社会技術研究開発事業
研究開発実施終了報告書

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

研究開発プロジェクト

「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」

Development of an RRI Practice Model for Molecular Robotics
Premised on Researchers Autonomy

研究開発期間
（２０２１(令和３)年１０月１日 ～ ２０２５(令和７)年３月３１日）

研究代表者／Principal Investigator

小宮 健

国立研究開発法人海洋研究開発機構 超先鋭研究開発部門

副主任研究員

KEN Komiya

Researcher, Institute for Extra-cutting-edge Science and Technology Avant-garde Research (X-star), Japan Agency for Marine-Earth Science & Technology (JAMSTEC)

目次

Ⅰ サマリー 2
Ⅱ 本編 5
1. プロジェクトの目標と背景 5
1-1. プロジェクトの達成目標 5
1-2. 研究開発の対象・テーマ、その意義と背景 5
1-3. プロジェクトが考察する根源的問い 7
1-4. プロジェクトの先に見据える将来展望 7
2. 研究開発の実施内容 8
2-1. 実施項目 8
2-2. 実施内容 8
2-3. 研究開発マネジメント 20
3. 研究開発の成果 22
3-1. プロジェクト目標における研究開発成果 22
3-2. プログラム目標における成果・示唆 28
3-3. 成果の活用・展開状況や今後の展望 29
3-4.成果の他分野への適応可能性・知見の一般化可能性 30
4. 研究開発実施体制 32
4-1. 研究開発実施体制図 32
4-2. 研究開発実施者 32
4-3. 研究開発の協力者 34
5. 研究開発成果の発表・発信状況、アウトリーチ活動など 35
5-1. 社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など 35
5-2. 論文発表 42
5-3. 口頭発表（国際学会発表及び主要な国内学会発表） 43
5-4. 新聞/TV 報道・投稿、受賞など 46
5-5. 特許出願 46

Ⅰ サマリー

プロジェクト概要

本プロジェクトは、生体分子で構成された生物と同じ原理で駆動する「分子ロボット」の研究開発を行う研究者コミュニティ自らが中心となって、多様なステークホルダーとの上流からの対話を実践し、より善い社会実装に必要となる条件やプロセスを明らかにしてきた。実践を通じて、自然科学研究者と人文・社会科学研究者の協働により実現する、責任ある研究・イノベーション（RRI）のモデルを構築し、革新的科学技術が人・社会と調和しながら発展していく上で必要な新しい「研究者の自治」と「研究者自身が実施する持続的な科学コミュニケーション」による共創のあり方を提示した。分子ロボット技術のあるべき将来像を市民と共創する科学コミュニケーションの実践と高度化、分子ロボット研究の RRI ガイドラインの策定、分野横断的かつ予見的な ELSI の検討と具体的な研究課題の立案、という３つの活動を柱に、相互連携しながら推進し、成果を国内外に広く発信した。

〈参画・協力機関〉

海洋研究開発機構、恵泉女学園大学、慶應義塾大学、北海道大学、東京大学、東京科学大学、総合研究大学院大学、九州大学　など

〈キーワード〉

分子ロボット、対話実践、科学コミュニケーション、社会実験

結果・成果の概要

本プロジェクトでは、研究開発の初期段階から市民およびステークホルダーと対話を行い、分子ロボットのある未来の社会像を共創するための「研究者自身が実施する持続的な科学コミュニケーション」を、フレームワーク（方法論・資料）の開発も進めながら実践した。そこで得た知見と成果を活用し、RRI の観点を踏まえて分子ロボットの基礎および応用研究を推進するためのガイドラインの策定に取り組み、新しい「研究者の自治」の在り方を提示した。技術開発を行う分子ロボット研究者が主体的に市民と対話する過程において、人文・社会系研究者と密に連携して倫理的・法的・社会的課題（ELSI）の分析を行い、それを分子ロボットの研究者コミュニティにフィードバックしてさらに対話を行う、というサイクルを構築するとともに、他の科学技術分野でも実践するための資料を整備した。以上の成果により、基礎研究から社会実装までが人・社会と調和しながら進展して、より善い社会に貢献するイノベーションを実現するための、自然科学と人文・社会科学の実践的協働のモデルケースを創出し、そのプロセスに関する知見を整理して学会発表や論文等で公表した。

（1）研究者自身による“上流”からの科学コミュニケーション実践のモデルケースを創出

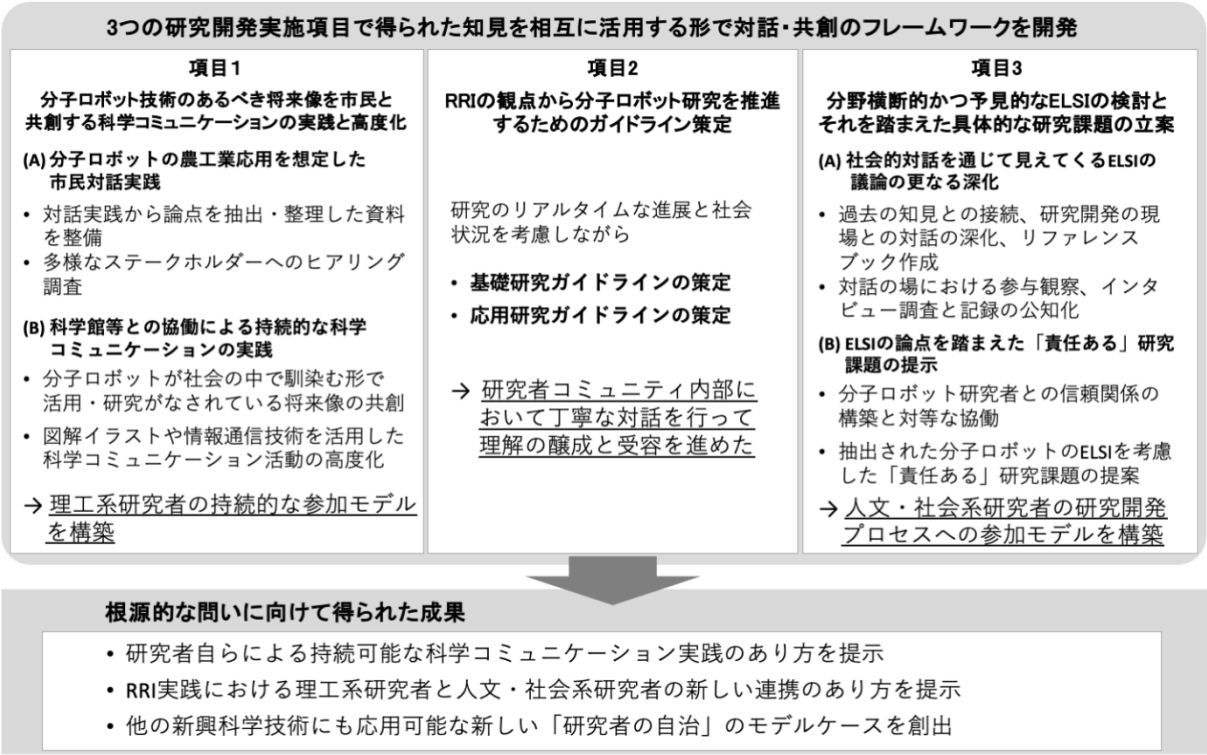
先端科学技術分野の分子ロボット研究者が、研究開発初期の“上流”段階から多様なステークホルダーとの市民対話に取り組み、従来の一方向的なアウトリーチを越えて、より善い社会実装の将来像を共創していく科学コミュニケーション実践のモデルケースを創出した。研究者コミュニティが自ら対話の場をデザインすることで、人文・社会科学の視点だけでは見えてこなかった課題を明らかにするとともに、継続的な対話で ELSI の議論を深めていくための、他の科学技術分野にも適用できる方法論および資料を整備した。

（2）分子ロボットの研究ガイドラインを策定

分子ロボット研究者と科学技術倫理研究者らが緊密に連携して、隔週の定例ミーティングなどで幅広い分野の議論を参照しながら分子ロボット基礎研究ガイドラインを策定し、研究者コミュニティに一定程度受容された。また、医療系倫理研究者と分子ロボット研究者の間で、分子ロボット倫理研究会医療系ワーキンググループを毎月開催して議論を深め、分子ロボットの医療応用に関して専門家の意見を交えて医薬品応用ガイドライン原案を策定した。

（3）「研究者の自治」をテーマとする自然科学の研究者向け冊子を公開

これまでに人文・社会科学の視点からなされてきた科学と社会の関係に関する議論を、自然科学の研究者が自分たちで議論する際に活用できるよう簡単にまとめた冊子、「『研究者の自治』のためのレファレンスブック」を作成してオンラインで無料公開した。



〈プロジェクト実施内容と成果の概要〉

問い合わせ先

国立研究開発法人海洋研究開発機構 横須賀本部
〒237-0061　神奈川県横須賀市夏島町 2 番地 15
TEL：046-866-3811（代表）

Summary

The current project conducted the following ethical and social research in together with a research community of molecular robots whose working principle is the same as living

organisms composed of biomolecules: (a) practices of dialogue with diverse stakeholders from upstream; and (b) clarification of the conditions and processes necessary to obtain better understanding and acceptance by society. The project developed a new model of co-creation between natural science researchers and humanities and social science researchers by means of the dialogue practice premised on "researchers autonomy" and "sustainable science communication conducted by researchers themselves" from the viewpoint of Responsible Research and Innovation (RRI), for contributing to the desirable growth of innovative science and technology in harmony with citizens and society. It promoted the following three activities in expectation of their synergy effects: (1) practice and advancement of science communication to co-create and share the ideal future image of molecular robots with citizens; (2) formulation of RRI guidelines for molecular robot researches; and (3) examination of cross-disciplinary and predictive ELSI and its application to concrete research topics. The obtained results were widely disseminated both domestically and internationally.

Specifically, we engaged in dialogue with citizens and stakeholders from the very beginning of the research and development, and while developing a framework (methodology and documents), we also put into practice science communication conducted by researchers in order to co-create a vision of a future society with molecular robots. We then used the knowledge and results we obtained to formulate guidelines for promoting basic and applied research on molecular robots from the perspective of RRI, and proposed a new form that embodies "researcher autonomy". In the process of molecular robotics researchers spontaneously engaging in dialogue with citizens, we constructed a cycle of analyzing ethical, legal, and social issues (ELSI) in close collaboration with humanities and social science researchers, and feeding the results back to the molecular robotics research community for further dialogue. As a result of the above, we have created a model case of practical collaboration for realizing innovation that contributes to a better society, with progress from basic research to social implementation in harmony with people and society. The findings of this process were published and presented in academic papers and conferences.

〈Joint R&D Organizations〉

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Keisen University, Keio University, Hokkaido University, The University of Tokyo, Institute of Science Tokyo, The Graduate University for Advanced Studies, Kyushu University, etc.

〈Key words〉

Molecular Robot, Dialogue Practice, Science Communication, Social Experimentation

Ⅱ 本編

1. プロジェクトの目標と背景

1-1. プロジェクトの達成目標

本研究における最終的な目標は、人・社会と調和した分子ロボット技術のより善い社会実装を実現するために、責任ある研究・イノベーション（RRI）を目指した市民とのコミュニケーションを基盤とする、自然科学研究者と人文・社会科学研究者による実践的協業モデルを模索し、革新的科学技術が社会に馴染むための新しい「研究者の自治」と「研究者自身が実施する持続的な科学コミュニケーション」による共創の在り方を提示することである。そのため、本プロジェクトを通じて分子ロボット技術の農工業応用を中心的な事例としながら、研究開発当初からの地域ステークホルダーとの対話と共創のためのフレームワークの開発と実践、RRI の観点から分子ロボットの基礎・応用研究を推進するためのガイドラインの策定、および分子ロボットのある未来の社会像を市民と共創するための持続的な科学コミュニケーションの実践と情報通信技術を活用したコミュニケーション活動の高度化に取り組む。これらの活動のなかで技術開発を行う研究者が主体的に市民と対話し、その過程において人文・社会科学の研究者と密に連携して、真に社会に資するイノベーション創出に必須である倫理的・法的・社会的課題（ELSI）の分析を行い、それを RRI の観点から分子ロボットの研究者コミュニティにフィードバックするというサイクルを構築する。分子ロボットを題材として科学技術の基礎研究から社会実装までが、人・社会と調和しながら進展していくモデルケースを創出し、分子ロボット技術の RRI への取り組みに関する情報を国内外に広く発信する。

カテゴリ	☑ ELSI への具体的な対応方策の創出 ☑ 共創の仕組みや方法論の開発 ☐ トランスサイエンス問題の事例分析とアーカイブに基づく将来への提言 ☐ その他（新型コロナウイルス感染症など新興感染症に関する研究開発）

1-2. 研究開発の対象・テーマ、その意義と背景

本研究の代表者や中心となる実施者は、分子ロボットの研究を行う現場の科学者である。分子ロボットは、DNA コンピューティングなどの技術を基盤として、DNA や RNA などの生体分子を素材としたナノスケールのロボットのデザイン・構築・活用を目指す新興科学技術分野である。未来学者であるレイ・カーツワイル氏は 2005 年に、G（遺伝子技術）・N（ナノテクノロジー）・R（ロボット技術）の進展（GNR 革命）が 2045 年にシンギュラリティ（技術的特異点）を引き起こし、世界の社会構造が変革され、価値観や死生観までもが変化すると予測した。生物と同じ生体分子から構成され、化学エネルギーで動作する分子ロボットは本来的に、遺伝子技術、ナノテクノロジー、ロボット技術という３つの側面を備えており、GNR 革命にもっとも近い技術の一つと考えられる。現時点で将来にわたって分子ロボット技術が社会にもたらし得る影響を全て予見することは困難であるが、だからこそ、分子ロボット技術がより善い形で人・社会と調和してイノベーションを創出していくためには、人や環境への適用における社会的課題、デュアルユースの問題、生命への介入における倫理的課題など、数多くの ELSI を探索・分析して対応していく必要がある。

このような問題意識から、2016 年度 JST-RISTEX『人と情報のエコシステム』(以下、HITE) 領域において、本研究の分担者である小長谷明彦を代表として分子ロボット ELSI プロジェクトがスタートした。倫理・社会科学の研究者との協働を経ながら、分子ロボット技術にお

ける潜在的な ELSI の探索と議論（Yoshizawa 2018）、分子ロボット倫理原則の作成と研究者コミュニティによる改訂と公表（小長谷 2020）、ELSI の解説を載せた若手研究者のための教科書を作成する活動などを行ってきた（村田 2019）。これらの活動を通して、分子ロボット技術が適切な社会実装に至るには、より多くの社会との対話に取り組み、その中で次世代の人材を育成しながら活動を継続していく必要性を感じたことが、本プロジェクトの重要な背景となっている。

そこで、具体的な対象として、北海道での分子ロボット技術の農工業への活用を目的としたフィールド研究を、ELSI 検討における地域固有の文脈と普遍性の双方を探求する社会対話実践の起点とした。人工的な生体分子システムである分子ロボットを農工業へ応用するこの取り組みでは、その当事者となる地域農業関係者・流通関係者・消費者らが「“上流”からの市民参加」を行い、現場の懸念や意見の共有、望ましい革新的技術の研究開発のあり方についての意見交換、そして技術活用の将来像についての議論をしながら進める適応的なガバナンスの実現が必要不可欠である。

北海道は、BSE 問題をめぐる風評被害、遺伝子組換え作物（GM 作物）の野外使用をめぐる北海道条例の議論といった歴史的経緯を持つ地域であり、より最近ではゲノム編集作物をめぐる対話実践などが行われ、地域の文脈になじむ形で萌芽的科学技術をどのように活用することができるのか、またその課題は何かという議論が積み重ねられてきた。本プロジェクトではこのような文脈を尊重しながら、対話の中で分子ロボットという革新的科学技術の環境・農業利用の可能性を、当事者である市民らと共に模索する。これまでは研究開発の事後的に行われてきた ELSI の検討を課題が顕在化する前から行い、予見的に探索・分析して対応していくことで、RRI を推進するためのガイドラインの策定、ならびに情報通信技術などを活用した持続的な科学コミュニケーション活動を実現して国内外へ発信する。これらの活動を通じて RRI を真に実践する研究開発のモデルケースを創出し、特定地域での具体的な ELSI を掘り下げることで、他地域への展開ならびに医薬品開発などの他の科学技術にも広く応用できる、普遍的な対話・共創フレームワークの開発と実践を行う。

本研究は JST-RISTEX の HITE 領域「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（代表：小長谷明彦）」の成果を基盤としている。技術開発を行う研究者が中心となり、ELSI が顕在化する前から論点の検討や倫理原則の作成を行ってきた経験を踏まえながら、(i) 分子ロボット技術の農工業分野での社会実装において生じる ELSI という、これまで十分に議論されてこなかった具体的な課題を対象とした対話実践へと発展させたものであること、(ii) このような課題に取り組む上で重要となる多くの研究者の積極的かつ持続的な参加を促す仕掛けも、実験デザインとして研究者コミュニティ自らが設計・実施していくこと、という点において独創性のある挑戦的な課題と言える。

本プロジェクトは、これまでの活動で培った ELSI 研究者らとのネットワーク、さらには「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）」での 2020 年度の企画調査「分子ロボット技術の社会実装に関する RRI コミュニケーション実践の企画調査（代表：小宮健）」を通じて構築した協力関係をもとに、より充実した実施体制を構築して実施した。大阪大学の ELSI 研究センターや、九州大学病院の生命・医療倫理研究者、農業者らとの対話実践の経験・知見を持つ北海道大学の研究者との連携に加えて、社会実験手法の検討に取り組む企画調査「『実験社会』における社会実験化の手法と影響に関する検討（代表：見上公一）」のメンバーも加わり議論を重ねた。その結果、両プロジェクトは相互に補完的な内容と専門性を持っており、共同で実施することによってより普遍的な価値を創出できるという結論に至り、両者が融合したプロジェクト体制に発展したものである。これを分子ロボット分野の若手研究者が PI としてとりまとめる挑戦的なマネジメント体制により、自然科学と人文・社会科学が効果的に協働する研究開発の実施が可能になった。

