

クマムシの乾眠と極限環境耐性

堀川 大樹

はじめに

地上最強の生物としてしばしば引き合いに出されるクマムシ。クマムシは多細胞生物であり、緩歩動物門に属する動物種の総称である。筋肉や神経、さらには単純ではあるが脳も備えている。消化器官もある。極限環境微生物は単細胞であることを考えれば、クマムシはずっと我々に近いといえよう。そんな「高等」なクマムシは、信じられないような極限環境を生き抜くことができる。本稿では、クマムシの極限環境耐性についてのこれまでの知見を紹介していきたい。

クマムシとは

クマムシはこれまでに1000種以上が知られており、その多くは体長が1 mmに満たない。緩歩動物門には大きく分けて、真クマムシ綱と異クマムシ綱の二つのグループがあるが、いずれも4対の肢をもつ(図1)。

クマムシの生息環境は、海から陸地まで、種によって異なる。また、その分布域も広く、南極や北極などの極地にもクマムシは高密度で棲息している。我々の身近なところでいえば、市街地の路上に群生するコケ類、あるいは、街路樹の表面に生えた地衣類にも、クマムシが棲息している。とくに、乾燥したコケ類や地衣類を住処として好むようである。

クマムシの専門家はきわめて少ないため、この生物の基本的な生態については詳細に調べられてこなかった。



図1. 活動状態のヨコヅナクマムシの側面。右側が頭部

食性が判明している種類のクマムシもわずかであり、実験室で培養できる種類は非常に少ない。筆者は、クマムシを実験生物として安定的に用いるようにするため、国内外から採取した十数種類のクマムシについて培養が可能かどうかをスクリーニングした。その結果、北海道札幌市の路上に生育するコケ類から単離したヨコヅナクマムシ *Ramazzottius varieornatus* が、緑藻類の *Chlorella vulgaris* (生クロレラV12, クロレラ工業株式会社) を餌として増殖することを見つけた。ヨコヅナクマムシを寒天培地上に水と *Chlorella vulgaris* とともに入れ、25°Cにて継代培養ができることがわかった¹⁾。ヨコヅナクマムシは交尾をすることなく、1個体のみで産卵し次世代を残すことができる。すなわち、本種は単為生殖を行っていることが示唆された。そこで、筆者らは1個体のヨコヅナクマムシに由来する標準系統YOKOZUNA-1を確立した。これにより、クマムシ研究を実験室下で効率よく推し進めることが可能となった。

クマムシの乾眠

クマムシは、陸上に生息する種類も含め、基本的にはみな水生生物種である。周囲に水がなければ活動できないのだ。それでは、なぜ乾燥したコケ類や地衣類にもクマムシは棲息しているのだろうか。実は、陸生のクマムシの多くは細胞が脱水しても「乾眠」という状態で生きながらえることができるのである。乾眠(anhydrobiosis)とは、乾燥ストレスによって誘導される無代謝状態であると定義される²⁾。乾眠状態にある生物は、いかなる生命活動のサインも見られない。しかし、水が供給されれば、再び生命活動を取り戻す。クマムシは周囲の水が蒸発すると自らの体内からも水分を喪失し、乾眠に移行する。このとき、クマムシの体は空き缶を潰したような「樽(tun)」とよばれる状態に変化する(図2)。クマムシの寿命は種類によって異なるが、おおむね1か月間から1年間である。だが、乾眠状態になると、長期の生存が可能となる。乾眠状態のクマムシが最大で9年間まで生きながらえたことが、これまでに報告されている³⁾。

筆者らはヨコヅナクマムシがどの程度の乾眠能力を備えているかを検証した。本種の卵、3日齢の幼体、20日齢の成体を相対湿度85%で1日間、さらに相対湿度0%で10日間乾燥させたあとで給水すると、いずれの発生



図2. 乾眠状態のヨコヅナクマムシの側面. 左側が頭部

段階にある個体の大半において孵化あるいは活動再開がみられた(図3). これにより, ヨコヅナクマムシは卵から成体まで生活史のどの段階でも乾眠能力を有していることが示唆された¹⁾. さらに, 超精密天秤を用いて乾眠に移行する前後におけるヨコヅナクマムシの成体の水分含量を測定したところ, 活動状態では水分含量が78.6% wt/wtであったが, 乾眠に移行した後では2.5% wt/wtにまで減少することが判明した. 活動状態のヨコヅナクマムシは相対湿度85%の条件で乾燥に暴露された場合, 最初の5分間で水分量の半分が失われ, 開始から16分後には水分含量がおおよそ10% wt/wtにまで低下することもわかった. 本種はきわめて急速に脱水しても死滅することなく乾眠に移行するわけである.

