

第12回 環境サイエンスカフェ

テーマ 謎の深海生物チューブワーム ―共生進化を通して生命の本質を探る―
 講師 長沼 毅さん (広島大学大学院 生物圏科学研究科 准教授)
 日時 2012年11月21日(水) 18:30~20:00
 会場 サロン・ド・富山房 Folio
 参加者 52名



長沼さん：皆さん、こんばんは。広島から来ました長沼といます。今日は環境サイエンスカフェでお話しする機会を与えていただき、ありがとうございます。

謎の深海生物、チューブワームというものを題材に、深海という環境の話をしながらか、チューブワームという生き物そのものの話をしたいと思えます。チューブワームを知ることによってどんなことが見えてくるかということもお話したいと思っていますので、約1時間半、皆さんとのディスカッションタイムを確保しながら、お話しさせていただきます。

事前に、皆さんから質問票をいただいています。いくつかあって、これに答える形で話をしたいと思えますし、また、話し切れなかった部分は後でまとめてお答えできればと思っています。そもそも、最初の質問、ナンバー1が、チューブワームとは一体何なのかという質問で、これからお話しすることなので、ナンバー1の質問はもう終わったということにさせていただきます。

今日のサブタイトルは、共生進化を通して生命の本質を探るということですが、チューブワームを見ながら何が見えるかというと、いろいろなことがあります。今日は共生進化というものに着目したいという面もありますので、その辺を記憶に

留めておいてください。

チューブワームを語るに当たって、個人的なヒストリーからいきたいと思うのですが、私が18歳の時、高校3年生の時、1979年に結構偉大な発見が地球でありました。太平洋の海底の高温熱水噴出孔、太平洋の海底火山です。具体的には、メキシコの沖で海底火山が発見されたということです。海底火山の発見そのものに関しては、皆さんは「何だ、そんなもの」とお思いかもしれませんが、この時の発見は少し変わっていました。実は、この2年前、私が高校1年生の時、1977年から、この一連の発見物語は続いていて、これがそのとどめを刺したようなものなのですが、「このようところに海底火山があるなんて」というところで発見されたわけです。

しかし、その発見は思わぬ発見ではなくて、予想どおりの発見だったのです。今で言うプレートテクトニクスが、この時点ではまだ仮説でした。この仮説が理論に格上げされたのは、この一連の発見によるものです。この2年前からずっと続いた一連の発見によって、プレートテクトニクスが仮説から理論になりました。もちろん、そのほかにもいくつかサポーティングな情報はあったのですが、その意味では、これは想定内の発見です。

しかし、ここで面白かったことは、今、ここに煙突状の構造が見えますね。煙突状の構造から黒い煙のようなものが見えますが、これは煙ではありません。熱水というものです。熱い水ですから、要するにお湯なのですが、われわれ専門家はお湯と呼ばずに熱水といいます。どのくらい熱いかというと、100℃を超えています。100℃、200℃、300℃を超えています。300℃を超えて、場合によっては、水の臨界温度である 374℃も超えています。ですから、このまま水は沸騰することなく超臨界水になってしまいます。実際には海水とか熱水というものは純水、真水ではありませんから、臨界温度はもう少し高く、400℃近いですが、400℃だとしても、超臨界になるまでどんどん温度は上がっていきます。1度も沸騰することなく、超臨界水になってしまいます。

ちなみに、今お見せしている写真の場所は、水深がだいたい 2,500 メートルぐらいです。詳しい数字は分かりませんが、大雑把に言って、地球の火山の 8 割ぐらいは海底火山で、その多くは水深が 2,000 メートルから 2,500 メートルになります。地球の火山の 8 割が海底火山というと、えっ、と思うかもしれませんが、地球の表面の 7 割が海ですから、考えてみればそうですね。ですから、7 割よりも少し多いぐらい。海の方が少し火山は多めですというぐらいです。

だいたい水深が 2,000 メートルから 2,500 メートル。水圧にすると、200 気圧から 250 気圧です。そういう水圧の下ですと、水はなかなか沸騰しなくて、超臨界になってしまいます。結局、沸騰せず、泡は立ちません。

黒く見えるところは、この熱水、熱いお湯がいろいろな成分を溶かし込んでいるもので、それが海底から海水中に出るやいなや、黒くなります。出る直前まではクリアウォーターといって、無色透明のお湯なのです。出るやいなや真っ黒になります。それはなぜかという、この熱水の周りにはある深海底の水、だいたいこの辺の水の温度が 2～3℃です。冷蔵庫の庫内温度が 4℃ぐらいに設定されていますから、冷蔵庫よりも冷たい水が周りにたくさんあって、その中に、本当に点のように熱いお湯が出たところで、すぐに冷やされますから、温度が下がって、それまで溶け込んでいた成分があつという間に出てきてしまうのです。こ

れを専門用語では析出といいます。

出てくるものは、ほとんどが硫化水素と金属が結び付いたものです。具体的には、ヘドロの主成分である硫化鉄があります。ヘドロが真っ黒なように、硫化鉄も真っ黒です。硫化鉄はいろいろな色がありますがけれども、黒いものが多いので、このお湯から析出した硫化物の成分で全体的に黒く見える、黒い煙のように見えるから、黒い煙を吐き出すものという意味で、ブラックスモーカーといわれています。

その析出したものは、どんどん沈殿していきます。最初が、平らな海底の割れ目です。そこからお湯が噴き出して、沈殿物がどんどん沈殿します。それが、この煙突状の構造を作ります。英語でも Chimney と呼んでいます。Chimney というものに金、銀、銅の沈殿物が入っています。金鉱床、銀鉱床、銅鉱床です。

私は広島に住んでおりますけれども、その広島の隣、島根県に石見銀山という世界遺産があります。東京の人はあまり知らないかもしれませんが、時の大航海時代の世界に流通した銀の 3 分の 1 は石見銀山が産出したものでした。そういう意味で、あれは世界遺産です。それから、佐渡の金山。秋田の黒鉱。そういったものはみんな、かつての海底火山、かつての熱水噴出孔です。逆に言うと、今、ここで見えている熱水噴出孔は、今、作られつつある金鉱床、銀鉱床、銅鉱床、その他諸々です。

そういうことで、地質学的に、あるいは資源学的には、ここは昔から非常に注目されておりましたが、今でこそ熱水噴出孔と呼んでいるけれども、昔は熱水鉱床と呼んでいました。鉱床というのは、そういった金属資源を産出するもので、熱水鉱床的、地質学的には想定範囲内の形です。しかし、想定範囲外だったのは、周りに見える謎の深海生物、チューブワームです。

1977 年に見つかった時、出てくるお湯の温度はたかだか 20℃だったのです。ですから、お湯が出てきたところで面白くないから、何とも思われなかったのですが、実はその時にチューブワームもいました。それから 2 年後、300℃を超える、非常に高温のお湯が出てきたのですが、その周りにもチューブワームがいるのです。お湯は 300℃を超えています、周りの水が冷たいから、1メ

ートルも離れてしまえば、あっという間に 50°C 以下、30°C ぐらいになってしまいますので、チューブワームはギリギリまで生えることができます。この時点で、まだチューブワームの正体はよく分かっていません。

チューブというのは管ですよ。管というか、筒。筒状の生き物がいて、ワームというのは虫という意味です。羽がはえてブンブン飛ぶ虫はバズとって、ミミズのようにニョロニョロする虫はワームですから、これは、筒状の構造に入っている、ミミズ状の虫という意味です。

白く見えているのは、これは次のスライドで少しよく見えますね。一本一本の白い筒が 1 個体です。これは最初に申し上げますけれども、雄、雌、バラバラです。雌雄異体というものです。こちらの小さいスクリーンに映っているものがリアルスケールに近いサイズです。白い筒は、硬いです。カニやエビの甲羅と同じ成分できていて、おおむねキチン質です。硬い筒の中に柔らかいミミズのような軟体部が入っていて、先端部が赤く見えます。ほかに大した構造はありません。構造についてはまた後で詳しく述べますけれども、チューブワームの概略としては、そういう形の作りの生き物であるということです。

これは、光が届かない、暗黒の深海底ですから、そこには植物はいません。ここにいるのは、全部動物です。したがって、チューブワームも動物ですけれども、驚くべきは、チューブワームは物を食べません。およそ物を食べない生き物は、植物ですよ。動物は物を食べる生き物であるというふうにわれわれは理解しています。ところが、このチューブワームは、れっきとした動物ですけれども、物を食べません。その時点で、これはもう矛盾した存在です。

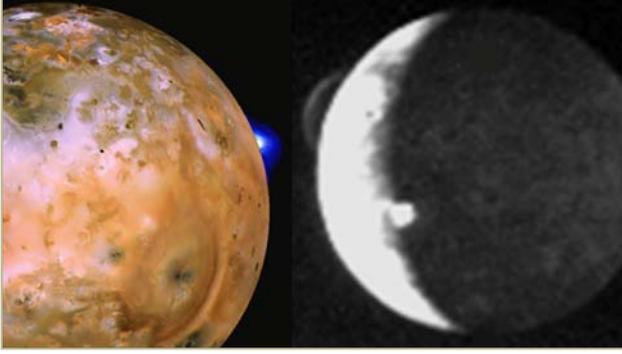
要するに、植物と同じように自分で栄養を自給自足するわけです。植物は、栄養を自給自足します。だから、物を食べませんけれども、それは、植物が太陽の光を浴びて光合成をするからです。「チューブワームもどうせそんなことやっているのでしょうか」と思いますよね。でも、光がないから、光の代わりにどんなエネルギーを使いますか？ということ。それは、海底火山に由来するエネルギーを使うということが一つの鍵です。場所によっては、このようにワサワサ生えていま

