



Title	実施記録：座談会「分子ロボットの未来」
Author(s)	見上, 公一; 河村, 賢; 齊藤, 博英 他
Citation	ELSI NOTE. 2022, 22, p. 1-34
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/89384
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka



実施記録：座談会「分子 ロボットの未来」

Authors

見上 公一	慶應義塾大学 理工学部 准教授 (2022年10月現在)
河村 賢	大阪大学 社会技術共創研究センター 特任助教 (2022年10月現在)
齊藤 博英	京都大学 iPS細胞研究所 教授 (2022年10月現在)
豊田 太郎	東京大学大学院 総合文化研究科 准教授 (2022年10月現在)
野村 M. 慎一郎	東北大学大学院 工学研究科 准教授 (2022年10月現在)
松浦 和則	鳥取大学大学院 工学研究科 教授 (2022年10月現在)

本稿で報告したオンライン座談会は、JST RISTEX 科学技術の倫理的・法制度的・社会的課題 (ELSI) への包括的実践研究開発プログラム (RInCA)「研究者の自治に基づく分子ロボット技術の RRI 実践モデルの構築」研究開発プロジェクト (2021 年度採択課題、代表：国立研究開発法人海洋研究開発機構 小宮健) により実施された。また座談会の実施に際しては同プログラム「萌芽的科学技術をめぐる RRI アセスメントの体系化と実装」研究開発プロジェクト (2020 年度採択課題、代表：大阪大学 標葉隆馬) の協力を得た。

目次

はじめに	3
座談会開催概要	3
分子ロボティクスに関する基本文献	4
座談会「分子ロボットの未来」(2022.3.9)	5
＜分子ロボットの過去＞	7
＜研究文化とアイデンティティ＞	10
＜分子ロボットと生命の起源＞	14
＜分子ロボットの応用＞	22
＜人文社会科学との連携＞	29
＜分子ロボットと細胞＞	33

はじめに

本稿は、分子ロボティクスにおける自然科学と人文・社会科学の連携の取り組みの一つとして実施されたオンライン座談会「分子ロボットの未来」の開催記録である。分子ロボティクスは、DNA やタンパク質に代表される生体分子を用いてシステム化させた分子デバイスの構築を目指した学際研究領域であり、2010 年頃からその活動が活発化してきた（村田 2010；2012；Murata et al. 2013；田中 2010）。この萌芽的研究領域である「分子ロボット研究」について、実際に研究を行う研究者がこれからの研究の方向性、およびその先の応用の可能性をどのように考えているのかを語り合い、その内容を言説化することが座談会を開催したねらいである。本座談会はあくまでも分子ロボットの未来について研究者の視点からその可能性について語り合うことが目的であり、「将来はこうなるはずだ」といった予測ではなく、「こういうことも考えられるのではないか」や「こうなったら面白いのではないか」などの期待という観点からの語りを中心とすることが目指された。このような研究者の語りは個別にインタビュー調査を行うことでも言説化は可能だが、他の研究者の語りに触発されて新たな観点が提示されることもあるため、今回はあえて座談会という形式を選択した。座談会は 2022 年 3 月 9 日（水）の 16 時過ぎから休憩を挟んで約 2 時間にわたり、Zoom を利用したオンライン形式で行われた。以下は当日行われた発言を書き起こしたものである。

座談会開催概要

開催時間：3 月 9 日水曜日 16:00 – 18:00（途中 5 分間の休憩を含む）

参加者：

京都大学 iPS 細胞研究所	齊藤 博英 教授
東京大学大学院総合文化研究科	豊田 太郎 准教授
東北大学大学院工学研究科	野村 M. 慎一郎 准教授
鳥取大学大学院工学研究科	松浦 和則 教授

司会：慶應義塾大学理工学部 見上 公一

補助：大阪大学社会技術共創研究センター 河村 賢

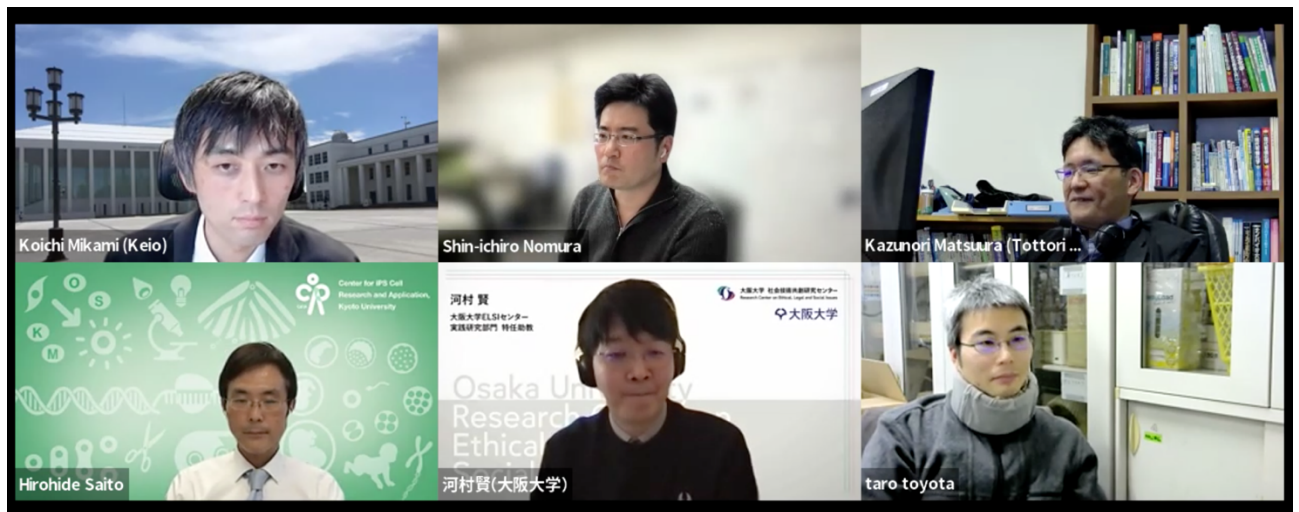


写真1 オンライン座談会の様子

分子ロボティクスに関する基本文献

村田智 2010: 「『分子ロボティクス』特集号について」『日本ロボット学会誌』 28(10), 1149.

村田智 2012: 「プロジェクト紹介:新学術領域研究『分子ロボティクス』」『計測と制御』 51(9), 884-85.

Murata, S., Konagaya, A., Kobayashi, S., Saito, H., and Hagiya, M., 2013: "Molecular Robotics: A new Paradigm for Artifacts," *New Generation Computing*, 31, 27-45.

田中文昭 2010: 「分子ロボティクス研究のはじめ方」『日本ロボット学会誌』 28(10), 1151-54.

座談会「分子ロボットの未来」 (2022.3.9)

見上： それでは座談会「分子ロボットの未来」を開始させていただきます。私は進行役の慶応義塾大学の見上と申します。どうぞよろしくお願いいたします。

この企画は JST-RISTEX の RInCA プログラム¹で今年度採択された「研究者の自治に基づく分子ロボット技術の RRI 実践モデルの構築」というプロジェクトの一環として実施するものです。分子ロボット研究の第一線でご活躍されている研究者をお招きして、現在、研究がこういったところにあるのか、そして、これからどういうところに向かっていくのかということを自由に語っていただくという趣旨で開催しています。どうぞよろしくお願いいたします。

それでは、まずご参加の皆様に簡単な自己紹介をお願いできればと思います。順番にお願いできますでしょうか。

齊藤： 齊藤です。よろしくお願いいたします。私は、もともと宇宙の起源について研究したくて大学に入ったんですけども、全然相対性理論の授業とかが分からなくて諦めて、その後生命の起源に興味をもって、RNA の研究を始めました。今もその RNA を使って、生命の成り立ちとか新しい技術をつくることを目指した研究をしています。

分野としては合成生物学とか幹細胞の生物学とか生命工学とか、そういういろいろ領域のニッチ的な部分で研究していて。だから、「この学会が自分の学会だ」みたいな場所がなくてなかなか困っているところもあるんですけど、その分、いろんな分野の人と交流しながら新しい研究をしていきたいと思っています。

今やりたい研究としては、合成生命システムというのをつくりたいと思っています。RNA が自分の好きな分子なので、RNA を基盤として人工細胞とか、今日の話題でもある分子ロボットというのも RNA をベースにつくれるんじゃないかという野望の下に研究をしています。そのような RNA の研究を基盤として、生命の成り立ちの理解とか、新しい医療用の技術をつくるということに展開していくような研究を目指しています。よろしくお願いいたします。

豊田： 豊田太郎です。皆さま、本日はどうぞよろしくお願いいたします。私は東京大学総合文

¹ 2020 年度に開始された「科学技術の倫理的・法制的・社会的課題（ELSI）への包括的実践研究開発プログラム」。Web サイトは <https://www.jst.go.jp/ristex/rinca/>

化研究科広域科学専攻相関基礎学系に属しております。最近のモットーは、「人工細胞の文化をつくる」です。ですので、いろんなイベントとか、アウトリーチなどにも、可能な限り力を割けるようにしていますけど。私自身の研究関心としては生命の起源になります。その生命の起源に対して、lipid world と呼ばれている脂質分子を中心とした細胞膜の構造体の研究課題に興味を非常に強く感じていて、学部時代から研究を継続させてもらっています。

目下、この分子ロボティクス・分子サイバネティクスの研究分野で、人工的につくった細胞膜をいかに活用して新たな機能につなげられるかということに貢献できればと思って研究をしています。

