

Title	実施記録 : 座談会「分子ロボットの未来2」
Author(s)	見上, 公一; 河村, 賢; 和泉, 佳弥乃 他
Citation	ELSI NOTE. 2024, 42, p. 1-36
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/95836
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University



実施記録：座談会「分子 ロボットの未来2」

Authors

見上 公一	慶應義塾大学 理工学部 准教授 (2023年2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 (2023年2月現在)
和泉 佳弥乃	東京農工大学大学院 (2023年2月現在)
岩淵 祥璽	東北大学大学院 (2023年2月現在)
小島 知也	慶應義塾大学大学院 (2023年2月現在)
小塚 太資	慶應義塾大学大学院 (2023年2月現在)
佐藤 岳	慶應義塾大学大学院 (2023年2月現在)
丸山 智也	東京工業大学大学院 (2023年2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
座談会「分子ロボットの未来2」 (2023.2.2)	4
<研究のテーマとその魅力>	5
<分子ロボットについての理解>	9
<分子ロボットと生命の関係>	13
<分子ロボットの応用>	21
<他者とのコミュニケーション>	26
<分子ロボットのコミュニティ>	28
<生命の起源と生命の本質>	32
<最後に一言>	34

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 2」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）。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 PI クラスの研究者たちがこれからの研究の方向性や応用可能性をどのように考えているのかを議論したオンライン座談会「分子ロボットの未来」（2022 年 3 月）に引き続き、大学院生としてこの分野に関わっている若手研究者たちに、自分の目から見える分野の将来像や、そうした分野に参入するにあたってどのような点を魅力と感じ、どのような研究テーマをさらに追っていたと考えているのかをお互いに論じるための場所を設定した。座談会は 2023 年 2 月 2 日（水）の 16 時から 18 時まで 2 時間にわたり、慶應義塾大学日吉キャンパスにて行われた。

座談会開催概要

開催時間：2023 年 2 月 2 日水曜日 16:00 – 18:00

参加者：

和泉 佳弥乃（いずみ かやの）	東京農工大学、参加大学院生
岩淵 祥璽（いわぶち しょうじ）	東北大学、参加大学院生
小島 知也（こじま ともや）	慶應義塾大学、参加大学院生
小塚 太資（こつか たいし）	慶應義塾大学、参加大学院生
佐藤 岳（さとう たく）	慶應義塾大学、参加大学院生
丸山 智也（まるやま ともや）	東京工業大学、参加大学院生
河村 賢（かわむら けん）	大阪大学 社会技術共創研究センター 特任助教
見上 公一（みかみ こういち）	慶應義塾大学 理工学部 准教授

座談会「分子ロボットの未来 2」 (2023.2.2)

見上： それでは座談会を始めたいと思います。司会をさせて頂く慶應義塾大学の見上です。よろしく申し上げます。まず自己紹介をしてもらおうと思います。所属とお名前、簡単に研究内容についても教えてください。

岩淵： 初めまして。東北大学工学研究科の野村研究室から来ました、岩淵祥璽と申します。研究内容としましては、DNA ナノ構造を用いて細胞膜を経由した分子信号伝達を行っています。よろしく申し上げます。

小島： 慶應義塾大学大学院理工学研究科の小島と申します。研究内容としましては、細胞膜を模したものとして袋状構造体のベシクルと呼ばれる人工細胞を研究対象としており、今まではベシクル一つをターゲットにして研究が進められてきていました。しかし、実際の私たちの体を考えますと、細胞同士がたくさん集まって組織を成し、その組織全体で心臓の拍動や筋肉の弛緩収縮といった機能が発現しています。そのため、私は人工細胞として考えられるベシクルをたくさん集めて人工的な組織を作り、その組織で心臓の拍動などを模した動きが出せないかを研究しています。よろしく申し上げます。

和泉： 東京農工大学大学院生命工学専攻の和泉佳弥乃と申します。よろしく申し上げます。私は先ほど小島さんがおっしゃったベシクルの形を、生体分子を用いて制御する研究をしています。本日はよろしく申し上げます。

小塚： 慶應義塾大学理工学研究科の小塚と申します。僕は、分子通信と呼ばれる細胞同士の通信手段について工学応用するための理論研究を行っています。

今まで細胞とか、分子ロボット単体の中身の構造や設計というのは行われてきたんですが、分子ロボットが集団で望みの振る舞いをするためには、互いに通信する必要があると。その時の特有の通信手段として、化学的な分子の拡散によって相互作用する分子通信というのがキーポイントになってきます。そのような拡散を利用した分子通信を工学的に応用しようとした時にどのように設計すればいいかということを実験的に研究しています。よろしく申し上げます。

佐藤： 慶應義塾大学理工学研究科の佐藤岳と申します。研究は、細胞は分子の集まりなのだから、その分子を集めれば細胞が作れるだろうという理念にのっとり、細胞を作るという研究をしています。中でも、生命の根幹になり得る、砂糖からエネルギーを取り出して、そのエネルギーでタンパク質を合成するという、この一連の過程を試験管内で再現

することを指して研究しています。よろしくお願いします。

丸山： 東工大生命理工学院の丸山智也と申します。僕は、DNA 分子から成る液滴状の構造体である、DNA 液滴と呼ばれる構造体を人工細胞の筐体として、その自己複製機能の実現に向けて研究を行っています。よろしくお願いします。

<研究のテーマとその魅力>

見上： ありがとうございます。それでは最初の質問ですが、何で今の研究をすることになったのか、研究テーマをどうやって決めてきたのかということについて、ちょっと振り返っていただけますか。

佐藤： 細かいテーマは指導教員から与えられたものなのですが、何でこの分野に進学したかというのには、幼い頃からの動機があるんです。小学生の頃にカブトムシを飼っていて、カブトムシが卵を産んで孵す継代というのがなかなかうまくいかなくて。それで、生命ってすごいチューニングされた環境じゃないと簡単に死んじゃうんだと漠然と思ったんですよね。

だけど、世界を見渡してみると、植物とか、動物とかには多様性があって。チューニングしないと生きられないはずの生命にこれだけの多様性があるのは不思議だなと思ったんです。それで、その多様性の背後にある生命の本質、つまり何を押さえれば生きていられるのかを知りたいと思って、細胞を作るという分野に進学して今のテーマに辿り着きました。

見上： 他の方もぜひ何で今の研究をやることになったのか、ちょっとお話して頂けますか。

小島： 私自身は、修士まではベシクルというものを扱っていませんでした。石けんなどに代表される界面活性剤の水溶液中に油の液滴を浮かばせると、それが動きだすという現象が知られています。私は、多数の油の液滴を使った時に、光照射することによって液滴同士が集まる現象や、集まった液滴がペアとなって動いていくといった現象を新たに発見しました。これは実際に魚や鳥の群れが集団となって動くという現象にも似ていると考えられます。

そのような集団的な挙動についての理解をより深められないか、と思いつつ別のテーマを考えていました。修士までで対象としていたのは生物の一個体同士が集団化した群れを模していましたが、生物についてより細かく考えてみると、細胞同士がたくさん集

まって集団的に振る舞うことで心臓の拍動などといった動きも出るんじゃないかと考えたんです。そこで、人工細胞を用いて、細胞が組織化してさらに動きを発現するまでの過程を人工的に再現できたら面白いなと思って始めたのが動機です。

丸山： 僕はもともと、学部まで分子生物学寄りの研究室にいて、生細胞とか、生細胞内のタンパク質を扱っていたんですが、研究をする中で生命の本質みたいなものに興味を持ち始めました。分子生物学分野の研究室では、ある一つの細胞の、ある一つのタンパク質だけに注目しているような研究が多いのですが、そうではなくて生命の本質を知る研究をするためには、生命を創るというアプローチで研究している研究室がいいではないかということで、今の研究室に入りました。

今やっているのは人工細胞の自己複製機能の実現ということで、生命の本質、何が生命を生命たらしめているかというのは、研究者の間でも意見が違うと思うんですけど、その中でも自己複製機能は特に重要だといわれています。なので、DNA分子の人工細胞の自己複製機能を実現することによって、生命の本質を探る研究したいと思ってこの研究を始めました。

見上： ありがとうございます。研究室が変わったというお話でしたが、学部から大学院にかけて研究室が変わったというのは、丸山さんだけですかね。

学部生の時に「生命を創る」とか、「細胞を創る」とかいう話って、すぐにピンと来るものでしたか。

和泉： 学部生の時には、「生命を創る、とは？」みたいな感じで、私の中では、全然イメージができませんでした。ただ、クローンとか、そういう研究の存在は知っていたので、すごく興味はありました。

小塚： 僕は皆さんとちょっと違って、もともと物理情報工学科というところの出身で、物理や工学を主に専攻していたんで、生物と関わるのが全くなかったんです。4年次の研究室選びの時に、分子ロボットとか、生物を制御するというコンセプトがちょっと面白いなと思って、今の研究室に入って生命を制御するといった方向に進みました。なので、生物をコントロールするといったことには、大学4年に入るまでは全く関わる事がなかったんで、本当に新しい世界でした。

岩淵： 今の小塚さんの話と僕も似てて、工学部の機械知能・航空工学科という、生命の「せ」の字もかすらない、そんなところがバックグラウンドなんです。ただ、研究室配属の時に、生体分子の素材として、ものをつくったり、細胞やそういう分子システムをつくる

