

トーク&ディスカッション (18) 事後報告

ボルボックスで見る多細胞生物への進化
～生物教育での取り扱いを考えよう～

開催日 2025 年 5 月 24 日(土)13:30～15:30

話題提供者 奈良女子大学理学部生物科学 西井一郎教授

参加者 話題提供者含めて 17 名

I 講演の概要

講演内容については、伊藤政夫さんが Volvox ML に紹介してくださった。それをもとに、少しの修正を加えたものを以下に紹介します。

最初に、高校でどのように習っているのか気になること というテーマでいくつかの話題 (1～5) がありました。(※は伊藤のコメントです。)

1 葉緑体とミトコンドリアの外膜は細胞内共生した際の宿主細胞の膜由来か？

祖先のシアノバクテリアやプロテオバクテリアはグラム陰性細菌であり、もともと二重の膜構造をもっている。現在の考え方は、取り込んだ際の宿主細胞の膜は消失して、バクテリア由来の二重膜が内膜、外膜となっているというものである。The Cell 第6版には、そのように記載されているが、第5版には外膜は宿主由来と書いてあった。

*現在の多くの教科書には、膜については書かれていません。以前から外側の膜はあやしいと聞いていましたが、今でも教科書の図には、宿主細胞の膜が取り囲むように描かれていますし、図表などにはまだ記述が残っているので、そのように説明しがちです。内外2枚の膜が、バクテリア由来といえるなら、それも共生説の根拠としても良いのではと思いますが。

2 光合成は呼吸の逆反応ではない

反応式で書く場合に、光合成で合成されるのはグルコースではないのに、 $C_6H_{12}O_6$ を書くのは誤解を招く。

*教科書では、光合成で実際に合成されるのはスクロースやデンプンで、それをグルコースに換算した形で記述しています。シンプルに表現しないとわかりにくいので、私はやむを得ないと思いますが。逆反応だと思ってしまっている学生がいるということでしょうか。問題点をもう少し伺いたいと思いました。

3 細胞の有糸分裂 核膜消失するかしらないか

4 多細胞生物の起源？

5 顕微鏡と細胞説 (1838/39)

複式顕微鏡? 1600 年頃 ヤンセン父子

フック Cell - Micrographia 1665

フックのものは複式顕微鏡でレーウェンフックのものは単式顕微鏡

レーウェンフックの顕微鏡は、倍率が高くボルボックスも観察していた。フックのものは低い倍率で性能はそれほどではなかった。細胞説は 1838 年、1839 年であるが、その間は細胞というものについて、どのように考えられていたのか?

* 3~5 については、あまり時間を割くことができなかったので、またゆっくりお話を伺いたいと思いました。

ここから本題に入りました。

ボルボックスは、体細胞と生殖細胞の 2 種類からなる。体細胞は約 2000 個で、細胞が小さくべん毛をもつ。生殖細胞は 16 個が基本で、サイズが大きく無性生殖で次世代をつくる。リンネによって命名された。volvo とはラテン語で「回転する」という意味である。

現在主に研究に用いられているのは、*Volvox carteri* という種であり、アメリカ人の Richard C. Starr が兵庫県で採取して単離したオス、メスが、世界に広まったものである。

生物の進化において、単細胞生物から多細胞生物への進化過程はよくわかっていない。ボルボックスなどの群体は、その中間に位置する存在として、注目されている。

研究室では、ボルボックスを 16 時間明期、8 時間暗期という条件で培養しており、2 日間のサイクルで、内部の生殖細胞が成熟→分裂→インバージョン (反転) →細胞分化・体積増大→若い個体のふ化を繰り返している。ふ化の際には、ハッチングエンザイムと呼ばれる酵素で、親の細胞を分解しているが、このとき子の細胞が分解されないのは、別の遺伝子 (LSG2) 産物がないためであることがわかっている。

単細胞のクラミドモナス、8~16 細胞のゴニウム、16 細胞のパンドリナ、32~64 細胞のユードリナ、64~128 細胞のプレオドリナなどの近縁種がある。ゴニウムでは不完全ながら反転運動が見られる。パンドリナまでは、細胞間にすきまがないが、ユードリナからは細胞外基質が増えて細胞間の距離が開く。またプレオドリナからは生殖細胞の分化が見られる。