野村： 東北大学工学研究科ロボティクス専攻の准教授をしております、野村と申します。研究室の名前は分子ロボティクス研究室で、2010年に立ち上がったラボです。当時は世界で分子ロボットという名を冠している研究室はうちだけだったのですが、チェコにケミカル・ロボティクス（chemical robotics）というラボがあったり、ハーバード大学のWyss研究所も分子ロボティクスをばんばんアピールしてきているので、世界的にどんどん盛り上がってきているんだろうなと思っています。

僕自身は静岡大学の出身で、卒論は有機合成のラボでして、そこの師匠の小夫家芳明先生が、誤解を恐れずに言えば「万物は合成できる」思想の直系の方で。その頃化学の人たちは——今もそうかもしれませんが——鼻息が荒くて、万物は合成できるのだから次は生命の番だとかアメリカ化学会長が言い切ったりして、元気にやっていらっやいました。ラボの先輩も妙に熱くて。それにあおりを受けた初学者の僕も、じゃあ生命はつくれるよね、つukらないかんよねと思に殴られた感じでした。博士研究をしていた2000年頃は、細胞サイズのリポソームに色々詰めこめば今度こそ人工細胞は起動するでしょみたいな話が出てきた頃で、もう生きた細胞まではつながる道があるねとぼんやり思えてきた辺りでした。そこで僕は、直接つながりそうなルートをつなげる研究は大変で大切だけど他の誰かでもやれそうだなと思って、天然とは異なる「コレジャナイ人工細胞」、「コレジャナイ生命体」を自分たちでつくり出せたら面白いなという、ちょっと抽象化した路線でやっています。

その一番シンプルな形が分子ロボットだろうなと信じて、自然にない、新しい友達をつくりたいとか、進化と地球の歴史からズレた——合成生物で現状をより良くしようと頑張る工学の人たちに対して斜に構えているみたいですけども、そうではなくて——まだ知らない宇宙人に会ってみたい、同じ宇宙のどこかにいるなら作れるはず、みたいな、そういうモチベーションでやっています。よろしくお願いします。

松浦： 鳥取大学工学部の松浦と申します。応用化学講座です。私はずっと化学の分野でいろんなことをやってきました。最初は野村さんと同じように有機合成から始まったんですが、その後ドクターの時に水晶発振子マイクロバランスというのをを使って気相、つまりガスフェイズの分子認識というのをなぜかやっていてですね。そこから分子集合体とかに興味を持って、いろいろ研究してきました。

名古屋大学で助手をやらせてもらった時には、糖の高分子についていろいろつくったり解析したりというのをやっていました。その後で九州大学で助教授、准教授をしていたんですが、その頃は最初は DNA の分子集合体、マイクロメートルサイズの DNA の球状のものとかをつくったりしていたんです。でも、DNA オリガミがはやりだして。はやりだすと大体嫌いになるんで、それでやめたんです。もう多分自分ではやらないと思いますね。

まあ、そういう経緯で現在はペプチドに研究をシフトしています。ペプチドの研究は九大のときから始めて、2012 年に鳥取大学に移って、今も主にペプチドを使って研究しているんですが、分子ロボットや分子サイバネティクスの関係で言うと、一つはウイルスみたいな集合体をペプチドでつくるということをやっています。もう一つは、微小管という分子ロボの素材としても使われる、動きのあるタンパク集合体をペプチドで制御するというのを進めています。あともう一つは、リボソーム上とか、DNA の集合体上で光を当てるとバツとペプチドが成長して、それを利用して分子を動かすという、光の方向に合わせて動くという研究もちょっとやっています。よろしくお願いいたします。

<分子ロボットの過去>

見上： 今日は「分子ロボットの未来」というテーマで、将来はこうなりそうとか、今こんな研究が面白いよということもそうなんですけど、今後どんな方向に行ったら面白いとか、こんなことができたらいいのにというちょっと夢や希望のようなことも含めて、いろいろと語っていただければと思っています。

まず最初にですが、夢を語っていただく、あるいは未来を語っていただく一歩手前として、ちょっと過去を振り返ってみたらいいかなというふうに思っています。特に、分子ロボットは皆さんの中でいつぐらいから出てきたものと理解されているかということ、を、ちょっと伺いたくて。

これはどれくらいの歴史があるかと一般の人たちは理解したらいいんでしょうか。いろいろ研究をたどっていけばすごい昔までたどれるのかもしれませんが、分子ロボットと

言えるのはやっぱりここからだよねという一つのきっかけがどこかにあるのかもしれませんが、ちょっと私は分からないんですが、皆さんの中でどう思っているのかをお伺いしたいなと思っています。

野村： ちょっとさっき資料を見返していたんですけれども、分子ロボティクス研究会を 2009 年頃につくろうという話になりました。そして、浜名湖で合宿をやったのが、多分最初ぐらいかなと思うんですが。それからですかね、大体。

日本で分子ロボットをやろうと言いだしたのが、今の僕の講座の教授の村田智先生で。その前身になっているのが分子計算、分子プログラミングという東大の萩谷昌己先生が率いていらっしゃったプロジェクトです。分子で計算機をつくろう、多種の分子が同時に並列計算するよ、実体として DNA コンピューティングがいけるよ、というトンがった話でした。その後を受けての分子ロボティクスです。計算だけではなくて、機構まで、メカまで分子でつくることができる。万物はつくれるというイメージに近いと思うんですが、そういうのをみんなで寄ってたかって議論して、やってやろうよということで、機械の人も化学の人も情報の人も生物の人も巻き込んで研究会が立ち上がりました。

松浦： 分子ロボットをどう定義するかにもよると思うんですけれど、野村さんがおっしゃった分子ロボティクス研究会の話は多分、分子ロボット自体が自律的に何か計算をして、さらに動いたり仕事をしたりというのが、野村さんの言う分子ロボットということですよ、きっと。

化学の世界だと、もう単に分子マシンとか、例えば光を当てたら分子が開いたり閉じたりとか運動しますよとか、単に車みたいな車輪を持っている分子が基板上で電場を与えると動くとか、そういった話は分子ロボットと言いだす前からあったわけです。

一方で、例えばウイルスみたいなものも、見ようによってはロボットみたいな働きをしているよねということを言い出せば、昔の映画でよくいわれる『ミクロの決死圏』² みたいな、ああいうナノメートルサイズの入れ物に何かを入れて体の中で運んでやるだけでもロボットなんじゃないかという考え方もあるかなと。

そうすると、だいぶ昔からあったということも考えられるけれども、ちゃんと計算して情報処理して動くということを考えると、野村さんの言ったぐらいの時期からかなと

² 1966 年公開の SF 映画。原題は『Fantastic Voyage』。

いう気はします。

野村： それでいくと、多分 19 世紀末でしたか、「魔法の弾丸」という概念が出てきて。今松浦さんがおっしゃったドラッグデリバリーシステムの最初概念みたいなもので、確かエールリヒかなんかの論文³があったと思うんですけど。体の中に入って、そして狙った病巣だけをやっつけるみたいな、そういうスマートな薬ができるといいよねというのが最初なのかな。

そうなると、ロボットという言葉の歴史よりも古いですね。ロボットという言葉ができたのが『R.U.R』⁴からだから、それこそ 20 世紀に入って少し経ったぐらいという話なので。それより先に、分子でメカをつくろうというのは出てきていた。

多分 NMR（核磁気共鳴装置）ができたぐらいで、もうそういうギミックをやろうという思想があったんじゃないかと思うんですが、どうなんですかね。IR（赤外線分光法）ぐらいからやれたんですかね。何か動きが測定できそうだと、これは分子工作で動かそううだと言えた時点ぐらいが。そうだとすると、もうそれこそ錬金術にまでさかのぼるんじゃないかなという気はします。

齊藤： 分子ロボットの素人のほうの人としての意見なんですけど、うちの学生さんとかと話していると、やっぱりドレクスラーの『創造する機械』⁵とかはよくみんな話題に挙げていて。イメージとして、やっぱりそういう微小な機械をタンパク質とか核酸でつくるみたいなナノテクノロジーと、さっき松浦さんも言われていた『ミクロの決死圏』みたいなイメージが。そういう小さい機械でいろんなことができるんだなというのを示した本なんで。

体内を駆け巡る分子ロボットみたいなものを分子でできた部品でつくるというのが出来上がってきたのが、翻訳書は 1992 年って書いていますね。だから、その前から絶対にそういう分野はあったと思うんですが、分子で機械をつくるという概念はあったと思うんですけど、それがイメージしやすくなったのには、こういった本とかの影響もあるのかなと思います。

³ Paul Ehrlich. 1907. The Harden Lectures on Experimental Researches on Specific Therapeutics.

⁴ 1920 年に発表されたカレル・チェペックによる戯曲。

⁵ K. Eric Drexler. 1986. Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology. (1992. 『創造する機械』. 相澤益男訳.)

