

餌から武器を盗んで利用する ミノウミウシの防御機構

Defense mechanism of Aeolids to steal weapons from cnidarian preys

筑波大学大学院 日本学術振興会特別研究員 (PD) 戸川 優弥子 (Togawa, Yumiko)

ウミウシの色や形

巻貝という言葉を知るとほとんどの人は螺旋状の硬い殻を持つ生き物を思い浮かべるだろう。ところが中には貝殻を持たないグループも存在する。ウミウシがその一つである。ウミウシと言えば赤、黄色、青といった派手な色合いとユニークな形により多くの人々の注目を集めている。それは研究者も例外ではなく、これらの色や形にどのような生態学的意義があるのか、またどのような進化の過程を経て獲得されてきたのかなど様々な観点から研究が行われてきた。

それらの研究結果から、ウミウシの色や形は敵から身を守ることに役立っていることが分かってきた。まず派手な体色は、自然界において有毒あるいは不味である生き物の多くが持つ特徴（警戒色）であり、捕食者は経験的にそのような体色のものを避けるようになっているため被食回避につながっている。また、反対に目立たない体色は周囲の環境に紛れ込むのに適しており（隠蔽色）、敵に見つからないという利点がある。形も同様にウミウシが生息する場所の底質や他の生き物を模倣する役割を持ち、捕食者から逃れることに有利に働くようであるが、それ以外にも防御に役立つことがある。その一例として、ここではミノウミウシの盗刺胞について紹介したい。

ミノウミウシの盗刺胞

私が研究対象とするミノウミウシは名前にもあるようにミノという突起を背中にもつ。この突起の役割については古くから議論されており、体表面積を広げて呼吸を効率的に行うためだという説がある。ところがミノの構造を見る限り、どうやら呼

吸のためだけに存在するわけではないようである。ミノウミウシの中でもオオミノウミウシ上科というグループに属する種のミノを顕微鏡で観察すると、ミノの先端には袋状の構造があることが分かる（図1）。そしてその中にはミノウミウシの餌である刺胞動物由来の刺胞が確認できる。刺胞動物とはクラゲやイソギンチャク、ヒドロ虫（図2左）などを含むグループで、多くの人をご存知の通りこれらに触ると皮膚が炎症を起こすことがある。これは刺胞動物特有の刺胞という武器細胞の仕業である。刺胞はカプセル状の細胞内器官であり、刺胞細胞にある刺針というセンサーが刺激を察知するとカプセル内に格納されている毒針が発射する仕組みになっている（図2右）。ミノウミウシはこれを体内に取り込んで武器として利用していると考えられている。このように餌から刺胞を盗むことから、盗刺胞現象と呼ぶようになった。刺胞が捕食者に対して実際どれくらいの効果を発揮しているかは、盗刺胞現象において非常に興味深いトピックの一つであるが、残念ながらそれを定量的に調べることは難しく、今のところ明確な答えは得られていない。

ミノウミウシのミノから刺胞が確認された当初は、ミノウミウシ自身が産生している可能性も否定できなかった。そこで研究者たちは刺胞の由来を明らかにすべく、長期間刺胞動物を与えずに飼育した個体や刺胞動物がない環境で育った個体のミノについて観察を行った。そして刺胞動物を与えなかったミノウミウシのミノには刺胞が存在しないことが分かり、盗刺胞現象の存在が認められるようになった（Grosvenor, 1903）。ちなみに、ミノウミウシ以外では、ヒラムシやクシクラゲの仲間で盗刺胞現象が確認されている。