このヨコヅナクマムシの研究結果からもわかるように, 乾眠状態におけるクマムシの水分含有量はきわめて少ない. 通常, このような状況では細胞膜は破壊され, タンパク質などは不可逆的な変性が起きる. つまり, 細胞の機能は保たれず死んでしまう. だが, 乾眠状態のクマムシは給水により問題なく復活することから, この生物は細胞から水を失っても生体構造およびその機能を維持できるような機構をもっているはずである. クマムシと同じように乾眠に移行する能力を有する他の動物, アルテミア, センチュウ, ネムリユスリカなどでは, 乾眠への移行に際して二糖類のトレハロースを爆発的に合成することが知られている. その際のトレハロースの蓄積量は, 体重の15~20%にまで到達する⁴⁾. 乾燥した細胞の中において, トレハロースは水の代わりに細胞膜やタンパク質と水素結合によって相互作用をして構造を維持したり(水置換説), ガラス状態を形成することにより生体物質を保護したりする(ガラス状態説)と考えられている⁵⁾. ただし, クマムシの場合は乾眠に移行してもトレハロースの蓄積はあまりみられず, もっとも蓄積

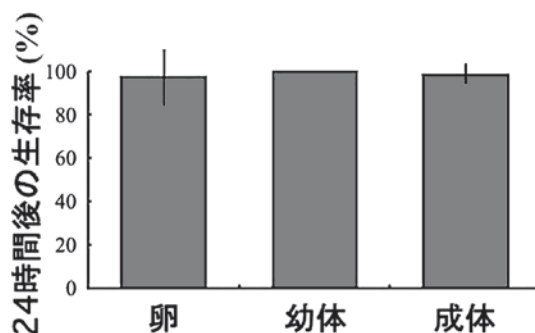


図3. 卵, 幼体(3日齢), 成体(20日齢)のヨコヅナクマムシにおける10日間の乾燥処理と給水後の生存率

する種でも3%未満である⁶⁾. よって, クマムシが乾眠を成立させるには, トレハロース以外の物質が関与していると考えられている. 最近になって, ヨコヅナクマムシから高温でも凝集せず沈殿もしないタンパク質が単離された. これらはCAHS (Cytoplasmic Abundant Heat Soluble) タンパク質とSAHS (Secretory Abundant Heat Soluble) タンパク質と名づけられた⁷⁾. CAHSタンパク質, SAHSタンパク質ともに乾燥すると α ヘリックス構造をとることが示唆されている. CAHSタンパク質は細胞内に, SAHSタンパク質は細胞外の空間に局在し, それぞれの場所でこれらのタンパク質が細胞膜や他のタンパク質の構造を保護したり凝集したりするのを防いでいると思われる. ただし, CAHSタンパク質やSAHSタンパク質を乾燥耐性のない細胞で発現させて乾燥耐性を付与した事例は, まだない. これらのタンパク質以外にも, クマムシの乾眠に関わる他の重要な物質が存在するのだろう. クマムシの乾眠機構の全容を解明するには, まだもう少し時間が必要である.

クマムシの極限環境耐性

クマムシは乾眠状態になると, ささまざまな環境ストレスに対する耐性を示すようになる. -273°C の超低温⁸⁾, ヒトの致死量のおよそ一千倍に相当する数千Gyの電離放射線^{9,10)}, アルコールなどの有機溶媒¹¹⁾, 紫外線¹²⁾, 7.5 GPaまでの高静水圧¹³⁾, 真空¹⁴⁾などの極限環境に耐えることが, これまでに確認されている. なお, 放射線に対しては通常の活動状態でも高い耐性をもつ.

ただし, これまでにクマムシの耐性について調査をした研究のほとんどは, ストレス暴露をしたクマムシについて, 数日間の生死しか確認していなかった. これは, 上述のように, クマムシの培養システムが不安定であり, 環境ストレス暴露後の個体を長期間にわたって追跡調査することが難しかったからである. そこで筆者らは, 環境ストレス (100°C の高温, 1 GPaの高圧, および5 kGy

のヘリウムイオンビーム照射)を暴露後のヨコヅナクマムシ(7日齢)を培養環境下にて継続観察し、生存期間および生殖能力を調査した。

100°Cと1 GPaに暴露された個体は、非処理区の個体と同等かそれ以上の期間にわたって生存したうえ、次世代の個体を残した(図4AB)。その一方、ヘリウムイオンビームを照射された個体は、非照射区の個体に比べて生存期間が短縮し、1個体あたりに残した仔の数も減少した(図4AB)。生物は通常、100°Cの高温や1 GPaの高圧にさらされると、タンパク質などの立体構造が崩れてその機能を失い、生命活動を維持できなくなり、死滅する。これは、水分子と結合した生体高分子が熱や高圧により変性しやすいためである。乾眠状態のクマムシは水分をほとんど含有していないため、高温や高圧に暴露されても、致命的な損傷を受けなかったものと推定される。その一方で、イオンビームなどの電離放射線は生体分子を直接的あるいは間接的に破壊する作用をもつと考えられる。今回のように高線量の電離放射線を照射されると、乾眠状態とはいえ、クマムシは本来の寿命を全うしたり正常な生殖能力を維持できないほど損傷が蓄積したのだろう。それでも、クマムシのような多細胞生物が、これらの地上には存在しえない極限環境にさらされた後も次の世代の個体を残せるという事実は、我々が生物の許容限界環境の幅を再考するための十分な材料となるだろう。