ボルボックスの通常的生活環は無性生殖であるが、オス、メスがあり、メスの体内に卵細胞がつくられて、オスにつくられた Sperm packet と呼ばれる構造が、メスの体内に精子を

放出して受精が起こり、赤い接合子をつくる。

実習材料としてボルボックスを使う場合には、入手先として国立環境研究所微生物系統保存施設 (<https://mcc.nies.go.jp/index.html>) や岩国市マイクロ生物館原生物培養株分譲サービス (<https://micro.shiokaze-kouen.net/info/page364.html>) などがある。培養方法は環境研のHPに書かれているが、1, 2週間なら室温で日の当たるところで維持できる。冷やさない方がよい。35℃くらいまでなら大丈夫。教材としての使い道としては、クラミドモナスや他の群体などと一緒に観察する、べん毛運動の観察、走光性の実験などがあげられる。大学の実習では、前後軸や胚の極性などの観察も行っている。インバージョン (反転) を観察するには同調培養すると良いが、45 分間くらいかかるので、タイムラプス撮影が必要だろう。

動物における多細胞化は、単細胞の襟べん毛虫類に群体性のものがあり、これが起源という考えもある。ボルボックスの多細胞化は分岐が2~2.5億年前で、動物や植物などの多細胞化が4.5億年以上前であることと比べると比較的最近のことである。そのため、ボルボックスは多細胞化を考える上で、発生現象がシンプルで解析しやすい非常にユニークなモデルである。

多細胞化したのが最近なので、発生現象がシンプルで解析しやすい

- ・生殖細胞と体細胞の分化
- ・多細胞生物の形作り：胚の**形態形成運動**、**ECMの構築**
- ・有性生殖における**個体間の情報伝達**(フェロモン)
- ・**卵生殖**：卵と精子

↓

単細胞から多細胞への進化(**多細胞化**)がどのようにして起こったかを**分子レベル・ゲノムレベル**で解明できるモデル

生殖細胞は、第6分裂の際に上部半球の16細胞が非対称分裂して生じる大きな細胞に由来する。その時点で体積比が30倍にもなる。その後液胞が発達して急速に成長し、体積比が1000倍にもなる。体細胞と異なり、べん毛や眼点がない。体細胞は細胞死するが、生殖細胞は分裂して次世代となる。

reg 遺伝子は、体細胞が生殖細胞化するのを抑制するはたらきをもち、Reg (somatic regeneration) 変異体は体細胞が生殖細胞化する。細胞の大きさが分化の運命を決めるため、ヒートショックにより胚の分裂回数が減って細胞が大きくなると多くの細胞が生殖細胞になる。また細胞分裂がランダムに停止するPcd (premature cessation of division) 変異体では、サイズの異なる細胞が生じ、直径8μm以上の細胞が生殖細胞になる。さらに顕微操作で人工的に大きな細胞をつくると、生殖細胞に分化する。以上のことから、分化決定因子

や分裂回数ではなく、細胞の大きさそのものが分化を決定すると考えられる。生殖細胞への分化は、プレオドリナ以上でみられるが、RegA 遺伝子クラスターはパンドリナ以降に存在していることから、その役割については今後の研究が必要である。

ボルボックス胚のインバージョンの際には、紡錘型の細胞が伸長してフラスコ型と呼ばれる細長い細胞になり、細胞どうしをつなぐ原形質連絡に対して細胞が移動する。その後、原形質連絡の部分の支点にするように反転が起こる。反転前は、生殖細胞が外側、べん毛が内側にあるが、反転によって入れ替わる。パンドリナで原形質連絡の形成を抑えると球形ではなく、ゴニウムのような平たい形になる。原形質連絡の構築は、細胞間をつなぐのに必須な構造であり、多細胞化への重要なステップだと考えられる。

最後のまとめ：

- ・ボルボックスはゲノム情報、分子生物学的手法が利用できるモデル生物である。
- ・ボルボックスは、「細胞分化（非対称分化、生殖細胞と体細胞の分化）」「形態形成（インバージョン、細胞外基質の構築）」「卵生殖」等の減少が比較的簡単に研究できる。
- ・変異体を淡利子、原因遺伝子を同定・解析することができる。（現時点ではトランスポゾンを用いる必要あり）
- ・ボルボックスの多細胞化は、他の多細胞生物よりも最近に起こった。従って、単細胞から多細胞への進化を探る、他にはないモデルとなる。

