



チャイロキツネザルはマダガスカルの固有種。猫よりも小さいこの動物が、大型の果実を食べ、排糞により種子を運んでくれる最大かつ唯一の散布者なのだ。サルと植物の季節を通じた関わり合いは、どのようにマダガスカルの森を育てているのだろうか。

【Research2より】

撮影：佐藤宏樹(京都大学)

今号テーマ

あなたがいて「わたし」がいる

多様な生きものが暮らす地球では、何とも関わらず生きるものはいません。今号では"あなたがいて「わたし」がいる"から考えます。光合成をやめ森の奥深くでひっそり暮らす花々に仕える生きもの、身近な樹木アカメガシワが抱える用心棒、マダガスカル島の木の実が選ぶ無二のお相手、大切なのは「あなた」です。牧場で草を喰む草食動物には、お腹の中にも牧場がありました。きのこが担うモグラの棲家の「後始末」、きのこがご縁の相良直彦先生と永田館長が語ります。30周年を機にスタートしたアカデミア、分子が支える生命のドラマを探る研究者の現場の声が生命誌の明日を示します。

もくじ

LECTURE & TALK

私のきのこ学

相良直彦 京都大学名誉教授・大分県在住

永田和宏 JT生命誌研究館館長

RESEARCH & PERSPECTIVE

あなたがいて「わたし」がいる

RESEARCH

アカメガシワの柔軟な防御戦略

アリを利用する植物の護身術

山尾 僚 京都大学生態学研究センター

チャイロキツネザル

森を育む種子散布の多様性

佐藤宏樹 京都大学大学院アジア・アフリカ地域研究研究科

ACADEMIA

生きものの多様性の 源泉を探る

〈分子構造の進化から見る世界〉

PAPER CRAFT

超遺伝子 表現多型を生むゲノム

ノドジロシトド

JT生命誌研究館

BRH NEWS

個性あふれるさまざまな食草園が
生まれています



LECTURE & TALK

私のきのこ学

「後始末」を軸としてみる森の姿

相良直彦

京都大学名誉教授
大分県在住



永田和宏

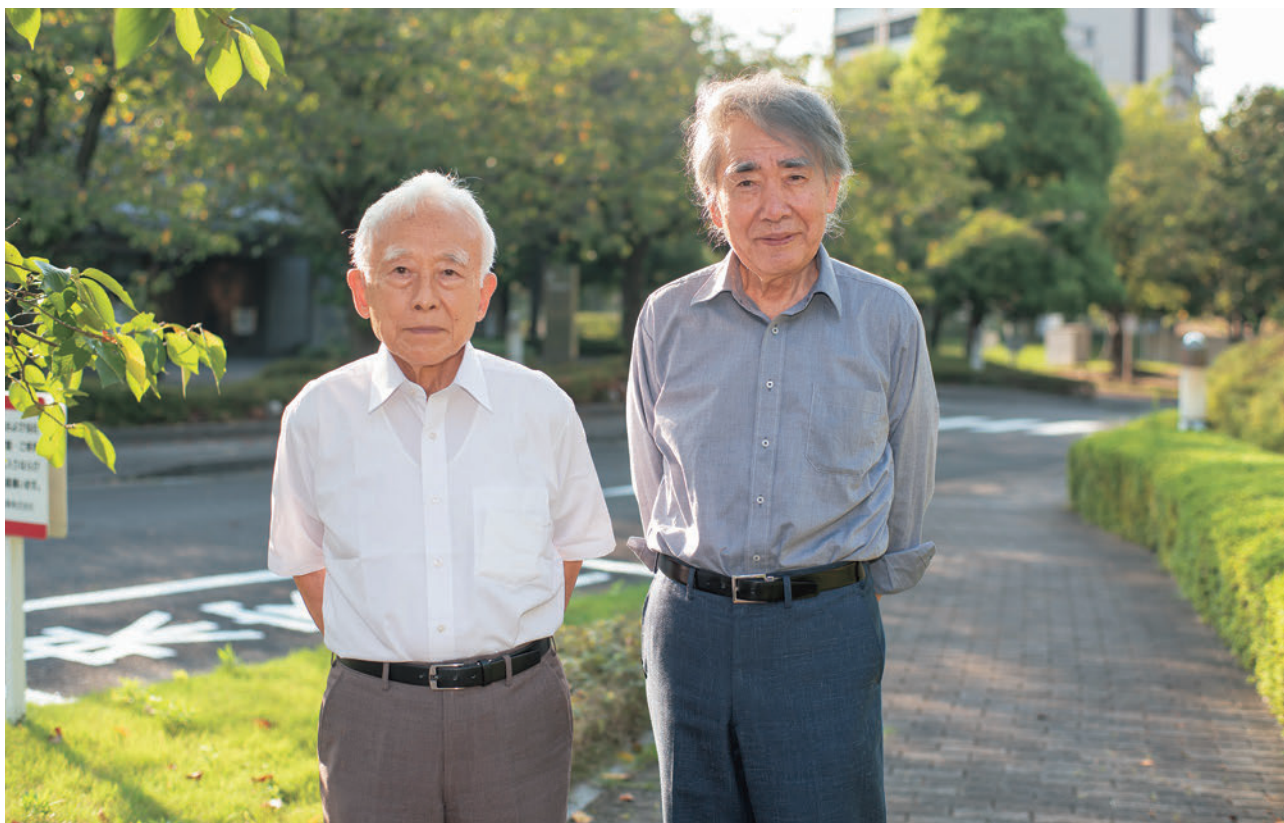
JT生命誌研究館館長



永田和宏館長は、実は、学生時代からの「きのこ好き」。

きのこがご縁で旧知の仲である菌類学の相良直彦・京都大学名誉教授をお招きしての講演と対談です。

森の生態系を支えている生きもの同士の意外なつながりを「きのこ学」に学びます。



ごあいさつ

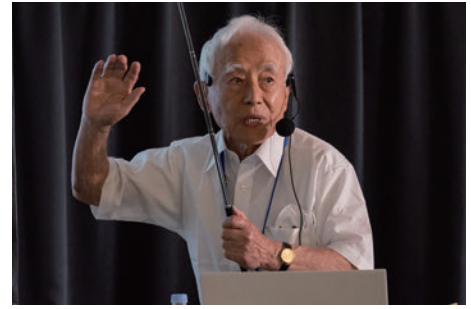
永田和宏

今日は、相良直彦先生の「私のきのこ学」というお話です。京大時代からのご縁で、今でも覚えているのは相良先生のツキヨタケ鑑賞会。京都大学の芦生研究林で夜光るきのこがいっぱい生えると。実は、芦生はマムシで有名な山で、月が出る前の暗闇の中、その山道をつきヨタケ目指して歩いてく。大変、怖い思いをしながら出会ったツキヨタケは、暗闇で木に張り付いて幻想的にぼうっと光って、昔の人はこれを雪女郎と見間違えただろうと思ったことでした。そんなお話も挟みながら、1976年『Nature』に載ったお仕事を含め、相良先生の「もぐらのせっちゃんたけ」発見に至るお話をお聞かせいただきたいと思います。

講演

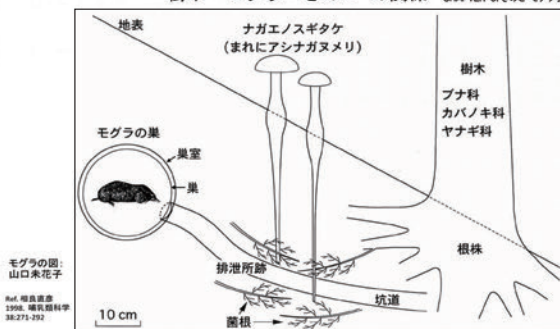
相良直彦

京都大学名誉教授



CHAPTER

樹木・モグラ・きのこの関係 CHAPTER 6.きのこ-モグラ学参照。



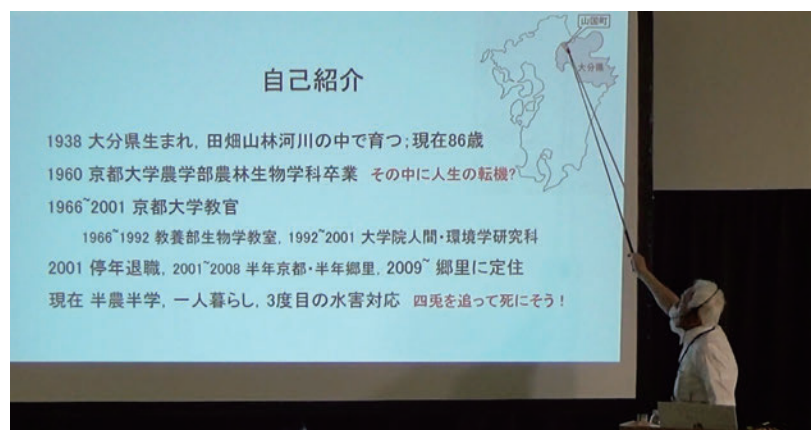
1. はじめに
2. きのこについて—私の理解
3. 私のきのこ研究のはじまり—アンモニアとの出会い
4. 動物の排泄物や死体のゆくえ
5. 2種のきのこの混同—モグラとの出会い
6. きのこ-モグラ学
7. ナガエノスギタケを追ってヨーロッパへ
8. 結び

1. はじめに

九州の田舎から出て参りました。自己紹介として、2つお話しします。

京都大学農学部私たちの学年は確か150名で入学して、3年生で各専門学科に所属する時、私の志望学科は定員28名に対して30人の志望者があり、試験で落とされた2人のうちの1人が私です。挫折感はほとんどありませんでした。そこでもし第1志望に行っていたら、人生は違ったものになって、きのこの研究はしなかったと思います。

現在は、まず、半農半学。この「農」は現代的な意味の農「業」でなく、昔風の、何でもやる百姓です。「学」の方は、もう現場の仕事はしておりません。そして昨年、2012年以来3度目の大洪水があり、甚大な土地被害を受けました。「二兎を追うものは一兎をも得ず」と申しますが、半農半学で二兎を追い、洪水対応ほか、三兎、四兎を追って死にそうです。



2. きのこについて—私の理解

菌類学を mycology マイコロジーと言いますが、今日の演題の「私のきのこ学」をちょっと気取って言うと、“My mycology”です。副題の、森における「後始末」と言えば、落葉落枝や枯木の後始末が大きな軸になりますが、私は、動物の排泄物や死体の行く末を取り上げます。ただし、初めから排泄物や死体を問題視していたわけではありません。

まず、きのこについて私が理解しているところを、ナガエノスギタケを例にお話しします。スライドをご覧ください(スライド1)。いわゆる「きのこ」です。これは「子実体」と言い、傘の裏側のひだで胞子をつくって飛散させるための構造物です。きのこの生活環で一時的に観察されますが、この姿できのこの生活が完結しているわけではありません。

スライド1

きのこ について、 私の理解

ナガエノスギタケ
を例として

子実体: 胞子
をつくり、飛散
させるための
構造物; 生活
の本体ではな
い、「2個体」で
はなく、「2個」

子実体から放出される胞子



写真 埴沙萌

このきのこは、滋賀県朽木の現場から飯島正広氏(写真家・故人)によって群馬県へ持ち帰られ、埴氏(故人)へ届けられた。

次に生活者としてのきのこを見ていきます(スライド2)。左の写真の地下部は「根」ではありません。「地中柄」と言います。地上部分と地中柄と全部あわせて一つのきのこ(子実体)です。子実体の一部分を切り取って試験管内の寒天培地で培養すると、まず生活の本体としての栄養菌糸が増殖します(写真中央)。菌類は我々と同じく光合成をしません。何かを食べなくてはなりません。我々は口から食べますが、菌類は細い菌糸の表面から養分を吸収して増殖します。ここでは、寒天に溶かしてある養分を吸収して増殖しています。栄養菌糸にエネルギーを蓄えて、温度などの条件が整うと子実体を形成します。

スライド2

生活者としてのきのこ

例: ナガエノスギタケ

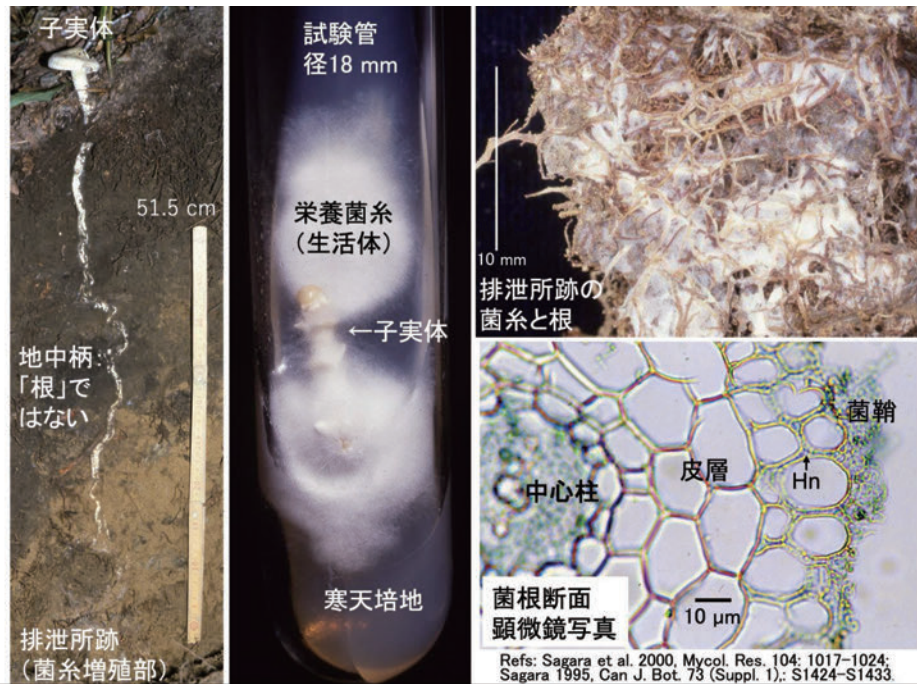
菌類も変態する
「質量保存の法則」

長い柄は必須の形態ではない

菌根共生

子実体は負の重力屈性によって地表へ出る; 子実体は真下から光が来れば真下へ伸びる (Kaneko & Sagara 2002, Mycoscience 43: 7-13).

菌類はリアリスト;
インテリジェンスあり?



Refs: Sagara et al. 2000, Mycol. Res. 104: 1017-1024; Sagara 1995, Can J. Bot. 73 (Suppl. 1): S1424-S1433.

昆虫は成虫になる時、幼虫の姿からは想像できないような姿に変態します。きのこもそのように見たりいい。私は、栄養菌糸から子実体への変化を、「変態」と理解しています。栄養菌糸の外見はどれも似たり寄ったりで種類は判別できませんが、子実体は千差万別です。ついで見たいのは、試験管内にできた子実体には長い柄がありません。ナガエノスギタケの長い柄は、子実体の形態として必須ではないことがわかります。

栄養菌糸から子実体に「変態」する時、大きな子実体ができるには元が大きくなければならないし、きのこ(子実体)が沢山生えてきたら地中にそれだけの元があったからです。この原理を、私は我流に「質量保存の法則」と呼んでいます。きのこは霞を食って生えることはできません。

試験管内では、菌糸は寒天に溶けている養分を吸収して生活していますが、森の中ではモグラの排泄物由来の物質と植物の根から供給される養分で暮らしています。その時、菌糸は木の根と共生します。右上の写真で、白く見えるのは菌糸、黄色味を帯びて網目状に見えるものが根です。その根を薄く輪切りにしてみます(写真右下)。根の外側で緑色に染まって見えるのが菌糸です。菌糸は根を鞘状に覆うので菌鞘と呼びます。その菌糸は細胞間隙に潜って根の中まで入り込むので(写真のHn)、根の細胞は菌糸に抱かれ包まれたような格好になります。その濃密な接触の中で、植物からは、地上部の光合成でできた糖類が菌類に供給され、菌類からは、土壤中に存在する窒素・リン酸・カリウムなどが根に送られます。互いに都合のよい関係にあると理解され、「菌根共生」と呼ばれています。

ところで、子実体が、地中深くから地表までどうやって迷わずに上がってくるのか(写真左)不思議ですね。これは負の重力屈性によります。では、仮に、菌糸が増殖しているところ(排泄所跡)の直下に空間があり、光が真下からやってきたらどうなるのでしょうか? 子実体は、真っ逆さま、地球内部に向かって生えます。正の光屈性です。これらは、実験室で明らかにされました。このように、菌類はリアリストです。知能(インテリジェンス)があるとも言われています。「リアリストでインテリジェンスもある」という言い方をしてみると、菌類がいつぱしの存在に見えてくるのではないのでしょうか。

3. 私のきのこ研究のはじまりーアンモニアとの出会い

農学部4年生の時、アカマツ林にどんなきのこが生えるかという調査をしたのが研究の始まりです。ある時、師匠の濱田稔先生が雑談の中で、「ありのままの自然を調査するのもいいが、山を一つの生物体と考えて、いろいろ刺激を与えてみてはどうか?」と言われました。「面白い」とは思いましたが、具体的にどうすればよいか、すぐにはわかりません。そして、きのこが少しわかるようになってから、山の反応を、きのこを通して観ようと考えました。そして、刺激の方法として土壌への化学薬品施与を考えました。この時、きのこが反応する予感があったわけではなく、文献も見ませんでした。化学薬品としては、肥料を使いましたが、肥やすという考えでなく、安く大量に使えるからでした。そもそもきのこは植物ではありませんから、「窒素・リン酸・カリウム」という肥料の常識は通用しません。ただ、マツタケ増産へのヒントはないか? という考えがほんのすこしありました。

数種類の肥料をアカマツ林の、幅50センチ、長さ10メートルの帯状区画に撒きました。すると尿素施与区に見たこともないきのこが一面に生えたのです(スライド3)。のちに和名を「イバリシメジ」としました。

スライド3



最初の成果

尿素を撒いて約3週間後、
見たこともない、小さい
きのこが!
のちに和名「イバリシメジ」

地表黒化

尿素区では、2~4年にわたって、他では見られないきのこが生えた。

Ref. Sagara & Hamada 1965, Trans. Mycol. Soc. Japan 6: 72-75.

