

ヒドラの重力走性

山口県立山口高等学校 化学・生物部

I はじめに

ヒドラ（図1）は淡水の池や沼に生息する刺胞動物門に属する多細胞動物である。ヒドラは負の重力走性をもつとされるが、他の動物で見られる重力を感知する器官は備わっておらず、どのような仕組みで重力を感知しているかは謎である。本研究では、微小重力環境におけるヒドラの行動を解析し、ヒドラの重力走性の仕組みを明らかにする。

II プロジェクトの背景と目的

私たちは身近な場所にいる動物をよく知る目的で、様々な動物の生息状況の調査をおこなっているが、その一環として最近ヒドラを採集した。ヒドラは刺胞動物門ヒドロ虫綱に属する淡水産の多細胞動物で、体長は1cm程度である。ヒドラが棲む沼や池は、海水系と比較して、波による大気からの酸素供給が少なく、循環も不活発なために表層部以外は貧酸素状態になりやすい。このため、魚類をはじめとして水中で生活する動物にとって、重力に逆らって酸素が豊富な水面に近づく「負の重力走性」は非常に重要な生存戦略であると考えられる。事実、単細胞動物のゾウリムシから高等動物まで、多くの動物は繊毛のはたらきを利用した重力を感知する仕組みを持っている。ヒドラは負の重力走性を示す（Ewer, R. F., 1946）¹⁾との報告があるが、実際に重力を感知する仕組みはまったくわかっていない。同じ刺胞動物でもクラゲでは平衡胞とよばれる高等動物とも共通した重力感知器があるのと対照的に、ヒドラではそのような構造は見られず、体表にも繊毛は発達していない。このようにヒドラの重力感知機構は大きな謎である。そこで、本研究では、微小重力（宇宙空間）と重力（地上）環境下におけるヒドラの行動を詳しく記録して比較し、重力と行動との関連を詳細に解析し、重力感知機構の解明をめざす。



図1 ヒドラ

また、捕食行動や形態形成に関する実験も実施し、宇宙環境を利用した多面的なアプローチにより、生命現象についての理解を深める。さらに、ヒドラを用いた宇宙実験を実施するための研究成果を活用し、水棲生物維持装置の改良や水質管理システムの開発にも取り組む。

III 関連分野の研究の現状

<飼育装置の開発>

国際宇宙ステーションで、メダカなどの小型水棲生物を90日間飼育できる水棲生物飼育装置（AAEU：Aquatic Animal Experiment Unit）が開発されている（内田・崎村・石岡）²⁾。

<ヒドラに関する研究>

ヒドラは実験動物学の祖といわれる Trembley(1744)により発見され、分類・再生・出芽・移植・行動に関する基礎的な研究が行われた。近年、再生や幹細胞分化といった最先端研究のモデル動物として用いられている。一方、ゲノムレベルの解析から刺胞動物の遺伝子構造はヒトに非常に近いことが発見され、ゲノム進化の常識を覆す発見として注目を浴びた（Putnum et al., 2007）³⁾。

IV プロジェクトの概要

このプロジェクトは、国際宇宙ステーションで行うこととする。

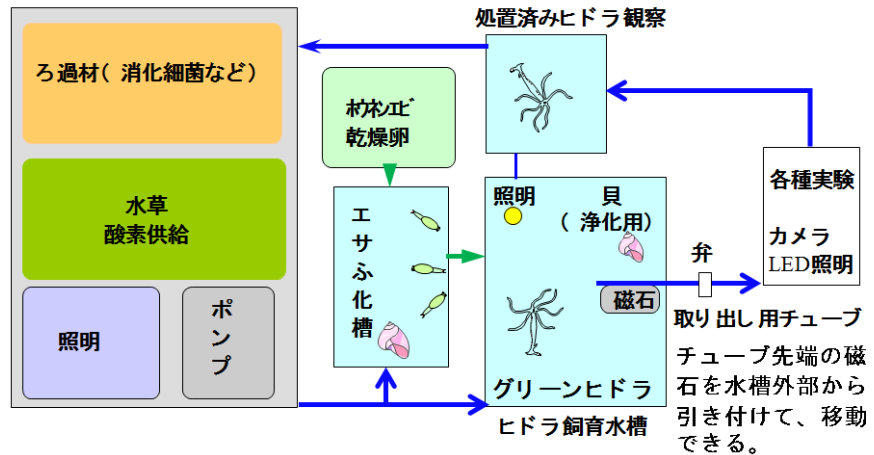
<宇宙でのヒドラの飼育>

ヒドラを飼育する場合、通常はエサとしてアルテミアやミジンコを2日に1度与える。一般的なヒドラの体色は白味の強いベージュであるが、一部、細胞に緑藻が共生している緑色のヒドラ（グリーンヒドラ）がいる。このグリーンヒドラは共生藻が光合成によって生産する光合成産物を利用できるため、光を照射すれば、エサを捕食する機会が少なくても生存することができる。