みたいなところを見つけて。そもそも、生体分子を設計したり、デザインして何かをするっていうこと自体を、研究室配属の時に初めて知ったというレベルです。ただ、すごく精密に、例えば DNA オリガミ¹とかでも結構精密につくることができて、それって何かすごいなと、ちょっと漠然とはしてるんですけど、すごい面白そうな分野だなと思って、この領域に入ってきたっていう経緯があります。

見上： ありがとうございます。ちなみに皆さんは、最初から大学院に行って研究をしようって思っていたんでしょうか。

小塚： 僕は、修士までは行こうと考えてたんですけど、その後は就職するつもりだったんです。ただ、修士課程の時に留学して、行った先で結構ドクターの就職先とかも、道が広がってる印象を受けたので、もう少し研究しても面白そうだなと思ってから博士課程への進学を考えるようになりました。

丸山： 僕も同じで修士までは進もうと思ってたんですけど、博士に行くとは、全く思ってた。ただ、今やってる研究が面白くて、最後までやり通したいなっていうのがあって博士課程に進学しました。

佐藤： 僕は割と学部 1 年の時から博士に行きたいなと思っていて。もちろん学部 4 年とか、修士 2 年の時に周りの人を見て、就活と迷ったりしましたが、それでも 1 割ぐらい心が傾いただけで、ずっと博士に行きたいなと思っていました。

和泉： 私も佐藤さんと同じで、学部 1 年の時から博士に進学して研究者になりたいと思っていたのですが、今の研究室に配属されるまでは神経細胞に興味があって、今の研究分野は全く知りませんでした。ただ、すごく今の領域が面白いので、修士、博士と進んできました。

見上： 他の研究分野に進もうかなって悩んだことある人もいますか。

佐藤： さっき自己紹介では大層なことを言った気もするんですが、実は、いろんな研究を見た上で今のがいいなって思いましたね。結構物理も好きで、神経って物理的な側面からも理解されてて、その辺も面白いなと思ったし、やっぱり就活と悩んだ時期とかは、就職に有利そうな医薬品開発とかがんの研究とか、もっとヒトにフォーカスした研究もいい

¹ DNA が相補性を持ち、決まった核酸塩基同士が対になることを利用して、ナノ構造体を設計・作成する技術のこと。

など思ったんですけど。やっぱり最後はもともと思っていた分野に行き着きました。

小島： 私自身は、修士までは行こうと考えていました。修士1年の夏くらいに企業のインターンに参加して、企業研究員になるかも考えたんですけど、企業研究員の場合だと「何でそうなるのか」といったメカニズムにまで迫るってことがあまりないことに気がきました。私自身は、なぜ起きるのかまでしっかり突き詰めたいという気持ちがあり、博士に行くとことん追究できるアカデミアの研究者になりたいと思って、博士進学しました。

岩淵： 私も博士進学か就職かでちょっと悩んでたんです。修士までは行く、でも博士か就職かどうしようって悩んで。ただ、インターンが博士に行くことを決めた決定的な理由になりました。

小島さんとはちょっと理由は違うんですが、僕の行ったところでは、事前に綿密に打ち合わせをして、その上で実行して、全てを解決してから次に行こうみたいな感じだったんですね。もちろんいろいろ事前に考えたり考察したりするのも大事なんですけど、思い付いたことを何かすぐにパッとできるというところが、やっぱりアカデミックのほうで。いい意味で自由にいろいろできるというところが、研究するという上では自分に向いているのかなと思って、博士課程に行ったという経緯があります。

見上： ここまでの話でも色々出てきたと思うんですが、改めて研究の面白さ、特に今やっている研究の何を一番面白いと思ってるのかを聞かせてください。後輩から何か似たような研究をやろうか悩んでるなんて相談を受けた時に、何を研究をお薦めする理由として挙げられるかを想像してみてください。

和泉： 後輩にお薦めしたいポイントとしては、世界でまだ、恐らくは誰も知らないことを顕微鏡一つで知ることができるというところなんです。新しい現象とか、研究の中で何を変えたらどんな現象を起こすかっていうのは、まだ恐らくは誰も知らないんで、それを観察できた時のうれしさや楽しさが一番の魅力だと思っています。

見上： 他の人はどうですか。みんな黙ってると、あんまりお薦めできないんじゃないかという雰囲気になってしまうので。

小島： お薦めのポイントとしては、やはり心臓が自律的に動くような生き物っぽい動きを自分で創り出す面白さですかね。

小塚： 僕の場合は、単純に分子ロボットとかそういったものにすごく可能性があると感じています。体内での薬剤の標的輸送とかそういった医療面でも、まだまだ難しさはあるんですけど、かなり応用性が高く、面白いものだと思います。僕の場合にはその理論研究

にあたるんですけど、まだまだそこは未開拓なところも多いので、自分で切り開いてくっていうところに面白さをすごく感じてます。

佐藤： 研究という行為そのものの面白さで言ったら、やっぱり仮説と検証のサイクルを回すことが面白いと思っていて。あるデータを受けて、次の仮説を立てて、また実験をするという作業を繰り返すのは、ずっとワクワクしていただけるから楽しいです。自分の分野のお薦めポイントなら、やっぱり夢がある。生命を創るっていうのは、まだ誰もしたことがなくて、誰もが、誰もがかは分からないけど、できたらすごいと思っていることで、それに対して仮説検証サイクルっていうワクワクする行為をずっとしていただけるというのは、もうすごい楽しいです。

岩淵： まず1つは、顕微鏡じゃないと見えないようなものを扱って、それをいろいろと設計して望みの機能をつくるのは難しいんだけど、それが何か思いどおりに動いた時のやった一みたいな、そういう感覚はものすごく大事にしています。もうそのために生きている、というのは盛りすぎかもしれませんが、うまく動いた時の喜びは今後忘れたくないなと思ってます。

もう1つは、この分野は何らかの生体分子を扱ってる、または研究対象としてるんですけど、それをデザインして人工的に使うという領域そのものが比較的新しくて。すごく広い可能性があって、われわれがまだ考えつかないようなことがいろいろある。より新しいところを開拓する、できるっていうところがやっぱり面白いと思ってます。

丸山： 一つは、先ほど皆さんも言われたようにこの分野はすごいロマンがある。人間の手で生き物をつくることは、これまでに達成されていなくて、すごくロマンがあるというのと、あともう一つは、僕は自己複製やってるので、何か生き物っぽいものがどんどん増えていくのが見えたら、単に面白そうだなって。

<分子ロボットについての理解>

見上： 今回の座談会は、一応分子ロボットということでテーマ設定しています。もちろん、分子ロボティクスの研究会²とかでお会いしたりもしているのですが、分子ロボットとい

² 参加者のうち数名には2022年11月12日・13日に東北大学工学部で開催された第6回分子ロボティクス年次大会で本座談会への協力を依頼した。

うふうに自分の研究が位置付けられることについては、どう感じていますか。

佐藤： ロボットと聞くと、固いとか、何て言うか、ある特定の形をイメージする人が多いと思うんですけど、僕の研究はむしろソフトウェアをつくってるというふうに理解していて。というのも、僕の研究は簡単に言うと、エネルギーをつくる研究なので、そのエネルギーを使って分子ロボットが動くような研究をしていると思ってます。

見上： でも、ロボットをつくっているっていう大枠の中に位置付けられることは、そんなに違和感はないということですかね。

佐藤： 違和感はないですね。ただ、僕自身は分子ロボットよりは生命が作りたいたいです。でも、全然違和感はないです。

見上： 後で生命と分子ロボットの違いをどう捉えてるかもぜひ聞かせてください。

小塚： 僕は、佐藤さんと逆で、もともと制御の人間なので、ロボットを制御するという文脈から、その対象がたまたま細胞とか DNA だったという感じです。なので、それに対して分子ロボットっていう名前はすごくしっくり来ます。

ちょっと違う分野でいくと、例えばナノロボットって呼ばれたり、あとはソフトロボットとか、人工細胞とか、いろいろ呼び方はあるんですけど、基本的にどれも同じものを指していると思っています。こうしたロボットとして模倣できる小さい細胞を制御したい、作りたいたいという文脈と考えると、個人的にはすごくしっくりきています。

見上： 丸山さんはいかがですか。自己複製するということは、普通にロボットを考えた時にはあんまり合致しない部分あると思うんですけど。

丸山： ロボットって聞くと、人間が制御しているものっていうイメージがあるので、将来的に分子ロボットが自律的な能力を持つと、生命に近づいていくというか。難しいですね。

僕の研究テーマでいうと、将来的には分子ロボットも自己複製機能を持って、人間が制御できない、人間の手に負えないものになっていくはずなので、その途中段階では分子ロボットと呼ばれるのは、違和感無いかなって思います。

見上： まずはロボットで、それが発展すると生命みたいなものできるという感じですかね。

丸山： はい。今思ったのは、そんな感じです。

岩淵： 自分の研究は、人工細胞でも分子ロボットでもいいです。ボディーとなる細胞膜を經由した分子輸送についてなので、自分の研究が分子ロボティクスに関わるということに違

和感はないし、小塚さんがさっき言っていたのとほぼ同じことを思っていました。

和泉： 分子ロボットという言葉に対して違和感はないです。むしろ、聞いた時ワクワクしました。生体分子で機械のロボットのようなことができるようになるかもしれないというので、私はとても良いイメージでした。

ただ、それに携わる研究者以外だと、やっぱり生命寄りに捉える方や、逆にロボットを強く感じて機械的な何かというイメージで捉える方とか、結構分かれていて、それによって個人が抱く印象は変わるのではないかとも思っています。