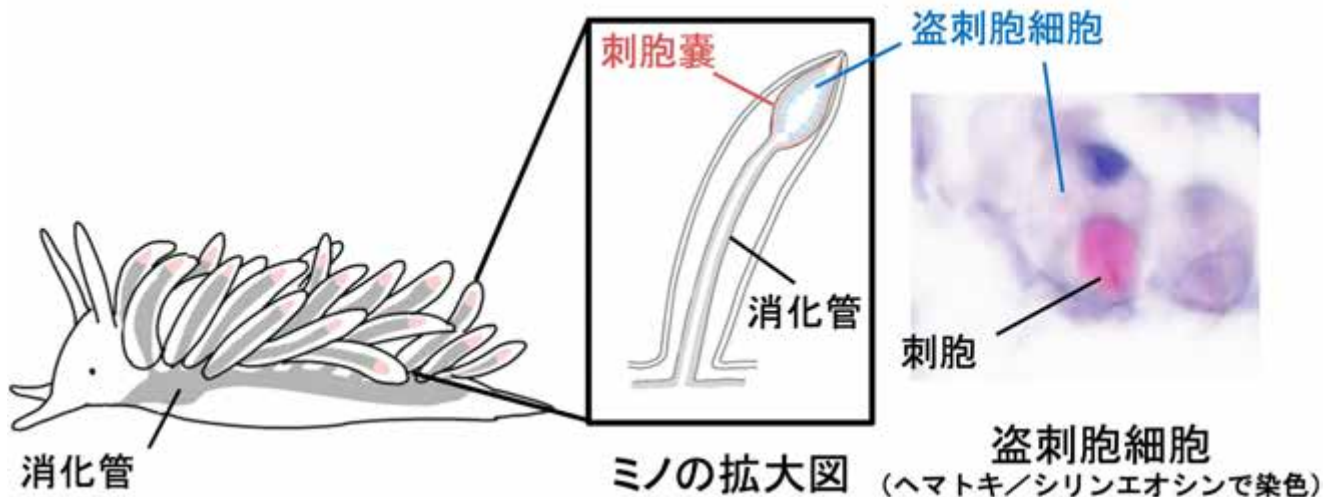


図1 ミノウミウシの消化管およびミノの模式図。

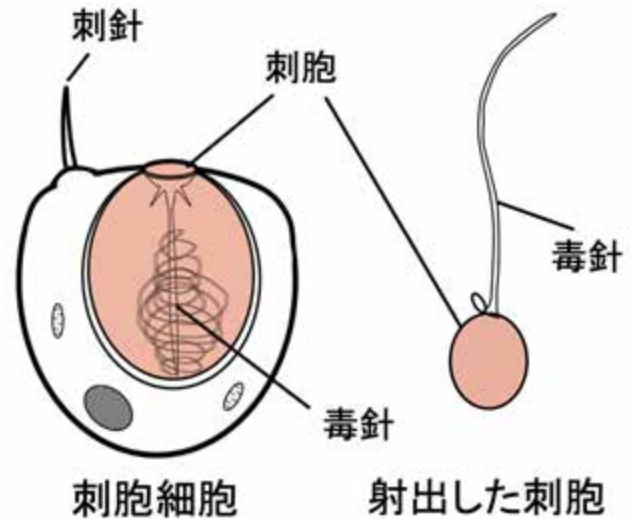
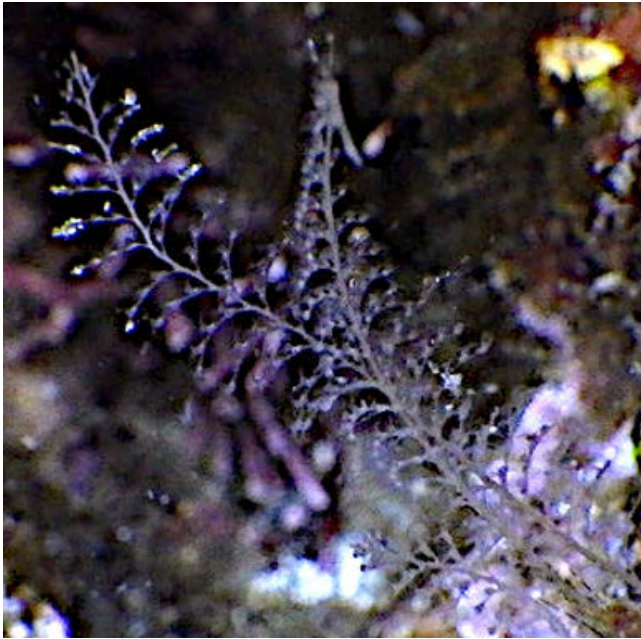


図2 左：刺胞動物の一種であるヒドロ虫、ハネウミヒドラ *Halocordyle disticha*，右：刺胞細胞と射出した刺胞の模式図。

盗刺胞の何がすごい？

盗刺胞現象は生物学者にとって非常に興味深いテーマである。通常、食物は体内に取り込まれると胃や腸の中で消化を受けて細かく分解されるため、元の形や性質はほぼ失われた状態になる。そして最終的には栄養源として吸収されるか、不要なものは排泄物として体外に出される。したがって、私たちがりんごを食べた次の日に体液がりんごジュースに置き換わったり、それを体に貯めておいたりすることは不可能である。ところが盗刺胞現象はその限りではない。ミノウミウシは刺胞動物を食べて、特定の細胞をそのままの形で利用することが可能である。これは生物界全体で見ても極めて特殊な現象であり、その背景にある仕組みを解明できれば生物学に新しい概念をもたらすことに繋がるかもしれない。

刺胞嚢の構造

ミノウミウシの消化管は図1のように体幹部から枝分かれして、すべてのミノに入り込んでいる。ミノウミウシに食べられた刺胞動物の細胞のほとんどが消化される一方で、刺胞だけが消化されずにミノ先端の袋構造（刺胞嚢、cnidosac）まで運ばれる。さらに刺胞嚢の内部には盗刺胞細胞（cnidophage）という細胞が並んでおり、この細胞は刺胞を選択的に取り込む。ミノウミウシの種類によっては刺胞嚢に開口部が存在し、そこから刺胞を放出することで防御機構として使われる（Edmunds, 1966）。

なぜ刺胞は射出しないのか？

刺胞が取り込まれる過程でまず疑問として挙げられるのが、なぜミノウミウシは刺胞動物の刺胞に刺されないのかという点である。実を言うと全く刺されない訳ではない。刺胞の何割かは摂食の際に発射してしまう。しかしミノウミウシの分泌する粘液には刺胞の射出を抑制する作用があり、それにより発射しなかった残りの刺胞を刺胞嚢に取り込んでいるのである（Greenwood, 2004）。また、まだ射出機能のない未成熟な刺胞を取り込んで刺胞嚢の中で成熟させているのではないかという

