

講演記録

生物を学び活かすバイオミメティクス研究と、ツールとしての NanoSuit 法

針山 孝彦

浜松医科大学医学部 教授

司会：大西素子

中部大学 生物機能開発研究所 所長

以下の記録は、生物機能開発研究所と生命健康科学研究所の主催により 2017 年 11 月 29 日(水)に中部大学 55 館 1 階講義室にて開催された、第 12 回中部大学ライフサイエンスフォーラムの講演を収録したものです。

こんにちは。初めて中部大学に伺いましたが、すごく立派な大学でびっくりしました。

今日は、大西先生に今ご紹介いただいたように、バイオミメティクスの話をしまして、「NanoSuit」という言葉を覚えて帰っていただければ満足かなと思っております。中部大学には昔からの知り合いの先生がいらっしゃるの、その先生に久しぶりのご報告をという意味も含めて、難しい話と簡単な話とを両方混ぜながらお話しします。

私は、昔々、君たちよりちょっと年をとったぐらいのとき、オーストラリアに留学したことがあります。オーストラリアでホリッジ(A. Horridge)というとても有名な先生のところに行った際、将来もし演壇の上に立つことがあったら、「create enthusiasm」を思い出しなさいと言われました。どういうことかという、「どうせ伝わらないのだから、やる気を引き出すような話をせよ。それが君の将来の教授としての仕事だ」と言われたのです。そのころは教授になれるかどうかなんて全然わからなかったのですが、先生から聞いたその言葉がずっと頭に残ったまま現在に至っています。ですから、今日は皆さんがやる気になってくれればと思いながらお話しします。

針山は生物学者です。皆さんもほとんどが生物学者になる人だと思います。もともと私は眼の研究者ですが、生物学者というのはとてもいい商売です。なぜかという、よその国へ行ってたくさん遊んで、その一部で論文を書いて日本に帰ってくると、お疲れさまと言ってもらえるからです。

私の場合、この英語で「Antarctica」という場所、つまり南極大陸のことなのですが、ニュージーランドのワイカト大学の人たちと研究しに行きました。その後、日本でワイカト大学の方々と南極に行って研究してきたと言うと、南極に行けるのならどこへでも行けるだろうと勘違いしてくれたようです。南極へ行って数カ月たったころ、文科省から眠り病という病気を媒介する双翅目(ハエ目)のツェツェバエの視覚的なコントロールを研究しなさいと言われ、ケニアへ行きました。ケニアで1年ちょっと過ごして帰ってきたら、今度はフィンランドの極地で研究しなさいと言われ、地球を縦に動くことができました。

フィンランドでも、とても先生に恵まれました。ロイター(Tom Reuter)という先生に、「日本人はだめだ」と言われました。ちょっと長い話になるのですが、これはぜひ皆さんに伝えておきたいと思います。

ロイター先生は、特にカエルを使った眼の研究で世界でトップの研究室を主催されていました。ある日、私のために先生方がパーティーを開いてくれました。その場で順番にスピーチをさせられたのですが、日本人の若造だった私は、何をしゃべっていいかわからなくなり、つい研究の話をしてしまいました。パーテ

イーといっても、奥様だったり子供だったり、家族を含めた多くの人たちがいる中で研究の話をしました。その時は先生もニコニコされていたのですが、翌朝、私一人で教授室に呼ばれ、午前中いっぱい懇々と説教されました。

「子供もいたのだから、研究の話をしても喜ぶ人ばかりではなかっただろう。日本の文化や歴史についてなり、フィンランドと日本、ロシアと日本の関係といったことをしゃべればみんな興味を持ったのに、君はだめだ」と言われました。先生は、だめだと言うだけではなくて、武者修行をして自分を鍛えなさいと言われました。昔はインターネットで追いかけることもなかったもので、その先生が行けと言えば、そのままどこに行っても、日本から追跡されませんでした。そのおかげで、1カ月半、ヨーロッパの中を点々と移動しながら各大学でセミナーをして、批判を受けるということができました。南極をきっかけに、そんなふうに研究をし、いろいろな人と議論してくることができました。

この写真の中にかがんでいる人がいますが、この人はマイヤーロホー (V. B. Meyer-Rochow) 先生といいます。南極なのに、雪が降っても積もらずに昇華してしまうほど一年中乾燥したドライバレーという場所で生き物を探しているところです。この方が探したのが、この写真の生き物です。実は極所と呼ばれるようなところにも生き物はいるのです。皆さんが歩いていってその辺の土をひっくり返せば、いくらでもいろんな生き物がいるというのが地球です。世界中にいるわけです。これはケニア山の山頂ですが、5,199mの山頂にも虫が飛んでいます。そういう地球の中で何が起きているのかを、生物学者として私はずっと知りたいと思いながら過ごしてきました。