講演後には、活発な質疑応答もありました。

その中で、反転する際の十字の切れ込みは、もともと原形質連絡がない部分であるという話や、ボルボックスには向きがあり、生殖細胞が少ない側が上側で上下軸を中心に回転しながら上側を前にして進む。それは、各細胞から伸びるべん毛が下側に傾いて運動することにより実現する。光が強い側は弱く、弱い側は強く運動することで、光走性が実現するという話がとても興味深く深いと思いました。

話題豊富で、予備知識の少ない私には、追いきれない部分もありました。特に後半はかなりダイジェストになっているかと思いますが、とりあえず以上とさせていただきます。

改めてボルボックスは美しく興味深い生物なのに、教科書からはほぼなくなってしまったことが残念だと思いました。

II 質疑応答

(まとめは、生物教育研究所 西郷孝研究員による)

Q：生殖細胞は最初に 16 個できると言う話だった。写真で見ると 19 個あるが、なぜか？

A：実験室での培養ではそれ以上できることがある。32 細胞になったとき、北極側の 16 細胞が生殖細胞になるが、栄養状態によっては増えたり減ったりすることがある。

Q：接合子の保存方法について、冷蔵庫に入れてしまったが・・・。

A：冷蔵庫でも大丈夫のはず。1 年間ぐらいなら良さそう。数が多ければ出てくるものもあると思う。クラミドモナスの場合はできるがディープフリーザーが必要。

Q：「北極側」とは？

A：将来（インバージョンの）穴があく側を「北極側」と呼んでいる。ひっくり返るとこの部分は下にいくので、そちら側に娘群体ができることになり運動する方向としては「後方」となる。

Q：進む方向はどのように同調して動いていくのか？

A：前後軸が決まっているので、各細胞は軸に対して位置関係が決まってくる。光が強い部分の細胞は鞭毛の動きを弱くして、光が弱い部分の細胞は鞭毛の動きを強くするので、結果的に全体として光の方向に向かうことになる。湖沼にいるボルボックスのなかには、昼は水面にいるが、夜は底面にいるものがある。水面には多くの生物が集まるので無機塩類が乏しくなり、夜は無機塩類の多い底面に移動することが知られている。

Q：クラミドモナスは接合後すぐに減数分裂をして n の細胞になってしまうが、多くの生物では $2n$ の細胞のままとどまっている。このことと多細胞化とは関係があるのか？

A：より複雑になるには $2n$ の方が向いている可能性はある。よく言われるのはコケとシダの関係で、コケは n の体が中心だが、シダでは $2n$ が本体となっている。有性生殖が進化における重要なイベントであったことは間違いない。

Q：ボルボックスの前後で細胞の大きさが違うように見えるが、インバージョンの影響があるのか？

A：前後で細胞の密度が少なく見えるということは、細胞が少ないことによるのか、その細胞が多く細胞外基質を分泌したかのどちらかである。細胞の大きさはそれほど変わらないと思う。インバージョン時に何かあるわけではなく、その後に細胞外基質の分泌に差が出てくるからだと思う。理由は分からないが、後方にある生殖細胞は細胞外基質を分泌しないのでその影響かもしれない。前方の細胞の方が運動に特化（体細胞に特化）しているという話もある。

Q：インバージョンして全部の細胞が後方を向いているということだが、それはイメージとして原形質連絡がつながっている部分で引っ張られているからなのか？細胞だけ見ているとよく分からないのだが。

A：重要なのは鞭毛がどちらを向いているかということで、細胞の位置が決まれば鞭毛の動く方向も決まってくる。分裂の方向を決めているのは基底小体である。*V. carteri* では、3~4 時間後には原形質連絡がなくなってしまう。しかし、そのまま切れてしまっ

互いの方向が変わってしまうことも考えられるが、そうならないように原形質連絡が切れる前に（むしろインバージョン後すぐに）鞭毛の根元のところから細胞外基質で細胞を固定する形になるように細胞外基質が分泌される。

