HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	オンライン座談会「分子ロボットの未来」：研究者による未来の語りの記録
Author(s)	見上, 公一; 河村, 賢
Citation	科学技術コミュニケーション, 33, 15-27
Issue Date	2023-09
DOI	10.14943/108262
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/90447
Type	bulletin (article)
File Information	jjsc33_p015-027_Mikami.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

ノート

オンライン座談会「分子ロボットの未来」
～研究者による未来の語りの記録～

見上 公一[1]，河村 賢[2]

The Online Forum “The Future of Molecular Robotics”: How Scientists Narrate the Future

MIKAMI Koichi[1], KAWAMURA Ken[2]

要旨

本稿では，2022年3月に実施されたオンライン座談会「分子ロボットの未来」について報告し，それが責任ある研究とイノベーションなどの議論で目指されている「共創」を実現する上でどのような意義を持ちうるのかを検討する．オンライン座談会を実施したことで，萌芽的な科学研究領域である分子ロボティクスの第一線で活躍する研究者の描く未来についての考えが言説化され，各研究者がおかれている環境についての理解を深めることができたと同時に，研究者間の微妙なニュアンスの違いも捉えることができた．座談会は，自然科学と人文・社会科学の研究者の連携により実現したものであり，それ自体は特定の専門家に閉じた活動でしかないものの，その実施記録を資料として公開し，誰でも容易に手に取ることができるようにすることで，今後なされるであろう多様なステークホルダーを交えたインタラクションの質を向上させる可能性を秘めている．「共創」の実現のためには，実現しうる未来の可能性を広げ，社会として望ましい意思決定を行うための基盤を形成する必要があるが，今回のオンライン座談会という試みはそれに貢献する取り組みの一つとして評価できるのではないだろうか．

キーワード：分子ロボティクス，未来の語り，期待，責任ある研究とイノベーション，共創

Keywords: molecular robotics, narratives of the future, expectations, responsible research and innovation, co-production

1.「共創」の実現に向けて

近年の科学技術コミュニケーションのキーワードの一つに「共創」がある．科学技術政策の文脈においても，ブダペスト宣言（世界科学会議 1999［2019］）を受けて2000年代初頭から重視されてきた「科学と社会の対話」の路線を継承し，2010年頃からは科学の専門知だけではなく，必ずしも知識として体系化されていないローカル知（現場知）なども含めた様々な知識をうまく反映させることによって，社会にとってより望ましい科学技術を創出していくことの必要性が強調されている

2022年9月13日受付　2023年6月19日受理
所　属：1. 慶應義塾大学理工学部
2. 大阪大学社会技術共創研究センター
連絡先：kmikami@keio.jp

（科学技術振興機構 2018; 内閣府 2011; 2016）．このような国内の動向は，欧米における「責任ある研究とイノベーション（Responsible Research and Innovation，以下 RRI と記す）」の議論（Owen et al. 2012; 標葉 2020; Stilgoe et al. 2013; 吉澤 2013）とも共鳴するものであり，特にヨーロッパでは 2014 年に開始した Horizon 2020 という欧州連合の研究助成枠組みにおいて，その取り組みが進められてきた（Owen et al. 2021）．日本では必ずしもまとまった形でその取り組みがなされてきたわけではないが，2020 年の科学技術基本法改正を受けて，人文・社会科学の知を交えた総合知の創出が大きな目標として掲げられており，今後そのような取り組みの推進が期待されている．

本稿では，分子ロボティクスという萌芽的な科学研究領域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」について報告する．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特定の機能を果たすシステムとしてデザインされた分子デバイスの構築を目指す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）．そして，この研究領域では，研究活動の活発化に追随して，研究者たちが中心となって社会との関係についての議論を進めてきたという経緯がある．特に顕著なものとして，2016 年に科学技術振興機構の社会技術研究開発センター（Research Institute of Science and Technology for Society，以下 RISTEX と記す）の「人と情報のエコシステム」研究開発プログラムに採択され実施された「分子ロボット技術に関する法律・倫理・経済・教育からの接近法に関する調査」，その後継プロジェクトにあたる「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」などがあり，人文・社会科学の研究者との連携を長期的に実現させてきた（分子ロボティクス研究会 2019; Yoshizawa et al. 2018）．そして，同じく RISTEX の「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に 2021 年度に採択された「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」プロジェクトでは，それまでの経験を踏まえ，より多くのステークホルダーを巻き込んだ形で RRI の実践を実現し，他の研究領域にも参考となるモデルケースを提示することが目指されている（RISTEX 2021）．

