

オスはメシよりもメス / 雌雄同体が好き - 線虫の異性学習の発見

酒井 奈緒子 (生物化学専攻 博士課程2年), 飯野 雄一 (生物化学専攻 教授)

多くの生物にとって、効率よく異性を探索して交配することは種の存続に必要である。今回、われわれは線虫 *C. elegans* とよばれる小さな生き物が異性を探索するのに、塩の有無という環境情報を記憶、学習して行動を決定していることを発見した。さらにこの学習には異性のフェロモン、異性との接触、そして神経回路の性別が重要であることを明らかにした。この結果は、神経の性差を解明する足がかりとなる成果である。

線虫 *C. elegans* (以下線虫) は学習行動のモデル生物として広く用いられており、雌雄同体とオスの2種類の性をもつ。自家受精が可能な雌雄同体と異なり、オスが自身の遺伝子を子孫に伝えるには雌雄同体と交配する必要があるため、線虫のオスにとって効率的な雌雄同体の探索は重要である。

雌雄同体を用いた研究から、線虫が餌の有無と塩の有無を関連づけて学習し、飢餓を経験した条件を避ける行動をとることが知られていた。本研究では、雌雄同体に比べて研究が遅れているオスに注目した。その結果、異性の存在に依存して行動を変化させるオス特有の学習(異性学習)を行うことを明らかにした。オスは塩の存在下で飢餓を経験すると塩を避けるが、同じ条件で雌雄同体と共にオスを保持すると、雌雄同体が存在していた環境条件である塩に誘引されるのである。オスは飢餓経験時にも、餌の探索よりも異性の探索を優先することで効率的に自身の遺伝子を子孫に伝えていいると考えられる。

野生型の雌雄同体の代わりに、フェロモンを合成できない *daf-22* 変異体の雌雄同体を用いてオスを条件付けしたところ、オスの異性学習は成立せず、雌雄同体がいらない条件付けを行った時と同様に塩を避ける行動を示した。*daf-22* 変異体と共に条件付けした場合でも人為的にフェロモンを添加すると異性学習が成立することから、異性学習にはフェロモンが重要であることが分かった。しかし、オスのみの集団にフェロモンを添加しても異性学習は成立しないことから、フェロモンだけでは異性学習の成立に不十分であることが明らかになった。そこで次に注目したのは交尾器である。オスの尾部にある交尾器が正常に働かない *mab-*

3, *mab-5* 変異体のオスは異性学習が行えなかったため、異性学習の成立には雌雄同体から分泌されるフェロモンと、オスの正常な交尾器の両方が必要であることが示された。

線虫の各細胞において、性決定遺伝子である *tra-1* 遺伝子が働いた細胞では細胞が雌雄同体化することが知られている。神経の性別が異性学習に寄与しているか調べるために、*tra-1* 遺伝子の活性化型遺伝子を神経で高発現させ、雄の神経を雌雄同体化した。その結果、雌雄同体型の神経をもつ雄では異性学習は成立しなかった。異性のシグナルを適切に処理して雌雄同体の存在依存的に行動変化を起こすには、雄特有の神経回路が必須であることがわかった。

本研究で、線虫のオス特有の学習システムを発見したことに加え、オスの線虫が飢餓、塩、フェロモン、交尾器からの刺激というさまざまな種類の情報を統合して行動していることを明らかにすることができた。

本研究は N.Sakai, S.Yokoi, R.Iwata *et al.*, *PLOS ONE* 8, (7), e 68676 (2013) に掲載された。

(2013年7月5日プレスリリース)

図1 線虫の異性学習

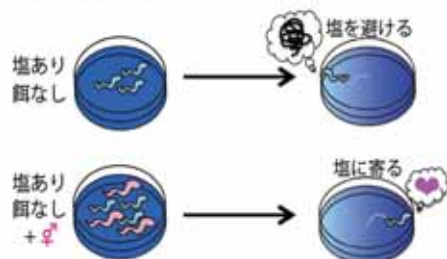
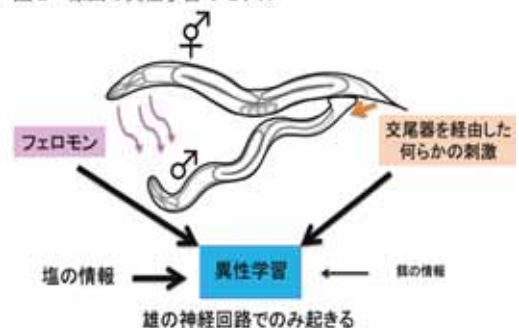