尿素を撒いた場所には、いろいろなきのこが長期にわたって生えました。一部を写真でお見せします(スライド4)。AとBはチャワンタケ類、CとDはヒトヨタケ類です。それぞれ種類が沢山ありますが、その中で決まった種類が生えます。新種もありましたし、新種でなくても、尿素を撒いたら生えるというような性質は知られていませんでした。

スライド4

初期に発生するきのこ類, 新種も

A: イバリスイライカビ *Ascobolus denudatus*

B: ウネミノイバリチャワンタケ *Peziza urinophila* 新種

C: コツブザラエノヒトヨタケ *Coprinopsis neolagopus* 新種

D: ザラミノヒトヨタケモドキ *Coprinopsis echinosporus*

これらのきのこは菌根共生はしない

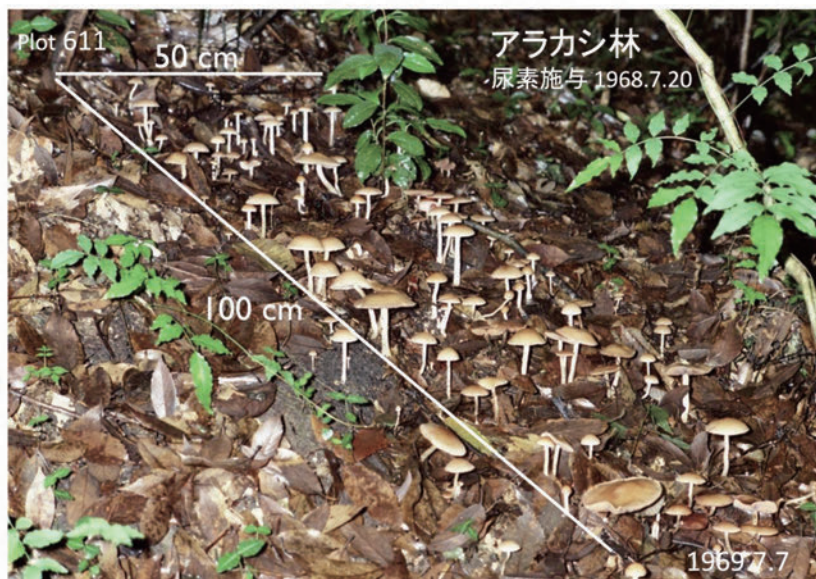
Ref. Sagara 1975, Contr. Biol. Lab. Kyoto Univ. 24:205-276.

初期に生えるきのこは菌根共生をしません。時間が経つと、食欲の対象になりそうな大きなきのこが生えます(スライド5,6)。アカヒダワカフサタケ、ナガエノスギタケダマシなど、どちらも菌根共生をします。

スライド5

時間経過とともに、生えるきのこの種類が移り変わる: 「遷移」.

遷移後期の1種, 菌根共生をおこなう.



きのこは食欲の対象になる大きさ (ただし有毒)

Ref. Sagara 1975, Contr. Biol. Lab. Kyoto Univ. 24:205-276.

尿素施与の約1年後, アカヒダワカフサタケ発生, 大分県中津市山国町

スライド6

尿素施与区
遷移後期
(つづき)

このきのこも
菌根共生をお
こなう。

Ref. Sagara et al.
2008 in Tibbett &
Carter (eds), Soil
Analysis in Forensic
Taphonomy, CRC
Press, Fl.



なぜ
「ダマシ」
か?
後出

ナガエノスギタケダマシ(当時は「ナガエノスギタケ」)

ところで、そもそも尿素とはどのような物質で、尿素を撒くときのこが生える真因は何でしょう(スライド7)? 尿素は、皆さんご承知の通り、我々の尿の中に排泄されます。肉や魚などとして食べた窒素分の最終形態です。工業的にはアンモニアと二酸化炭素から合成されます。土に撒くと水に溶け、微生物の尿素分解酵素の作用でアンモニアと二酸化炭素になります。このアンモニアが一番の大元であることがわかったので、尿素を撒いて生えるきのこをまとめて「アンモニア菌」「ammonia fungi」と呼ぶことにしました。世界に約50種類あります。150万種とも言われる菌類全体の中では、一握りにもならない一つのグループです。

スライド7

そもそも「尿素」とは? 「尿素を撒くときのこが生える」素因は?



証左 アンモニア水(NH₄OH).....有効(毒物, アルカリ性, 有機物分解促進)

「アンモニア性肥料」硫酸アンモニウム(NH₄)₂SO₄.....無効

硫酸アンモニウム(NH₄)₂SO₄ + 水酸化カリウムKOH.....有効

山林土壌という得体のしれない媒体を通して、化学通りにきのこが動く

「アンモニア菌」(ammonia fungi) と呼ぶことに—世界に約50種(150万種中)

アンモニアが基本であることを示す実験として、アンモニア水を撒くと尿素と同じ効果があります。アンモニアは「土壌殺菌剤」とされたこともある毒物ですから、尿素を撒くということは「殺す」という側面を含んでいます。また、アンモニアはアルカリとして、落葉落枝など有機物の分解を促進します。硫酸アンモニウム(硫安)は「アンモニア性肥料」と言われますが、これは効果がありません。しかし、これを撒いた上から強アルカリを加えると、強酸との結びつきが切れ、アンモニアが有効になります。山林土壌という得体の知れない媒体を通して、化学通りにきのこが動く場面にもいくつか出会って感動しました。

4. 動物の排泄物や死体のゆくえ

はじめに戻りますが、イバリシメジの生えた実験(スライド8)で肝心なのは、尿素という物質を撒いただけで、孢子など、菌の種(たね)になるものを撒いてはいないことです。きのこはそこに潜在していたわけです。写真の、白線の手前の非処理地にもイバリシメジは居るということです。



では、自然界ではイバリシメジはどんなところに生えるのでしょうか？ まずは、尿が落ちたところを調べました。例えば、ヒトの放尿跡にイバリシメジ、イバリスライカビが生えました(スライド9)。尿素を撒いた時と同様に、落ち葉が黒化しています。

スライド9

イバリシメジ

自然界では
どこに生え
るか？

Ref. Sagara 1975,
Contri. Biol.Lab.
Kyoto Univ. 24:
205-276, Pl. 4.



森林内で排泄するとき、人には見られていなくても、きのこには見られている！
悪いことではない；水洗便所に流すよりよっぽどマシ!!

ヒト放尿跡のイバリシメジとイバリスライカビ 落ち葉の黒化

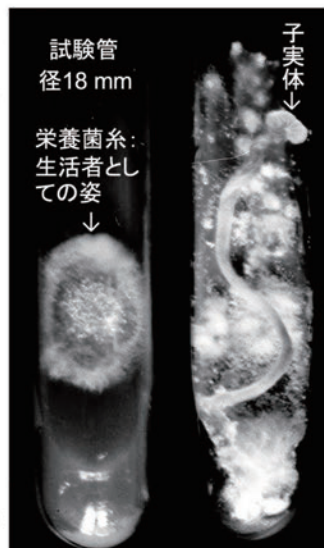
タンパク質も分解するとアンモニアが生じるのであれば、動物死体でもきのこが生えるだろうと実験しました。安い冷凍の魚を山へ持って行き、腐らせてみるとイバリシメジなどが生えました。豆腐もタンパク質ですから腐れば生えるはずで、それも確かめました。

イバリシメジには特技があります(スライド10)。胞子を寒天培地に撒くと栄養菌糸が伸び、時間が経つと、子実体ができることもあります(写真左)。普通、きのこは傘の下面のひだに胞子をつくりますが、このきのこは栄養菌糸から直に胞子をつくらせてしまう(写真右)。細い栄養菌糸から太い菌糸が少し伸びてその先に胞子をつくります。この特技は、例えば虫の糞や死体などの微量なアンモニア源からでも胞子までつくれるという性質ではないかと想像しております。

スライド10

イバリシメジ
の特技:子実
体をつくら
ずに栄養菌
糸から直に
有性胞子をつ
くる。

Ref. Yamanaka &
Sagara 1990, Mycol.
Res. 94:847-850



培養所見



「栄養菌糸生担子基」および担子胞子

微小資源への
適応？

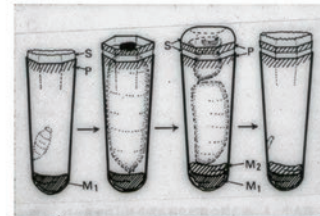
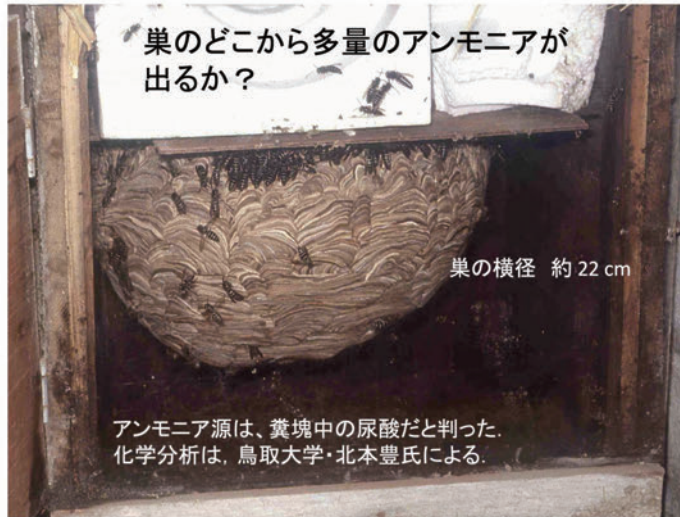
隔壁と
かすがい連結

“mycelial basidia”
として外国の本
にも引用された。

顕微鏡写真 山中高史

時間経過に伴って遷移後期に生えてくるきのこの例では、アカヒダワカフサタケが猫の墓に生え（「ごあいさつ」で永田館長が言及した『Nature』はこの知見）、ナガエノスギタケダマシ（当時はナガエノスギタケ）がキャンプ場の野外便所跡に生えました。また、アシナガヌメリがクロズメバチの巣跡に生えた例もありました。これは、巣の中に溜まったハチ幼虫の糞塊に含まれる尿酸がアンモニア源だとわかりました（スライド11）。

スライド11



育室で幼虫が繰り返し育てられ、蛹化した回数だけ糞塊がたまる。
出典：山根真一・山根正気，1975，
生物教材No.10:18-39，図6C



取り出した糞塊 地中に残る糞塊

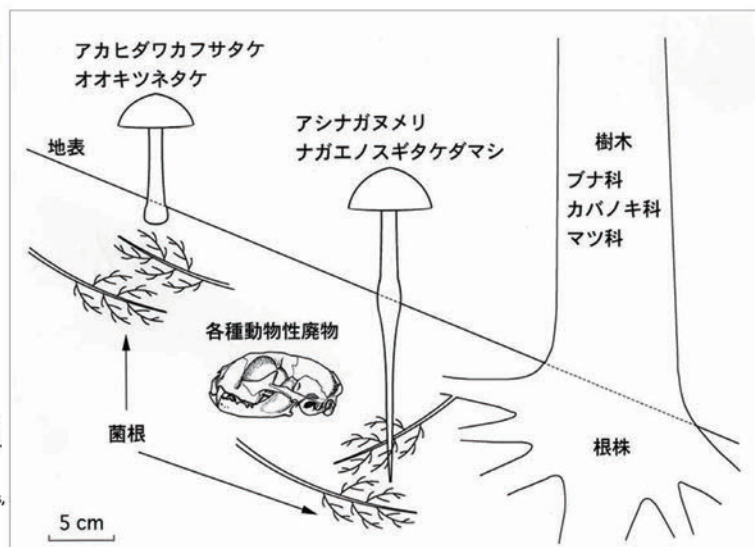
ヒト管理下のシダクロズメバチ営巣 岐阜県中津川市 西尾亮平氏 1980.11.21

Ref. Sagara et al. 1985, Trans. Br. mycol. Soc. 84: 349-352

森の中での動物性廃物の成り行きを模式化して見ると（スライド12）、死体や排泄物が朽ち果てた跡に、きのこの菌糸と木の根が茂って菌根共生し、その菌根の塊がエネルギー源になって地表に子実体として現れます。ここに暮らす動物は、樹木ときのこに生活の後始末をしてもらっているとみることができます。私はそれを「生息地浄化共生」と呼んでいます。

スライド12

動物性廃物の
のゆくえ



ここで暮らす動物は、その生息環境の浄化をきのこや植物に負っている：生息地浄化共生(1)

Ref. Sagara et al. 2008
in M. Tibbett and D. O. Carter (Eds.), Soil Analysis in Forensic Taphonomy, CRC Press, Taylor and Francis Group, Fl.

模式図 樹木・動物性廃物・きのこの関係

動物の糞に生える糞生菌は昔からよく知られています。とくに草食動物の糞は分解に時間が掛かるために、長い間、地表に形が残ります。そこに生えるきのこは注目されやすく、たくさん研究されました。アンモニア菌はそれらとは違います。肉食や雑食動物の糞や動物死体はすぐに腐って消えてなくなりますし、尿は初めから形を留めません。アンモニア菌はその跡の土に生えるものです。

5. 2種のきのこの混同—モグラとの出会い

ナガエノスギタケダマシとナガエノスギタケ(スライド13)。今、この写真だけ見ると、どうして両者を混同していたのかと思われるでしょうが、歴史の事実として、混同され、同種だと考えられていました。

スライド13

ナガエノスギタケダマシとナガエノスギタケ 当時は同種とされていた



ナガエノスギタケダマシ
(大津市関津, 尿素施与区 Plot 1154)

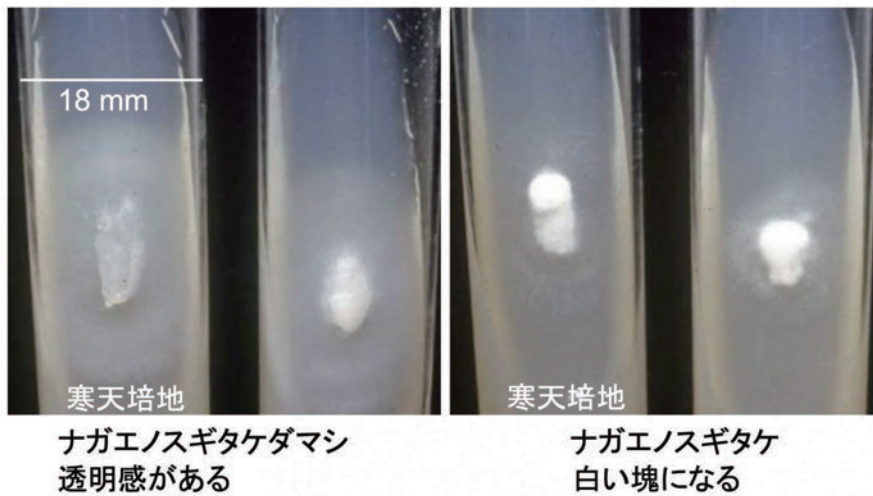
ナガエノスギタケ
(美山町芦生, ミズラモグラ営巣地)

Ref. Sagara et al. 2000, Mycol. Res. 104:1017-1024

京大近くの大文字山で、本物のナガエノスギタケに出会った時、ナガエノスギタケダマシだと思っていたから、地中にアンモニア源があるはずと考えて掘ったところ、巣に行き当たりました。きのこが生えた理由は動物の排泄物だとすぐに見当がつかしました。しかし、巣の主(ぬし)がわからない。動物学者を訪ね歩いたところ、ネズミだろうということでした。動物学者から、「モグラ」の線は全く出ませんでした。当時、「山にモグラがいる」という常識もなかったのです。ネズミの巣と誤同定をして発表してしまいました。その後に、モグラだったことがわかり、ほぼ2年後に訂正しましたが、この大失態のせいもあってモグラに深入りしました。

スライド14

二者の違いを感じた培養所見(1982年12月20日)



二つのきのこを別種ではないかと感じた初めは培養所見です(スライド14)。試験管内の寒天培地でそれぞれの菌糸を培養したところ、ナガエノスギタケダマシは寒天表面にくっついて伸びるから透明感がある。一方ナガエノスギタケは気柱に立ち上がるので白い塊に見える。胞子の形態にも微妙な違いがあることがわかりましたし、さらに子実体の香りもうんと違いました。香り成分を調べると、前者はほとんど持たないのに対して、後者では3物質が顕著に検出されました(スライド15)。うち、上の二つを混ぜ合わせるとナガエノスギタケ特有の香りになることもわかりました。

スライド15

子実体の香り成分 エチルエーテル抽出物のガスクロマトグラフィー

• ナガエノスギタケダマシ

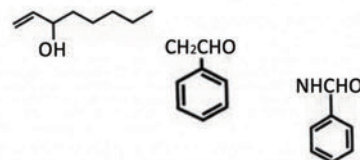
ほとんど無し

• ナガエノスギタケ

1-オクテン-3-オール(マツタケオール)

フェニルアセトアルデヒド

N-フォルミルアニリン



(徳島文理大, 橋本敏弘氏らによる分析 Ref. Sagara et al. 2000, Mycol. Res. 104: 1017-1024)

さらに実験的に、モグラの便所跡に似せて尿素などを地中深く埋めてナガエノスギタケが生えるかと調べてみましたが、そこに生えたのはアンモニア菌のナガエノスギタケダマシとアシナガヌメリのみ。ナガエノスギタケはモグラの便所跡でしか確認できませんでした。このように、騙されていた

おかげで私はモグラに出会うこともできたわけです。なお、ナガエノスギタケは室内培養によって子実体を生やすことはできますが、山で人為的に生やすことは今でもできておりません。

そこで、ナガエノスギタケダマシをナガエノスギタケとは異なる新種として発表しました(Sagara et al. 2000, Mycol. Res. 104: 1017-1024)。私が筆頭著者として新種発表を行った唯一の例です。2種の違いに気が付いてから約18年後の2000年のことで、この時、ようやく「ナガエノスギタケダマシ」という和名も定まりました。なお、その後の研究で、ナガエノスギタケとナガエノスギタケダマシは分子系統学的には近縁ではないことがわかっています。

この論文には新種発表とは別の冒険がありました。それは、英語圏外の私がつくった ammonia fungi(アンモニア菌)と chemoecological group(化学生態学群)という言葉、論文のタイトルに使って、定着・普及させようという企みです。審査において何か言われるかと緊張しましたが、何も言われませんでした。「学問は遊びだ!」というのが私の基本姿勢ですが、闘わなければならないこともあるように思います。

6. きのこと - モグラ学

モグラの巣を見つけるには、きのこを手がかりにするほかありません。皆さんご存じの「モグラ塚」は、地下鉄工事の残土を積んだようなもので、あの下に巣があるわけではありません。捕らえたモグラに発信器を取り付けて巣を見つける方法がありますが、科学機器を使わず巣を見つけるにはナガエノスギタケとアシナガヌメリを手がかりにするしかありません。きのこ屋にモグラ学への出番が生じた次第です。



モグラの雪隠から生えるきのこは、ナガエノスギタケとアシナガヌメリの2種です(スライド16)。アシナガヌメリはアンモニア菌の1種で、いろんなアンモニア源から生えます。ナガエノスギタケはモグラの雪隠専属です。一方のモグラにはこういう種類がいて(スライド17)、どのモグラの便所跡からもナガエノスギタケ、アシナガヌメリは生えます。

スライド17

本州中央部
のモグラ類

いずれの種も、
もぐらのせつ
ちんたけを発
生させる

Ref. Sagara et al. 1989,
Contr. Biol. Lab. Kyoto
Univ. 27: 261-272



左から:ヒミズ, ミズラモグラ, アズマモグラ, コウベモグラ
ヒミズとミズラモグラの巣は、私より前には知られていなかった。

さて発掘です。これまでに、外国を含めて86箇所、計134回の発掘を行いました。同じ場所でもくり返し掘ることもあるので、回数は場所の数より増えます。

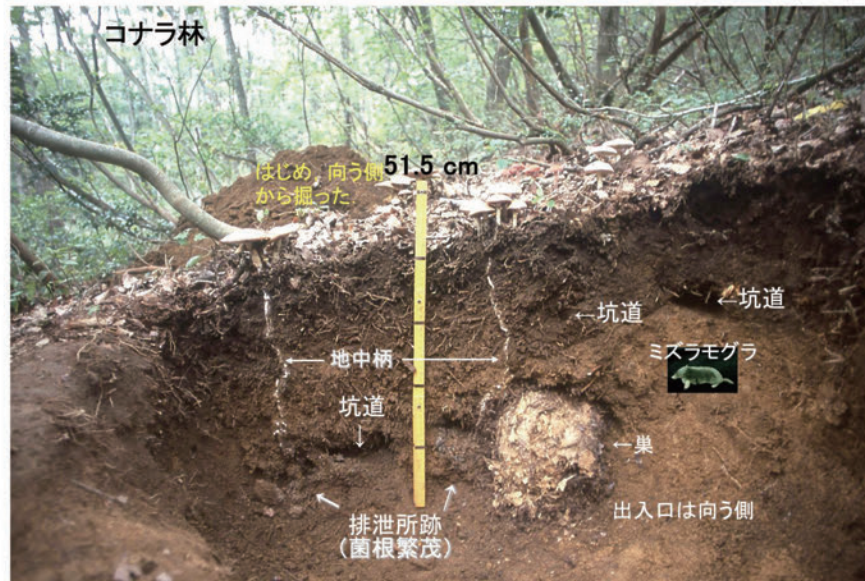
この1枚の写真にきのこが生えた由来を示します(スライド18)。画面中央のやや上部の地表にきのこがあります。その下に地中柄があり、便所跡、巣、坑道が示されています。発掘では、このような写真が撮れるように掘ります。この時も、初め、向こう側から掘ったものの、それではよい写真が撮れないとわかってこちら側から掘り直しました。

スライド18

さて発掘.