図2 グリーンヒドラ

図3 →
ヒドラの宇宙実験装置



私たちは、国立遺伝学研究所の清水裕先生よりグリーンヒドラ（図2）をいただいて飼育している。なお、ヒドラを飼育している容器にサカマキガイを一匹入れてみたところ、サカマキガイがヒドラの食べ残したエサを食べて掃除をするため、水替えの頻度を減らすことができた。ヒドラに触れたサカマキガイは触角を引っ込めて身を縮めたことから、ヒドラが持っている触手の刺細胞は、エサを取るためだけでなく、捕食者を遠ざけることにも役立っていると推察された。宇宙実験で使用するヒドラはグリーンヒドラとし、エサは淡水でふ化するハウネンエビを用いる。

<プロジェクト1 重力走性>

図3の飼育水槽からヒドラを取り出し、低酸素濃度の水（生存に必要な酸素は溶けている水）を満たした2本の遠心管に入れ、気体が入らないように遠心管に蓋をする。遠心管内部のヒドラの様子を、デジタルカメラにて、複数の方向から10～30秒間隔で5時間インターバル撮影を行う。その後、観察に用いた2本の内の1本の遠心管を回転させて1Gに相当する遠心力を加えた後に、ヒドラの行動を撮影する。さらに、残りの1本の遠心管には、気体の酸素を蓋側にゆっくりと入れる。遠心管内部の水の酸素濃度は、蓋側が高濃度、底側が低濃度になる。この遠心管内部のヒドラの様子を、デジタルカメラにて前述の方法で撮影する。地上でも同様の実験を行い、撮影した行動を比較、解析する。もし、1G条件下でヒドラが散在し、酸素濃度勾配がある遠心管内にて酸素濃度が高い場所にヒドラが集合すれば、地上で観察される水面に集まる行動は、酸素を求める行動であると考えられる。逆に、1G条件下で遠心力に対して負の走性を示し、酸素濃度勾配がある遠心管内でランダムに位置する場合は、ヒドラは重力に対して負の走性を有していると判断できる。なお、微小重力条件下と1G条件下とで、触手や柄部の状態を詳しく比較し、微小重力条件下では方向が定まらず、1G条件下では重力に対して特定の方向に位置する部位が無いか観察する。1G条件下で特定の方向に位置する部位があれば、重力の感知に深く関係している可能性が考えられる。その部位の細胞の構造や機能について研究することで、ヒドラの重力感知機構の解明に役立つ情報が得られることが期待される。なお、ヒドラには正の光走性がある（Trembley, A. 1744）⁴⁾ため、観察時には光条件が均一になるよう照明に配慮する。

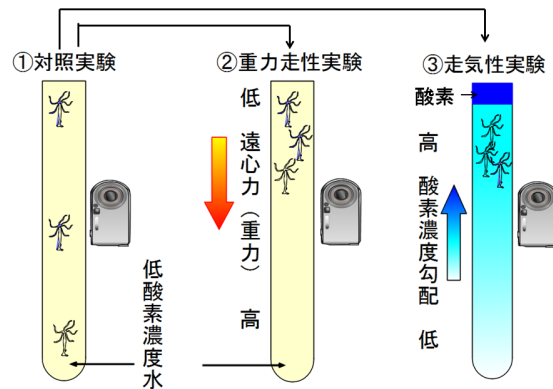


図4 重力走性の実験方法

<プロジェクト2 エサの運動と捕食行動>

ヒドラは、口の周りがある6～8本の触手を傘の骨のように伸ばし、ミジンコなどのエサが触れるのを待つ。触手にエサが触れると刺細胞から刺胞が発射され、この毒によりエサの動きを止め、触手で口に運んで食べる。エサになる動物は、重力によって沈降しては逆らって上昇するという鉛直方向の移動が多く、ヒドラは触手を傘の骨のように広げて捕獲する。宇宙空間ではエサ

が重力に影響を受けず、直線的に四方八方へ移動する可能性が考えられる。直線的に動くエサを捕獲するために、ヒドラの触手は放射状に広がると私たちは予想している（図5）。地上と国際宇宙ステーション上で、エサ（ホウネンエビ）が存在する場合と存在しない場合のそれぞれについて、触手の広げ方や捕食の様子を比較する。ヒドラの神経は散在神経系であり、このシンプルな神経系で環境に対する適応を行っているとするれば、どのような情報処理によって適応的な行動が出現するのか、その仕組みを解明することは意義深い。