Q：V. carteri 以外ではどうなるか？

A：種によって、原形質連絡の有無は様々。

Q：昼は水面で、夜は底面という話が出たが、ボルボックス以外の藻類もそうするのか？

A：V. carteri の話だったかは覚えていない。David Kirk 博士が書いた“Volvox”という本に文献等も載っている。

Q：顕微鏡に取り付けたカメラを作ったという話だが、自分でも作ってみたい。

A：そんなに難しくはない。市販のパーツを組み合わせるだけでできる。2 万円から 2 万 5000 円ぐらいだと思う。

Q：細胞群体の例として、ゴニウム、パンドリナ、ユードリナ、プレオドリナなどがあげられるが、細胞の分化はプレオドリナ以降と言って良いか。

A：生殖細胞と体細胞の分化という意味ではプレオドリナ以降とするのが分かりやすい。

（注 西郷）次の質問参照。ゴニウム、ユードリナなどでは、すべての細胞が分裂して次代の個体を作る、そういう意味ではすべての細胞が生殖細胞といえる。しかし、プレオドリナとボルボックスでは分裂して次代の個体を作らない細胞が存在する。それらは体細胞ということになる。

Q：ゴニウム、パンドリナ、ユードリナで細胞が集まって群体を作っている意義は何なのか？ それらは、切り離しても細胞として生きられる、と聞いたことがあるが。

A：バラしても細胞としては生きていけるが、集まっているときと同じようにはいかない。

16 個の細胞できているゴニウムは、真ん中の 4 つの細胞と周辺の 12 個の細胞で鞭毛の動く方向が違っている。これもある意味「分化」と言えるかもしれない。ゴニウムの場合、体細胞であり生殖細胞でもある。ユードリナについては生殖細胞と体細胞という分け方ではないが、前側の細胞は常に小さくてそこから生まれる次世代は細胞の数が少ないということがある。眼点の大きさも前側と後ろ側で違っている。

Q：ボルボックスを培養していると、そのうちに形がおかしくなってくることもあるが、何が原因なのか。

A：そのようなことはよく起こる。至適の状態ではないということだと思うが、原因を特定することは容易ではない。研究室ではエアレーションしているのが良いのかもしれない。

Q：エアレーションはどの程度か？

A：ポコポコという程度。

Q：インバージョンするときに、十文字に切れ目があるのが不思議なのだが。

A：ボルボックスは平たい紙の端が合わさったものと考えると分かりやすい。もともと切れ目の部分であって「切れ目が新たにできるわけではない」と考えればよいのでは。

チャット欄への書込みコメント：微細藻類とくにボルボックスが好きで、ずっと西井先生のお話をお聞きしたかったので、本日参加できて、興味深い内容でとても勉強になりました。もっともっと西井先生のお話を聞いてみたいのですが、機会はないでしょうか？(実習・実験も見学・体験できたら最高なのですが)もし次のセミナー・講演会・学会等のご予定があれば、教えていただけるとありがたいです。
実は以前、奈良女子大学のオープンキャンパスにも参加したことがあるのですが、西井先生は出張中とのことでお話をうかがえず残念でした。中学生のときです。

Ⅲ 実施後のアンケート結果 (まとめは、生物教育研究所 片山舒康所長による)

- ◆アンケートの回答者数 12名
- ◆回答者の年代 30歳未満：1, 30代：1, 40代：3, 60歳以上：7
- ◆今回の催しをどのようにして知りましたか
 メーリングリスト(5) 生物教育研究所のウェブサイト(1)
 生物教育研究所員・知人の紹介(5) ボルボックス関連イベントのネット検索(1)
- ◆今回のテーマについて とても興味深かった(12)
- ◆内容の難易度 やや難しかった(6) ふつう(6)
- ◆参加者のご感想・ご意見 (感謝の言葉など一部略)
- *ホルモンの話とかは正直知りませんでした。とても興味深く聞かせていただきました。
 教材化については、ご教示いただいた鞭毛の観察や光走性のところだけでも何かできないか模索してみようと思います。
- *難易度は普通、と書きましたが、難しいお話をわかりやすくお話いただき、自分で理解できる部分を楽しく学ばせていただきました。ボルボックスについて、研究者のお話をお伺いすることができ、深く知ることができ面白かったです。
 以前はボルボックス他、群体類を培養していましたが、その種は今日お話のメインであったカルテリではなかったのだとわかりました。
 去年は、多分、カルテリを生徒実験で観察しました。インバージョンも、モニターに映している時に見えました。温度が上がると性誘導されるということなど、なるほどと思うことがたくさんありました。去年は、最後はオレンジ色になって、接合子ができました。実験室は暑いので、生徒実験が終了して少し経つところに接合子になりました。
- *教科書から消えていった(古い位置づけでの扱いのままでは科学的に適切ではなくなってしまった)のを見てきた世代で、新しいトピックスにもバラバラと断片的に触れてきた状況だったので、いま、どのように捉えてこの仲間を教室に持ち込めば良いのか、ずいぶん整理ができた気がします。原形質連絡のでき方や、もともと細胞が平面的に並ぶ仲間から細胞数が増えて球体を作るようになったこと、そのことと、インバージョンの切れ目とがつながるとは思いもよらず、どんな生物も進化の産物、ということ改めて深く感じました。また「生殖細胞がデフォルト」で小さな細胞はそうならないように抑えるという遺