私はもともと視覚生理学者だったので、眼の研究をして論文を書いていたれば、それで褒められました。それだけで一生終わろうかと思っていたところ、どうもそれでは日本の将来がヤバイなと思い始めました。20年ほど前から生物の多様性を維持しなければいけないということが叫ばれるようになり、生物の多様性とは何かということを自分自身で知りたくなりました。眼の研究だけしていいのかということで、いろいろ

なものに手を出すようになりました。

これは私の研究室でおこなっている実験の材料の一部です。普通、眼の研究というと、例えばセミならセミの眼を研究することで一生が終わる人も多いのですが、セミの眼だけでなく、たくさんの生物に興味をいだくようになりました。たとえば、タマムシがどうしてきれいな色を出しているのかという発色の物理的仕組みを解析したり、どうして種内コミュニケーションができるのかというようなことを扱ったり、その延長上で植物にも手を出したり、泥だんごにまで手を出したりしています。泥だんごを触っているとなぜびかびかしてくるのか、その物理学的な現象がなぜ起こるのかというようなことまで研究するようになりました。

そういうことをしていく中で、いつもいつも強く考えるようになったことがあります。皆さん、今日の講演の中で、ぜひ「人間」と「ヒト」を区別できるようになっていただきたいと思うのですが、「人間」というのは、君たちがお勉強をすることによって、あるいはご両親に育てられることによって、ようやく「人間」になるのですね。生まれてきたそのままの状態、学名で *Homo sapiens* と呼ばれる状態は「ヒト」です。文化を背負った「人間」も、ただの生物学的な「ヒト」も、実はどちらも進化の中で確立された動物です。そして、人間(ヒト)は猿の仲間です。猿のグループの一つと言ってもいいでしょう。これを心の中に刻んでほしいと思います。猿なのです。猿だと言われるのは嫌でしょう。でも、一番大切なのは何かというと、ほかの動物と同じように、人間(ヒト)は完成品ではない、進化の中で完成したトップの生き物ではないということを、皆さんの心の中にとめていただければと思うのです。

皆さんも授業で習ったと思いますが、137億年前に宇宙ができました。昔は150億年前と言われていましたが、最近では137億年とか139億年と言われるようになりました。そのころ宇宙ができて、その宇宙の中から太陽系と地球ができたのが46億年前です。そこからおよそ10億年経つと生命が誕生します。

授業でこう聞くと、「ふーん、10億年で生命が誕生したのか」と思われるかもしれませんが、皆さん、だれか生命を誕生させてみてください。この中でだれかー

人でもいいから生命を誕生させてくれたら、確実にノーベル賞がもらえます。だれも生物をつくったことはないのです。もっとひどいのは、生命とは何かということを実験に記録できた人すらいません。もちろんたくさん書くことは書けますよ。試験で出るようなことはたくさん書けますけれども、本当の本質のところ、なぜ生命ができたのかは、実はわかっていないのです。ここに挑戦するのもおもしろいなと私は思っているのですが・・・、それはさておき、10億年ほどたったところで生命が誕生し、それから長い時間は静かな地球でした。

その静かなところから、5.4億年ほど前にカンブリア紀の爆発が起きました。5.4億年前というのは、46億年のうちの5.4億年前ですから、地球の歴史の中ではつい最近ですね。このカンブリア紀の爆発が起ころころ、我々の設計図がほとんどできたと考えられています。ただし、どうしてそこで我々の設計図ができたのかということもわかっていません。知らないのに、生物学者は偉そうに、カナダの山中のバージェス頁岩のところにいろいろな生き物があつたからといって、もうそこでできたと思いますよと言ってしまうのですね。でも、なぜできたのか、どうして変わったのかはわかりません。ずっと長い生命の歴史があつて、20万年ぐらい前にヒトが誕生したわけですが、これまで「進化」と言って片づけてきたことも、どうして進化するのか、特にどうして大進化というような大きな変化が起こるのかはわからないままです。

「わからない」と今一生懸命言っているのは、お勉強などしても実は何もわからないのだということを皆さんに伝えたいからです。皆さん、大学へ入るまでは、解答を得るために勉強をしてきたわけですが、大学へ入ってからは、解答を出すためではなくて、自分で考えて次のステップを切り開いていくために勉強するのです。もちろん、いろいろなことを覚えておいたほうがいいに違いありませんが、覚えたからといって何も変わりません。なぜそうなったのかということを一生涯懸命考えてほしいと思います。