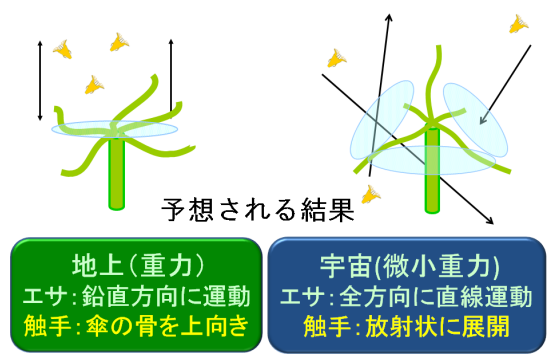


図5 エサの運動と捕食行動

<プロジェクト3 細胞の再集合>

ヒドラの体を構成する細胞に酵素を作用させてばらばらにした後、解離した細胞を集めると、やがて内外2層の細胞層からなるヒドラが再構築される。これは、分化した細胞が同じ種の細胞を見分けて集合しているためである⁹⁾。飼育水槽内のヒドラを吸引し、処理水槽内で酵素を作用させて細胞を解離させた後に、体の再構成が正常に行われるか観察する。地上実験の結果と比較し、細胞相互の認識や移動が、微小重力条件下においても正常に行われるか検証する。宇宙で再構成が正常に行われなかった場合、頭部や足部を誘導する物質は重力に基づいて極性を形成すると考えられる。宇宙でも再構成が正常に行われた場合は、細胞接着などによって極性が形成される可能性について詳しく調べる。

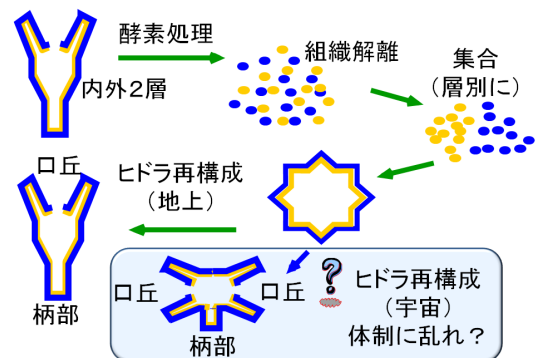


図6 ヒドラ解離再集合体の実験

<プロジェクト4 小型水質管理システムの開発>

国際宇宙ステーションでは水は大変貴重であり、回収して再利用している。飲料水は燃料電池で作られる水と地上から送られている水を用いているが、汗や尿なども処理して衛生水として利用する⁶⁾。その際、水質管理はpH、伝導度、透明度、イオンおよび微生物などについて調べられているが、毒物の混入などをチェックすることは難しい。近年、地上の上水道では、上水をメダカの泳ぐ水槽に流入させ、異常行動を監視することで毒物などの混入をチェックするシステムが活用されている⁷⁾。

