

ゾウリムシは宇宙を目指す

——いち研究者の宇宙実験始末記

お茶の水女子大学名誉教授／放送大学特任教授 最上善広



はじめに

国際善隣協会理事で講演会担当の副委員長を務める、高橋昇君は、高校の同級生で、卒業後も交流が続いている。その彼が、この夏、大雨の中を北千住にある放送大学の学習センターを訪ねてくれた。近況などを話すうちに、訪問の目的は国際善隣協会の講演会で話をしてほしいということがわかってきた。高校のときと変わらず、大上段から竹刀を振り下ろすように迫ってくる生真面目な高橋君の圧力に負けて講演を承諾することとなった。

高橋君は日本の行く末を真面目に案じていて、これまでも色々な視点から日本の現状にフォーカスした講演会を開催してきた。

今回彼が案じているのは、日本の科学研究力の低下とのこと。そのきっかけとなったのは、

「自然科学分野の研究論文のうち、他の論文へ引用された数が「上位10%」に入る質の高い論文の数で、日本は世界13位だったことが、文部科学省の科学技術・学術政策研究所の調査でわかった。過去最低だった昨年の発表と同じ順位のまま（読売新聞オンライン、9月3日）という記事のようだった。

高橋君の意見は、

「日本の科学力を活性化するために、いわゆる基礎研究からの底支えが重要なのだ。そのためには、研究者生活の大半を基礎研究に費やした、私、最上が基礎研究の重要性を説くべきだ」ということ。

しかし私に、日本の基礎研究を概観して何か言うほどの力量はないので、自分の研究経歴を振り返ることで、研究の発想から、どのような発展があり、他の分野とどのようにして関連していくのかをイメージしていただければいいかと思ひ表題のような講演をさせていただくこととした。

基礎研究というと、大方の人の抱くイメージは、

「大事なこともかもしれないが、急にはお役に立たないような研究」というものではないだろうか。まさに

そのような特性から、研究者も多くはなく、したがって論文引用数では評価されないようなマイナーリサーチと認識されている。

私は、大学では理学部で、大学院は理学研究科、就職先も理学部という、理学一筋に基礎研究というマイナーリサーチを続ける道を歩んできた。就職先でたまたま学部長になった際に、オープンキャンパスなどで受験生やその保護者になるべく手短かに理学部の特徴を伝えなければならなかった。理学の分野に求められるのは、特に世の中にどんなお役に立つのかという観点から。この点では理学部は押しが弱い。そこで、苦慮しつつもアピールしたの

は次のようなことである。

理学部は世界の謎 (Mystery) ではなく (Problem) に関わる研究と教育をするところ。謎を解く (Problem

solving) のは勿論だが、謎を見つける (Problem finding) が大事。人間という生物の特性は、好奇心にあり、好奇心に導かれてきたからこそ、地球の生物の頂点に立っていられる。人類が進歩を続けるためにも、彼らの好奇心をくすぐるような、いまだに誰にも知られていない Problem を目の前に示すことが必要である。そして、できればそれを自らの手で解き明かしたい。それを目指した教育と研究をするのが理学部である。

今でもその思いは変わらず、マイナーリサーチの基礎研究を続けている。

ゾウリムシと向き合う

お茶の水女子大学理学部に職を得たときに、自ら探し出した Problem は、「地球重力の生き物への作用」。具体的な研究ツールとして選ん

だのは、ゾウリムシの負の重力走性行動であった。これは、ゾウリムシなどの水棲微生物によく見られる行動で、写真1に示したように、上(反重力方向)を目指して泳ぐ行動であり、かつては、地球から遠ざかることから負の走地性とも呼ばれてきた行動である。ゾウリムシは宇宙を目指すのである⁽¹⁾。

研究では、上に向かう行動に重力感知とそれに伴う運動調整が関わっているか、が焦点となる。もし感知しているなら、重力センサーはどのようなものか。そして、これがゾウリムシで確認されれば、細胞レベルでの重力受容という新発見につながる。

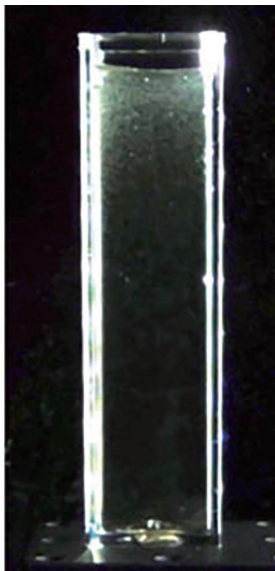


写真1 ゾウリムシの負の重力走性行動の例。試験管の中に一様に入れられたゾウリムシ(左)は上に向かって泳ぎはじめ、しだいに水面下に密集(白くなっている部分)するようになる(右)。この行動は密閉容器でも起こるので、水面を目指すものではなく、重力に依存した行動である。写真は筆者提供。