説（Obermann *et al.*, 2012）もあるが、これらについてはまだ未解明の部分が多く更なる調査が必要である。

最近の研究

—盗刺胞細胞が刺胞を取り込む機構について—

盗刺胞におけるもう一つの疑問は、盗刺胞細胞がどのような働きによって刺胞だけを選択的に取り込んでいるのかということである。私はこれを解明するために盗刺胞細胞で特異的に発現する遺伝子について調査を行った。

まず発現遺伝子を調べるとはどのようなことを簡単に説明する。一個体の生物が持つほとんど全ての細胞は同一のDNA（生物の設計図のようなもの）を持っている。全ての細胞が同じ設計図をもとに作られているにもかかわらず、皮膚や内臓、脳といった全く異なる器官を形成できるのは、参照される設計図の範囲（遺伝子）が異なるからである。つまり細胞の種類によって利用されている（発現している）遺伝子が異なる。RNA-seq法という技術を用いれば標的の細胞で発現している遺伝子を網羅的に調べることができ、そこからその細胞の性質や役割を予測することも可能になる。

私はムカデミノウミウシ *Pteraeolidia semperi* というミノウミウシの一種（図3）を用いて、ミノの先端で特異的に発現している遺伝子を調べた。その結果、免疫システムに関連する遺伝子が高発現していることが分かった。免疫とは、異物が体内に入り込んだ時にそれを察知し、排除しようとする働きのことである。当然ながら私たち人間にもそのシステムは存在し、マクロファージなどがその役割を担う細胞として代表的なものである。マクロファージは異物を認識するとそれを飲み込み、内部で消化することができる。盗刺胞細胞はこのような免疫システムの、異物を認識する機能とそれを細胞内に取り込む機能を転用しているのではないかということが今回の実験結果から示唆された。

盗刺胞の能力はどうやって獲得されたか？

進化とは合目的に進むものではなく、その生物を取り囲む環境や遺伝子の関係でランダムに生じるとされている。つまり、



図3 ミノウミウシの一種。ムカデミノウミウシ *Pteraeolidia semperi*.

ミノウミウシが最初から刺胞を武器として利用するために狙って取り込むようになったわけではなく、偶然の出来事が重なり盗刺胞という形になったと考えるのが自然である。盗刺胞を行うウミウシが出現するに至ったシナリオは以下のような流れではないかと考えられる。

1. ウミウシの中で刺胞動物を食べる種が出現する。これは、他に刺胞動物を餌とする種が少なく競争率が低いために生存に有利な性質であると考えられる。
2. 刺胞が難消化性であるためにウミウシの体内に残留する。あるいは、刺胞を消化するとカプセル内の毒液がウミウシの体内に漏れ出し有害であるため、消化しない個体の方が有利であったとも考えられる。
3. 刺胞を消化しない種は捕食者に食べられる確率が下がり、種として繁栄するようになった。

現段階ではまだ仮説に過ぎないが、それぞれのプロセスの背景には、おそらく免疫システムの転用やミノ突起の獲得・構造改変に伴う遺伝子の変化がある。今後はそれらに着目し、さらに多角的な研究を進めることでより明確な答えに近づけると期待している。

ウミウシ研究の難しさ —採集と飼育—

ウミウシの研究がなかなか進まない要因の一つに飼育が難しいということがある。ウミウシは種によって食べる餌が限られていることが多く、長期飼育のためにはまずそれを特定しなければならない。そして仮に餌が特定できたとしてもその確保が

難しいこともままある。また、継代飼育はさらに難易度が高く、より詳しい生態調査が必要になる。したがって、実験室内での飼育法が確立されていない種について研究を始めるには、多くの場合季節を問わず海に通い詰めなければならない。私は修士課程からウミウシ研究を始めて海に出るようになったが、実は水泳が苦手だったため少々苦勞した。それだけでなく冬の海での採集は過酷である。もし将来的にウミウシの研究者になりたいという人がいれば今のうちから、体力と肺活量、海での実地経験を積んでおくことを強くおすすめしたい。

引用文献

- Edmunds, M. (1966) Protective mechanisms in the Eolidacea (Mollusca Nudibranchia). *J. Lin. Soc. Lond. Zool.* 46: 27-71.
- Greenwood P. G., Garry K., Hunter A. and Jennings M. (2004) Adaptable defense: a nudibranch mucus inhibits nematocyst discharge and changes with prey type. *Biol. Bull.* 206: 113-120.
- Grosvenor G. H. (1903) On the nematocysts of aeolids. *Proc. R. Soc. Lond.* 72: 462-486.
- Obermann D., Bickmeyer U. and Wägele H. (2012) Incorporated nematocysts in *Aeolidiella stephanieae* (Gastropoda, Opisthobranchia, Aeolidioidea) mature by acidification shown by the pH sensitive fluorescing alkaloid Ageladine A. *Toxicon* 60: 1108-1116.