伝子のお話も、なるほど、もとはみんなそれぞれが次の個体になる細胞だった、ということとすんなりつながって、腑に落ちました。「生殖細胞が分化する」と捉えるのではなくて、多細胞になるというのは体細胞をつくるコトなのだ、という、「ものの見方」を変えるきっかけになる教材だと感じました。鞭毛の向きと泳ぎ方の話も面白かったです。参加できて良かったです。

*ボルボックスについて今回いろいろ学ばせていただき、細胞群体という興味深い教材が、高校の教科書からなくなってきているのが、大変残念だと改めて思いました。また、図表にはボルボックス以外は細胞の分化がみられないという表現があったりするので、なぜ群体になっているのだろうと思っていましたが、お話を伺って小さな分化がいろいろ見られることがわかって納得しました。

*とても興味深いお話で、楽しかったです。ボルボックスはとても綺麗なので生徒に見せるのが楽しみでした。やんちゃな生徒も感動してくれました。そのころは不勉強でインバージョンのことも知らなくてこんな劇的なことが起こることをちゃんと知っていればもっと面白く見せられたかなと思いつつ、でも 私としては 田んぼの中にこんな綺麗で不思議な生き物がいるということを生徒に見せることがまず大事かなと思っています。

*丁寧さまざまな事を解説していただき、今更ですが、高校生にも聞かせてあげたい内容でした。

*大変おもしろい新たな事実についても知ることができました。

私としては原形質連絡の形成と構造の関係、クラミドモナスの分裂期の細胞間の連絡構造の研究が一番面白く感じました。

不完全（この表現はあまりよくないのでしょうか？）な分裂が生じるしくみ、時期によっては完全に分離するしくみなどがわかると楽しいなあと思いました。

接合子からの目覚めは、私は難しいかなと思っています。チャレンジしている業者の人も成功してないのではと勝手に思っています。まずは西井先生がおっしゃられるように膨大な数の生きのいい接合子を作るのが先決かと思に至りました。

CRISPR/Cas9 が使えるようになったとのこと、研究の進展が期待できると思います。シングルセル解析の現状にも関心がありますが、またの機会にとおもいます。

西井先生が最初に触れられたことについて

私は不勉強で最近まで二重膜が共生の証拠となると説明していました。

第一学習社(2017年)「五訂版スクエア最新生物図説」p. 310 1 葉緑体の成立と多様性の図には、宿主の食胞膜が消失し、シアノバクテリアの外膜が再構成(葉緑体の2枚の包膜はシアノバクテリアの膜に由来)が起こると記載されていました。ただし、注として2枚の包膜のうち、外膜は宿主の食胞膜に由来するという説もあるとの記述もありました。この図を使って葉緑体の膜について話すこともありましたが、二重膜を共生の証拠として話していました。

以下のような文献もありました。この1-2年で新たな事実が明らかになったかどうかは

知りませんが、大学の先生方の間では葉緑体の外膜が共生体由来であることが定説になっているのでしょうか。

小林 康一(大阪公立大学) / 佐藤 直樹(東京大学名誉教授) 特別寄稿 高校生物で“葉緑体の外包膜の起源”をどう教えるか～複数の説が並立する現状と教科書での扱いについて考える～ 「生物の科学 遺伝」 2023年1月発行号 77巻1号, 10-17『ミトコンドリアや葉緑体は細胞内に共生した細菌に由来するとされ、2枚の膜で囲まれていることが特徴である。一番外側の膜の起源については、書籍により、宿主細胞膜起源と共生体外膜起源という二通りの記述があり、発展的な学習をおこなう生徒や指導教員に混乱が生じかねない。本稿では、葉緑体に関して、これら二つの説を検証し、どちらの説にも決定的な証拠がないことを、わかりやすく解説する』