次章で説明するように，今回実施されたオンライン座談会もそのようなモデルケースの構築を目指した活動として位置付けられており，その具体的な内容は，続く 3 章で，特に重要と思われるものに絞り紹介する．本稿の目的は，オンライン座談会によって得られた当該研究領域の第一線で活躍する研究者による語りを分析することではなく，その実施記録を誰もが閲覧できる形で公開するという試み[1] を通じた研究領域の透明性の向上の可能性を提示することであり，この点については 4 章で考察を行う．総合知の概念に特徴づけられるように自然科学と人文・社会科学の連携が重要であることは間違いないが，多様なステークホルダーを包摂し，その相互的なインタラクションを通じて「共創」を実現するという観点からは不十分であり，だからこそ研究者間で実現した連携に満足することなく，その先を見据えた形で活動を展開していくことが必要だと考えられる．

2. オンライン座談会「分子ロボットの未来」とその実施記録について

オンライン座談会を実施したことで得られた研究者の語りを見ていく前に，本章ではまずその実施概要と企画趣旨について説明する．

2.1 実施概要

オンライン座談会「分子ロボットの未来」は 2022 年 3 月 9 日にオンライン会議システムを用いて実施された（写真 1）．主催は前述の「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

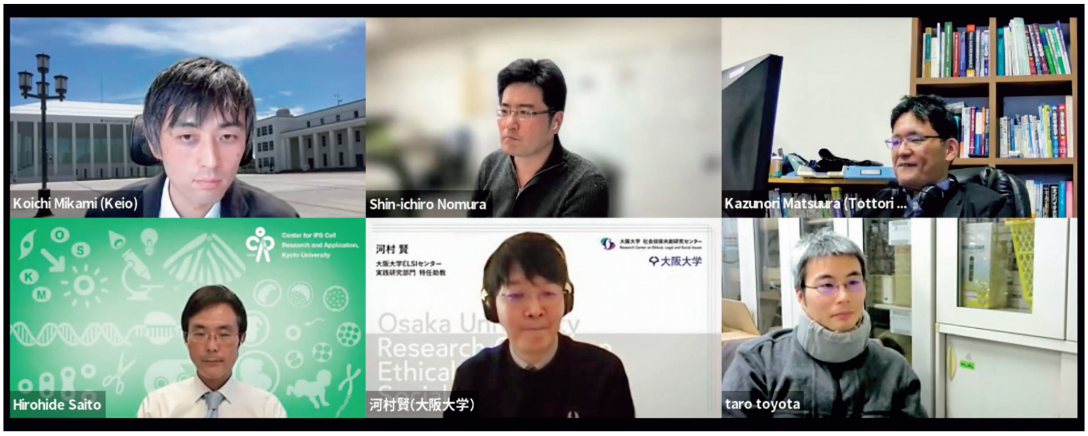

写真１　オンライン座談会の様子

の構築」プロジェクトで，その中でも「責任ある」研究課題検討グループ（グループリーダーは本稿の筆頭著者）が企画・実施を担当した．主たる目的は，萌芽的な研究領域である分子ロボティクスについて，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などについて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というもので，参加した分子ロボティクスの研究者にもそのように依頼文で伝えている．加えて，依頼文には，「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」当日は話してもらいたいことも記載した．このような研究者の個人的な想いや期待は，RRI 実践の要となる「科学やイノベーションに対して私たちは何を望むのか」(Owen et al. 2012: 754）という問いに直接的につながるものだが，一般的に研究者同士の何気ない会話などに現れるのみで社会に対して発信されるものではない．一方で，これまでの連携を通じて実施する側の人文・社会科学の研究者はそのような想いや期待に触れる機会が幾度となくあった．だからこそ，本企画では座談会という研究者の会話を主体とした手法によってそれを記録に残し，あえて社会に向けて発信することを目指した．