生き物は、細胞からできています。皆さんも、1年生、2年生ですと、細胞説というのを習ったと思います。

ですから、人間にも細胞の栄養を入れてやればいいのかと考えるといます。もちろん入れなければいけないのですが、それだけではないのです。その理由は、生物の中に神経というものができてしまって、要するに情報処理ということをするようになってしまったからです。

情報処理をすると何が起るかという、反射、走性、本能、学習、知能というふうに、いろいろな行動様式が出てきます。これは何も生き物がそのように分けているわけではなくて、人間がこのように分けたりわたりやすいだろうということで人為分類したのですが、時間が流れることによって神経系が複雑になり、それとともに、ヒトがよくやるような知能行動が出てきました。私たちのほとんどの行動は知能行動で表現されますが、根元に進化の歴史を持っていますので、体の中には、走性行動もありますし、反射行動もありますし、本能行動もあります。ただ、表現型の中では全部知能行動でやるわけですね。おなかが空いているからといって、本能行動でそこにあるものをがぶっと食べるのではなく、我慢してみんなで一緒に礼儀正しく食べましょうということをしつめますから、これは高度な知能行動になります。こんなふうに生き物はどんどん複雑になっていきました。

皆さんは新聞を読みますか。ニュースはネットで見るのでしょうか。ほとんどの場合、マスコミの方たちは、例えば地球を何とかしようというときに、エネルギーをコントロールすればいいとか、環世界をよく知って自然保護をすればいいというふうに書きます。この環世界というのは、種独自の世界、それぞれの動物がそれぞれの動物のグループだけで進化していけば、子孫を繁栄させることも栄養を補給することもできるというような、種特異的な情報処理世界のことをいいます。しかし実際には、ヒトは地球とものすごくかかわっているのです。地球とヒトがものすごくかかわっていることによって、地球の我々の世界がどんどん変わってきたということがあります。

これは『Science』という雑誌に載った *Ardipithecus* 属の写真です。*Ardipithecus* というのは、500万年ぐらい前に誕生した我々の先祖です。これをわざわざお

見せした理由は、とてもすてきな先祖だからです。牙が、短くなりました。Homo sapiens が 20 万年前にサバンナで立ったと言われていることは皆さんも聞いていると思いますが、実は Ardipithecus が 500 万年前に森の中で立っていたことを研究チームが見つけております。なぜ立ったと思いますか。これがすごくすてきなのです。牙がなくなったということは、けんかをしなくなったわけですね。それで、手いっぱい果物などのプレゼントを持って、それを相手にあげて何とか仲よくしようとするために立ったのではないかという説明です。これは本当に研究者が言っていることでして、日本のチームも入っていたのですが、ヒトの先祖がそういうことを始めたと考えられています。とてもすてきなストーリーですよ。

500 万年前に Ardipithecus が誕生し、その延長上で 20 万年前に Homo sapiens が誕生し、その後何をしたかという、つい 1 万年前、日本ですと 1 万 5,000 年前の青森県の三内丸山に遺跡がありますが、農耕・牧畜業を始めました。これはヤバいことなんです。

ヒトは社会性動物だと言われますが、進化的には真社会性動物ではありません。真社会性動物というのは、「超個体的個体」という言葉が使われたりしますが、ハチやアリのような、集団で生きるように進化したものを言います。ヒトは真社会性ではなくて亜社会性なのです。真社会性動物としての生き物の進化はしていないので、たくさんのルールをつくらないと社会が成り立たないようにできています。

たくさんのルールとは何かといえば、農耕・牧畜業が始まると、共同作業によって生産性が上がるとともに、集団化した結果として宗教が生まれました。宗教を信じている人を批判しているのではありませんよ。宗教の力ということです。例えば、「神様に誓って悪いことをしません」というように、神様、あるいは何か「もやとしたもの」、何か「おどろおどろしいもの」に向かって自分の行動を制御するようになりました。また、神官や権力を持った人がコントロールしやすいように法律をつくるということが 1 万年前から始まりました。それ以来、法律を利用してしまふ人たちが、あるいは破

ってしまう人たちが当然出ますので、社会は不安定なままで、どんなに頑張っても安定しなくなりました。残念ながら、現在の世界情勢を見ても、そんなことがわかるかと思います。