まずは、一つの
写真にきのこが生
えた由来を示す。
営巣者の同定は
必須だが、これが
難儀。

外国を含めて86カ
所で、計134回の
発掘をおこなった
(1976~2014)。



滋賀県朽木にて、きのこは幼菌の会・正井俊郎氏発見。第1回発掘調査2001年10月9日。

なお「モグラが便所をつくる」、もう少し正確に言えば「ほぼ場所を定めて排泄する」という認識は私より前にはありませんでした。排泄物が「臭い付け」に使われるという理解はありました。

排泄物が新しいうちは蛆虫(うじむし)やバクテリア等が増殖し、時間が経つと、きのこの菌糸と木の根が茂って菌根形成をしながら排泄物の後始末の仕上げをします。そこに溜まったエネルギーで地表にきのこの子実体が現れる。ですから、地表で見るときのこはモグラの排泄物の「成れの果て」とみることができます。

ここの諸関係を整理すると次のようになります(冒頭の図「樹木・モグラ・きのこの関係」を参照)。

- 1) 樹木は森を形成してモグラときのこに生息地を提供し、菌根共生によってきのこに養分のやりとりをする。
- 2) モグラはきのこに樹木に栄養分となる排泄物を与え、土壌の耕耘や通気をもたらす。
- 3) きんこは樹木と菌根共生を行いながら、モグラの排泄物を清掃する。

森に棲むモグラは、このように、樹木やきのこの共存から恩恵を受けていると考えられるので、この関係も「生息地浄化共生」と捉えます。特に長期の定住において、このことは重要ではないかと思えます。

巣は、モグラの日々の暮らしの中心であるにもかかわらず、これまで真面目に観察されませんでした。ヨーロッパの本を見ると、巣は、出入口が二つあり、落ち葉の雑然とした塊に過ぎず、モグラはその中に体を放り込んで休息するという程度の理解しかありませんでした。そうではなく、巣の入り口は一つであり、巣には決まった構造があることを、私は明らかにしました(スライド19)。巣は、

広葉樹の落ち葉を地中空間の壁に押し当てて、しっかりとつくられています。スライドの写真(上)は、病院の、ヒトをのせるベッドにモグラの巣をのせて撮影してもらったものです。ここで見られるような巣のつくりに、モグラにおける「文化」を見る思いです。

スライド19

巣の構造

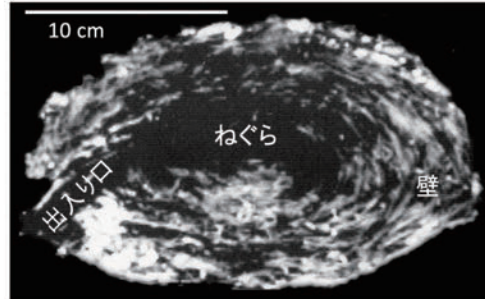
巣は、日々の暮らしの中心でありながら、まじめに観察されていなかった。

出入口:一つ。

壁:広葉樹落葉を積み重ねたもの。

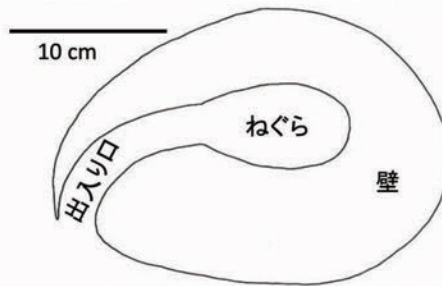
ミズラモグラの巣の1例:
ブナの落葉に換算して
577枚。

Ref. 相良直彦 1998, 哺乳類
科学38:271-292



X線CT(断層写真)

この撮影は、京都大学人間・環境学研究科助教授(当時), 医師・津田謹輔氏のはからいにより、京都市内の毛利病院において行われた。



巣の断面輪郭

巣の造りは、モグラ
における「文化」だ!

私のモグラ学でもっとも大事なところは、モグラは長期に定住する傾向があることを明らかにしたことだと思っています。モグラの寿命は数年とされるなか、20年以上にわたって同じ場所で営巣がおこなわれた例があります。その話をここで詳しくする時間はありませんが、住者が代わってもなお同じ場所に住み続けた証拠をひとつお話しします。

京大の芦生研究林で、1985年にナガエノスギタケが生え、その翌年に発掘し、巣とその住者とともに採取して埋め戻しました。住者はコウベモグラでした。そこから9年後の1994年、同じ場所にまたナガエノスギタケが生えました。巣も住者もいったん取り去っていますから、別のモグラが営巣したに違いありません。掘ってみると、巣があり、今度はアズマモグラが住んでいました。モグラの種類が変わってもなお、同じ場所で営巣することがあるとわかりました。異種のモグラが近接して住んでいる証拠でもあります。ところで、「長期定住」と言う時、私が見た期間が20年あまりであって、その前、いつから営巣がはじまったのかはわかりません。

ミズラモグラ幼獣の初観察と飼育条件下への持ち込み

繁殖に関するはじめての情報

京大芦生研究林

長期定住の1例：
1990年以來の継続
観察により、巢の
位置が判っていて、
2007年の第4回発
掘において幼獣に
遭遇した。

Ref. 相良直彦 2009, 哺
乳類科学49: 45-52



*京都府
捕獲許可第8号



哺乳類学者・故
土屋公幸氏に
より飼育・観察
が継続され、
最後は本剥製
標本として私
に返却された。

京大博物館
に展示

長期定住の観察の中で、予め場所がわかっていたミズラモグラの巣を掘ったところ(スライド20)、幼獣がいました(写真左上)。その時は、写真を撮っただけで埋め戻し、後日、再び掘ったところ幼獣はこのように成長していました(写真右上)。このうち一匹を家(京都)に連れ帰り、餌付け・飼育を試みました(写真左下)。まだ乳離れしておらず歯も未発達で、ミミズを丸ごと与えても食べられない。ミミズをはさみで切って食べさせたりして飼育を確立して(写真右下)、その後は、東京の本職の哺乳類学者が飼育・観察を継続しました。そして最後は、きれいな本剥製標本として返却されました。その標本は、今は京大博物館に展示されているそうです。

モグラは「農耕地周辺の動物」と思われがちですが、農耕地が開かれたのは地球史上では近年のことであり、見てきたように森にも普通に住んでいて樹木やきのこと深い関係を結んでいますし、広葉樹の落葉を材料としてつくられる巣も完成度が高いと感じられるので、「モグラは、本来、森の生物だ」と私は主張しています。

7. ナガエノスギタケを追ってヨーロッパへ

ナガエノスギタケはモグラの便所跡から生えることが日本でわかりましたが、イギリスでも同じ例を私が明らかにしました。一方、モグラがいないのにナガエノスギタケが記録された地域がありました：アイルランド、ノルウェー、それから日本の北海道です。それらの地域で、ナガエノスギタケが生えた原因が問題になります。調査の結果、北海道ではトガリネズミの例が見つかりましたが、トガリネズミは広い意味のモグラ類ですから、これはあまり不思議ではありません。一方、スイスではモグラとネズミそれぞれの例が、またノルウェーではアナグマの例が見つかりました。ネズミの例は意外感があります。食性が大きく違うからです。なお、アイルランドは調査できておりません。

ところで、こうした調査が可能だったのは、きのこ発生地点をピンポイントで標識し、連絡し、現地案内してくれる協力者が存在したからです。日本国内でも同様に、私が調査した73箇所のうち、自分で見つけたのはわずかに12箇所、他はきのこ仲間からの通報によるものでした。ここではスイスからの通報に基づくモグラとネズミの例を紹介します。

スライド21

スイス:ヨーロッパモグラの例(1997.11.25)



モグラの例です(スライド21)。きのこ発生地点は、概観では「針葉樹林」の中でした。「針葉樹のマツ科もナガエノスギタケと菌根共生を行うのだろうか?」という問いを抱えていましたが、現地に着いてみるとナガエノスギタケが生えた付近には、落ち葉を散り敷くブナの木が3本ありました。トウヒの根元を掘って巣を掘り出し、中に落ちている毛を調べたところ住者はモグラであることがわかりました。巣材はブナの落葉でした。このように概観は針葉樹林でも、ナガエノスギタケが生えた場所には必ずブナが存在したという例を4箇所経験し、ブナ・モグラ・ナガエノスギタケという三者の結びつきの鮮明さに感動しました。なお、「マツ科はナガエノスギタケの菌根宿主になりうるか?」という問題が解消したわけではありません。発掘作業は、私の“Site-seeing”であり、大地の秘密と向き合う至福の時です。この時の気温は1°Cでした。

スライド22

スイス:ヨーロッパアカネズミ類 *Apodemus* sp. の例(1997.11.22)



もう一つは、ブナ林でのネズミ(ヨーロッパアカネズミ類)の例です(スライド22)。私に連絡をくれた、赤い上着の人は菌学者で、彼女の知り合いのきのこ愛好家(写真左)がしょっちゅう山を歩いていて、ナガエノスギタケを見つけて標識しておいてくれたわけです。標識の下を掘ってみると、巣は割合浅いところにあり、そこから坑道でつながった深い所に、ブナの実の食べかすなどが大量に溜まった貯食痕がありました。モグラの場合、こういうものはありません。住者は、やはり毛を調べることでアカネズミ類だとわかりました(写真右)。調査の後、愛好家のファールニさんは、「たった1種類のきのこのために、遠路はるばる日本から、本当にやってくるとは思わなかった」と言いました。

8. 結び

結び、1. きのこは過去を語るということは、十分ご理解いただけだと思います。「きのこには証拠力がある」とも言えるかもしれません。そこから鑑識菌学・法菌学というような分野への広がりも予感されます。分野の確立には至りませんが、「証拠力」に力点を置いて、尿素施与に始まる研究をまとめました: N. Sagara, T. Yamanaka and M. Tibbett. 2008. Soil Fungi Associated with Graves and Latrines: Toward a Forensic Mycology. In: M. Tibbett and D. O. Carter (Eds.), Soil Analysis in Forensic Taphonomy, CRC Press, Boca Raton, FL. この一篇は、米国で出版された本の中の1章で、その本を企画したイギリス人研究者の誘いで書きました。私(たち)が書いたものの中では一番よく読まれているようです。

結び、2. 献名いただいたきのこの学名が3つあります。*Panaeolina sagarae* Hongo (コブミノシバフタケ)、*Sagaranella* V. Hofstetter, Cléménçon, Moncalvo & Redhead (イバリシメジ属)、および *Hebeloma sagarae* T. Kasuya, Mikami, Beker & U. Eberh. (ナガエノスギタケ)です。ナガエノスギタケは近年になって、ヨーロッパのものとは違うという見解に至り、日本のものは新種で、新しい

種小名が必要となったわけです。

献名は、虫にも一例ありました。*Lucasioides sagarai* Nunomura (モグラアナワラジムシ)。これは、富山県で私も関わって掘ったモグラの巣の試料から得られたものです。きのこからモグラの巣を見つける道が開けたことからこんなものまで生まれたのは、とてもhappyです。

スライド23

むすび(3) 私における「生息地浄化共生」(の一端)



結び、3. これは何をやっているところかおわかりでしょうか?(スライド23)。この桶(おけ)は肥担桶(こえたご)と言いまして、下肥(しもごえ)、つまり我々のし尿を汲んで畑に入れます。昔はどこでもやっていたことです。この作業は、「一滴も溢さず、一沫も浴びないぞ!」という集中力が要る作業でして、これをやり終えると、人としての勤めを果たしたような思いで気分爽快になります。

— 謝辞 —

きのこ発生情報をくださった方々をはじめ、研究活動の中でお世話になった方々、研究資金を援助くださった富士電機(株)様に厚くお礼申し上げます。その方々のおかげで成り立った「私のきのこ学」でありました。田舎ごもりの私にこの講演の機会をくださった永田館長、および準備を助けてくださったスタッフの方々にお礼申し上げます。そして会場の皆さん、それからインターネットで聴講くださった皆さん、ありがとうございました。最後に、骨肉となった郷里とその人々、および犠牲になりながら助けてくれた家族への謝意も表しておきたいと思ひます。



相良直彦(さがら・なおひこ)

1938年、大分県生まれ。1960年、京都大学農学部卒業。1962年、京都大学大学院農学研究科修士課程修了。1966年、京都大学大学院農学研究科博士課程退学、京都大学教養部助手、助教授、教授、同大学大学院人間・環境学研究科教授を経て、2001年、定年退職。農学博士、京都大学名誉教授。現在、郷里大分県の間山地で独居・百姓。主著に『きのこ動物』(築地書館)。

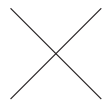
LECTURE & TALK

私のきのこ学

対談

相良直彦

京都大学名誉教授



永田和宏

JT生命誌研究館館長



CHAPTER

1. きのこからモグラへ

3. 「生息地浄化共生」

2. イバリとセツチン

4. 美味しくて等身大の生きもの



1. きのこからモグラへ

永田

相良先生のご著書『きのこ動物』はとても面白いですね。1章から3章までが「獣ときのこと」、「昆虫ときのこと」、「線虫ときのこと」。4章以降に、「排泄物ときのこと」、「死体ときのこと」、「廃巢ときのこと」、「生態系における動物ときのこと」。そして、最終章は「雑感」。雑感とありますが相良先生の哲学がここに入っていますね。今日はいろいろお聞きしたいのですが、そもそもきのこに取り付かれたきっかけは何ですか。

相良

京都大学の農学部で4年生になった時、たまたま私がついた先生がマツタケの研究をしていた関係でマツ林のきのこを研究することになりました。きのこは好きでも嫌いでもありませんでした。

永田 浜田稔助教授、京都にきのこ学を根付かせた方ですね。

相良 はい。私に「君は野人ではなく、野蛮人だ」とおっしゃった先生です(笑)。「鈍重」とも言われましたが、これは褒め言葉だったかもしれません。

永田 私は自宅が、京都の宝ヶ池の近くの岩倉で、相良先生ももともとと同じ町内、哲学者の鶴見俊輔さんもお住まいでした。その岩倉の実相院の裏山にマツタケの碑があって、これは浜田先生のお仕事を記念してお弟子さんたちが立てたものですね。

相良 ええ。浜田先生は、マツタケを生物として見た先生ですね。

永田 相良先生もそのお一人ですが、浜田先生の影響で、京都にきのこ学をやる人が多く育ちましたね。私もきのこ集めが好きでマツタケの碑にお参りにも行きました。ところで相良先生は、これまでに沢山のモグラの巣を発掘してこられましたね。

相良 発掘した回数は百三十何回でしたかね。

永田 巣を1つ掘るのにどれくらいの時間がかかるものですか？

相良 巣に到達するまで、ざっと半日です。調査を了えるには丸1日。3日かかったことや1週間かかったこともあります。巣そのものはふにゃふにゃの落ち葉の塊ですね。実は、モグラがどうやって巣をつくるのか？ どのようにして地中にあのような空間をつくるのかは、まだわかっていません。

永田 京大博物館にモグラの巣とその付近の地中構造の模型が展示されています。あれを見た時、形を崩さずに掘り出すのは、何日もかかる大変なお仕事だろうと思ったのです。

相良 慣れてからは、時間はそれほどかかりません。博物館では、モグラの巣と一緒にナガエノスギタケの模型も展示していますが、模型の鋳型になったのが、今日のスライドでお



見せした、地中柄の長いナガエノスギタケです。京大芦生研究林の山奥からそっと掘り採って、壊れないように添え木をして山から運び出し、その晩のうちに模型屋さんにお渡しした。それを鋳型に、博物館のあの模型はできています。

2. イバリとセツチン

永田

相良先生のお仕事は典型的なフィールドワークで、外に出ないとできない研究ですね。研究室に籠って、見えないものと格闘している我々にはうらやましく映ります。学名に相良先生の名前が入ったイバリシメジ(*Sagaranelia tylicolor*)。和名の名付けの親は相良先生ですね。イバリとは尿のことで、森の中で動物がおしっこしたところに生えるから、イバリシメジと名付けた。

相良

はい。イバリという言葉は机を並べていた学友が教えてくれました。もぐらのせっちんたけの「雪隠」という言葉は、自分の中からすんなり出てきました。子供のころ、私の郷里で村の人たちは「セツチン」と言っていたから。

永田

もぐらのせっちんたけは、相良先生のお仕事で有名になったきのこですね。ナガエノスギタケはモグラの雪隠からしか生えてこない、尿素を撒いても生えてこないということを明らかにした。加えて、ナガエノスギタケダマシはモグラの巣には生えない別種だということも明らかにされた。でも尿素があれば、ナガエノスギタケも生えてきてもよさそうに思うのですが。

相良

私もそう思うのですが、今のところ、その事例はありません。

永田

そうすると、ナガエノスギタケダマシの生えるところに、モグラの巣の一部の何かを埋めたら出てこなくなるでしょうか？何か阻害に働く物質がモグラの雪隠に含まれているというふうにも考えられますね。

相良

そこまで考えたことはありませんでした。ナガエノスギタケダマシはアカネズミ類の巣(便所)から生えた例があります。また、ナガエノスギタケダマシと同じ「アンモニア菌」のアシナガヌメリはモグラの便所からも生えます。



永田

ナガエノスギタケは生えるけれど、ナガエノスギタケダマシは生えない。その理由は何か？まだ解かれていない面白い「問い」だと思います。

3. 「生息地浄化共生」

永田 もう1つ面白いと思ったのがコウベモグラとアズマモグラ。最初に掘った巣がコウベモグラのものだったと確認して埋め戻した後、9年経ったらまたナガエノスギタケが生えてきた。掘ってみると、今度はアズマモグラが住んでいたというお話し。このモグラたちは、なぜ同じ場所で暮らしているのでしょうかね？