座談会に参加した分子ロボティクス研究者は四名で，上記プロジェクトで連携する当該研究領域の研究者と議論を重ねた上で，この研究領域を牽引する立場にあると考えられる PI クラスの研究者をリストアップして参加を依頼した．ただし，うち一名は上記プロジェクトの研究実施者でもある（表１）．また，これまでにこの研究領域の研究者と継続的に連携してきた人文・社会科学の研究者（本稿の共著者）にもサポート役として参加してもらうこととなった．当初は二時間として企画されたが，途中で短い休憩をとったこともあり，結果として予定より二十分ほど超過して終了した．会話は基本的に司会（本稿の筆頭著者）からの質問に参加者が自由に回答する形式で進められた．ただし，一つの質問に必ずしも全ての参加者が回答したわけではなく，誰かの回答を受けて他の参加者がさらに発言するなど，全体を通じて会話の流れを断ち切らないことが重視された．今回座談会がオンラインで実施された背景には，2020 年に始まった新型コロナウィルス感染症の拡大があるが，二年以上の月日が流れる中で対話形式の企画をオンラインで実施する経験が蓄積されてきた（奥本 他 2021; 田中 他 2021; 水町 他 2021）ことに加え，本稿の著者二名を含めて今回の座談会に参加するような研究者たちはオンラインの会議や研究会に慣れてきた状況もあり，限られた参加者が単一のコミュニケーション空間で会話する今回の企画では各参加者の接続環境も含めて特に問題は予

表１　オンライン座談会「分子ロボットの未来」参加者リスト（五十音順）

氏名 （○は司会）	主な所属先	自然科学／人文・ 社会科学の区分
河村　賢	大阪大学　社会技術共創研究センター	人文・社会科学
齊藤　博英	京都大学　iPS 細胞研究所	自然科学
豊田　太郎	東京大学大学院　総合文化研究科	自然科学
野村　M. 慎一郎	東北大学大学院　工学研究科	自然科学
松浦　和則	鳥取大学大学院　工学研究科	自然科学
○見上　公一	慶應義塾大学　理工学部	人文・社会科学

見されなかった．オンライン会議システムを用いた際に同時に複数のコミュニケーションが成立しないなどの課題が指摘されてはいるものの（水町 他 2021），対談の様子をリアルタイムで見せるのではなく，座談会記録を残して公開するという今回の目的からは，発言者の特定も容易であり，使用したシステムに録画機能が備わっていることはむしろメリットであった．また，各参加者が日常的に研究活動を行う場から参加することができた点もメリットに感じられた．予め参加者全員から当日の会話の内容を公開することの了解を得ており，使用したシステムの録画機能を用いて録画を行い，後日書き起こした記録の原案を参加者に確認してもらった．個人情報や研究活動などに支障をきたす可能性のある内容など，最小限の修正をしてもらった上で，内容を変えないように留意しながら読みやすくするための軽微な編集を行ったものが公開された『実施記録：座談会「分子ロボットの未来」』という資料（見上 他 2022，以下『実施記録』と記す）である．本稿で紹介する内容も，この『実施記録』を元にした記述である．

2.2 未来についての語り

今回実施したオンライン座談会は，その題名にも表されているように，特に研究者による未来に向けた語りに重点をおいて企画されている．これには主に二つの理由がある．

まず一つ目に，対象とする分子ロボティクスという科学研究領域がまだ萌芽的な段階にあり，その研究の多くは基礎研究として位置付けられているため[2)]，社会との接点を考える際は必然的に未来に目を向けることになるという事情がある．これまでになされてきた議論でも，主として遺伝子組換え技術や合成生物学，再生医療などの過去のバイオテクノロジー研究の事例を参照する形で倫理的・法的・社会的含意（Ethical, Legal and Social Implications，以下 ELSI と記す）の検討がなされてきたのも，このような社会との接点がまだ具体的に定まっていないという当該研究領域の事情に起因するものである（分子ロボティクス研究会 2019; Yoshizawa et al. 2018）．