見上： 小島さんはいかがですか。もともとの研究の始まりも生命的なものをつくりたいということでしたが、それが分子ロボットと呼ばれることに関してどう感じますか。

小島： 私としても違和感はそんなにないです。私は専門分野が化学なので、化学という学問を考えてみると、簡単に言えば最小単位の分子を使って、その分子に着目していく学問かなと思っています。実際にわれわれがやろうとしているのは、分子から徐々に積み上げていき、最終的に生命みたいな高次機能を持つものを創り出したいということだと理解しています。ロボットで例えれば、組み立て部品をいろいろ集めていき、やがて最終的な大きなロボットができるということです。それらを照らし合わせれば、分子から組み上げていき、大きな生命を創っていくというのと、部品を集めてロボットを創っていくというのは、仕組みとしては一緒なので。そんなに違和感はないと考えています。

岩淵： そもそもロボットの定義なんですけど、ちょうど先日調べまして。ロボットの定義に、センサーとプロセッサとアクチュエーターの3要素を持っているというのがありますが、それを持っていればロボットとして定義できると解釈ができる。そうすると結局、世間一般が思い浮かべるロボットは確かに金属的なものなんですけど、その3要素を持っているのであればロボットと名乗れるので、その材料が生体分子であると考えたら、分子ロボティクスという名前はすごくかっこいいというか、理にかなっているというか、そういう感じで捉えています。

小塚： 先ほど和泉さんのお話を聞いていて思ったんですが、分子ロボットという名前だからこそ、工学の人が入ってこれるのかなと思って。これが人工細胞っていう名前だと、工学の人は自分とは無関係な分野だと思ってしまわないか。分子ロボットだと、もしかしたら自分も関わって、研究として何か入っていけるチャンスがあるんじゃないかっていう印象を持たせることができるというのも、一つの役割として意味があるのかなと思いました。

見上： 一方で、分子ロボット、あるいは分子ロボティクスという言葉は、どのくらい周りに通じますか。自分の研究を紹介する時に分子ロボットの研究してるんですって言ったことある人はいますかね。

小塚： 友だちや親に「これは分子ロボットです」って言っても、何それ？となるので、そういう場合は、「これは人工的な細胞だよ」と言ったほうが伝わりやすいというのはありますね。分子ロボットとだけ言うと、まず何なのか分かってくれない。

岩淵： 僕の場合は、分子ロボティクスというよりはDNA ナノテクノロジーという形で紹介しています。分子ロボティクスだと何ですか、って実際になった経験もあるんですけど、DNAを素材として使うというと、少なくとも分子ロボティクスよりは分かってもらえるなというのは正直あります。

見上： じゃあ人工細胞だよって名乗る人はいますか。

丸山： 僕は人工細胞の研究やってますって言うんですけど、だいたいそう言うと周りの友だちとかからは、「iPS細胞³の研究とかやってるの？」ってほぼ100%の確率で言われますね。こういう領域に携わってない人からすると、生体分子を用いてボトムアップで何かをつくるっていう概念そのものが、あまりないのかなとは感じますね。

小島： 私も、美容院に行って美容師さんとお話した時に、人工細胞を集めて組織をつくって動かしたいんです！とお話したら、iPS細胞の話だと思われた経験があります。一般の人の理解であれば、それはそれでいいのかなと思ってそのまま濁すことが結構多いです。

見上： ちなみに、iPS細胞はかなり遠いところにあるイメージですかね。

丸山： そうですね。何か人間の手を使っていじってやって、自然に存在しないものを作っているという意味では似てるのかもしれないですけど、さっき言ったように、トップダウンか、ボトムアップかっていうところで違うのかなって思います。

見上： じゃあ、例えば、核移植⁴してできた細胞とかもトップダウンのイメージですかね。

³ 2006年に京都大学の山中伸弥教授の研究グループが世界で初めて作成に成功した細胞。既に分化した細胞の遺伝子発現を変えることで、様々な細胞になることができる多様性を再度持たせたもの。翌年にヒトの細胞からも作成に成功し、世界的に注目を浴びた。

⁴ 細胞の核を取り出してきて、核を取り除いた別の細胞の中に入れ込む技術。20世紀末には、この方法を用いて世界初の哺乳類のクローンであるクローン羊ドリーが誕生した。

丸山： はい。自分としては、既に生体の中で使われてる細胞をベースにやってる研究というのは、僕らのやっているボトムアップによるアプローチとは違うのかなと考えてます。

見上： なるほど。ある程度システムとして組み上がってるものを外から持って来るといふのは違うと、そこに線があるってことですね。

丸山： そういうふうに僕は考えてます。

見上： 小島さんもそういう感じですか。

小島： そうですね。難しいですけど、私自身としては、アクチンなどの実際に生き物で使われているものを入れて人工細胞を動かす研究などもあるんですけど、それは別にそんなに違和感はないですね。

見上： 細胞を壊して、そこからまた作り直そうみたいな研究もあった気がするんですけど、皆さんご存知ですか。

佐藤： それはやっていますね。壊すというのは、細胞をばらばらにして、中から欲しい要素だけを取ってくるんです。例えば、砂糖を代謝するためのタンパク質だけを取ってきましょうと。それを試験管の中で混ぜて砂糖を入れて、本当に砂糖が細胞と同じように代謝されれば、今まで分かっていた知見は正しかったと分かるんですけど、全ての生命現象について見てみた時にそのプロセスが正しくないこともある。要は、この因子だけでこの生命現象が起こせるはずだと思われてたのに、起こせないっていう時にこそ、僕らみたいなボトムアップの研究が力を発揮して、実はこういう要素が必要だったとか、そういうのが分かると思っています。

見上： そうすると、部品まで一度分解しているという感じがあるんですね。

佐藤： そうですね。だから、やっぱり iPS 細胞とは全然違うと思います。知ってるものだけで組み上げていく研究と、今あるものに対して外乱を加えてどうなるかっていうのを見る研究とは全然違うように思います。

<分子ロボットと生命の関係>

見上： もう一つ質問があって。どの段階までいったら、生命を創ったと皆さんは言えそうですか。先ほど、分子ロボットと生命の間にはある種の線が引けるというようなお話があったと思うんですけど、線があるとしたら、どの段階でその線は乗り越えられそうなイメージですか。

佐藤： 完全な自己複製を一世代だけでもいいから完成した時に、生命だって言えるんじゃないかなと思っています。

見上： 自己複製がやっぱり鍵ってということですかね。

佐藤： そう思いますね。

見上： そうすると、丸山さんの研究はかなり生命をつくるものと言っていいんですかね。

佐藤： その研究が完全な自己複製をしているなら、要は、外部から補助的な因子を入れないで、自分で自分の要素を全部つくって、自分と同じものをもう一度つくりだせているなら、生命だと言えると思うんですけど。僕が知る限り、DNA だけではそういうことはたぶんできないので。やっぱり生体分子を素直に使わないと、完全な自己複製は無理じゃないかなとは思いますが。

丸山： 先ほど佐藤さんが言われたように、僕の研究は、DNA だけではなくて、外から補助的な分子を入れているので。やはり DNA だけで自己複製はできません。ただ、DNA は情報分子なので、RNA とかその先のタンパク質までつくり出すことが可能です。だから、補助的な分子も DNA からつくりだすことができれば完全な自己複製になり得るといえるのはあります。あとは、生命の起源では何か普通とは違うことが起こって生命が生まれたように、人工細胞の自己複製の一番最初の段階っていうのも、最初は人間の力、ある意味神様じゃないですけど、そういう外からの特別な力が働いたとしても、その後自分複製するための補助的な因子を自分でつくっていけるようになれば、それはもう自己複製している生命って言えるんじゃないかなとは思いますが。

見上： そこは目指したいところですか。

丸山： そうですね。将来的には目指したいなって思っています。

見上： 小塚さんにも聞いてみたいんですが、先ほど工学的とか、物理学的とかというアプローチでも入りやすいのが分子ロボットなんじゃないかってお話をされていたと思うんですけど、そういった観点を持っている小塚さんから見た時に、こういう生命をつくるっていうことにどのぐらい関心を持っているか、ちょっと聞かせてもらえますか？

小塚： 正直、生命とは何かとかはほとんど考えたことはなくて、僕にとってはもう全てロボットかなと思っちゃってます。自然界にいるバクテリアも、先ほど岩淵さんがおっしゃったように、センサー・アクチュエーター・プロセッサーを持っているので、もうロボットだと思うんです。そういう大きな枠組みで捉えたら、そもそも人間も自律した機能を

持つロボットだと思いますし、全てロボットと捉えてもいいんじゃないかと思っちゃいます。

皆さんが生命をつくりたいというモチベーションがあるのは知ってますし、それは個人的にもすごく興味があるところなので、それと並行して僕は工学のほうで、一緒にコラボして、ロボットと捉えるのか、生命と捉えるのかは分かりませんが、そういった面白いものをつくっていただけたいなと思ってますね。

岩淵： 自分も今の小塚さんの話と同じで、生命をつくるよりは分子を、生体分子を基としたロボットを動かすという方に関心は向いているのかなと思っています。

生命って何なんだろう、みたいなことにもなってしまうんですけど、僕が将来的にやりたいこととしては、ある程度こういうふうに動いてほしいという意図、例えば何か薬剤を出すだったり、体内を巡るという目的があって、それを達成する分子システムをつくるという点では、僕の興味はロボットに向いているのかなと。