また、本研究は国内外のこれまでの「“上流”からの市民参加」事例と比較しても、より上

流からの対話実践を試みる点、また過去の多くの事例と異なり対話実践を社会科学者ではなく、理工系の科学者コミュニティが主体となって行う点に特徴がある。これは、今後の科学者の自治のあり方にモデルを提示するという意味においても、大きなインパクトをもたらし得るものである。単に対話を行うだけで終わるのではなく、その成果を体系的に整理してアウトプットし、研究・技術開発現場のプロセスにフィードバックしていく。前述した科学者のコミュニケーション活動参加への障壁については、「持続的な場の設定」というハードルが指摘されてきたが（JST 2013; Shineha 2017）、これを科学者コミュニティ自身がデザインする活動で乗り越えていくという先駆性がある。

1-3. プロジェクトが考察する根源的問い

本研究における根源的な問いは、萌芽的科学技術が社会に根付き、科学技術と人・社会のより善いあり方を実現していく上で「研究者の自治」は必要であるか、必要であるならそれはどのようなものか、というものである。GNR 革命におけるシンギュラリティのように、人類の自然観・生命観を大きく変革し得る分子ロボットという革新的技術が、社会に馴染みながら健全に発展していくためには、研究者と市民の率直かつ建設的な対話を通じた信頼の構築が不可欠である。その上で様々なステークホルダーが不合理な制限や不利益を受けることなく、自身の責任を自覚しながら自律的に活動する先に、科学技術の発展とあるべき社会像の実現を両立することが可能となる。アシロマ会議の事例として知られるように、遺伝子組換え技術が登場した当初、科学者たちは新しい技術のインパクトの大きさを鑑み、技術利用に関するモラトリアム期間を設け、遺伝子組換え技術に関する指針の作成をまず行った。その過程では、議論のスコープは技術的安全性に関する指針形成に収斂し、倫理的議論は重きを置かれなかった経緯がある。しかしながら、アシロマ会議から半世紀を経て、科学技術が持つインパクトは比較にならないほど大きなものとなっている。このような状況だからこそ、本プロジェクトでは新しい研究者の自治の在り方を模索していく。

1-4. プロジェクトの先に見据える将来展望

本研究が見据える社会像は、科学技術の研究開発現場と社会が信頼関係で結ばれ、食・医療・環境など様々な問題を解決するイノベーションが継続的に創出される「共創型」社会である。本プロジェクトは、人類や社会の脅威となるリスクを予見して回避するだけの RRI ではなく、人・社会と調和した科学技術の社会実装のあり方を研究者と市民が共創することが当たり前になり、科学技術の発展とあるべき社会像の実現を両立した状態になるための RRI の実践を目指している。プロジェクトの成果が市民および研究者の双方に活用されることで、社会ニーズが開発現場において適切に把握され、科学技術のもたらす恩恵を最大化しながら迅速かつ公正に共有がなされると同時に、研究者も市民からの科学研究への理解や後押しが得られるなかで、社会の持続的な発展に資する革新的技術を開発することができる、という好循環を生み出す関係が構築された将来を展望している。

2. 研究開発の実施内容

2-1. 実施項目

■項目 1：分子ロボット技術のあるべき将来像を市民と共創する科学コミュニケーションの実践と高度化
■項目 2：RRI の観点から分子ロボット研究を推進するためのガイドラインの策定
■項目 3：分野横断的かつ予見的な ELSI の検討とそれを踏まえた具体的な研究課題の立案

2-2. 実施内容

■項目 1：分子ロボット技術のあるべき将来像を市民と共創する科学コミュニケーションの実践と高度化

社会との対話と共創のためのフレームワークを開発・実践する本項目は、本プロジェクトの軸となるものである。研究代表者のグループが主導し、3 つ全てのグループが緊密に連携しながら、多様な専門性を持つメンバーが協働して実施した。具体的な内容を以下に記述する。

（A）分子ロボットの農工業応用を想定した市民対話実践

分子ロボット技術の北海道地域における農工業への活用を対象事例として、北海道のフィールドにおける地域との対話実践を重ね、社会実装のあるべき姿について農業関係者を中心とする市民との共創に取り組んだ。

RInCA で 2020 年度に小宮らが実施した企画調査では、北海道十勝地区の農業者らをはじめとして数回の対話実践を試行し、その結果の予備的な分析も行った。また、新型コロナウィルスの流行によりオフラインでの対話実践が不可能であったため、ワークショップ形式の対話をオンラインで実施した。人文・社会科学が専門の研究協力者らから対話実践にともなう作業への協力を受けながら、科学コミュニケーション活動のファシリテーションや運営に実績のある合同会社科学コミュニケーション研究所と、ワークショップ内容の設計から運営までを協働して進めた。これにより、ネット環境が充実していない地域の農業者とも建設的な対話を実施することができたほか、比較対照となる農業者以外の市民とも同様の対話を実施し、通常のオフライン対話では難しい様々な地域から参加者を得ることもできた。そこで行った予備的な分析では、研究者からの適切な情報提供と継続的な対話によって、対話の土台となる市民との信頼関係が構築できたと思われるが、一方でなじみのない新興科学技術に対する不信感も見てとれた。2021 年度はそれらの知見を整理し、研究開発現場の研究者が市民対話を実践するためのマニュアルとしても活用できる「対話要点集」を公表することをマイルストーンに設定し、同じく RInCA で実施している標葉プロジェクト（PJ）と共同で作成して、CBI 学会の電子書籍として計画通り公表した。

本プロジェクトでは、分子ロボット技術の社会実装のあるべき姿を市民と共創するために、上記の企画調査での蓄積を活用しながら、農業者や他のステークホルダーの中でも意見の分かれるようなテーマ（農薬の使用、畜産の効率化といった困難な論点）においても、研究開発者とステークホルダーの間で議論を深めていく必要がある。その際には、企画調査で得た知見や「対話要点集」などの本プロジェクトの目的に応じて作成した資料、および連携先と構築した協力関係を活用することで、農業やそれに関わる環境へ適用する技術について、実情に即した予見的な ELSI の探索・分析を行うための対話実践を継続的に行うことができる。また、北海道における BSE 問題をめぐる風評被害や、GM 作物の野外使用をめぐる議論、よ

り最近ではゲノム編集食品をめぐる対話実践など[1,2]、地域固有の文脈に関わる先行研究を参照点としながら対話分析を更に掘り下げることで、他の地域や技術分野にも適用可能な、より普遍的な対話実践および適応的な技術開発のガバナンスに関する方法論の開発が期待できる。農工業への利用におけるより具体的な場面を想定して、起こり得る問題に対する懸念や、社会課題の解決につなげる技術開発のガバナンスのあり方など、より踏み込んだ内容について市民の意見をヒアリングしながら困難な論点を議論するため、ゲノム編集機能を備えた分子ロボットの農業応用を念頭にした、農業関係者とのオンライン対話ワークショップを 2021 年度に開催した。

2022 年度は引き続き、分子ロボット技術の北海道地域における農工業への活用を対象事例として、北海道のフィールドにおける地域との対話実践を重ね、社会実装のあるべき姿について農業関係者を中心とする市民との共創に取り組んだ。

前年度までに実施したワークショップを分析して情報提供用の資料を見直し、市民と研究者の自発的な議論を喚起するための冊子「対話のための遺伝子リテラシー」を作成して、CBI 学会の電子書籍として公表した。また、標葉 PJ と共同で他の過去事例における知見との接続を行って、現地ステークホルダーへのヒアリングやオンライン対話ワークショップでの論点を抽出し、今後の分子ロボット技術に関する ELSI の観点での議論を深掘りする際に、参照点として活用するための資料作成を計画よりも前倒して進め、大阪大学社会技術共創研究センターの発行する ELSI ノートとして公表し、マイルストーンを達成した。

これらの成果を踏まえ、農業従事者と研究者で意見が分かれている、分子ロボットを援用して行う遺伝子技術の農業応用について、企業研究者等のより幅広いステークホルダーを交えて議論する市民講座『分子ロボットと循環農工業 – 持続可能な未来を目指して』を、CBI 学会 2022 年大会において東京工業大学、恵泉女学園大学との共催により会場とオンラインのハイブリッドで開催した。生命科学、メタゲノム解析、分子ロボット、農業倫理の専門家から背景知識を伝えた上で踏み込んだ議論を行うことで、社会実装に向けて対話が必要な新たな論点や、“上流”とは異なるステークホルダーの関心について知見が得られた。

2023 年度は、北海道以外の地域や分子ロボット以外の先端科学技術分野にも適用が可能な、より普遍的な対話実践および適応的な技術開発のガバナンスに関する方法論の開発に向けて、これまでに資料化した知見、および対話実践を継続的な取り組みにする上での分子ロボット研究者らの気づきについて考察を深めた。現状の評価システムにおいて理工系の研究者にとっては取り組むインセンティブがない、研究開発の“上流”段階での市民対話を主体的に実践する上で重要と考えられる内発的な動機づけについて、国際学会の「The 23rd biennial international conference of the Society for Philosophy and Technology (SPT2023)」や、「科学技術社会論学会 第 22 回年次研究大会」の学会セッションにおいて発表して議論し、国内外に発信した。

また、分子ロボットを活用した循環農工業の必要性や妥当性と有効な技術の開発について議論するため、淡路島において有機農業から有機食材を提供するレストラン経営までを展開している企業と連携し、12 月に分子ロボット研究者が現地を訪問して、2 日間にわたり開催した淡路島循環農業ワークショップで有機農業関係者との市民対話を実践した。初日は有機農場の訪問見学と分子ロボット研究者による技術紹介を、二日目は一般市民をパネリストとして、分子ロボットの農工業応用に向けた可能性を企業目線で探求することを目的とした対話集会を行った。分子ロボットは DNA やタンパク質を自己組織化させることで創製される、

[1] 三上，立川，「ゲノム編集作物」を話し合う，ひつじ書房 (2019).
[2] 三上，杉山，高橋，山口，立川，科学技術コミュニケーション, 6, pp. 50-66 (2009).

ナノからマイクロメートルサイズまでの人工の機能性分子システムであり、2030 年代には医薬品応用を中心に 2 千億円以上の市場創出が期待されている。また現在、日本の農業においては化学肥料や農薬の多用によって畑の生態系が破壊されている可能性があり、慣行農業から循環共生圏農工業への移行が必要であることを、北海道十勝地域の農場の例は示唆している。分子ロボット技術を農工業に応用するためには、実際のニーズから出発するマーケットインのアプローチが社会実装実現の近道になると指摘し、直面している問題と、分子ロボットがそれを解決する可能性についてパネリストたちに問いかけて議論を深めた。この議論から、これまで対立軸と考えられてきた有機農業や自然農業とスマート農業を「循環型スマート農業」として統合し、化学肥料や農薬に頼らない持続可能な農法を科学の力で実現することが、取り組むべき課題の一つとして認識された。そこで東工大超スマート社会推進コンソーシアムに参画し、恵泉女学園大学で実践している有機農場と、東工大が実践しているスマート農場の連携も進めた。その他、分子ロボット研究者が養殖事業者を訪問して、赤潮や魚病に苦しむ水産業における分子ロボット活用の可能性についても対話を行った。

分子ロボット技術の開発において日本は基礎研究が盛んであるが、海外では応用を目指す研究者が多く水面下での研究が進んでいる。社会実装の開始に備えてより具体的な応用の場面と課題を明らかにするため、2024 年度は東京科学大学超スマート社会推進コンソーシアムが主催するスマート農業部会に参加し、研究実施者である東京科学大学の山村らとともに、小長谷は有機農業に取り組む恵泉女学園大学の客員教授の立場から、ドローンやロボットを用いたスマート農業技法の有機農業への応用可能性、ならびに有機農法による土壌の科学的分析について意見交換を行った。そこで特定した論点などを項目２のガイドライン策定に活用するとともに、俯瞰した視点から分子ロボット技術の発展や社会受容に向けた考察を進めた。分野融合研究の困難さや革新的科学技術に対する不信感を乗り越えるカギとなるような、他の地域や技術分野にも適用できる普遍性がある知見の言説化に取り組み、RInCA の言説化ワークショップやエッセイ執筆の機会などを活用して、実践を通じて見出したよりメタな課題についても発信した。

（B）科学館等との協働による持続的な科学コミュニケーションの実践

項目１(A)の北海道での対話実践と並行して、分子ロボット分野の若手を含む研究者がより積極的に参加できるような、持続的な科学コミュニケーション活動のあり方についてのモデル構築に取り組んだ。本研究開発の背景にある HITE 領域で実施したプロジェクトの経験からは、まだ“上流”の基礎研究段階にある分子ロボット技術の研究者にとって、すぐにその潜在的なリスクや ELSI を想定することには予想以上の困難を伴うということが見出された。その経験の振り返りから、むしろ敢えて当該技術のベネフィットを最大化するようなロードマップや将来像の作成を行い、そのプロセスを検討する過程を通して潜在的な ELSI への洞察を深めていくことが、“上流”段階からより広い研究者の参加を獲得し、議論の深堀りを可能にするとともに、実際に研究開発の現場で RRI を推進する上で有用な方法論になり得るという仮説を持つに至った。

本プロジェクトでは、それを実践するための場および科学コミュニケーションに関する専門家のリソースとして、科学館等と連携して具体的なコミュニケーション実践を行った。そのなかで以下の二点を実現することを中心に据えた。

(i) 分子ロボットが社会の中で馴染む形で活用・研究がなされている将来像について、来館者と研究者が直接対話し、市民の懸念や期待を肌で感じながら共創を行う。
(ii) (i)のプロセスによって多様な意見を反映することで、研究開発の視点からは出てこない、より善い社会実装にとって課題となる ELSI の予見的な抽出を可能にする。

RInCA で 2020 年度に小宮らが実施した企画調査において、日本科学未来館が公募するオープンラボに標葉 PJ と共同で申請して採択された（実践の場と専門性のリソースを借り受けることは出来るが、実施予算について未来館からの提供はない形）。若手研究者にとって科学コミュニケーションを行う場の不足は、かねてより指摘されてきた問題であるが、そのような課題を考える際、科学館は定常的な科学コミュニケーションの場となり得る市民との重要な接点の一つである。市民の意見を聞き取るために、本研究では目に見えないサイズのロボットが動作する分子ロボット技術のイメージを伝える展示、およびより善い将来像の共創を通して ELSI の論点抽出を行う対話のための展示用ボードのデザインを、科学館スタッフをはじめとする専門家と協働して、綿密な打合せを重ねて作成した。項目 1 (A)で作成した「対話要点集」をはじめとする資料も活用して、市民と直接コミュニケーションする場の設計と対話実践に、若手を含むより多くの研究者が過度の負担なく参加できるように計画した。2021 年度は、オープンラボの試行会を 10 月と 2 月の二回（計 4 日間）にわたって実施し、科学館のコミュニケーター等の専門家と協働して、分子ロボット研究者自身が各回約 200 人の市民とのコミュニケーション実践を行うとともに、リアルタイムテクノロジーアセスメントとして、分子ロボット研究開発についての様々な観点での意見を収集した。この実践を通じて分子ロボットの将来像を共創する対話、および研究者が持続的に実施する科学コミュニケーションのデザインに関する知見を得た。また、情報通信技術を活用して科学コミュニケーション活動を高度化する一環として、分子ロボットの主要部品となる DNA を VR 上で表示して、分子シミュレーションにより触れる体験ができるデモシステムを、次年度のオープンラボ本調査に向けて開発した。

また、分子ロボット研究に関連する複数の学会で本プロジェクトに関するセッションを開催し、知見を分子ロボットおよび関連分野の研究者にフィードバックした。オンラインで開催された「細胞を創る」研究会 14.0 では、一般公開のセッションとして SF 作家やアーティスト、キュレーターらが登壇し、研究者と分野を超えて議論するセッションをオーガナイズした。アートなどの幅広い分野と交流することで、技術開発の将来像を共創する議論の射程や視点が大きく拡張し、セッションの模様を学会開催後も期間限定でオンライン配信した。

2022 年度は引き続き、科学コミュニケーションの場および実践の専門家と連携して、分子ロボット研究者と市民のコミュニケーション実践を行った。サイエンスアゴラ２０２２へブース出展したほか、前年度に実施した日本科学未来館でのオープンラボの試行会の結果をもとに、対話の場をデザインする方法論を改善した本調査を実施して、科学コミュニケーションの高度化に取り組んだ。前年度に開発した VR を用いた分子ロボットのデモシステムを、本調査で行う対話デザインの観点から最適化して対話に活用したところ、特に子供たちの理解を促進するために有効であった。

実際に市民の懸念や期待を肌で感じながら研究者が来館者と直接対話して、分子ロボットが社会の中で馴染む形で活用・研究がなされている将来像を共創する経験から、理工系研究者にとって自分たちが基本とするコミュニケーションの特殊性への気づきが得られた。それらの知見についての検討を行い、研究・イノベーション学会の学会誌で特集論文として公表した。また、これらの成果に至るこれまでの分子ロボット分野における ELSI や RRI に関する取り組みについて、標葉 PJ と共同で検証・分析を行い、“上流”ならではの課題や異分野間の協働における課題を明らかにして、理工系の国際誌に論文公表するとともに、プレスリリースを行って広く社会に発信した。以上の成果により、実践を通じて得た知見を社会科学分野の研究者と協働して詳細に分析し、言説化するというマイルストーンを計画通り達成した。これらの論文に対する反響は大きく、後述する分子ロボット分野における取り組みの新聞記事等での紹介や、JST-CRDS の戦略プロポーザルへの採録につながった。さらに、第６回分子ロボティクス年次大会などでセッションを開催して口頭発表も行い、分子ロボット研究者のコミュニティに共有した。

2023 年度は、対話の場としてのデザインを改善・発展させながら行ってきた、日本科学未来館でのオープンラボにおける、分子ロボットの将来像を市民と共創する取り組みについて、持続的な活動にするための検討を開始した。科学コミュニケーション実践のなかで仮説等を検証するため、オープンラボで得た結果や知見を反映させた議論を促進するパネルを、科学技術に関する図解作成の経験を持つイラストレーターなどの、外部のリソースを積極的に活用しながら試作した。これらの試作パネルを用いた市民対話を企画し、日本科学振興協会（JAAS）の年次大会に展示ブースを出展して、これまでのコミュニケーション実践には参加していなかった、次世代の研究開発に携わる人材である大学院生からも参加を募った。より多様な分子ロボット研究者が参加して対話を実践し、萌芽段階にある先端科学技術研究において RRI を実践する方法論の発展と、モデルケース創出に向けて経験を蓄積した。