す。私たち、深海を調査する者は、長い間、深海というのは、生物が極端に少ない、砂漠のような場所であると考えてきました。ゆえに、深海砂漠という名前もありました。実際、海底火山以外の普通の海底は、実に砂漠のようです。でも、ここ、海底火山は、チューブワームを中心とした生物が本当にたくさんいて、例えば、今見えている、この密集部は、地球上のどの生態系にも見られないほどの高密度な生物群集です。よく言うサンゴ礁とか熱帯雨林とか、あそこと比べても、1 平方メートル当たりの生物量は群を抜いています。1 平米当たり 30 キログラム以上あります。熱帯雨林に入れば、木の生えている 1 平米はすごいですけれども、熱帯雨林全体でならしてしまえば、そんなに生物はいません。サンゴ礁は、もっと貧弱です。それに比べて、ここは非常にのどかではあるけれども、地球上では最高の生物群集密度を誇っています。深海砂漠に対して、オアシスとっていいと思います。本当の砂漠は、光はあるけれども水がないから、植物は育ちません。光はあるけれども水がない砂漠に水が出たら、オアシスですよ。これは分かりやすいです。深海砂漠では、水はジャバジャバあります。でも、光がないから、深海砂漠ですよ。そこに光があったらオアシスですが、そうではありません。光の代わりに海底火山のエネルギーですというのが、われわれの一番簡単な理解だったのです。

今のチューブワームたち、海底火山の発見とほぼ同じ週、これもまた私が高校 3 年生の時に、偉大な発見が、今度は地球外でありました。本当に同じウィークというのは偶然ですけれども、私にとってはとてもわくわくすることでした。

地球外の天体で初めて火山活動が発見されたのが、チューブワームと、メキシコ沖の海底火山発見と同じウィークです。ここに噴煙が見えますよね。確かボイジャー 1 号だったような気がするのだけれども、それが発見しました (図 1)。発見したのは、NASA の女性研究員です。男性研究員が写真を撮らペラ見捨てているのに、女性の研究員が 1 枚 1 枚丁寧に見ていたら、こんなのがありましたと。これは、木星の衛星、木星の月です。木星には、今、66 個の衛星があるといわれていますけれども、そのうちのイオという第 1 衛星に火山活動が発見されました。

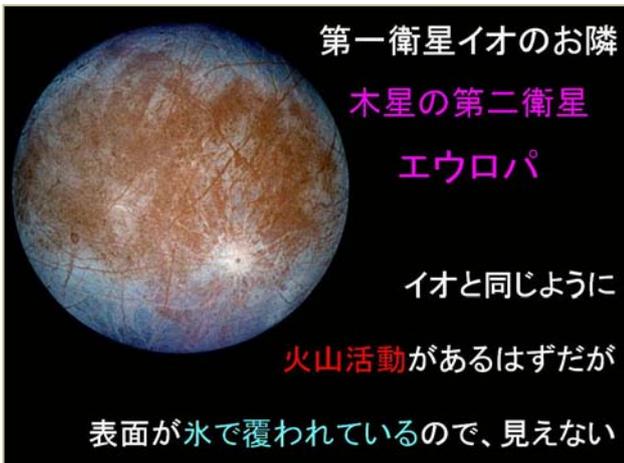
1979年、木星の第一衛星イオに火山活動
(長沼 18歳、高3)



【図1】

なぜイオに火山活動があるかというのは、今日は長くなるため省略しますが、放送大学の太陽系の科学という講座で、何でここに火山活動があるのかということ、私が担当しています。放送大学は無料で見られますので是非見ていただけたらと思います。

一番簡単に言うと、木星の衛星、第1、第2、第3、第4ぐらいまでは非常に大きいのです。太陽系でも一番大きい方です。その大きい衛星たちと木星という、太陽系で一番大きい惑星の間で引力の綱引きのようなことがあって、その間に挟まれているイオやエウロパで火山活動があるということです。第1衛星に火山があれば、お隣の第2衛星にも火山があるよ、と思いませんか。あります。ありますというか、あるはずです。あってしかるべきです (図2)。



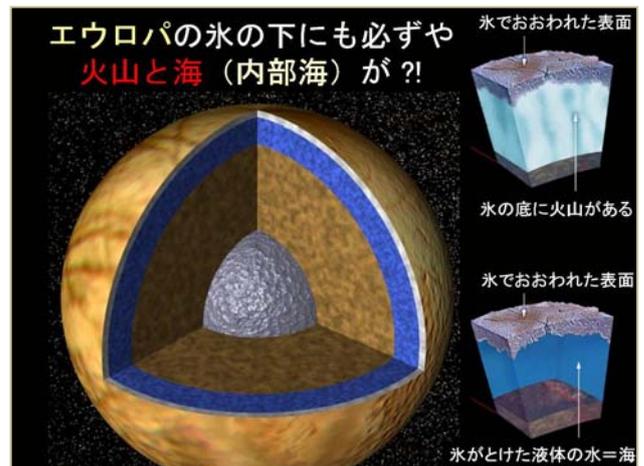
【図2】

これは、私がさきほど言った、引力の加減で絶対にあるはずだというのは本当なのですが、このエウロパは、火山活動があるはずなのですが、見えません。なぜかということ、表面が全部氷

で覆われているからです。表面が氷で覆われているということ、そんなことあるのですか、不思議だなと思うかもしれませんが、太陽系においては、表面が全部氷で覆われている星はさほど珍しくありません。ほかにもいくつかあります。別に驚くに値しないし、われわれの地球でさえ、地球の歴史において、過去、最低2回か、もっと多くの回数、全部氷で覆われた、いわゆる全球凍結、スノーボールアースという出来事があったのですから、全球が氷で覆われることは別によくある話だと思っています。

問題は、その氷の下に火山活動があるよねということです。氷の底に必ずや火山活動があるから、その火山の熱で必ずや氷の底が溶けているだろうという推測が成り立って、この推測は、今から33年前、私が高校3年生の時にあり、ほとんどの惑星研究者はそう思っていました。

そして、下の方の氷が溶けて、氷の底で海になっている。簡単に言うと、表面が氷で、内側に岩石があって、岩石と氷の間に液体の水、すなわち海があるのです。サンドウィッチ構造で液体の水、すなわち海が挟まれていると。そういった、挟まれている海のことを、私たちは内部海と呼んでいます。この内部海の海底には必ずや火山がある、つまり海底火山があるということが分かります (図3)。



【図3】

地球の海底火山にはチューブワームがいました。では、エウロパの海底火山にはチューブワームがいますか? という問題意識は、1979年、33年前の時点で出ていました。エウロパの海底火山にチューブワームがいるかなという、この意識は、もう私が高校時代にありました。そして、これは高

校3年生の私の問題意識にもなって、今でも私はこの研究をやっています。このことを調べたくて大学に入ったようなものです。結局、私は、いろいろありまして、JAMSTEC、今の海洋研究開発機構に入所して、実際に、潜水船「しんかい」に乗ってチューブワームの研究をやりました。

紆余曲折があったのですけれども、JAMSTECの話若干させていただきます。日本の深海研究において、今動いている潜水船は1隻しかありません。「しんかい 6500」といいます。ほかにも、「しんかい 2000」もありましたが、「2000」の方はもう引退しました。「6500」は、平成元年に就航して以来、25年目です。頑張っています。「しんかい 6500」は、世界で一番深く潜れる、世界最高の性能を誇る潜水船だったのですけれども、今年(2012年)の7月に中国の潜水船に抜かれました。中国が7,000メートル潜って、日本の船は名前どおり6,500メートルしか潜れないので、抜かれました。

しかし、この6,500メートルしか潜れないというのは現実的には嘘で、日本では安全係数が高いです。安全のマージンというか、余裕度が高いです。確か1.5倍か1.6倍ありますので、この船は1万メートル行けます。本当は1万メートル行けるのですけれども、一応安全係数を勘案して6,500止まりです。文部科学省のご通達により、6,500メートルを1ミリたりとも超えてはいけません。中国の潜水船がいかなる船であるかは知りませんし、具体的に安全係数がいくつであるか分かりません。もしかしたら安全係数ギリギリかもしれないけれども、7,000まで行っています。水圧の方はもう少し後でお話ししますが、**「しんかい」**に関して言えば、この会場に役所関係の方はいらっしゃいませんよね？しんかいは一応文部科学省の所管下になるので、基本系は役所です。だから、深海の稼働時間は9時 - 5時です。9時に潜って5時に上がります。もちろん、その前から準備はやっていますから、本当に朝早くから準備を始めて、9時に潜行を開始して、5時に浮上して回収して、回収した後も、もちろん長い時間かけて点検、明日への潜行の準備、その他諸々やります。だけれども、本当に水に入って上がるのは9時 - 5時だということです。

9時 - 5時ですから、もちろんランチは持って

いきます。いろいろなランチがあります。おにぎりやサンドウィッチ、それから時々、船の昼飯のような重があるのです。今日はどうな重にしてくれというリクエストしたりします。

それから、トイレのことはよく聞かれますので、最初に言うておきます。トイレは、常備しているのは、ユリアパックといって、車の中でおしっこをして固めるものです。あれを常備してあります。私もずいぶん使いました。1回潜って二、三個使ったこともありますけれども、1回失敗してしまったことがあって、ドボドボこぼしてしまって、潜水船の中にまき散らしてしまって、とても怒られて、それ以来、使っていません。それ以来、老人介護用の大人用のおむつを使っています。

「しんかい 6500」で6,500メートルまで仮に潜ったとすると、その水圧はどのくらいでしょうか？水圧は、水深のメートルから0を1個取ってください。そうすると、650ですよ。単位は気圧です。650気圧。気圧について、ご存じの方には釈迦に説法ですけれども、知らない方に言います。気圧というのは、例えば、この環境は1気圧です。皆さんの頭の上に空気が乗っかっているわけですが、成層圏から地表までだいたい100キロメートルですから、頭の上には厚さ100キロメートル分の空気の重さがかかっているのです。これが1気圧です。もう少し精密にいうと、1平方センチメートル、だいたい皆さんの指の爪ほどの面積に1キログラムかかったら1気圧です。だから、普通のペットボトル2本分です。爪の面積にペットボトル2本分かかったら1気圧です。でも、皆さん、そんな重さがかかっているなんて全然知らないでしょう。生まれてから今日に至るまで、みんなそれがかかっているから、全然気にもとめませんが、皆さんにもう1気圧乗せると、皆さんはすぐつぶれます。ドラム缶もつぶれます。たったのもう1気圧で。