生命をつくるっていうのは、哲学的な意味で難しいと思っているんですけど。自分の意思で、自分で生きようとするものをつくるっていうんですかね。細胞が意思を持って動いたり、自我があるっていうのは、一つ重要になるとは思ってるんです。ちょっと考えがうまくまとまらないですが、何らかの自我というか、意識っていうのが重要で、今の技術では難しかったとしても、境界としてはそれが一つあるのかなと考えていました。

見上： 分子ロボットの研究では、将来的に自我を持つ何かをつくり出すところまでたどり着くと思いますか。

岩淵： 全然あり得ると思ってます。そうなってくると、今は分子ロボット、小塚さんはロボットをつくりたいって話だったと思うんですけど、将来的にはロボットを明確に分けるといふより、自分たちで組み上げた何かが究極的には生命と同じものになってもおかしくないとは考えています。

和泉： 私も今の岩淵さんの意見と結構似ていて、最終的にはロボットと生命っていうのが、分かれるのではなくて、全てつながっているというか、生命現象から良いものを人工物に取り入れたり、逆になったりという循環を繰り返して行って、全ての学問や領域がつながっていくと面白いんじゃないかなと思っています。

小島： 私としては、生命をつくりたいっていうモチベーションは、正直なところなくて。どちらかというと、生き物を超えたいと思っています。化学の分野で考える最小単位の分子に基づけば、徐々に複雑なシステムは創れると考えています。私の当座の目標としては、

生き物っぽい動きを出していきたい。生物模倣みたいなところをまずは目指したいなと思っていて。そこをとっかかりとして、次に、生き物にない分子を私をはじめとする化学者はつくり出せるのだから、そういう分子を使って、生き物にないものをつくりたい。言い過ぎですけど、生き物を超えられる何かをつくれたらいいなというのが、将来的な展望です。

見上： 存在する細胞とか微生物と違って、分子ロボットとして目指すもの、目標みたいな捉え方なのか、それとも今超えていきたいという話もあったんですが、どういうものとして位置付けたらいいんですかね。自分たちの研究はロボット研究であって、それは参照点ではあるけれども、通過点ではないっていったらいいのか。そこら辺の関係を皆さんはどのように捉えていますか。

佐藤： 僕の場合は、一番高いゴールが細胞を超えること。二番目のゴールが今いる生命で。一番低いとはいえ高いゴールが、すごく温室育ちでいいから、一回だけでもいいから自己複製してくれるような細胞だと思っています。

見上： 今ある細胞や微生物みたいなものをつくるっていうのは、一つの段階として必要で、その先に何かもっと違った、より効率的に生きるとか、そういうことを考えられるということですかね。

佐藤： そうですね。極端な話、僕の場合は、細胞と全く同じ条件を試験管の中でつくれば、同じように生きるはずだって思っているのだから、やっぱり今いる生物はすごくお手本になります。その上で、小島さんとかがつくっているような、新しい生命にないものを取り入れたりとか、あるいは、生命ってここちょっといまちだよな、みたいなところが分かれば、そこを改変して超えていくようなこともできると思っています。

丸山： 分子ロボットがどう進んでいくかですよね。僕は、分子ロボットの研究がどんどん進んでいくと、人間が制御できない生命みたいなものができるんじゃないかなと思っていて。先ほど岩渕さんが、生命って自分の意思を持つみたいなこと言われたと思うんですけど、分子ロボットの機能をどんどん拡張して、分子ロボットが自律性みたいなものを持って。それを人間が制御できなくなって手に負えなくなった場合、それはロボットといえるのかというと、たぶんもう分子ロボットじゃなくて、別の生命みたいなものになっていくと思うんで。そうすると、分子ロボットの研究が進むと、分子ロボットは制御できる分子ロボットとそうじゃない生命みたいなものの2つに分かれていくんじゃないかなと思います。

見上： そういうものが出てくる可能性はあるのでしょうか。

丸山： 可能性はあるんじゃないですかね、自己複製とかそういう機能が達成された時には。

見上： そういうものをつくりたいという気持ちもありますか。

丸山： そうですね、それはロマンがありますね。

岩淵： 生命をつくるという話も出て来たし、制御したいという方向も出てきたんですけど、結局、根底にあるのは、生体分子を使って何かをするということじゃないですか。なので、何か違う方向に向いているのは全然よくて、ただベースとなる技術は同じだから。ある技術を分子ロボティクスの方で使ってみて、これ生命つくるほうでも利用できそうじゃんっていうのがあっていいし、人工細胞を作る方でもこれ分子ロボットに使えるそうじゃんみたいな。そういうのがどんどんあって、結果的にいろいろやれることが広がってくんじゃないのかなって僕は考えてます。

小塚： まずは、人間が今欲しがっている機能を持つロボットをつくっていく方向が、僕の中ではゴールかなと思っています。ボトムアップでつくり上げてくその過程で、恐らく今の実際にいる生物に近いものができてくると思うんですね。そうなってくると、生物の機能を今までトップダウン的に解析して、解明しようとしていたところを、ボトムアップ的にそれを理解することができてくるのではないかなと。また、そういった実際の生物は、かなり面白い使える機能を持っていたりするので、そこから得られた知見を使って、また新たに、本当に人間の欲しいロボットをつくっていく、という流れなんじゃないかなと思っています。

和泉： 私も他の方がおっしゃったのと似たようなことなのですが、あくまで「生命をつくる」とか、細胞や微生物を人工的に設計することを段階の中の一つのゴールに設定しているという意識で研究しています。ゆくゆくはその機能を利用した上で、機能を拡張したり、小島さんが先ほどおっしゃったように、超えていける何かをつくれたらすごく面白いと考えています。

見上： 皆さん、野心的なビジョンを持っている感じですが、それに対して今の分子ロボット研究の状況というのは、どのぐらいまで来てると思いますか。

他の座談会⁵では、富士山に例えてもらったんですけど、富士山の10合目まで登るこ

⁵ 2022年3月9日に実施された座談会「分子ロボットの未来」のこと。詳細は見上他(2022)「実施記録：座談会『分子ロボットの未来』」, *ELSI NOTE*, 22: 1-34 (DOI: 1018910/89384).を参照。

とを目標とした時に、今どこら辺にわれわれはいるのかという感覚をちょっと教えてもらいたいんですけど、どうですか。

岩淵： 10 合目がさっき言った「生命をつくる」とか、もう思いどおりに動かせる分子ロボットだとしたら、1 合目とか、2 合目とか。全然まだまだ。現在は基礎研究のフェーズで、応用とかそういうこと考えると、まだまだ先はあるなと思ってます。

小島： 分子ロボティクスで目指している 10 合目が生命だとして、それは自我まで持たなくてもいいと考えているのですが、だとしたら、やはり 1 合目とか、2 合目位かなと思ってます。佐藤さんがやられてるように、実際の生き物の中から取ってくるのができたらいいんですけど、私みたいに化学の観点から、分子をデザインしていくとなると、全然生命の機能を模倣できてないというのが現状で。まだまだ 1 合目だと考えてます。

和泉： 私も同じように 10 合目を「生命をつくる」に設定すると、1 合目か、0.5 合目ぐらいのイメージで捉えています。というのも、ボトムアップでやっていくとしても、例えば生命現象のトップダウン的なアプローチによる学術領域の知識だったり、多少は必要となってくると思うんです。生命現象とか、生物について、トップダウンのアプローチでも分かっていないことがいっぱいあるじゃないですか。なので、トップダウンの発展とボトムアップの発展が合わさらないと登っていけないというイメージがあるので、そこら辺かなと考えてます。

小塚： 10 合目を望みの機能を持つ分子ロボット単体をつくり上げるということにしたなら、3 合目か、4 合目ぐらいまで来てるんじゃないかなと。もう膜も作れるし、DNA も改編して、ある程度望みのタンパク質も合成できるってなってきたので。それぐらい行ってるんじゃないかなと勝手に思ってます。

さらにその先の単体ではなく、分子ロボットのネットワークを構築して、要は人間とか、いわゆる生物のような複雑なシステムまで構築しようとなったら、恐らくまだまだ 1 合目にも達してない段階なんじゃないかなと思います。

佐藤： すごいチューニングされた環境で生きる簡単な生命を 10 合目に設定したとしても、まだ僕らは日吉⁶ぐらいにいるんじゃないかなと思っていて。要は、そのゴールがどれだ

⁶ 神奈川県横浜市港北区日吉。本座談会の実施会場となった慶應義塾大学日吉キャンパスがある。

け高いかも分からないっていう状態にあると思ってます。

細胞のことってすごい分かってきたように思えるんですけど、実際はそんなことなく、僕の体感だと問題は山積みです。細胞ではゲノムからモノが出来上がって、そのモノがいろんな働きをして、細胞膜なんかを成長させていくんです。だから、ゲノムから発現するものの量比なんかが、まず適切に設定されないといけないけど、そういう研究ってあんまりされていないから、どうしたらゲノムから目的のタンパク質を目的の濃度でつくり出せるのかわかってないし、そもそも、どの分子がどれだけあれば細胞の成長に必要な現象が起こせるのかもわかっていないので、すごい遠いように思います。

見上： 日吉から富士山は一応見えるんですけど、そういう意味も含めて日吉ですかね。

佐藤： 日吉っていうか、蜃気楼でしかないっていうか。迷ったんですけど、富士山が見えればどこでもいいです。

丸山： 先ほど皆さんが言われたように、分子ロボットの10合目が「生命をつくる」で言うと、確かに僕も1合目ぐらいかなと思っていて。それぞれの研究で、単純な機能を実現するみたいなことはできてると思うんですけど、やっぱりそれらを統合して、より生命らしいものをつくるまでには、まだかなり時間かかるんじゃないかなって考えてます。