本項目では、先端科学技術の開発を行う研究者自身が市民と将来像を共創していくために、研究成果を伝えるアウトリーチではなく、対等な対話を行うための対話の場のデザインと方法論を検討してきた。技術がもたらすリスクが顕在化していない“上流”段階でも、革新的な技術が受容される上では、人々の死生観や自然観に影響を与える得る点に特に注意を払う必要があることが、これまでの科学コミュニケーション実践で示唆された。考察を進めるなかで、具体的には「生きている」「自然」といった言葉の意味や付帯する文脈が、研究開発現場と日常社会で乖離している「境界オブジェクト」である可能性があり、ELSI に関して両者が誤解なく対話を継続して深めていくためには、そのようなギャップを埋めるための言説化が必要であると考えられた。当該年度に実施した市民対話では、言説化に向けた知見を収集するために、オープンラボにおける対話で毎回共通してみられた市民の懸念・問題意識や、研究者への要望に関する意見を図解したパネルを作成して追加し、それを分子ロボット研究者が解説した上で対話を行うことで、擬似的ではあるが双方向の継続的な議論を深めていく科学コミュニケーションを試行した。その結果、より深い、もしくは広い話題での対話が行われる場面があった一方で、特定の話題に誘導してしまったり、対話が長くなり過ぎたりするような場面もみられた。このような試行錯誤の経験を重ねることで、持続的な科学コミュニケーションにもとづく、科学技術研究の将来像を市民と共創する RRI 実践の理解が進み、方法論が洗練されていくと思われる。得られた知見について検討し、科学技術の受容に影響する死生観や自然観に関する言説化にも取り組んだ。

2024 年度は、分子ロボットが活躍する社会の将来像を対象とする市民との対話を、継続して実施するなかで得られた知見について、合成生物学などの関連する他の科学技術分野とも共有して言説化を進めるため、「細胞を創る」研究会 17.0 で一般公開セッションを開催した。バイオアートや科学史、動物行動学などを専門とする研究者をはじめ、多くの研究者と意見交換を行って死生観や自然観に関する議論も深めた。社会科学分野の研究者と共同で分析して今後の言説化や論文化に活用するため、議論の内容について文字起こしを行ったほか、知見の一部に関する RInCA エッセイを執筆した。

図解パネルを用いた対話の場のデザインのさらなる改善と、科学コミュニケーションの高度化に向けた方法論の開発として、対話参加者から幅広い観点の議論や疑問を引き出すための、イラストカードを用いたコミュニケーションツールを試作した。これらのツールを活用して今後も市民対話を重ね、分子ロボット技術特有の ELSI 課題の抽出と得られた知見や関連資料の公表に取り組み、先端科学技術分野の研究者自身が行う持続的な科学コミュニケーション実践のベストプラクティスを創出していく。

■項目 2：RRI の観点から分子ロボット研究を推進するためのガイドラインの策定

本項目では、項目 1 で得た多様な ELSI 論点を踏まえながら、将来的な分子ロボット技術

の農工業応用および医薬品応用に備えて、分子ロボット基礎研究ガイドラインの策定ならびに分子ロボット応用ガイドラインの策定に向けて、多様なステークホルダーを巻き込んだ議論に取り組む。

分子ロボットの基礎研究は、2012-2016 年度に実施された新学術領域研究「分子ロボティクス」をはじめとして、2016 年度からの NEDO「分子人工筋肉」のほか、複数の科研費課題により推進されてきた。2020 年度からは、学術変革研究「分子サイバネティクス」ならびに NEDO「AI と VR を活用した分子ロボット共創環境の研究開発」といった大型研究プロジェクトが始まり、急速に技術の発展が進んでいる。

一方、新型コロナ禍のなかで、ウィルス由来のエンベロープに RNA あるいは DNA を導入した、新規な原理で作用するワクチンが人体に投与される事態となった。また、脳腫瘍など手術が困難ながん細胞を直接攻撃するウィルス製剤が認可されるなど、生物製剤の実用化も急速に進んでいる。これらの状況は、分子ロボットの研究においてこれまで、倫理的な懸念からタブー視されていた「自己増殖」ならびに「ゲノム編集」などの機能についても、リスクとベネフィットを検討する議論が不可欠であることを示唆している。たとえば、新型コロナウイルス感染症に対するワクチンとして実用化されたmRNA ワクチンの動作機構は、人工的な疑似ウィルスとも言えるものであり、生体分子から構成された「人工物」という点で分子ロボットとも関連が深い。また、がん治療用のウィルス製剤の効果を高めるために、より野生型ウィルスに近い細胞選択機能の開発が求められており、同様の機能は分子ロボット技術でも開発の対象となり得る。

これに加えて、分子ロボットの医薬品応用に関しては 1 型糖尿病を対象とした科研費課題「人工分子膵島細胞の研究」があり、小動物への試験的投与がすでに試みられている。長期的観点からは、分子ロボットのように「感覚」「知性」「運動」機能を備えた生物製剤は、より精緻な細胞認識や正確な遺伝子発現制御を行える可能性を秘めており、DNA や mRNA を標的細胞に運ぶだけの現行のウィルス製剤や mRNA ワクチンを凌駕する、革新的な薬剤の開発が期待される。また、使用の対象を作物とすれば、農薬や肥料に代わる機能を持った分子ロボットの開発も予想される。しかしながら、このような医薬品応用および農工業への応用に関しては、研究の“上流”段階から様々な観点での ELSI の議論とガイドラインの策定が不可欠である。

これまでに分子ロボットの研究者コミュニティでは、HITE 領域のプロジェクトにおいて分子ロボット倫理原則（技術倫理綱領）を策定しており、本プロジェクトでは 2021 年度から分子ロボット基礎研究ガイドライン原案の作成に着手した。上述の技術倫理綱領策定の経験から、実効性のあるガイドラインを作成してそれが受容され、社会にとって望ましい形で技術が発展していくためには、分子ロボットの研究者コミュニティから十分なコンセンサスが得られ、技術を開発する研究者自身がガイドラインの議論や改訂作業を“自分ごと”という意識を持って、継続して行うことが不可欠であると考える。基礎研究ガイドラインの策定に当たっては人文・社会系分野の専門性が必要になるが、理工系研究者が研究の発展を阻害する規制を押しつけられると感じたり、逆に研究の社会受容を進めるために自分以外が行う補助作業であるという“他人ごと”の意識になり、人文・社会系研究者に検討作業を丸投げしたりしてしまうといった、RRI 実践における典型的で未解決な問題を乗り越える必要がある[3,4]。そこで本プロジェクトでは RInCA の標葉 PJ と連携し、企画調査の段階から隔週以上の頻度で行ってきた定例ミーティングを活動の基盤として、理工系研究者と人文・社会系研究者の緊密な協働に挑戦した。さらに、近い将来の社会実装が予測されるなか、基礎研究ガイドラインの策定後、ただちに分子ロボットの応用研究ガイドラインも整備できるよう、分子ロボット研究者、科学技術倫理研究者、医療倫理研究者などが参加する分子ロボット倫理研

[3] Balmer, A. et al., Science & Technology Studies, 28(3) pp. 3- 25 (2015).
[4] Mikami, Ema, Minari, Yoshizawa, Technology and Society: An International Journal, 15(1), pp. 86-96 (2021).

究会を CBI 研究機構の下に設立した。2022 年 3 月にキックオフ研究会を開催し、分野を越えた議論とその下地となる交流や意見交換を開始した。

2022 年度は、医薬品応用および農工業応用を想定して、分子ロボットの実用化研究を社会にとって望ましい形で推進するための倫理的課題について論点整理を行った。医療応用と農工業応用ではリスクとベネフィットの比重が大きく変わるため、一方の応用での倫理的規範が他方の研究の足かせにならないように留意して議論を進めた。分子ロボット基礎研究ガイドラインについては、科学技術倫理研究者と共同で前年度の議論をさらに深める検討を行い、科学者の責任に関する幅広い分野の過去の議論とも接続しながら、基礎研究ガイドライン原案を作成した。項目 1 (A)で前年度に実施した、ゲノム編集機能を備えた分子ロボットの農業応用に関するオンライン対話ワークショップを分析して得た知見なども活用して、これまで倫理的観点からタブー視してきた問題にも踏み込み、どのような条件であれば基礎研究が推進できるかといったより具体的な議論を行った。項目 1 (A)でも述べた通り、市民が農業分野の遺伝子関連技術について話し合うときに拠り所となる、知識のミニマムセットとして活用できる資料「対話のための遺伝子リテラシー」を CBI 学会出版より刊行した。

応用研究ガイドラインに関しては、分子ロボットの医療応用を念頭にガイドラインを議論する場として、第 6 回分子ロボティクス年次大会で開催した分子ロボティクス倫理セッションや、第 2 回分子ロボット倫理研究会での講演などを通じて情報の共有と議論を行い、コミュニティへの周知や組織化を図った。

2023 年度は前年度から引き続いて、本 PJ の研究協力者でもある科学技術倫理研究者の標葉 PJ・河村らと基礎研究ガイドラインの検討を進め、より多くの研究者と異分野間で議論を行い、分子ロボット基礎研究ガイドラインを策定した。そこでは、分子ロボット技術倫理綱領で示した倫理原則を、技術発展の最新の動向も踏まえて具体化するために、個々の文言レベルまで詳細な議論を協働して行った。ガイドラインを実効性のあるものにするには、分子ロボット研究者のコミュニティに広く受容されるように、コミュニティ内部において時間をかけて丁寧に対話を行うことが必要である。第 7 回分子ロボティクス年次大会で倫理セッションを開催し、基礎研究ガイドラインについて周知して議論を行うことで、研究者コミュニティに一定程度受容された。相互理解を深めるために、拙速を避けて対話の機会を繰り返し持つという方針で取り組んだことで、当初計画よりは遅い時期となったが、ガイドラインの策定および研究者コミュニティの受容というマイルストーンを達成した。ただし、技術倫理綱領と比べてガイドラインは文章量が多く、内容の詳細までコミュニティ全体に理解・受容された状況ではないと考えられる。今後は分子ロボットの研究者コミュニティが主体的に内容を精査し、必要があれば改訂などを検討していくことが望ましい。

応用研究ガイドラインの策定に向けては、3 月に開催した第 3 回分子ロボット倫理研究会において、遺伝子操作および自己複製機能を有する分子ロボットの倫理的課題を掘り下げるために、分子ロボット技術と関連の高い自己複製機能を持つ mRNA ワクチン（レプリコン）を題材として、医療応用上のリスクとベネフィットのトレードオフについて議論し、医薬品応用における論点抽出をこころみた。さらに、同じく 3 月に行われた分子ロボット倫理研究会 医療系ワーキンググループのワークショップでは、当該ワーキンググループでこれまでに実施してきた対話集会の総括を行って、今後に応用研究ガイドライン原案を作成する活動の方向性について意見交換し、分子ロボット研究者と医療倫理研究者との連携および相互理解を深めた。また、項目 1 (A)で述べた企業と連携した淡路島循環農業ワークショップでは、応用研究ガイドラインの観点からも対話を行った。

2024 年度は、前年度までの取り組みを継続して行った。分子ロボット基礎研究ガイドラインについて、研究者コミュニティへさらに浸透を図るため、第８回分子ロボティクス年次大会で倫理セッションを開催し、策定プロセスにおける文理協働に関する講演と議論を行った。分子ロボットの医薬品応用に関して医療倫理研究者との対話を継続し、10 月には分子ロボット倫理シンポジウムを開催して議論を深め、より具体的な医療応用の場面での ELSI 論点を整理した。これまで定期的に行ってきた、医療倫理研究者と分子ロボット研究者との意見交換の内容を反映して、分子ロボット医薬品応用ガイドライン原案を策定し、マイルストーンを達成した。また、農工業応用に関しても、東京科学大学超スマート社会推進コンソーシアムが主催するスマート農業部会に参加し、分子ロボットを農業応用する場面での論点を明確化した。その他に、本プロジェクトの取り組みをモデルケースとして今後に発信していく準備の一環として、基礎研究ガイドラインの英訳を進めており、他の科学技術分野の研究者らもアクセスしやすい公表の形を検討している。

■項目 3：分野横断的かつ予見的な ELSI の検討とそれを踏まえた具体的な研究課題の立案

本プロジェクトでは、その基盤となった HITE 領域のプロジェクトおよび RInCA の企画調査の段階から、社会との対話実践や科学コミュニケーション活動を、分子ロボット研究の研究者が中心となって主体的に行うべきものと位置づけており、その経験を通じて、ELSI の検討と望ましい適応的な科学技術ガバナンスの実現がなされることが想定されている。このような考え方は理想的である一方で、他の分野でも今後、同様の考え方のもとで社会との対話実践が積極的に行われ、社会として望ましい研究開発の方向性が模索されるとは限らない。加えて、日本では科学技術イノベーション基本法が施行され、人文・社会科学が科学技術イノベーションの推進において果たすべき役割も注目を浴びている。これらを踏まえて、技術開発を行う研究者の自主的な取り組みに対して、人文・社会科学の研究者がどのような形で支援あるいは参加することが望ましいのかについて、実際の協働のなかで検討を行うこととした。そのための具体的な活動としては、(A), (B) 2 つの計画を実施した。

（A）社会的対話を通じて見えてくる ELSI の議論の更なる深化

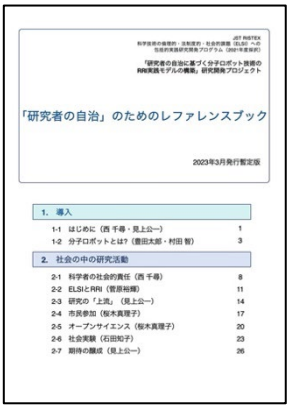
科学技術、特に生命科学に関する ELSI の議論は、その概念が登場した 1990 年代から現在に至るまで、主として人文・社会科学の領域で研究の蓄積がなされてきた。ヒトゲノムの解析に始まり、遺伝子組換え技術やゲノム編集技術、さらには幹細胞研究やナノテクノロジー、合成生物学、そして人工知能などの技術に関してなされてきたこれまでの議論は、分子ロボット技術の ELSI を検討する上でも重要な示唆を与えると考えられる。特に、分子ロボット技術は将来的に自己複製や、生物の遺伝子発現制御に関わる研究開発の可能性も検討されていることから、上記のような過去の議論との接続がより一層重要になると予想される。

ELSI をめぐる先行する議論の一部は技術開発を行う研究者にも知られており、本プロジェクトで実施する社会的対話実践や、科学コミュニケーション活動にも反映されている。しかし、技術開発を行う研究者の自主的な活動として、そのような実践や活動の中で新たに見えてきた論点も含め、過去の議論を踏まえた分野横断的な分析まで行うことは負担が大きく、必要な専門性という点からも大きな困難があると考えられる。活動のハードルが上がると、たとえ本プロジェクトで分子ロボット研究に関する ELSI の議論や、ガイドラインの策定が成功したとしても、そこで構築された対話・共創フレームワークのより広範な普及は望めない。また、対話実践に参加する市民が抱える懸念の中には、言語化されにくい事柄もあると考えられ、それらを細かく適切に拾い上げるためには、人文・社会科学で培われてきた調査

手法も適宜活用する必要がある。

これらのことを踏まえて、項目１で実施される北海道地域における社会的対話実践から見えてくる ELSI の論点を中心として、分子ロボット研究の ELSI について、過去の ELSI の議論との関係を検討しながら人文・社会科学の視点での更なる分析を行い、項目１および項目２の活動に参加する研究者たちにその結果をフィードバックすることとした。2021 年度はまず、これまでに HITE 領域のプロジェクト、および小宮らによる RInCA の企画調査で行われてきた対話実践を通じて明らかになった課題を整理し、過去のどのような議論と接続して検討することが望ましいのか、また分子ロボット技術に特有の論点は何かについて、洗い出しの作業に取り組んだ。分子ロボット研究者が主体となって実施する本プロジェクトの活動の中で、考慮すべきと考えられる ELSI の論点をリストアップすることを目的として、分子ロボット研究で中心的な立場にある分子ロボット研究者４名による座談会「分子ロボットの未来」をオンライン・非公開で開催した。また、「研究者の自治」を目指した本プロジェクトを通じて、人文・社会科学の研究者がどのような役割を果たせるかを検証するため、プロジェクト後半で活動の詳細を振り返ることを前提とした、記録方法に関するワークショップをグループ内で開催した。さらに、社会的対話の手法の一つとして、見上らによる RInCA の企画調査で検討を行った社会実験について、その可能性と課題についての検討結果をまとめた論文の執筆を行った。

2022 年度は前年度に実施した、これまで分子ロボット研究に関してなされてきた対話実践によって明らかになった課題の整理と、分子ロボット研究者による研究の未来に関する座談会の語りを踏まえて、分子ロボット研究の現状と方向性を把握した上で、実際に分子ロボットに関連する ELSI の論点を検討する作業を開始した。明らかになった論点のうち、項目１の市民との対話実践や科学コミュニケーション活動、項目２の基礎研究・応用研究ガイドラインの策定において、考慮されることが特に望ましいと考えられる複数の論点について情報をまとめ、それらの活動を担う分子ロボット研究者に提供するための資料作成を開始した。その際に、分子ロボット研究の ELSI について、異なる研究領域の過去の ELSI の議論を踏まえた分野横断的な分析を行った。人文・社会科学の調査手法を活用して、対話実践に参加する市民が抱える懸念を細かく適切に拾い上げるとともに、項目１および項目２の活動を行う研究者たちや、広く分子ロボット研究を実施する研究者コミュニティに対して、どのように結果をフィードバックし、人文・社会科学の視点を共有していくことが望ましいのかを確認するため、まずは試験的なミニレポートを作成した。本プロジェクトが掲げる「研究者の自治」の実現のためには、これまでに科学技術の倫理的・法的・社会的課題に取り組んできた人文・社会科学の研究者との連携が重要である。人文・社会科学において議論されてきた内容をまとめ、使われる用語についても分かりやすく解説された資料となるよう、ミニレポートに記載する情報の質や記載の仕方について検討を行った。対象とする ELSI 論点の優先順位や、項目１と項目２で実施される活動との関係性を確認した上で、複数のミニレポートを作成し、それらを取りまとめて「『研究者の自治』のためのレファレンスブック（2023 年 3 月発行暫定版）」としてオンラインで公開した。また、作業を進める過程でレポート作成の手順を明確化し、次年度以降その内容をさらに充実させるための準備を進めた。実践活動においては、社会的対話を促進して ELSI の議論を深化させるためには、まずは当事者である分子ロボット研究者と、これまで科学と社会との対話や ELSI などについて議論してきた人文・社会科学研究者の間で、コミュニケーションが円滑になされることが不可欠であることが示唆された。レファレンスブックはそれを支援するためのツールとなるものであり、第２回分子ロボット倫理研究会での口頭発表などを通じて、広く関係者に対して情報共有を行った。