でも、逆に言えば、みんなで共同作業することによってエネルギーをたくさんつくるできるようになり、食べ物もたくさん維持できるようになったわけですね。そのおかげで何が起こったかという、それまでは家族単位、あるいは家族を含めた血縁関係の中で生活し、全員が一日中働いて一生懸命食料を持ってこなければ栄養をとれなかったところから、集団で行動しますので、君たちが働いている間に僕たちは他のことをするね、ちょっと遊ばせてねといったことができるようになりました。おもしろいことに人間は、遊べる立場になると勉強を始めるのですね。今の皆さんも、心もしくは胃の片隅では早く帰っておいしいものを食べたいと思っているかもしれませんが、でも、やはりお勉強をしてしまうわけです。

人間の歴史の中で、学問は数学、物理学、化学、工学という順番で始まりました。一番初めに神様がくださる天体の動きを理解するために天文学や数学が始まり、それを使って自然を理解しようということで物理学が始まり、その延長上で物質がわかり始めて化学が始まるということが起こったわけです。そして、近代に至って工学が産業革命を引き起こしました。この産業革命によって、今皆さんはこんないい環境を得られているわけです。これを当たり前と思わないでください。みんな生物系の学生さんなのでおわかりでしょうが、生物は、普通に放っておけば、服もつくれないし、こんなあほらしいネクタイみたいなもので着飾ったりもしないわけです。生き物として、私の場合は雄ですから、ほかの雌に格好よく見てもらいたいということで何か格好をつけるかもしれませんが、こういう決まったパターンの装いをするのは、文化を背負うことによって必要になってきたことなのです。

結果、何が起こるかという、家畜化していきます。君たちは若くたくましいですが、山に行って昔のスタイルで 3 日間過ごしていらっしゃいと言われたらできますか。服を着てはいけません。食べ物も持っていつて

はいけなくて、自分でとって食べなければいけません。それで何人が3日間生き残れるでしょうか。そうやって1週間いなさいと言われて生き残れる人がどれぐらいいるかと考えると、私たちは自分自身で自分を家畜化しているわけですね。人間は牛や猫や犬も無理やり家畜化しましたが、自分自身まで家畜化した生き物というのは非常に珍しい。というか、人間以外ありません。

皆さんも授業で習ったかもしれませんが、生物の個体数を見ると、人間以外の生物は指数関数的に増殖しても必ず頭打ちが起こります。これを環境収容力というのですが、例えば、食料が足りなくなったり、病気が起こったり、面積が足りなくなったりして、必ず頭打ちになるのです。しかし、*Homo sapiens* の「*sapiens*」というのは賢いという意味でして、人間はそうならないように英知を使ってどんどん改良してまいりました。でも、それによってどんどん砂漠化したというような歴史もありまして、本当に *Homo sapiens* は、賢い人間なのかと思ってしまう。

ここに *Homo domesticus* とありますが、これは家畜化した人間という意味です。私が遊びで勝手にこんな名前をつけてみました。ラテン語でつけるということは決まっていますが、皆さんも生き物に勝手な名前をつけて構わないのですよ。こうやって勝手に遊びでつけて論文で発表しますと大抵蹴られますけれども、もしも歴史に残すことができたとしたら、これも非常に楽しいことだと思います。

これは習ったことがあると思いますが、太陽のエネルギーを使った、生産者、一次消費者、二次消費者、三次消費者というループがあります。このループだけでなく、人間があらわれたせいで、太陽のエネルギーを使って農耕・牧畜業をし、産業革命も起こってしまいました。起こったおかげで今の我々があるのですが、化石燃料や原子力を必要としております。これは地球全体のことでですから、この両方を考えなければいけないということを覚えて帰ってほしいと思います。

残念なことに、地球では自然災害が起こります。日本の場合は地震が起こったりします。そして、自然災害だけでなく、自然災害に伴った人災も起こるわけ

です。この写真は2011年の出来事です。

2011年よりずっと前から、人災の予兆が見られます。これは2002年の朝日新聞の漫画ですが、原発にひび割れがいっぱいあって、それを隠そうと絵をたくさんかけ、「まるでギャラリーだ」と言って笑っています。こんなふうには、もう既にたくさんの批判があったわけです。しかし、それを修正することができませんでした。今回の場合、東電を批判することもありかもしれませんが、もっと深く考えたら、自分だっていろいろなそをついているでしょう。私もうそをついたことがあります。皆さんぐらいの年代のときには、ちょっと秘密でたばこを吸ってみたり、高校生のときからお酒を飲んでみたり、やってはいけないことをやったことがあります。みんながそうであって、みんなが完成品ではありません。悪いことは知っていても、ちょっとやってしまったりします。ですから、*Homo sapiens* とはいうものの、実はそうではなくて *Homo domesticus* なのではないかというようなことを考え始めたわけです。