図2 線虫の異性学習のモデル



■ 本研究で明らかになったオス特有の連合学習である”異性学習”と、そのモデル

暑さに弱い花粉管を守るめしべ

遠藤 暁詩（生物科学専攻 特任助教）, 福田 裕穂（生物科学専攻 教授）

植物は常に気温変動に曝されている。実は多くの植物において花粉管は高温に弱いのだが、めしべと共にいるとその高温ストレスを回避できてしまう。私たちは、ペプチドを介した細胞間のコミュニケーションの役割を研究する過程で、めしべから花粉管へ送られるシグナル分子、CLE45 ペプチドを発見した。花粉管は、単独では高温ストレスを被る条件でも、めしべから CLE45 ペプチドが供給されていると、ストレスを回避して無事に受精できることがわかった。

植物の生殖過程は気温変化にとっても敏感で、とくに高温は植物の受精や種子の実りに重篤な影響を与える。この種子の実りと高温の関係は、植物の環境応答の典型的な事例としても、近い将来起こりうる地球規模の気候変動への対策においても重要な研究課題である。

私たちは、植物の細胞間コミュニケーションを担う CLE ペプチド (CLV3/ESR-related peptide) の構造を世界で初めて明らかにし、おもにモデル植物シロイヌナズナを用いて、CLE ペプチド機能の解析を進めている。シロイヌナズナでは 32 個の CLE 遺伝子があり、遺伝子の一部が翻訳されて 12-13 個のアミノ酸からなる 27 種の CLE ペプチドが作られる。しかし、その多くの機能は分かっていない。そこで、私たちはさまざまな実験系を開発し、これら CLE ペプチド機能を調べてきた。その過程で、花粉管の伸長に関する新たな CLE ペプチドの働きを見いだした。

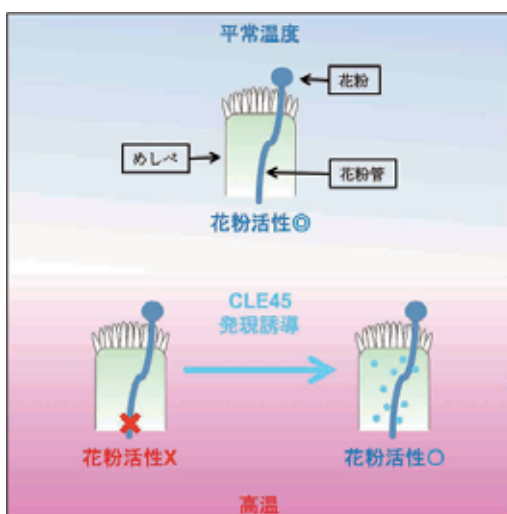
おしべから花粉を取り出して、シャーレ上で育てると花粉から花粉管が出てきて伸長する。このとき、30℃ に置いておくと花粉管はすぐに成長を止めてしまう。しかし、CLE45 ペプチドを与えておくと、花粉管は伸長し続けたのである。それでは、このシャーレ上の出来事は植物の中のどのようなし

くみを反映しているのだろう。シロイヌナズナは普通 22℃ で生育している。この植物を 30℃ で育てると、めしべの中で花粉管が胚珠まで到的道筋でだけ、CLE45 ペプチド遺伝子の発現が誘導された。この発現は 22℃ ではみられない。そこで、CLE45 ペプチドを作れない植物を用いて、受精が成立し種子ができるかどうかを調べた。すると、22℃ では異常はないのだが、30℃ にすると種子形成率が減少した。この減少は通常の植物ではみられない。このように、シロイヌナズナでは、高温ストレスに弱い花粉管を守るために、高温に曝されたときに、花粉管の通り道で CLE45 ペプチドをつくって、花粉管を守っていたのである（図）。私たちは、花粉管側で CLE45 ペプチドを受け取る受容体も探索し、SKM1 および SKM2 の 2 種類の受容体を見いだした。これらの受容体は花粉管の細胞膜上で CLE45 ペプチド受容し、花粉管内部にシグナルを伝えることで、花粉管の高温への備えを促す。