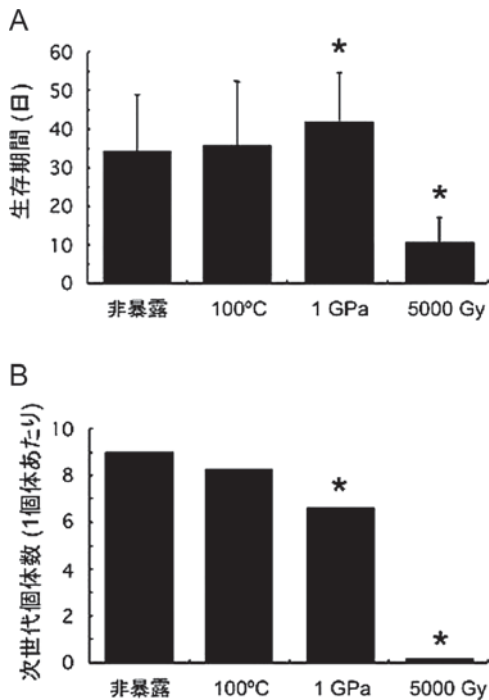


図4. 乾眠状態のヨコヅナクマムシを100°C, 1 GPa, ヘリウムイオンビーム(5,000 Gy)に暴露後のA生存期間およびB次世代幼体数。

おわりに

アストロバイオロジーの主要な命題は、「我々が宇宙で唯一の生命体か」を調べることである。言い換えれば、地球外生命体を探すことだ。現時点で我々が認知している生命体は、地球上の生命体のみである。では、地球外生命体が存在するとしたら、それらは宇宙のどのような環境に存在しうるのだろうか。生命が存在しうる環境範囲、すなわちハビタブルゾーンを推定するには、地球上の生命体の許容限界環境を知る必要がある。地上最強生物といわれるクマムシの許容限界環境を調査することは、単細胞様生命体だけでなく、より複雑な多細胞様生命体のハビタブルゾーンを推定する上でもきわめて重要である。

果たして、クマムシのような生命体が地球外に存在するのだろうか。この可能性は、大いにありうる。実際に、乾眠状態のオニクマムシ *Milnesium tardigradum* などが、欧州宇宙機関(ESA)により低軌道環境に10日間さらされた後、地上帰還後に復活したことが報告されている¹⁵⁾。低軌道において紫外線を暴露された個体は、地上で保存されていた対照群に比べて生存率の有意な低下がみられたが、真空のみを暴露された個体では、生存率の有意な低下はみられなかった。また、乾眠状態のヨコヅナクマムシは、火星の地表環境を再現した「火星シミュレーションチャンバー」に45日間暴露された後も、過半数が生き残っていた¹⁶⁾。クマムシの常識を超えた環境耐性能力を目の当たりにすると、ハビタブルゾーンは、我々が考えるよりも広く、生命は宇宙でありふれた存在ではないかと思わされる。

文 献

- 1) Horikawa, D. D. *et al.*: *Astrobiology*, **8**, 549 (2008).
- 2) Keilin, D.: *Proc. R. Soc. Lond. B*, **150**, 149 (1959).
- 3) Guidetti, R. and Jönsson, K. I.: *J. Zool.*, **257**, 181 (2002).
- 4) Watanabe, M.: *Appl. Entomol. Zool.*, **41**, 15 (2006).
- 5) Crowe, J. H.: *Annu. Rev. Physiol.*, **60**, 73 (1998).
- 6) Westh, P. and Ramløv, H.: *J. Exp. Zool.*, **258**, 303 (1991).
- 7) Yamaguchi, A. *et al.*: *PLoS One*, **7**, e44209 (2012).
- 8) Becquerel, P.: *Séances Acad. Sci. Paris*, **231**, 261(1950).
- 9) May, R. M. *et al.*: *Bull. Biol. Fr. Belg.*, **98**, 349 (1964).
- 10) Horikawa, D. D. *et al.*: *Int. J. Radiat. Biol.*, **82**, 843 (2006).
- 11) Ramløv, H. and Westh, P.: *Zool. Anz.*, **240**, 517 (2001).
- 12) Horikawa, D. D. *et al.*: *PLoS One*, **8**, e64793 (2013).
- 13) Ono, F. *et al.*: *J. Phys. Chem. Solids*, **69**, 2297 (2009).
- 14) Horikawa, D. D. *et al.*: *Astrobiology*, **12**, 283 (2012).
- 15) Jönsson, K. I. *et al.*: *Curr. Biol.*, **18**, R729 (2008).
- 16) Johnson, A. P. *et al.*: *Icarus*, **211**, 1162 (2011).