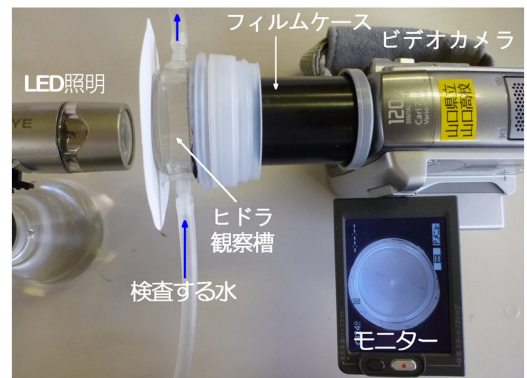


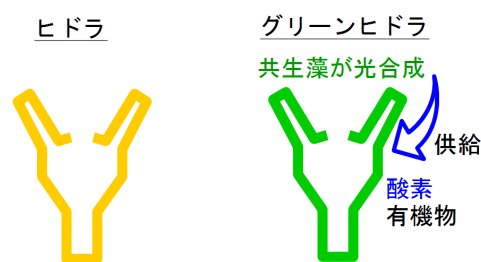
図7 小型水質管理システム（試作）

グリーンヒドラは光を照射すればエサを頻繁に与えなくても良く、体が小さいために飼育装置も小さい。また、学校での飼育の経験から、悪化した水質の中では触手を広げないなど、形態的な特徴から水質を推察することが可能だと考えられる。そこで、ヒドラの異常行動や形態の変化をモニタリングすることで、毒物などの混入をチェックできる水質管理システムの試作に取り組んだ（図7）。ビデオカメラのレンズ部分に銀塩写真のフィルムケース（黒色）の筒を取り付けてフードとし、これにヒドラの行動を観察する小型水槽（観察層）を取り付けた。この観察層へ検査したい水を流入させてヒドラの行動をモニタリングし、異常な行動を検出すると警報を発するシステムを考えている。ヒドラの行動と水質の関係についてはこれからデータを収集し、ヒドラの行動をモニタリングすることで水質を判定することが可能かどうか判断したい。また、ヒドラの触手部分を明確にする画像処理法⁸⁾はすでに研究されており、この技術を応用すれば、異常行動の検出は可能である。なお、このシステムは、宇宙ステーションのみならず、地上での飲用水の水質管理にも利用可能であろう。

<第2次プロジェクト 緑藻類の共生によるヒドラの行動の変化>

緑藻が共生しているグリーンヒドラ（図2）は、光合成産物の他に酸素もヒドラに供給している可能性が考えられる。緑藻がヒドラに酸素を供給している場合、グリーンヒドラは共生している緑藻から提供される酸素を利用することで、酸素要求量が少ないことが予想される。プロジェクト1で実験した酸素への走性について、藻類が共生していない通常のヒドラと、グリーンヒドラの間で度合いが異なるかも知れない。また、藻類は光合成に光や二酸化炭素を必要とするため、ヒドラを光源や二酸化炭素に近づけるように働きかけている可能性も考えられる（図8）。光走性については地上でも実施できるので、現在、実験の準備をしている。

プロジェクト1～3を成功させた後に、第2次のプロジェクトとして、通常のヒドラとグリーンヒドラを用いて、酸素に対する走性や重力走性について比較するための宇宙実験を実施することを提案する。



酸素 要求性大？ 光・二酸化炭素 要求性大？

図8 共生藻とヒドラの行動の関係

V 社会的な効果

小さな装置で飼育や実験を行うことができるため、宇宙実験で要する空間や費用も少なく、生物学や医学に関する数多くの研究成果を得ることが期待できる。なお、ヒドラは世界に広く分布しているため、身近な環境に対して目を向けてもらうきっかけにもなる。さらに、貝類を用いた浄化装置や、ヒドラの様子をモニタリングすることで水質を管理するシステムは地上でも利用できる。なにより、宇宙でヒドラがエサを捕食したり触手を伸ばしたりしている姿は、人々に癒しを与え、宇宙実験に対しても興味を持っていただけたらと思われる。

VI 実施に向けての準備

	2012年～2016年	2017年～2019年	2020年	2021年
実験の準備	水棲生物飼育装置改良 水質管理システム開発	予備実験 改善の検討	実験内容の確認	国際宇宙 ステーションにて 宇宙実験
宇宙飛行士準備		実験操作手順の協議	実験操作の訓練	

VII 謝辞

国立遺伝学研究所 清水裕先生、九州大学理学研究院 小早川義尚先生より、ヒドラに関して多大なるご指導を賜りました。心よりお礼申し上げます。なお、本研究は、(独) 科学技術振興機構平成23年度「中高生の科学部活動振興事業」の助成を受けて実施しました。

VIII 参考文献

- (1) Ewer, R. F. (1946). The behaviour of Hydra in response to gravity. Proc. Zool. Soc. London. 117, pp.207-218
- (2) 内田 智子, 崎村 徹, 石岡 憲昭:「第7章 水棲生物を用いた宇宙環境利用研究と実験装置開発」, http://www.jaros.or.jp/space%20utilization%20view/h14_chapter7.pdf#search='AAEU
- (3) 「ヒドラ～ヒドラ研究の歴史年表」, 遺伝学電子博物館, http://www.nig.ac.jp/museum/livingthing/10_a.html
- (4) Trembley, A. 1744 Memoires pour servir a l'histoire d'un genre de polypes d'eau douce a bras en forme de cornes. Leyden: J. and H. Verbeck.
- (5) 川島誠一郎ほか:「改訂版 高等学校生物I」, 数研出版, 2010. pp. 58-59
- (6) 狼嘉彰, 富田信行, 中須賀真一, 松永三郎:「宇宙ステーション入門第2版」東京大学出版 2008. pp. 260-273
- (7) 株式会社四国総合研究所「めだかdeモニタ」, <http://www.sskn.co.jp/service/environment/seibutumonita.htm>
- (8) 塚田 章, 相川 治毅, 花井 一光, 佐々木和男:ヒドラ画像に対する2値化しきい値選定法, 電子情報通信学会論文誌, D-II Vol. J83-D-II No.8 pp.1841-1845, 2000年8月