そこで、ちょっと前振りが長かったのですが、15年ほど前からバイオミメティクスを扱い始めました。

一番初めにバイオミメティクス(Biomimetics)を唱えたのは、シュミット回路と呼ばれるものをつくったオットー・シュミット(Otto Schmitt)という工学者です。生物学者と工学者が一緒に研究をしていく中で、私たちの神経もそうですが、イカの巨大神経がきれいに信号を出し、変な信号を出さないことに気づいたわけです。それをよくよく調べていって、コンピューターのキーボードをたたいたら、何かを落とすとぼんぼんと弾むように、キーボード自身もチャタリングを起こすはずなのですが、それを1発の信号として「A」をたたいたら「A」だけが出てくるという回路をつくったのがオットー・シュミット先生です。大金持ちになったと思います。イカの巨大神経にならって、チャタリングをキャンセルするものをつくりました。

もう一つ有名なものとして、メストラルさんという工学者が、自分の愛犬にひつつき虫がくっついていたのでよく見て、マジックテープをつくりました。彼の商標名としては「ベルクロ」でして、ヨーロッパでは今もベルクロと言われることが多いです。ひつつき虫の引っ

かかりと毛から、これは商品になると考えたのが、バイオミメティクスの発想による製品作りの始まりでした。

ハスの葉は、表も裏もお水がころころ転がりますよね。皆さんは自炊をされるでしょうか。テフロン加工のフライパンも同様にくっつきませんが、あれはテフロン加工をしているからです。でも、これは何もしていません。植物は、我々と同じ生命の素材を使いながら、ちょっと表面構造を変えることによってお水をはじいております。ドイツの植物学者が「ロータス効果 (Lotus effect)」という名前をつけて商標登録しました。現在では、これと同じような構造をペイント材の中に混ぜて製品化されており、それを外壁に塗りますと水がころころ転がるので、自浄作用を持ち、雨が降ると自分できれいにしてくれるというわけです。

こういったことが 10 年ほど前からずっとなされてきたのですが、日本にもちゃんとバイオミメティクスを走らせなければいけないということで、とても有名な先生方が評価委員となって新学術領域という研究チームがつくられました。生物多様性を規範とし、生物そのものを先生として材料をつくりましょうということで、5 年間ほど研究を進めました。これから、その例を二つお話しします。一つはモスアイ構造と呼ばれるものの話で、もう一つはフナムシの脚の構造が水を上げるという話です。

まず、モスアイ構造というのは、蛾の目は一つ一つの個眼が集まった複眼ですけれども、その表面を大きな倍率で観察すると、200nm ほどの小さな小さな凸凹があるわけです。1mm の 1,000 分の 1 が 1 μ m で、1 μ m の 1,000 分の 1 が 1nm ですから、全く目に見えない大きさなのですが、その凸凹構造があることで何が起こるかという、光が反射しなくなるのです。

私たちが見ている光の波長がどれぐらいか、知っていますか。人間は 400~700nm ぐらいの範囲を見ることができます。モスアイ構造は 200nm ですから、400nm の光の波長よりも小さな凸凹です。そうすると、すごく比喩的に申しますと、光はどこが表面なのかわからなくなってしまうのですね。400nm の波が来たときに、下に小さなでこぼこ構造があると、どこが表面かわからなくて中に入っていくというイメージ

でいいと思います。この光が反射しないで中に入るという物理学現象が起こることを、1960 年代にヨーロッパの人たちが見つけました。それによって、世界中の人たちがモスアイ構造とは無反射性のものだと思えるようになり、それが蛾の目や透明な昆虫の翅にあることがわかりました。

これはセミの翅です。物理学の先生が撮った写真でして、カバーガラスがあってぴかぴか光ってしまうところでも下に光が入ることを見せております。無反射性が非常に高いことがわかります。工学の先生たちは、無反射性のものがあると、きれいにパターンをつくろうとします。今は電子顕微鏡の中で削ったりすることができる時代でして、200nm のパターンニングでも簡単にできますので、つくり込もうとするわけです。でも、よくよく生物を見ると、そんな必要はないのですね。

ちょっと脱線しますが、皆さんは生物系の学生さんなので、物理や化学や数学は勉強しなくていいと思っているかもしれません。でも、絶対に勉強してください。なぜかという、歴史的には物理や化学や数学のほうが古い学問で、その上に生物学が乗っているので、物理や化学や数学を知らないと解析不能になって、こうではないかという説明しかできなくなるからです。特に数学や物理の場合、数式は言語に近いので、言葉であらわしているのとほとんど変わりません。言語を持たないで研究を続けていては非常に損をしますので、ぜひ若いうちに物理、化学、数学を復習すること、あるいは新たに難しいものを学ぶことをしてください。