650気圧は、どうですか。皆さんの指の爪ほどの面積に650キロ乗るのです。相撲取りが4人分か5人分です。これが爪の面積ほどに乗ってきて、体中まんべんなく来るのが650気圧です。

「しんかい」は、この中に、丸い、直径2メートルの玉が入っていて、その中に人が3人ほどいますけれども、玉の中は1気圧です。外は650気圧です。その650気圧を支えてくれるものが、玉

の壁です。これは、厚さ 17 センチのチタン合金です。この厚さ 17 センチのチタン合金が 650 気圧を受けてくれて、中にいるわれわれを守ってくれるという乗り物です。中国の船はチタン合金ではなくて、確か何かスチールで、名前は忘れただけけれども、スチールです。だから、材質的には我々の方が上を行っていると思います。

「しんかい」は、過去、平成元年から始まって、今、24 年目です。数々の成果を挙げてきましたし、たぶん水中でのパフォーマンスは相変わらず世界最高だとは私は思っています。単に 7,000 メートル潜った、潜らないではなくて、水中での性能です。そういったパフォーマンスは、「しんかい」はなかなか素晴らしいと思います。この「しんかい」に乗ってチューブワームに会いに行きましたということです。

ここでチューブワームの説明をしたいと思いません。学問的にはれっきとした動物で、有髭（ゆうしゅ）動物門というグループに入ります。グループ分けは諸説紛々あって、今でも現代生物学においてはいろいろな分類分けは変わってきていますけれども、とりあえず間違いないのは、これは動物だということです。動物というのは、およそ物を食べる生き物であるというふうに私は言いました。これは大筋で間違いありません。けれども、このチューブワームは動物なのに、物を食べない動物だということが異常なのです。

そもそも物を食べるための消化器官、口、胃腸、肛門がありません。しかし、物を食べないとはいっても、栄養はとる必要があります。あの植物でさえ、物は食べませんが、栄養は自分で作っています。光合成ででんぷんを作っています。このでんぷんは、もちろん植物自身のためのもので、その上前をわれわれ人間がピンはねしていますが、植物はそうやって栄養を自分で作っています。

チューブワームもそうです。栄養を自給自足しているはずですがけれども、厳密に言えば、チューブワームがそれをやっているのではありません。チューブワームの体内に住んでいる別の生き物がチューブワームのために栄養を作ってくれるのですけれども、その別の生き物とチューブワームをあえて分けて考える必要がないので、一緒にたにするということを前提にこれからお話しします。

栄養を自給自足するのは、チューブワームの体内に住んでいる共生微生物です。チューブワームと共生関係にある、特殊な微生物が栄養を作ってくれています。どうやって作るかというと、これまた面倒くさいのですけれども、そのヒントは、この生き物が海底火山に住んでいるということです。そこにヒントがあります。

体内に住んでいる共生微生物と申しますが、そういうふうになると、皆さん、自分だって持っているよとお思いでしょう。具体的には、腸内細菌です。腸内細菌いますよね。腸内細菌がいるおかげで、われわれは日々の健康的な生活が営めますから、あれも体内に住んでいる共生微生物といってもかまいません。ただ、腸内細菌の居場所はどこですか。腸の管の壁ですよ。私にとって、腸管の壁というのが体内には思えないのです。なぜならば、極端なことを考えますけれども、私たちの体はドーナツであると思って、ドーナツを縦に伸ばして、上の穴が口であって、下の穴が肛門であって、間を結ぶのが食堂や胃や腸です。では、腸の管の壁というのはどこですか。もともとドーナツの穴の表面じゃないですか。ドーナツの穴の表面はドーナツです。体内に見えますか。私には体外に見えます。

だから、ドーナツ的な生き物にとって、本当の意味の体内というのは、ドーナツに指をぶすっと刺した、その部分でしょう。その部分が体内です。私には穴の表面は体外だと思えるので、私たちの腸内細菌は厳密な意味では体内ではないと私には見えるし、たぶんチューブワームに意思があったらそう言うと思います。口があったらそう言うはずです。

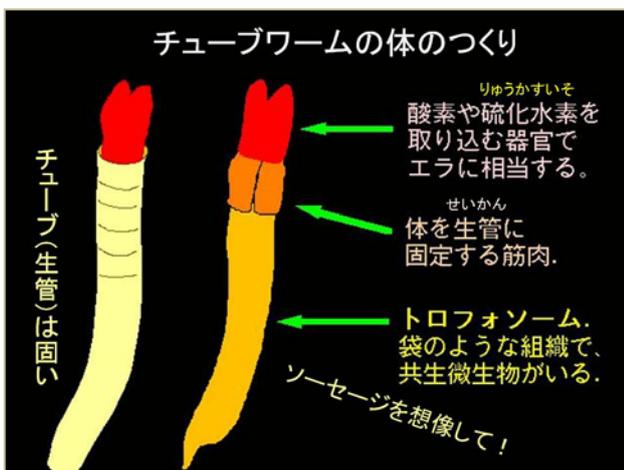
チューブワームの場合は、そもそも口も胃腸も肛門もない、穴のないドーナツです。チューブワームの体内というのは、本当に、穴のないドーナツに指をぶすっと刺した、その部分です。その部分に微生物がワサワサいます。どれだけワサワサいるか、また後で言いますけれども、本当にワサワサいます。

こんなことが人間で起きたら、どうなるでしょうか。おそらくは、腹膜炎、肋膜炎、敗血症、破傷風、感染症です。でも、チューブワーム自体は感染症を起こしていません。そういうところから、非常に良好な共生関係を結んでいるということ

す。

このこと自体はおそらく、われわれ人間における感染症を考える上で、一つのモデルケースになるかもしれません。人間の体内に微生物が入り込んできて腹膜炎や肋膜炎を起こす、その感染という現象のメカニズムを解明するときに、チューブワーム、これは感染しません。するのですが、病気になるりませんので、何でという、このシンプルなクエスチョンが生れます。

チューブワームの発見が実際には 35 年前あるいは 33 年前ですが、その三十数年間、まだ分かっていません。21 世紀のチューブワーム研究における一番大事なポイントになるかもしれません。



【図4】

もともと簡単な作りなので、チューブワームの体の作りを簡単に言います(図4)。チューブ、この白っぽく見える管は、先ほど申しました、カニやエビの甲羅、あるいはカブトムシやクワガタの殻と同じような硬い物質で、キチン質という物質でできています。この中にミミズのような柔らかい軟体部が入っていて、上の赤い部分がえらです。魚のえらと同じようになっていきます。その下にちよつとした筋肉があつて、これは内側から突っ張つて、体をチューブ、管に固定する役割を果たしています。あるいは、場合によっては、えらを引っ込めるような役割もしています。

その下に、長い、大部分を占めているトロフォソームという名前の組織があります。日本語はないので、とりあえずカタカナでトロフォソームと呼んでいます。イメージとしてはソーセージのようなものです。ソーセージの中身はぐちゃぐちゃですよ。このトロフォソームも中身はぐちゃぐちゃです。そのぐちゃぐちゃの大半が共生微生物

物だということを今から申し上げようと思います。えらに関しては、魚のえらと同じです。魚のえらは周りの海水から酸素を取り込む器官ですよ。チューブワームに関しても同じです。酸素を取り込みます。それと同時に、もう1個、硫化水素も取り込みます。これについてはまた後で触れますが、火山ガスで、毒ガスです。これも酸素と一緒に取り込むような働きをしているのが、えらです。ちなみに、このチューブワームは、潜水船で行って、マジックハンドでぐしゃっとつかんで、ガツと持って上がってきます。上に上げてきても、別に膨らんだり、破裂したりしません。だいたい深海生物の多くは、破裂も何もありません。つぶれてしまつとか、逆に破裂するというのは、中に空気がある場合です。チューブワームのような本当の深海生物は、中に空気のある部分がないので、つぶれもしないし、膨らみもしません。魚などは浮き袋の部分に空気があるので、あそこが圧縮されて浮力を失つて沈んでしまつとか、逆に何かの理由で、例えば急な潮に巻き込まれて急に浅いところに行くと、圧力が下がって、浮き袋がプクッと膨れてバランスを失つてしまつということがあります。私は、そういう魚を、真の意味で深海魚とは認めていません。本当の意味の深海魚は、浮き袋の中に油が入っています。油が入っているとつぶれないからです。

ちなみに、中に空気がなければつぶれませんが、空気が入っていると、ドラム缶などは10メートルでつぶれます。でも、中に空気が入っていなければつぶれません。例えば、お豆腐です。お豆腐を「しんかい」に乗せて、外に置いて、潜水船で沈みます。お豆腐は、何の変化もありません。手でつかんだらグチャツとつぶれる豆腐ですよ。あのようなものが、圧力ではびくともしないのです。中に空気があるかないか、これがいかに重要であるかということです。

そういう理由で、チューブワームは、中に空気がないので、つぶれないし、上に持ってきても、膨らんだり、破裂したりしません。チューブワームを持ってきて、船の上で中身を取り出そうとします。うまく上からニユルッと抜ければいいのですけれども、上手にはなかなか抜けません。途中でちぎれたりすると、もう悲惨なことになるから、ちぎれないようにゆっくりと上手に抜くか、発想

の転換で、チューブのおしりの方に口を付けて、プーっと吹くと、頭の方からニュルっと出てくるのです。ところでんみみたいな感じでピューっと抜けます。チューブワームの筋肉が内側から突っ張って、なかなか簡単に出てきません。でも、それにも負けずに、もう頬を膨らませて、プーっとやると、ニュルっと出てくるんです。それを、例えば30本取ったら30回やるわけです。

潜水船で上がってきて、それから一通りサンプルを回収して、さっさとご飯を食べて、またラボに戻ってそんなことをやっている、だいたいチューブワームと格闘するのが、場合によっては夜の12時になることもあります。

12時になると、船員さんが、見回りに来ます。薄暗い研究室で口にチューブワームを加えてプーっと吹いている、私がそんなことをしていると、長沼が何か謎の物体Xに侵されたというような大変な話になったりします。あの実験室は閉鎖しろとか、隔離しろとか言われたことがあって、なかなか大変です。

