



「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

Authors

森下 翔	大阪大学 社会技術共創研究センター 特任研究員
河村 賢	大阪大学 社会技術共創研究センター 特任助教
標葉 隆馬	大阪大学 社会技術共創研究センター 准教授
小長谷 明彦	東京工業大学情報理工学院 名誉教授 / 恵泉女学園大学 客員教授 / 株式会社分子ロボット総合研究所 代表取締役 / CBI研究機構先端技術ELSI研究所 所長
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 研究員

協力

分子ロボット倫理研究会幹事会メンバー

(河原直人・豊田太郎・見上公一・瀧ノ上正浩・武田浩平・山村雅幸・吉田省子；五十音順)

※本 ELSI ノートは、トヨタ財団 2019 年度特定課題「先端技術と共創する新たな人間社会」における助成企画「分子ロボットロードマップ構想に向けた分野間・国際間共同研究」および JST-RISTEX・RInCA における研究開発プロジェクト「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」の助成を受け、小宮健博士による同 RInCA プロジェクト「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」「研究者の自治に基づく分子ロボット技術の RRI 実践モデルの構築」との連携のもとで作成された。

本 ELSI ノートの作成にあたりご協力いただいた分子ロボット倫理研究会の参加者（分子ロボット研究者・ELSI 研究者）各位には心から感謝申し上げます。

目次

分子ロボットの「ELSI 論点モデル」について	3
1. 科学一般に関する論点	7
1.1. 責任ある研究・イノベーション（RRI）	7
1.2. 自然破壊への懸念	8
1.3. 進歩主義	10
1.4. 知的好奇心か社会貢献か	11
2. 生命・遺伝子・知性に関する論点	13
2.1. 生命・知性の創造	13
2.2. エンハンスメント（人間・環境の「強化」）	15
2.3. 遺伝子組換え技術・ゲノム編集技術	17
3. 分子ロボットに固有の論点	19
3.1. 名称	19
3.2. 発展シナリオ	21
3.3. 材料	23
3.4. 使用環境	24
3.5. ライフコース	25
3.6. 多様な用途	39
4. 社会実装に関する論点	40
4.1. 不確実性・信頼・予防原則	40
4.2. 悪用の危険（デュアルユース・マルユース）	42
4.3. 食の安全	44
4.4. 市場と公正	47
5. 参考文献	48
付録 1 分子ロボット技術倫理綱領	57
付録 2 市民対話ワークショップ参加者のリスト	58

分子ロボットの「ELSI 論点モデル」について

分子ロボットとは、従来の金属部品を主材料として造られるロボットとは異なり、DNA などの生体部品を素材として造られるロボットである。村田智『分子ロボティクス概論』では、ロボットを「『外部環境から情報を獲得し、コンピュータ（情報処理回路）によりその情報を処理し、その結果に応じて環境に対して働きかけるアクチュエータ』からなるシステム」と定義し、この定義を満たす「分子デバイス」ⁱで製作されたシステムのことを「分子ロボット」であるとしている[村田 2019: 1-2]。

このたび、分子ロボット研究者および ELSI 研究者らからなる「分子ロボット倫理研究会」¹は、分子ロボットが社会実装される際の課題となる論点を抽出・可視化するため、これまでに全 7 回のオンライン市民対話・研究者対話を実施した²。これらの市民対話は本邦における分子ロボットに関する**市民参加**の取り組みの皮切りとなるものであったⁱⁱ。

本ノートは、これらの市民対話実践で得られた「語り」に基づき作成した、分子ロボット対話における「ELSI 論点モデル」を構築するものである（図 1；作成協力：科学コミュニケーション研究所）。この「ELSI 論点モデル」は ELSI 研究者と分子ロボット研究者の協働により作成された。本ノートで紹介する論点のなかには、実際に分子ロボット対話において集中的に論じられた論点もあれば、研究者間の議論において浮上した論点もあるが、著者らは潜在的にはすべての論点に対話における重要なポイントとなりうると考えている。