このように、今回の研究により、めしべと花粉管の間の温度に依存したシグナルが初めて発見された。しかし、謎はまだ多い。たとえば、めしべにおいて温度がどのように認識されて CLE45 ペプチド遺伝子発現が開始されるのか、CLE45 ペプチドシグナルが花粉管内で何を誘導するのか（これこそが、高温耐性のしくみそのものであるはずである）、そもそも花粉が高温に弱いのはなぜか。私たちは、今回の発見をさらに深化させることで、雄器官と雌器官の相互作用および高温耐性のしくみを明らかにしていくつもりである。同じペプチドはイネにも存在し、しかもシロイヌナズナと異なり複数種存在する。そのため、私たちは CLE45 による高温耐性誘導の仕組みは植物に共通の現象であるだけでなく、植物種ごとの高温応答機構に応じて複雑な制御が進化してきているのではないかと推測している。

本研究は、基礎生物学研究所の松林嘉克教授・篠原秀文助教との共同研究として実施し、S. Endo *et al.*, *Current Biology* 23, 1670 (2013) に掲載された。

(2013年8月2日プレスリリース)



高温時には、めしべから供給される CLE45 ペプチドによって花粉管は高温ストレスを回避する。

「第二の木星」の撮像に成功した、すばる SEEDS プロジェクト

田村 元秀（天文学専攻 教授）

太陽以外の恒星を周回する惑星（系外惑星）は、最初の発見からまだ 18 年しか経たないが、すでにその数は 1000 個を超え、有力な候補も入れると 4000 個を超える。その多くは、惑星の公転運動による主星の速度ふらつきを測る、あるいは惑星が恒星の前面を通過する際の光度減少を測るという間接的な方法による発見である。これには、主星の速度を人の走る速さ以下の精度で測定したり、その光度変化を 1% 以下の精度で決定するなど、高い技術が用いられる。では惑星を直接に見ることは、できないのだろうか？

惑星自身を画像でとらえる手法（直接撮像法）は、惑星の発見だけでなく、次のステップである惑星の特徴づけに繋がるため、いわば究極の観測方法である。しかし明るい恒星の周囲にある暗い惑星を撮像することは、遠方の灯台のすぐ近くを飛ぶ蛍を撮影するようなもので、暗い惑星を検出する高い感度、恒星と惑星を見分ける高い解像度、惑星の 10 億倍以上に達する強い恒星光を取り除き惑星を検出しやすくする高いコントラスト（可視光で地球と太陽を見分ける場合）、という高度な観測技術が同時に必要となる。

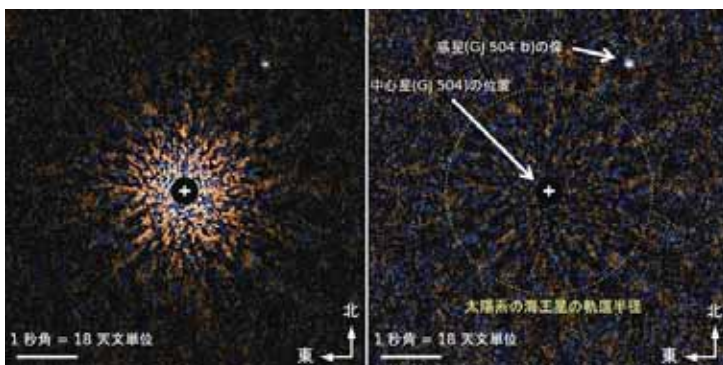
このため、直接観測の成功例はまだひじょうに少ない。2004 年頃から、そのような例がいくつか報告されたが、どれも主星から 100 au（1 au は地球・太陽の平均距離、約 1 億 5 千万 km）以上と遠く、太陽系の惑星と同列に論じることは難しかった。2008 年頃から、ようやく太陽系サイズの軌道にある系外惑星が撮像されてきた。これらはみな木星質量の約 10 倍程度かそれ以上という超巨大惑星であるが、新しい進展が始まったことは疑いない。現在、この直接観測を牽引しているのが口径 8 メートルのすばる望遠鏡を用いた SEEDS（シーズ：Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru）プロジェクトである。