実験室レベルの研究では、重力を遠心加速機などを用いて大きくすることはできて、小さくすることは難しい。手詰まり感に悩んでいたところに、宇宙科学研究所の研究者から、単段式のロケットの打ち上げ後回収の模擬実験に参加しないかとお誘いがあった。

実験では、飛翔体を気球で成層圏まで運び、切り離す。そこからの自由落下によって生じる微小重力環境を利用してみたいかということであった。落下後に回収される装置のダミーウエイトとして、実験装置を搭載

できるとのことで、いわば「密航」ではあるが、ありがたい機会なので参加させていただいた。三陸の山間にある気球の打ち上げサイトで、ロケット屋さんたちとの共同作業はスリルに満ちた体験だった(写真2)。実験そのものは、温度調節や気密維持に問題が発生し成功とは言いがたいものであったが、これが、ゾウリムシから始まったマイナー研究が宇宙というメジャーに関わるきっかけとなった。

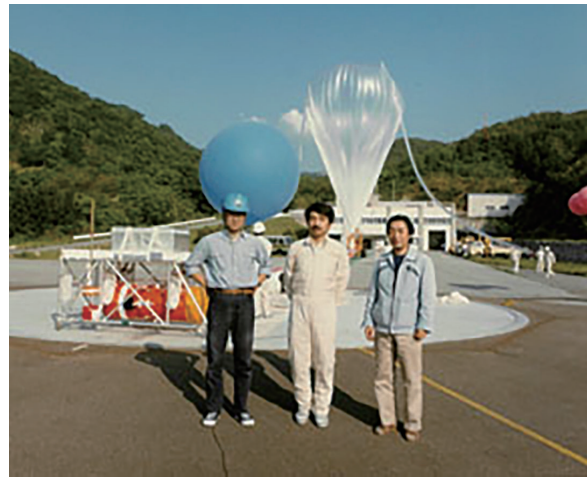


写真2 「密航」実験グループ(左端が筆者)と、回収実験に用いられた模擬飛翔体(オレンジ色の円筒)。背景に高高度まで運び上げるための気球が写っている。写真は筆者提供。

宇宙実験への参加

密航実験グループはその後も連絡を取り合い、次の機会を探していたところ、宇宙実験に参加する可能性が見えてきた。当時宇宙科学研究所が、計画していた無人の宇宙実験衛星(Space Flyer Unit S.F.U.)で行う生物実験を募集しており、そこにグループとして実験提案することになった。衛星はHII型ロケットで打ち上げ、スペースシャトルが回収する。打ち上げ以降は無人の運用となり、遠隔操作のみが

可能となる。そんな厳しい条件に見合うような生物実験を色々考えた結果たどり着いたのは、「イモリを使った宇宙軌道空間での受精と初期発生」というテーマであった。当時の発生生物学の知見として、イモリを含む両生類の受精から初期発生は正常な地球重力環境が必要であると考えられていた。事実、遠心機などで重力の方向や大きさを変えた状況で発生させた初期胚には発生異常による奇形が生じることが知られていた。ならば、地球重力が及ばない空間ではどうなるか。これはまだ誰も答えたことのないProblemである。しかも、イモリ(特に日本などの温帯産のイモリ)には次のような特性があり、無人の実験が可能と思われた。温帯産のイモリは冬眠に入る前に交尾をして、雌は体内に精子を保持したまま冬眠する。春が来て、暖かくなり冬眠から覚めると、体内に保管していた精子を用いて受精卵を産み出す。宇宙に限らず、生物の実験をしようとするならば、とにかく生きのいい生物試料(この場合は、卵子と精子)を使う