相良 それは、私の言う「生息地浄化共生」という関係がそこに成立しているからだと考えています。排泄物の後始末をしてくれるシステムがそこにある。そのことをモグラは感じ取るのではないかな。その土地には、樹木やきのこが居て、それらが生活の後始末をしてくれることを、モグラは何らかの感覚で理解しているのではないかな。モグラは生活の後始末に必要な環境がそこにあると理解するというのが、私の仮説、長年の持論です。

永田 なるほど。アンモニア菌の成長にアンモニアは必須だけれども、例えば、人糞を肥やしに撒いた畑に、モグラが来て、ナガエノスギタケダマシが生えるということはないのですか。

相良 ナガエノスギタケダマシにも、ナガエノスギタケにも、樹木が必要で、菌根共生の相手がないところでは生えられません。

永田 樹木の根っこと菌糸との関係ですね。

相良 そうです。一方、生きている樹木を必要としないきのこもあります。尿素を撒いて初期に生えるきのこは菌根共生をしませんから。きのこが生えるにも生えないのにも理由があるわけです。

永田 きのこの世界はほんとうに種類も多く、生態も多様なので、研究対象として、これから面白い発見がまだいくつも出てくるように思いますね。相良先生は、退官後もずっと、興味を持ってきのこの研究を続けておられますね。

相良 今は、モグラに関する私の知見をもっと公のものにしたいと格闘してるところです。まだ執筆中の論文もあります。

永田 1年、2年発表が遅れると、ライバルに追い抜かれてしまうという我々の研究と違って、先生のお仕事は10年たっても古びない。とても羨ましいですね。

4. 美味しくて等身大の生きもの

永田

ところで、きのこ採りが好きな人って意外に多く、私がきのこに取り付かれたのは京都大学時代、文学部の助手をしていた友人が、京都御所でツルタケというきのこを見つけた。これはドクテングタケの仲間で、ほとんどのテングタケには毒があるけれど、ツルタケだけは食べられる。しかもとても美味しい。それを分けてもらって、その日、家族で喜んで食べたら、ほんとうにうまかった。家族できのこ狂いが始まったのはそれからです。



きのこって、興味ない人は見てないけど、気に掛けているとあちこちに、いろんなきのこが生えているのが見えてくる。だから京都大学の構内でもしょっちゅうきのこ採りに行きましたし、百万遍から丸太町まで、東大路通のプラタナス並木に生えるヤナギマツタケも美味しい。これを採って歩くと、すぐ紙袋2杯分いっぱいになっちゃう。それを塩漬けにして一冬鍋に使うんです。ある時、誰か先に採ったやつがいるぞと思って、後で、数学者の森毅先生も、私と同じ場所をきのこの猟場にしていて、お互いに誰かに採られたと思っていたことがわかった(笑)。きのこって採り始めると、とても面白い。相良先生にとってきのこは研究対象ですが、楽しんでもおられますか。

相良

今は、大分で百姓をしていて、草刈り中に会えるきのこは一瞬にして木っ端みじんです。出会わないことが望ましい。奥行きを考えるとゾツとするのです。シイタケ、ナメコは栽培しております。去年の大洪水では、ほだ木が全部流されましたが、また新しく植えました。流失は3回目になります。

永田

もったいない話ですね。きのこは足が早いですね。すぐ駄目になっちゃう。ヒトヨタケは、夜明けに出始めて、午後にはもう溶け始める。その出るか出ないか、ちょっと土が膨らんでるところを掘って、ヒトヨタケを持って帰って料理をすると、これまたうまいんです。ほんとに京大時代は、大学構内でなんぼ晩ご飯のおかずを採ったか。きのこを自分で採って食べる一番の喜びとは、世界中で、今、このきのこを食べているのは自分だけ。売られているきのこはどこでも誰でも食べられるけど、このきのこは自分しか味わっていないところが醍醐味。その時、一番の問題は、今、目の前に生えているこのきのこに、毒があるかないか？

相良

食べられるか、食べられないかですか。それを見分ける原理・原則はありません。結果でしかわからない。



撮影：コジマスタジオ

永田 } ご自分で食べたりもしますか。

相良 } 少しは食べます。人が食べないようなものを食べたりして、「そんなもん食べるんか!」と言われてたりしました。今、シイタケ、ナメコなどは食べます。冬の、野外の、ナメコ、ヒラタケはいい!

永田 } 今、相良先生もおっしゃったように、世の中に出回っている毒きのこの見分け方って全部うそですよ。ほんとうは一つ一つ確かめるしかない。それが醍醐味ですね。先生、最後に、きのこの面白さを一言で言うとどうなりますでしょうか。

相良 } 自分と等身大の生き物だと思って見たら面白いんじゃないかと思います。少し勉強してもらおうと、実質も等身大とわかります。「人格」と「菌格」、「人生」と「菌生」です。しかし、すぐにはピンとこないでしょう。一方、きのこは過去を語る、自然の「語り部」です。「路傍のきのこは何を語るか?」と思って接すると、自然の奥行きが見えてくるのではないかと思います。

LECTURE & TALK

私のきのこ学

質問タイム

会場の参加者から8つの質問がありました。
どんな話題が展開したのか、ご覧ください。



Q1 きのが生えていた場所を掘っていく時、何か、印象的なにおいがありますか？ おそらく排泄物の分解が進むほど、あまりにおわなくなると思いますか。



相良

新しい排泄物はやっぱり臭いです。モグラは基本的に肉食ですから、においは良いものではありません。ナガエノスギタケが生える頃になると、排泄物はもう古いので、そのような臭いはありません。巣が小さいですし、獣臭もほとんどありません。

Q2 菌糸が便所跡で成長してきのこが生えてくるまでに、どれくらいの時間がかかるのでしょうか？



相良

半年以上でしょうね。実験できないので、はっきりしたことは言えませんが、最終的にきのこを生やすほどに菌糸を茂らすには、ある程度の量まで糞が溜まらないとできません。それには相当な時間を要すると思います。

Q3 森の中で、菌根共生が起きやすく、きのこが生えやすい環境として、日当たりや水はけなど、何か特徴的な要素はありますか？



相良

原理的な話になってしまいますが、樹木は光合成をする必要があるので日当たりは必要ですね。それから、やはり水はけが良くないといけませんね。酸素が土壌中に供給されないと菌糸も木の根も生育できませんから。

Q4 私は大学でタヌキの溜め糞の研究をしています。きのこが好きで、相良先生の著書や論文も読ませていただいている、タヌキが定期的に排泄する場所で、きのこが生えないかと見ていますが見つかりません。毎日排泄されていますが、そのような場所では生えにくいのでしょうか？



相良 ▶ 私もタヌキの糞場には、随分通いました。排泄している最中は、きのこは生えません。きのこが生えるのはその糞が朽ち果てた後のことですね。糞に含まれる窒素が分解されてアンモニア化した後の出来事になります。アンモニア化した後の初期にはチャワンタケ類やヒトヨタケ類が生えるかもしれません。時間が経てば、アシナガヌメリや他のきのこも生えてきます。是非、きのこを見てください。

Q5 尿素有撒かれた場面で、地面が黒くなるのはどうしてですか。例えば、山の中で動物が排泄したようなところも後から黒くなるものですか。



相良 ▶ アルカリ性のものであれば、尿素でなくても、KOH(水酸化カリウム)などでも黒くなります。動物の尿の落ちたところや死体が朽ち果てた跡はアンモニアによって黒くなります。

Q6 生息地浄化共生について伺います。もし、きのこがないと巣にアンモニアが溜まってしまってモグラは住めなくなるのでしょうか。



相良 ▶ 良いご質問です。自然界にはいろんな生物がいて、代わりに同じようなはたらきをするものもいっぱいいます。例えば、畑の付近には樹木もきのこもありませんが、そこでも排泄物の後始末は行われているはず。さまざまな生物が関わり合う開放された大地であれば、代替りの生物が後始末してくれます。しかし、同じ所に長期定住できるかというと、それは、やはり森の中でこそ可能なのだろうと私は考えています。ともかく、農耕地周辺で長期定住が観察された例はなく、長期定住を観察しようとした人もいません。なお、ナガエノスギタケの増殖原因がアンモニアだとはわかっていません。

Q7 山の中などで、ナガエノスギタケを見分ける方法や何か特徴はありませんか。



相良

ナガエノスギタケはとても目立つ、立派なきのこです。あるイギリス人は、“noble fungus”と言いました。「高貴なるきのこ」だと。目立ちすぎて私が困るのは、先に誰かに採られちゃう。においも特徴的で、昔のフエキ糊のようなにおいです。ナガエノスギタケやアシナガヌメリが見つかったら、その発生位置をピンポイントで標識しておいていただけると、科学になり得ます。

Q8 アカマツ林に尿素を撒いて、まず腐生菌のチャワソタケやヒトヨタケの仲間が生えて、その後、ワカフサタケの仲間が生えたということですが、時間差があるのはなぜでしょう。



相良

菌類遷移の実相はほとんどわかっていませんが、後から生えるきのこで菌根共生するものには、木の根の回復が必要です。尿素を撒いた時、直後には樹木の細根は死滅し、それが数カ月以上経つと回復してきます。その時、菌糸のほうも一緒に増殖すると思えばよいかと思います。さらに、尿素施与によって増殖したきのこの死骸はどうなるのだろうかという問題もあります。アンモニア菌の中には、以前に育ったきのこの死骸を食べて育つきのこもあるかもしれません。

アカメガシワの柔軟な防御戦略 アリを利用する植物の護身術



山尾 僚 京都大学生態学研究センター

本州以南では身近な樹木であるアカメガシワは、アリを使って天敵を排除する戦略をもつ。両者の関係を探ると、機敏に周囲の状況を捉え、賢くアリと協力するアカメガシワの姿が見えてきた。ここから、植物が他の生物を利用して身を守ることを考えてみたい。

CHAPTER 1. アリに守ってもらう植物 2. アカメガシワの護身術 3. 葉ごとに異なる守り方
4. 柔軟な防御戦略 5. 迅速な反応でアリを動員 6. アリとの関係の進化

1. アリに守ってもらう植物

地中に根を張って固着生活をする植物にとって、昆虫や哺乳類などの動物に食われることは最大の脅威である。多くの植物は、動かずして動物の食害に対抗する手段を進化させてきた。ほとんどの陸上植物が、天敵の嫌がる味や匂いのする化学物質を体内に蓄えたり、天敵の摂食を物理的に阻むトゲや毛、硬い外皮をもつ。ここからは、植物が歴史的に数多くの食害に遭ってきたことが想像できるだろう。

他の生物を利用して間接的に身を守る植物も存在する。そのパートナーとしてよく選ばれているのが、地球上のほとんどの地域に生息するアリである。アリと共生する植物の多くは、花以外の場所に蜜腺(花外蜜腺)をもつ。甘い蜜でアリを誘引し、天敵昆虫のパトロールをしてもらうのだ。中には、植物体の一部を変形させてアリを住まわせるものまでいる。これらの植物を巡回するアリが、植物の天敵となる昆虫を見つけた場合は捕食するか、捕食対象とならない昆虫であっても、自身の縄張りへの侵入者として排除してくれるのだ。

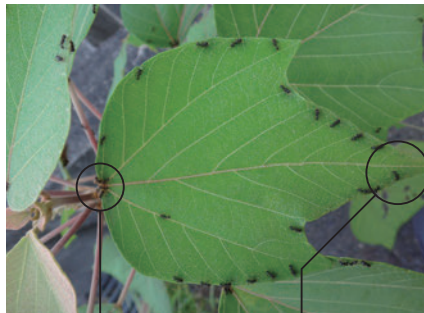
2. アカメガシワの護身術

アカメガシワ(*Mallotus japonicus*)は、日本で見られる数少ないアリと共生する植物である。本州以南に生息し、都市部でも公園や道路脇の草むらに、数十センチ～数メートルの若木がよく見られる。この樹木は葉に蜜腺をもち、アリを誘引する。また、葉脈や葉の柄から分泌する「食物体」と呼ばれる脂質の塊もアリの餌になる。身近なアカメガシワを見れば、多くの場合アリを見つけることができるだろう(図1)。

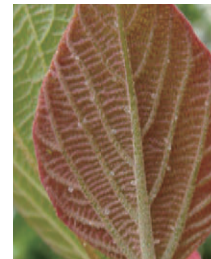
アカメガシワの若木



アリが訪れる葉



食物体



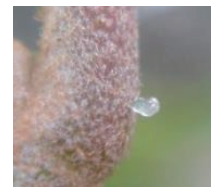
葉脈上の食物体

蜜腺



基部の大きな蜜腺

葉縁の蜜腺

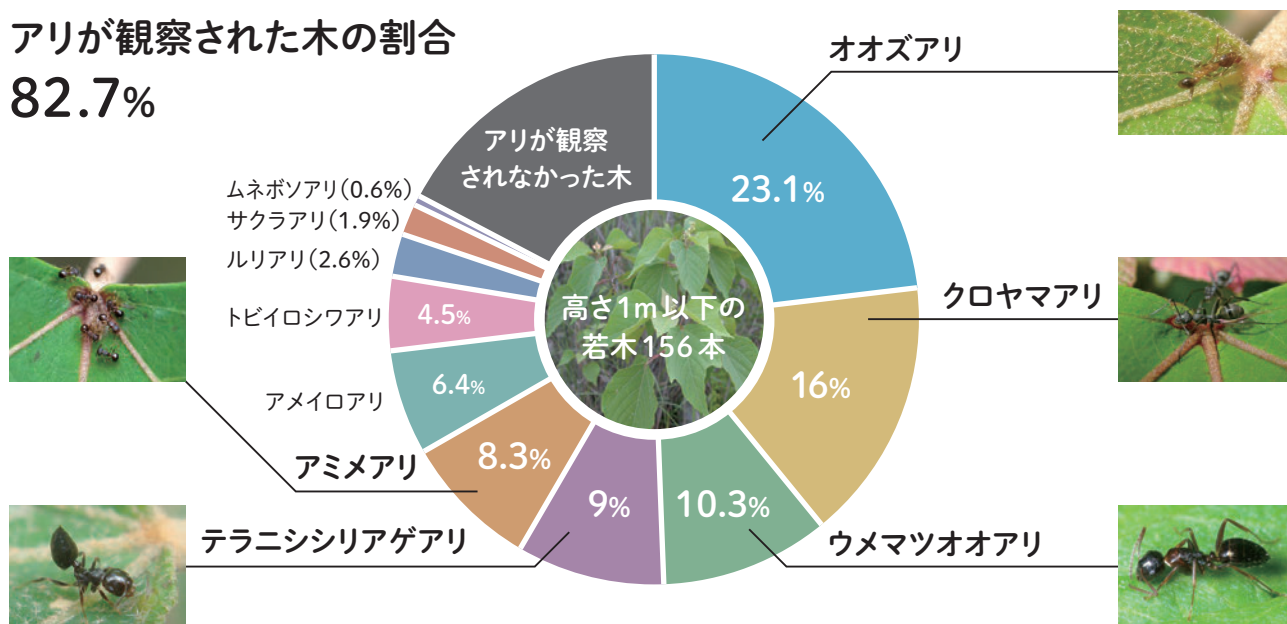


葉柄の食物体

(図1) アリを誘引するアカメガシワの工夫

学生時代に両者の共生関係に興味をもった私は、岡山理科大学の構内のアカメガシワの若木に訪れるアリを調査し始めた。150本以上を調べた結果、8割を超える若木でアリが見られ、この地域に生息するアリのうち10種類が訪れていることがわかった(図2)。

アリが観察された木の割合 82.7%

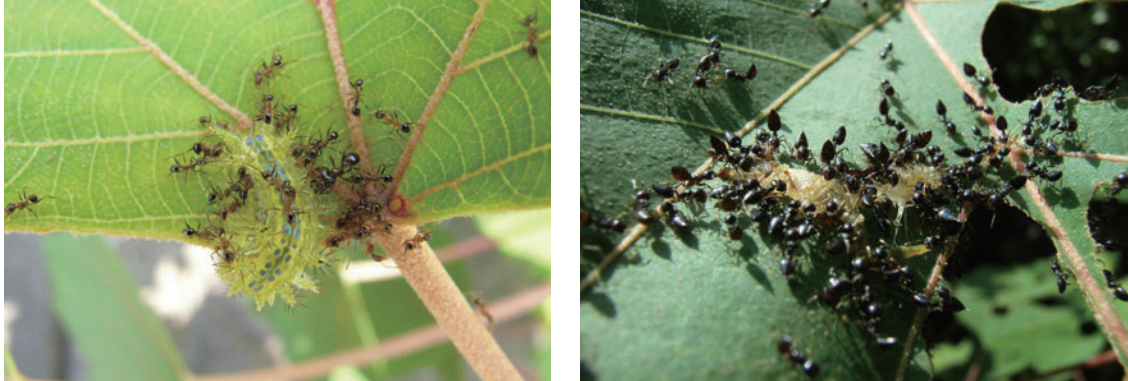


(図2) アカメガシワを訪れたアリの種類と割合

高さ1m以下の若木156本中の調査結果。一つの木に見られたアリは一種類ずつだった。

データ: Yamawo et al., *Journal of Ecology* (2012)

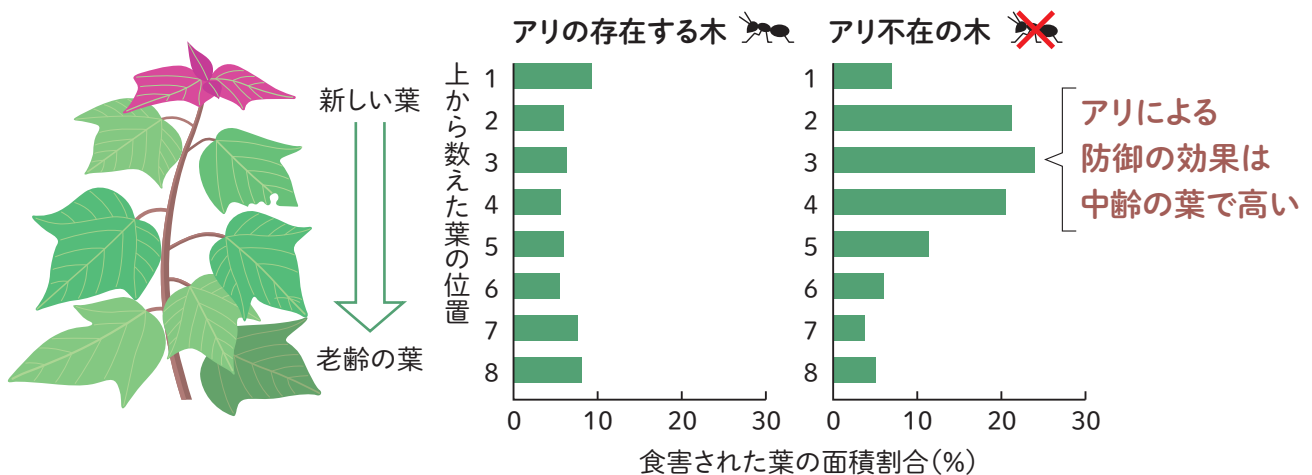
アカメガシワの葉の上に、植物の天敵であるイラガやシャクガの幼虫を置いてみると、アリが群がってきて速やかに排除された(図2)。ただし、アリの攻撃性は種によって差があり、全種のアリが植物にとって有効な守護者ではないことや、有効なアリが常にどの木にもいるとは限らないことがわかった。アリは条件が合えば天敵を排除してくれるが、その守りは必ずしも完璧ではないのだ。