もう一つは RRI の理念を積極的に反映するという理由である．1990 年にヒトゲノム計画の一環として米国で実施された ELSI 研究プログラムでは，そこでなされた様々な議論の内容をヒトゲノムの解読という研究活動に反映させるルートが存在せず，外部からの検証にとどまっているとの批判の声が上げられた（Owen et al. 2021; 見上 2021）．その反省を踏まえ，RRI の議論では，社会との接点に関する検討がこれからなされようとしている研究開発に影響を持つことが強く求められており，まだ技術的に確立されていない，研究活動の早い段階から先見的な議論を行うことで，多様なステークホルダーのインタラクションを通じた「共創」の実現が目指されている（Owen et al. 2021; 吉澤 2013）．そして，そのような議論は，結果として科学技術を通じた「未来に対するケア」を意味することになるという（標葉 2020; Stilgoe et al. 2013）．これまでの分子ロボティクスと社会との関係に関する検討でも，未来に向けた言説に着目した試みがなされてきたが（分子ロボティクス研究

会 2019; Yoshizawa et al. 2018），今回のオンライン座談会でもそのような RRI の理念を反映させると同時に，今後の「共創」に向けた契機とすることを念頭に，一般的に知られることが少ない研究者たちが抱く未来に対する考えを言説化し公開することによって，当該研究領域の透明性を高めることに注力した[3]．

特に後者については，このオンライン座談会のような試みが「共創」の実現に向けてどのような可能性を持ちうるのかという議論に深く関係するものであることから，4 章の考察でその妥当性に立ち戻って検討を行う．

3. 未来から現在へ

『実施記録』として作成された資料は 30,000 語を超える内容となっており，その内容からは参加した四名の研究者それぞれの考えを様々な観点から垣間見ることができる．本章では，その中でも特に分子ロボティクスに対する各研究者の考えが読み取れると思われる特徴的な箇所を四つほど切り出して紹介する．

3.1 分野との関係

最初に着目するのは，研究者の分子ロボティクスという研究領域における自分の立ち位置の捉え方である．司会が「分子ロボット研究者」として扱われることに対してどう感じるかについて質問をしたところ，全員が少なからず違和感があると回答した．既に説明した通り，準備段階で他の分子ロボティクス研究者とも参加者の選出について議論を行っていることに加え，四人とも分子ロボティクス研究者として参加の依頼を受けていることから，自分の研究がこの研究領域から外れるものだと考えているわけではないことは明白である．その理由はむしろ，下記の二人の発言にあるように，作成が目指される分子ロボットのあり方と現在取り組んでいる研究の乖離に起因している．

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．（…）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．（…）

齊藤：僕も躊躇しますね．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ところがあります．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れども．（…）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．

（見上 他 2022: 12–13）

特に興味深いのは齊藤氏の回答の最後の一文である．研究者は自分の研究内容を相対化することで研究者としてのアイデンティティを捉えているが，それでも「こういうとき」，つまり研究領域の「外」に位置する人文・社会科学の研究者と連携するような場においては，ある程度はそれが曖昧になることも許容できるという．

3.2 生命の起源

分子ロボティクスではシステム化された分子レベルのロボットを作ることが目指される一方で，それを目指した研究をすることになった経緯やモチベーションについて研究者に尋ねると，生命の起源を理解したいという声が頻繁に聞かれる．分子レベルではあってもロボットに類するものの構築と生命の起源の理解はそれぞれ工学と科学という異なる営みとして理解されることが多いが（McCarthy 2006），それらがこの研究領域においてどうつながるのかは，研究の未来に関わる重要な論点の一つと考えられる．そして，この論点について研究者間で捉え方に微妙な違いが生じている．

齊藤：（…）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．（…）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，（…）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．

（見上 他 2022: 15）

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ということです．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．

（見上 他 2022: 15）

ここでの二人の語りからは，科学の営みと工学の営みとを対比したうえで，それぞれが支え合って成立する研究領域として分子ロボティクスを位置付けていることが読み取れる．これは科学と工学の接点に位置づけられる合成生物学にも共通するものである（Calvert 2013）．この二人の語りが興味深いのは，工学のアプローチをどのように特徴づけるのかという点において，若干の違いが見られることである．モノをボトムアップで作り出すことを工学の特徴として理解する齊藤氏に対し，豊田氏は現象や反応をシステムとして制御するという発想に工学の特色を見出している．さらに，制御を強調する別の研究者は，工学的な制御の可能性を拡大していくことと生命の起源を理解することがつながりを持ちうるのは，この研究領域がまだ発展段階にあるからではないかという見解を示している．

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．（…）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，（…）ブラックボックスが小さくなりましたという状態で．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れば，今度はそれを制御できるようになるという話ですよね．（…）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，それ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 他 2022: 16）