SEEDS は、太陽系外惑星とその形成の現場を直接撮像するため、すばる望遠鏡を用い 2009 年から始まった戦略的観測で、日本の主導のもと国内外およそ 120 人のメンバーが参加し、筆者がその代表者を務める。すばるのもつ高い集光力、新規開発された補償光学系 AO188 による高い解像度、同じく新規開発の HiCIAO 装置（主星の光を隠すコロナグラフを装備）による高いコントラストを組み合わせることで、従来より 1 桁も高い性能を実現している。

SEEDS は今回、地球から約 60 光年の距離にある太陽型恒星 GJ504 を観測し、それを周回する木星型惑星（GJ504b）を、直接撮像により発見することに成功した。GJ504b は、軌道長半径が約 44 au で、木星質量の 3 ~ 5 倍の質量をもち、直接撮像された惑星の中ではもっとも軽い例となる（図）。直接観測における惑星候補の質量は、その明るさの測定値を、理論進化モデルや天体年齢と比較することで推定する。最新のモデルで計算すると、これまで直接撮像で検出された他の系外惑星は、いずれも惑星質量を超えて褐色矮星の質量となるのに対し、GJ504b の質量は用いる理論モデルによらず、惑星と呼べる範囲にあり、撮像された唯一の系外惑星であると言ってよい。これまで撮像された惑星はいずれも赤い近赤外線の色を示すのに対し、GJ504b は木星に似た青い色を示し、この意味でも第二の木星と呼べるだろう。

SEEDS の技術を展開すれば、日本も参加する次世代の口径 30 メートル超大型望遠鏡 TMT（Thirty Meter Telescope, 2021 年度完成予定）に系外惑星観測専用装置を搭載し、地球型惑星を直接撮像することができるだろう（SEIT（Second Earth Imager for TMT）計画）。これにより、惑星に生命の有無をリモートセンシングすることも可能になると考えられ、天文・惑星科学・工学・生物（アストロバイオロジー）を繋ぐ学際的研究が花開くと期待される。この結果は、M. Kuzuhara, *et al.*, *Astrophysical Journal*, 774 巻（2013）に掲載された。

（2013 年 8 月 5 日プレスリリース）



すばる望遠鏡に取り付けられた HiCIAO カメラによる、太陽型恒星 GJ 504 のまわりの木星に似た惑星の赤外線カラー合成画像。中心の明るい主星からの光は、コロナグラフの働きで抑制されている。右はノイズに対する信号強度を画素ごとに表わしたもので、惑星の検出が十分に有意であること、主星のまわりの成分はノイズであることを示す。

プレート速度と地震数の関係

井出 哲（地球惑星科学専攻 教授）

人はストレスが多いほど怒り易くなる。また普段静かな人ほど怒らせると怖いもの。似たようなことは地震の発生にもいえる。プレートが沈み込む地域では地震が良く起きるが、その数はプレート沈み込み速度にほぼ比例する。この関係は海洋プレート同士の沈み込み帯で顕著であるが例外もある。とくに速度のわりに地震が起きない場所では「ゆっくり地震」が良く起きている。これら「ゆっくり地震」が起きる場所では中規模の地震は少ないが、稀に超巨大地震が起きる。地震発生地域の「性格」を知ることがリスク評価に重要である。

日本のようなプレート境界周辺では長期のプレート運動によって蓄積される力（ストレス）を地震が解放している。それならプレートの運動速度が速いほどストレスが速くたまり、地震がたくさん起きるだろう。このような関係は常識的だが、これまでデータからクリアに示されたことはなかった。世界中の地震観測体制とデータ流通システムが充実し、統計解析手法が進歩した現在、ようやくこの問題に取り組む環境が整いつつある。