ここにボロノイ分割と書いてありますけれども、オオタバコガの複眼の表面の乱れを物理学的、数学的に計算で出してみています。色がついているところは乱れが生じていて、そうでないところは六角格子になって乱れていないことがわかるかと思います。生物学者として私がこの乱れをどう表現したらいいかと悩み、物理学の先生に相談してみたところ、もしかしたらボロノイ分割が使えるかもしれないということで、一緒に計算してくれました。その結果がこれです。

このグラフは、言ってみれば頻度分布みたいなも

のですが、乱れを量で表現しています。オオスカシバという日中飛ぶ蛾のとても透明な翅は非常にきれいである一方、クマゼミの透明な翅はかなり乱れています。アブラゼミの色がついた翅にもでこぼこ構造があるのですが、透明なものと比べると、より乱れています。モスマイトというのは、自己組織的に穴ぼこを形成するという技術で人工的、工学的につくったものですが、かなり乱れていることがわかりました。

ここで大発見です。生物学者と物理学者とが組むことによって、「生物はつくり込んでおらず、遺伝子の設計原理の中で一定の範囲まで機能を果たすようにしている」ことがわかりました。生物は整ったものをつくらうとするのではなくて、機能が確保されるものをつくっているということが、この研究からわかったわけです。これは大事なことです。生物系の人たちは、どんどん工学系の人たちに言ってください。つくり込まなくても、一定の範囲でつくることができればそれでいいのだということが、この研究からわかりました。

そこで、どこまで乱れていても機能を果たすか、どの範囲まで反射が起こらないか、物理学的に乱れを入れて計算してみました。水平な面積が広くなれば、当然光にとってそこが反射面であることがわかってしまうのですが、ある程度の乱れの範囲までは許せることを計算できました。これにキャッチフレーズが必要だということで、「良い加減な表面構造が持つロバストネス」としました。初め「良い加減」と言っていたのですが、「良い加減」にしまして、そこまでならしっかりとした機能を持ちますよということをキャッチフレーズとして言うようになりました。

もう一つ、機能はたくさんあるということを知ってほしいと思います。私たちは進化の中で生きています。ヒトもそうですが、ほかの生き物も、「ショパン(CHOPiN)」と呼ばれるもの、つまりCとHとOとPとiとN、炭素と水素と酸素とリンと窒素、このiというのはイオンで生体に必要な無機物だと思っていただけはいのですが、そういうものでつくられていて、設計図もほとんど一緒です。でも、ちょっとした表面変化などによって機能を変えてしまうということをしているわけです。例えば、このような超撥水性を持つものがあり

ます。テフロン加工をしなくても、先ほどのロータス効果と同じように、凸凹構造があることで超撥水性が出てしまうわけです。モスマイトでもそれが生じることがわかっています。

それからもう一つ、アリは垂直面を歩くことができます。なぜそんなことが起こるのかというと、アリの脚の先はたくさんの毛でできていて、その毛が物質と物質の間に入り込み密着するので、ファンデルワールス力が起こってくっつくのだと言われています。アリではありませんが、ヤモリの足裏は恐らくファンデルワールス力で垂直面にくっつくのではないかとということで、数年前に『Nature』に出ました。それと同じことが起こって、アリも垂直面を歩くことができるわけです。

ところが、セミの翅を模したアブラゼミシートをつくり、それを垂直面へ張ったところにアリを歩かせようとすると、踏み込んだ瞬間に落ちるのです。実は、ヤモリもアリも、足の毛は数 μm の大きさなので、その毛の先にナノ構造のもの、ミクロンの100分の1とか1,000分の1というような構造のものを置くと、歩くことができなくなるわけです。ファンデルワールス力が生じないので、滑落させることができます。セミの翅がそうになっているのは、恐らく天敵であるアリから自分の体を守るためでしょう。よく調べてみると、実際、この凸凹構造が体中にありました。かなり乱れたでこぼこ構造で、光は通さないものの、滑落の機能だけは残しています。生き物はそういうことをしているのだということがわかりました。

本来アリは垂直の壁をどんどん上がっていきけるのですが、人工的につくったモスマイトフィルムをそこに張ってやると、ごらんのように、上がることはできなくなります。このようにして証明することができます。このような凸凹構造をつくることのできるのではないかと研究もしており、将来大量エネルギーを使わずにもつくりができることを夢見ています。

次に、これはフナムシの脚です。脚を1本もいで赤インクの中につけてやると、このように水が上がってきます。これはどういうことかということ、表面の一見溝のように見えるところに小さな凸凹した突起構造があって、オープンキャピラリーとして水を運んでいるので