¹ 本倫理研究会は、研究開発法人科学技術振興機構社会技術研究開発センター（JST-RISTEX）公募型研究開発領域「人と情報のエコシステム」（HITE）における 2017 年度プロジェクト「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）のもとで開始された。分子ロボット研究者と ELSI 研究者の継続的な対話は、JST-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（RInCA）における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」（代表：小宮健）を中心に、トヨタ財団 2019 年度特定課題「先端技術と共創する新たな人間社会」における助成企画「分子ロボットロードマップ構想に向けた分野間・国際間共同研究」（代表：標葉隆馬）および JST-RISTEX・RInCA における研究開発プロジェクト「萌芽の科学技術をめぐる RRI アセスメントの体系化と実装」（代表：標葉隆馬）など複数のプロジェクトを背景としながら、2021 年度現在まで継続して行われている。

² 本対話実践は、JST-RISTEX の RInCA プログラム（注 1 を参照）における「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）の一部として実施された。対話の分析は同氏による同 RInCA プログラム「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」の一部として行われた。

本 ELSI ノートではこの「ELSI 論点モデル」を紹介・説明する。記述は各論点につき：

1. 論点のポイント
2. 対話イベントにおいて実際に市民側により示された実際の発言 ⁱⁱⁱ
3. 発言内容への補足

の 3 項目から構成される（2,3 は省略される場合もある；必要に応じて、分子ロボット倫理研究会の構成メンバーの発言が別途引用される場合もある）。

各論点についてのまとめは 1 に、具体的な発言例は 2 に、2 の市民の発言例に対する補足的な議論・知見等は 3 に、それぞれ記載している。なお、2 については読みやすさや冗長性を考慮し、文意を損ねない範囲で簡単に加筆・編集している。市民側の発言内容には、現在の科学的知見に即して正確でない内容を含む場合もあるが、各論点について市民が抱く言説の例を示す一次資料として、そのまま掲載している。

本「ELSI 論点モデル」および付随する知見の整理は、おもに、今後の分子ロボット技術をめぐる市民対話の設計や分析の参照点として活用されることを目的としている。本論点モデルはこれまでに実施された対話実践に基づくいわば「青写真」としてのモデルであり、将来の対話実践により随時改善されてゆくことが望まれるものである。

オンライン市民対話（全7回）の概要（すべてZoomにて実施）

それぞれの対話は、公募あるいは依頼による3～8名の市民と、5～7名の分子ロボット倫理研究会からの分子ロボット研究者・ELSI研究者、および2～3名のファシリテータ（科学コミュニケーション研究所）により実施された（表1）。対話の基本プログラムは、全員の自己紹介および専門家による20分程度の情報提供ののち、分子ロボットについて評価できる点・評価できない点・疑問点等についてディスカッションを行い、終了後にアンケートを取得するというものである。ワークショップ参加者（匿名）のリストを付録2に添付する。アンケートの結果を含む対話の詳細な要約は分子ロボット倫理研究会[2021]を参照されたい。

表1 実施されたワークショップの概要

ワークショップ名	実施日	略称	備考
農業従事者を対象とする市民対話（全3回）			
分子ロボットで、地球に優しい農業を（第1回）	2020年8月29日	AW1	
分子ロボットで、地球に優しい農業を（第2回）	2020年10月24日	AW2	
農業技術のなかで分子ロボット技術を俯瞰する対話	2021年2月10日	AW3	
一般市民を対象とする市民対話（全2回）			
分子ロボットで、地球に優しい農業を ^{iv}	2020年8月30日	CW1	市民参加者として、農業従事者が1名参加
分子ロボットで、よりよい世界を	2020年10月25日	CW2	市民参加者として、農業従事者が1名参加
地域科学館関係者を対象とする市民対話（全1回）			
科学館での分子ロボット展示コンテツを構想する	2021年1月25日	SW	
分子ロボット研究関係者を対象とする対話（全1回）			
分子ロボット基礎研究ガイドラインを構想する	2021年2月4日	TW	