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（2021年度開発）

「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

「研究者の自治」のためのレファレンスブック

2023年3月発行暫定版

1. 導入
1-1 はじめに（西 千尋・見上公一） 1
1-2 分子ロボットとは？（豊田太郎・村田 智） 3
2. 社会の中の研究活動
2-1 科学者の社会的責任（西 千尋） 8
2-2 ELSIとRRI（菅原裕輝） 11
2-3 研究の「上流」（見上公一） 14
2-4 市民参加（桜木真理子） 17
2-5 オープンサイエンス（桜木真理子） 20
2-6 社会実験（石田知子） 23
2-7 期待の醸成（見上公一） 26

その他に、前年度に開催したオンライン座談会「分子ロボットの未来」について、録音データの書き起こしを作成して編集作業を行い、大阪大学社会技術共創研究センターの発行する ELSI ノートとして公開したほか、その内容について第 6 回分子ロボティクス研究会でポスター発表を行い、分子ロボット研究者に対して取り組みを紹介した。研究室主催者レベルの研究者によるこの座談会を受けて、分子ロボティクス分野で活動する大学院生による若手座談会を年度末に開催した。また、本項目を進めるグループでは、個々の活動内容に応じたオンラインミーティングに加えて、３カ月ごとにグループ全体のミーティングを実施して、活動状況の報告と計画に関する議論を行った。全体ミーティングの 8 月実施分については、グループ間の連携を深めることを目的として、プロジェクト代表を務める小宮が所属する海洋研究開発機構を訪問し、ディスカッションを行った。

2023 年度は、前年度に暫定版として公開したレファレンスブックについて、その内容をさらに充実させるための検討を行い、新規の項目を追加した暫定版 ver 2.0 を公開した。まず、前年度の暫定版について連携する分子ロボット研究者たちとの議論の場を設け、内容と共に読みやすさの観点からも意見交換を行い、想定する読者層にとって理解しやすい記述となっているかどうかを確認した。分子ロボット研究者からのフィードバックの結果を踏まえ、最終版の作成に向けて修正すべき点をリストアップしたほか、新たに追加する項目を選定して作成の優先順位を検討し、第２部「社会の中の研究活動」に新たに５項目を追加した。また、予定されていた第３部「これまでの議論からの学び」については４項目を完成させて、2024 年 3 月発行暫定版 ver.2.0 として公開した。さらに複数の項目について、最終版の公開に向けた内容の精査や記述の修正などの準備を進めた。

前々年度に開催したオンライン座談会の実施概要をまとめた論文が、査読のプロセスを経て、国内学術誌「科学技術コミュニケーション（JJSC）」に掲載された。前年度に開催した若手座談会についても、録音データの書き起こしを作成して編集作業を行った。

最終年度である 2024 年度は、一昨年度から執筆作業を行ってきた「『研究者の自治』のためのレファレンスブック」を完成させ、CBI 学会の電子書籍として公表した。予定していた項目に加え、本プロジェクトでも繰り返し議論を行ってきた「研究者の自治とは」と、「生命とはなにか」という２つの問いについても、対談の形式で研究者の現時点での考えを収録し記録に残した。これにより、分子ロボット技術の ELSI 論点をリストアップして整理し、それらの知見を研究者コミュニティに提供してフィードバックを受け、広く活用してもらうための資料として完成させるという一連のマイルストーンを達成した。レファレンスブックは分子ロボット研究者だけではなく、関連する研究領域において研究者になることを目指す大学生や大学院生などにも広く読んでもらうことを想定している。人文・社会科学を専門とする執筆者が考える適切な書き方と、想定される読者にとっての読みやすさは必ずしも一致しないことが多い。このため、分子ロボット研究者からフィードバックをもらいながら完成版を作成した。手に取りやすいデザインを意識して体裁を整えたことに加え、執筆作業の振り返りと、本資料が分子ロボティクス分野でどのように活用されることを期待しているのかに関して、プロジェクト全体の視点からの議論を文章化した内容も加えた。一方で、まだ自分で研究を構想したり、その社会的な意義について検討したりする経験の乏しい大学生や大学院生の場合には、記述されている内容がどのような形で自分が関心を寄せる研究と関係するのかを想像しにくい、という課題も明らかになった。そこで本プロジェクトの関係者やそれ以外の分子ロボット研究者にも協力を依頼し、本資料をどう捉えているか、および当該分野における研究や教育への活用の可能性などについて対話を行った。

また、若手座談会の書き起こしを編集した文書を ELSI ノートとして公表した。その他にも、議論の深化に必要となる補完的なデータを積極的に収集するため、分子ロボット分野の取り組みにおいて人文・社会科学が果たしてきた役割について、人文・社会科学の研究者た

ちによる対談の機会も設けた。

（B）ELSI の論点を踏まえた「責任ある」研究課題の提示

これまで科学技術の ELSI の議論が人文・社会科学の研究者に委ねられ、当該科学技術分野の研究者たちが率先してその議論に関わってこなかった理由の一つとして、研究者にとってそのような議論に参加することのメリットが明確ではなかったことが挙げられる。項目１および項目３(A)で実施される社会的対話や科学コミュニケーションの実践、および ELSI の議論の深化も、広く分子ロボット技術が適切に社会に馴染むことが最終的な目標とされており、研究分野としてそのような活動が行われることの重要性は明確であるものの、研究者個人が自身も積極的に関与すべきものという認識を抱くとは限らない。したがって、分野レベルでの活動と並行して、個別の研究者の研究活動への直接的な影響が見えることが重要である。また、人文・社会科学の側の視点からも、単に科学技術の研究開発を進めるための道具となることなく、人文・社会科学の価値観が尊重された形での連携のあり方が模索されなくてはならない。

これらの問題意識を踏まえて、特定の研究グループの研究関心を軸に多様なステークホルダーとの対話の場を設け、そこで見えてきた社会ニーズと、項目１および項目３(A)の活動により抽出された分子ロボットの ELSI を考慮した、具体的な「Responsible（責任ある）かつ Response-able（応答可能）な」研究課題を試案する。このような多様なステークホルダーの関与のもとで研究課題を立案し、研究開発を進めることは、欧米を中心に議論が進められてきた RRI を研究開発の現場レベルで体現することを目指すものであり、本活動は分子ロボット分野で日本におけるモデルケースを作り上げることを意味している。

対話の進め方は、RInCA で見上らが 2020 年度に実施した企画調査「『実験社会』における社会実験化の手法と影響に関する検討」の成果を踏まえ、社会の側が抱える課題を中心に技術開発の可能性を模索するというアプローチをとることとした。2021 年度は、協働する分子ロボット技術の研究グループを特定した上で、3 年間にわたる協働の活動内容とその目的を共有し、信頼関係を築くことで活動の基盤を醸成した。まず、理工系の研究者と人文・社会系の研究者が協働し、科学的な関心と社会的な意義を両立させた RRI のモデルケースを創出するための準備として、活動を共にするパートナーとなる慶應技術大学の分子ロボット関連研究者４名の同意を得て、一年後に活動のあり方について見直すことを前提に定期的な懇談会を開始した。そして、「研究者の自治」を目指した本プロジェクトを通じて、人文・社会科学の研究者がどのような役割を果たすことができるかを検証し、その情報を発信していくことを念頭に、定期懇談会を中心とした活動の記録を残す方法論に関するワークショップをグループ内で開催した。

2022 年度は、学会などが多く実施が困難であった 9 月を除き、定期懇談会を月 1 回のペースで開催した。本項目では、多様なステークホルダーが関与して分子ロボット技術の「Responsible（責任ある）かつ Response-able（応答可能）な」研究課題を立案するという、RRI 実践のモデルケースを提示するとともに、これまでの ELSI の議論で一般的に想定されてきた、人文・社会科学研究者の第三者的な関わり方を批判的に捉え直し、RRI 実践における当事者としての関わり方を提案することを目指している。したがって、最終的に提案される「責任ある」研究課題は、分子ロボット技術の研究者だけではなく、人文・社会科学研究者や対話に参加するステークホルダーの視点からも、その実施に価値が見出されるものでなければならない。

定期懇談会では、研究グループが抱いている研究関心を焦点として、その研究成果が将来どのような場で社会実装されることが想定されているのかを把握することや、関わる主要なステークホルダーを同定することを試みた。基本的に懇談会はオンラインで実施し、人文・

社会科学の視点から「面白そう」と思えたテーマを紹介し、分子ロボット研究としての可能性について意見交換を行うという形で進められた。その中でまずは関心のすり合わせが優先されるべきとの意見が強かったことから、年度の後半は役割を交代し、分子ロボット研究者が面白そうと思うテーマを紹介して意見交換を行う形として、研究者間の相互理解の促進に重点を置いて活動を行った。研究グループや各ステークホルダーが、活動する領域の現状と将来をどのように理解しているかを調査し、その結果を用いて、「責任ある」研究課題を立案するための議題（アジェンダ）の構築を目指した。定期懇談会が 2022 年 1 月の初回開催から中間地点となる 6 月と、1 年が経過した 2 月に振り返りの機会を設け、主催者である人文・社会科学の研究者と、参加する 4 名の分子ロボット関連研究者に個別のインタビューも行い、活動の記録を残した。

実現が期待できる ELSI の論点を踏まえた「責任ある」研究課題を立案するためには、分子ロボット研究の技術的詳細だけでなく、研究者コミュニティの現状や、その中で持たれている長期的なビジョンなどについても理解することが不可欠である。そのための資料を作成する目的で、前年度にオンライン座談会「分子ロボットの未来」を実施した。項目 3(A)でも述べたように、その実施記録は ELSI ノートとして公表した。座談会で話された内容が、人文・社会科学の視点からどのように面白いと思えるのかをまとめ、第 6 回分子ロボティクス年次大会でポスター発表を行い、分子ロボットの研究者コミュニティに共有した。分子ロボット研究者にとっては、これまでに協働して行った作業の中で人文・社会科学の視点を知る機会はあまりなかったが、座談会やポスター発表の機会に、自分たちが日頃抱いている想いや疑問との接点が見つかるなど、異分野の研究者どうしが対等に協働できる研究課題を立案するための基盤となる、コミュニケーションのきっかけとしてこのようなアプローチが有効なことが明らかになった。

2023 年度は、分子ロボット研究者との定期懇談会の活動を継続して行った。これと並行して、参加する研究者の研究室を個別に訪問し、具体的に現在どのような研究活動が行われているのか、どのような関心を持って研究を行っているのかをヒアリングする機会を設けた。また、これまでに行ってきた対話の活動について、それによって何が得られたのか、何が足りていなかったのかを、企画した側である人文・社会科学研究者の立場から総括するため、「分子ロボティクス分野における文理共創の試み」と題した報告書を内部資料として作成した。これまでの活動をどう評価し、どのような点で今後改善ができるのかについてまとめたこの報告書の内容を、参加する分子ロボット研究者に紹介したことで問題意識の共有がなされ、今後どのような形で対話を進めていくことが望ましいのかについて、建設的な意見交換を行うことができた。その内容については、12 月に開催された科学技術社会論学会の年次大会で報告した。

さらに、対話を行ってきた分子ロボット研究者と具体的な共同研究を開始した。そこで行う分子ロボットの研究開発が、本プロジェクトで目指している社会ニーズと分子ロボット技術の ELSI の論点を考慮した、「Responsible（責任ある）かつ Response-able（応答可能）な」研究課題となるように、研究開発の詳細を明確化することを目的として、想定する研究領域に関する先行文献のレビューを行い、分子ロボットがどのような形でデザインされるべきかについての議論を開始した。

これまで 2 年間にわたって実施してきた定期懇談会の活動を通じて、参加する分子ロボット研究者および人文・社会科学研究者の間に共通認識が生まれてきた。最終年度である 2024 年度は、前年度に始まった共同研究の内容を基盤としながら、目標とする「責任ある」研究課題の立案に向けた議論を継続して行った。特に、社会ニーズの反映を前提として、特定の文脈に研究開発の内容を位置づけることが重要であることから、想定する文脈における課題や取り巻く状況を精査するとともに、社会との接点や与える影響を明確にすることに注力し

て、具体的な研究構想をまとめるに至った。以上の成果により、人文・社会系研究者が RRI 実践に当事者として参加するモデルケースを創出するための、理工系研究者と人文・社会系研究者の新しい関係の構築、具体的なテーマについての継続的な対話を通じた相互理解の促進と信頼の醸成、両者が対等に協働して実施する「責任ある」研究課題の共創と共同研究、という一連のマイルストーンを達成した。そのなかで得た知見を発信するために、各種資料の公表と学会での発表を行った。また、研究協力者であるエジンバラ大学の Rob Smith 博士らをはじめ、国外においても同様の問題意識を持って、特定の研究分野との協働を進めている人文・社会科学の研究者が多数いることが明らかになり、本プロジェクトでの活動を論文化して国際的に発信していくことを確認し、意見交換を行った。

2-3. 研究開発マネジメント

■プロジェクト・マネジメントの実施方針と工夫

<u>複数グループ間の有機的な連携・協働や、成果統合の工夫</u>

本プロジェクトは、科学コミュニケーション活動の実践的な取り組みを通じて、社会との対話と共創のためのフレームワークの開発を行う項目１を主導する小宮グループ、農工業や医薬品開発分野での分子ロボット技術の社会実装における具体的な場面での ELSI を検討して、ガイドラインを策定する項目２を実施する小長谷グループ、関連分野で蓄積された議論を踏まえて、ELSI 議論の深化と「責任ある」研究課題を立案する項目３を実施する見上グループで構成される。それぞれのグループが固有の活動に取り組むとともに、分野横断的な検討や多様な専門性を総合した取り組みが求められる項目１において、個々の活動で得た成果や仮説を全てのグループ間で共有して協働することで、３つのグループが有機的に連携し、成果が統合される体制となっている。

<u>研究開発現場との連携・協働に関するチャレンジや、マネジメント上の工夫</u>

科学技術の研究開発を行う現場の研究者にとって、ELSI への取り組みが重要であることは認識されているものの、“新興科学技術”と呼ばれるような萌芽段階の時期に研究を担う基礎研究者が、社会実装する段階の研究開発にも関与することは稀である。そのため、萌芽段階にある科学技術が将来的に人・社会へ与える影響について、社会の側の視点から検討することを求められても、研究者が“自分ごと”として捉えて適切に検討することは難しい。これに対して RRI に取り組むことは、自らが日々行っている研究側の視点から、未来に向けて研究がどのように発展していくべきかを考える中で ELSI も検討することになり、基礎研究者にとっても主体的に取り組む意義が見出しやすい。それでも、研究開発の“上流”段階から予見的に ELSI を検討する取り組みを、開発現場の研究者だけで行うのは困難である。

そこで本プロジェクトでは、自然科学と人文・社会科学の研究者が連携し、分子ロボット分野の研究者が市民と直接対話して議論を深めるための資料作成や、対話を実践する場のデザインに協働して取り組むことに挑戦した。その際、従来のように社会対話実践の企画・実施を人文・社会科学研究者に強く依存する体制では、主体的な RRI コミュニケーションや、研究者の世代を超えて継続する対話活動に発展しない可能性があった。そのため本プロジェクトでは、自然科学研究者が全体をマネジメントする体制をとり、人文・社会科学の知見や専門性を助けとしながら、研究開発現場（研究者）と ELSI が顕在化する場である社会（市民）を直接接続し、人・社会と調和しながら科学技術が発展するモデルケースの創出に取り組んだ。

プロジェクト内外のステークホルダーとのネットワーキングの方針

本プロジェクト代表者の小宮、グループリーダーの小長谷は、分子ロボット分野で同時期に実施された主要な大型研究プロジェクトの科研費・学術変革研究(A)「分子サイバネティクス（2020～2024 年度）」、NEDO「AI と VR を活用した分子ロボット共創環境の研究開発（2020～2024 年度）」にそれぞれ参画していた。本プロジェクトの目標を達成するには、様々な活動への研究者の参加と協力が不可欠である。上記の大型プロジェクトに参画する研究者たちと緊密に連携したことで、ELSI 課題に関する議論や科学コミュニケーション活動において相互に協力し、本プロジェクトの計画を効果的に実施することができた。

また小宮、小長谷ともアカデミックな領域で技術開発を行う基礎研究者であると同時に、RRI を推進するために分子ロボット技術の社会実装までを見据えて、ベンチャー起業などの活動も積極的に行っている。本プログラムが目標とする、科学技術と人・社会が調和する責任ある研究・イノベーションの営みの普及・定着に資する実践的協業モデルの創出に向けて、ELSI についての理論的な検討のみで終わるのではなく、実践的な協働を重視して広い視野で活動に取り組んだ。プロジェクト内および分子ロボット研究者コミュニティ内の協働にとどまらず、産業界も含めたプロジェクト外のステークホルダーとも積極的に連携して、各種シンポジウムの開催や具体的な共同研究の可能性を探り、本プロジェクトの成果を今後の「責任ある」イノベーションの実現につなげるために、ネットワーキングの拡大を推し進めた。

■課題や障壁と、その対応方策

より善い社会を共創する RRI コミュニケーションの実践は、研究者が世代を問わず取り組むべき課題であるが、実際に技術開発を行う研究者である研究代表者・実施者らは、通常の研究・教育活動を行いながら社会との対話を継続する困難さもまた実感してきた。このような研究開発の現場における視点が、研究者が持続的に参加できる科学コミュニケーション実践のあり方について、対話の場の運営も含めた具体的なデザインや、資料の整備とコミュニケーションツールの開発も行う本プロジェクトを計画した背景となっている。競争的環境に置かれている研究者、特にこれから新興科学技術を創出する若手研究者が RRI コミュニケーションを担っていくためには、いかにして時間や実践の場を確保するのかが深刻な問題である。研究代表者らは専門家と適切に連携することで、研究者が使う時間は短くとも効果的な科学コミュニケーションが実現できると考え、企画調査の段階から科学館等の専門家との意見交換や連携を模索し、運営ノウハウを持つ企業と協働してワークショップの企画と実施に当たり、市民と対話する際の実践的な資料の作成にも取り組んできた。本プロジェクトではこれらの経験と知見をもとに様々な外部のリソースも利用して、効果的なコミュニケーションを可能にするパネルやVRデモなどのツール開発も行い、より多くの研究者が参加する RRI コミュニケーション実践を実現した。