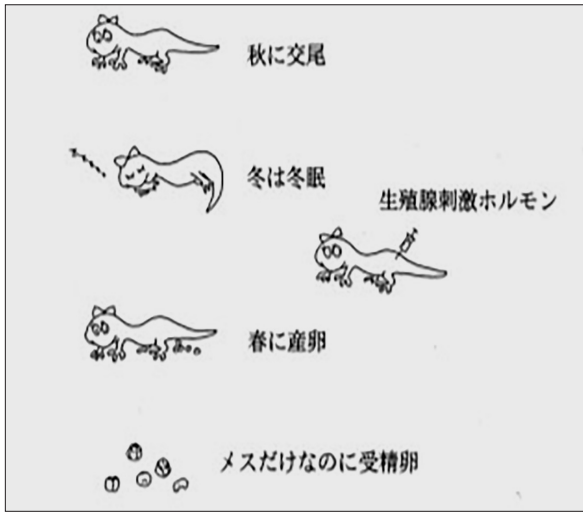


図1 「イモリを使った宇宙軌道空間での受精と初期発生」実験のシナリオ。出所：引用文献(2)。

ことが肝要である。宇宙実験では、実験場所である軌道上宇宙空間に到着するまでに時間がかかり、その間どうやって生きのいい状態を維持するかが大問題となるが、イモリを使えば解決できる。更に、その雌も、冬眠状態で宇宙につれてゆけるので、餌をあげたり、水质を維持したりするのにかかるリソースを減らすことができる。リソースの低減は宇宙実験では欠かせない。宇宙について、実験の準備が整ったところで温度を上げると、イモリは冬眠から覚めて卵を産み始める(図1)。

実際には、産卵を確実にするためにイモリの皮下に生殖腺刺激ホルモンを含んだペレットを埋め込んでおき、温度上昇に伴い、血液循環が活発になることでペレットからのホルモン放出を促進する、ドラッグ・デリバリーシステムを採用することにした。

我々は、イモリを使った実験ミッションをAstronautに引っかけて、AstroNewt (newt イモリ)と名付け、他の実験機会への参画を図ったが、奇しくも日本の2回目のスペースシャトルミッションであるIML-2 (International Microgravity Laboratory-2)に採用されることになった。

IML-2では一緒に実験を行うメダカや金魚と循環水を共有する必要があったため、冬眠状態での輸送は行わず、搭乗実験者が生殖腺刺激ホルモンを直接注射し、産卵を誘導することにした。

二つの宇宙実験では、軌道上微小重力環境下での受精卵の産卵を確認し、重力が作用しなくとも初期発生が正常に進むことを明らかにした。⁽²⁾⁽³⁾ AstroNewt ミッションは、孵化幼生

の回収などに問題があったものの、両種類の発生に際しての地球重力の関わりについて、新たな知見を加えることができた。

1990年代に行われた多くの宇宙発生生物学実験によって、宇宙微小重力での受精とそれに続く初期発生は正常に行われることが確立されてきた。すなわち、

「地球上での進化の過程で確立された強固な初期発生イベントプログラムの進行は重力が消失することによって乱されることはない」

というのが生物学者の共通理解である。ただしこれには、「地上で形成された配偶子を用いるならば」という但し書きが付く。但し書きを取るためには、長期宇宙滞在による、世代交代を行う実験が必要となる。それを可能にするのが、国際宇宙ステーション(ISS)であった。

21世紀の宇宙科学を象徴するISSでの実験に向けて、マイナーリサーチからの実験計画の策定を進め、宇宙滞在で生物時間が変動する可能性に着目

した実験計画を提案した。その実験では、細胞分裂の回数と細胞寿命がリンクしているゾウリムシを用いることとした⁽⁴⁾。基礎的な実験を積み重ねて、搭載実験装置の試作にまで至ったのだが（写真3）、当時頻発したスペースシャトルやH II ロケットの事故を受けて、宇宙実験計画の見直しがなされ、結果として、ゾウリムシが宇宙を目指す計画は没になった。やはり宇宙はマイナーサーチの出る幕ではなかったかと思やきながら、メジャーなリサーチを立ち上げるために重要なことは、まず第一に機能的な研究グループを作り上げることだと理解させられた。

宇宙実験と並行してゾウリムシの重力走行行動の研究も続け、その結果として、重力走行行動に重力感知（重力依存の出力調整 gravikinesis）が関わっているという実験的証拠を示すことができた⁽⁵⁾。この成果はドイツのグループも同時に発表していて、細胞レベルでの重力受容が受け入れられるきっかけとなった⁽⁷⁾。しかし、細胞という