たぶんこれが今日のスライドで一番難しいと思うのですが、謎の深海生物、チューブワームの秘密と言いました。猛毒の硫化水素を食べる共生微生物。硫化水素を食べるとするのは少し変な表現ですが、あえてそういうふうに言わせてもらいました。

まず、硫化水素です。これは、よく温泉地帯に行くと臭いにおいがしますね。あれが硫化水素です。猛毒です。あれを吸って亡くなる方がいまだに年に何人かいらっしゃいます。温泉地帯に行くと臭いにおいがしたら近付かない方がいいと思います。ちなみに、へドロから出てくる臭いにおいも硫化水素です。この硫化水素は、しばしば、卵が腐ったにおいといわれています。猛毒の硫化水素を食べるとするのは、比喩的な表現なので、もう少し詳しく説明しますが、そういった共生微生物が体内にいます。口も胃腸も肛門もありません。普通のものを食べないで、代わりに硫化水素を食べます。

厳密に言うと、硫化水素、簡単に言えば硫黄です。硫黄というのは、火をつければ燃えますよね。火をつければ、硫化水素も燃えます。燃えるということは、専門的には酸化反応といって、燃焼、燃えるということですから、エネルギーを出しま

す。普通、物が燃えれば光や熱などのエネルギーを出しますが、生物作用で燃焼する場合には非常にゆっくりですから、熱は出しますけれども、光は出しません。でも、光を出さない代わりに化学エネルギーというものを出します。これが何であるかは、今日は説明しませんけれども、化学エネルギーというものを出します。その化学エネルギーを用いて、植物の光合成と同じことをします。同じことというのは、具体的には何でしょうか。具体的には、でんぷんを作ることです。植物は、でんぷんを作りますよね。私たちが食べるお米、パン、じゃがいも。あのでんぷんは植物が光合成をして作るものです。このチューブワームの体内に住んでいる微生物もそれをやってくれます。ただし、光エネルギーを使わないで、化学エネルギーを使います。

化学エネルギーは、この微生物が自ら硫化水素を燃やして得るエネルギーです。燃やすためには酸素が必要です。その酸素を、また、この赤いえらの部分から吸収します。魚のえらと同じですから、まず酸素を吸収します。そして、硫化水素という硫黄成分、猛毒のものを吸収します。チューブワームは硫化水素の毒性を打ち消す働きがあるから、大丈夫です。このえらの赤い色はなぜかという、われわれの血液と同じ、ヘモグロビンというものが、この赤い色を出しています。実はこのことは異常なのです。赤い血液を持っているのは、実は背骨のある生き物なのです。ほ乳類から鳥類、は虫類、両生類、そして魚類に至るまで、背骨のある生き物が赤い血液を持っているんだけれども、チューブワームは背骨がありません。背骨がない生き物は、血液を持ってないこともあります。もし持っている場合は青か緑です。例えば、イカやタコも血液がありますが、薄い青ですね。イカやタコを切って赤い血が出たら、皆さん、びっくりするでしょう。イカやタコを切っても赤い血は出ないから、皆さん、安心していただけますけれども、チューブワームも本来だったらそちらの系統ですが、これは例外的に赤い血液を持っています。ヘモグロビンです。

ただ、チューブワームのヘモグロビンはわれわれと違って、われわれのものよりも10倍大きいです。これは大きいことに意味があって、われわれのヘモグロビンは、肺で酸素をくっつけて、血液

の流れに乗って体の隅々に行き、行った先で酸素を離して体の各部に酸素を与えます。これがヘモグロビンの役割ですが、チューブワームもそうです。

でも、人間のヘモグロビンは、硫化水素があると、酸素よりも先に硫化水素がくっついてしまうことがあります。そうすると、もう酸素がくっつかないのです。結局、酸素が体の隅々に運ばれません。われわれの体で一番酸素を使っているのは、脳です。脳が酸欠になって、即、死にます。だから硫化水素は怖いのです。でも、チューブワームのヘモグロビンはわれわれのものよりも10倍大きいので、酸素もくっつけるし、硫化水素もくっつけます。同時にくっつけて、体の奥深くへ運んでいくと、そこには共生微生物がいるのです。今、見えていますね。えらがあって、ソーセージ状のトロフォソームという部分があって、中身がぐちゃぐちゃです。このぐちゃぐちゃの部分が、気持ち悪いけれども、実はほとんど共生微生物です。トロフォソームの部分がチューブワームの体の大半を占めています。そのトロフォソームの中はほとんどが共生微生物で、しばしばチューブワームの全体重の半分以上を占めます。こうなると、もうどちらが本体か分かりませんが、そういう生き物です。

ちなみに、共生微生物の話を、もう1回私たち人間の方に照らし合わせて考えると、われわれ人間も腸内細菌と一緒に住んでいますよね。それで日々の健康的な生活を営んでいます。もちろん皮膚にも常在菌がいます。皮膚に常在菌がいてくれて、口の中にも常在菌がいてくれて、腸内細菌がいてくれて、これとわれわれの体の協働作業で日々の生活を営んでいますけれども、私たち一人一人の自分の細胞の数は何個でしょうか。

私たちの細胞の数は、60兆個です。それに対して、皮膚の常在菌や口の常在菌、腸内細菌、これら全部合わせると何個かという、100兆個です。自分の細胞60兆個とよその生き物の細胞100兆個から成っているのが、私たちなのです。もちろん、いろいろな方法によって、それらの微生物100兆個を除去することはできます。でも、その100兆個の生き物を除去した瞬間から、私たちは日々の健康的な生活を営めません。

ということで、私たちの普通の当たり前の生活

は、自分の細胞60兆個とよその生き物100兆個からなる協働作業です。ある意味では、われわれ自身がもうすでに共生体だということです。ただ、チューブワームの共生関係は、それをはるかに凌駕した、もっと密接なものです。我々も、ある意味、緩やかな共生体であるといつてよいでしょう。

ちなみに、私たちは、誰でも腸内細菌を持っています。たぶん皆さんの腸内細菌は、かき集めると、一人頭1.5キログラムです。皆さんの体重は知りませんが、体重の1.5キログラムは腸内細菌です。チューブワームに至っては、もう少し甚だしいのです。体重の半分以上が体内の共生菌であるにご理解ください。

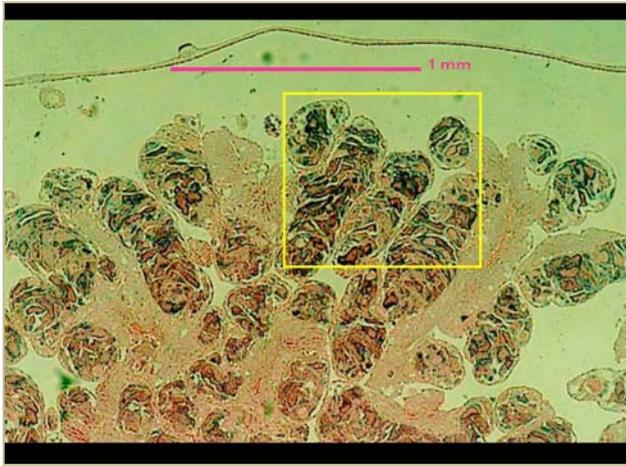


【図5】

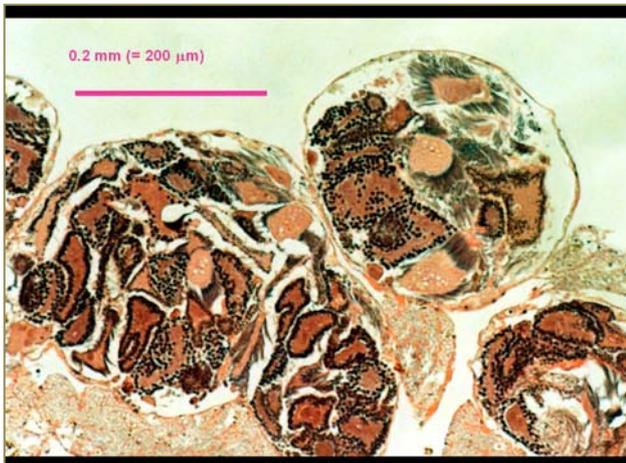
トロフォソームの輪切りをお見せします(図5)。トロフォソームをいろいろな方法で固めて輪切りにしました。全体的に黒っぽく見えるところに共生細菌がいます。少しずつ大きくします(図6、図7)。こんな感じでどんどん大きくしていくと、今見えているのが、何となく丸っこい部分が見えますね。大きい、丸っこい部分です。これが1つの単位というか、この中にチューブワームの細胞が数個から十数個入っています。

チューブワームの細胞というのは、具体的には、黒い点々で縁取られているものが1つの細胞です。実は、この黒い点々が共生微生物です。黒い点々がちょうど細胞の表層直下というか、すぐ内側にいます。一応細胞内ですけども、細胞膜のすぐ内側にいて、あたかも細胞を縁取るかのように存在しています。大事なことは、共生微生物は細胞内に存在するという事です。ここでは丸っこいものが見えていますけれども、それからさらによく見ると、また細胞の外にモサモサしたものが見

えます。毛が固まったようなものです。これは細胞の外にいますけれども、細胞と細胞の隙間を埋めるように何かモサモサしたものがいて、これは第2の共生微生物だと思いますが、これは細胞内には入っていません。



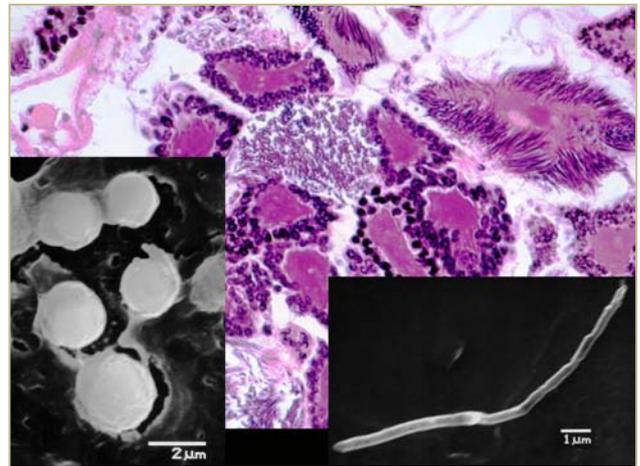
【図6】



【図7】

共生微生物が細胞内に入るといのは、かなり異常です。全く例がないというわけではありません。例はいくらでもあるのですけれども、やはり細胞内に侵入すること自体が異常です。細胞側と入り込んだものとの間に持ちつ持たれつの関係はよくありますが、チューブワームの場合は、その関係が非常に緊密です。この緊密さをもう少し詳しく述べてみたいと思います。