見上： 皆さん、結構低いところにいる感覚をお持ちみたいなんですけど、皆さんの研究生活の中ではどのくらいまで登れそうですか。てっぺんまで登るところを自分が研究者として活動している間に、自分で達成できる、あるいは他の研究者と一緒に見られると思いますか。それとも、道半ばで後続に託していくというイメージですか。

和泉： かなり長期戦のイメージを抱いています。もちろん最近のバイオテクノロジーや、いろんな学術領域の発展や進展は目覚ましいと思うんですけど、まだ自分たちで生命現象だったり、自然現象を理解して、それを落とし込んだり、生かしたりして生命や分子ロボットをつくるというところに達するには、まだ全然足りないと思うので。もう長期戦で後続に託して、引き継いでいくっていうイメージです。

小塚： 僕の場合は10合目というのが皆さんと違って、生命をつくることじゃなくて、望みの働きをするロボットをつくれればいいということなので。そういう意味では、別にその中にDNAが入ってなくても、タンパク質を使わなくても、他の部品でそれが達成できれば、僕としてはゴールなんです。そういうマイクロスケールで、体内でも働ける、生体親和性を持ったナノロボットをつくるまでに、僕があと30年とか、40年研究できたとしたら、7合目ぐらいまでは達成したいなっていう気持ちはあります。

見上： それでも7合目なんですね。

小塚： それでもですね。なかなか厳しいところがあるかなと思っています。

見上： 小塚さんの研究は、分子ロボット同士のコミュニケーションというところだったと思うんですが、そうすると、7合目が10合目まで来た次の段階で必要になる技術、あるいは知識という感じがするんですけど、ご自身でもそういうイメージですか。

小塚： そうですね。僕が本当にやりたいことは、単体の完全なロボットをつくるんじゃなくて、ロボット同士が集団として望みの働きをするということなので、またもう一段上の目標になります。ただ、分子ロボット集団の制御に向けては、必ずしも完璧な単体の分子ロボットが完成している必要はないと思っています。どちらの研究も並行して進められたらいいと思います。

岩淵： 僕の場合、人間の体の中でも動かして、例えば分子ロボットが何らかの治療における選択肢の一つになるみたいな、そんなところが究極のゴールだと思ってるんですけど、恐らく数十年はかかるだろうし、自分が生きてる間に達成できない可能性も全然あると思っています。われわれの代はこれまでの研究を応用に近づけて、たぶん次の、あるいはその次の代で、具体的な応用的な話に進むのかなと考えてました。

見上： 先ほどのコメントでは、地道に一步步ということはもちろん必要じゃない、場合によってはちょっと何か跳ばせるんじゃないかって話もありましたけど、それは自分の研究生活の中でも起こりそうですか。

岩淵： あくまで可能性の一つなので、起きるか、起きないかは、ちょっと断言は難しいのかなと思っています。

見上： 他の皆さんはどうですか。そういう急に富士山が低くなったかのようなことは起こり得そうですかね。

佐藤： 僕は難しいと思います。富士山をどう設定するかは人それぞれだから、岩淵さんの意見はそれはそれで正しいと思うんですけど、僕の中ではやっぱり生命をつくるという目的を10合目に据えた時に、どれだけ高いかも分からない山だと思っているので。難しいんじゃないかなと思いますね。

丸山： 僕も、「生命をつくる」というのを10合目とすると、難しいと思います。ただ、コンピューターが指数関数的に成長していったのを見ると、何かしらのブレークスルーがあれば、この分野も急激に発展していく可能性はあるんじゃないかなと思います。例えば、

僕たちの分野じゃなくて、分子生物学とか他の分野で何かすごい機能を持つ分子が発見されて、それを使えば、僕たちの領域で目的の分子ロボットをつくるのにすごい利用できるみたいな。そういうブレイクスルーが出てきたら、急速に発展する可能性もあるんじゃないかなって思います。

小島： 急速な発展があるとしたら、分担してやるのが大事なのかなと思っていて、その分担したものを統合していければいいのかなと思います。例えば、私の研究は今までの潮流と少し変わっていて。今までの潮流では、一つの細胞に着目して、いかにそれに細胞らしい機能を持たせていくかということを考えていました。一つの細胞で生命とみなすなら良いんですけど、私はヒトを代表とするような細胞が沢山集まった集合体みたいなものを最終目標と捉えたい。その時には、一つの細胞を見ているだけでは駄目で、それを集めて、さらに集めた細胞同士でのコミュニケーションとか、インタラクションを通じて、より高次の機能を出していくということも大事だと思うんです。

そのためには、従来のようなベシクル一つ、細胞一つに着目した研究が発展していく一方で、私が取り組んでいるような、ベシクル同士を集めて、より高次の機能を出していくという方向性の研究、更には、より物理的・工学的に制御する仕組みを作っていく研究なども各々発展していけると良い。そういうものを集めていって、それを最終的に取りまとめられれば、急速な発展は期待できるかと思います。ただ、それができないいろんな分野を知っている研究者は、正直、この世の中にはいないと思います。物理も分かって、化学も分かって、生物も分かって…というような広い分野に博識ある人が現れて統合してくれたらあり得るのかなって。

<分子ロボットの応用>

見上： さっきも少し話に出ていたんですが、応用の話もちょっとなしたいと思います。まず、分子ロボットってどんなところで応用できそうかということについて、皆さんの持っているイメージを聞かせていただけますか。

和泉： 水のあるあらゆる環境で応用可能なのではないかなと考えています。例えば、体内に限らず、海水や淡水の水質モニタリングなど、環境へ貢献できる働きをしたり。医療に限らず、幅広く使えると思っています。

岩淵： 今の和泉さんの「水があるあらゆるところ」ってすごくいい表現だなと思いました。

僕は、体内だったり、あと汚水環境とかで使えるかなと思ってはいたんですけど、水があるあらゆるところで使えるっていうのは、本当にそのとおりだなと思ったので、その

表現は今後使わせていただきたいです。

見上：他にどんな場所で応用できそうかという点について、いかがですか。あるいは「水のあ
るあらゆるところ」というのとは逆に「ここは水があっても分子ロボットは使えないで
しょう」というところってありますか？

小塚：例えば、おそらく土壌の上でも使えるのかなと。難しいところは、そういった分子ロボ
ットをどう回収するのかなとか、そういう細かい問題はいろいろあって、実際に応用しよ
うっていう時には、まだまだハードルはたくさんあるという印象です。

小島：分子ロボットが駄目なところで言うと、生き物が生きられる環境ではないところは駄目
なのかなと思っています。完全な生き物っぽいものをつくるというのがゴールなのだと
したら、生き物が生きられないところで耐性がないと思われれます。その耐性を新たに付
与するようなことを考えないのであれば、基本、生き物が生きられないような環境でな
ければ駄目なのかなという気はします。

見上：じゃあ、最初に分子ロボットが応用できそうなところっていうと、どこだと思いますか。
分子ロボット研究一般の現状からして、あるいは皆さんがやっているような研究と近い
ところで、最初に分子ロボットが活躍してくれそうなところってどこだと思いますか。

小塚：ちょっと確かなことは言えないんですけど、やはり体内で薬として使うことかなと思っ
ています。例えば今、ワクチン接種とかしてるのも、要は異物を体の中に入れてあるわ
けなので、それが許容できるということは、恐らくそれに近い、ある程度害のないこと
が判明している簡易な分子ロボットを体内に注入することも近い将来できるんじゃない
かなと思っています。

丸山：僕は体内に入れるよりも、もっと簡単な診断とかに使えるんじゃないかなって、
がん診断とかそういうものに使えるんじゃないかなと思ってて。医療応用なんですけど、
体内に入れる前段階とかには使えるんじゃないかなって思ってます。

見上：皆さんの研究ではどれぐらい応用を意識しているかもちょっとお伺いしたいです。意識
してるよっていう人、手挙げてもらえますか。結構手挙がりますね。どんな感じでその
応用が視野に入ってくるのか、ちょっと聞いてもいいですか。

岩淵：私の研究は結構分かりやすいところがあると思ってて。例えば、中から外に薬剤を放出
するみたいな役割を持つ分子ロボットがあって、その機能は私がさっき言った脂質膜を
経由した分子輸送の研究成果を利用して達成できるので、自分の研究テーマは分かりや
すく応用と直結してるな、ということは正直思ってます。

見上： それはドラッグ・デリバリー・システム的なイメージですか。

岩淵： そうですね。研究費申請の書類を書く時のように、専門じゃない人に自分の研究を説明する時にも、ドラッグ・デリバリーという単語が出てくるので、そういう感じに考えています。

佐藤： 僕の場合の応用は、逆に分子ロボットは生命みたいに生きてないので、死ぬ心配をしなくていいという意味で、毒性のある化合物の合成なんかに使えと思っています。あるいは、毒性のある化合物がある環境中でも使えと思っています。

例えば、僕は試験管の中でタンパク質を合成しようという研究をしてるんですけど、細胞に合成させると細胞が死んじゃってなかなか合成がうまくいかないタンパク質みたいなものがあるって、そういうものを合成するためには細胞よりも試験管の中でやるタンパク質合成系のほうが上手に合成できるってことが既にあります。