本プロジェクトは対話を通じた予見的な ELSI の探索・分析を行うものであるが、市民らと対話する機会を増やすだけでは、議論の深化や方法論の発展は達成できない。研究ガイドラインの策定や成果の発信においては、適切に議論が進むようなフレームワークの設定や、専門知識にもとづく ELSI の抽出と分析が求められる。分子ロボット分野の研究者が主体となって、RRI コミュニケーションを実践する点に本研究の独創性があるが、将来的な農工業や医薬品開発への応用における ELSI を検討するには、必要な専門家との連携が不可欠である。社会科学者との連携についてはまず、それぞれ別の企画調査を行っていた２つのグループが融合した文理協働体制を構築した。さらに、各実施項目の活動を行うなかで専門性が不足していると思われる状況が生じたため、同じく RInCA で実施している標葉 PJ や日比野 PJ と協働して活動を進めたほか、分子ロボット倫理研究会を設立して生命倫理、医療倫理な

どを専門とする研究者らと定期的に意見交換する体制を整えた。より具体的な応用の場面での ELSI の議論を深めるために、東京科学大学循環共生圏研究推進体との連携など、プロジェクト実施期間中にネットワーキングを拡大しながら活動を実施した。

本プロジェクトの実施期間中、前半は新型コロナウィルスの感染が拡大している状況であり、当初想定していたオフラインでの対話実践は困難な状況が続いた。そこで、農業者らとの対話ワークショップはオンラインでの実施に切り換え、科学コミュニケーション活動のファシリテーションに実績のある合同会社科学コミュニケーション研究所と、ワークショップ内容の設計から運営までを協働して進めた。これにより、遠隔地である北海道地域の農業者とも対話を実施できただけでなく、オンライン対話に関するノウハウを活用して多くの有用な知見を獲得することができた。また、副次的な効果として、比較対照となる北海道地域以外の市民との対話を実施した際に、通常のオフライン対話では難しい様々な地域から参加者を得ることもできた。

■プロジェクトを通じた ELSI/RRI 人材の育成

研究代表者らは、各分野の技術内容を理解した上で ELSI やデュアルユースの問題に取り組めるスキルを持つ人材を、研究開発の現場から輩出していくことが望ましいと考えている。各技術分野の RRI を推進していくため、そして高度な人材が流動することでイノベーションが継続的に生み出させる社会を目指すために、研究開発の現場に多様なキャリアパスが確保された状況をつくる必要がある。学生やポスドクなど分子ロボット分野の若手研究者が多く参加する分子ロボティクス年次大会では、倫理セッションを毎年開催して ELSI や RRI に関する動向、本プロジェクトの取り組みとその意義や目指す将来像について伝え、若手研究者を議論に巻き込んできた。その結果、分子ロボットの研究者コミュニティでは ELSI や RRI が当たり前の話題になり、一部の若手研究者は本プロジェクト以外も含め、科学コミュニケーションを行う機会があれば、積極的に参加して対話実践に取り組む状況となってきた。分野横断的な視点が求められる対話実践の経験を通じて、先端科学技術の社会実装にまつわる多様な課題を見渡せる能力が身につき、実際に課題解決を牽引していける ELSI/ RRI 人材を育成するという、当初の目標に向けて着実に進展してきている。今後は、科学技術の研究開発に対する実際の経験と深い理解を持つ人材が、ELSI 研究を専門とする人文・社会科学研究者や政策担当者、その他のステークホルダーと連携しながら問題に向き合い、科学技術の発展によってより善い社会の実現に貢献していくという、プロジェクトの計画時に構想した研究者コミュニティの将来像の実現を目指す。

また、人文・社会科学分野から ELSI や RRI に取り組む人材については、人文・社会科学の素養を身につけるとともに、高度に専門的な先端科学技術そのものへの理解、および研究開発現場の実態についての理解も求められる。本プロジェクトにおいて、自然科学と人文・社会科学の研究者が緊密に連携し、RRI コミュニケーションの実践と分析を協働して行う環境つくることで、若手研究者が異分野の研究に深く関わる機会を提供してきた。その結果、ELSI や RRI のスキルを身につけた広い視野を持つ高度な人材を育成することができた。

3. 研究開発の成果

3-1. プロジェクト目標における研究開発成果

（1）プロジェクト全体としての成果のまとめ、ならびにプロジェクトの目標の達成状況

項目 1：分子ロボット技術のあるべき将来像を市民と共創する科学コミュニケーションの実践と高度化

(A) 分子ロボットの農工業応用を想定した市民対話実践

フィールドにおける分子ロボット技術の活用を対象事例として、北海道地域の農業関係者らと望ましい社会実装のあり方を共創する対話実践に継続して取り組んだ。研究開発現場の研究者が市民との相互理解を深めながら、ELSI の抽出や検討を効果的に行う対話を実践するための知見をまとめた「対話要点集」を作成した他、分子ロボット固有の ELSI を抽出・分析した「論点モデル」などの資料を作成し、項目 2 のガイドライン策定の基盤となるデータを蓄積した。

関連する主な成果物：

- 分子ロボット倫理研究会（小長谷明彦，小宮健，河原直人，河村賢，標葉隆馬，瀧ノ上正浩，武田浩平，森下翔，山村雅幸，吉田省子（共著）），分子ロボットをめぐる対話要点集 2020 年度版（eBook No.4），CBI 学会出版, 2022 年 2 月.
  ※RInCA 標葉 PJ との連携による成果
- 分子ロボット倫理研究会（小長谷明彦・著，吉田省子・監修），対話のための遺伝子リテラシー（eBook No.5），CBI 学会出版, 2022 年 9 月.
- 森下 翔，河村 賢，標葉 隆馬，小長谷 明彦，小宮 健，「分子ロボットをめぐる市民対話」に基づく「ELSI 論点モデル」の構築，大阪大学社会技術共創研究センター ELSI NOTE，17 号（2022）.
  ※RInCA 標葉 PJ との連携による成果

(B) 科学館等との協働による持続的な科学コミュニケーションの実践

市民が抱く懸念や期待を肌で感じながら研究者が直接対話することで、研究開発の視点からは出てこない多様な意見を反映した ELSI の予見的な抽出を行うことを目的として、分子ロボットが社会の中で馴染む形で活用・研究がなされる、より善い社会実装の将来像について共創する対話実践を実施した。その中で、若手を含む研究者がより積極的に参加できるような対話の場のデザイン、および対話・共創のためのフレームワークの開発に取り組み、持続的な科学コミュニケーション活動のあり方についてのモデルケースを創出した。

関連する主な成果物：

- Ken Komiya*, Ryuma Shineha*(*equal contribution) and Naoto Kawahara, Practice. of responsible research and innovation in the formulation and revision of ethical principles of molecular robotics in Japan, SN Applied Sciences, Vol. 4, 305 (2022).（査読有り）
  ※RInCA 標葉 PJ との連携による成果
- 小宮 健，瀧ノ上 正浩，小長谷 明彦，先端科学技術領域の研究者が ELSI を考えるということ，研究 技術 計画，37 巻，3 号（2022）.（査読有り）

項目 2：RRI の観点から分子ロボット研究を推進するためのガイドラインの策定

農業および医療の現場に携わる多様なステークホルダーを巻き込んだ議論を重ねながら、農工業応用から医薬品応用までの幅広い応用の場面に対応した、分子ロボット基礎研究ガイドラインならびに分子ロボット医薬品応用ガイドライン原案を策定し、分子ロボット研究者コミュニティによる受容を進めるための働きかけを継続して行った。

関連する主な成果物：

- 分子ロボット基礎研究ガイドライン
  ※RInCA 標葉 PJ との連携による成果
  ※恒常的に公開するため、CBI 学会 分子ロボティクス研究会の Web サイトへの掲載に向けて協議中
- 分子ロボット医薬品応用研究ガイドライン原案
  ※今後の公開に向けて分子ロボット倫理研究会 医療系ワーキングループで検討中

項目 3：分野横断的かつ予見的な ELSI の検討とそれを踏まえた具体的な研究課題の立案

（A）社会的対話を通じて見えてくる ELSI の議論の更なる深化

「研究者の自治」の実践に向けて、社会との対話や科学コミュニケーション活動を分子ロボット研究者が主体的に行う上で必要となる、分野横断的な分析や過去の知見を踏まえた ELSI の議論を如何にして行うか、またそこには人文・社会科学研究者がどのような形で参加することが望ましいのかについて探究するため、インタビュー調査や ELSI の議論に必要な基礎知識をまとめた資料の作成を行った。

関連する主な成果物：
- 石田知子，猪口絢子，見上公一，市民参加としての社会実験：不知と向き合うための試み，研究 技術 計画，37 巻，3 号（2022）.
- 西千尋，桜木真理子，見上公一（編），「研究者の自治」のためのレファレンスブック（eBook No. 7），CBI 学会出版, 2024 年 9 月.

（B）ELSI の論点を踏まえた「責任ある」研究課題の提示

理工系の研究者にとって、個人のレベルで ELSI の議論に参加することのメリットが明確ではない中で、如何にして社会的対話や科学コミュニケーションの実践、そして ELSI の議論を深めていけるのかを、実際の協働を通じて検討するため、関与するステークホルダーがみな同意できるような「責任ある」研究課題の立案に取り組んだ。これは、RRI を研究開発の現場レベルで体現するモデルケースを作り上げる試みであり、項目 3(A)の知見を活用して、理工系と人文・社会系の研究者それぞれの価値観が尊重された形で対等に協働する、RRI 実践における新しい関係構築のあり方を提示した。

関連する主な成果物：
- 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，実施記録：座談会「分子ロボットの未来」，大阪大学社会技術共創研究センター ELSI NOTE，22 号（2022）.
- 見上公一，河村賢，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，科学技術コミュニケーション，第 33 号（2023）.（査読有り）
- 見上公一，河村賢，和泉佳弥乃，岩渕祥璽，小島知也，小塚太資，佐藤岳，丸山智也，実施記録：座談会「分子ロボットの未来２」，大阪大学社会技術共創研究センター ELSI NOTE，42 号（2024）.

まとめ

以上の通り、本プロジェクトの研究開発を実施する中で、研究開発現場の研究者が市民対話を実践するためのマニュアルや、建設的な対話を行うための基本知識、市民と研究者の自発的な議論を喚起するための情報提供資料などの目的に活用できる各種の資料を、対話・共創のためのフレームワーク開発の一環として作成・公開してきた。分子ロボット分野だけで

なく、生命科学を中心とする他の科学技術分野の研究者にも活用してもらえる内容であり、無料でダウンロードできる冊子などのアクセスしやすい形で公開している。これらの資料の存在を広く知ってもらうことや、どのような形で活用するのが有効であるかについても発信していくことが今後の課題である。

また、研究開発の“上流”段階において、分子ロボットの研究者コミュニティが持続的にRRI 実践に取り組んでいる本プロジェクトの事例は、国際的に見ても先進性の高いモデルケースの１つといえる。項目 1 (B)で RRI 実践の取り組みのプロセスを分析して報告した英語論文が、理工系の査読付き論文誌に掲載されたことは大きな意義があり、プレスリリースも通じて広く社会に認知されたほか、項目 1(B)でプロセスの詳細を報告した和文論文は、他の科学技術分野にも適用できる知見の記録として、分子ロボット分野の取り組みが人文・社会科学分野に広く知られるきっかけとなった。

そして、本プロジェクトにおいて策定した分子ロボット基礎研究ガイドライン、分子ロボット医薬品応用ガイドライン原案は、人・社会と調和した分子ロボット技術の発展を実現する上で、高い公共的価値を持つものである。これらのガイドラインを実効性のあるものにしていくためには、まずは分子ロボット研究者のコミュニティに広く受容されるように、コミュニティ内部の対話を丁寧に続けていくとともに、ガイドラインの存在がもたらす価値への認知を高めていく必要がある。今後も国内外への発信に取り組みながら、RRI において重視される予見性 (anticipatory)、包摂性 (Inclusive)、省察性 (reflexive)、応答性 (responsive) を備えたガイドラインであり続けるために、研究者コミュニティが主体となってその内容の検討と改訂に取り組んでいくための働きかけを行う。

上記の成果物のほか、2-2 で詳述した通り、様々なステークホルダーと連携したシンポジウムやワークショップ、学会でのセッション等を開催して議論を深め、得られた知見や洞察について理工系、人文・社会系双方の学会で発表した。以上の活動を通じて本プロジェクトが当初に計画していたマイルストーンは全て達成することができた。ただし、項目 1(B)や項目 3 については、多様な観点でそれぞれ意義のある知見やデータを蓄積しており、その一部はまだ詳しい分析や関連する議論との接続を進めているところである。マイルストーンのうちのいくつかについては、これまでに創出した成果は最低限の内容と考えている。同じ活動から得られた知見であっても、関与した研究者の分野によって着目する点が異なり、それらをどのように切り分けて、もしくは関連づけて論文等の形で公表するのが適切であるかも含め、連携する研究者らと今後に検討した上で、さらに成果を創出していく。

（2）各実施項目を横断する総合的な考察

<u>研究開発の方法やアプローチ、国内外の関連する取り組みとの比較</u>

1-2 で詳細を述べた通り、本研究プロジェクトは技術開発を行う分子ロボット研究者が主導する体制をとっている。萌芽期の基礎研究段階から ELSI 論点の検討や倫理原則の作成を行ってきた経験を踏まえ、RRI に取り組む上で重要な多くの研究者による主体的で持続的な参加を促すため、研究者コミュニティ自らが市民対話を計画・実施してきた。このような独創性や挑戦性のあるアプローチをとったことで、研究者が実施する持続的な科学コミュニケーションについて、実効性のあるデザインを実現することができた。また、基礎研究者自身が率先して取り組んだことで、“上流”からの市民参加を試みた国内外のこれまでの事例と比較しても、より上流からの対話実践を実現した。これは、新しい「研究者の自治」のあり方を示した成果であり、今後さらに発展していけば、モデルケースとして大きな意味を持つ可能性がある。単に理工系の研究者が対話を行ったというだけではなく、主体的に対話の目的を検討することで、人文・社会科学の研究者と適材適所で適切に連携して、対話実践から得られた知見を体系的に整理・分析した。それらを各種の資料や論文、ガイドラインなど多方面

にアウトプットするとともに、成果を研究・技術開発の現場にフィードバックし、内容を改善してさらに対話実践を行うサイクルを構築した。継続的な取り組みの中で、活動を持続化する方法論の開発やELSI議論の深化にも取り組んでおり、高い先駆性のある成果といえる。

グローバルに通用する普遍的な価値

近年、科学技術研究を行う研究者が自身の関与する研究に関して、ELSIの観点を含めた課題を指摘するケースは国際的に見ても増えている。ただし、指摘の内容は研究者コミュニティとして十分に議論されたものではなく、場合によっては研究者グループ間の競争の中で、優位性を得るための手段として行っている可能性さえもある。そのような不適切なELSIやRRIの議論の利用（ある種の“悪用”）に対し、研究者コミュニティ全体としての取り組みを推進し、誠実に実施してきたこと自体が先進的な成果であったといえる。個々の研究者の利益を追求するためではなく、より善い社会の実現に貢献するために公正な議論を行う模範的なモデルケースを提示してきたことは、普遍的な価値を持つと考える。今後はそのような取り組みについて国際的に発信し、認知を高めながら継続して展開していくことが課題である。

研究開発のプロセスで得られた知見や洞察

本プロジェクトの対話実践を実施する中で、分子ロボット研究者による様々な気づきが得られた。科学技術の専門家以外を「市民」と一括りにしてしまう場面は多いが、農業者であれば農業の専門家であり、彼ら・彼女らが持つ視点や知見からは、狭い分野の研究者だけで議論すると抜け落ちてしまう重要な指摘が多くあった。例えば、分子ロボット技術の農業応用におけるELSIを検討する際に、分子ロボットの生産から使用、廃棄までのライフサイクル全体を見渡す議論が必要であるが、そこでのトレーサビリティの重要性について分子ロボットの基礎研究者は認識できていなかった。分子ロボットが社会実装される際は、目に見えない極小サイズのロボットとして利用されることが想定されるため、ライフサイクルの各場面において安全と安心を担保する上で、トレーサビリティは非常に重要である。社会実装が始まる前に、分子ロボットのトレーサビリティを確保する技術とはどのようなものであるかを議論し、そのための技術開発を行うことが社会受容に必須であることに気づかされた。このような経験を通じて、科学技術以外の何かの専門家である市民との対話の重要性や、対話を通じて科学技術研究の質が高まる可能性、すなわち対話実践が研究活動の周辺で行う雑務ではなく、研究活動の一部になり得るという研究者にとってのメリットが認識された。

研究者間の連携は一般的に、各自が得意な専門領域をお互いに理解した上で、作業を分業して行う形で実現する。しかし、理工系研究者と人文・社会系研究者との連携においては、通常の研究活動とは異なるメタなレベルで、一つの作業を協働して行うことが求められることが多い。アウトプットとして目指す成果の形だけでなく、そこに至るまでのプロセスや実践する上での懸念などについても、具体的なコンセンサスを取り付ける密なコミュニケーションが必要となる。ある程度以上の信頼関係が必要となることに加え、それぞれの分野で評価される成果になかなか辿り着かない状況になることも多く、非常に挑戦的な取り組みであるという理解が必要である。不十分な理解のまま連携することは、協働相手を一方が目指す成果のための下請けのように扱ったり、相手に作業を丸投げしてしまったりする結果となる。このような、経験的に得られた文理協働における困難さの理解と、本来目指すべき対等な協業のあり方について、本プロジェクトでは今後さらに言語化を進めて発信していく。