- *面白かったです。実際の生体を扱っている方の話は新鮮に感じました。なぜ、あのような美しい形、動きをするのか、話を聞けば聞くほどますます興味深かったです。一見、対称性はなくランダムな配置に見えるが、実際は規則的で群体としての極性もある。細胞の大きさに分化の針路が決定される、とかの話は、じゃ、どういう仕組みで大きさを感じているの？そもそも細胞の大きさを決めているのはどういう仕組み？極性があるってことは、それを維持する仕組みはECM？とちょっと知りたかったです。機会があれば学ばせていただこうかと思えます。
- *非常にためになる話だった。今まで疑問に思っていたことがいくつも解決し、スッキリした。ボルボックスを教材として利用する参考にもなり、とても有意義な時間だった。
- *新しいことを沢山知ることができ、錆びた頭には、とても良い刺激で楽しかったです。元々平たい紙のようなもので…など思いもしないことでした。
専門ではないのですが、2020年に(恐らく最後の)生物基礎を担当しました。コロナ下で時間もあり、NHK 高校講座生物基礎とスタディサプリをすべて視聴し、他にも調べながら授業したのですが、共生説の理由に二重膜も挙げていたり、呼吸と光合成は逆の関係みたいなものと言ってしまった気がします。お恥ずかしいばかりです。思い込まず疑ったり、疑問点を流さないようにしたいです。
生物は特に変化が大きいたいへんだと思いつつ帰宅したのですが、途中電車で読んだ実教の刊行物で、化学の過酸化水素の酸化力の話題がまさに同じ状況、分かりやすいからと簡単に言い切らず、正しく？(表現悪いです)を心掛けたいものだと反省する事しきりでした。
- *ボルボックスについて、自分の想像以上にいろいろなことが分かっていて、研究が奥深く進んでいることを知りました。共生説のことや教科書で教えてきたことが少しずつ変わっていることに気づく機会にもなり、大変有意義でした。情報量が多くて少し追いつかなかった部分もありますが、個人的にはボルボックスの前後軸の存在と光走性のしくみに関するところが興味深いものでした。
- *ボルボックスの研究について、興味深いお話を聞けて大変勉強になりました。

眺めているだけでも魅力的なボルボックス、本日のお話をふまえて走光性やインバージョンの観察・実験などができれば生物の授業がもっと楽しくなりそうです。

葉緑体についてのお話では、葉緑体の二重膜構造を、あたかも細胞内共生説の証拠かのように記載している教科書もあるという説明があり、教科書には最新の研究結果からみると誤った（古い）情報が記載されていることも多いと聞くので、高校の先生方には教科書に準拠した内容だけではなく、オマケの話として最新の研究結果なども紹介してもらったり、実験・観察を多く取り入れてもらえると、生徒たちの生物への関心がたかまり、理解も深まると思うので、ぜひ、お願いしたいです。

【補足】

T&D 開催にあたり、西郷氏から紹介のあった文献の他、いくつかの URL を以下に紹介します。

- ◆「ボルボックスで見る多細胞生物の形づくり 西井一郎
https://www.brh.co.jp/publication/journal/039/research_11
- ◆ボルボックスの分子生物学—最近の進展— 西井一郎
http://sourui.org/publications/sorui/list/Sourui_PDF/Sourui-56-01-025.pdf
- ◆「ボルボックスの仲間から多細胞化を探る」 野崎久義
<https://www.brh.co.jp/publication/journal/092/research/1>
- ◆緑藻クラミドモナスのゲノムから植物と動物の機能を探る
福津秀哉・久保雄昭・山野隆志 蛋白質核酸酵素 2008
https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/185378/1/pen_53_1133.pdf
- ◆「古代湖琵琶湖から球形緑藻ボルボックスの新種"ビワコエンシス"を発見
～琵琶湖からボルボックス愛を込めて～
<https://www.nies.go.jp/whatsnew/2024/20241009/20241009.html>
- ◆東京農工大、緑藻ボルボックスの体細胞には周囲の明るさに順応可能な照度差検知機構が備わっていることを発見 (2024年10月23日)
https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP680642_T21C24A0000000/
https://release.nikkei.co.jp/attach/680642/01_202410231122.pdf