これは結構合成生物学と似たような議論になるかもしれないんですが、合成生物学も、じゃあいつからなのと言われると、誰もはっきり分かんないんですよね。大御所の先生ほど、「そんなの昔からあるじゃないか」みたいな。少し前は「おまえら若手は合成生物学と言ってイキっているだけやろ」みたいな感じで言われることが多かったですけど、結局そういうことと同じで、分子ロボットもいきなりではなくて、確かに連綿と続く流れの中でできた気がします。

ただ、いろんな技術革新があってその分野が盛り上がるということはあると思うので、分子ロボティクスもそういう野村さんが言われたときに、それまでの DNA コンピューティングの技術と、その受け皿としてのリポソームとか、動きを出すタンパク質とかを含めて、統合して新しい分野をつくらうという機運につながってきたんじゃないかなというふうに理解しています。

豊田： 僕は先ほどおっしゃられたナノテクの時期からと言われれば、確かにそうかなというふうに思いますし、あまり明確に分かっていないのが正直なところですね。ただ、やっぱり国内に分子ロボットという名前を提案されて、それを冠とされてきた研究者としては村田智先生で、一つの方向付けが行われたというのはそのとおりだろうと思ってます。

ただ、最終的には私は、化学は錬金術からずっとやっていることはあまり変わっていないと思っている人間なんです。その対象がいろいろ小さくなったり大きくなったりということはあるんですけど。個人的な見解ですけども、賢者の石という考え方と、あとホムンクルスという考え方がその当時からあって。で、分子ロボティクスは、その両方にまたがるような考え方だから、化学としてはずっと脈々と続いてるんじゃないかなという印象を持っています。

野村： 1959年にリチャード・ファインマンが「底のほうにはまだ十二分の余地がある」という講演⁶をしていて、それがナノテクの概念を一般に広めるはしりになったんじゃないかなというのを言い忘れていました。

<研究文化とアイデンティティ>

見上： こうやって歴史をちょっと振り返ってみたときに、この分子ロボットあるいはロボティ

⁶ Richard P. Feynman. 1959. There's Plenty of Room at the Bottom, in The Pleasure of Finding Things Out. (2009. 『聞かせてよ、ファインマンさん』. 大貫昌子・江沢洋訳 収録)

クスという研究は、日本が盛り上げてきた研究分野というイメージを持つんですが、それは皆さんも共通して持っている認識ですか。それとも、名称は違うけど、分野としては世界的に大きな流れとしてあったという認識でしょうか。

野村： アメリカの東海岸、ボストンら辺がすごく元気で、ハーバードで BIOMOD という学部学生の分子デザインコンテストみたいなものが 2011 年に始まりました。実はこれルールは日本から持っていったんですが。合成生物学の学部学生の世界大会の iGEM⁷がその前に、やっぱりボストンの MIT とハーバードら辺から 2004 年ごろに始まっています。iGEM の後で、もっと原理的に分子をデザインできるようになって、それこそ DNA オリガミ⁸が出てきた頃だったので、学部学生でも分子をデザインできるでしょうと。今でこそタンパク質をデザインできそうな気配がただよっていますけれども、DNA のナノ構造はその随分先に形がデザインできるようになったので、それでロボコンをやるという流れがボストン、あと日本でも分子ロボティクス研究会で盛り上がって、BIOMOD が立ち上がりました。以降は学生を育てながら、本業お互いチラチラ見合いながらやっています。日本のほうがどちらかというといろんな種類の分子をまとめて使って動くようなロボットシステムをつくっていきましょうという流れで、アメリカやヨーロッパ、そして中国などは、単一分子のスケールで動く機械装置に結構こだわっているところが多かった印象です。

齊藤： 私も野村さんに近い感覚を持っています。やっぱりボストンとかはすごく強いんですが、日本はそれぞれの研究者がそれぞれの分子を扱ってはいるんですけども、融合的に、先ほどの話じゃないけれども、萩谷先生の DNA コンピューティングの流れとナノテクを組み合わせ、リポソームを組み合わせ、人工細胞みたいなイメージに近い、分子ロボットの構成原理を知りたいみたいなイメージがありますかね。

だから、融合的といいますか、それぞれのコンピューティングと動きと区画を統合したものをつくろうみたいな流れであると思うんですが、海外はもう本当にめちゃめちゃ細かい模様をつくるとか、何かパターンをつくるとか構造をつくるとか、そういうのはすごい勢いで進んでいるなという印象を客観的には持っていました。

⁷ The International Genetically Engineered Machine competition (iGEM) は合成生物学の学生による国際的なコンペティション。

⁸ DNA が相補的な塩基対と二本鎖をつくるという性質を利用して 2 次元あるいは 3 次元で自由に構造物をデザインしたもの。

見上： 国ごとというか、アメリカ東海岸の特性というか、それぞれの色がある感じなんですか。

野村： 学部学生など若い人を巻き込むのがすごくうまいなという感じがありますし。例えば iGEM は、合成生物学がまだ名前も出てきたばかりのころなのに、それを学部学生と一緒に、しかも世界中からパーツを集めてきて、それで、全員で得体の知れないものを共有しつつ考える場として、言い方は悪いですが共犯者にしてしまおうみたいな、全世界規模の OJT のような雰囲気がある。日本だと割と、研究というのは学部学生は最初習い事から入って、本当の最先端はプロ中のプロがやる、という印象が強いと思うんですけども。萌芽期の研究のトピックスとかだと、もう若い人もどんどん巻き込んでいっちゃえという雰囲気が、アメリカの東海岸ら辺にはすごくあったような気がします。なので、アイデア先行の日本とマンパワーというか巻き込んで人数先行の欧米みたいな、そんな感じかもしれません。

見上： 研究コミュニティという観点では、皆さんは分子ロボット研究者ですかと言われたときに自信を持って「はい」と答えますか。もし、ちょっとためらうということであれば、ためらう理由についてもぜひお伺いしたいです。

野村： 正直今でも、何を研究されているんですかと聞かれて、分子ロボットですと言うときには半笑いになっています（笑）。僕はどちらかというと人工細胞をつくるという話がメインで、それを要素に分割して一つ一つちゃんと動かしてやろうというのが分子ロボットなので。人工細胞もちょっと前はそれこそ日陰者で、石を投げられて。先ほどの齊藤先生のお話じゃないですけども、人工細胞なんてぬかしやがってみたいな割と冷たい目で見られたりとか、申請書に書いたら「こんな名前はけしからん」と怒られたりしたこともあったんですけど。最近は研究者人口も増えたので、専門と言ってもそんなに恥ずかしくない風潮になってきました。怒られると躊躇しますよね。割と化学の人は夢を持ってテーマにタイトルを付けることが多いので、分子の構造が変化して一回閉じるだけとか、開いただけとかでも、分子マシンと言い切る夢の大きさがあったので。それを思えば、化学の人のほうが分子ロボットだよという言葉は使っても恥ずかしくないような、そういう風潮ができつつあるんじゃないかなとは思っています。逆に、いわゆるロボットの研究者とかから見ると、「なんだこんなもんか」と言われたりしたこともあったので、まだ社会認知にはほど遠いかもしれませんが、物理的に下の階層からじわじわ浸透しつつある気はします。

松浦： 分子ロボティクス研究者かと言われたら、僕は自信を持っては「はい」とは言えないです（笑）。分子ロボティクスのプロジェクトに入れていただいたからそういう研究も始

めてみたというのが正直なところですよ。

自信を持って言えないというのは、僕は部品はつくっているけれども、システムとしては組み上げていないなと思っていて。やっぱりロボティクスの本当の難しい話を聞くと、本当にシステムってよくあんなのを理論で考えるなと思うんです。そこまではできていないと思うんで、やっぱり部品をつくっているだけだよなというのは思っています。

なので、分子マシン屋さんとは言えるかもしれないけれども、ロボティクスではないのかなと自分では思っていますね。

齊藤： 僕も躊躇しますね（笑）。僕の場合は、自分の理想とする分子ロボットに到達していないみたいなのがあります。やっぱり完全に分子で、今、松浦さんが言われたみたいに、部品で組み上げてロボットの振る舞いをするものを自分のラボでできたら、自信を持って言えると思うんだけど。

僕は生きた細胞を使っているんです。生きた細胞の中にそういう人工のシステムを入れて細胞の挙動を変えるみたいな研究をしていて。それ以外にもしているんですけど、完全にボトムアップに組み上げているものもあるんですが、メインでラボでやっているのはやっぱり生きた細胞を改変していくようなアプローチを取っているの。それってやっぱり、ハッキングしているだけって言えばそうなので、どちらかというと分子ロボットにはまだ至っていないのかなという意味で、自分が分子ロボット学者ですとはこういうときしか言わないですね（笑）。

でも、憧れはあります。自分のラボでそういうのができていたら結構いい世界になるなという憧れは正直あるんですけど。だから、生命工学者ですみたいなことを言ったりはしますね、RNA 工学者ですとか。

豊田： 私もドンピシャで分子ロボット研究者ですとは言えないなと思っています（笑）。

私はどちらかということコロイド界面化学にずっと傾倒して、リポソームをやっています。すごくシステム化されているんだろうけれども、生命ってもっとぐちゃぐちゃ、ドロドロしていて、もうなんかあれやこれやいっぱい変なのが出てきてというような系だと思っていて。生命起源に関心があるのはそこに面白さを感じているんです。

だから、今回、分子ロボティクス・分子サイバネティクスでリポソームを——リポソーム自体も、もう本当に大きさは小さな数十ナノメートルから、大きいものは1 ミリメートルぐらいまであるんですけど——それをいかに工学のセンスで、調教と言ったらおかしいですが、制御できるかというテーマはチャレンジングだなと思いながら、そうい

ったことが重要でもあるということはすごくよく理解しているつもりです。それで、やっぱりその研究分野にぜひ一度没頭してみようと思っています。

だから、それでどこまでできそうかな、そこからあとは、ここまで以上になってくるともっとぐちゃぐちゃ、ドロドロしていて、もう制御というほどの制御ができないかもしれないかな、というラインまできたならば、ちょっと分子ロボティクスと生命起源研究のどちらを取っていくかというのはまた考えていこうかなと思っていますところ。

リポソームは本当に難しいんですよね。その中でも、ハンドリングしやすく、かつそこそこ再現性も含めて実験的にやりやすいところは、ぜひ皆さんにもやっていってもらったら本当にいいなと思っています。そこに、DNA タンパクの研究を私も理解してきてくるかなというのは、自分として楽しみでもありますし、その制御から外れていたものたちにも焦点を当てられるような研究にいずれしていけたらいいなと思っています。