小塚： 僕の場合は、完全に理論研究なので、まず物理現象を数学に落とすところから始まるんですね。なので、その段階で応用先を見据えた状態や問題設定に基づいて、数理モデルを作るところから研究が始まります。そういう意味で応用先を見据えて理論を作っていくということには、常に関わってます。

和泉： 私の研究は、ベシクルの形を制御するっていう研究なんです。岩淵さんが先ほどおっしゃったドラッグ・デリバリー・システムに活かせる機能として、形を制御することによって細胞と細胞の狭い隙間に入り込めるようにしたり、細胞ぐらいの小さなものを覆ったりできるようなものができたらいいなという点においては、応用を意識しています。

見上： 最初の佐藤さんの話に、生命は結構チューニングされてるっていう話があったと思うんですけど、応用の場所を想定し始めると、ロボットにせよ、モデルにせよ、それが適応した環境というものを前提にすることになると思うんです。でもそうすると、皆さんがつくろうとするものの幅が狭まってくる感じもするんですが、それは生命をつくるという大きな目標に対して、プラスに働いているのか、それともマイナスに働いているのかという点については、皆さんどうお感じですか。

もう少し補足すると、何かの応用を考えることって、そのものが応用される状況をその研究の中に反映させることだと思うんです。しかしそうするとあくまでも限られたコンディションの中での活動だったりとか、機能の発現や維持だったりとかを求めることになるような気がするんです。そうすることが、生命として考え、大きなものをつくろうと思った時に、ちょっとやっтерることを限定している感じがするという印象も持って

るんですけど、皆さんとしてはどうでしょう。

丸山： 僕は DNA ベースの人工細胞を作っているんですけど、現状かなり塩濃度が高い環境でないと作成することができないんですね。生体内とかに入れちゃった時に壊れちゃったりする可能性があるんで、そういう応用をどう可能にするかというのは研究において解決すべき問題の一つになっている部分ではありますね。

見上： つまり、解決するとまた違った研究の展開とかにつながっていくって可能性はあるということですか。

丸山： そうですね。より幅広く、汎用（はんよう）的に使えるようになっていく可能性が高くなるんじゃないかなっていうふうに思います。

岩淵： 丸山さんがおっしゃったとおり、やっぱり条件というのは、どうしても狭まってしまうところはあると思っています。というのも、そういういろんなものを組み合わせて、高機能化するというのを考えると、それぞれの構成要素が動く最適な条件、つまりこの濃度あるいはこの溶液条件でしか動かないっていう条件があって、それらの最大公約数的なところを探る必要があるんで、そこがどうしても大変だなと思っています。

実際に、私の研究室で過去に発表されたアメーバの分子ロボット⁷も、条件の最適化というところにもものすごくリソースを割いたという話があるので、最大公約数探しというところは、どうしても必要になるんじゃないかと考えています。

佐藤： 生命をつくりたいって目標の中で考えると、応用するっていうのは、ちょっと脇道にそれてるようなイメージがあって。応用するということは、生命が持ってるよりはるかに少ない要素だけで可能だと思うんですね。なのでむしろ応用に照準することで特に何か狭まっている感じはしないです。要は、生物みたいにいろんなことをしなくてよくて、ただこの薬をこの環境で放出するような機能だけ持ってくださいねっていうようにするのが応用だとしたら、それは特に本筋である生命をつくる研究に何かしらの制約を課しているようには思えないです。むしろ、つくった生命が、いろんな場所でいろんなものを感知して、それに応じた動作ができるようになるためにも、応用研究から自分の生命をつくるという研究に対するフィードバックがあるんじゃないかなって思います。

⁷ 2017年に東北大学工学部の野村 M.慎一郎研究室が発表した成果。Sato *et al.* (2017) Micrometer-sized molecular robot changes its shape in response to signal molecules, *Science Robotics*, 2(4), eaa13735 (DOI: 10.1126/scirobotics.aal3735).

小島： 恐らく、小塚さん以外の実験科学に取り組んでいる皆さんにとっては、応用が目標じゃないと思っています。こういう生き物っぽいものをつくっていきたくてという理学的な興味ははじめにあるんじゃないかと。でも、研究の申請書などを考えた時に、世の中に分かってもらいやすい意義はどうなのかなってところを考えると、例えば、ドラッグデリバリーシステムが出てきたり、膜の透過性をよりよくしたりするなどの応用が出てくるとしています。

そのため、応用が最終目的になっているわけではないので、生命により近づきたいところが根本的なモチベーションとしてあれば、狭まらないと思います。

見上： 皆さんの中で応用と、科学的な関心とのバランスって、どういうふうになっていますか。全くどっちかがないってことはあんまりないのかなという気はするんですけど、どっちを軸に自分の研究活動が動いていると思いますか。いまの小島さんのお話では、どちらかというと基礎的な、科学の知識への関心が軸にあって、それを進めるために、ある意味では社会のニーズに応えることも考えなきゃいけないってバランスなのかなと思いましたが、他の皆さんはどうですか。

佐藤： 僕自身は、やっぱり生命をつくるっていうより、理学的なモチベーションに8割、9割の軸を置いてやっていきたい。基礎研究と応用の関係っていうのは、やりたい人がやりたいほうをやれば良いと思っています。例えば何かを僕らがつくったとして、それを論文として発表したら、応用したい人がそれを読んで、自分がやりたい応用にこの技術は使えるってことになれば、それで自分の技術が応用されたっていうことになると思っています。だから、自分の技術に対して、こんなことに使えそうみたいに思いを巡らせて、その使えそうですよっていうことを発信していくことは大事だと思うんですけども、必ずしも自分で全部の応用をやる必要はないと思っています。

見上： ありがとうございます。他の皆さんはいかがですか。

岩淵： 私は佐藤さんとは真逆とまではいなくても結構逆の方向で。工学部出身なのもあって、やっぱり応用のほうから考えているところがあります。こういうことすると例えば投薬とかに役立つよな、っていうところを先に考えてしまうところがあると思っています。

ただ、私は研究の先に応用があるっていうふうに思ってたので、佐藤さんがさっき言っていたように、応用が本筋である「生命をつくる」ことに対してフィードバックをもたらずっていうのは、何かすごい、面白い考え方だなと思いました。

小塚： 僕も岩淵さんと同じで、工学の人間なので、もともとは何か人の役に立つものをつくりたいってモチベーションでやってきているので。やっぱり最終ゴールには応用っていうところがありますね。

例えば、ちょっと前の話で、汎用性とかの話があったんですけど、何かの応用先を一個に絞ってしまうと、それだけにしか適用できないものが出来上がるんですね。そういったものは、単純にそれを数値シミュレーションすればいいじゃんっていうところに落ちてしまうので、そういうことは避けたいんですね。僕がやっているシステム論っていうのは、むしろ問題をいかに一般化して、どういったクラスの問題に対して一般的にどういったことが言えるかっていうところを突き止めていくという研究です。そこがシステム論の強みかなと思っています。

<他者とのコミュニケーション>

見上： 先ほど申請書とかを書く時には、やっぱりそういったことも書かなきゃいけないというお話もあったんですが、一般的にやっぱり応用だったり、役に立ってということが研究する上で求められてる部分は多いっていう話がよく聞かれると思うんです。今、大学院生として研究をしている皆さんも、やっぱりそういった感覚を持っていますか。それとも、まだ自由に研究をやらせてもらってるっていう感覚がありますか。

小塚： 博士課程になると、自分で研究費も取ってこなきゃいけないので、申請書を書くとなると、やはりどうしてもこんな応用ができますよとか、何かの役に立ちますよとかいうアピールはしなきゃいけないと思います。そこはどうしても考えなきゃいけないポイントかなと思っています。

佐藤： さっき言ったように、基礎研究と応用研究が相互に助け合って発展していくだろうっていう考えからすると、基礎研究側も応用の可能性を考えることは大事だと思うんです。だけど研究自体は、あらゆる意味で自由にできていると思っています。申請書に「応用できますよ」って書かなきゃいけないのは、その申請する内容の理学的な興味をうまく伝えられていないからじゃないかなって僕は思っています。だから自分がすごく面白いと思っている現象についてうまく説明できれば、その応用について、本当は興味がないことを書く必要はあんまりないんじゃないかなって思っています。

見上： それは応用みたいな部分も自然と付いてくるからっていうことですかね。それとも、もう理学的な興味関心の重要さが伝われば、それは研究として認めてもらえるっていう意味ですか。

佐藤： 後者ですね。

見上： ありがとうございます。もう一つ聞きたいんですけど、申請書を書く以外にも、自分の研究についてその分野についてよく知らない人や、そもそも科学のバックグラウンドを持っていない人に研究内容を説明したり、自分の研究の重要性や価値みたいなものについて説明しなきゃいけない機会っていうのはあたりしますか。

和泉： 私はあります。自分の身内の母や祖母をはじめ、自分が大学以外で関わる人と接する機会があるからです。例えば塾講師をしていた時に、学生と「先生、何を研究しているの？」みたいな話になるので、そういう時にうまく伝えて、彼らが興味を持ってくれたり、また身内が私の研究を知ることによって応援してくれたり、そういうかたちで普及していく機会があります。

見上： 皆さん、ご家族に自分の研究の話したりする人ってどれぐらいいらっしゃいますか。その時に結構伝わるよっていう人はどれぐらいいらっしゃいますかね。

岩淵： 私の場合は、父も母も薬学系の出身で、結構生体分子について明るいところがあるので、割と伝わりやすいというところはあります。

見上： それはちょっと特例的かもしれないですね。他の皆さんは、あまり伝わらないですか。丸山さんがうなずいてますけど、自分の研究について説明を試みたことはありますか。