(図3) 植物の天敵を排除するアリ
オオズアリに攻撃されるヒロヘリアオイラガ幼虫(左)、テラニシシリアゲアリに捕食されるエダシャク幼虫(右)

3. 葉ごとに異なる守り方

隙があるように見えるアリの防御は、どの程度効果があるのだろうか? いくつかの若木に、アリが接触できなくなる処理を行ってみたところ、1ヶ月後には木の一部の葉で食害が増えた。食害が増えたのは、新しい葉や老齢の葉ではなく、適度に成熟した葉(中齢葉)だった(図4)。同じ個体の中でも、中齢葉が最も手厚くアリに守られているということであり、実際に木の中でアリが多く見られたのも中齢葉だった。



(図4) アリによる食害防止の効果
アリによる食害防止の効果は、中齢の葉(上から3番目の葉)を中心に高くなった。
データ: Yamawo et al., *Journal of Ecology* (2012)

老いた葉はともかく、個体にとって最も大事な新葉の守りが薄いことは意外だったが、この植物は新葉を他の手段で守っているらしい。アカメガシワはその名の通り新芽(新葉)が赤いことが特徴だが(図5左)、これは芽が「トライコーム」という細毛で覆われているためである。この毛は物理的に昆虫の食害を妨げる効果がある。またこの植物の葉には、天敵が忌避するポリフェノールなどの化学物質を分泌する腺点があり(図5右)、腺点の数も新葉で特に多いようだった。

アカメガシワの新葉

葉の表面

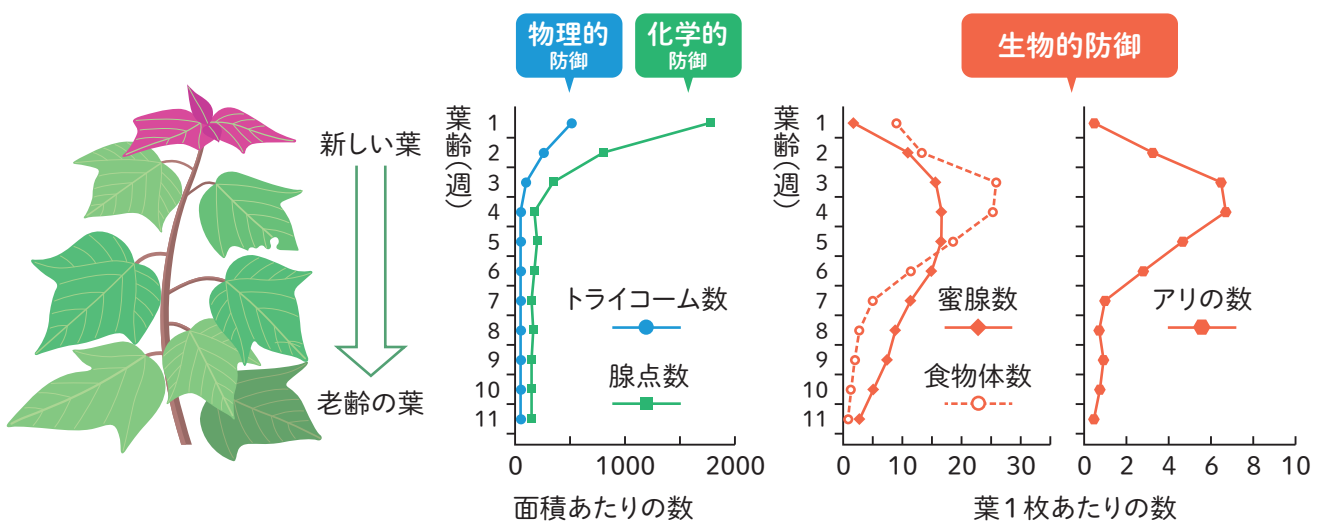


拡大した新芽



トライコーム

(図5) アカメガシワの新葉(左)と、葉の表面のトライコーム・腺点

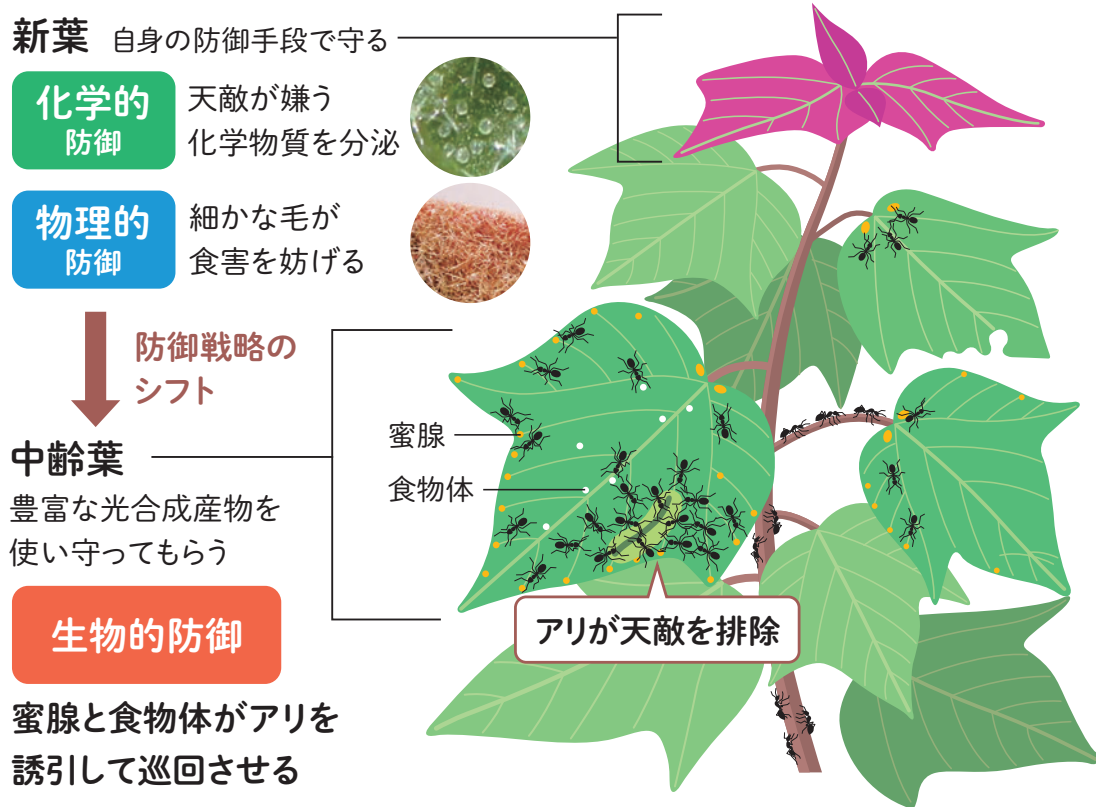


(図6) アカメガシワの葉齢と、化学的防御・物理的防御・生物的防御の強さの関係

新葉(葉齢1~2週)では腺点数・トライコーム数が高く、中齢葉(葉齢3~5週)では蜜腺・食物体数と訪れるアリの数が高くなった。

データ: Yamawo et al., *Journal of Ecology* (2012)

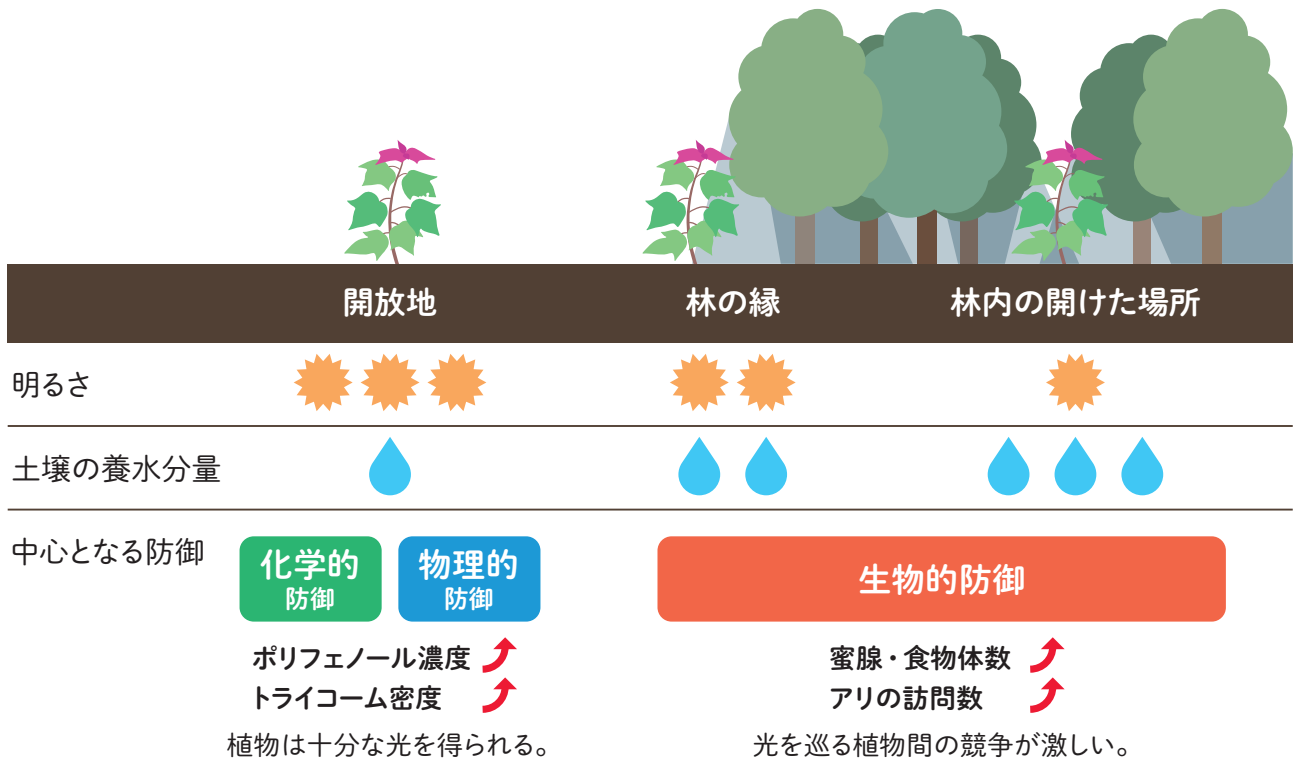
トライコーム、腺点、葉の蜜腺と食物体の数を全ての葉で調べ上げたところ、新葉と中齡葉では重点的な防御方法が見事に入れ替わることがわかった(図6)。まだ小さく柔らかい新葉は、アリに頼らない自身の防御手段(化学物質とトライコーム)で守り、葉が成長すると蜜腺の数や食物体を増やしていく。豊富な光合成産物を蜜に転用し、アリに守ってもらう戦略にシフトするのだ(図7)。



(図7) アカメガシワの防御戦略のシフト

4. 柔軟な防御戦略

この経験から私は、アカメガシワは様々な状況に応じて、化学的・物理的・生物的な防御を使い分けることができるのではないかと考えた。アカメガシワは河川敷や山の中など多様な環境に生息しており、生育環境に応じた防御戦略の違いが見られるかもしれない。フィールド調査や生育実験を重ねた結果、林の縁や林内など土壌の養水分が豊富でやや暗い環境の木は、アリを使った防御に重点を置くことを発見した。反対に明るい開放地の個体は、アリ防御ではなく化学的・物理的防御に重点を置くようだ(図8)。



(図8) 環境に応じて変わる守り方

また開放地の木のほうが食害が少なく、実際は生物的防御よりも化学的・物理的防御の方が、食害を防ぐ効果は大きいこともわかった。ではアカメガシワが、環境に応じてわざわざ防衛手段を切り替え、アリと共生するメリットは何なのだろうか？一つ考えられるのは、生物的防御が低コストな防御方法であるということだ。

化学的・物理的な防御には、複雑な化学構造をもつポリフェノールを合成したり、葉全体でトライコーム生産遺伝子を発現させる必要がある。一方、アリを呼ぶ甘い蜜の主成分は、光合成産物そのものに近い糖であるため、前者よりもコストをかけずに作れるのではないだろうか。もちろん植物にとっての防御コストを調べることは難しい。ただ私たちの実験では、アリと共生した個体は、アリ不在の個体に比べ、1年後の重量が10～20%大きくなることがわかっている。

アカメガシワは暗い場所では生きられないため、他の木より早く成長して光を獲得することが、生存のために何より重要だ。特に光を巡る競争が激しい状況では、アリと協力して防御のコストを減らし、少しでも成長に資源を回せることは十分なメリットではないだろうか。アリと共生する植物の多くが、アカメガシワと同様に明るい場所を好む「パイオニア種(註)」であることも、この考えを支持している。アカメガシワの生き様を通して、植物の柔軟さと強さを垣間見ることができた。

(註) パイオニア種

明るい環境を好み、主に開放地で発芽・成長する樹木。他の植物より早く成長して光を獲得するが、遅れて他の樹木が繁り始めると数を減らすことから、森林形成の初期に見られる種という意味でこのように呼ばれる。

5. 迅速な反応でアリを動員

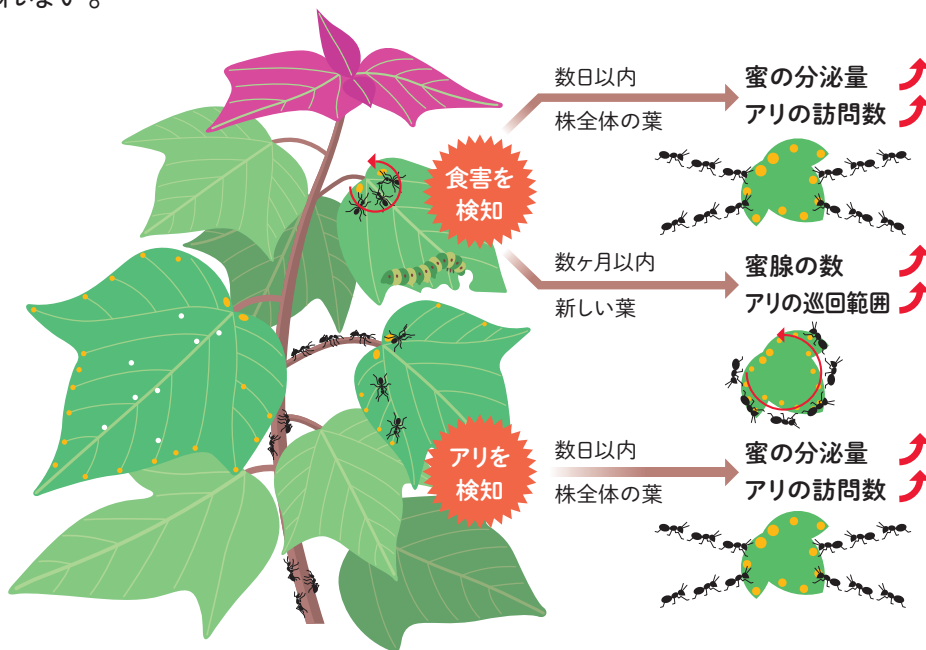
蜜量の調節は、化学的・物理的防御の調節に比べ迅速に行えるというメリットもある。状況に応じて蜜の量をしばれば、さらなる資源の節約にもつながるだろう。実際にアカメガシワは状況の変化に速やかに反応して、アリを動員することもわかった。

天敵の食害を模して、無傷の若木の葉の一部をハサミで切り取ってみると、24時間以内に、個体全体の葉で分泌される蜜の量が増え始めた。蜜量は3日後には5倍になり、訪れるアリの数も10倍にまで増加したのだ。

食害後に新しくつくられた葉には、さらなる変化が見られた。蜜腺の数自体が増え、葉の先端まで蜜腺が並ぶ形になったのである。結果、食害前の葉では、葉の基部までしか巡回しなかったアリが、葉全体を歩き回るようになったのだ。植物が食害を受け、隈なく天敵を探索するようアリに促しているかのようだ。

また奄美大島の地域個体は驚くべき反応を示した。アリに触れたことのない若木にアリを昇らせてみると、数日後には蜜の分泌量が増え始めたのである。何らかの形で木がアリの来訪を検知したようだ。アリの接触や歩行による振動に反応したのか、アリの足に付着している特有の化学物質に反応したのかもしれないが、そのしくみは全くわからない。海外の他の植物の研究では、植物がアリの種類まで識別しており、有効なアリが来た場合のみ反応を示すという例もある。

植物は、私たちが思うよりはるかに機敏に周囲の状況を捉え、他の生物の行動を巧妙に操作しているのかもしれない。



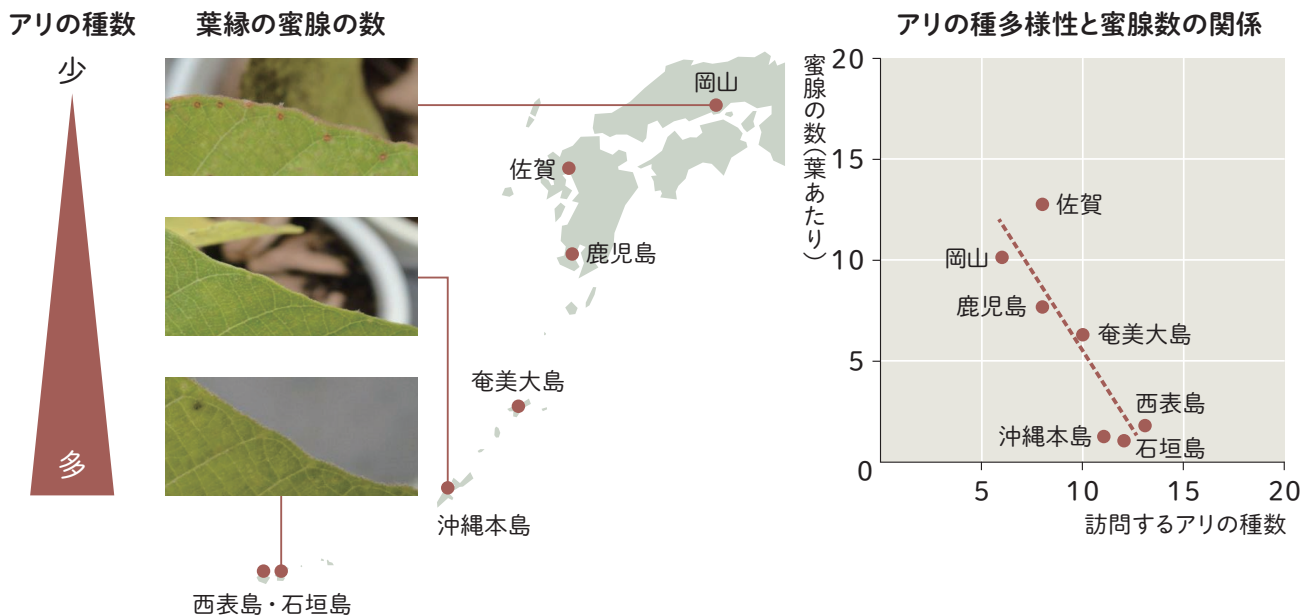
(図9) 迅速な反応でアリを動かすアカメガシワ

6. アリとの関係の進化

アカメガシワは日本を含む東アジアの温暖な地域に分布する。そのパートナーであるアリの種類や生活史は、地域によって大きく異なるはずである。私は九州や沖縄の島々あわせて7箇所を回ってアカメガシワを訪れているアリの種類を調査し、種子を集めて同じ環境で育てる実験を行った。