そういう意味で、分子ロボでもぎちぎちにシステムを構築できるという世界を勉強しながら、自分がステップアップしてみたいという感じで今はやらせていただいています。

野村： 梯子を外される気満々の分子ロボティクスです（笑）。

豊田： いやいや（笑）。いやでも本当に、活性化エネルギーを超えた分子たちで結果を出すんですが、超えていない子たちをどうやって評価するかというのは、分子ロボでも多分次に考えなきゃいけない課題になると思うんですよね。

野村： ごみがいっぱい出ますからね。

豊田： そうなんです。あのごみちゃんたちは、多分、部分的に機能は残してあって。それを全部実験データからはサクッと違うように扱っちゃうわけです。それでも、自然現象としては同じ系内で起きていることだしなとも思っているのです。そこが次に、生命起源にも絡んで考えていきたい課題だなと、この分子ロボでやらせていただくことで、あらためて思っているところでもあります。

<分子ロボットと生命の起源>

見上： 今のお話もそうですが、分子ロボットの研究者とお話をしていると、生命の起源を知りたいという話が度々出てくるんですが、分子ロボットを突き詰めていくことと生命の起源を理解することというのは、どこかで分岐するというイメージがあるんでしょうか。

デザインして制御することを突き詰めていくのと、生命の起源を理解するというのが、分子ロボットの現状では一体化しているけれども、先を突き詰めていくと分かれそうなのかなという印象を受けたんですが。それとも、分子ロボットを突き詰めていくことは直接的に生命の起源の理解につながるというお考えですか。

齊藤： 僕は、分岐するというよりは、理解につながるほうのスタンスを取っています。僕もやっぱり生命とか細胞の創発というのがほんまにどうやって出来上がるのかとか、そういうのにすごい興味があるんです。分子ロボットの原理はもう完全にボトムアップで組み上げていくところで、できないことも結構。今、豊田さんが言ったようにごみがいっぱいできるとか、実はごみの中に宝があるかもしれないというのもあって。そこをちゃんと見ていけば、それは生命の起源をどういうふうに捉えるのかにもよると思うんですけど、すごい大事な問題に——どうやって本当に複製するのかとか、複製と分裂がどう同期するのかとか、いろんな重要な問題があると思うんですが。どうやって進化するのかとか。それを理解する上で、僕は分子ロボットという分野は助けになるんじゃないかという気持ちでいます。

ただ、それに到達するのに、自分の中でもすごいギャップがあるんです。自分が今やっている研究とそういう部分というのは結構まだギャップがあって。願いとしては、それはゆくゆくマージしていくんじゃないかと僕は思っています。

豊田： 例えば有機化学は、これができました、収率何%でしたというふうに、やっぱり化学のできたことをきちんとその原理まで含めて考えていく学問として面白い。私が感じている分子ロボットの面白さは、それに加えて、システムとしての見方があって、これとこれをこういう条件で混ぜ合わせると、こんな制御とか安定した機能が出てきやすいとかいうことです。それは、有機化学で勉強してきたこととは全然視点が違うところからくるので、生命の起源というある機能化したものが出てくるときには、どっちの考え方もあってしかるべきだろうなというふうに視野を広げていただいたと思っています。だから、分岐するかというと、分岐ではないんです。あとは、得意なものを見方みたいところで各研究者が発展していけばいい気がしています。

なので、例えばさっきお伝えしたごみの拾い方も、何かシステムのほうの考え方で、これと、これと、これの性質を満たすようなごみだったら合わせるとこういうことができそうとか。それって、合成のプロセスでは基本的には廃液っていうふうになって考えないことにするんですけど、そういうふうな拾い方があれば、生命の起源で分子も大事だし、分子の集まり方とか、役者が何なのかとかいうのを考えいくときに多分大事な話なので、分岐という感じではないと思っています。

野村： 分子ロボットというネーミングには、もう制御がかかっているものという意味が隠れていて、本来完全に制御ができるはずのもんでしょと。つまり、ホワイトボックスとか、中の要素は全部知っていて、だから俺たちはここをこうすれば制御ができると知っている、それに従え、おまえは従う機械だ…というような話が、分子ロボが今やりたいところなんです。一方で、いやいや、そんなガッチリした話じゃなくて、生命の起源からこっちの天然というのはもっとごみもいっぱいあるし、要素も不確定な中から、やっと 46 億年ぐらいかけてまとまってきて、これとこれが似たような挙動をして、何とか明日もご飯を食べて行けるよねというような状況に収まって、ブラックボックスが小さくなりましたという状態で、そこに至るまでのぐしゃぐしゃしたところをどうやって制御してきたかというのを僕らがちゃんと分かっている、今度はそれを制御できるようになるという話ですね。さっきおっしゃられた分岐点については、今のところは、分子ロボットをつくろうという指向と、ややこしい生命現象をちゃんとつかんで、そのオーダーパラメータは何なのかという制御の仕方を理解するという指向で、利害が完璧に一致しているんだろうという印象をもっています。

ただ、小さくなったとは言えブラックボックスの要素の数はすごい。で、そこから制御可能なものだけをピックアップしてこいというのはまた別の話で、そこら辺は生命の起源の研究とはちょっとだけずれてくると思っています。

見上： 先生方と一緒に研究したいという学生さんのモチベーションは、どこら辺にあるのかなというのもお伺いできますか。生命の起源を理解したいといった夢みたいなものを追い掛けてくるのか、それとも、これを制御したら何かできるんじゃないかみたいな視点から研究に関心を持ってくる方が多いのか。どういった学生に来てほしいと思っていますかということも含めて、お伺いしたいんですが。

松浦： まず、研究室紹介のときのスローガンとして、生命を理解するだけでなく、「超える」ということを言っていて。生命を超えるようなものをつくりましょうという、それを僕らはつくりたいんだということを言っています。

僕は生命起源はそんなに研究していないと思っていますが、生命起源にもつながるかもしれないし、生命の機能を利用して、例えば何か科学で改造してやったり制御するというのをほんのちょっと設計して、パスだけでもできるんじゃないかと思っています。そういうのを設計してつくれるというところが化学の醍醐味なんだよということは教えたいたと思っています。

見上： その生命を超えるというのは、既存の生物種で起きている現象よりも、例えば効率的に何かができるとか、そういうイメージでしょうか。

松浦： そういうこともありますし、例えばウイルスとかでも、光で何かウイルスの構造がぱっと変わるとか。そういうウイルスって多分ないんですよ。

そういう本来持っていないような機能を人工的につくるとかですね。あと微小管でも、微小管の中に何か物を詰めたりとかいろいろやっているんです。そういうのを、天然でもあるにはあるんですが、積極的に制御して、本来持っていないような性質とか、物性とかを出すという。例えば磁場におとして微小管が動くとか、そんな研究をやりたいなと思っています。

齊藤： うちのiPS細胞研究所なんで、やっぱり来る学生は医療応用に興味があることが結構多いんですよね。だから、そういう学生さんにはやっぱり分子ロボットというか、そういう構造物をまずつくるとというのが医療につながるよみたいな説明をしながら、若干お茶を濁している感じでリクルートするみたいなことはしたりしています。

僕らは、今、野村さんとも共同研究をしているんですが、RNA とタンパク質で何か構造物とか機能のあるものをつくりたいと思っています。僕らの中では、リボソームは神だというふうに言っているんです。リボソームって究極の分子ロボットの形態の一つみたいな。こんなものがなんで生命の起源から全ての生命であるのかっていうのが謎で、誰もボトムアップにつくれないので、そういうのにちょっとでも近づけるような研究をしたいなと。ただ、そういう例えば生命の根源が分かるんだといっても、やっぱり医療応用を志向している学生さんにはピンとこなかったりもするので、そういう研究もできるし、医療応用もできますよ的な感じで道に引き込むみたいなことはしたりしています。

分野にもよるんですが、医学系だとやっぱりゆくゆくは医療応用したいという。iGEM 出身者で他大学の子も応募してくてくれるんですが、やっぱりそういう子たちも医療応用につながる技術開発をしたいというモチベーションの子が多いので。だから、それは分子ロボットもゆくゆくはそういう医療応用につながるよということを言うと、興味をもってくれる学生もいるという感じです。

野村： 齊藤先生、医療応用から入って、齊藤先生のラボに入ってから形に目覚めたというようなことってあったりするんですか。

齊藤： それを言うと、僕もジレンマ的にラボの中で医療応用の研究と生命の根源を探るみたいな研究の両方をしたいんだけど、それをどうラボの中で実現するかというのは結構難しい問題で。学生さんのモチベーションもやっぱり偏ってきちゃったりするから。そこは自分の中の課題としてあります。

見上： 持っていращやるプロジェクトは、自分の中ではどちら寄りとかというイメージはあったりするんですか。それとも、プロジェクト自体も両方に行けるような中間点というか、接点で組み立てていращやる感じなんでしょうか。

齊藤： 一応提案書とかは、ある程度どちらもできるように書いていますが、興味を持つ学生はやっぱり医療志向みたいな子が多いですね。根源的なところもやりたいなとは思っているんですけども。

野村： うちはやっぱ機械系なので、ピペットなんか握ったこともないよ、遺伝子って？DNA？RNA？みたいな状態で入ってくる学生がほとんどです。ごく最近になって、分子ロボット知っています、勉強しました、やらせてくださいといってくる学生も出てきたんですけど、ほとんどは大体、熱力学・材料力学・機械力学・流体力学の4大力学と制御工学、要はマクロな機械の原理をたたき込まれて、それから研究室配属になりますね。そして修士卒業後も、一般のメーカーに勤めたりすることが多いですね。

その面接で、こういう実験をやっている、こういう問題にぶち当たって、こういうふうに解決しましたとか語るんだそうです。で、テーマ何だっけと聞かれて、「分子ロボティクスです」と答えたら、「なんでそんなニッチなものを」と言われたりするそうです。やっぱり世間的にはニッチなところなんですよ。2年間とか3年間ぐらいラボにいと、よそとは違うことをやっているというのがだんだん誇りに思えてくることもあるそうですよ。