どの実施項目においても、表層的ではなく相互理解を促進する質の高い対話やコミュニケ

ーションを実現しようとすると、準備も含めて多大な時間やコストが必要となった。そのようなコストは、科学技術が社会に馴染む形で発展していくためには不可避なものである。特に、領域の異なる研究者との協働においては、本プロジェクトが目標とするような ELSI や RRI に関する実質的な成果を得るには、多くの研究者が想定するよりも遥かに大きな労力や時間を必要とする。例えばガイドライン策定の取り組みでは、基礎研究ガイドラインの原案や初版を作成するに当たって、過去の議論との接続や他の科学技術分野のガイドラインを参照して文案を作成するという、専門性の高い作業を誰かが行うだけでは、「研究者の自治」を実現するのに不十分である。分子ロボット研究者のコミュニティが“自分ごと”として、社会状況や技術の発展に応じて自律的にガイドラインの検討を続けていくために、本プロジェクトでは繰り返し対話の機会を設けて、理解や関心を高める働きかけを続けたことで、当初計画よりは時間がかかったものの、分子ロボット基礎研究ガイドラインを策定し、研究者コミュニティに認知されることができた。その過程では、研究者の責任に関する議論を学術的に探究しようとする科学技術倫理研究者と、社会に対して大きなインパクトを持つ革新的科学技術をいつ・誰が・どのような形で社会実装するか予見できない中で、自分たちの研究がより善い社会に貢献する形で発展することを担保できるような、実効的な指針を求める分子ロボット研究者の意識の擦り合わせを、両者が忍耐強く行ったことで価値のある成果へとつながった。

一方で、ELSI や RRI に関する実質的な成果は、科学技術そのものの研究開発ではないため、査読付き論文の形をとらないものが多い。科学技術政策としては非常に重要な、研究のアウトプットの質・価値を高め得る ELSI の議論および RRI 実践が、現状では研究開発の現場でほぼ評価されない実態が本プロジェクトを実施する中で散見された。上記で述べたように、異分野間で連携して ELSI や RRI に関する成果を創出する上で、相互理解や協働を実現するために各実施項目で想定以上の作業が必要となったが、多くの時間をかけて対応することで随所に発生する問題を解決し、本プロジェクトの成果を達成した。しかし、理工系の特に若手の研究者にとっては、査読付き論文の公表に直結しない問題に時間をかけること自体が、キャリアを失う要因となる現状がある。個々のプロジェクトのレベルでの活動では解決できない、研究開発現場の構造的な問題があることが改めて見えてきた。また、人文・社会系の研究者がキャリアを形成していく上でも、具体的な科学技術の ELSI や RRI の実践的な取り組みに関与することが、適切な形で評価されにくいことが国際的にも指摘されている。本プロジェクトの取り組みが成功例として認識されるためには、このような課題についても向き合っていく必要がある。

これまで述べてきた成果により、本プロジェクトでは「研究者の自治」の一つのあり方のモデルケースを提示し、他の科学技術分野で RRI 実践を行う上で有益な知見を提供することができたと考えている。しかし、分子ロボット分野においても、実際に社会実装が進む段階まで RRI の取り組みが続くかどうか、続いたとしても今以上に広がっていくのかについては、そのような取り組みに関心を持つ研究者たちに委ねることになる。分子ロボット研究者コミュニティの中でも RRI 実践への関心の持ち方は一様ではなく、今後さらに発展が見込めるのか不確実な要素が残っている。また、連携する人文・社会科学研究者の考え方や研究関心によっても、RRI 実践のあり方は大きく影響を受ける。これさえやっておけば良い、という正解がない RRI の取り組みにおいて、何をどのように行えば責任を果たしたと言えるのかについて、どうすれば属人的な形にならずに議論を続けていけるのかが、大きな課題であることが明確になった。

3-2. プログラム目標における成果・示唆

（1）プログラム目標達成への貢献

「新興科学技術の倫理的・法制度的・社会的課題（ELSI）を発見・予見しながら、科学技術と人・社会が調和する責任ある研究・イノベーションの営みの普及・定着に資する実践的協業モデルを創出する」という RInCA プログラムの目標に対し、本プロジェクトではまず、分子ロボット分野における責任ある研究・イノベーション（RRI）の実現を目指して、市民との科学コミュニケーション実践に取り組み、革新的科学技術が社会に馴染みながら発展していく、分子ロボット技術のより善い社会実装の将来像を共創した。その中で開発した、研究者自身が実施する持続的な科学コミュニケーションを実現するためのフレームワークは、他の分野でも活用されることで本プログラムの目標達成に貢献するものである。次に、科学コミュニケーション実践において多様な観点で抽出した ELSI 論点を反映して、基礎研究および応用研究ガイドラインを策定した。社会実装に至るかなり前の“上流”段階から、研究者が主体的にガイドラインを策定してコミュニティが受容していくプロセスは、適応的な科学技術のガバナンスを実現する「研究者の自治」のモデルケースとして、今後の重要な参照点となる可能性があり、本プログラムに有用な知見を提供して貢献する。そして、これらの成果を達成できた要因となったのは、自然科学研究者と人文・社会科学研究者による実践的協業のあり方を模索する中で、異分野の研究者が互いの価値観を尊重しながら対等に協働する、文理連携の新しい関係を構築した成果である。RRI の実践においては、技術を開発する研究者と人文・社会科学研究者の相互理解にもとづく連携が不可欠であり、2-2 に詳細を記載した本プロジェクトでの具体的な事例の蓄積は、本プログラムの目標達成に大きく貢献するものと考える。また、3-1 で述べたそれらの多様な成果についても、資料の公開や論文公表、学会発表等の様々な機会を通じて発信し、本プログラムの取り組みへの認知と理解を高める点からも貢献してきた。

（2）根源的な問いの探求結果

本プロジェクトでは、「萌芽的科学技術が社会に根付き、科学技術と人・社会のより善いあり方を実現していく上で「研究者の自治」は必要であるか、必要であるならそれはどのようなものか」という根源的な問いに取り組んだ。科学技術が社会にもたらすインパクトが非常に大きなものとなった現代において、科学技術の発展が社会と歩調を合わせ、望ましい社会実装のあり方を社会と共創しながら研究開発が進んでいくために、技術の詳細を一番良くわかっているステークホルダーである研究者が、率先して ELSI を検討する議論を行って対応していくことが理想ではないか、という仮説からプロジェクト内で議論を開始し、本報告書に記載した様々な取り組みの中で議論を深めた。

プロジェクト開始当初の「研究者の自治」のイメージは、研究者たちが自分たちは何を目指して研究活動をしているのか、どのような成果を創出したいのかということを常に問いながら研究を実施し、そこに貢献しないことはやらないという選択肢を検討しながら、自らを律して活動することで、結果的に社会から信頼される存在になることを目指すというものであった。そのための具体的なアクションが、自律的なルールメイキングとしてのガイドライン策定であり、自分たちの理念を明文化し、策定のプロセスを含めて社会に発信することで、透明性が高い研究者コミュニティとして社会から“見える存在”になる。そのような取り組みの基盤として社会との対話を実践し、社会が抱く期待や懸念を理解して研究活動を行う結果として、社会の課題を解決するイノベーションが創出できる、という位置づけで捉えていた。このような考えの背景には、より善い社会の実現に貢献する研究活動に最適な環境を提供するマネジメントと、実際に研究開発の現場に下りてくる科学技術政策との間にギャップ

がある、という問題意識がある。最も適切で現場の実態ともギャップがない、より善い科学技術政策を実現するためには、マネジメントされる側である研究者もマネジメントする側の意識を持つ必要があり、それを具現化するものとしての、研究者コミュニティが自律性高く活動する「研究者の自治」が期待される。

そのような「研究者の自治」が実際に機能するためには、何が重要であるかという論点で議論を展開する中で、研究者コミュニティの多様性が重要であろうという洞察に至った。研究開発の現場にとって、そして社会にとっての双方に最適な研究環境を作り上げていくためには、専門性を持った博士人材が研究開発現場に進むだけでなく、行政や公共性のある財団など多様なキャリア形成を行うことで、生産性の高い研究環境を共創することが可能になると思われる。そのような状況を実現するためには、博士取得＝研究者養成といった近視眼的な考えに囚われた研究者コミュニティではなく、社会との交流が盛んで流動性が高い研究者コミュニティである必要がある。このような「開かれた」研究者コミュニティであることの重要性の指摘は、本プロジェクトにおける理工系と人文・社会系の研究者間の協働の経験から導かれている。

従来の ELSI や RRI に関する文理協働においては、人文・社会系の研究者が特定の科学技術分野のサポートをするという事例が多かった。これに対し本プロジェクトでは、人文・社会系研究者が継続して分子ロボット研究に関わることで、理工系研究者による研究者コミュニティの外側に人文・社会系研究者がいるのではなく、分子ロボットの研究者コミュニティには、理工系と人文・社会系をそれぞれ専門とする研究者がいる。すなわち、人文・社会系研究者も研究者コミュニティの内側にいて、協働する際は対等な関係で必要な作業に当たるという認識へと変容した。コミュニティが開かれているが故に多様性が確保され、ELSI の検討や RRI の実践においては、人文・社会科学分野の専門性を活用して建設的な批判や課題の抽出、過去の事例や議論を踏まえた対応策の提案などが可能になる。「研究者の自治」は研究者コミュニティづくりと密接につながっている、というのが本プロジェクトの経験から得た洞察である。萌芽的科学技術が社会に根付き、科学技術と人・社会のより善いあり方を実現していく上で「研究者の自治」は必要で、それが有効に機能するためには開かれた研究者コミュニティをつくることが重要である、というのが根源的な問いに対する現時点での回答である。

(3)「日本の文脈」についての考察

本プロジェクトが対象とする技術分野はまだ社会実装が始まる前の段階にあるため、日本固有の文脈を考察できる場面は北海道地域での農業応用の検討に限られた。北海道の農業者らとの対話ワークショップなどの機会に、実際のフィールドで分子ロボットの応用研究開発を実施する可能性を探ったが、日本の農業における規制や流通における制約などのために、現時点での実現は困難と判断し、まずは東京科学大学内に実験のために作成した農場での研究に限定することとした。そのため、本プロジェクト期間中にこの論点に関する議論は行わなかった。

3-3. 成果の活用・展開状況や今後の展望

本プロジェクトが目指す社会像は、研究開発現場と社会が信頼関係で結ばれ、イノベーションが継続的に創出される「共創型」社会である。そのためには、分子ロボット技術のあるべき将来像を共創する対話を今後も深めていく必要がある。本プロジェクトの科学コミュニケーション実践の中で、「生きている」「自然」といった言葉や概念が、人々の属する集団の文脈や立場によって意味が異なる「境界オブジェクト」であることが示唆された。分子ロボ

ット技術の研究開発が、畏敬の念の対象となるそれらの概念を脅かすものであるのかどうかを丁寧に探り、脅かす場面があるのであればそれを特定して、具体的な ELSI の議論やガイドライン等に反映していくために対話を続ける必要がある。そのような対話において、これまでに作成してきた資料やコミュニケーションツールなどの成果を活用する。

分子ロボット医薬品応用ガイドライン策定の成果について、医療系研究者との共同研究を計画している分子ロボットの研究開発を実施する際に活用する。応用ガイドラインはまだ原案であり、その内容を検討・改訂する作業を、医療応用に向けた分子ロボットの研究開発と並行して進めることで、実際の研究開発に対するガイドラインの妥当性を高めるとともに、分子ロボットの研究開発の内容も社会に対して「責任ある」ものにしていく。

また、「責任ある」研究課題として検討を行ってきた成果についても、実際に研究開発を実施する機会を探っている状況にある。予備実験などが進んで成果が出ることで、研究課題への取り組み方も大きく変わると考えられることから、本プロジェクト終了後も研究者間での議論や関係性についての記録を残し、後で活用できるように準備を進めていく。

3-4.成果の他分野への適応可能性・知見の一般化可能性

（1）分野融合と文理協働に関して

異なる科学技術分野が融合することで新興分野が生まれ、それまで接点のなかった異分野の技術がかけ合わされて、イノベーションにつながる革新的技術が生まれることはよく認識されている。では、社会課題を解決するような異分野の融合や、革新的技術の創出につながる学際研究は、どのようにすれば起こるのだろうか。分子ロボット分野は、それ自体が化学、分子生物学、生物物理学、情報科学、システム科学、ロボット工学など多数の異分野が融合した学際領域である。そして本プロジェクトではさらに、生命倫理や科学技術社会論などの人文・社会科学の各分野とも協働して、多様な成果を創出した。2010 年頃に日本から提唱した分子ロボット分野がこれまで発展を遂げ、さらにその研究者コミュニティに人文・社会科学分野の研究者も参画するようになったのは、その元となった各分野をバックグラウンドに持つ研究者たちが、出自である特定分野のディシプリンに新興分野を引き寄せることなく、協働して研究を進めてきたからである。

もし、新興分野を特定の伝統的分野の延長上に位置づけたり、簡単に説明できる厳密な定義づけをしたい欲求に流されていたら、多様な研究者からなる分子ロボット分野のコミュニティはおそらく空中分解して消滅し、本プロジェクトの成果は得られなかったと思われる。これまでの分子ロボット分野の経験を踏まえたそのような洞察を、グループリーダーの小長谷は中国の神話になぞらえて、「渾沌マトリックス」と呼ぶことを提唱した。多様な研究者のコミュニティであり続けることこそが異分野融合の成功、そしてイノベーションを生み出す源泉であり、明確な輪郭を与えようとするとそれは消滅してしまう。「協働」というと、皆が心を一つに合わせて同じ方向を向くことが成功の秘訣であるように思われているが、それとは逆に、皆が好き勝手な方向を向いて異なる知見を持ち寄り、協業できる場を用意することが重要であるという洞察を言語化したものである。社会実装につながる革新的技術を創出する機会を増大し、異分野が協働して ELSI を検討する RRI の実践に必要な意識づけに関する言説で、他分野に一般化できる成果といえる。

(2)“上流”からの ELSI 検討に関して

新興科学技術分野の研究者にとって、“上流”の基礎研究段階から潜在的なリスクや ELSI を想定することは困難であり、将来における社会実装の形はほぼ予見できないことから、たとえ ELSI の検討をしたとしても無駄に終わると思われる。それに対して本プロジェクトでは、敢えて技術発展のベネフィットを最大化するようなロードマップの作成や、市民との将来像の共創に“上流”段階から取り組み、潜在的な ELSI の議論を行った。新興科学技術の ELSI に対しては、適応的で柔軟に対応することが求められるが、それは問題が起こるまで何もしないことを意味するものではない。対応の幅を狭める「規則」を作るのではなく、適応的で柔軟に対応することが可能な「指針」を作ることで、ELSI が顕在化する手前からの対応が可能となる。これはあくまでも仮説であり、本当に正しいかは今後に分子ロボット技術が発展していく中で明からかにすることであるが、“上流”段階から議論を開始したことで、より多くの多様な研究者の関心と参加を獲得し、議論の深堀りが可能になった。ガイドラインを策定し、ELSI や RRI への理解が進んだ人材育成や研究者コミュニティの形成が進んできており、研究開発の現場から RRI を推進していく上で有用な方法論になり得ると期待される。これは分子ロボット分野に限ったものではなく、「研究者の自治」の実践に関心を持つ幅広いステークホルダーにとって一般化可能なアプローチである。

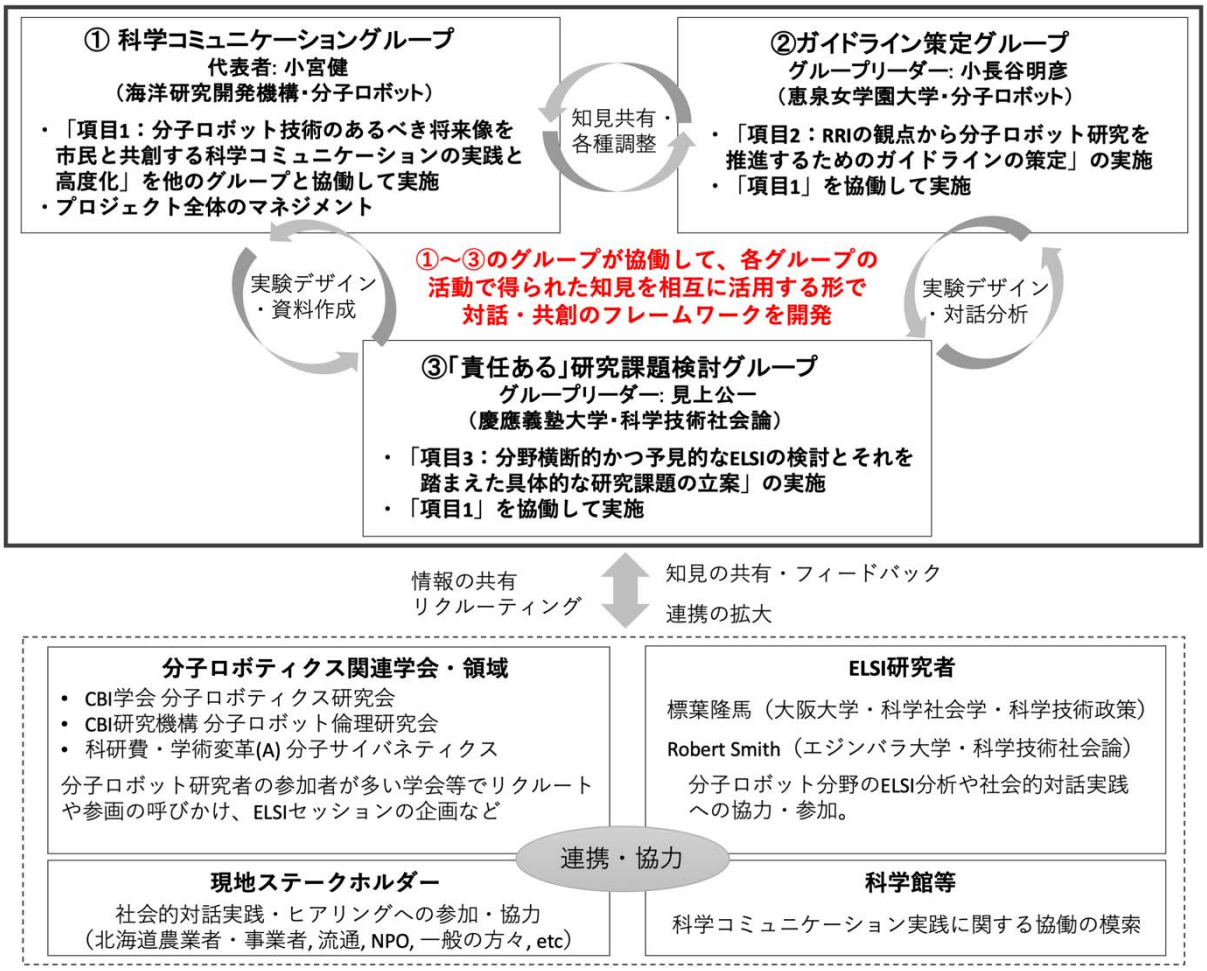
(3) 研究者自身が行う持続的な対話実践に関して

本プロジェクトでは、研究成果を伝えるアウトリーチではなく、先端科学技術の望ましい将来像を市民と共創する対話の実践に取り組んできた。実際に技術の開発を行う研究者自身が対話することで市民から顔の見える存在となり、研究者への信頼が醸成されることが、日本科学未来館等で行った対話実践で来場者から得た意見や、SNS での投稿からも伺えた。しかし、それは科学コミュニケーターなどの専門家と協働して、対話の場のデザインや方法論を十分に検討・準備したからこそ得られた成果である。研究者自身が闇雲に対話を行うと、逆に信頼を損ねたり科学技術への忌避感を生んでしまったりする可能性もある。科学技術の社会受容につながる対話の場であるためには、研究者が伝えたいことを話す場ではなく、来場者が知りたいことを聞ける場にすることが重要である。