野村氏はこの他にも，細胞を分子ロボットが目指す目標として位置づけられるかという質問に対し，それは目標ではあるものの「発展的に分かれていくもの」であって，人工物である分子ロボットは細胞にないような機能を持たせられることが魅力であるとも回答している（見上 他 2022: 33）．

3.3 応用

前述の通り分子ロボティクスはまだ基礎研究として位置付けられることが多い．一方で，これまで紹介してきた内容にも見られるように，人工的にデザインした分子レベルのロボットという観点からは，何らかの社会的に有用な機能を持たせることが想定される．では，それはどのような機能だろうか．これは研究者がどのような応用を見据えているのかという問いに置き換えることもできる．この問いに対して研究者は必ずしも応用に向けた明確なビジョンを持っているわけではないものの，今のところイメージしやすいのは医療分野だという意見で一致している．

野村：（…）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，（…）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のになるんじゃないかなと考えています．（…）

豊田：（…）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ね．（…）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もいいのかなと思っています．（…）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．

（見上 他 2022: 22–23）

研究者が医療分野での応用をイメージしやすいことの背景には，生体分子に関わる研究をする中で接点を持っている研究コミュニティから受ける影響があるということが，次の語りからうかがえる．

齊藤：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，目的の腫瘍にいって――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．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．（…）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．

（見上 他 2022: 24）

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んですが，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て．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ね．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，そんなの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．

（見上 他 2022: 25）

基礎研究を行う研究者にとって，自分の研究が将来どのような応用へと繋がっていくのかは，自分だけで道筋をつけることではなく，おかれている研究環境との関係においてその糸口が提示されることでその可能性が広がっていくという側面が強いのかもしれない．

3.4 学生の巻き込み

実施したオンライン懇談会の参加者はPIクラスの研究者だったが，そのような研究者の研究環境として忘れることのできない要素に一緒に研究を行う学生の存在がある．研究室配属にあたり各研究者は学生に自分の研究室でどのような研究ができるかを提示する必要があり，そこにも研究者が抱く研究の未来を垣間見ることができる．

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じゃなくて，「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るんですが，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なと思っています．

（見上 他 2022: 16）

齊藤：うちは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．（…）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[4] 出身者

で他大学の子も応募してきてくれるんですが，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．

（見上 他 2022: 17）

野村：うちはやっぱり機械系なので，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．（…）うたい文句としては「何かおもろいことをやろう」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ろ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．（…）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っ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じゃなくて，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，研究をしてみ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．

（見上 他 2022: 18-19）

ただし，これらの回答に見られるように，固定的な未来像を提示するのではなく，学生の興味も把握しながら，自分の研究関心とうまくすり合わせができるように調整がなされている．かといって，学生の存在によって研究室の研究の方向性が大きく変わりうるかというと，研究者自身が進める研究と学生が取り組む課題には多少なりとも乖離があるという．それは日本の研究文化にも影響を受けている．日本以外で分子ロボティクスの研究が盛んなアメリカの東海岸との違いに関する質問に対して下記のような回答があった．

野村：（米国の研究者は）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って．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れども．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．

（見上 他 2022: 12）

今回は学生が取り組んだ課題によって新しい研究の展開に繋がった事例があるかどうかまでは話

が及ばなかったが，研究室は多様な興味を持つ学生と共有された空間であり，研究者にとって自身の研究を多面的に捉えておくことはそのような空間を運営するために必要なスキルとなっている．特に分子ロボティクスのような萌芽的な研究領域は学生の認知度もまだ低いことから，研究者の側がその将来像を積極的に提示する必要があるのかもしれない．

4. おわりに

冒頭で説明したように，今回のオンライン座談会は，分子ロボティクスという研究領域における「共創」に向けた契機とすることを念頭に実施された．社会実装に直接結びつくような研究成果が登場する前の段階から自然科学と人文・社会科学の研究者の連携によって実現されたという点において，旧来の科学技術の ELSI に関する議論とは異なった試みと言うことができるだろう．しかし，RRI で理想とされる，多様なステークホルダーの相互的なインタラクションを通じて望ましい未来を築くという観点からは，今回の活動がまだ特定の専門家に閉じられた限定的なものでしかないことも事実である．だからこそ，このような試みは，それ自体に重要性があるというよりも，それが行われたことによってその先にどのような取り組みの可能性が生じたのかという視点から，その意義が検証されるべきだろう．