だから、うたい文句としては「何かおもしろいことをやろう」というのがラボのモットーですね。今まで他の人が使っていないような材料を使って、一番小さいスケールで動くロボットをつくらうというのがモットーなので。そこら辺のロマンは買ってもらえているのかなという気はします。

学部学生の時に、先ほど話した BIOMOD に出たりして、学部学生がチームを組んで一夏だけ。それこそ iGEM の分子デザイン版なんですけれども。自分らで分子をデザインして、実際につくってみて、その出来栄を競う。うちのラボに入ったらまずそれで世界一を取ってこい、話はそれからだみたいな。要は部活みたいなもんですね。世界相手に勝ったり負けたりした後で、卒業研究を、これからはじゃあ「1人 BIOMOD だ」、「おまへたちは自分で世界に1つだけのテーマを頑張るんだ」ということで、それぞれの研究に入っていきます。大抵はすでに誰かがやっていたりはするんですが。珍しいラボで自分だけのテーマをやっているというところは、何となく面白がって卒業していつてくれているのかなという気はしています。

豊田： 私の場合は、生命起源とか生命の成り立ちをつくって分かりたいという、どちらかというと分かりたい系の学生さんにアプローチしています、スローガンとしては。ただ、やっぱり学生さんの中にはそういうピュアな興味を持っている学生さんだけでなく、就職的にも、コロイド界面関係で医療とか、それから化粧品とか、食品とか、そういった業界を考えている学生さんもいます。あとそれから、サニタリー系ですかね。そういった企業への就職を目当てに、研究をしたいというモチベーションの学生さんもいます。それはやっぱり私としてももちろんウエルカムで、ぜひ身に付けていってほしいなというふうな思いでやってきています。

一方、10年前ぐらい前はリポソームという言葉自体もあまり市民権がなかった感じで。リポソームって何ですかというと、まずカプセルのことをやっていますとか、そこから学生さんは話をしなきゃいけないと言っていたんですが、最近徐々にリポソームという言葉は、ネット検索をすればいろいろ出てくるようになっていきますよね。例えば化粧品のほうでかなり広まってきているので、最近はリポソームの研究をしていますという話をしても、何それって言われることはなくなってきているようです。ただ、それもやっぱり業界によるとは思いますけど。そういう学生さんには、医療応用という観点での可能性でやっぱりモチベーションを持ってもらったらいいなとは思っています。

私のところでは直接生物をつかう研究はできないので、共同研究先でいろいろ学ばせてもらうという機会を可能な限りこちらで提供して頑張ってもらえるようにはしています。だから、動物実験をやりたいになったら、そのときは相談してくださいと伝えています。

それはそれとしても、今やっている研究テーマでやってみようと学生さんも思ってもらっているかなと、信じています。

見上： 後ほど応用の話にも行きたいんですが、その前に、分子ロボットの研究は、今、富士山に例えると何合目ぐらいまで来ているんでしょうか。到達したいところを10合目として、どれくらいのところまで来ているという感覚ですか。

野村： これは一番苦手の質問ですね。さっきのお話とも関連して、機械系の他のラボの修論発表会とかを聞いていると、みなさんイントロで、社会的にこういう問題がある、これを解決するにはこういうのが必要で、俺はここをやるという形の書き方が多いんです。僕はそうっていないんですよ。登る山を定めない、シーズ型っていうんですかね。ニーズ型が機械系とかでは一般的にやられているんだけど、シーズ型の、こういうのができたら面白いよねとか、何かにつながりそうだよねというロマン駆動型だと思うので、多分それぞれの山があるんじゃないかなと。

そういう意味で、あえて分子ロボット全体の山じゃなくて、自分の目標としているところの山からいくと、2 合目ぐらいかなという気がしています。僕は万物とお話ができるようになるという辺りが 10 合目だと思っています。今、情報通信は 1、0 の電子の信号で光に乘せるぐらいの速度が出せるとして、電子回路と電子回路を結ぶならそれでも十分なのでしょう。そうではなくて、その先のいろんな生き物が、イルカとか猫とか、あとは無生物とかいっぱいいると思うんですが、そいつらとインタラクションしようとする、現物を使わなきゃいけない。だから、電子機器をくっ付けるだけでは駄目で、間に必ずインターフェースが必要で。そいつら何だか分からない万物と対話をするためには現物が必要で、その現物っていうのが何かというと分子なので。その部分をやってほしいな、やりたいなというのがあります。ではそこにたどり着けているかというところはまだ全然なのですが、リポソームとかをやっているとちょっとは近づけているのかなという気がするので、2 合目ぐらいというイメージですね。

見上： 分子ロボットと対話したいということではなく、分子ロボットを媒介として、万物とインタラクションするということでしょうか。

野村： はい、分子ロボットと対話できるのは基本で、その分子ロボットが何か他のものとの間をつないでくれるみたいな、そういうところなのかなと思っています。

松浦： 例えば分子ロボティクスのときに目標にしていたアメーバだとか、野村さんがよくプレゼンで出す白血球の動きとか、あれをゴールだとすると、あるいは別の見方をしたときに、何か実用化されるような製品につながったとか、そういうのをゴールというふうに考えると、僕は今の技術というのはまだ富士山の樹海ぐらいじゃないかなと思います。まだ混沌としている状態で、いろいろ皆さんが模索している状態だと思います。

齊藤： 僕の中での分子ロボットのイメージって、本当に一から組み上げたシステムで、細胞みたいなものと区別がつかんようなものができるみたいなことと、あとは自分の中でいつも、「人の細胞というのは大体 200 種類ぐらいあって、60 兆個の細胞がヒトにはあってすごいですよね」みたいな話をするとき、なんで 200 種類なのみたいな。だから、人工細胞というのができるようになったら、その種類というのは何種類でも、目的に応じていろんなことができる細胞がつかれる時代になるんじゃないかと思っています。

今って多分、医療用でも、例えばがん細胞を攻撃する CAR-T 細胞をつくろうとか、何か iPS 細胞から医療に役立つ細胞をつくろうといった、それぞれ今ある細胞をつくるのにみんな一生懸命なんですけど、それがもう本当に目的に応じていろんな機能を持った人工細胞をつくれるような時代になるんじゃないかと思っています。

そういうのを頂上としたら、僕も野村さんが言うから本当に思っていたんですが、同じく2合目ぐらいかなという印象を持っていますので、残りの部分がどうやれば埋まるかというのをちょっと考えていきたいなと思っています。

豊田： 野村先生がおっしゃるとおりで、各先生にやっぱり富士山があるんだと思ひまして、私の場合はやっぱり生命起源にどうしても寄ってしまいます。

最近、生物普遍性連携研究機構⁹という研究機関が立ち上がってしまひて。宇宙にいる生命の存在から人工的な生命の存在までを一括して総括できるような新しい普遍的な法則を探りましようという研究機構です。

金子邦彦先生が今年度機構長を務めていらっしゃるんですけども、生物の普遍性という言葉は小松左京さんの『継ぐのは誰か？』という小説の中に出てくる研究者の専門分野として掲げられているんですね。そういうのを受けて考えたときに、こういう化学の面からやれることの先って何かなという、やっぱり水に頼らない生物の姿とは何かなというふうに思ひて。水に限らないんですけど、溶媒に限らず、生命らしいものが誕生しているという状況をどう考えるか。そこに答えを出せるか、出してみせようという。

それを思ひると、SF作家の藤崎慎吾先生¹⁰と議論している中で、いつか地球はなくなっちゃうよねと。いつかですよ、本当の先に。そうしたときに、生物が地球型だけだとすると、次の地球型惑星と交信をしておくか、地球に近いものをつくるか、地球じゃない環境でも生物でいられるようになる、生命現象を継続できるようになるかという、3択しかないかなと思ひてしまひて。その中で化学でできるのは最後かなと思ひています。それはどういうことかという、水とか地球資源に頼らない生物の可能性を先に化学者がいろいろとトライしておくというようなことは、一つの考え方になるかなと思ひています。

で、そんなことを言ったら、富士山なんていったらもう歩けていないぐらいの領域だ

9 2016年に東京大学に設立された研究・教育組織。Webサイトは <http://park.itsc.u-tokyo.ac.jp/UBI/index.html>

10 SF作家であり、ノンフィクションライターとしても活躍。2019年に『我々は生命を作れるのか』（講談社ブルーバックス）を出版したほか、学術変革領域研究（A）「分子サイバネティクスー化学の力によるミニマル人工脳の構築」と連携し、「脳に迫る『化学人工知能』の夜明け」を執筆。

なと思っていますんで、樹海にも到達できていませんけれども（笑）。

見上： なるほど、皆さん研究者の性（さが）なんですかね、あまり上のほうにはいたくないというのを感じました。自分がやっていることは先が長いんだという、それがある意味ではモチベーションであり、面白さでもあるのかなという気もしました。ありがとうございます。

<分子ロボットの応用>

見上： 研究の中で応用をどれくらい重要だと思っていらっしゃるかはさまざまにあると思うんですけど、一般的にはやはり何の役に立つのかを聞かれることも多いんじゃないかと思うんです。医療応用が一番出口として考えられているところかなと思うんですが、医療応用以外でもこんなことに使えるんじゃないのということがあればお伺いしたいんですが、いかがでしょうか。