実際に対話実践に参加した研究者の気づきの一つは、そのような市民の話を聞く科学コミュニケーションや、相手を説得しようとしない対話を行うことは、特に研究者にとってはとても難しいというものであった。理工系の研究者の研究活動では、自身の研究の意義を認めてもらうために、相手を説得する議論を行うのが基本である。そこでは自身の研究が抱える課題について、それを解決し得る対応策など先回りして検討し、研究の意義に瑕疵がないことを主張して“ディフェンス”をする。そのような姿勢は市民対話において、その場の議論としては良いのかもしれないが、まだ顕在化していない ELSI を多様な視点から幅広く抽出して、どのような対応策が本当に有効であるかを検討し、RRI を実現するという目的にとっては障害となる。本プロジェクトでは、現場で研究開発を行う研究者だからこそ陥りがちな点を検討し、有意義な対話を行うための姿勢についてもまとめた「対話要点集」をはじめとする資料や、図解パネルなど各種のツールを作成することで、研究者が準備にかける時間をできる限り少なく、対話から得る成果はできる限り大きくなるように、対話・共創のフレームワークを開発してきた。そこで取り上げた話題は分子ロボット技術であるが、研究者自身が行う持続的な科学コミュニケーション実践を可能にする本プロジェクトの成果は、科学技術の分野を問わず適応できるアプローチである。上記の知見は、研究・イノベーション学会の学会誌「研究 技術 計画」に特集論文として報告した。

4. 研究開発実施体制

4-1. 研究開発実施体制図



〈実施体制図〉

4-2. 研究開発実施者

（1）科学コミュニケーショングループ（リーダー氏名：小宮 健）

役割：他の 2 つのグループと協力して対話・共創フレームワークの開発に取り組み、科学館等と協働した科学コミュニケーション活動、および分子ロボットの農工業応用と医薬品応用をめぐる対話実践を行う。本プロジェクトの研究活動全体のマネジメントも行う。

氏名	フリガナ	所属機関	所属部署	役職（身分）
小宮　健	コミヤ　ケン	海洋研究開発機構	超先鋭研究開発部門	副主任研究員
小長谷　明彦	コナガヤ　アキヒコ	恵泉女学園大学	人文学部	客員教授
山村　雅幸	ヤマムラ　マサユキ	東京科学大学	情報理工学院	教授

瀧ノ上　正浩	タキノウエ マサヒロ	東京科学大学	情報理工学院	教授
吉田　省子	ヨシダ　セイコ	北海道大学	大学院農学研究院	客員准教授
藤堂　健世	トウドウ　ケンセ	海洋研究開発機構	超先鋭研究開発部門	臨時研究補助員(D 院生)
野田　千鶴	ノダ　チズル	海洋研究開発機構	超先鋭研究開発部門	臨時研究補助員
河村　耀仁	カワムラ　アキヒト	海洋研究開発機構	超先鋭研究開発部門	派遣スタッフ

(2) ガイドライン策定グループ（リーダー氏名：小長谷 明彦）
役割：分子ロボットの農工業ならびに医薬品への利用を視野に入れた、基礎研究ガイドライおよび応用研究ガイドラインの策定に向けた活動に取り組む。

氏名	フリガナ	所属機関	所属部署	役職（身分）
小長谷　明彦	コナガヤ　アキヒコ	恵泉女学園大学	人文学部	客員教授
河原　直人	カワハラ　ナオト	九州大学	ＡＲＯ次世代医療センター	特任准教授
小野　喜志雄	オノ　キシオ	CBI 研究機構	先端領域 ELSI 研究所	客員主任研究員
山村　雅幸	ヤマムラ　マサユキ	東京科学大学	情報理工学院	教授
瀧ノ上　正浩	タキノウエ マサヒロ	東京科学大学	情報理工学院	教授
豊田　太郎	トヨタ　タロウ	東京大学	大学院総合文化研究科	准教授
小宮　健	コミヤ　ケン	海洋研究開発機構	超先鋭研究開発部門	副主任研究員

(3)「責任ある」研究課題検討グループ（リーダー氏名：見上 公一）
役割：分子ロボットの ELSI に関する分野横断的な分析を行うとともに、具体的な「責任ある」研究課題の立案に取り組む。

氏名	フリガナ	所属機関	所属部署	役職（身分）
見上　公一	ミカミ　コウイチ	慶應義塾大学	理工学部（日吉）	准教授
川本　思心	カワモト　シシン	北海道大学	大学院理学研究院	准教授
鈴木　和歌奈	スズキ　ワカナ	総合研究大学院大学	先導科学研究科	助教
豊田　太郎	トヨタ　タロウ	東京大学	大学院総合文化研究科	准教授
桜木　真理子	サクラギ　マリコ	札幌医科大学	医療人育成センター	講師
西　千尋	ニシ　チヒロ	同志社大学	学習支援・教育開発センター	助教
菅原　裕輝	スガワラ　ユウキ	大阪大学	大学院人文学研究科	特任助教

石田　知子	イシダ　トモコ	富山県立大学	工学部	講師
佐々木　翔生	ササキ　ショウイ	慶應義塾大学	理工学部（日吉）	研究員（M 院生）

4-3. 研究開発の協力者

氏　名	フリガナ	所　属	役職（身分）	協力内容
標葉　隆馬	シネハ　リュウマ	大阪大学社会技術共創研究センター	准教授	萌芽的科学技術に関する ELSI／RRI の知見協力、科学コミュニケーションに関する実践協力
Robert Smith		エジンバラ大学社会政治研究科	講師	萌芽的科学技術に関する ELSI／RRI の知見協力、国際的な情報発信に関する助言
森下　翔	モリシタ　ショウ	山梨県立大学地域人材養成センター	特任助教	萌芽的科学技術に関する ELSI／RRI の知見協力、科学コミュニケーションに関する実践協力
河村　賢	カワムラ　ケン	大阪経済大学国際共創学部	講師	萌芽的科学技術に関する ELSI／RRI の知見協力、科学コミュニケーションに関する実践協力
村田　智	ムラタ　サトシ	東北大学大学院工学研究科	教授	分子ロボット技術に対する助言
藤原　慶	フジワラ　ケイ	慶應義塾大学理工学部	准教授	「責任ある研究」立案に向けた議論への参加
堀　豊	ホリ　ユタカ	慶應義塾大学理工学部	准教授	「責任ある研究」立案に向けた議論への参加
伴野　太祐	バンノ　タイスケ	慶應義塾大学理工学部	准教授	「責任ある研究」立案に向けた議論への参加
山下　忠紘	ヤマシタ　タダヒロ	慶應義塾大学理工学部	准教授	「責任ある研究」立案に向けた議論への参加
齋藤　博英	サイトウ　ヒロヒデ	京都大学 iPS 細胞研究所	教授	「分子ロボットの未来」座談会への参加
野村　慎一郎	ノムラ　シンイチロウ	東北大学大学院工学研究科	准教授	「分子ロボットの未来」座談会への参加

松浦　和則	マツウラ　カズノリ	鳥取大学学術研究院	教授	「分子ロボットの未来」座談会への参加
藤堂　健世	トウドウ　ケンセ	東京工業大学情報理工学院	博士課程学生	科学未来館オープンラボへの参加
浜田　省吾	ハマダ　ショウゴ	東京科学大学情報理工学院	助教	科学未来館オープンラボへの参加、市民対話の実践協力
川又　生吹	カワマタ　イブキ	京都大学大学院理学研究科	准教授	科学未来館オープンラボへの参加、市民対話の実践協力
西田　暁史	ニシダ　アキフミ	東京農業大学生命科学部	助教	市民対話の実践協力
熊谷　壮太	クマガイ　ソウタ	東北大学大学院工学研究科	修士課程学生	市民対話の実践協力
中島　大地	ナカジマ　ダイチ	東北大学大学院工学研究科	修士課程学生	市民対話の実践協力
安田　翔也	ヤスダ　ショウヤ	東京工業大学情報理工学院	研究員	市民対話の実践協力

5. 研究開発成果の発表・発信状況、アウトリーチ活動など

5-1. 社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など

5-1-1. プロジェクトで主催したイベント（シンポジウム・ワークショップなど）

年月日	名　称	場　所	概要・反響など	参加人数
2021/4-2024/7 に隔週以上の頻度で実施	分子ロボット倫理研究会定例ミーティング	オンライン	本プロジェクトの活動および RInCA の標葉 PJ と共同で実施する活動について、計画や実施内容の詳細、実施後の振り返りを行って議論し、分子ロボット研究者と人文・社会系研究者が意見交換して、相互理解と RRI の理解を深めた。	各回８名程度

2021/10/16-17	日本科学未来館オープンラボ試行会「分子で「ロボット」をつくる？」（企画：小宮健, 標葉隆馬）	東京都江東区・日本科学未来館	分子ロボット技術の将来像を市民と共創することで ELSI 論点を抽出するための、市民対話実践および調査研究の試行会を日本科学未来館の科学コミュニケーターと共同で実施した。幅広い世代の多くの来場者が参加して好評を得た。	約 200 名
2021/11/5	「細胞を創る」研究会 14.0 人文・社会セッション「「細胞を創る」を社会が拡張する—SF、バイオアート、DIY の地平から」（オーガナイザー：小宮健）	オンライン	分子ロボット研究を含む細胞を創る最先端研究がもたらす倫理的課題や社会との関わりについて、一般公開のセッションとして SF 作家やアーティスト、キュレーターらと研究者が分野を超えて議論し、期間限定でオンライン配信した。	約 150 名
2021/11/7	第 5 回分子ロボティクス年次大会 分子ロボティクス倫理セッション（オーガナイザー：小宮健）	オンライン	分子ロボット研究者と人文・社会系の研究者が継続的に分子ロボット技術の ELSI に関する意見交換を行う場として、最新の動向について議論した。	約 110 名
2022/1/23	分子ロボットの農業応用に関する対話ワークショップ（オーガナイザー：小長谷明彦）	オンライン	農業分野における先端科学技術の応用と分子ロボット技術の位置づけについて情報提供を行い、農業者らと研究者がより善い社会実装のあり方について意見交換を行った。	10 名
2022/2/19-20	日本科学未来館オープンラボ試行会「うごく！ ふえる？ 10 万分の 1 ミリのロボット、	東京都江東区・日本科学未来館	分子ロボット技術の将来像を市民と共創することで ELSI 論点を抽出するための、市民対話実践および調	約 200 名

	君ならどう使う？」（企画：小宮健，標葉隆馬）		査研究のデザイン改善を目的とした2回目の試行会を、日本科学未来館の科学コミュニケーターと共同で実施した。幅広い世代の多くの来場者が参加して好評を得た。	
2022/3/9	座談会「分子ロボットの未来」（オーガナイザー：見上公一）	オンライン	分子ロボット技術のELSI 論点を抽出するため、中心的な研究者4 名を招待し、分子ロボット研究の現状と将来的な可能性について議論した。	6 名
2022/3/11	分子ロボット倫理キックオフ研究会（オーガナイザー：小長谷明彦）	金沢市・金沢大学サテライトプラザおよびオンライン	農業から医療までの分子ロボット技術の応用における具体的なELSI への対応について、幅広い分野の研究者が知見を共有して議論した。	31 名
2022/4-2023/3 に9月を除く毎月実施	分子ロボット研究者グループとの定期懇談会	オンライン	人文・社会科学の視点から「面白そう」と思えたテーマについて、関心のすり合わせや研究者間の相互理解の促進、信頼関係の醸成に重点を置いて分子ロボット研究者と意見交換を行った。	各回6名程度
2022/4-2023/3 に３カ月ごとに実施	「責任ある」研究課題検討グループ全体ミーティング	オンライン（2022 年8月は海洋研究開発機構（横須賀市）で実施）	「責任ある」研究課題検討グループが実施する活動についてメンバー内で共有し、その内容について、特に分子ロボット研究者の視点からもそれが適切であることを担保するための検討を行った。	各回4名程度
2022/6/11-12, 18-19	日本科学未来館オープンラボ「うごく！ ふえる？ 10万分の１ミリのロボット、君ならど	東京都江東区・日本科学未来館	日本科学未来館の一般来場者を対象に、本プロジェクトのメンバー以外も含む分子ロボット研究者が、分	約800 名

	う使う？」（企画：小宮健，標葉隆馬）		子ロボット技術の説明と研究者が思い描く応用例を提示し、市民の素朴な懸念や期待に耳を傾けて、望ましい社将来像を共創する対話を実践した。	
2022/10/18	「細胞を創る」研究会 15.0 人文・社会セッション「培養肉が拓く「食の倫理」」（オーガナイザー：日比野愛子，小宮健）	東工大蔵前会館	先端生命科学分野である合成生物学の基礎研究に関する主要な研究会の年次大会において、一般公開セッションを RInCA 日比野 PJ と共同企画して講演と議論を行った。	約 180 名
2022/10/24	市民講座「分子ロボットと循環農工業 – 持続可能な未来を目指して」	東京都江戸川区・タワーホール船堀およびオンライン	作物と土壌との良い共生関係を目指す循環農工業への分子ロボットの適用可能性とその倫理的課題について多方面から議論した。	約 50 名
2022/11/5-6	サイエンスアゴラ 2022 ブース企画「分子でロボットをつくる？－分子ロボティクスの世界」	東京都江東区・テレコムセンタービル	サイエンスアゴラの一般来場者を対象に、分子ロボット技術の説明と研究者が思い描く応用例を提示し、素朴な懸念や望ましい将来像を共創する対話を実践した。	約 200 名
2022/11/13	第 6 回分子ロボティクス年次大会 分子ロボティクス倫理セッション（オーガナイザー：小宮健）	東北大学工学部青葉山記念会館およびオンライン	日本の主要な分子ロボット研究者が一堂に会する研究会の年次大会において、分子ロボット技術の ELSI や RRI に関するセッションを企画して講演と議論を行った。	約 110 名
2023/2/2	座談会「分子ロボットの未来 2」（オーガナイザー：見上公一）	慶應義塾大学日吉キャンパス	分子ロボット研究の現在と未来についての語りを記録することを目的として、現在博士課程に在籍する若手研究者による座談会を実施した。	6 名

2023/3/10	第 2 回分子ロボット倫理研究会（オーガナイザー：小長谷明彦）	北陸先端科学技術大学院大学およびオンライン	バイオ情報学系の研究会との連続開催で、分子ロボット研究者および倫理研究者による講演およびパネル討論会を行った。	約 30 名
2023/4-2025/3 に 2023 年度はオンラインで隔月程度、2024 年度は 3 ヶ月に一度程度の頻度で実施	KMB Salon	慶應義塾大学およびオンライン	慶應義塾大学理工学部の分子ロボット研究者 4 名と「Responsible（責任ある）かつ Response-able（応答可能）な」具体的な研究課題の立案に向けた議論を行った。	各回 6 名
2023/4-2025/3 にほぼ毎月実施	「責任ある」研究課題検討グループ研究員ミーティング	オンライン	慶應義塾大学で雇用する 2 名の研究員と「『研究者の自治』のためのレファレンスブック」の作成作業について打ち合わせを行った。	各回 3 名
2023/10/7-9	日本科学振興協会（JAAS）年次大会 2023 展示ブース「DNA でロボットをつくる未来をわたしも一緒に考える」	東京都千代田区・秋葉原 UDX	分子ロボットの将来像を市民と共創するため、パネル等の資料を展示し、意見を書込むボード等も用いて、持続的かつ双方向的な科学コミュニケーションを意図した対話を実践した。SNS で好意的なコメントが寄せられた。	約 500 名
2023/12/15-16	淡路島循環共生圏ワークショップ	淡路島パソナ農援隊およびオンライン	分子ロボットの農業応用の可能性について有機農業関係者と対話をし、これまで対立軸にあった有機農業や自然農業とスマート農業が取り組むべき課題を議論した。	13 名
2024/3/8	第 3 回分子ロボット倫理研究会（オーガナイザー：小長谷明彦）	北陸先端科学技術大学院大学およびオンライン	バイオ情報学系の研究会との連続開催で、分子ロボット研究者および倫理研究者に	20 名

			よる講演およびパネル討論会を行った。	
2024/3/13	分子ロボット倫理研究会 医療系研究開発 WG 会議	東京大学駒場キャンパス	2022 年 4 月から開始した医療系研究開発ワーキンググループ会議の年間活動を小長谷と河原で総括し、今後の活動方針について参加者と議論した。	8 名
2024/3/14	第 7 回分子ロボティクス年次大会 分子ロボティクス倫理セッション（オーガナイザー：小宮健）	東京大学駒場キャンパス	日本の分子ロボット研究者コミュニティの中心的な会合において倫理セッションを企画し、ガイドラインおよびレファレンスブックに関する講演と総合討論を行った。	約 120 名
2024/7/12	分子ロボット研究者との協働を実践した人文・社会科学の研究者による座談会	オンライン	分子ロボット研究の現在と未来についての語りを記録することを目的として、これまでに分子ロボット研究者との協働を実践してきた人文・社会科学の研究者による座談会を実施した。	5 名
2024/10/28	分子ロボット倫理シンポジウム（オーガナイザー：小長谷明彦）	東京都江戸川区・タワーホール船堀	分子ロボットの医療応用の可能性について、医療系倫理研究者と分子ロボット研究者とで、医療応用分子ロボット研究の現状と課題について議論を行った。	約 50 名
2024/11/12	「細胞を創る」研究会 17.0 人文・社会セッション「生命と生物の「境界」」（オーガナイザー：標葉隆馬，小宮健）	大阪大学銀杏会館	分子ロボット研究と関連の深い合成生物学に関する研究会で、生命性について議論する一般公開セッションを開催し、幅広い分野の講演と総合討論を行った。	約 120 名