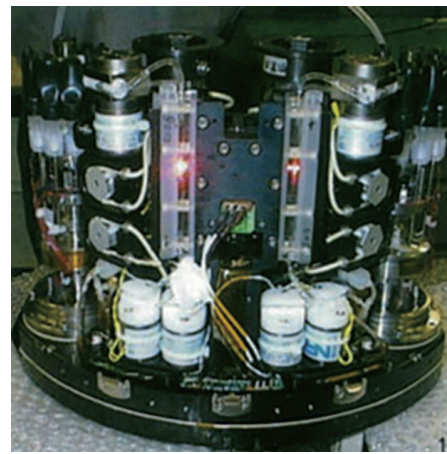


写真3 「宇宙滞在における生物時間：ゾウリムシのクローン寿命の変動」ミッションのための搭載実験装置試作品（千代田化工アドバンスソリューション提供）。

マイクロサイズでの重力感知を主張するためには、熱揺らぎから重力情報を弁別するメカニズムを確立する必要がある、物理学の原理を無視しない限り、「生物のシステムが持っているかもしれない特殊な増幅作用」を想定せざるを得ない。そんなことは生物学に生気説を復活させるようなものかもしれないが、全くオリジナルな Problem⁽⁸⁾として挑戦する価値があるのではないか⁽⁹⁾。

海を、地球を守るサンゴ研究

重力走行行動研究の現実的なスピンオフとして、サンゴの幼生の着床行動の解明に取り組むこととした。きっかけは、温室効果ガスによる近年の異常

気象であり、温暖化を防ぐには、二酸化炭素の大気からの除去が必要となる。炭酸カルシウムを海底に蓄積できるサンゴは植物以上の炭素固定能力を持っていると期待されるため、サンゴ礁を保全し、二酸化炭素の固定能力を高めることで、海を、地球を守りたい。

サンゴの卵は脂質を豊富に含み、産卵後は浮き上がる。軽い受精卵から発生した幼生は海を漂いながら、最適な場所を探して繁殖する。このとき、水面から海底に向かう行動が誘発されるが、従来は、脂質をエネルギーとして使い果たすことで相対密度が増加し、海底に向かって沈降するという受動的（非能動的）な移動が受け入れられてきた。しかし、サンゴのプラナラ幼生の遊泳行動を詳細に解析することで、着床時に見られる上下方向への移動は重力を指標とした能動的な運動性制御によるものであり、プラナラ幼生は海流に流されるだけでなく、積極的に着床に有利な場所を探すように遊泳している可能性を示し、幼生の分散と

着床（その結果としてのサンゴ礁の拡張）の理解を深める上での新たな知見を与えるものとなった。

ところで、サンゴの研究を続けているうちに、現在、地球の海が直面している問題に目が行くようになった。

今や、海は死にかけている。磯に出てみれば、深刻な「磯焼け」で貧相になった海岸の生態系を見ることになった。豊富だった生物集団がいなくなったことの原因は色々考えられるが、特に目に付くのが、プラスチックによる海洋汚染である。マイクロプラスチックが海底を覆ってしまっただけで、頑張ったところでサンゴは着床する場所を見つけないことができない。しかし、この汚染源はプラスチックの使用者である我々が日常的に気をつけることでもかなり取り除くことができる。そういう意味では、温室効果ガス対策よりも手軽に取り組みることのできる環境問題である。

国境のない海を流れ漂うプラスチックの漂着から海岸を守るには国際協力が絶対に必要である。国際善隣協会には、これまでの国際交流の資産を生か

して、海洋汚染に取り組むような活動の展開を期待したい。

おわりに

最後に日本の科学力の低下について、私見を述べたいと思う。

一般的に低下の原因として、

1. 技術立国の重点設定に沿うような研究が求められ、そのような分野に予算が集中されている、

2. 研究費が「競争的資金」となり、その獲得のためには、公募審査に通りそうなテーマに偏ってしまう、

3. 国立大学の法人化に伴い、国からの運営費・交付金が減ったことによる基礎研究の地盤沈下、などが挙げられている。

特に3番目の点については、法人化から20年後の今年度に行った国立大の学長へのアンケートでは、回答者の7割弱が、教育・研究機関として「悪い方向に進んだ」と考えていることがわかった。国や産業界がイノベーション創出を期待する国立大だが、国から

配られる運営費交付金が減額された影響を指摘する声が多かった。

これらが複合的に作用して、研究の自由度の低下をもたらしていると考えられる。研究は、土の中の種のようなもの。芽が出るまで良し悪しはわからない。しかし種を撒かなければ決して芽は出ない。