野村： 医療応用以外で、ですね。分子ロボットって、細胞と分子の間ぐらいのスケールと複雑さのものだと思っています。そこら辺でできることという話になると、さっきお話したのとちょっとかぶるんですが、電子の世界と、それと実体の世界との間のインターフェースの部分をやってくれるのが、多分、知能化された分子システム・分子ロボットみたいなものになるんじゃないかなと考えています。例えば、BMI は電気信号から電気信号ですが、今は電子信号と分子信号をつなぐ部分が足りていないという状況です。そこら辺を分子ロボットとか、分子サイバネティクスとか、そういうところで埋めたい。まだ僕は自分の人格や記憶をデジタル化できていない状態なので、実体を持って生まれてきて死んでいく間に他のあらゆるものとアクセスできるようにしようと思ったら、インターネットオブシングスってよく言いますけれども、あれって電子機器との接続だけなんで、それ以外のもの、豊かな自然とかと直接つながれるようになったら面白いなという、そんな感覚を持っています。医療応用じゃないところで最有力といったら、それかなと思います。

見上： センシングみたいなところが入り口になるんですかね。

野村： はい、センシングは当たり前で、プロセッシングもやらなきゃいけなくて。それからあとの、世界に働きかけるアクチュエーションというも。どこに入ってくるかは分からないんですが、耐久性も上らなきゃいけないですし。どれだけ放ったらかしておいても当初のもくろみどおりに動き続けてくれるかというところがすごく大事だと思っています。それは、医療用でも使われると思うんですけれども、そういうインターフェースとして

働くときも、少なくとも3カ月は保たれてほしいとか、そういう部分は効いてくると思うので。センシング以外の部分もすごく大事だとは思っています。

豊田： 僕のほうで分子サイバネの描く未来的な課題がどんなことがあるかといったときの話で、今、野村さんがおっしゃっていたのは自然と電子的な世界とをつないであげるというセンシングだったと思うんですけども、僕もそこはぜひやりたいと思ったりしています。ただ、もう一つは、医療まではいかなくても、私たちの生活とか生物の持っている、病気でなくても機能拡張できるようにしてあげる、その一つが多分、電子世界とのつながり方かなというふうに思っています。

もう一つというか、パワードスーツとかああいったものは、メカニカルなところではもちろん実現されています。ただ、生活レベルでの機能向上とかそういったレベルのことなんです。それこそ例えば生物組織の透明化技術が最近発展していますけれども、あれは生きたまま透明化はできないんですね。だけど、生きたまま透明化したほうが面白いですよ。変な言い方ですけど。

それは、要するにわれわれの体の屈折率や透過率の話なんです。透明マントをつくっていらっしゃる稲見昌彦先生という方がいらっしゃいます。例えば分子ロボの行き着く、すごく先の話ですけど、そういう物性変化が可能な機能を持つ分子ロボによって生物がもともと持ち得ないような物性を付与できるような、そういう取り組み方があっていいのかなと思っています。

それは多分、松浦先生が生物を超えとおっしゃっていたことにもちょっと該当するかなと思ったんですけど。松浦先生、いかがですか。

松浦： 医療応用以外でというのはなかなか思い付かないです。

野村： すみません、医療応用以外でというので、一番大事なのを言い忘れていました。生命をつくるということですね。

齊藤： 分子ロボットの最初のほうの議論で、環境浄化に役立つ分子ロボットとかも議論していませんでしたっけ。やっぱり環境問題って絶対に今後大事になるから、そういう環境問題に対応する分子ロボットでセンシングして、目的の出力を出すとか。で、変えていくというのはありなのかなという気はしています。

見上： では応用というと、やはり医療応用が一番核になりそうなイメージでしょうか？

松浦： よく思い付きますし、それが分かりやすいというものもあると思います。

見上： 確かにメリットを明確に出しやすいということと、どんな技術にせよ多少のリスクや不確実性を伴うと思うんですけど、医療分野ではそのメリットが大きければ大きいほど、そこら辺は目をつむって実用化に動き出すという傾向もあるので。確かに医療が一つの突破口になることが多いのかなという気はします。

野村： それでいくと、それこそ一昨年から、学生で大騒ぎしていたんですけど、公開されたファイザーのコロナワクチンを見たときに、これって分子ロボじゃんという話になって。リボソームの中に合成したメッセンジャーRNAが入っていて。それを何十億の普通の人たちが、喜んでか半分不安げには分からないですけど、それを体に入れて、リボソームを勝手に借りて目的のタンパク質を体内で合成させるイベントをやっていますので。これはもう分子ロボとか分子スケールでの人体改造、分子の工作の世界はもう現実だよねというのが身近になったというのがこの2年ぐらいだと思います。

齊藤： そうですね。ちょっと自分のリボソームが使われていると思うとドキドキします(笑)。

僕も思うのは、今、京大でも本庶佑先生がノーベル賞を取られて免疫の療法がすごい注目されているけど、やっぱり既存の免疫細胞は疲弊しちゃう問題とか、目的の腫瘍にいつて——これはがん治療の例なんですけど——なんか固形がんには作用しにくいとか、そういうのはあるみたいなんです。何か分子ロボットの技術で、さっき言ったスーパー細胞みたいなものがつくれるかもしれないじゃないですか。いろんなアプローチで。それは、既存の細胞に混ぜ込むのでも、完全にもうリボソーム的な完全な人工物でも、どちらでもアプローチはいいと思うんですけど。そういうのはやっぱり重要な課題としてあるし、いろんな医療応用の可能性は、既存の生物にこだわらなくていいという利点があると思うのでいいと思いますね。

あと個人的には、今、リプログラミングというのはiPS細胞研究所でもRNAを使ってやっているんですが、やっぱり細胞って運命変換というのを、適したRNAを入れたらちゃんと運命変換できそうだというのが見えていて。

今、僕らがやっているのは、そのiPS細胞をさらに初期化した細胞というのをRNAでつくっているんですけど、そういを見てみると、やっぱりRNA分子の力というのがある気がします。今までRNAってしょぼいなといろんな人に言われ続けてきたんですが、しょぼくないよというデータが出つつあるので。

リプログラミングすると細胞は若返るので、老化とかの制御とかにもつながる可能性があるんですよね。だから、そういった老化制御の分子ロボットとかもできたら面白いんじゃないかなという気がしていて。

松浦： 医療応用関係で言っていくと、その薬を届けるというのは以前から言われていることなのですが、センシングして、なおかつ患部に、特定の部位に結合して中に侵入して、なおかつ中で増えてとかということとか、互いに通信し合って協力して仕事をしたりとかというところまでできるといいなと思っています。

やっぱりいろいろそういうのを考えると、ウイルスってすごいなって最近思うんですよ。最近ちょっと僕、ウイルス若手ネットワークとかで講演をさせてもらって、ウイルスの人たちと話をしていたら、そんなウイルスの世界では普通ですよみたいな感じで言われるんで。ああ、やっぱりこの人たちはすごいことをやっているんだなと思っていたんですけども。

そういうのを何か人工的にできないかなと思っているんですね。細胞内の特定のところに侵入して行って、中で複製して、なおかつあと出芽まで、一連のサイクルを人工物で全部できるみたいなやつができると楽しいなと思っているんですが。きっと倫理的はあまりよくないんじゃないかなとは思っていますけれども。

見上： 例えば何の機能を持たせるのかとか、あるいは、先ほどのウイルスについての機構を解明するとか、そういうことだとまた、同じ研究であっても違った見方で捉えてもらえるということはあると思うので。そこら辺も恐らく考えるべきところなのかなというふうには思います。

今の一連のお話と関係して、分子ロボットの研究をする上で、増えるということがどれくらい重要なものだと考えていらっしゃるのか伺いたいんですがいかがでしょうか。今の松浦先生のお話でも、自己増殖というか、ウイルスのようなシステムで体内で増えるということがありましたし、細胞のようなものをつくる時、あるいは生命をつくるというときの一つの考え方として、増えるということに力点を置く研究者の方もいらっしゃると思うんです。

松浦： 増えるといいという点は、先ほど豊田さんのお話で、廃棄物が出てごみがたくさん増えていくという話がありましたけれども、そういうのをできるだけなくしていくとか、エコな方法というのを考えると、究極的にはほんの少量入力しただけで出力がすごいたくさん増幅していくという系で、なおかつごみは出ないというのがいいんじゃないかなと思っています。やっぱりそういう仕組みをつくるためには、複製して増えるというのは必要な仕組みなんじゃないかなというふうに思っています。

野村： 増えるというのはものすごく魅力的だと思っています。増えるというところに向き合えないと、次の人類の課題には太刀打ちできないだろうなと思っています。というのは、僕

らの周りに増えるものがいっぱいあって、大体増えるものが問題を引き起こしているからで。

だからそういう意味で、制御したい対象として増えるという現象はめちゃくちゃ魅力的で、すごく難しくて。どうやったら増えられるか、どうやったらそれをコントロールできるかというところに真正面から向き合わないと。向き合うことで、生き物も理解できるし、そして僕らが次に使えることになる技術というのもめちゃくちゃ発展するだろうなと思っています。身近では納豆やヨーグルトは増えて嬉しくて怖くない。遠くなら例えば惑星開発、テラフォーミングであるとか、べらぼうな数が必要ですよね。ウイルスに対して数で負けているというときに、じゃあどうやって戦うのか。もっとたくさんワクチンを打てばいいのかっていうと、やっぱり副作用とかが起こっちゃったりするので。これはもうその場で相手と同等にまで数を増やして戦わせるというのが筋だろうなと思います。

松浦： ワクチンが増えるといいですね。ちょっと打っただけで中で増えてくれたらすごいいいなと思っているんですけども。

齊藤： 僕もやっぱり増えるシステムをつくるというのは大事だと思っていて。あと、分子ロボット自体も環境に応じて進化していく必要があると思うので。進化と複製って結構リンクしているところもあると思うので、そういう意味でもやっぱりどんどん目的に応じて最適解を出す分子ロボットというのをつくるためには、増えるシステムというのは必要になると思います。全てがそうではないかもしれないんですけども、やっぱりそういう自己複製して進化適応できる分子ロボットというのには挑戦していく必要があるかなと思っています。