今、黒っぽい丸が見えますね (図8)。電子顕微鏡で見ると、丸っこい菌です。それから、外側にある、モサモサしたもの。これは糸状の細長い菌だし、チューブワームの1つの個体の体の中にも複数の微生物が入り込んでいることがあります。一番多いのは、1個のチューブワームに、たった1種類の共生微生物が入っていることです。これ



【図8】

が典型的な例ですけれども、われわれが研究した中では、1つの個体の中に2つ、3つ、それ以上の微生物が入り込んでいる例も多々ありました。次にお見せるのは、もっと分かりやすいです。

次にお見せるのは、ここにソーセージ状の微生物がいますね (図9)。これはソーセージ状のもので、これが典型的な微生物の形なので、分かりやすいでしょう。私、今、微生物と簡単に言ったのですが、この微生物をしっかりと学問的に言うと、細菌です。英語では、バクテリアです。いわゆる大腸菌とか乳酸菌と同じような生き物です。チューブワーム体内の共生微生物で、名前が硫酸化細菌というものです。硫酸化細菌と呼んで結構です。

きょうせいびせいぶつ

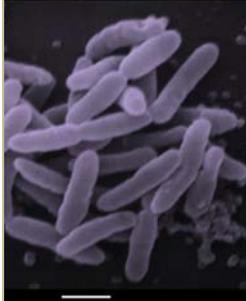
チューブワーム体内の共生微生物
イオウ酸化細菌

植物の光合成と同じことしてる

暗黒の光合成

光ではなく火山のエネルギー

- ・イオウ(硫化水素)を酸化・燃焼して化学エネルギーを得る。
- ・そのエネルギーを使ってCO₂から自分の体と栄養をつくる。



【図9】

このソーセージ状のサイズです。下に白いバーがあって、そのバーが1,000分の1ミリメートルです。だいたい1,000分の1ミリメートルくらいのサイズなので、簡単に言えば、1つの細胞、1つのソーセージが1,000個連なったら、やっと1ミリメートルというサイズです。非常に小さい生き

物です。これがチューブワームの体内にワサワサいるわけです。

これは、硫黄酸化細菌です。硫黄を酸化する、硫黄を燃焼するものです。燃焼して出てくる化学エネルギーを使って植物の光合成と同じことをします。硫黄を燃やすこともあれば、火山ガスである硫化水素を燃やすこともあります。作るものはでんぷんです。

でんぷんを作るときの原料は、何でしょうか。植物もでんぷんを作りますが、植物がでんぷんを作る原料は、二酸化炭素、CO₂です。CO₂といえば、私たちが呼吸で吐き出すか、あるいは物を燃やしたときに出てくる排気ガス、車や工場から出る排気ガスに入っていますよね。普通はCO₂というと捨てるものですが、植物やこの微生物にとっては、CO₂はでんぷんを作る原料です。このことが一つ、意外と大事だということを後でお話します。チューブワーム体内にこれがいて、この生き物は、ここの海底火山においては硫化水素を酸素で燃焼してエネルギーを得て、そしてCO₂からでんぷんを作るという話です。

さあ、硫化水素と酸素が2つ出ました。この2つの物質が共存することは、自然界ではまれです。全く皆無ではないけれども、まれな現象なのです。でも、チューブワームの体内にいれば、チューブワームの素晴らしいヘモグロビンのおかげで、硫化水素も酸素も両方入ってきます。チューブワームの体内にいて、そこは天国ですよ。それでじゃんじゃんでんぷんを作りまくって、余ったでんぷんはチューブワームの方に流れます。これは、完璧な共生関係です。このおかげによって、チューブワームは物を食べずに済んでいるのです。これほど完璧な共生関係はほかにあるのでしょうか。ありません。もし強いて挙げるとすれば、それは植物です。でも、本当に光合成をしているのは、何ですか。植物の細胞の中に存在する葉緑体というものです。

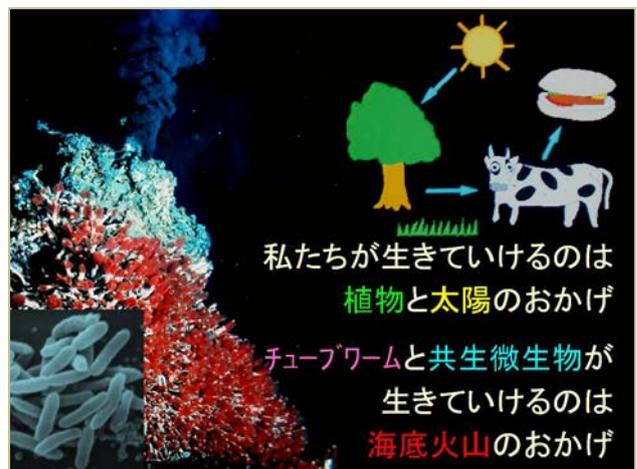
葉緑体は、もともと別の生き物です。皆さん、名前は知っているでしょう。シアノバクテリアというものです。光合成をするバクテリアです。シアノバクテリアが植物のオリジナルな植物細胞の中に侵入して、そこで非常に良好な共生関係を結んで居座ってしまったものが、今の葉緑体です。だから、このチューブワームの共生関係に匹敵す

るのは植物しかないと言ってよいでしょう。それはまた後で言いますけれども、もう1個あります。これは後で言います。

まず、チューブワーム発見の衝撃です。チューブワームの衝撃というのは、一つには、ここにあります。

まず、私たちがご飯を食べる、パンを食べるといっても、それは稲や小麦の体を食べていることで、植物に依存しています。植物は光合成を通して太陽に依存しているから、私たちは究極的には太陽を食べているという比喩的な表現もできます。自分は牛を食べているといっても、牛だって所詮は牧草を食べていて、牧草は太陽に依存しているから、牛や牧草を通して、やはり太陽を食べています。それは、もう食物連鎖を通して何でもそうです。マグロを食べても何を食べてもそうです。究極的に私たちは太陽を食べているというのが普通の考え方ですよ。太陽がなければ私たちは生きていけないというのが、小学校、中学校、高校、大学を通して教えていることです。

それに対して、チューブワームを知ってしまった今、チューブワーム、そしてその体内にいる共生微生物が生きていけるのは何のおかげですか。簡単に言えば、硫化水素です。硫化水素は、海底火山から供給される火山ガスです。チューブワーム、そして共生微生物は、今や切っても切り離せない、一体化したものです。これが生きていけるのは、海底火山のおかげです。強いて言えば、地球の内部から湧き上がってくる火山ガスのおかげです。もう太陽は要らないのです(図10)。



【図10】

ここまで言ってしまうと、だいたい普通はここで洗脳終了なのですからけれども、あえて脱洗脳をす

ると、チューブワームが使っている酸素は、ほとんど光合成のおかげです。地球上にある酸素のほとんどは光合成で作っていますから、その意味では、太陽の恩恵を半分被っています。

私が昔、本を書いた時に、本の帯に、太陽に背を向けた生物と書きました。でも、今となってはどうか、その後すぐさま、講演会では修正して、太陽に半分だけ背を向けたと言ったのです。まだ酸素の部分では依存していますから。ただ、その後、完全に酸素さえ要らないような生物たちも見つかっていますので、そういった生物たちは本当に太陽が要りません。

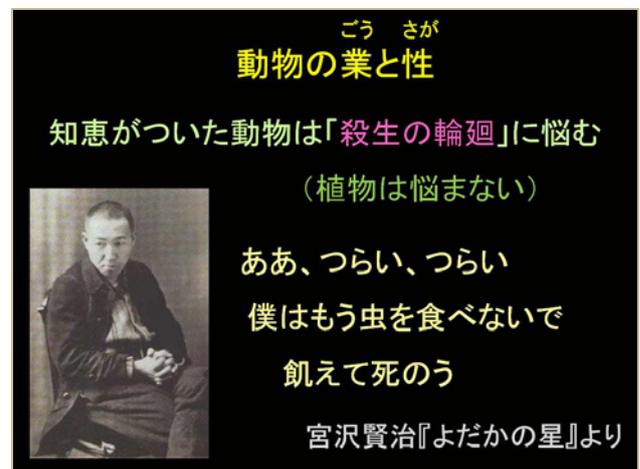
今言ったような、太陽が要りませんという世界は本当にあります。そのことは、今日はチューブワーム中心でいきますから、申し上げます。ただ、チューブワームは半端ですけれども、半端ではないものもいるということだけご承知おきください。その上で、チューブワームと共生微生物は、あえて言えば地球のおかげで生きているということをお許し願いたいと思うわけです。



【図 11】

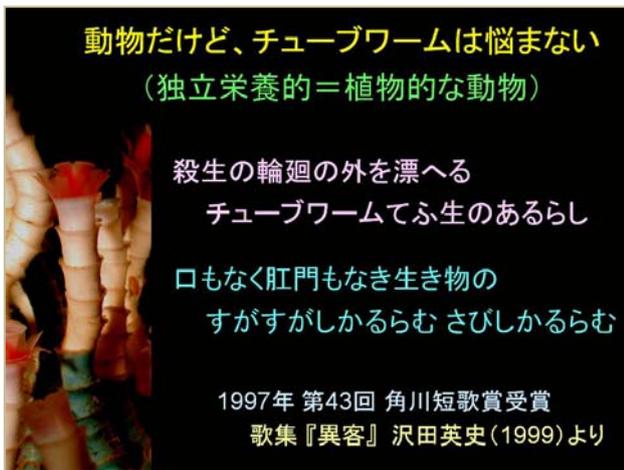
ここで、栄養のとり方をおさらい的に申します。おさらい的に申しますと、今、ここに独立栄養と従属栄養というふうに2つ書きました(図 11)。この言葉は専門用語ですから、無理して覚える必要はありません。独立栄養は、植物とチューブワームの生き方です。植物もチューブワームも、物は食べません。自分の栄養は自分で作るから、独立栄養です。自分の栄養は作るのですが、その原料は二酸化炭素、CO₂であるということです。これは、独立栄養です。それに対して、われわれ人間を含む動物は、物を食べます。物というのは何ですかと、あえて言うと、それは他人の体です。