丸山： あるんですけど、だいたい人工細胞っていう話をすると、iPS細胞の話になっちゃうんですね。そうなった時に、何か生命の起源に近いことをやってる、みたいな話をすることもあるんですけど、僕の場合は自分の今やっていることが、かなり先の未来でどう生かされるかみたいなことについて説明したりすることが多いですね。理解してもらえてるかどうかは分からないですけど。

見上： 逆に皆さんの研究の内容あるいは目的について話した時、例えば生命をつくるとか、細胞をつくるとか言った時に、社会からそれについて何かマイナスな印象を持たれたりする可能性があるかもしれないと考えたことがある人、あるいは、実際にそういう経験がある人っていますか？

佐藤： 実際に問題になったことはないんですけど、他の文化圏の人にどう見えてるのかっていうのは、すごい気になっていて。要は、キリスト教的な価値観、神が生命を創ったみたいな価値観に対して、僕らの研究はすごく対抗的だと思うので、それがどう見えてるのかが気になったりはしています。ただ、ヨーロッパにも細胞をつくる研究会は存在して

いて⁸、それはそれなりに大きな団体でもあるので、絶対に理解されないっていう訳ではないんですけども、それでも文化の違いが気になります。

和泉： ネガティブというか、それこそ先ほどのような周りの人に細胞をつくるという観点から話をした時に、「すごっ」という反応と「怖くない？」という意見のどちらもがあったので、怖いという印象を持たれることはあるかと思います。

見上： また丸山さんに振ることになるんですけど、増殖するとか自己複製とかっていうと、何か「えっ？」っていう反応を受けそうな印象があるんですけど、そんなことはないですか。

丸山： 実際にそういう反応を受けたことはないんですけど、そうなる可能性があるなっていうのは感じていて。自己複製の研究なので、申請書とかにも倫理的な問題を意識したようなこと、つまり「研究者の意図と関係なく勝手に増殖したりすることはない」みたいなことを書くこともあるんです。でもそういうふうに、人間の手に負えない形で増殖していくっていうイメージのされ方をすると、やっぱり怖いって感じる人がいるんじゃないかなって思います。

見上： 今の丸山さんみたいに、申請書であったり、学会以外の場所で他の人に自分の研究内容や目標を説明したりする時に注意してることとか、気にしてることとかってありますか。

岩淵： 注意とまではいかないですけど、一応申請書に「DNA は使うけどその DNA は遺伝情報を持たない合成分子である」という文言は書くようにはしています。

見上： それは DNA って言われると、遺伝情報を持ってるものっていうイメージが強いからってことですね。

岩淵： そうですね。配列を合成する際には4種類の塩基をガッチャン、ガッチャンと繋ぎ合わせていくんですけど、知らない人からすると、ちょっと何だそれって思われる可能性はあるので、そこは気を付けるようにしてます。

<分子ロボットのコミュニティ>

見上： もう一つ、研究者コミュニティについてもお伺いしたいんですけど、皆さんは分子ロボ

⁸ 例えば、2017年にオランダで開始した BaSyC (<https://www.basyc.nl>) などがある。

ットのコミュニティに属しているっていう感覚はありますか。あるいは、実際、分子ロボットの研究者コミュニティって存在している感じがありますか。どれぐらいの大きさのコミュニティだと思ってるかを聞かせてもらってもいいですか。それは日本のコミュニティっていう感じですかね、それとも海外も一緒になって動いている感じがありますか。

和泉： ほんとに私個人の知る限りなんですけど、今はあくまで日本中心のコミュニティなのかなっていう印象で捉えています。ただ、最近、海外の研究者の方とかも巻き込んで、どんどん広がりつつあるコミュニティになってきているという印象です。

見上： 巻き込むっていうのはどういう感じでしょうか。

和泉： 例えば共同研究とかを通じて、どんどん分子ロボティクスが存在を知る、他の分野の研究者の方々が増えていっているというイメージです。

見上： 皆さんはそのコミュニティに属している感じがありますか。それとも端っこや外から見ている感じがしていますか。

岩淵： 分子ロボティクスや分子サイバネティクスのプロジェクト代表が村田智先生⁹なんですけど、村田先生は自分のいる東北大学の先生で、しかもまさに自分の入ってる研究室の先生なので、自分から入ろうというよりは、最初からもうコミュニティの中に入ってるっていう意識は正直あります。その上で、分子ロボティクスというコミュニティは、やはり日本が中心になってるっていう印象です。

小塚： 僕は、佐藤さんと岩淵さんと一緒に分子ロボティクスの実行委員をやっているのですが、どっぷり入っている感じはありますね。僕も分子ロボットのコミュニティは国内のコミュニティという印象が強くて、その中でも細胞などを扱う分野の中で、工学を目指したコミュニティなのかなという印象を持っています。

そこには僕みたいに、理論的にアプローチする研究者もちらほらいて、比較的新しい感覚を持ったコミュニティなんだなという印象ですね。ただ一方で、僕のような工学系の人間が行く学会と、他の生命をつくるような方が行く学会は、また分野が違ってくるので、後者の学会に行くような人と普段から深い関わりがあるかといわれたら、個人的

⁹ 東北大学大学院工学研究科ロボティクス専攻ナノシステム講座教授。分子ロボティクス研究の中心的な研究者の一人で、2020年度に開始された科研費・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ナマル人工脳の構築」(-2025.3)の領域代表。

にはそこまでではないっていうイメージです。

見上： 小島さんはどちらかというと、人工細胞というイメージのほうが強いのかなっていう感じがしますが、分子ロボティクスコミュニティの一員っていう感じもしますか。

小島： そもそも自分自身はこの分子ロボティクスの研究グループに厳密には入っていないので、外で見てる側なんです。人工細胞を作って、生命っぽいものをつくりたいっていう理念の上では共通していて、切磋琢磨してるなという感じはあります。

見上： 丸山さんは瀧ノ上正浩先生¹⁰の研究室なので、結構ど真ん中な感じですかね。

丸山： そうですね。そういう分野に所属しているっていう感覚はあります。どんどん、分子ロボティクスに関する領域が大きくなっているっていうのも、なんとなく感じています。

見上： 皆さんの研究者コミュニティとの関わりっていうのは、やっぱり指導教員というか、研究室の先生との関係で自分の立ち位置も決まってくる感じが強いですかね。

こうやって座談会を開催している理由には、分子ロボティクスの研究に関しては、私みたいに人文・社会科学の人間とも共同研究を進めていこうというプロジェクト¹¹が動いているからなんですね。それについてもちょっと皆さんの感触を聞いてみたいと思って。そうした共同研究に何かを期待するとしたら、どんなことが期待できそうですか。あるいは、こんなことしてくれたらいいのっていう希望とかはありますか。

小島： 期待したいこととしては、倫理的な側面だと思っています。先ほど挙がっていたと思うんですけど、やはり一般の人からすると、生き物をつくり出すというと、それが勝手に増殖したら怖いとかそういうイメージを持たれがちだと思います。そういう勝手な増殖はないということや、こういう恐れはないんですよ、というようなことを社会に訴えていってもらえたらいいなと期待します。

見上： 研究の実情を社会に伝える役割みたいなイメージですかね。

小島： そうですね。研究自体を伝えることは、理学系の人が行えば良いと思うんですけど、その上で倫理的な問題とかについては、理学系の人に対処しきれないところもあると思

¹⁰ 東京工業大学大学院情報理工学院教授。

¹¹ 本座談会の実施に関わるプロジェクトのほか、先行して実施された JST RISTEX「人と情報のエコシステム」研究開発プログラム「分子ロボット ELSI 研究とリアルタイム技術アセスメント研究の共創」(2017-20, 代表: 恵泉女子大学 小長谷明彦) などがある。

うので、そちらを協力して埋めていけたらと考えています。

佐藤： 人文系の方をお願いするのが適切か分かんないですけど、生物って、今の受験科目の関係で、大学を出ても知らない人が結構多いと感じていて。例えば僕の扱っている生物の現象として、解糖系というものがあるんですが、東大出た人にそれを言っても伝わらないということがあったりもするので、もっと生物のことをみんなに知ってもらえるようになればいいなど。極端な話で言えば、義務教育課程の改定だったり、あるいはもっとラフな感じでもいいので、生物について国民が興味を持ってくれる状態にしてもらえるとうごくありがたいと思います。

和泉： いまお二方が言ってくださったことと似ているのですが、倫理の側面と普及の側面があると思っています。倫理に関しては、まさに小島さんが言ってくださったとおりだと思ってます。また普及に関しては、やっぱり知ってもらってことがすごく大事だと思っているので、今回こういう会を開催していただいて、いろんな方の意見を聞けて、とても楽しかったです。この座談会の、例えば研究を始めたばかりの学部生のバージョンとか、ポスドクになりたての方々のバージョンとかがあっても面白いのではないかなと思いました。

岩淵： 今、和泉さんがおっしゃったことと同じで、倫理のことと、もっと広めるってところの2つになってくると思います。倫理については、自分の分子ロボティクスコミュニティの中でも、ELSIのことを考えるという取り組みって結構あるはずなんですけど、普及というか、周知というかについてはそこまで進んでいない。我々のやっている生体分子を使って何かをつくるだったり、例えば、DNA だったら、生体分子をちょっと改変するみたいなことができるってというのが、そもそも知られていない。分子ロボティクス以前の、生体分子をマテリアルとして使う、またはそれをマテリアルとして利用できるように設計し直すっていう段階が知られていないからこそ、さっき小島さんが言ったような、分裂って話をするとちょっと怖がられるみたいなことにつながっているところもあると思ったので。やはり広めるってところは大事なかなと思いました。