その結果意外なことに、アリの種の多様性が低い地域のアカメガシワほど、アリによる防御に重点を置くよう進化していることがわかった(図10)。恐らくこれは、その地域の全種のアリが植物の有効な守護者になってくれないことと関係する。アリの種類が多様になるほど、植物にとって協力的でないアリが蜜を持ち去ってしまう確率も高くなり、かけたコストが割に合わなくなるのだろう。結果、そのような地域では他の防御手段に重点を置く個体が選択されてきたのではないかと考えている。

アカメガシワとアリの共生関係は、動物と植物の違いを明確に感じることができる現象の一つだと思う。ぜひ身近な植物に目を向け、その変化を感じ取ってもらいたい。想像もしなかった魅力的な世界に引き込まれることをお約束する。



(図10) アリの種多様性と葉の蜜腺数の関係

データ: Yamawo et al., *Functional Ecology* (2021)

本記事に関連する文献

- 『植物たちの護身術—被食防御の生態学—』 種生物学会 編(坂田ゆず・角田智詞 責任編集)文一総合出版(2024) 生物的防御を始めとする植物の様々な被食防御について、最新の研究に基づいて解説している。
- Yamawo A, Suzuki N, Tagawa J, Hada Y. Leaf ageing promotes the shift in defence tactics in *Mallotus japonicus* from direct to indirect defence. *Journal of Ecology*, 100: 802-809 (2012)
- Yamawo A, Tagawa J, Hada Y, Suzuki N. Different combinations of multiple defence traits in an extrafloral nectary-bearing plant growing under various habitat conditions. *Journal of Ecology*, 102: 238-247 (2014)
- Yamawo A, Tokuda M, Katayama N, Yahara T, Tagawa J. Ant-attendance in extrafloral nectar-bearing plants promotes growth and decreases the expression of traits related to direct defenses. *Evolutionary Biology*, 42: 191-198 (2015)
- Yamawo A, Suzuki N. Induction and relaxation of extrafloral nectaries in response to simulated herbivory in young *Mallotus japonicus* plants. *Journal of Plant Research*, 131: 255-260 (2018)
- Yamawo A, Suzuki N, Tagawa J. Species diversity and biological trait function: Effectiveness of ant-plant mutualism decreases as ant species diversity increases. *Functional Ecology*, 35: 2012-2025 (2021)



山尾 僚 (やまお・あきら)

2012年鹿児島大学大学院連合農学研究科博士課程修了。博士(農学)。2013年日本学術振興会特別研究員、2015年弘前大学農学生命科学部助教・准教授(2021年)を経て、2023年より京大生体生態学研究センター教授。

RESEARCH

チャイロキツネザル 森を育む種子散布の多様性



佐藤宏樹 京都大学大学院アジア・アフリカ地域研究研究科

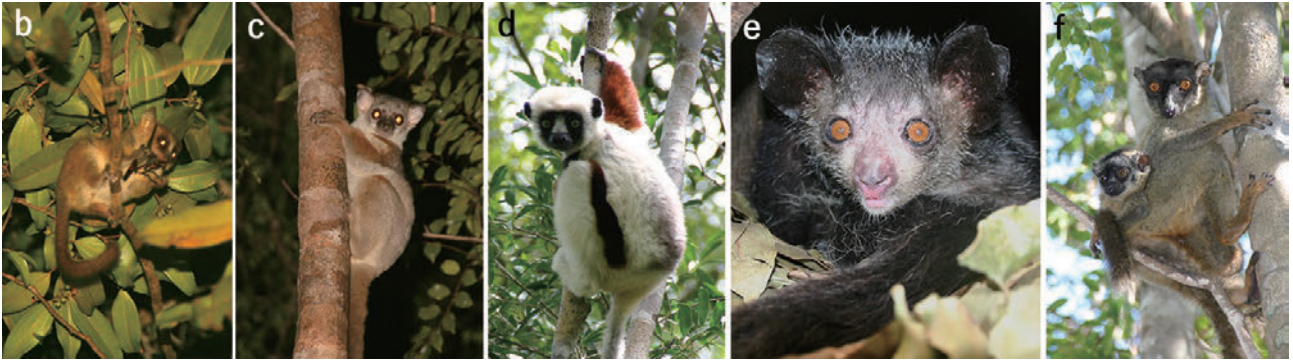
動植物の90%が固有種のマダガスカルで、直径10mmを超える大きな種子を丸飲みができる動物はチャイロキツネザルだけ。植物はおいしい果実をつけて種子散布者を誘います。排糞により運ばれた種子の運命は？ 種子を巡る、運ぶ動物側と運ばれる植物側の多様な共生関係から、マダガスカルの森をのぞいてみましょう。

-
- CHAPTER 1. マダガスカルの霊長類 2. 種子の運び屋 3. 運び屋の生態
4. 運ばれる種子の量 5. 運ばれた種子の運命 6. キツネザルが育む森
-

1. マダガスカルの霊長類

アフリカ大陸の南東沖400kmに浮かぶマダガスカルは、日本の国土の1.6倍、世界で4番目に大きな島です(図1.a)。ジュラ紀にアフリカ大陸、白亜紀にインド亜大陸から分裂して孤島となったため、現在マダガスカルに生息しているのは、恐竜の絶滅以降に出現し、8,000万年以上をかけて独自の進化を遂げてきた生きものたちなのです。マダガスカルは生物多様性の宝庫ともいわれ、植物の80%、脊椎動物の90%がこの島の固有種です。例えば、人気者のキツネザルは、私たち人間と同じ霊長類の仲間で、現在5科107種が確認されていますが(図1.b-f)、全て固有種です。手首にある臭い腺(臭腺)や反射膜(タペタム)と呼ばれる夜間のわずかな光を増幅する目の構造など、原始的な霊長類の特徴を残しています。私はこれまで、キツネザルの生態や森をつくる働きについて調査を行ってきましたが、ここではチャイロキツネザル(図1.f)と糞を通して種子を蒔く植物の研究を紹介します。





(図1) a: マダガスカル

b: コビトキツネザル科、c: イタチキツネザル科、d: インドリ科、e: アイアイ科、f: キツネザル科

チャイロキツネザル (*Eulemur fulvus*) は、体長40-50cm、体重1.5-2.5kgで、複雄複雌の群れで熱帯雨林から乾燥林まで様々な環境で暮らし、ほとんどの時間を樹上で過ごします。果実や木の葉、花の他、昆虫なども食べますが、主食(70%)は果実です。その糞を分析すると、70種類もの種子が出てきます。自ら動けない植物が子どもである種子を自分から離れたところに蒔く現象を「種子散布」といい、多様な方法のひとつが、おいしい果実をつけて動物に種子ごと飲み込んで運んでもらう被食動物散布です。動物は果肉という餌をもらい、植物は種子を分散してもらうことで子の生存や成長が有利になり、分布を拡大できます。動物と植物の双方に利益がある相利共生と呼ばれる助け合いの関係になっているのです。特に大小さまざまな種子を大量に飲み込める大型の動物は、森の世代更新を担う種子散布者の主力となります。

2. 種子の運び屋

マダガスカルは、生物種だけでなく生態系の構造もユニークで、他の地域で種子散布の主力となるゾウやサイチョウのような大型の果実食動物はいません。ハトやヒヨドリ、オオコウモリ、コビトキツネザルなど、種子の直径が10mmもあれば喉が詰まってしまう小さな動物ばかりです。大きな種子を持つ果実を食べる動物は、インドリ科とキツネザル科に限られます。インドリ科のコクレルシファカ (*Propithecus coquereli*) (図1.d) は、体重4kgほどで、葉食に適応した大きな臼歯と長い消化管を持っています。口にした種子はバリバリと破壊され、跡形もなく吸収され、ヤギのような糞にはその形をとどめていません(図2.a)。キツネザル科のチャイロキツネザル(図1.f)は、消化に手間のかからない糖類を含む果実を主食とするため、歯や消化管は簡易な構造をしています。よって、種子は無傷のまま生きて排泄されます(図2.b)。つまり、大きな種子を持つ植物にとって、インドリ科は「種子を食べる種子捕食者」、キツネザル科は「種子を運ぶ種子散布者」に位置づけられるのです。実際、チャイロキツネザルの糞に含まれる70種の種子のうち23種が直径10mmを超える植物のものです*1。このことから、マダガスカルの森の生態系は、キツネザル科だけが種子散布の主力を担うような単純な構造であると予想されます。彼らの種子散布者としての役割を明らかにすることは、他地域でゾウやサイチョウが担う役割を明らかにすることと同様に重要であると考えられます。



(図2) a: コクレルシファカの糞、b: チャイロキツネザルの糞から出てきた種子 (スケール: 10mm)

3. 運び屋の生態

チャイロキツネザルの種子散布者としての能力を評価すべく、私はマダガスカル北西部に位置するアンカラファンツィカ国立公園で1年間に渡って彼らの後をひたすら追跡しました。行動を記録し、糞を拾い、内容物を分析し、得られた種子をプランターに植えてみる(図3)——今思えば、キツネザルたちの生活をあれほど長く近くで見られたのはこの時だけです。現地での調査から、1日に個体群あたり9,854個/km²もの種子を散布することや、チャイロキツネザルが飲み込むことで種子の発芽率が改善する植物があることもわかりました*1。また、アンカラファンツィカは雨季と乾季が明瞭です。乾季は半年間も雨が降らず、日中の気温は35°Cを超えます。結実する植物の種数が少なくなるほか、チャイロキツネザルは体内水分を失わないように活動量をなるべく減らします。一方の雨季は森中に多様な果実が実り、水分補給も十分にできることから、チャイロキツネザルは活動量を増やし、果実を求めて森中を駆け巡るようになります。こうした環境の変化に適応する行動は、種子を運ぶ距離にも影響し、母樹から種子までが、乾季は75mと短く、雨季は170m(中央値)と長くなりました*2。この運び屋としての季節的な行動の違いは、植物にとってどのような意味があるのでしょうか？



(図3) a: 発信機を着けたチャイロキツネザル、b: 糞分析、c: 発芽実験

4. 運ばれる種子の量

この問いに答えるため、チャイロキツネザルの季節ごとの主食である2種の果実に着目しました。乾季に3-4ヶ月間結実するセンダン科の *Astrotrachilia asterotoritra* (A種) と、雨季に2-3週間結実するウルシ科の *Abrahamia deflexa* (B種) です。いずれもマダガスカル固有種で、直径10mm以上の大きな種子を持つ植物です。これまでのキツネザルを追いかけて動くというアプローチから一転し、今度は結実木とともに動かず(図4.a)、生産する果実、動物に運ばれる果実、運ばれずに落ちる果実の量を測ることにしました。

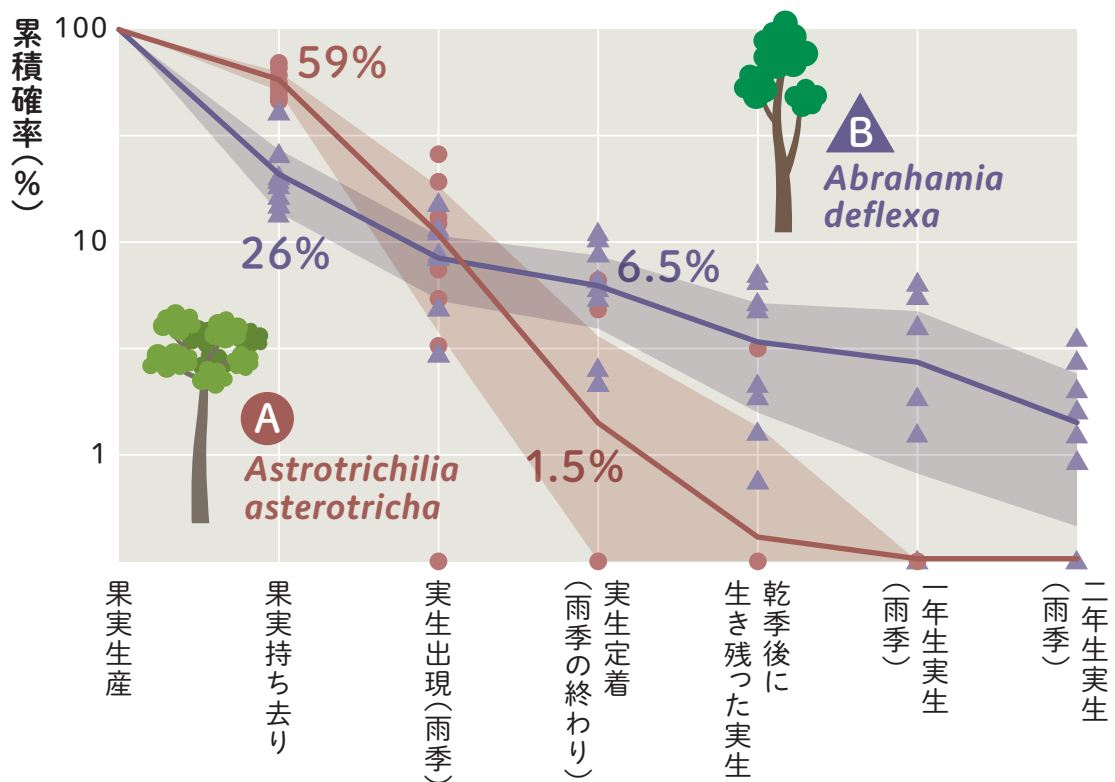
ザア…ザア…グフ…グフ……涼しくなった深夜、彼らは暗闇の彼方から森の梢を揺らしながら現れます。10個体以上の群れが樹冠を跳ね回りながら果実を頬張り、大きな種子をゴクリと飲み込むのです(図4.b)。その滞在時間や個体数、飲み込んだ数をストップウォッチとカウンターを手に記録します。運ばれずに落ちてくる果実は、シードトラップ(図4.c)という網を張った容器を樹冠の下に置いて捕捉します。こうした調査を大小さまざまな木で行ったところ、A種が1回の乾季で生産した果実のうち、チャイロキツネザルが持ち去る割合は59%(図5)で、果実の密度や樹冠サイズが大きいほどその割合は高くなりました。前述の通り、乾季に結実する樹木数は多くありません。しかも、チャイロキツネザルは活動量を減らしたい時期です。これは、閉店するレストランが多い街で営業する大きなレストランに常連客が集まるように、チャイロキツネザルは繰り返し結実期間の長いA種の大木に通い、効率よくお腹を満たす採食戦略だと考えられます。一方、雨季に結実するB種の木を調べると、チャイロキツネザルが持ち去る割合は26%(図5)にとどまります。雨季の森は多様な植物がそこらじゅうで果実を実らせるため、チャイロキツネザルはお祭りの屋台のように果樹から果樹へと食べ歩きますが、B種の同じ樹木にはそう何度も訪れません。このように運ばれる種子の量を比較すると、A種の方がより多くの種子を散布することに成功しているといえます。



(図4) a: 定点観測用のブラインドテント、b: 果実を飲み込むチャイロキツネザル、c: シードトラップ

5. 運ばれた種子の運命

しかし、多くの種子を運んだから植物の役に立った、と結論付けるにはまだ早すぎます。長い樹木の一生で最も死亡率が高いのは、種子や実生（発芽したばかりの植物）の時期であるため、若い植物たちがどのようにその時期を乗り切るのかを見届ける必要があるのです。また、栄養のたっぷり詰まった種子や新芽は、ネズミや虫の格好の餌となるため、運ばれずに落ちた種子が密集する母樹直下は、捕食者たちが集まる危険地帯となります。生産した種子のうち、どれくらいがその年に定着するのかを見てみると、A種で1.5%、B種で6.5%となります（図5）。運ばれる種子の量はA種の方が多くても、生き残りやすさはB種の方が上なのです。



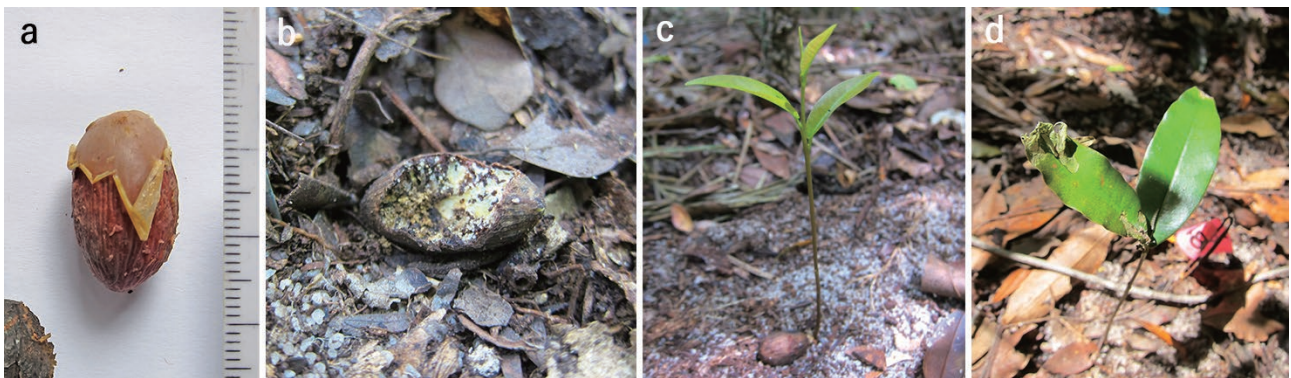
(図5) 散布後2年生実生までの到達確率

さらに、森の中で種子の発芽実験をしたところ、A種では発芽率が20%未満と低く、新芽も食害にあいますが、林冠が開けて日当たりのよい場所では生存率が少し良くなることがわかりました。この結果を理解するには、種子と実生の特徴が手がかりになります。A種の種子は、乾季の果実生産から次の雨季の発芽までの期間、乾燥や外敵から種子を守るための硬い内果皮の殻に覆われています（図6.a）。これを突き破って産卵するのがゾウムシで、孵化した幼虫は内部の種子を食べて育ちます（図6.b）。発芽率が低いのはこのためだと予想されます。そして、A種の実生は子葉とよばれる双葉を地上で開きますが（地上子葉）、この双葉には成長のための栄養が貯蔵されており、ネズミや虫による食害は致命傷となります（図6.c）。これがA種が生き残りにくい理由のひとつです。また、双葉を開き光合成をすることで本葉を増やしていくため（図6.d）、日当たりのよい場所では高い確率で生き残ると考えられるのです。