お米にしても小麦にしても、牛肉にしても丸鶏にしても、他人の体を食べています。それをもう少し言うと、他者の生命ですよ。他者の生命を奪って自分の生命を長らえるのが、われわれ動物です。この生き方は従属栄養と呼んでいます。動物というのは結局、そうやって他者を襲ったり、あるいは他者のアタックから逃げたりするなどして、知能が発達するわけです。知能が発達し過ぎると、やがて知恵が付いてきます。そうすると、動物の性というか、業に気付いてしまうのです。動物の業、性。それが、他人の命を奪ってでも自分の生命を長らえたいのだろうか、それでいいのかという悩みです(図 12)。この業と性は、殺生の輪廻と言ってよいでしょう。自分が人の命を奪う、そして自分もまた誰かに食べられてしまう。この殺生の輪廻に一番悩んだ人は、たぶん宮沢賢治だと思っています。宮沢賢治は、ついに、こうやってしまうのです。「あゝ、つらい、つらい。僕はもう虫を食べないで餓えて死のう。」と言ってしまいます。これが宮沢賢治の問題意識でした。そして、たぶんわれわれに共通する問題意識ですけれども、動物であるならば、この業と性に悩むに違いはないけれども、もうチューブワームは悩みません。



【図 12】

チューブワームは動物ですけれども、物を食べませんから、この殺生の輪廻から逃れています。このことを知った神戸に住んでいる高校の先生がこんな歌を詠んでくれました。「殺生の 輪廻の外を漂へる チューブワームてふ 生のあるらし 口もなく 肛門もなき 生き物の すがすがしがるらむ さびしがるらむ」。こう詠んで、角川短歌大賞を受賞されました(図 13)。このことが素晴らしいです。チューブワームというのは本当に、



【図 13】

生物学的に、哲学的に、そして文学的に素晴らしいのです。こんな素晴らしい生き物はほかにいないです。ということで、今日は数ある深海生物の中でもたった1つだけ、これだけをご紹介したわけです。



【図 14】

(図 14) は、私のせがれが書いた絵です。今、20 歳ですけども、小学校低学年の時に学校で、海に住んでいる生き物を描きましょうと言って、チューブワームを描いたのです。さすが私の子供です。ただ、この絵は若干の間違いがあります。それは、泡が立っています。海底火山の多くは水深 2,000 メートル、2,500 メートルだから、沸騰しません。泡が立つことはないのですけれども、日本の近海、鹿児島島の桜島は火山です。桜島の裾野は海底に入っています。水深 60 メートルからポコポコと泡が立っている噴気孔があります。そこに薩摩チューブワームが住んでいるので、この 1 例をもってすれば許してあげなくてはならないです。許しがたいのは、チューブワームは泳ぎません(笑)。

チューブワームは泳がないし、歩きません。

では、どうやって自分の勢力範囲を広げますかという問題があります。これは普通です。普通の海洋生物と同じように、受精したら受精卵がフワッと放り出されて、潮の流れに乗って、ふわふわ行きます。チューブワームは雌雄異体です。雄、雌が違います。雄から精子が出て、何らかの方法で雌の卵巣に行きます。どうやって行くかは分かりません。何かのケミカルが出ているのですが、よく分かりません。でも、何らかの方法によって雌の卵巣に行って、そこで卵子に受精して、受精卵は海中に放出されて、潮の流れに乗って、ふわふわ行きます。行って、着地した先に海底火山があればラッキーです。なければ死にます。

ここに生えているチューブワーム一個体一個体の背景には、不運なチューブワームの子供たちの死屍累々というか、たくさんあったわけです。たぶん、もう 99.99%が死んでいますから。だから、こういうのは、難しい言葉では僥倖というんですけども、今の若者風でいうと、超ラッキーな世界です。チューブワームは、そういう超ラッキーで生きていくのだけれども、海底火山は、場所によっては本当に狭い範囲にいっぱいあります。数キロメートルあるいは数十キロメートルです。でも、場所によっては数百キロメートルから数千キロメートル離れているところもあります。どうやってその距離を克服するのでしょうか。本当は難しいのです。でも、方法がありました。クジラの死体です。さっき、硫化水素のことを、卵が腐ったにおいと言いました。卵が腐って硫化水素が出るのだったら、クジラが死んだらどうなりますか。死んだ深さによりますけれども、浅場で死んでしまうと、腐敗してガスが出てきて浮いてしまいます。でも、深場で死ぬと、水圧でガスが圧縮されるので、沈みます。沈んだクジラが海底で腐敗して、硫化水素が発生します。そういったクジラの死体を探しました。運良く、水深 4,034 メートルでクジラの白骨死体を発見しまして、その骨を見るとチューブワームがくっついていました。

クジラの背骨です。昔の写真だから解像度が悪いのですけれども、この背骨の下に何かチューブがニョロニョロと出ているのです。これは、チューブワームの子供です。骨にチューブワームが群がっ

ているということが分かりました。これは 92 年撮影ですから、今から 20 年前ですけれども、この 20 年の間にあちこちでクジラの死体が見つっています。それから、浜に打ち上げられたクジラの死体をわざわざ深海に置いたという実験もあります。これは JAMSTEC の私のかつての研究者仲間がやっておりますけれども、そうすると、海底に置いたクジラの骨にチューブワームの仲間が生えてくるのです。

そのようなことがあるので、100 キロメートル、1,000 キロメートルもあるような海底火山の間を埋めるのは、おそらくクジラの死体であろうということが考えられていましたが、たぶん本当にそうだろうと思います。もしクジラの墓場というのがなくて、ランダムに死体が転がっているとすれば、数キロメートルから十数キロメートルに 1 頭の割合でクジラの死体があるはずですから、結構な感じでクジラの死体を伝って広がっていくということです。ただ、クジラが進化の舞台に登場したのは今から 4,000 万年前です。それよりも昔はどうでしょうか。例えば、チューブワームで一番古い化石は 3 億年前です。では、そのころ、クジラの死体がない時代にチューブワームはどうしたのですかというクエスチョンです。

おそらく、それはクジラに取って代わるものでしょう。先ほどの骨はニタリクジラの骨で、だいたい体長が 11 メートルの大人のクジラの死体でした。体重は、クジラの場合は 11 メートルをそのままトンにすればいいんです。11 トンです。その下はフタバズキリュウ (図 26 左下)。これもだいたいクジラのように、体長が 12 メートルあり、だいたい体重が 10 トンあります。10 トンもの肉の塊が腐敗したら硫化水素が発生します。ちなみに、これは上野の国立科学博物館にあります。科博の展示で吊られていますのでぜひご覧ください。

こういった魚竜は、今から 1 億年前とか 2 億年前にいたので、その時代のチューブワームはこういった魚竜の死体を伝っていったのかなと考えられます。だいたい化石屋さんというのは、発見するとすぐに、クリーニングと称してきれいにしてしまうのです。私たちは、やめてと言っています。きれいにする前に周りをしっかりよく見てくださいますと、実際に、十数年前にオーストラリアで発見された魚竜の化石にはチューブワームが付

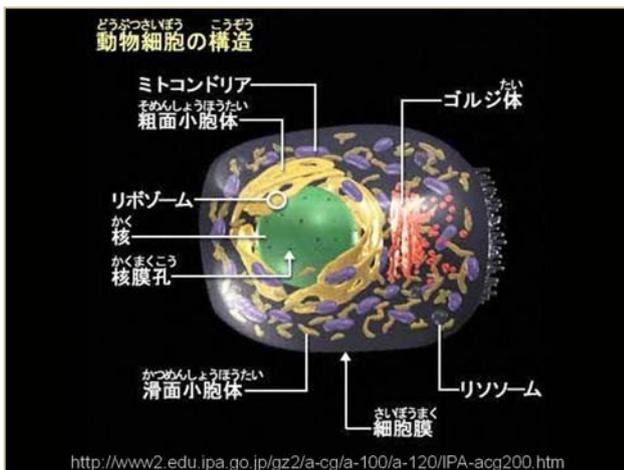
いていました。チューブワームは、3 億年前からの化石があります。3 億年前には恐竜も魚竜もいません。では何かというと、ここにある魚です。この魚のサイズは、本物はこの 2 倍あります。私の頭が口にすっぽり入ってしまう大きさです。頭がこの 2 倍あると、体は大きいです。これの体重は数トンになります。チューブワームは、そのころは、この古代魚という大きい魚の死体を伝ったのかなということも考えられますが、まだ古代魚の化石からはチューブワームのいた証拠は挙がっていません。とはいえ、今後の楽しみです。



【図 15】

チューブワームの話に戻ります。最後は、共生の話です。チューブワームを語る時に、皆さんに思い出してほしいのは、ギリシャ神話に出てくるキマイラあるいはキメラというものです (図 15)。パーツ、パーツが別の生き物です。チューブワームは、実際、今のところ、実はキメラですよ。チューブワーム本体は動物の細胞があって、動物細胞に硫黄酸化バクテリアが侵入しています。侵入していますけれども、私たちはずっと、そのバクテリアだけを切り離して試験管やフラスコ内で別々に培養しようと思ってきました。チューブワームの発見から、古い方は 35 年、新しい方は 33 年ですけれども、この三十数年間、私を含んで、多くの研究者がやってきましたけれども、誰も成功していません。おそらく、それは駄目なのでしょう。チューブワームと共生バクテリアは本当に密接に関わり合っていて、いまや一心同体、切っても切り離せない関係にあると思われれます。もうチューブワームはそれが一つのシステムですけれども、このシステムはいくつかの生き物のパーツから成っているので、キメラだということです。