本稿で紹介した内容で特に興味深かったのは，研究者間での研究内容の捉え方やニュアンスの違いである．第一線で研究を行う研究者の声を言説化するのであれば，必ずしもこのような座談会という形式を取る必要はなく，例えば一般的な社会科学の手法として個別にインタビュー調査を行うことも考えられる．しかし，注意すべきなのは，それが自分の研究領域の「外」に位置する社会科学の研究者に対して話す内容になってしまうということだろう．研究者の実感として紹介したように，研究領域の「外」に位置する者と対峙する時には，普段と少し異なった立ち位置から話をしている可能性がある．研究領域における自分の立ち位置が曖昧になることで，話す内容も一人の研究者としての回答から，研究領域を代表するような発言へと変化することも考えられる．また，インタビュー調査は，オーラルヒストリーなどと異なり，その内容がそのまま資料として公開されることはほとんどない．複数のインタビューの結果を分析して重要な論点を導き出し，それに関連する部分が抜き出されて提示されるのが一般的である．これら二つの要素が重なることで，個々の研究者の考えを読み取れる資料が必ずしも手に取りやすい形では公開されなくなってしまう．これに対して，今回のような座談会という形式であれば，研究者は同じ研究領域の研究者のいる空間で会話を通じて自分の考えを話すことが求められる．結果として，研究者自身も他の研究者との微妙な違いにより強く意識が向くことになり，そのような気づきのプロセスも含めて明示的な形で記録されるのである．そして，そのような違いは「共創」に向けた取り組みにおいて重要な意味を持ちうる．近年の科学技術コミュニケーションの議論において，対話の相手として想定される「社会」や「市民」という存在の内実に目を向けることの重要性が指摘されているが（Bogner 2012），それは「科学者」や「研究者」といった括りについても同様であり，個々の研究者の抱く考えとそれぞれが活動する研究環境のあり方をより具体的に把握することによって，研究領域全体としての透明性も高まり，研究者を含めた多様なステークホルダーの間で実現されるインタラクションの質も向上すると考えられる．

また，そのような研究の内容や方向性に関する考えやそのニュアンスの研究者間での違いは，実は研究者たちも普段はあまり意識していない可能性があり，そのような違いへの気付きは各研究者に省察の機会を与えることにもなる．それを示唆するのが，参加した研究者の一人から後日もらった下記の感想である．

今回の座談会の記録で私が驚いたのは，自分が口にした記憶のないアイデアが記録されていることでした．普段，私は研究アイデアノートにアイデアを書き留めているのですが，そこには記録してなかった内容なので，自分の中ではそれを言語化できていなかったといえます．情熱溢れる先輩研究者に感化してでた発言と思われ，そのことが私の大きな発見でした．また，未来構想をテーマとすると，自然科学者として私は自身の専門だけに立脚した見立てを強調したくなりますが，人文学・社会科学を専門とする二人を交えた議論の場で視野を相対化できる経験を得られたので，本座談会は大変有意義なものでした．

座談会でなされた会話は，RRI の実現に強い関心を寄せる人文･社会科学の研究者がファシリテーターとして掘り下げた結果であり，研究者同士の普段の会話ともまた異なったものである．自分の考えではありながらも，それを日常的に言語化しているわけではなく，このような特別な会話の場が与えられたことでそれが言葉として発せられ，記録に残ることになった[5]．もちろん残された記録が厳密に各研究者の抱く考えを表しているとも限らないし，今後何かのきっかけで考えが変わる可能性は十分にある．たとえそうだとしても，言語化した研究者にとっても，公開された『実施記録』を読んだ人にとっても，今の自分の考えとの共通点や相違点を省察するためのレファレンスポイントが作られたことになる．上記の感想をくれた研究者は，過去に科学雑誌に掲載された他の座談会の内容[6] から刺激を受けたことも教えてくれた．今回のように『実施記録』が作成され公開されたことで，将来には研究領域間の違いや研究内容の発展に伴う時系列的な変化について考察することもできるようになるはずである[7]．