(図6) A種 a: 果実と種子、b: ゾウムシの幼虫、c: 食べられた双葉、d: 双葉と本葉

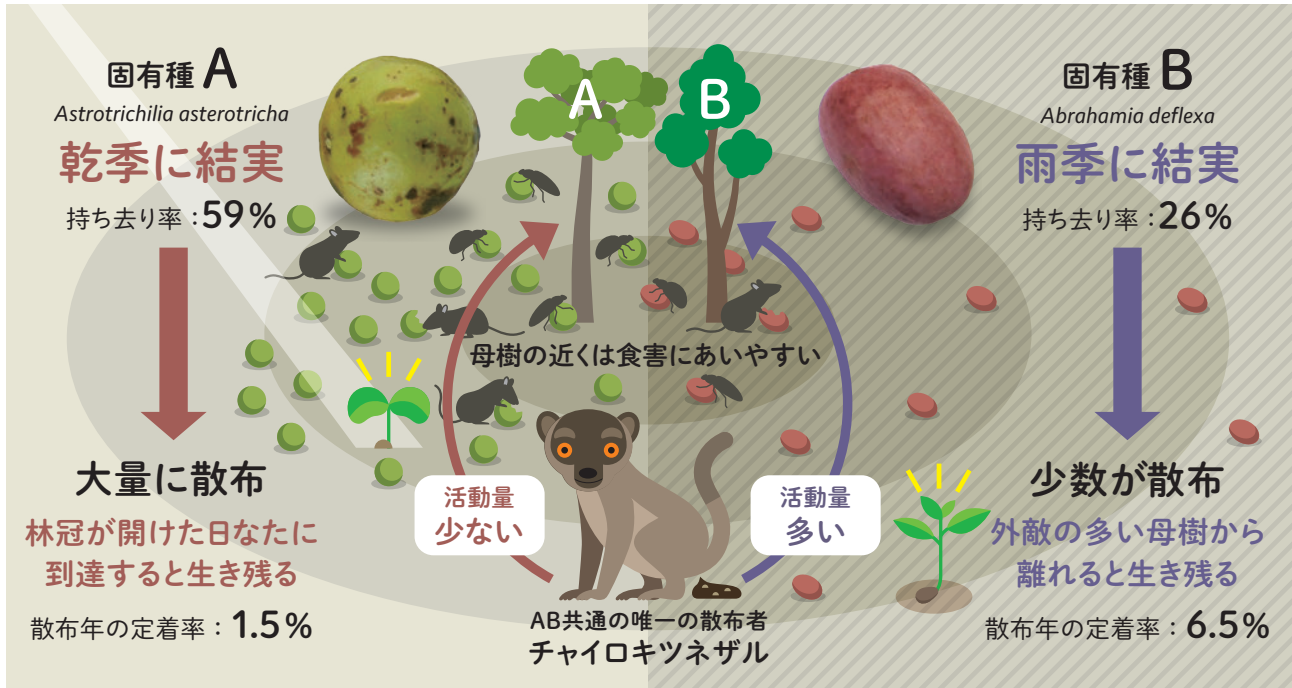
B種では、遠くに運ばれるほど多くの実生が生き残ります。種子と実生の特徴をみると、B種の種子は大きく栄養豊富ですが、硬い殻は存在しません(図7.a)。これは種子捕食者には好都合で、運ばれずに母樹下に落ちている種子は一網打尽に食べられてしまいます(図7.b)。しかし、外敵の多い母樹から少しでも離れると、雨の水を吸って数日後に発芽します。B種の芽生えは地下子葉と呼ばれ、種子の中に栄養の詰まった子葉を残したまま、根と茎と本葉を伸ばしていきます(図7.c)。種子の中の子葉が食べられても地上の本葉は無傷で済み、本葉が食べられても種子の中の子葉を使って再び成長します(図7.d)。そのため、散布される種子の量は少なくても、効率良く生き残ることができるのです。



(図7) B種 a: 果実、b: 食べられた種子、c: 本葉、d: 食べられた本葉

6. キツネザルが育む森

このように大きな種子を持つ2種の果実植物は、チャイロキツネザル一種に種子散布を托していますが、その役割は全く異なります。A種の場合、大量に種子が運ばれ、そのうちの一部分が日当たりのよい場所に到達することで次世代の個体が育ちます。B種の場合、運ばれる種子は少量であっても、母樹近くの危険地帯から逃がしてもらうことで世代更新が促進されるのです(図8)。マダガスカルの森では、動物側の環境に適応する行動と、植物側の結実期間や種子・実生の特徴が相互に作用しあうことで、多様な種子散布のパターンが生み出されているのでしょう。



(図8) A種とB種で異なる種子散布パターン

キツネザルたちが育む森林の生態系をさらに理解するために、私たちは、アンカラファンツィカの森にマダガスカルで初めての大面積森林調査区画を設置しました。15haの区画内にある幹直径5cm以上のすべての木本植物の種を同定し、番号をつけ、位置をマッピングする作業を終え、160種、約36,000個体を記録しました。樹木のバイオマスにして30%程の植物が、チャイロキツネザルに種子散布を頼る大型の種子植物であることもわかってきました。A種とB種のように、実をつける季節や期間、種子の硬さや子葉の形も色々あるはずですが。種子を巡る、運ぶ側と運ばれる側の多様な共生関係は、多様な植物が共存する生態系を支えているのかもしれませんが。現在、この森林調査区画を利用して日本人やマダガスカル人のあらゆる世代の研究者たちが動物や植物の生態を研究しています。動植物だけでなく研究者もこの森で世代を更新しながら、面白い研究を生み出していきたいと思っています。

この記事は主に以下の論文をまとめたものです。

Sato, H. Significance of seed dispersal by the largest frugivore for large-diaspore trees. *Sci Rep.* 12: 19086 (2022).
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-23018-x>

出典 *1-2につきましては以下をご参照ください。

*1 Sato, H. Frugivory and Seed Dispersal by Brown Lemurs in a Malagasy Tropical Dry Forest. *Biotropica.* 44: 479-488 (2012).
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2011.00838.x>

*2 Sato, H. Predictions of Seed Shadows Generated by Common Brown Lemurs (*Eulemur fulvus*) and Their Relationship to Seasonal Behavioral Strategies. *Int J Primatol.* 39: 377-396(2018). <https://doi.org/10.1007/s10764-018-0057-3>



佐藤 宏樹 (さとう・ひろき)

奈良県出身。京都大学大学院アジア・アフリカ地域研究研究科博士後期課程修了。京都大学霊長類研究所・日本学術振興会特別研究員を経て、現在同大学院アジア・アフリカ地域研究研究科准教授。専門は熱帯生態学、霊長類学、民族生物学。マダガスカルをフィールドとし、動物、植物、人を結ぶ生態系保全のあり方を探っている。

生きものの多様性の源泉を探る 〈分子構造の進化から見る世界〉



タンパク質の構造-機能の理解を通して生きものの多様性の源泉を探るべく、第一線で活躍する研究者がプレゼンテーションとディスカッションを繰り広げました。研究に対する熱意やワクワク感、これから研究者を目指す人々へのメッセージをお伝えします。

CHAPTER

1. はじめに
2. 座談会 (伊原さよ子 × 田上俊輔 × 小田広樹)
3. 企画・進行役を務めた小田広樹室長より

1. はじめに

Academiaではご登壇頂いた研究者の方々の、研究に対する熱意やワクワク感、これから研究者を目指す人々へのメッセージをお伝えします。今回のシンポジウムでは、伊原さよ子さんと田上俊輔さんをお招きし、タンパク質の構造-機能の理解を通じて見える、生きものの多様性の源泉についてプレゼンテーションとディスカッションを繰り広げました。ここでは、後半の座談会からタンパク質を扱う第一線で活躍する2人の研究者が語る、研究との向き合い方についてのお話をお届けします。聞き手は当研究館の細胞・発生・進化研究室の小田広樹室長です。



小田広樹
(おだ ひろき)

JT生命誌研究館
大阪大学大学院理学研究科



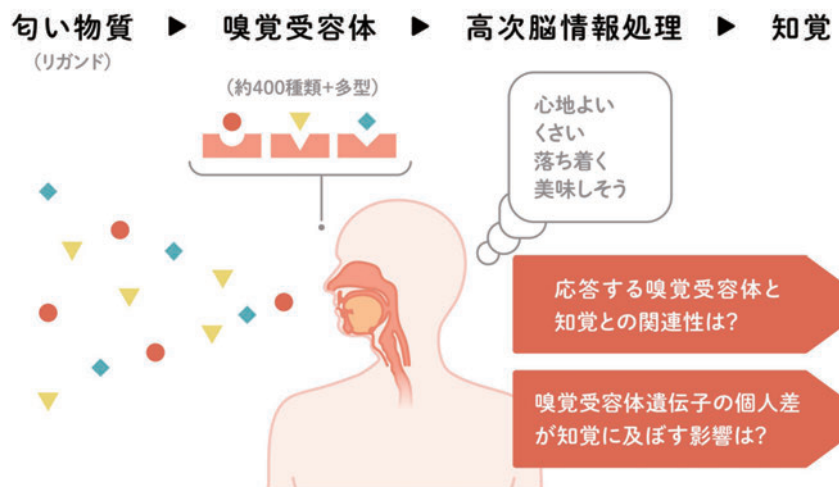
2. 座談会(伊原さよ子 × 田上俊輔 × 小田広樹)

SPEAKER

伊原さよ子 (いはら さよこ)

東京大学大学院農学生命科学研究科

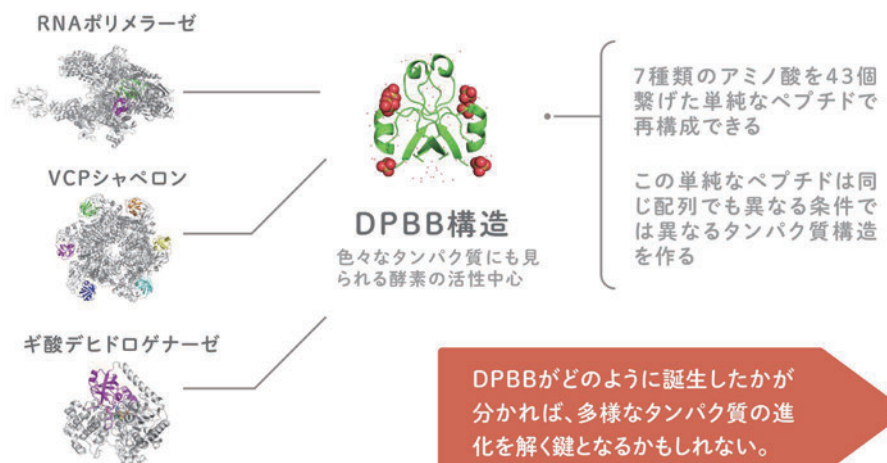
匂い知覚の仕組みを匂い受容体を切り口として理解すべく、研究を進めています。ヒトでは匂い受容体が約400種類存在し、異なる匂いに応じて、複数の受容体が異なる応答パターンを示し、そのシグナルが脳に伝達され、知覚へと至ります。しかし、匂い受容体応答パターンと知覚との関連性についてはほとんど明らかになっていません。私たちは遺伝子の個人差を区別できるように構築したアッセイでの受容体応答パターンをもとに、匂いの感じ方との関連性を調べ、特定の匂い知覚に鍵となる受容体や、個人により感じ方の差を生み出す受容体を明らかにしようとしています。これらの研究を通じて、近年、実社会で期待が高まっている香り活用の促進に貢献したいと考えています。



田上俊輔 (たがみ しゅんすけ)

理化学研究所生命機能科学研究センター

合成生物学・構造生物学的手法を用いて機能性生体高分子の開発に取り組んでいます。ペプチド・RNA の試験管内進化、タンパク質のX線結晶構造解析などの技術を組み合わせることで細胞の動態を制御する分子を作成し、医療や基礎生物学への応用を目指しています。さらに、同様の技術を活用して、生命誕生からのタンパク質の進化過程の再現にも挑戦しています。



目の前の結果が真実かもしれないと疑う姿勢 —— 研究の醍醐味



小田 今日はお2人のお話を聞けるのを楽しみにしていました。まずは伊原さんから、研究を進める上で最もやりがいを感じられる部分や、研究の醍醐味について教えていただけますでしょうか？

伊原 やはり、当初立てた予想を裏付ける結果が出ると嬉しいです。例えば、匂い応答パターンを取得できる既存のアッセイ系ではまったく見えなかった応答が、感度を上げるなど独自の改良を重ねたことにより検出できた時は嬉しかったですね。他には一般的に言われていることと辻褃が合わない結果が出た時に、最初は失敗だと思っても、何度やっても同じ結果なので「もしかしたら目の前の結果が真実かもしれない」と素直に受け入れてみたら、思わぬ展開が生まれるということもあり、そういった時にも喜びを感じます。



小田 仮説通りに、思い描いた結果が出たときですか。

伊原 仮説ってそれほど大それたものではないのですが、一般的に言われていることや自分の経験則からくる直感と、自ら得たデータを突き合わせて立てた予想を裏付けるデータが出た瞬間は嬉しかったですね。こういうタイミングってそうそうないからこそ、上手くいった瞬間はすごく嬉しいですし、研究の面白さを感じます。

自分がすごいのではなくて、自分のサンプルがすごい

小田 田上さんはタンパク質の構造に特に想像を掻き立てながら研究をされていると思うのですが、田上さんの場合はどういうところに研究の魅力を感じていますか？

田上 僕の場合、最初に思った予想と、まったく違う結果になることが楽しいです。最初はこうなるのではないかとという予想を頭の中に予算の申請をしたり、研究員の方と最初の予想を共有しているのですが、現実当初の思い通りになることはなかなかないです。だからこそ、なぜか予想外の結果が出て、人間の頭であらかじめ考えていたことを上回る実験結果が得られる瞬間は研究にしかない魅力だと思います。

小田 自分が考えていたことを実験結果がはるかに超えてくることに対する楽しみですか。

田上 まさにその通りで、いつも僕は「自分がすごいのではなくて、自分のサンプルがすごい!」と思っています。自分のサンプルがすごいのは間違いないから、これからも遺伝子発現に関わるタンパク質の進化の研究を続けていきたいと思っています。



実験を失敗するのが楽しくなる——うまくいかない時の心構え

小田 次の質問ですが、予想にそぐわなかった結果が出た時、次への情熱はどのように湧きあがりますか？ やっぱり、学生の頃や若い頃は壁にぶつかると落胆して終わってしまうことがよくありますよね。

田上 そうですね。僕が学部4年性で研究室に配属された頃や、大学院生の頃は「俺が全ての謎を解いてやる」くらいの気持ちがあったので、思ったとおりにならないことや、失敗した時は落ち込むこともありました。

小田 研究をしていると誰もが一度は通る道ですよ。

田上 はい。そんな経験もあり、思ったとおりに行かなかったからこそ、より素晴らしい結果を得るという経験を一度してしまうと、それ以降は全然落ち込まなくなりました。それどころか今ではこれはチャンスだ! とまで思うようになりました。一回でも逆転の成功体験があると、皆さんも実験を失敗するのが楽しくなるかもしれないですね。ただ、そこに辿り着くまでは精神的になかなか辛かったなと振り返って思います。

小田 伊原さんはどうですか。

伊原 自分も失敗してしまった実験に落ち込まないメンタルは持ち合わせてはいるつもりで、「失敗」と思われた結果から真実を見出す大切さは認識しているのですが、現実問題、色々な締切やタスクがあると、その真実を探り出す労力や時間を考えてしまい、つい後回しになってしまいがちです。できることなら、時間をかけてでも「このデータには何か意味があるかもしれない」と、うまくいかなかった結果に何か別のアプローチができないか吟味していきたいです。

小田 期待通りの結果にならなかったデータのもつ可能性やその研究テーマを誰かに託す機会はありますか？

伊原 どうでしょう。特に上手くいかなかった実験のようなリスクの高いテーマは学生さんにはなかなか渡しづらいですね。自分の中で、新たな真実が隠されているのではないかと落とし所を考えるようにしています。

田上 一般的に多くの研究員の方々は任期が決まっているので、砂漠の中から砂金を探すようなテーマを丸投げするのはやっぱり考えてしまうところがありますね。もちろんそういうテーマだからこそ、燃える人もいます。

それぞれのタンパク質構造の見え方

小田 今回のシンポジウムではタンパク質の構造がテーマでしたが、実際タンパク質の構造って目には直接見えませんよね。それぞれの研究者の頭の中には、それぞれのタンパク質の世界があると思うのですが、みなさんはどのように頭の中でタンパク質を描いていますか？

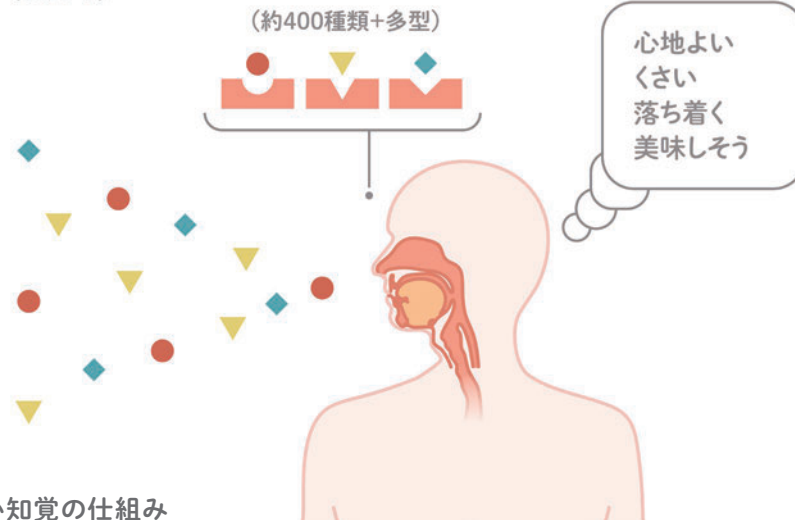
伊原 そうですね、実際のところ構造と一言と言っても活性との相関ありきです。私の場合は、匂いを感じる嗅覚受容体タンパク質が匂い分子であるリガンドに対してどのように応答するかに興味があるので、匂いを感じるという活性とリンクしている構造をイメージしたいのですが、過去の知見に結構支配されている面があるので、まっさらな状態から想像豊かに考えられてはいないのかなと思います。

小田 例えば、匂い分子のリガンドに対応しているいろいろな受容体の構造があると思いますが、そのあたりの対応関係などはどの程度イメージできていますか。

伊原 特に匂い分子の受容体については、ものすごく多様なんじゃないかと思っています。非常に幅広い応答性やリガンドの選択性を持つものもあれば、ごく少数のリガンドにしかなんて応答しないものもあります。対象範囲が全く異なるということは、それらの構造も全く異なるはずなんですよ。ただ嗅覚受容体の構造解析はリガンドと受容体のデータがそれほど蓄積していないので、それぞれにリンクした構造をイメージするのが難しいという現状があります。それが明らかになると、ものすごく面白くなるのではないかなと思います。現状AlphaFold*のような便利なソフトはありますが、こと嗅覚受容体の構造解析については、実際は安定した構造をとっていない可能性があるため一筋縄ではいかないイメージがあります。

*AlphaFold…タンパク質の3次元構造を、そのアミノ酸配列から高精度に予測できる人工知能プログラム。

匂い物質 (リガンド) ▶ 嗅覚受容体 ▶ 高次脳情報処理 ▶ 知覚



ヒトの匂い知覚の仕組み

小田

田上さんはどうですか。先ほどの講演は、リボソームとRNAポリメラーゼの構造の間の立体構造の間をつなぐ新しい構造を発見したお話でしたが、要素となる構造がかなり入れ替わっている気がしたんですけど。