植物の時に、光合成をしているのは葉緑体ですよと言いました。これはもともと、オリジナルな植物細胞に侵入してきたシアノバクテリアと言う別の生き物です。そういう意味から、植物は、オリジナルな植物とシアノバクテリアとのキメラです。そして、もう1個言ってしまうと、私たち動物、人間の細胞と植物細胞には、もう1個別の、よその生き物が入り込んでいます。それは、ミトコンドリアです。葉緑体があって、ミトコンドリアも入っています。ミトコンドリアは、酸素呼吸をやっているものです(図16、図17)。



【図16】

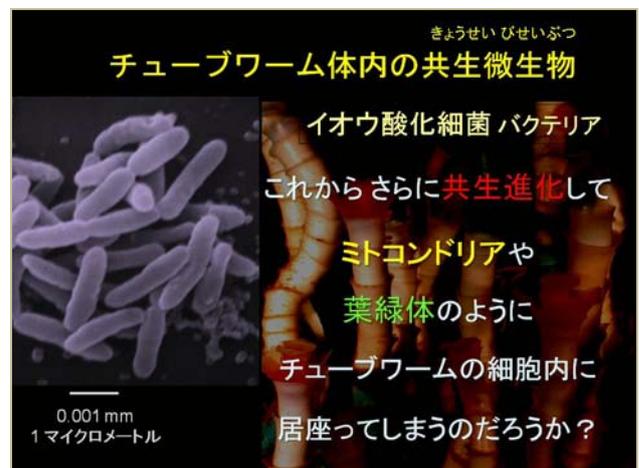


【図17】

もともと私たち地球生物は、酸素がない環境に生まれたのです。酸素呼吸はできない生き物だったけれども、突然変異で酸素呼吸をする、新しい生き物が出ました。アルファプロテオバクテリアといいます。そのアルファプロテオバクテリアというものが酸素呼吸の能力を持って私たちの祖先の細胞に侵入したのが、今のミトコンドリアです。私たちの体というのは、動物細胞で言えば、よそ

の生き物が侵入した出来事は1回あります。それはミトコンドリアのものが入ってきた時で、そしてそれは今、ミトコンドリアになっています。私たち自身がすでにキメラなのです。アルファプロテオバクテリアとわれわれの祖先の細胞のキメラが、私たち自身です。植物は、さらにもう1回侵入イベントがありました。それはシアノバクテリアの侵入イベントで、それは葉緑体になりました。今、第3の侵入イベントが起きています。チューブワームの硫黄酸化細菌です。これは、ガンマプロテオバクテリアです。ミトコンドリアは、アルファプロテオバクテリアです。チューブワームの硫黄酸化細菌は、ガンマプロテオバクテリアです。まだ完全にミトコンドリアや葉緑体のようには見えませんが、やがて確実にそうなるでしょう。あと1万年後か10万年後か100万年後か分かりませんが、そのときのチューブワームの、先ほどの写真を見ると、たぶんミトコンドリア、葉緑体、そして何々というふうになっていると思います。

動物細胞は、たった1回の侵入イベントがありました。私たちです。植物は2回の侵入イベントがあって、物を食べずに済むようになりました。チューブワームはもともと動物ですが、さらに一番新しい硫黄酸化細菌の侵入イベントがあることによって、物を食べずに済むようになりました。これはすごい進化です。普通、進化というと、ダーウィン進化の方でしょう。遺伝子の突然変異があって、それが蓄積して、その蓄積したものが表現型として姿形に現れ、それが自然選択、自然淘汰されて何か生き残る。これが普通の、進化の標準理論です。新ダーウィン主義ですよね。



【図18】

生物が侵入してきて、新しい生き方を獲得するというのは、今言った、進化の標準理論、新ダーウィン主義とは全く違った形での進化です。これが共生進化の恐ろしさです。地球では、過去2回ありました。そして、今、3回目がチューブワームという形で起こりつつあるということです。その新しい生き物が誕生しつつある進化の断面を私たちは見ているというのがチューブワームを研究する意義であるというふうに私は考えております(図18)。

というところで時間が来ましたので、これで質問をちょうだいしたいと思います。どうもありがとうございました。

◆質疑応答

会場：チューブワームはクジラの骨を伝わって広がるというお話だったと思うのですが、ということは、クジラにチューブワームが取り込まれるというのは、幼生の時代から入ることなのですか。

長沼さん：クジラの死体が腐って硫化水素が発生したところに、たまたま幼生が着地するということです。

会場：では、クジラでなくてもいいわけですね。

長沼：先ほど、魚竜とか古代魚と申し上げたとおりですね。

会場：チューブワームのライフサイクルが何かよく分からないのですけれども、受精して、幼生みたいな格好になりますよね。それが最終的にこういう状況になるまでに、そのサイクルはどうなっているのかなという疑問なのですが。

長沼さん：チューブワームに一番近い生き物は、ゴカイです。卵の様子も、卵からふ化した幼生の様子も、ゴカイがよく似ています。ゴカイの幼生というのは、専門用語ではトロコフォア幼生と呼びますがけれども、形はだるまです。だるまのくびれた部分に、ハワイのフラダンスの腰みのを付けたような形をしていますけれども、そんな幼生が来ます。このだるまがふらふらするわけです。そ

れが着地して、海底で細長くなっているのです。

会場：では 4,000 メートルのところに着地しないといけないということですか。

長沼さん：2,000 メートルのクジラの死体もありますし、もっと浅い死体もありますけれども、クジラの死体があれば、そこにくっついて、ということ。

会場：共生細菌というのが次世代にどうやって継承されていくのですか。

長沼さん：その質問が出ることを待っていたのです。ありがとうございます。そのとおりなのです。実は、例えば私たちのミトコンドリアであれば、卵子を伝わってきますよね。卵子系統です。それから、植物の葉緑体は、もちろんめしべの方法です。チューブワームはどうかというと、チューブワームの卵子にも精子にも硫黄酸化細菌は見つかったことはありません。私たちは、探しています。探しているけれども、まだ1回も見つかっていません。だから、それは私たちの努力が足りないのか、本当はないのかということ。考え方としてはもう1個あって、卵からかえったすぐ後、幼生には小さい口が開いているのです。だいたい1日ぐらいです。たった1日の間に、小さい口から、周りから取り込めるだけバクテリアを取り込んで、その中から硫黄酸化細菌だけを取捨選択していくのかということが考えられますが、それもまだ証明はされていません。その方法だと、例えばチューブワームの個体ごとに違った共生菌を持ってしまいますよね。それを示唆するデータもあるし、示唆しないデータもあるのです。今のところ決定打はないのですが、一番いいのは、卵子の中に硫黄酸化細菌を入れればいいのですけれども、それが見つかっていないということから、まだこの共生関係が完成形ではないということ。子供が毎回、自分で硫黄酸化細菌を確保しなくてはならないという関所があるのかなと。その意味では、まだミトコンドリア化してないとはいえます。

でも、たぶん、私の考えでは、今後10年から20年の間に、卵子を通して伝わるということも見つ

かと思うのです。もちろん、外界から取り込んでいくようなライフスタイルというか、様式もあるのでしょうか、一部のものにはミトコンドリア化、葉緑体化が進んでしまっているかもしれない、例えば日本の近海のチューブワームというのは、日本近海の海底火山の歴史がせいぜい数百万年とか、短いから、駄目なのです。太平洋の海底火山は過去7億年ありますから、その間に、もしかしたらミトコンドリア化が進んだのかもしれないので、その辺りで深い研究ができるかなと思っているところです。まさにおっしゃるとおりで、親から子へどうやって伝わるのかということは、今、大問題であります。

会場：今のお話に関連すると思うのですが、腸内細菌というと、人間の場合は個体差が非常に激しいのですが、チューブワームに関して、あまり個体差がないようなお話も感じるのですが、地域差というものはありますか。

長沼さん：チューブワームの地域差というよりも、研究者の地域差があって、まず欧米の人はかなり、このチューブワームは、みんな同じもの、たった1種類の微生物を持っていると言いたがります。それは確かにそうで、向こうの方は海底火山活動が激しくて、辺り一面硫化水素なのです。そういうところだと、もう本当にたった1つの微生物が優占？していて、それを取り込めばいいから、それで話は済むし、非常に簡単な論理で多くのことが説明できるので、欧米的な論文は通りやすいです。

日本の近海は、硫化水素がしょぼしょぼで、非常にかつかつなんです。かつかつの硫化水素をどう利用するかというところで、日本の近海では、チューブワームはものすごく工夫しています。そうすると、複数の微生物が協働作業してしまうとか、当然、個体差も大きいです。私たちが出す論文は、片端からそういう論文で、欧米の学者からことごとく否定されて、バトルをしております。

会場：個体差が激しいと、もう少し生命環境が変わると、普通、考えてしまうのですが、

長沼：生命環境というのは、

会場：生命が育成できるといいますか、例えば人間でしたら、汚い話ですけども、その時のヨーグルトをどれくらい食べたかというようなことによって菌がすごく変わるので、それによって、出てくるものも、ものすごく変わりますよね。そうすると、やはり体に与える影響というものも変わると思うのですが、チューブワームに関しては、菌がそれだけ違うということは、それだけ個体差が出るということにもなるのですか。

長沼さん：個体差がどうやって環境の側から選別されるのかです。それもケースバイケースだと思うのですが、私たちがやっている中で一番面白いのは、硫化水素をリサイクルするシステムがあります。硫化水素を1回酸化してしまうと、もう終わりです。それを別の微生物との共存関係によってリサイクルできる場合もあります。それは、日本のような、かつかつの状態では有利かもしれません。でも、別に、そのリサイクルしてくれる生物は、それは栄養をピンはねして取りまますから、全体からいうと、それは損になるのか、得になるのか、ケースバイケースだと思います。

会場：熱水鉱床とか、そういうところは昔、海底火山のあった影響だというお話だったと思うのですが、例えば石見銀山とか佐渡とかで、そういうところからチューブワームの化石のようなものが見つかるのですか。