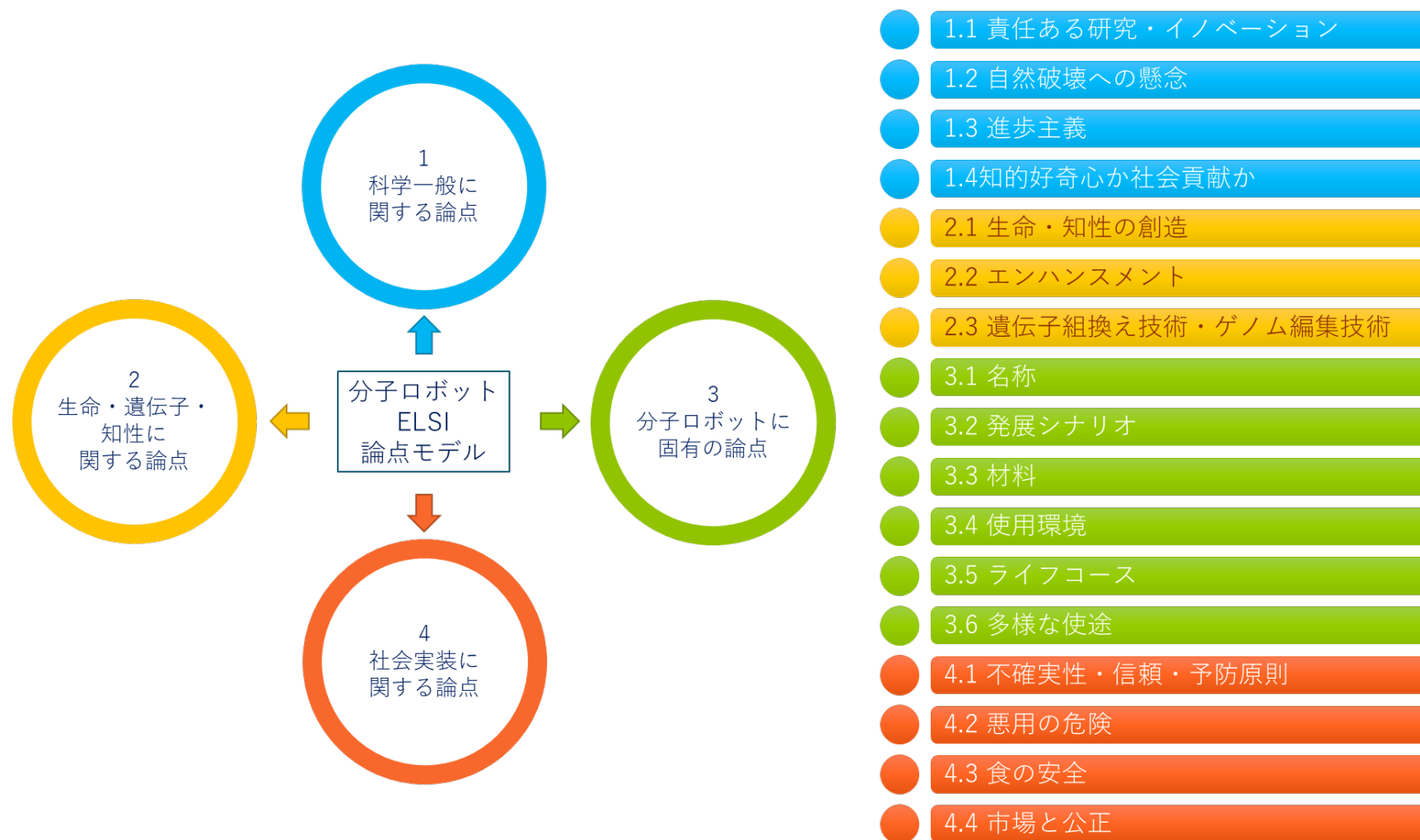


図 1 分子ロボットの「論点モデル」 (知見提供・協力：科学コミュニケーション研究所)

1. 科学一般に関する論点

本節では、分子ロボットをめぐる諸論点のうち、萌芽科学技術一般に共通する基本的な論点を取りあげる。

1.1. 責任ある研究・イノベーション（RRI）

1. ポイント

責任ある研究・イノベーション（Responsible Research and Innovation; RRI）^vとは、科学技術の規制を科学者コミュニティの外部に委託する従来の在り方を超えて、科学者自身が未来の社会を築く担い手となり、人文・社会科学の専門家とも協働しながら、研究のリスクや研究が切り開く社会の未来について、自ら考え行動するという理念である[Gianni et al. 2019b]。RRI は、日本における科学技術と社会のつながりを考えるうえで、近年核となるキーワードとなっている[JST CRDS 2022]。

本 ELSI ノートが示す分子ロボットの「ELSI 論点モデル」は、分子ロボットによる RRI を実践するためのツールとして活用されることを目的としている。本モデルは、オンライン市民対話における具体的な内容を踏まえつつ、過去の研究・実践事例において示されてきた諸論点を結びつける形で展開している。