す。

人工的にオープンキャピラリーをつくってみても、水がすっと上がりました。加えて、このやり方のいいところは、一部が壊れても、ぐるっと回り込んで水を上げられるわけですね。セーフティー機構があるのです。管にしてしまうと中が詰まったらもうおしまいですが、これですと少々壊れても水を流すことができます。

さて、ようやく NanoSuit の話ですが、実は NanoSuit の研究はここから始まっているのです。フナムシの脚にどうやって水が上がるのか、数 μm の毛にどう液が流れていくかを知りたかったのですね。10 年ぐらい前、当時は、イオン液体という蒸発しない水のような挙動をするものがあつたので、それを中に入れてやって、毛のところをイオン液体が上がっていくのを見るような装置をつくっていたのですが、仲間がイオン液体を使わなくてもできるのではないかと思い始めたわけです。そこで、本気でやってみようということになりました。

1600 年代に先ほどお話ししていた細胞説が出てきて、人間にとってもものすごく大きなパラダイムシフトが起きました。その後、1930 年代に電子顕微鏡ができ、およそ 20 年たって生命科学でも使われるようになったのですが、電子顕微鏡の中は宇宙船の外側のような環境なのですね。10⁻³~10⁻⁶Pa の真空度です。私たちは 80% が水ですので、そんなところにそのまま出したら、干からびてしまいます。

でも私は、ちょうど君たちぐらいのとき、先生に向かって「こんな干からびたものを見ていてもだめなんじゃないですか。生ものを入れましょうよ」と言いました。昔の教授はすごく怖くて権力もあつたので、「おまえは出ていけ」と言われ、1週間口をきいてもらえませんでした。今の先生方は優しいから、皆さんにはそんな経験はありませんよね。でも、昔はそういう先生がいらして、私はとても悩みました。でも、先生にその一言を言ったことはとてもよかった。それを言ったことによって、いつか見返してやろうとずっと根に持つことができました。

当時は、世界中の人たちがショウジョウバエの幼虫を乾燥処理して見ていました。きちっとした処理をす

るとこんなふうに見えるのです。そして、電子顕微鏡の中にそのまま入れると、やはりこのようにぺちゃんこになるのですね。でも、私は負けませんでした。宇宙服を着せればいいだろうと考えたわけです。宇宙服を着せるのはとても大変でしたが、ついに着せたときには、このように電子顕微鏡の中で動きました。

この宇宙服というのは何かというと、ある溶液を表面に塗るわけです。この黒いところが、生物が持っている一番外側のクチクラです。私たちの皮膚のようなものです。その外側に、このようなもやもやとしたものをつくってやるのですね。それを電子顕微鏡で観察すると、NanoSuit がある状態のときには、ぷりっとしています。それがいない状態のときには、ぺちゃんこになります。

先ほど自分自身にも数学や物理や化学の能力をつけようと言いましたが、私にとって、よかったのは、化学者がすぐそばにいたことでした。電子顕微鏡で電子線重合を起こすことができるというようなことを私がちょっと言ったら、電子線重合と同じようなプラズマ重合というのが既に報告されていることを教えてくれました。

プラズマ重合とはどういうものかということ、真空中でプラズマをかけてやったら分子と分子が結合したり、表面の撥水性を変化させたりできるというものです。私たちは溶液をスタートとしてそれができるようにしようということで、溶液スタートでプラズマ重合をしてみました。それで、緩い真空状態で溶液にプラズマを当ててやると NanoSuit ができることがわかりました。これは私の力ではなくて、私のそばにいた研究者の力です。ですから、コラボするということはものすごく大切なのです。

実際、普通はぺちゃんこになってしまうボウフラに NanoSuit を着せて電子顕微鏡の中に入れてやると、このように動いています。NanoSuit がこんなふうにできているものを高倍にすると、規則性のあるものがはっきり見えます。しかし、NanoSuit がないと、しわくちゃになってしまいます。従来法の観察では、やはり実体を見ているわけではないことがわかりました。

よかったのは、走査型電子顕微鏡では、上から電

子を落として反射したものや、そこで分子と相互作用して出てきた二次電子を観察しているだけなのですが、上から電子が飛んできたときに NanoSuit から入ってくるとはいえ、実効的には生体から返ってくる二次電子のほうが多かったことです。結果として、この宇宙服は透明な宇宙服であるということになりました。もちろん厚くしてしまったらだめですが、薄い大体 50～100nm の範囲ですと、個体の中をのぞくことができます。その証拠に、この状態のときに金属蒸着すると、金属は二次電子をたくさん出しますので、中を見ることができなくなるということで、これが実効的に透明な服であることがわかりました。