最後に，今回のオンライン座談会で未来に関する語りをその中心に位置付けたことの是非について検討してみたい．既に述べたようにこれは企画・実施をした人文・社会科学の研究者の意図によるものであった．上記の研究者の感想にもあるように，研究領域の現状よりもその未来を語る方が，語りの内容は不確実性を伴うこととなり，研究者個人としての見解が現れやすいと考えられる．さらに，未来についての言説は，それを実現させるための資源の確保を促し，そのための行動を現在時点において具現化させるという観点から，研究領域の形成において重要な役割を果たすとも言われている（Brown and Michael 2003; Borup et al. 2006; Schyfter and Calvert 2015）．本稿で紹介したような，生命の起源の理解との関係や将来的な応用の可能性など，様々に分子ロボティクスという研究領域を紐解く糸口が座談会の会話中で提示されており，RRI で目指される「共創」を実現するために議論すべき論点を見出すことができる．公開された『実施記録』を用いることで，研究者に直接関与してもらえない状況であってもそのような議論を開始することが可能であり，その先にある研究者との相互的なインタラクションにおいても，議論の具体性を高めることにつながると考えられる．これまでの科学技術の ELSI の議論では，人文・社会科学の研究者の関与が研究領域の発展の方向性を狭める傾向が強かったが（見上 2022），「共創」の実現のためには，実現しうる未来の可能性を広げ，社会として望ましい意思決定を行うための基盤を形成する必要がある．今回のオンライン座談会のような試みはその一つの形として評価できるのではないだろうか．

謝辞

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．最後に，座談会に参加して下さった分子ロボティクス研究者の皆様には，改めて感謝を申し上げたい．

注

1）座談会の記録は大阪大学社会技術共創研究センターが発行する ELSI NOTE の一つとして公開されており（見上 他 2022），誰でもダウンロードしてその内容を確認することができる．

2）ただし，新型コロナウィルス感染症に対する新型ワクチンで用いられたメッセンジャー RNA 技術は，分子ロボティクスとも近い技術として理解されており，既に実用化が始まっているという認識を持つ研究者も多く，この点は座談会でも話題に上がっていた．それでも，分子ロボティクスという観点からは，当該研究領域を代表する技術と言えるものではなく，社会との接点を考えるための論点としてそれを中心に議論することはふさわしくないと考えられた．

3）発展のさなかにある研究分野の将来像について自然科学と人文社会科学の境界をこえて専門家が議論した過程を公開する先例としては，英国の ESPRC と AHRC が中心となって起草したロボット倫理原則（ethical principle of robotics）の改訂プロセスが挙げられる．なかでも 2016 年のワークショップにおける倫理原則の改善点についての投票結果とその後の議論の概要を公開した試みは，改訂プロセスを「徹底的でインクルーシブな」ものにすることを目指した点において重要である（Szollosy 2017: 262）．

4）iGEM は International Genetically Engineered Machine Competition という，合成生物学における国際的な学生チームによるコンペティションのことで，その詳細は iGEM のホームページから確認できる：https://igem.org（2022 年 9 月 9 日閲覧）．

5）逆に，人文・社会科学の研究者から見て「面白い」と思う分子ロボット研究の方向性とはいかなるものであるのかといった点についても議論が交わされており（見上 他 2022: 29–33），こちらも記録に残っている．

6）この座談会は 2011 年に合成生物学をテーマとして開催されたものであり，その内容には今回の分子ロボティクスに関係するトピックも含まれている（四方 他 2011）．

7）今回のオンライン座談会を含め，一連の RRI 実践や共創を目指す取り組みによって，当該研究分野の研究者たちが活動する研究環境における人文・社会科学の研究者の存在がより顕在化しているものと考えられる（Bryson 2017; Szollosy 2017）．本稿で紹介したように，研究をする中で接点を持つ研究コミュニティから影響を受けるのだとすると，将来的には人文・社会科学との連携による影響も検証することが可能かもしれない．

文献

Bogner, A. 2012: “The Paradox of Participation Experiments”, *Science, Technology, & Human Values*, 37(5), 506–527.

Borup, M., Brown, N., Konrad, K., and van Lente, H. 2006: “The sociology of expectations in science and technology”, Technology Analysis & Strategic Management, 18(3), 285–298.

Brown, N. and Michael, M. 2003: “A Sociology of Expectations: Retrospecting Prospects and Prospecting Retrospects”, Technology Analysis & Strategic Management, 15(1), 3–18.