長沼さん：日本で見つかっているのは、熱水噴出孔というよりも、メタンガスが湧くところです。この辺でいうと、三浦半島にメタンガスが湧いた化石があって、そこのメタンガス関連のチューブワームの化石があります。海水中には硫酸イオンがたくさんあって、だいたい海水中のイオンは塩化ナトリウムと、あと硫酸が3番目ですけども、硫酸とメタンが反応すると、非生物的に、ほぼ間違いなく硫化水素ができます。その非生物反応でもできてきて、その硫化水素を食べるんですね。鉱床関係は変質が激しくて、もうぐちゃぐちゃなんです。仮にチューブワームの化石があっても、たぶんぐちゃぐちゃになっていて残っていないです。ただ、3億年前の化石と話したのは、例えば

ロシアのウラル山脈です。あそこの、かつての熱水噴出孔です。それから、カリフォルニアのところにもありますが、そこはたぶんメタン関係です。ウラル山脈は熱水孔です。

会場：チューブワームの寿命はどれくらいなのでしょう。

長沼さん：まず、35年とか33年前に発見されて以来、頻繁に何回も行く場所があつて、そこにいる、同じ個体がどうか分からないけれども、何となく同じに見えるから、30年ぐらいはいるだろうなというのが一つあります。

それから、熱水噴出孔が、だんだん沈殿物がたまってきて閉じるのです。クローズしてしまうと、死ぬはずなのです。1つの熱水噴出孔が閉じるのが、いろいろ沈殿していく様子を観察すると、100年ぐらいたらうと言われてるので、現実的な話とした場合、チューブワームの生物の性質ではなくて、熱水孔の寿命として100年というのが一つです。

それから、別の場所ですけれども、これは海底火山ではなくて、先ほど少し言った、メタンガスが湧いているところです。メタンガスが湧いてくると、ほぼ間違いなく硫化水素ができますけれども、メタンガスがわいているところに住んでいるチューブワームのチューブの成長を測っています。チューブの成長を測って、それから、今のチューブワームになるまで何年かかったかということ計算すると、1,000年なのです。1,000年は生きるだろうと言われていて、これは地球の生物では寿命最長記録と思われていますが、よく分かりません。違った観点で言うと、ある熱水噴出孔、海底火山に同じ場所に何回か行く用事があります。そこで、ある年に行ったら、数時間前に噴火した後らしく、激しい穴が開いていて、水中にチューブワームの破片が漂っていました。そこにかつていたチューブワームは全滅したのです。そこに翌年行ったら、チューブワームがもう生えているのです。また翌年、つまり2年後に行ったら、もう1メートル80センチあるのです。だから、生えるときのスピードというのが、早いときには一気に伸びます。さっき言った、このスピードでいったら1,000年だよねという話もよく分からないのです。まだ30

年強しか経っていないから、よく分かりません。でも、30年ぐらいは生きるのだらうと思います。

会場：もう1ついいですか。先ほど、幼生がゴカイに近いというようなことだったのですけれども、例えばゲノムとかを調べていくと、強いて言えば何の生物に一番近いかわかっているのですか。

長沼さん：ゲノムは、やはりゴカイです。先ほど、私、チューブワームは有鬚動物門に分類されると申しましたが、今の分類枠ではゴカイの方、環形動物門に入れたいという人もいます。

会場：先ほど、木星の惑星なども登場しましたがけれども、やはり太陽光が届かないところに、地球以外のところにもいそうなのでしょうか。

長沼さん：基本的には酸素の供給量が問題ですけれども、たぶんいそうだと思います。チューブワームの場合は、ふんだんに存在する酸素を使っていますから、あそこまで大きくなると思うのです。木星の衛星、エウロパや、あの辺は酸素の供給が乏しそうな気がするので、あの氷の下に酸素を光合成する植物的のようなものがあればいいのですけれども、たぶんエウロパの氷は厚さが5キロメートルぐらいありますから、きついかと思います。酸素はほかにも出す方法はありますが、いかんせん、その方法をもってしても、エウロパにおいては酸素の供給量や供給スピードが小さくて、大きい生き物は住みづらいたらうなどは思っています。

ただ、これは、過去にわれわれが想像を絶するような発見が過去二、三十年にたくさんあったのと同じように、これからの二、三十年、また想像を絶するようなことがあるかもしれませんから、私は期待しています。

会場：繁殖の方法なのですが、深海は非常に安定した環境だと思うのですがけれども、先ほど、精子を放出してというお話があったのですが、何か時期を合わせたりしているのか、しているとすると、何がスイッチなのかというのはありますか。

長沼さん：これは非常に難しいです。深海生物が

季節性を感じる話は、なくはないのです。つまり、春になると上の方で植物プランクトンがワーッと生えて、それで、いろいろ食物連鎖が活発化します。植物プランクトンが食べられるときの食べ残しや食べ散らかし、動物の糞や死体や脱皮殻、そういったものがワサーッと降ってくるから、それで、そういう季節かなど、下の生き物も分かるのです。その程度の季節性の分かり方もあります。チューブワームに関しては、そういったものを感じ取るのかどうか。何が一つの刺激というか、環境のキューになってチューブワームに受精のタイミングを知らせるのかというのは、今のところは謎ですが、もしかしたら、例えば温度です。温かいお湯が流れてきて、それが刺激になるかもしれないという話があります。

潜水船で行って、潜水船でつかんだ瞬間に精子を出すということがあって、これは一体何を感じているのだろうと思って、そういういろいろな話もあるのです。よく分かりませんというか、つかんだら出すことはありましたけれども、毎回ではありません。お湯のゆらぎで、温かいお湯が流れてきたら出すという話もありますけれども、それを証明したことがあまりないので、まだ仮説にしすぎません。

会場：私は以前、テレビで長沼先生がチューブワームの血を自分の体内に注入していたというのを見たのですけれども、結構ヘモグロビンの大きさとか違うと言っていたので、何か体に支障は出なかったのですか。

長沼さん：皆さんが思うほどドバツとは入れていません（笑）。少量です。せいぜい変にはれたぐらいです。たくさん入れたら本当にやばいじゃないですか。やらない方がいいですよ。

会場：先ほど、酸素は全然関係なくて生きているものも最近見つかってきていますと。今日は話しませんとおっしゃったのですけれども、ぜひその名前ぐらい話していただいたら。

長沼さん：動物にはそういう生き物はいません。動植物じゃなくて、ほとんどバクテリアの類です。それから、バクテリアの仲間に古細菌というのが

いますけれども、細菌、古細菌の仲間にそういったものがあります。酸素不要です。

会場：それが見つかってきているということですか。

長沼さん：昔から知られていますけれども、それが大量に存在することが、この十数年の間で分かりました。それは地底です。海底よりもさらに深い海底下とか、あるいは陸上の地底です。地底はもともと酸素がない、酸欠ですから、酸欠ワールドにおいてそういったものが大量に存在することが分かってきました。おそらくわれわれが知っている海や陸地に住んでいる全生物量を凌駕する生物量でそういった微生物がいます。

会場：ありがとうございます。それがわれわれの体の先祖に当たるということはないんですか。例えば、同じアメーバからそちらに行った人と。

長沼さん：考え方は、共通祖先はもちろんいます。共通祖先からどうやって派生してきたかなのです。

会場：やはり共通祖先かもしれないということですか。

長沼さん：われわれ地球にいる生き物はすべて単一の系統であるというのが、われわれ科学者の現在のコンセンサスなのです。単一の系統ということは、単一の祖先がいるわけです。単一の祖先のことを最後の共通祖先というのです。L U C A といって、われわれはルカと呼んでいます。L U C A です。

会場：あまり真面目でない質問かもしれませんが、チューブワームというのは食べたらどんなものなんでしょうか。あるいは、こういうものを食べている、チェーンを作っているような、そのサイクルというのでしょうか。そういうものはあるのでしょうか。

長沼さん：チューブワームも何かの理由で衰えたものが出て、元気だと、例えば捕食者が来ると、頭の赤いエラの部分がチューブのなかに引きこも

るのです。衰えたものは、すぐに引き込みません。捕食者は、例えばカニです。よく熱水孔にいる白いカニがいるのですけれども、あれがチョコキチョコキと赤いエラを切りに行くのです。ぼーっとしているものは切られています。切られてカニがむしゃむしゃ食べています。そういった点でも食物連鎖はあると思います。

食べたらどんな味かという、えらの部分は食べたことないですけれども、トロフォソームの方はあって、トロフォソームは、やはり硫黄くさいです。あのおいにはドロドロのおいと申しましたけれども、その臭いです。木村拓哉がある番組で、チューブワームではない、非常にまずいもの食べた時に、ドブの味がすると言うわけです。彼がいかにしてドブの味を知ったのか、私は知りませんが（笑）、たぶんチューブワームもドブの味がすると思います。

会場：すごいお金をかけて、海底と全く同じ状態に水槽のようなものを作って、卵子と精子を持ってきて、いちいち潜らないで養殖のようなことを地上でやるということはできないのですか。

長沼さん：それは、もちろんチャレンジはやっています。私の元の同僚と新江の島水族館が共同で作っています。深海アクアリウムというものです。だから、新江の島水族館に行けばあります。ですので、運が良ければ新江の島水族館で見られます。たとえば、相模湾のチューブワームがいて、相模チューブワームがいるんだけど、あるいは、他の場所で採れたチューブワームがいるんですけど、運が良ければ見られます。

会場：6,500メートル潜るのに、潜ったり上ったりする時間はどのくらいかかるのですか。

長沼さん：「しんかい 6500」で言えば、片道2時間半です。もちろん深さによって違いますから、マックス 6,500メートル潜ると、2時間半で行って帰って5時間で、9時－5時で8時間ですよ。海底にいられるのは3時間です。もっと浅かったら、行き帰りが短いから、海底の滞在時間はもっと延びます。2時間半の間も、本当に暇だったら、映画を見ます。だいたい「寅さん」が主流だった

のですけれども、寅さんに飽きると、深海モノがありますよね。深海モノの、潜水船がぐしゃっとつぶれるやつです。自虐的ですが、あれを見ます。

以上