上記の問題に加えて、昨今の研究費の使用に関するコンプライアンスの徹底が、研究者の活動の自由度の低下を加速しているように感じる。

大概の大学や研究所では、毎年コンプライアンスの講習会があって、終わりにコンプライアンス遵守の誓約書を書かされる。誓約書を書きながら、こんな飼いやられた羊のような集団からは「やんちゃな研究」は育たないな、と思ってしまう。

本当のイノベーションを望むなら、常識を破壊するくらいのパワーが必要だろう。コンプライアンスの遵守は大事だけれど、何か他に大事なことがつぶされていると感じるのは、年寄りのひがみだろうか。何も、狡を見逃して

くれというわけではなくて、もったのびのびと研究ができるようなルールを作ってもらいたいと強く望む。

今は研究に関しては隠居状態である。しかし、マイナーリサーチの研究は、高価な装置を使わなくとも続けることができる。これまでも、特殊な研究目的に特化したような実験装置を手作りしながら研究を続けてこられたのだから、今後もしばらく基礎研究の醍醐味を味わいつつ、オリジナリティーの高い Problem の発見とその解決を目指してゆきたい。同時に「面倒くさい」ご意見番となって、地球の未来を担うような科学の発展をサポートできればと願っている。

引用文献(資料)

- (1) 黒谷(和泉)明美・大矢真弓・最上善広・山下雅道・奥野誠・馬場昭次(1989)「原生動物ゾウリムシの遊泳行動と重力」『宇宙科学研究所報告』vol.24、33〜47。
- (2) Mogami, Y., Imamizo, M., Yamashita, M., Izumi-Kurotani, A., Wiederhold, M.L., Koike, H. and Asashima, M. (1996) AstroNewt: early development of newt in space. *Adv. Space*

Res. 17, pp.257-263.

- (3) Mogami, Y., Koike, H., Yamashita, M., Izumi-Kurotani, A. and Asashima, M. (1996) Early embryogenesis of amphibians in space: AstroNewt for the space embryology in IML-2 and SFLU. *Adv. Astronaut. Sci. Ser.*, 91, pp.1089-1097.
- (4) 最上善広・馬場昭次・高橋三保子・高木由臣・三輪五十一(1994)「宇宙空間における生体寿命の変動―細胞クロン寿命の解析―宇宙利用シンポジウム(第11回)」、120〜122頁。
- (5) Ooya, M., Mogami, Y., Izumi-Kurotani, A., Baba, S., A., (1992) Gravity-induced changes in propulsion of *Paramecium caudatum*: a possible role of gravireception in protozoan behaviour. *J Exp Biol.* 163:pp.153-167.
- (6) Machemer H., Machemer-Roehmisch S., Braeucker R., Takahashi K. (1991) Gravikinesis in *Paramecium*: theory and isolation of a physiological response to the natural gravity vector. *J Comp Physiol A*, 168: pp. 1-12.
- (7) 最上善広・坂爪明日香(2015)「単細胞生物の重力感知」『メカノバイオロジー』(曾我部正博編)化学同人、9〜23頁。
- (8) 柴田文明・最上善広・藤枝修子・馬場昭次(1996)「拡散応答系における自己組織化への重力の作用の検証」宇宙利用シンポジウム(第3回)」、35〜38頁。

- (9) Fujieda, S., Mogami, Y., Furuya 『宇宙科学研究所報告』A, Shang, W. and Araisio, T. (1997) Effect of microgravity on the spatial oscillation behavior of Belousov-Zhabotinsky reactions catalyzed by ferrioin. *J. Phys. Chem. Part A*, 101, 7926-7928.
- (10) Takeda-Sakazume, A., Honjo, J., Sasano, S., Matsushima, K., Baba, S., A., Mogami, Y., Hatta, M. (2024) Gravitactic swimming of the planula larva of the coral *Acropora*: *Characterization* of straightforward vertical swimming. *Zool. Sci.*, 40(1): pp.44-52.
- (11) 朝日新聞デジタル (<https://www.asahi.com/articles/ASS4753QYS43ULL1001.html>) (2024年10月24日・公開講演会)

筆者略歴(もがみ・よっひる)

東京大学理学部、同大学大学院で動物生理学を専攻。理学博士。その後お茶の水女子大学にて、微小生物の遊泳を中心としたバイオメカニクスを研究。その過程で重力生物学に注目し、黎明期の日本の宇宙生物学の発足に関与。初期の宇宙実験や地上微小重力実験施設、航空機を用いた微小重力実験を行ってきた。