Bryson, J. J. 2017: “The Meaning of the EPSRC Principles of Robotics”, *Connection Science* 29(2), 130–36.

Calvert, J. 2013: “Engineering Biology and Society: Reflections on Synthetic Biology”, *Science, Technology and Society*, 18(3), 405–420.

分子ロボティクス研究会 2019:『分子ロボティクス概論: 分子のデザインでシステムを創る』情報計算化学生物学会出版.

科学技術振興機構 2018:「科学と社会の関係の深化」https://www.jst.go.jp/sis/scienceinsociety/（2022 年 9 月 9 日閲覧）.

世界科学会議 1999［2019］:「科学と科学的知識の利用に関する世界宣言（ブダペスト宣言）」『学術の動向』

24(1), 62.
McCarthy, N. 2006: “Philosophy in the Making”, *Ingenia*, 26, 47–51.
見上公一 2021:「『参加のテクノロジー』としての ELSI: ELSI 概念の文脈依存性に関する考察」『慶應義塾大学日吉紀要 社会科学』31, 1–25.
見上公一 2022:「科学技術への人文・社会科学の関与の意味について: 期待の社会学の視点から」『慶應義塾大学日吉紀要 社会科学』32, 51-65.
見上公一・河村賢・齊藤博英・豊田太郎・野村 M. 慎一郎・松浦和則 2022:「実施記録: 座談会「分子ロボットの未来」」『ELSI NOTE』22, 1-34.
水町衣里・工藤充・八木絵香 2021:「新規科学技術をめぐる『オンライン対話の場』の記録」『科学技術コミュニケーション』29, 5–18.
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.
内閣府 2011:「第 4 期科学技術基本計画」https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/4honbun.pdf（2022 年 9 月 9 日閲覧）.
内閣府 2016:「第 5 期科学技術基本計画」https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf（2022 年 9 月 9 日閲覧）.
奥本素子・池田貴子・梶井宏樹・川本思心・小林良彦・種村剛・西尾直樹・朴炫貞・原健一・早岡英介 2021:「『サイエンス・カフェ札幌｜オンライン』の試行: 参加者分析から示唆された可能性と課題」『科学技術コミュニケーション』29, 79-91.
Owen, R., von Schomberg, R. and Macnaghten, P. 2021: “An unfinished journey? Reflections on a decade of responsible research and innovation”, *Journal of Responsible Innovation* 8(2), 217–33.
Owen, R., Macnaghten, P. and Stilgoe, J. 2012: “Responsible research and innovation: From science in society to science for society, with society”, *Science and Public Policy* 39(6), 751–60.
RISTEX 2021:「プロジェクト概要: 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」https://www.jst.go.jp/ristex/rinca/projects/jpmjrx21j4.html（2022 年 9 月 9 日閲覧）.
Schyfter, P., and Calvert, J. 2015: “Intentions, Expectations and Institutions: Engineering the Future of Synthetic Biology in the USA and the UK”, *Science as Culture* 24(4), 359–83.
Szollosy, M. 2017. “Rapporteur’s Report”, *Connection Science* 29(3), 254–63.
四方哲也・加藤和人・岩崎秀雄・上田泰己・竹内昌治 2011:「座談会: 細胞とは何か，生命とは何か―「創る」研究が切り拓く, 生命科学の新しいステージ」『実験医学』29(7)増刊, 18–25.
標葉隆馬 2020:『責任ある研究開発ガバナンス』ナカニシヤ出版.
Stilgoe, J., Owen, R. and Macnaghten, P. 2013: “Developing a Framework for Responsible Innovation”, *Research Policy* 42(9), 1568–80.
田中香津生・喜多亮介・河野理夏子・末廣和夏・須﨑渓介・高梨美佳・髙橋翔太・能勢千鶴 2021:「対談: 中高生宇宙線探究活動『探 Q』でのオンライン研究サポート」『科学技術コミュニケーション』29, 37–54.
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.
吉澤剛 2013:「責任ある研究・イノベーション― ELSI を越えて―」『研究 技術 計画』28(1), 106–22.
Yoshizawa, G., van Est, R., Yoshinaga, D., Tanaka, M., Shineha, R. and Konagaya, A. 2018: “Responsible Innovation in Molecular Robotics in Japan”, *Chem-Bio Informatics Journal*, 18, 164–72.