小塚： 僕も同じで、普及がすごく大事かなと思ってまして。個人的には、分子ロボットっていうコンセプト自体、例えば量子コンピューターとかそういう分野と匹敵するぐらい面白いものだと思っているんです。でも量子コンピューターっていったら、おそらく一般の人もなんとなく聞いたことがあるんですね。分子ロボットも名前が広がって、何かすごく面白そうなものがあるんだってというイメージを持ってもらえる段階になると、たぶんその後も発展するんじゃないかな。例えば、学部1年生、2年生が、なんとなく分子ロボットって存在を知っていて、配属される研究室を選ぶ時には「あ、分子ロボット面

白そうだな」と思ってもらえるぐらいの段階まで、イメージやコンセプトを普及できたらいいなと思います。

丸山： もし分子ロボットが、どんどん有名になって、世の中の的にも広く認知されるようになると、みんなの分子ロボットに対する考えとか価値観とかが、ガラリと変わっていく可能性もあるのかなっていうふうに思っています。僕としては、それが反対意見であれ、賛成意見であれ、その変化の過程に興味があるので、分子ロボットがもっと受け入れられるようにしてほしいっていうよりも、そういう過程を調べてもらえたらなって思います。

< 生命の起源と生命の本質 >

河村： 最初のほうに聞いた研究のモチベーションの話に戻っちゃうんですが、シニアの先生方に話を聞いていると、やっぱり皆さんと同じように生命の起源への関心って話をされるんです。例えば2年ぐらい前にお話したあるシニアの研究者によると、分子ロボットをつくることで、その生命の起源を理解できるようになるんだと。その場合の生命の起源ってどういう意味かという、まさにこの地球の歴史において、無生物から生命のようなものが出てくるまでの過程を再現できたら、この地球の歴史っていう意味での起源が分かるんじゃないかということなんですよね。むしろそれこそが研究をやる一番の理由だといった説明をされていたんです。

皆さんも、生命の起源を知りたいという時に、このシニアの研究者と同じように、この地球上に生命が登場するまでの歴史をこの手で再現できたら生命の歴史的な起源がわかるぞっていう感覚で研究しているのか、それともそこまでではないよって感じなのか、お聞きしたいです。

佐藤： 僕はその観点はなくて。というのも、生命の起源まで遡っていった時には、もとは生体分子は存在しないはずですよ。となると生体分子を使ってる僕が相手にしているのは、もっと十分に発展した生命、例えば、大腸菌みたいなものなんですよ。大腸菌って一般的なイメージとしては、すごく単純な生命だと思うかもしれないんですけど、生命の起源という視点で考えるとそれはもうスーパーカーぐらい余計な機能が詰め込まれてかっこよくデザインされたものになっていると思っています。僕が作りたいのは、比較的大腸菌に近いものなので、僕は起源を明らかにしようという感じではないです。

起源っていうと、むしろ丸山さんとかは、近いんじゃないかなって想像します。自己複製し合う核酸があったりだとか、そういうのが生命の起源のイメージです。

丸山： 僕の研究はかなりここでいう生命の起源みたいなものを意識している研究だと思うんです。自己複製機能がもし実現できれば、物質と生命の違いみたいなものを理解するうえでの一つの手助けになるんじゃないかなって考えてます。

見上： 生命の本質を理解するっていうことと、生命の起源を理解するっていうことが必ずしも一致しないんじゃないかなってちょっと思いながらお話を聞いていたんですけど、そのあたりは皆さんどう思われますか。

先ほどの佐藤さんの話で言うと、生命の「起源」を考えるんだったら、その生命発展の歴史に沿った条件みたいなものを考慮して考えなきゃいけない部分が出てくると思うんです。それに対して、生命の「本質」を考えるんだったら、今ある生命がどういうシステムで動いているのか、成り立っているのかっていうことを解きほぐしていけばいいという感じがあるんですけど。生命の起源と本質はどれくらい重なるものとして皆さん受け止めているのか、そしてもしそれらが違うものだとしたら皆さんはどちらの方向を目指しているんでしょうか。今丸山さんがおっしゃっていた自己増殖に関しても、必ずしも生命の起源なのか、生命の本質的な機能としての自己増殖を理解するっていうことなのかって、ちょっと分からないなっていう感じがしたんですけど。

丸山： 難しいですね。何を生命の本質と考えるかが重要な気がするんですけど。

少なくとも、僕の研究においては、自己複製機能っていうものが生命の本質的な部分だというふうに考えていて、それが物質を生命たらしめたっていうふうに考えています。そうするとやはり、その機能が生まれた生命の起源という観点にも関連することになってしまうと思うんです。

佐藤： 僕がやりたいのは、既の実存してしまっている生命が今ある部品を使ってどうやって生きているのかを調べることで、要はどうやって生きてるかっていう生命の本質に当たるんです。だから、本質の次元が、ひとつレベルが違うように思っていて、生命の起源を知ることももちろん生命の本質を知ることだし、今ある生き物がどうやって生きてるのかを知ることも生命の本質を知ることだと思っています。

小島： 私の研究室では、割と生命の起源を研究の拠り所にしてしている側面もあります。ですが、個人的には、別に生命の起源を求めて研究しているつもりはないです。私の研究室では、化学進化の過程として、単純な分子があった時に、それがいろいろ組み合わせられて複雑になっていき、生命のようなものがどのようにしてできてきたのかを再現したいというモチベーションの人もいます。

ですが、自分自身が目指してるゴールは、どっちかといえば、どうやって生命が原始地球でできてきたかを知るよりは、生命がどういうふうに関係を現してきてたのか知りたい、というのが根底にあります。

<最後に一言>

- 見上： ありがとうございます。最後に皆さん一言ずつ、感想でもいいですし、何か研究に関して、あるいは分子ロボットに関して、何かこれは言っておきたいとかいうことがあればお願いしたいです。
- 丸山： 今日はほんとにありがとうございました。いろんな人のいろんな意見が聞くことができ、自分もすごく勉強になりましたし、また、自分の考えを何か頭の中で整理できたような気がします。
- 佐藤： 今日はありがとうございました。僕も何というか、同じぐらいの世代の研究者が何を考えているのかっていうのが知ることができて、すごく面白かったです。
- 小塚： いろんな話を聞いてみると、意外と分子ロボットをつくりたいってモチベーションじゃなくて、そもそも生命の起源を探りたいとか、生命をつくりたいっていうモチベーションの方がいたり、あるいは僕みたいに工学がモチベーションの人もいたりする。いろんなものを目指している人が、こういう分子ロボットをつくるっていう観点で集まっているし、しかも工学と生物の両方からいろんな分野の人が集まって来ているっていうのが、このコミュニティの特徴なんじゃないかと思っていて。なかなか他だと、こういう人たちが集まって共同でやれることも少ないんじゃないかと思うので、今回議論してすごく面白かったです。
- 和泉： まずは、本日はこのような機会をつくっていただき、ありがとうございました。私も今回、いろんな角度からのお話を聞くことができ、とても楽しかったです。
- 小島： 今日は、ありがとうございました。私自身も、分野が違うような人たちと色々な話をすることができたというのがすごく楽しかったです。あとは、分子ロボティクスみたいな話を理解している人は私の研究室にあまりいないので、実際に分子ロボティクスに携わっている方々の前で自分の考えをアウトプットすることができたのも、非常に貴重な経験だと思っています。
- 岩淵： 本日はこのような貴重な機会に出席させていただいて、本当にありがとうございました。自分の周りの研究目的を大きく分けると、分子ロボティクスや人工細胞とか、生命をつ

くるっていうくくりがあると、僕の中で思ってた、その中で自分は分子ロボティクスを中心に考えてたんですね。でもそうではない人工細胞とか、生命をつくるっていう考え方についても、今日はいろんな角度から新しい考え方や意見を知ることができたのが本当によかったです。また、ここにいた方のフィロソフィーというか、考え方や科学に対する視点を知れたというのが、本当に、今後の研究に良い影響が出るだろうなと思っていました。

見上： ありがとうございます。それではこれで座談会をおしまいにしたいと思います。

実施記録：座談会「分子ロボットの未来2」

見上 公一	慶應義塾大学 理工学部 准教授 (2023年2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 (2023年2月現在)
和泉 佳弥乃	東京農工大学大学院 (2023年2月現在)
岩淵 祥璽	東北大学大学院 (2023年2月現在)
小島 知也	慶應義塾大学大学院 (2023年2月現在)
小塚 太資	慶應義塾大学大学院 (2023年2月現在)
佐藤 岳	慶應義塾大学大学院 (2023年2月現在)
丸山 智也	東京工業大学大学院 (2023年2月現在)

Event Report: the Roundtable Discussion “Future of the Molecular Robotics 2”

Koichi Mikami	Keio University
Ken Kawamura	Osaka University
Kayano Izumi	Tokyo University of Agriculture and Technology
Shoji Iwabuchi	Tohoku University
Tomoya Kojima	Keio University
Taishi Kotsuka	Keio University
Gaku Sato	Keio University
Tomoya Maruyama	Tokyo Institute of Technology



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>

 大阪大学

Osaka University
Research Center on
Ethical, Legal and
Social Issues