2025/3/7	第 4 回分子ロボット倫理研究会（オーガナイザー：小長谷明彦）	北陸先端科学技術大学院大学およびオンライン	バイオ情報学系の研究会との連続開催で、分子ロボット研究者および倫理研究者による講演を行った。	18 名（オンライン込み）
2025/3/13	第 8 回分子ロボティクス年次大会 分子ロボティクス倫理セッション（オーガナイザー：小宮健）	東京大学駒場キャンパス	日本の主要な分子ロボット研究者が一堂に会する研究会の年次大会において、ガイドライや文理協働に関するセッションを企画して講演と議論を行った。	約 120 名

5-1-2. 書籍、DVD など論文以外に発行したもの

(1) 分子ロボット倫理研究会（小長谷明彦，小宮健，河原直人，河村賢，標葉隆馬，瀧ノ上正浩，武田浩平，森下翔，山村雅幸，吉田省子（共著）），分子ロボットをめぐる対話要点集 2020 年度版（eBook No.4），CBI 学会出版, 2022 年 2 月.
ISBN: 978-4-910628-01-1

(2) 分子ロボット倫理研究会（小長谷明彦・著，吉田省子・監修），対話のための遺伝子リテラシー（eBook No.5），CBI 学会出版, 2022 年 9 月.
ISBN: 978-4-910628-03-5

(3) 西千尋，桜木真理子，見上公一（編），「研究者の自治」のためのレファレンスブック（2023 年 3 月発行暫定版），「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」研究プロジェクト, 2023 年 3 月.
https://researchmap.jp/multidatabases/multidatabase_contents/detail/235717/d0aa52c149d1f1827d5354a9b7957117?frame_id=636731

(4) 西千尋，桜木真理子，見上公一（編），「研究者の自治」のためのレファレンスブック（2024 年 3 月発行暫定版 Ver.2.0），「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」研究プロジェクト, 2024 年 3 月.
https://researchmap.jp/multidatabases/multidatabase_contents/download/235717/9aa4211b2d1068c225ce0e99ac79cf7c/35671?col_no=2&frame_id=636731

(5) 西千尋，桜木真理子，見上公一（編），「研究者の自治」のためのレファレンスブック（eBook No. 7），CBI 学会出版, 2024 年 9 月.
ISBN: 978-4-910628-08-0

5-1-3. ウェブメディア開設・運営

(1) JST-RISTEX RInCA プログラム プロジェクトページ：
https://www.jst.go.jp/ristex/rinca/projects/jpmjrx21j4.html
RInCA プログラムの Web サイト内に掲載，2021 年 10 月 1 日.

(2) 分子ロボット倫理研究会 ホームページ：
https://cbiri.cbi-society.info/elsi/sigelsi/
CBI 研究機構先端領域 ELSI 研究所ホームページ（https://cbiri.cbi-society.info/elsi/）内に開設，2022 年 6 月 22 日.

(3) プレスリリース：国立研究開発法人海洋研究開発機構，分子ロボット分野における倫理原則の策定と受入プロセスの検証―新興科学が発展させる科学と社会の信頼構築のための先駆的取組―，2022 年 10 月 21 日.
https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20221021/
反響：5-2-1 の(2)に記載した論文に関する本プレスリリースにより、理工系研究者が研究開発の初期段階から社会に対する責任と向き合い、RRI の実践に取り組んでいる分野があることが認知された。新聞の一般紙から複数の取材を受けて、5-4-1 に記載した記事の掲載に至った。

5-1-4. 学会以外のシンポジウムなどでの招へい講演　など

(1) 日本科学未来館オープンラボ，小宮健，標葉隆馬，うごく！ ふえる？ 10 万分の 1 ミリのロボット、君ならどう使う？, 2022 年 6 月 11-12, 18 -19 日（各日 2 回），東京都江東区.
(2) 市民講座：分子ロボットと循環農工業 － 持続可能な未来を目指して，小長谷明彦，分子ロボットと遺伝子との接点を探る，2022 年 10 月 24 日，東京都江戸川区（オンライン併用）.
(3) 市民講座：分子ロボットと循環農工業 － 持続可能な未来を目指して，吉田省子，分子ロボットの農業利用ですか？：農家の目・他の目，2022 年 10 月 24 日，東京都江戸川区（オンライン併用）.
(4) JST-CRDS 科学技術未来戦略ワークショップ「イノベーションの土壌づくりとしての ELSI/RRI 実装」，小宮健，分子ロボティクス分野における研究開発×ルール・規範形成の実践 -科学技術の萌芽段階（“上流”）から基礎研究者が ELSI/RRI を議論する-, 2023 年 1 月 30 日，東京都千代田区.
反響：有識者として招へい講演とディスカッションを行い、その内容が 2023 年 5 月発行の JST-CRDS 戦略プロポーザル「科学技術・イノベーションの土壌づくりとしての ELSI/RRI　戦略的な科学技術ガバナンスの実現に向けて（CRDS-FY2023-SP-01）」（ISBN 978-4-88890-854-2）に採録された。

5-2. 論文発表

5-2-1. 査読付き（　3　件）

(1) Ken Komiya, Molecular programming, In: Ang, M.H., Khatib, O., Siciliano, B. (eds) Encyclopedia of Robotics. Springer, Berlin, Heidelberg (2022).
https://doi.org/10.1007/978-3-642-41610-1_210-1
(2) Ken Komiya*, Ryuma Shineha*(*equal contribution) and Naoto Kawahara, Practice. of responsible research and innovation in the formulation and revision of ethical principles of molecular robotics in Japan, SN Applied Sciences, Vol. 4, 305 (2022).
https://doi.org/10.1007/s42452-022-05164-z
(3) 見上公一，河村賢，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，科学技術コミュニケーション，第 33 号 (2023).
https://doi.org/10.14943/108262

5-2-2. 査読なし（ 5 件）

(1) 石田知子，猪口絢子，見上公一，市民参加としての社会実験：不知と向き合うための試み，研究 技術 計画，37 巻，3 号（2022）.
https://doi.org/10.20801/jsrpim.37.3_264
(2) 小宮 健，瀧ノ上 正浩，小長谷 明彦，先端科学技術領域の研究者が ELSI を考えるということ，研究 技術 計画，37 巻，3 号（2022）.
https://doi.org/10.20801/jsrpim.37.3_310
(3) 森下 翔，河村 賢，標葉 隆馬，小長谷 明彦，小宮 健，「分子ロボットをめぐる市民対話」に基づく「ELSI 論点モデル」の構築，大阪大学社会技術共創研究センター ELSI NOTE，17 号（2022）.
https://doi.org/10.18910/87647
(4) 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，実施記録：座談会「分子ロボットの未来」，大阪大学社会技術共創研究センター ELSI NOTE，22 号（2022）.
https://doi.org/10.18910/89384
(5) 見上公一，河村賢，和泉佳弥乃，岩渕祥璽，小島知也，小塚太資，佐藤岳，丸山智也，実施記録：座談会「分子ロボットの未来２」，大阪大学社会技術共創研究センター ELSI NOTE，42 号（2024）.
https://doi.org/10.18910/95836

5-3. 口頭発表（国際学会発表及び主要な国内学会発表）

5-3-1. 招待講演（国内会議 12 件、国際会議 0 件）

(1) 小宮健（海洋研究開発機構），「細胞を創る」を社会に接続する素朴な対話，「細胞を創る」研究会 14.0，オンライン，2021 年 11 月 5 日.
(2) 小宮健（海洋研究開発機構），分子ロボット技術の継続的な RRI 実践モデルの構築，第 5 回分子ロボティクス年次大会 分子ロボティクス倫理セッション，オンライン，2021 年 11 月 7 日.
(3) 見上公一（慶應義塾大学），ELSI から RRI へ：真に『良い』研究を求める旅への招待，第 5 回分子ロボティクス年次大会 分子ロボティクス倫理セッション，オンライン，2021 年 11 月 7 日.
(4) 小宮健（海洋研究開発機構），分子サイバネティクスのための上流からの RRI 実践のこころみ，発動分子科学 × 分子サイバネティクス共催ワークショップ，オンライン，2022 年 3 月 4 日.
(5) 山村雅幸（東京工業大学），分子エコ動態学 ― 分子・細胞レベルから再構築する生態学，第 3 回分子サイバネティクス・第 47 回分子ロボティクス定例研究会，オンライン，2022 年 3 月 25 日.
(6) 小宮健（海洋研究開発機構），10 年後の分子ロボット倫理研究に向けて，第 6 回分子ロボティクス年次大会 分子ロボティクス倫理セッション，東北大学工学部 青葉山記念会館（オンライン併用），2022 年 11 月 13 日.
(7) 河原直人（九州大学），分子ロボット医療系研究開発に向けた取組み：ガイドライン等について，第 6 回分子ロボティクス年次大会 分子ロボティクス倫理セッション，東北大学工学部 青葉山記念会館（オンライン併用），2022 年 11 月 13 日.
(8) 小宮健（海洋研究開発機構），分子ロボット研究者はなぜ未来について考えるのか，分子ロボット倫理シンポジウム「分子ロボット ELSI 論点モデル・ライフコースモデルの先

へ：科学コミュニケーション実践をつうじた論点モデルの構築」，オンライン, 2023 年 2 月 24 日.

(9) 小宮健（海洋研究開発機構），分子ロボット研究しながら RRI 実践, 第 7 回分子ロボティクス年次大会 分子ロボティクス倫理セッション, 東京大学駒場キャンパス, 2024 年 3 月 14 日.

(10) 西千尋（慶應義塾大学・東京大学），人文・社会科学系の研究者と議論する手引きとしての「レファレンスブック」，第 7 回分子ロボティクス年次大会 分子ロボティクス倫理セッション, 東京大学駒場 1 キャンパス, 2024 年 3 月 14 日.

(11) 小宮健（海洋研究開発機構），境界オブジェクトとしての生命　―生きるものと想うもの, 「細胞を創る」研究会 17.0, 大阪大学銀杏会館, 2024 年 11 月 12 日.

(12) 小宮健（海洋研究開発機構），（タイトル未定），第 8 回分子ロボティクス年次大会 分子ロボティクス倫理セッション, 東京大学駒場 I キャンパス, 2025 年 3 月 13 日.

5-3-2. 口頭発表（国内会議　25　件、国際会議　1　件）

(1) 瀧ノ上正浩（東京工業大学），細胞を模倣した分子ロボットを創る, 分子ロボット倫理キックオフ研究会, 金沢大学サテライトプラザおよびオンライン, 2022 年 3 月 11 日.

(2) 豊田太郎（東京大学），分子サイバネティクスが目指すケミカル AI の社会的イノベーションへ向けて, 分子ロボット倫理キックオフ研究会, 金沢大学サテライトプラザ（オンライン併用）, 2022 年 3 月 11 日.

(3) 小宮健（海洋研究開発機構），分子ロボット技術の将来像を共創する対話と研究者の自治, 分子ロボット倫理キックオフ研究会, 金沢大学サテライトプラザ（オンライン併用）, 2022 年 3 月 11 日.

(4) 見上公一（慶應義塾大学），「監督者」から「共犯者」へ, 分子ロボット倫理キックオフ研究会, 金沢大学サテライトプラザ（オンライン併用）, 2022 年 3 月 11 日.

(5) 吉田省子（北海道大学），分子ロボットの農業利用を考える上での諸課題, 分子ロボット倫理キックオフ研究会, 金沢大学サテライトプラザ（オンライン併用）, 2022 年 3 月 11 日.

(6) 河原直人（九州大学），分子ロボット医薬品研究ガイドライン策定に向けて, 分子ロボット倫理キックオフ研究会, 金沢大学サテライトプラザ（オンライン併用）, 2022 年 3 月 11 日.

(7) 小野喜志雄（CBI 研究機構），臓器移植と ELSI, 分子ロボット倫理キックオフ研究会, 金沢大学サテライトプラザ（オンライン併用）, 2022 年 3 月 11 日.

(8) 豊田太郎（東京大学），分子ロボティクスのためのリポソーム操作技術, 第 2 回分子ロボット倫理研究会, 北陸先端科学技術大学院大学（オンライン併用）, 2023 年 3 月 10 日.

(9) 小長谷明彦（恵泉女学園大学），自己組織化を目指した分子シミュレーション, 第 2 回分子ロボット倫理研究会, 北陸先端科学技術大学院大学（オンライン併用）, 2023 年 3 月 10 日.

(10) 西千尋, 見上公一（慶應義塾大学），自然科学分野の研究者のための RRI コミュニケーション支援ツールとしてのミニレポート, 第 2 回分子ロボット倫理研究会, 北陸先端科学技術大学院大学（オンライン併用）, 2023 年 3 月 10 日.

(11) Ken Komiya (JAMSTEC), Toward Sustainable ELSI Discussion and RRI Implementation for Basic Researchers in Emerging Technologies, The 23rd biennial international conference of the Society for Philosophy and Technology (SPT2023), National Olympics Memorial Youth Center, 2023 年 6 月 8 日.

(12) 小宮健（海洋研究開発機構），萌芽段階にある分子ロボット技術分野の基礎研究者が行

う市民対話実践の意義の探究, 科学技術社会論学会 第 22 回年次研究大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2023 年 12 月 9 日.

(13) 見上公一（慶應義塾大学）, 分子ロボティクス分野における文理共創の試み, 科学技術社会論学会 第 22 回年次研究大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2023 年 12 月 9 日.

(14) 山村雅幸（東京工業大学）, 循環共生圏：持続可能な第一次産業のための分子エコ動態学, 淡路島循環共生圏 WS, 淡路島パソナ農援隊, 2023 年 12 月 15 日.

(15) 瀧ノ上正浩（東京工業大学）, 分子ロボティクスのバイオ応用, 淡路島循環共生圏 WS, 淡路島パソナ農援隊, 2023 年 12 月 15 日.

(16) 小長谷明彦（恵泉女学園大学）, 分子ロボットの医療応用に向けて：複製機能および遺伝子操作機能を持つ分子ロボットの ELSI 課題について, 第 3 回分子ロボット倫理研究会, 北陸先端科学技術大学院大学, 2024 年 3 月 8 日.

(17) 小野喜志雄（CBI 研究機構）, 審査報告書から見るレプリコンワクチンのメリットとデメリット, 第 3 回分子ロボット倫理研究会, 北陸先端科学技術大学院大学, 2024 年 3 月 8 日.

(18) 小長谷明彦（恵泉女学園大学）, 医療系研究開発 WG の活動の現在・過去・未来について, 分子ロボット倫理研究会 医療系研究開発 WG 会議, 東京大学駒場キャンパス, 2024 年 3 月 13 日.

(19) 河原直人（九州大学）, 分子ロボット倫理研究会医療系 WG への期待と展望, 分子ロボット倫理研究会 医療系研究開発 WG 会議, 東京大学駒場キャンパス, 2024 年 3 月 13 日.

(20) 小長谷明彦（恵泉女学園大学）, 分子ロボットの医薬品応用への期待と現実, 分子ロボット倫理シンポジウム, タワーホール船堀, 2024 年 10 月 28 日.

(21) 河原直人（九州大学病院 ARO 次世代医療センター）, 分子ロボット倫理の取組みと社会共創に係る展望, 分子ロボット倫理シンポジウム, タワーホール船堀, 2024 年 10 月 28 日.

(22) 豊田太郎（東京大学大学院総合文化研究科）, ジャイアントベシクルを用いた医療支援ツールの開発, 分子ロボット倫理シンポジウム, タワーホール船堀, 2024 年 10 月 28 日.

(23) 浜田省吾（東京工業大学情報理工学院）, スライム型分子ロボットとその医療応用への展望, 分子ロボット倫理シンポジウム, タワーホール船堀, 2024 年 10 月 28 日.

(24) 見上公一（慶應義塾大学）, 河村賢（大阪経済大学）, 「語り」を残すことの意義：座談会「分子ロボットの未来」記録に関する考察, 科学社会学会第 13 回年次大会, 大阪大学, 2024 年 9 月 8 日.

(25) 西千尋（同志社大学）, 見上公一（慶應義塾大学）, 「分子ロボティクスと社会」のためのコミュニケーション支援ツール, 科学技術社会論学会第 23 回年次大会, 東京大学, 2024 年 12 月 1 日.

(26) 見上公一（慶應義塾大学）, 河村賢（大阪経済大学）, ELSI から RRI へ：座談会記録から考える変化の必要性, 科学技術社会論学会第 23 回年次大会, 東京大学, 2024 年 12 月 1 日.

5-3-3. ポスター発表（国内会議 1 件、国際会議 0 件）

(1) 見上公一（慶應義塾大学）, 河村賢（大阪大学）, 分子ロボットの未来を語る：オンライン座談会の経験とこれから, 第 6 回分子ロボティクス年次大会, 東北大学, 2022 年 11 月 12-13 日.

5-4. 新聞/TV 報道・投稿、受賞など

5-4-1. 新聞/TV 報道・投稿

(1) TV 番組：NHK E テレ「サイエンス ZERO」，2023 年 1 月 22, 28（再放送）日，生命の法則を利用する！DNA コンピューターがひらく未来, 出演:瀧ノ上正浩（東京工業大学）.
(2) 新聞報道：読売新聞オンライン, 2023 年 4 月 28 日，および読売クオータリー, 2023 年春号，先端技術と社会つなぐＥＬＳＩ.
(3) 新聞報道：読売新聞, 2023 年 11 月 29 日，朝刊８面，先端科学　社会への影響は…ＥＬＳＩ研究　活発化.

5-4-2. 受賞

(1) 小宮健，公益財団法人倶進会 2021 年度科学技術社会論・柿内賢信記念賞 実践賞，分子ロボット技術に関わる科学コミュニケーションの市民参加の実践研究，2021 年 12 月 4 日.

5-4-3. その他

該当なし

5-5. 特許出願

5-5-1. 国内出願（　0　件）

該当なし

5-5-2. 海外出願（　0　件）

該当なし