今回、世界のさまざまな場所で、中規模（マグニチュード4.5）より大きな地震の発生率を計算した。世界の沈み込み帯をほぼ一定面積の約100地域に分割し、各地域で地震発生率を推定し、プレート速度と比較した。データは米国地質調査所の地震カタログ過去約20年分を用い、余震など地震間の誘発効果の影響を統計学的手法を用いて補正した。その結果、地震発生率と各地域のプレート沈み込み速度に正の相関が得られた（図）。この相関はトンガ・ケルマデック海溝やマリアナ海溝のある南西太平洋地域でとくに顕著であり、単純な比例関係で良く近似される。この地域では同じような海洋プレート同士の沈み込みが進行しているからだろう。この結果は「プレート速度が速ければ地震はたくさん起こる」という常識的な関係を初めてはっきり示したものである。

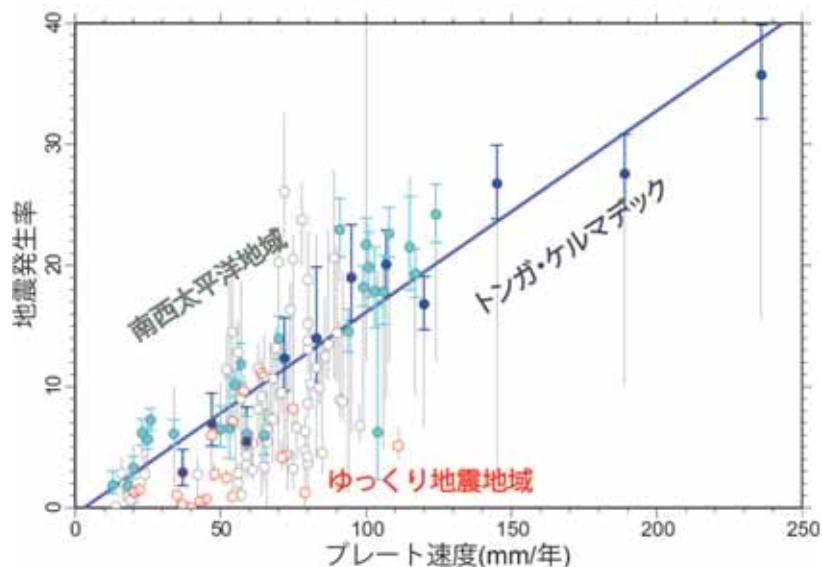
この比例関係には例外もある。とくにプレート速度のわりに地震の少ない場所としてアラスカ、カスケード（米国・カナダ国境付近）、ペルー、チリ、そして日本の南海トラフから琉球海溝付近が挙げられる。これらすべての地域で、近年「ゆっくり地震」が発見されている。「ゆっくり地震」は長時間続く微弱な地震波「深部微動」や数日～数か月かけて起きる地殻変動「スロースリップ」の総称である。さらにこれらの地域では、過去に多くの超巨

大地震が起こったと考えられている。反対に普段頻繁に中規模の地震が起きる南西太平洋地域では、過去100年にマグニチュード9以上の超巨大地震はひとつも知られていない。

この結果は、地震発生のリスクについてパラドックスを提起する。プレート速度が同じであれば、普段頻繁に中規模地震が起きる地域では超巨大地震は起こりにくく、普段中規模地震が起きない地域では超巨大地震が起きるといえる。そうであれば世界中の沈み込み帯が「一見活発だが穏やかな地域」と、「一見静かだが危険な地域」という2つの極端な状態の間に位置づけられるだろう。その位置づけを行う手法はまだ確立していないが、「ゆっくり地震」が手掛かりを与えるかもしれない。より信頼性高く地震のリスクを見積もるためには、「ゆっくり地震」も含めて地域ごとの地震発生プロセスの違い、いかなれば性格を解明する必要がある。

この研究は、S. Ide, *Nature Geoscience* 6, 780 (2013) に掲載された。

（2013年8月12日プレスリリース）



■ プレート運動速度と推定した地震発生率の関係