これでいろいろなものを見ることができるようになるわけですが、昔の方法と比べて一番いいのは、準備に時間がかからないことです。正直に言うと、私が先生に変化したものを見てもしょうがないと言った裏には、実験するための準備に1日半ぐらいかかるのが嫌だったということがありました。学生だった私は、すぐに見たかったのですね。すぐ見る方法としても NanoSuit 法はよくて、以前は準備に1日半から2日かかったところを、カップラーメンを待つ程度の数分間という時間でできてしまうようになりました。見たい試料を NanoSuit 溶液につけ、よくぬぐって重合させるだけで、観察することができるようになります。

私としては、これでもう既にハッピーです。皆さんと同じ生物学者ですから、生物を見られればそれでいいのです。でも、幸いなことにというか、不幸なことにというか、医学部に所属しておりますので、周りの先生たちはほとんどお医者さんでした。ですから、虫を見て何がうれしいのかと言われてしまうのですね。それで、細胞や組織を見ましょうということになりました。

ちょっと溶液は変えていますが、これは光学顕微鏡で見たマウスの腹膜です。それから、これは人間の培養細胞です。これを NanoSuit メソッドで見ると、例えば、細胞の核を見ることができますし、真核細胞の場合は細胞骨格というものがあったりするので、そういうものも核の中に見ることができます。腹膜のほうは、表面が全然荒れていない状態で細胞の単位を見ることができます。昔ながらの、今も世界中の人たちが

やっている方法ですと、荒れた感じになってしまうのですね。それはどうしてかという、乾燥させるためにたくさんの溶液を通しますので、どうしても荒れてしまうわけです。

医学部に所属しているせいで診断にも使いたいというようなことになるのですが、これはヒトの胃がんの組織です。こちら側が、がんの場所で、こちら側が正常な場所です。診断の過程においては、フロントラインがどういう形かを病理医の先生たちが判断し、どこまで切除するかを外科の先生たちが決めるわけですが、手なれた病理医の先生方は、連続切片を光学顕微鏡で全部観察され、頭の中で立体構築し、どういう形なのかを判定されています。ここに NanoSuit をうまく使いますと、数分間でフロントラインをしっかりと見ることができますので、今後診断に使っていこうというようなことも進めています。

これは、ちょっと高倍にしたがんの部位と正常な部位です。顔つきが全然違うことがわかるかと思います。濡れたまま観察できる点で良いのは、フロントラインのあたりをもう一回割いて、再び NanoSuit 溶液をつけ、そのまま電子顕微鏡で観察できる所でもあります。

これは一つの細胞ですが、細胞を見るときには、個体で見るときのような 50～100nm ではなく、10nm の薄膜をつくって観察することができるようになりました。ここは実は私にとってもすごくホットなところでして、今は朝から晩まで水のことを考えております。高分子のところに直接かかっている水は、構造化されている可能性が高く、バルク水(自由水)とは違う挙動をします。お水は電気を通さないのですが、たくさんのお水とは違う氷様の分子になりますと、電気を通したりするのです。それらのことをしっかりと押さえないが、なぜここで観察ができ、生命維持までできているのかということを、今研究しています。

これも恐ろしい話なのですが、5分間ぐらですと、電子顕微鏡の中で観察した後、もう一度培養することができて、細胞の数が増えるのですね。電子顕微鏡の中で観察しているものを殺していないのです。ですから、中で高分子が何をしているのかをしっかりと調べれば、もしかしたらこのセミナーの一番初めにお話し

した生命の誕生につながるような分子との関係がわかってくるのではないかと考えています。

NanoSuit は、例えば、ウイルスがどんなものか、そのウイルスがどうやって細胞の中に入っていくのかを見たりもしております。それから、水分子がどうして電流を通すのかを調べたりもしているところです。これは植物にも使えますし、元素分析もできます。

最後のまとめです。

世界中の多くの人たちはまだ昔の方法でやっていて、大変な時間を使ってちょっと変わってしまったものを見ているわけですが、「3分間待つのだよ」という即席ラーメンができるぐらいの時間で、結構生のものに近い本当の姿が見えるようになりました。これは工学利用もできます。自立膜を形成させることができますし、いろいろな溶液からつくることができます。

これらは私一人でやったわけではなく、学内の研究者、学外の研究者、たくさんの人たちとコラボすることによってできるようになりました。おかげさまで、今年の4月からは NanoSuit 開発研究部というのが大学の中にできております。

これが今日皆さんにお話ししたかったすべてです。終わります。