田上

そうですね。構造がどう変換するのか考える時は、リボン図のレベルで想像していることが多いですね。あとはやっぱり立体構造だと人間の脳みそでは少し理解が難しい瞬間があるので、構造生物学ではよく使われるトポロジー図のような図に直して考えたりしますね。

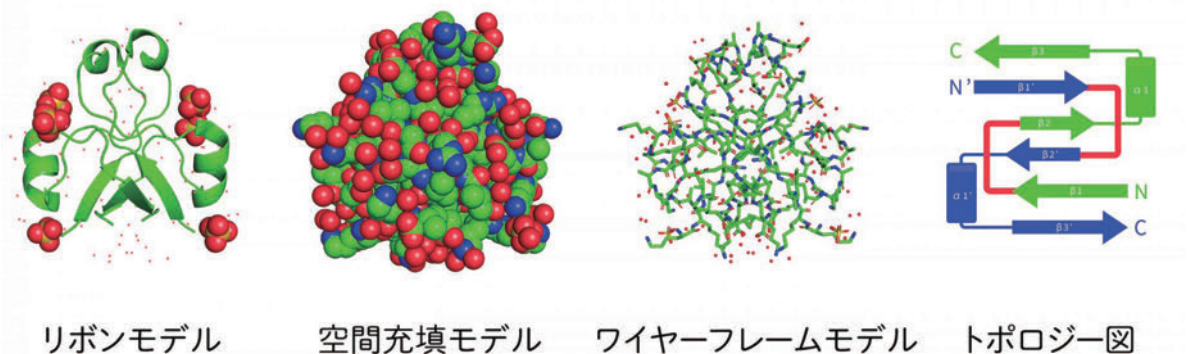
小田

わかります。ただ立体構造を頭の中で考えるだけでなく、視覚化すると見えてくるものがありますよね。

田上

ただ、僕は頭の中で構造について考える瞬間もあるみたいで、以前自転車に乗って職場から帰る時に、無意識に目の前にタンパク質の立体構造が浮いていて慌ててブレーキを踏んだことがあります。タンパク質構造ばかり見ていると、こういうことが起きえますので皆様も気をつけてください。

ホモ二量体 DPBB の色々な図の表し方



リボンモデル

空間充填モデル

ワイヤーフレームモデル

トポロジー図

今だから欲しいスキル・得たい知識

小田 それでは、もしもっと時間があつたらやりたいと思うことや、ご自身の研究の発展に欲しいスキルや知識などはありますか。

田上 私はそういうことがすごくたくさんありまして、生物学者としてキャリアを始めたのですが、生命の起源の問題って生物学の分野だけではなく、化学や地球惑星、物理学といった非常にたくさんの分野が関わっています。生物が生まれるところなのでその一步前の問題です。だからいろんなフィールドの分野がわかると研究にも活かせるし、何より自分が楽しいと思うんです。そういう意味では、学部1,2,3年の頃に受けていた講義をもう一回きちんとやり直して、教科書を読み直したいなと思いながら、教科書を買って積んでおります。(笑)

小田 積んだけどまだ読んでいないんですね。

田上 1冊くらいは読んだんですけど、まだたくさん積んでおります。

小田 伊原さんはいかがですか。ヒトの嗅覚となると必要な知識が多そうですが。

伊原 私は元々生化学を専門にやってきたので、進化とか生物学寄りのことを体系的には学んではいないんです。今は嗅覚のような感覚の研究をやっているのもっと生物のことを勉強したくなります。私も教科書を読もうと思いつつ積んでおります。(笑)

小田 忙しいとついつい後回しになってしまいますよね。

伊原 はい。あとは情報系にとっても疎いので、ビッグデータを扱えるスキルを身につけたいです。次々に新しい技術が出る今の世の中で、今日皆さんのお話を聞いてもっともっと勉強したいなと思いました。

研究者になるために必要な素質とは

小田 最後に会場からの質問です。皆さんが思う研究者になるための素質というものはありますか？

田上 僕は自分が研究者に向いているのかはわからないのですが、研究というのは学生時代の5-6年の短いスパンではないので、続けられるのは自分の性格や環境といった運の要素も影響すると思います。現実はやっぱり思い通りにいかないことも多いので、そう

いうのを丸ごと楽しめる姿勢が大事なことかなと思います。楽しめないと失敗ばかりの仕事ってどうしても辛くなっちゃうと思うので。

伊原

私は研究を続ける上で大事なことは、情熱を持ち続けられることだと思います。素質というよりもいかに持続して行動に移し、いかに諦めずに続けられるかが重要で、そういう人が向いているのかなと思います。



おわりに

3.企画・進行役を務めた小田広樹室長より

小田広樹 室長（細胞・発生・進化研究室）

有史以前から人類文明は石器、青銅、鉄器、最近では光ファイバーや導電性ポリマーといった素材を手に入れることによって、発展を遂げてきました。人類文明で新たな素材が出現すると、新しい使い道や多様性が生じたように、我々生きものの世界にも同じことが起きているのだと考えました。例えば、細胞の新たな構成成分や酵素・シグナル・成分・輸送や分配などのタンパク質といった素材の出現によって、生きものは多くの役割や能力を得て多様化してきました。そこで生きものの歴史や進化を、もっと素材に注目して考えられないだろうかと思い、今回のシンポジウムを企画しました。皆さまにとって素材から生きものの進化を考える機会に寄与できればと考えています。



PAPER CRAFT

超遺伝子(スーパーゼーン) 表現多型を生むゲノム



動物は様々な色や形をもち、同じ種の中でも異なる姿形をしていることがあります。これを多型といい、多型を生み出すしくみの一つが、超遺伝子と考えられています。**超遺伝子については、113号の記事の3.超遺伝子(スーパーゼーン)**で解説しましたので、ご覧ください。



1. 4つの性をもつ小鳥

ノドジロシトド(*Zonotrichia albicollis*)は、北米大陸では身近に見かけるスズメに似た小鳥です。和名のシトドはホオジロを表し、スズメ目ホオジロ科であることを示しています。この鳥の特徴は、同じ鳥に羽色の異なる白型(White-Stripe: WS)、茶型(Tan-Stripe: TS)の2つの型がいることです。鳥には、クジャクのようにオスだけが派手なものや、ウグイスのようにオスがさえずりメスを誘うものなど、メスの好みで雌雄の違いが進化したとされる例があります。しかし、ノドジロシトドの場合は、それぞれの型にオスとメスがいます。さらに興味深いことに、白型の羽色は繁殖期に現れ、白型のオスは茶型のメス、茶型のオスは白型のメスとつがいになるという現象が観察されています。これを非同類交配と呼びますが、ノドジロシトドには「あたかも4つの性があるようだ」と言われる所以です。



(図1) ノドジロシトドの白型WS(左)茶型TS(右)

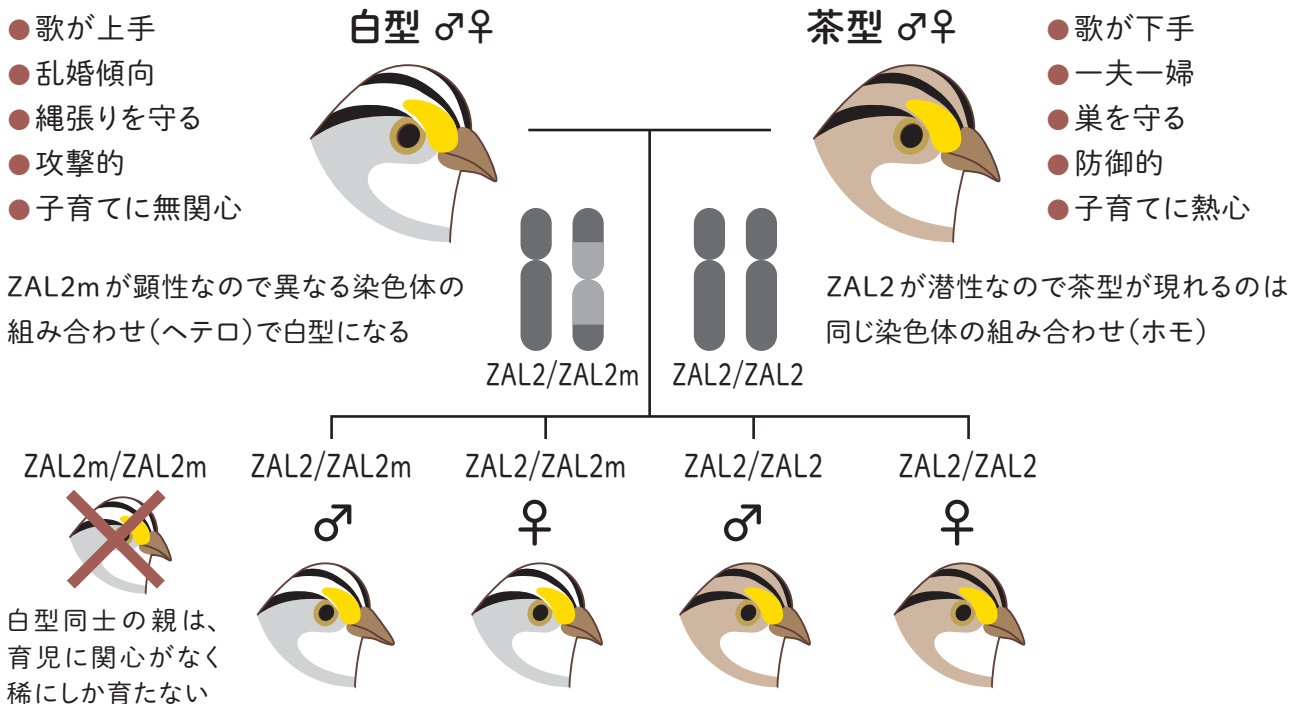
2. 白型と茶型

白型は、頭の縞模様が白と黒でノドの白もはっきりしています。茶型は、頭の縞やノドの羽色が茶色がかっています。ですが実際に鳥を前にすると、その姿よりもまず白型のオスの美しい歌声が耳に

とどくようです。歌の上手な白型のオスは、歌声で縄張りを主張し、つがい相手を誘います。性格は攻撃的で子育てには積極的ではありません。一方、茶型は歌は上手くありませんが、子育てに熱心で外敵から巣を守り、一夫一婦を通します。メスにもその傾向があり、白型メスは子育てを茶型のオスに頼り、茶型のメスは子育てに協力的でない白型オスをよそに子育てに励みます。オスの繁殖の戦略としては、白型は多くのメスと交配して子孫を残すチャンスを広げ、茶型はつがい相手と雛を自ら守って世代をつなぐのです。どちらか一方の戦略をとる鳥はいますが、同じ鳥の多型が違う戦略を選ぶのはノジロシトドのユニークな特徴と言えます。

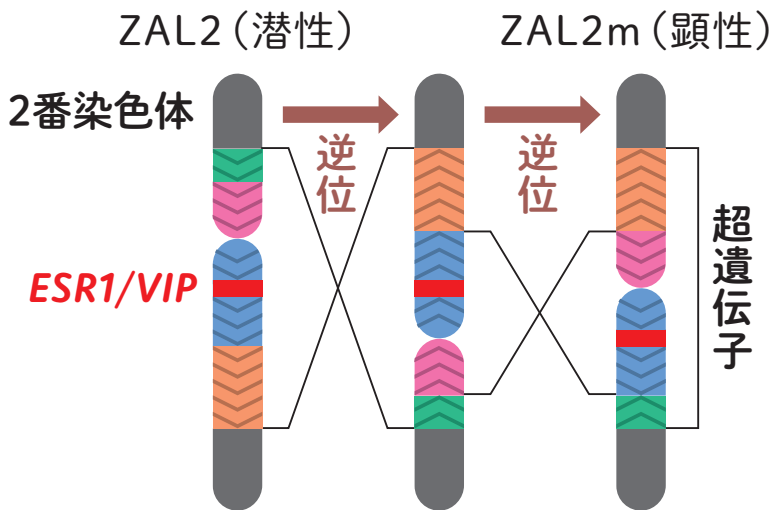
3. 逆位がつくった超遺伝子

2つの型の違いが、遺伝的に決まっていることは、50年以上も前から鳥類学者のソニークロフトによって指摘されていました。2番染色体に注目すると、茶型では2本同じものを持っています(ホモ)が、白型は組み合わせが異なっていました(ヘテロ)。メンデルの法則に則ると茶型の染色体ZAL2は潜性遺伝を示し、白型の染色体ZAL2mは顕性遺伝となり、茶型と白型がつがうことで半数ずつの割合が保たれます。白型の染色体ZAL2mを調べると、大きな逆位がありました。逆位は、染色体の一部をひっくり返した構造で、逆位が起きた領域は、減数分裂の際に正常な染色体との間に相同組み換えが起こりません。そのためDNAに起きた変異が除かれにくく蓄積していくのです。多くの場合、変異は有害で、両方が逆位染色体である白型(ZAL2m/ZAL2m)がほとんどいない理由と考えられます。



(図2) 白型と茶型の染色体の遺伝

しかし、逆位となった領域が常に一緒に遺伝するので、そこに存在する遺伝子が協調してはたらき、「超遺伝子」として新しい形質を生みだすことがあります。ノドジロシトドでは逆位染色体は、白型の特徴である羽色や歌声などを進化させました。詳しく調べると茶型の染色体に対して白型の染色体では、逆位が複数回起きていて塩基数にして約1億になり、そこには1000個以上の遺伝子が存在しています。これらの遺伝子の中に羽色や行動に関わる遺伝子があると推測され、解析が進められています。



(図3) 逆位による茶型染色体ZAL2から白型染色体ZAL2mへの変化

4. 行動と遺伝子

鳥の性差や繁殖行動に性ステロイドホルモンが関わるということが知られていますが、逆位領域にエストロゲン受容体 α の遺伝子*ESR1*が見つかりました。このはたらきを白型と茶型の脳で比較したところ、白型の脳では扁桃核で増加しており、茶型では、視床下部と内側視索前野で増加していました。扁桃核は、哺乳類では情動や社会行動に関わる扁桃体にあたり、白型の攻撃的な行動と関わりと考えられます。一方、茶型で増加している内側視索前野は、子育て行動に関わるということが知られ、茶型の特徴と適うことがわかりました。両者の違いは、ZAL2m染色体のDNAの変異によって*ESR1*が脳内ではたらく場所が変化したためです。さらに、他の動物で攻撃や子育ての行動に関わる遺伝子として知られるVIP(血管作動性腸管ペプチド)も同じく逆位領域にあり、白型で繁殖期に縄張りを守るさえずりの増加や茶型オスの給餌行動との関わりが調べられています。



(図4) 白型、茶型の*ESR1*遺伝子の脳内のはたらく場所と行動の関わり

5. つがいの謎

白型と茶型がつがう理由は、野外の調査で、ほとんど同種同士のつがいがいないことから様々な考察がされています。メスはいずれも攻撃的な白型オスよりも温和な茶型オスを好むという観察があります。そこで茶型オスと白型メスがつがうのは、メスでは白型が茶型より積極的なので、好みの茶型オスを手にいれるようです。また、オスにとっては同型のオスはメスを争うライバルなので、メスに対しても警戒してしまうので近づけないという解釈もあります。しかしこの理由では、メスが白型オスの美声になびかないなら、なぜ白型オスの歌が進化したのか疑問が残ります。先にも触れた通り白型同士の組み合わせは、ZAL2m/ZAL2mが有害変異をもち、どちらも子育てが苦手なので子供が育ちにくいことから、異なる相手を選ぶものが生き残ってきたとも考えられます。超遺伝子のはたらきで、姿と行動、遺伝子が結びついたノドジロシトドの暮らしぶりを紙工作で作りながら想像し、進化の謎に迫ってみましょう。

参考文献

- Nature Japan Nature ダイジェスト Vol. 14 No. 2 News Feature 4つの性がある小鳥
- Bolton PE, Balakrishnan CN. Behavioral Genetics: Dissecting a Supergene to Understand Behavior. *Curr Biol.* 2020 Dec 7;30(23):R1438-R1441
- Maney DL, Küpper C. Supergenes on steroids. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 377(1855):20200507 (2022)
- Maney DL, Merritt JR, Prichard MR, Horton BM, Yi SV. Inside the supergene of the bird with four sexes. *Horm Behav.* Nov;126:104850 (2020)
- Horton BM, Michael CM, Prichard MR, Maney DL. Vasoactive intestinal peptide as a mediator of the effects of a supergene on social behaviour. *Proc Biol Sci.* 287(1924):20200196 (2020)
- E. M. Tuttle. Alternative reproductive strategies in the white-throated sparrow: behavioral and genetic evidence *Behavioral Ecology* 14 (3), 425-432(2003)
- Philip W Hedrick, Elaina M Tuttle, Rusty. A Gonsler Author Notes Negative-Assortative Mating in the White-Throated Sparrow *Journal of Heredity*,109:3,223-231(2018)



ノドジロシトド
ダウンロードはこちら

PAPER CRAFT DOWNLOAD



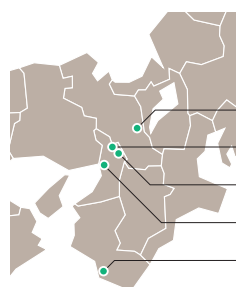


INVITATION

個性あふれるさまざまな食草園が 生まれています

2003年に研究館で誕生した「Ω食草園」は、チョウが卵を産みつけ、幼虫が育つ植物を集めたお庭です。私たちは「あなたの街にも、食草園をどうぞ」という働きかけを行い、これまでにいくつかの地域で、それぞれの想いが詰まった新たな食草園がオープンしました。これらの食草園はひとつとして同じものではなく、子ども達がチョウの成長過程を見守る場として活用されたり、都市の中に息づく生きものの観察の場として親しまれたり、さまざま形で活躍しています。スタイルは違っていても、身近な生きものの暮らしから私たち人間を考える、生命誌の想いの場であることに変わりはありません。

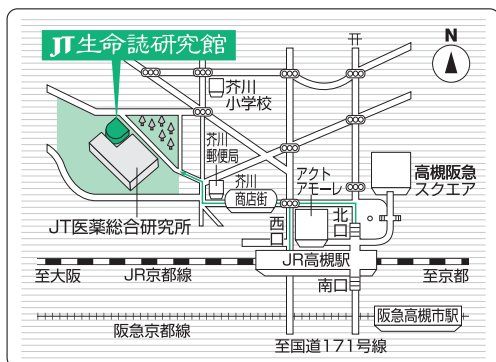
京都府立植物園「食草園 - いもむしのレストラン -」



お近くの食草園に
ぜひお立ち寄りください

京都府立植物園
JT生命誌研究館
高槻市役所
グラングリーン大阪
アドベンチャーワールド

詳しくはこちら



JT生命誌研究館

〒569-1125 大阪府高槻市紫町1-1

Tel:072-681-9750(代表) Fax:072-681-9743

開館時間 10:00-16:30 入館無料

休館日 毎週月曜日/年末年始(12月29日-翌年の1月4日)

最新の開館情報はサイト(www.brh.co.jp)でご確認ください。

交通 JR京都線高槻駅より徒歩10分

阪急京都線高槻市駅より徒歩18分

JRのご利用が便利です。