レプリコンの RNA でワクチンをつくっているグループもあって。レプリコンの RNA って自己複製、増殖するんで。それは今後の次世代ワクチンとして、そういう自己増殖 RNA をつくるというのをやっているベンチャーとかもあります。そういう RNA というのは目的に応じて使い分けるのが大事ですね。メッセンジャーRNA は増えないというのはメリットでもあるんですけども。何か悪さをせえへんという。ただ、そうやってすごい持続性を高めたいときには増える RNA というのも必要だと思うんで。分子ロボットもその目的に応じて使い分けていく。でも、絶対に増えるシステムというのは必要になってくるんじゃないかなという気がしています。

豊田： 私も増える研究をずっとやっていきたいし、これからも続けていこうと思っている課題になっています。生体内で増えるというのは、最初は考えていなかったんですね。でも、増えたら面白いだろうなとか。あとは膜のほうで増やす機構で、例えば医療用って考え

たときには、細胞膜修復の絆創膏みたいな感覚で、脂質膜を増産させるような反応がうまく細胞膜破壊によって引き起こされるような病気とかに対応させられるかな、というのはちょっと考えていたところでした。

ただそのときに、できるだけ生体に悪影響を及ぼしにくいものでどうつくるかというのが、具体的に考えていったときにまだまだ全然、研究例なり、バックグラウンドになる知識背景も足りないのも、そこはいきなりは研究できないなと思っているんですけど。

そうやって長期的に考えたときに、どうやって生体の今あるシステムと——これはエコシステムとも関わるんですけども——増えるものが協調できるかなというのが、目下すごく面白いし、重要な課題だなと思っています。リソースの奪い合いになっちゃったら、やっぱり生体側のほうが疲弊させられてしまうので。やっぱり分子ロボは分子で攻めるので、全く独立した材料では難しいなと思っているんですけども。どこは共有化し、どこはそれぞれ別のシステムで動かして、というところの考え方は、今後も学んでいったり、解明していかなくちゃいけないことになるかなと思っています。

あともう1個、私がこの「増える」ということに関してすごく気にしていることがあります。それは、分子が集まる過程とバラバラになる過程というのは、基本的には可逆過程といって、集まるのと同じような過程が逆向きになれば、分子はバラバラにもなれる。そこをうまく制御してあげるということになるんですが、大概可逆過程だといわれています。

ところが生物は、一部一部は可逆過程なんですけど、細胞なり、ウイルスもちょっとどうか分かんないんですが、基本的には非可逆といって、逆はない。あったとしたら、相当いろんな制約を取っ払って逆も起こり得るということになっているようなんです。

だから、その分裂現象を見たときに、化学で通常考える「増える」はちぎれる感じになるんですけども、それは同時に逆過程としてくっついて元に戻るという過程があるはずなんです。そこは制御できそうだなと思っています。ただ、生物がやっているのはやっぱり増える過程も不可逆なんじゃないかなと思っています。そこは結構、化学の純粋な興味としても重要で、できるとしたらどんな分子たちが寄り集まっていったときに不可逆な分裂現象になるのかなというのは興味を持っています。

見上： 先ほど齊藤先生のお話の中で進化の話も出てきたと思うんですが、増えるということと変わるということは、分子ロボットの一つの先のステップとして掲げられることも多いと思うんです。そこに制御というのがどう関わってくるかという、バランスが周りから見ると気になるころだと思っています。必ずしも望んだように変わってくれなかったり、

増えるのが止まらなくなってしまうということになると、それは問題じゃないかなるわけですね。だからこそ、やはり制御と一体ということが重要なのかなと思うんです。

齊藤： 多分それは生物の問題としても結構大事なことで。やっぱり何か体の中にもものを入れて増幅してきたら、それこそさっきの免疫細胞でもそうなんですが、やっぱりそれは止めないといけないという問題が生じるじゃないですか。多分今おっしゃられていることに近いと思うんですが。そういうときはやはりシステムに何か、例えばタンパク質とか核酸がある一定以上の濃度になると、それを threshold にしてそれを——キルスイッチみたいな言い方をするんですけども——そのシステムを止めるとか、そういうのは組み込めると思うんですね。

だから、分子ロボットも無秩序にどんどん増殖していくだけではなくて、多分ある閾値を超えたり、あるタイムスケールを超えたら増殖停止するとか、もう死滅するとか、何か違うものに変えるとか、例えば体から出るような仕組みにするとか。それは制御のところでもいろいろやりようがあると思うので。DNA プログラミングの技術とかもううまく活用すれば、そういうシステムを組み込んだ分子ロボットというのはできてくるんじゃないかなという印象を持っています。

野村： ちょうど齊藤先生と一緒に基盤 S のプロジェクトで「オートマター」というのをやっています。そこでは、まさに今ご提示いただいたような問題をやろうという話をしています。リボソームですね。細胞の外でつくれない最後の分子だといわれている。先ほど齊藤さんが「神の分子だ」と言われましたけど、この、タンパク質の翻訳を行う分子を自発的につくれるようにしてやれば、基本的にはタンパク合成が行えるセットというのが複製されていくよねという。理研の清水さんという方が、もうあと一歩なんですけれども、その一歩の大きさがわかったかな、というところまでわれわれは来ていると踏んでいるんです。それを、できる前から分子的に、それから外部からいろんな刺激でもって制御するというのを、車輪の両輪みたいな形で研究していこうという話をしています。要は、いつでもキルスイッチがあっていつでも止められるようにする。内側の分子の側で止められなかったら外側から止められるし、外側から止めなくても、分子で自在に制御できるようになるんだったら、それもいいでしょうという話で。内面と外面の両方から制御できるような研究を、自己複製の研究と一緒にやっていくというのがすごく重要なことだと思っています。

< 人文社会科学との連携 >

河村： 社会との接点とか応用に微妙に関連しつつ、ちょっと離れた問いかもしれないんですけど、私たちみたいな社会学者とか人文学者にどういう役割を期待するのかなという辺りを、最後にちょっとだけお聞きできますか。

僕の記憶なんですが、2019 年の分子ロボット年次大会の時に野村先生がいらっしゃって、（当時作っていた）倫理綱領というのは分かるんだけど、今実際にやっている研究の段階としては塩とかを入れたらすぐ壊れちゃうようなものなので、今から規制の話とかをされるのはちょっとなんかピンとこないんだよねみたいなことを言っていた記憶があるんですね。

なので逆に、もし人文社会科学に何か期待することがあれば、せっかくなので最後に聞いておきたいと思った次第です。

野村： 確かに当時小学生だったおいっ子に「人工細胞ってどうやったら殺せる？」って聞かれて、せっけんに弱いとか、塩で死ぬとか答えたら、「なーんだ全然弱いじゃん！」と笑われて、それ以降状況は変わっていないので、あんまり怖くないという話をした覚えがあります。2019 年でしたか。それで、そんな急がんでもええんちゃうという話はしたと思うんです。

ただ一方で、多分 2019 年の秋かな。その直後ぐらいに、割と違う分野の研究会に呼ばれて。水の研究会かな、呼ばれてしゃべったときに、海外の研究者から結構な勢いで詰められまして。「おまえ、それ本当にいいと思っているのか」みたいな感じですよ。

何かというと、人にもよるんだと思うんですけれども、神がつくった生物以外に増えるようなものをつくり出していいのかみたいな。それを軽々しくやっていいのかって思う人たちというのは絶対にいるので。自己増殖なんかもよしとしない文化というのも必ずあって。それは多様性の世界なので。それでも、そういう人たちを切り捨てるとか、なかったことにして研究を進めるというのはできないなとそのとき痛切に思いました。相いれない人というのは絶対いるとは思いますが、対話しつつ、情報を交換しつつ物事を進めていくというのは、研究者としてもものすごく大事なというのが今の僕のスタンスです。

ですので、こういうのを怖がっている人がいるとか、あとは、何でもかんでも怖いという人でも、これくらいだったらまあいいだろうなと思えるような情報を出したり、やっぱりここは怖いねというものでも情報交換できるような場が必要だと思っていますの

で、そういった対話のチャンネルとしてすごく期待しているというところです。

松浦： 私も野村さんと割と同意見で、やっぱりいろんな印象を持たれる一般の方がどうしてもいらっちゃって。分子ロボットって聞くと、すごい怖いとかそういう印象を持つ人は一定数いるんだろうなとは思っているんです。そのときに、やっぱりうまく伝えるということはすごく大事だと思っています。

1つの分子の集合体であっても、たとえばウイルスのようなものであっても、表現の仕方によってはうまく一般の人にも伝えられるのかなと。いい印象で伝えられるのかなと思っているんですが、そのときに僕らこういう科学者は表現力が乏しかったりとか、うまく伝えられないというところがあるかもしれないので。そういうときに、こういうふうに伝えるといいと思いますよとか、そういうのを何か書くアドバイスを頂けるとか、そういうところで人文科学系の方と協力できるとうれしいなという気持ちは持っています。

齊藤： ちょっと前に Twitter に「僕、お気に入りのメッセージャーを体内に打ちました」って書いて、「今、僕のリボソームが頑張っています」って言ったら、結構「いいね」ボタンを押してくれたんですけど、コメントに「みんなが科学者を応援しているとは限らないですよ」というコメントをくれた人もいて。

そういうことだと思うんですね。自分はすごいメッセージャーRNA が好きで、こういう研究をしたいから、今、リボソームはすげえよみたいなことを言いたいから言ったら、やっぱりそうやって、「何言ってるの、この人」って思う人というも一定数いると。なので、研究を進めるときには絶対に社会の人と対話しながら、理解もしてもらって、問題のあるところを自分でも理解しつつ進める必要があると思うので、そこはやっぱり研究者だけだと欠けてしまうところだと思うんです。

そういう意味で、例えばこの分子ロボットも、今日もそうなんですけど、人文科学系の方たちと僕ら研究をやっている人でみんなで未来を一緒に描くというか、こういう未来が今後広がる可能性があって、そのときにやっぱりこういうところはケアしないといけないよねとか。僕はさっきウイルスの研究は絶対するべきだと言ったんですけども、でも、そのときには、こういうアプローチですべきだという話にはなるかなと。なので、一緒に議論しながら進めることは大事だと思います。

多分、人文科学をやられている方も、ただ規制をするというのが本意ではないと思うんです。規制をするために関わられているわけではないのに、なんかそういう研究をやっている人からは規制されそうで嫌だなと思われるからどうしよう、みたいなジレンマ

も多分あると思うんですが。そこを、こういう未来の世界と一緒に築くために、ケアするところは注意しながら、でもこういう研究は進めようねというような形の対話ができるといいのかなと思います。

実際は難しいと思うんですよ、こうやって口では言っても。うちの研究所にも上廣部門という倫理の部門があって、そういうことを議論とかしています。ただ同じ空間にいたとしても、その議論がすごいしっかりできるかというとなかなか難しい場合も多いので、やっぱり定期的に会って飲みながら話すのでもいいと思うんですが、そういう話しあえる場がたくさんあるほうがいいんじゃないかなと思います。ですので、あまり研究者の人から煙たがられているんじゃないかとか思わずに、今日みたいな機会もどんどん積極的に利用していただいて。僕らもやっぱりそれは必要だと思っているので。自分たちの世界に閉じていると研究者もよくないと思うので、そういうふうにしていただきたいと思います。

豊田： 人文社会の研究者の皆さんから気付きを得たいというのは、やっぱり自然科学者の中でもそういう方もいれば、そうじゃない方もいると思うんですね。耳をふさぎたいという方もいらっしゃる、いや、どんどんと耳を大きくして聞いていきたいという方もいらっしゃると思われます。

議論を続けていく中でちょっとずつ社会の意義を認識することは、多分研究者の方たちは気付いてはいると思うんです。だけど、その気付いた後に、自分の研究とうまく歯車が合っていくようにする――先ほどの科学コミュニケーションでどうやって伝えるべきかというようなところでいい連携をしたいという気持ちは、私も本当に思います。で、その自然科学の研究を進めていくに当たって、なんか足を引っ張られたら嫌だなということにプラスして、より一歩前進していけるような環境づくりを、気付きから実践にさせていただけるというのは、自然科学者はそこまでいろいろ動き回れないので、幅広く歴史も含めて、時間軸も含めて、例えば、こういうことなら今の先生の立ち位置はこんな感じの印象が持たれるかもしれませんねとか、こういうことが過去行われてきましたよとか、そういったところを、よりちょっとミクロな立場に寄り添っていただいて並走していただけたらうれしいなと。

どうしてもやっぱりマクロになると、先生の研究はこういう感じですよと言われて、「いやそうなんだけれども、ここにロマンを感じてほしいな」という中で one of them で終わってしまうことが多いので。そういうところは、もっとより自然科学者のミクロな、そういう個々の活動に並走をしていただけると非常にうれしいなと思っていますところなんです。

見上： ありがとうございます。やっぱり人文社会科学の側からすると、まず最初に理解するのが難しいんですね。理解するところから入ろうとしても、同じようには絶対に理解できないんで、それができないとうまく付き合えないんじゃないかなという危惧も持っている部分もどうしてもあるので。そこら辺をうまく乗り越えていくというのがお互いに歩み寄る形でできると理想かなというふうに思っています。

野村： すみません、完璧に蛇足かもしれないんですけども、今までのこの座談会で、われわれから人文社会の人に期待することみたいな話だったと思うんですが、逆に、人文社会科学の人たちが、こういう実験をやってくると人文社会的に面白いのになというような提案とかがあったりしたら、ちょっと伺いたいなと思って。

こういう生命体もどきみたいなのが社会に提示されたら、これは考察のしがいがあるぞとか、何らかあるじゃないですか。いつも人文社会系の方々に並走していただくとか、こっちが主流でっせみたいな感じで、なんかちょっと物質実験科学のこちら側から注文を付けているのがいつも若干心苦しいなと思っているので。ちょっと人文社会科学の方の研究者魂というか、傲慢さみたいなのご披露していただけると。

見上： これは全くもって私個人の感覚なんですけど、研究の細かい内容って、社会との接点をつくっていくときにだんだん薄まってしまう気がするんです。われわれが理解しようとするときにも薄まるし、それを社会に伝えようとするときにもやっぱり薄まってしまっ。それが、豊田先生がミクロなことを見て欲しいとおっしゃっていたこととつながってくるんだと思うんですけど。

なので、私の感覚だと、極端なパターンがよくて。何が極端かという、科学的な面白さと倫理的問題意識が両方明確にそこに存在しているような事例という意味です。それはどう評価されるんだろうと。でも、そういう可能性を分子ロボットも、人工細胞も、秘めていると思っていて。本当に生命をつくっちゃうんじゃないかという印象を受ける人もいるし、でも一方では、そんなこと言ってもできる範囲は限られているからねと思っている人もいるだろうし、すごい両極端にあると思うんです。そこら辺を刺激するような状況というのはとても興味があります。

野村： 早稲田大学の岩崎秀雄さんの生命美学というか、生き物で芸術をやるみたいなのも結構近いものがあって、分野が変わると面白いなと思いました。

見上： アートでやるというのは一つの方法だと思うんです。ただそれは誰もができる方法ではないので。

河村： 見上さんが今おっしゃったように、例えばここ 20 年とか、さらに 2010 年代の 10 年で、ロボット倫理学って倫理学の中でもすごく前進したんですよ。それはやっぱり、ロボット技術が発展して、これってモノだけど、ちょっとヒトと同じように道徳的配慮をしないとイケないのかなという意識が生まれたことと関係していると思っています。

既存の道徳体系って、中間的で都合が悪いものができる、どうしたらいいのかというのを人文学者は考えなきゃいけないので。でも、社会的なインパクトがあるというのはそういうことだと思うので。そういう都合の悪いものをつくってもらえると面白いのかなと私も思うし、自己増殖機能を付けるという話も、それが生き物なのか、そうじゃないのかって、かなり難しい境界的なものができて、それをどう考えるかというのは考察しがいがありそうだなという印象は強く受けました。

<分子ロボットと細胞>

見上： 最後にもう 1 つだけ質問させて下さい。私自身は完全な分子ロボットって細胞のことなのかなと思ったことがあるんですが、先生方にとって細胞は分子ロボットなのか、そして、分子ロボットが目指す目標のような存在と言えるのかどうか、お聞かせいただけますか。

野村： 目標ではあるんですけども、発展的に分かれていくものだと思っています。

というのは、普通のロボットもそうなんですが、じゃあロボットは人間をつくることなのかというと、そうではなくて。例えば人間のパーツをバラバラにして、それをもう一回組み立てて人間をつくってそれを労働力にするのかというと、そうではないですね。だから、ロボットの究極の形は人間とは違うんだと思います。

同じ理由で、細胞を模倣してつくっていくんだけど、細胞にできないことをやらせるとか、細胞では絶対に働けない温度レンジで、太陽の表面でも大丈夫とか、そういう機能を持たせられる可能性があるところに人工物の魅力というか、将来性があると思っているので。だから、必ずしも同じだとは思っていないです。

齊藤： 僕はリボソームが分子ロボットの一つの形態だと思っています。そのリボソームを持っている細胞というのは、やっぱりそういうすごい分子ロボットの集合体だと思っています。

さっき野村さんが言われたことにもつながるんですけども、やっぱりでも僕らはそれを超えていないといけないという。これは松浦さんのモットーにもつながるんですけども。そういう意味で、細胞からいろんなことを真摯に学びつつ、でもやっぱり細胞

ではなし得ないようなシステム、例えば、遺伝暗号を全く別の仕組みでつくりとか、自己複製を違う分子機構でつくりとか、細胞ではなし得ないことができる「生命ライクなシステム」みたいなものをつかって初めて細胞を超えたと言えるんじゃないかなと思うので。

だから答えとしては、細胞というのは素晴らしいすごいものなんですけど、そこがゴールではなくて、僕らはそれをステップとして次のステップに行かないといけないというふうに思っています。

松浦： 全く同意見です。いいお手本ではあるけれども、僕は斜め上ぐらいを行きたいなという。すぐ上じゃなくて、斜め上ぐらいを目指したいと思います。

豊田： 私も同意見です。やっぱり細胞をそのままつくるっていても、平均的な細胞はこれだということも分からないですし、教科書に載っている細胞の図もあるモデル生物のとある一側面しか捉えていないというふうに考えると、今ある細胞のいろんな状態をそのままつくるということ自体、ちょっと私はまあできないだろうと。そういう意味で、私は生物としての細胞が完璧な存在というふうな感じでは捉えていなくて。

で、いろんなステートにあるような生物っぽいもの、細胞っぽいものも含めてつくって、そこから学ぶことをさらに、松浦先生がおっしゃるように、斜め上をいきたいなと。私の場合はそれが水を使わない生命体みたいな感じです。

見上： ありがとうございます。

ELSI NOTE No. 22

実施記録：座談会「分子ロボットの未来」

令和4年10月28日



大阪大学 社会技術共創研究センター
Research Center on Ethical, Legal and Social Issues

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-8
大阪大学吹田キャンパステクノアライアンス C 棟 6 階
TEL 06-6105-6084
<https://elsi.osaka-u.ac.jp>