1.2. 自然破壊への懸念

1. ポイント

市民対話の過程では**自然破壊**への関心・懸念がたびたび表明された。西洋近代科学は「自然を支配・活用する存在としての人間」というヨーロッパ的人間観のもとに成立したとされるが、近年ではそうした考え方の限界も繰り返し指摘されている。そのようななかで、自然環境と共生する、**持続可能な**科学研究・技術開発が世界的に模索されるようになってきている。

分子ロボット研究者らは今回の市民対話実践で分子ロボットのコンセプトを市民に紹介する際、分子ロボットを「効率主義的な社会の在り方を超えた「持続可能な社会」の創生に貢献する技術」として提示した。「分子ロボットで、地球に優しい農業を」「分子ロボットで、よりよい世界を」といった市民対話のタイトルは、そうした意味づけを反映するものである。ここで言及される持続可能性は、分子ロボット技術倫理綱領（付録として掲載）第2条にある**安全と環境への配慮**を考える鍵となる概念ともいえる。

分子ロボット研究者の発言例

要するに、エネルギー源として、まさに石油とか電気を使わないで動くロボットを、まさに分子ロボットは、目指しています、言い方としては。要するに、電気とかガソリンエンジンって、石油を使うじゃないですか。元をたどれば。そういう石油を使わないでも、動くようなロボットにしたいというのが、1つあります。だからこそ、地球に優しいというところに、つながっていくのです。

（参考）分子ロボット技術倫理綱領第2条

2. 安全と環境への配慮（Consideration for safety and environment）

分子ロボット技術に携わる者は、分子ロボットの環境への拡散防止のための措置、安全の確保に向けた取組を行う必要がある。これは、将来世代に対する責任と配慮を含む。

2. 関連する市民の発言例

- ✦ 分子ロボットを使って農薬、化成肥料の代わりなどに活用してほしい。地球を汚すことなく、破壊することなく昆虫などの生物もどれも殺すことなく生かして、分子ロボットが生態環境を整える役割をしてくれると良いと思う。(G; CW1)
- ✦ 人間が作るものは完璧ではないので、何かしらの不具合や危害が発生しそうという懸念がある。あまり便利になりすぎると変な方向に進まないかが心配である。不便なくらいがちょうど良いこともあるので、人間がなんでも作ってしまうと、自然や動物を大事に思えなくなり、地球を破壊してしまう懸念があるのではないか。(G; CW2)
- ✦ 生態系を破壊せずに自然の恵みをいただけるのであれば、現存する生態系を破壊する技術よりも、残留物を残さない分子ロボットのほうが良いと思った。(G; CW1)

1.3. 進歩主義

1. ポイント

科学技術の進歩は、社会に対して大きなベネフィットをもたらしてきた。この科学技術の成功は、それによりもたらされる社会の変化を「人類の進歩」として捉える、進歩主義的な歴史観もまた生み出した。たしかに科学技術の「進歩」は一見よいことばかりにも見えるが、この価値観が**人種差別**や**優生学**と結合し、深刻な差別を生み出してきた歴史的経緯を見過ごすことはできない^{vi}。戦争における化学兵器の使用や公害等の環境問題も、純粋な知的探究や科学技術の進歩による技術革新の副産物である。市民との対話においても、進歩主義的な視点への懸念は、ふとした瞬間に登場してくるものであった。科学技術は、たとえ善良な目的のもとで作られたものであっても、つねに悪用の危険がつきまとうことを忘れてはならない（☞4.2 悪用の危険）。

市民との対話は、科学技術の進歩をめぐる異なる価値観に触れ、あらためて科学技術と社会の関係の在り方について考える機会となる。そのことはときに、研究者が無意識のうちに内面化しがちである進歩主義的価値観を自覚する機会ともなりうる。

2. 関連する市民の発言例

- ✚ なぜ人はどこまでも進化しようとしてしまうのか。なぜ分子ロボットをつくったほうが良いのか。 (G; CW1)
- ✚ なぜどんどん技術を開発してしまうのか。これ以上どんどん進めると、どんどん苦しい社会になるような気がする。そんなに進化しないで良いのではと思ってしまう。疲れてしまう。日々もっとゆっくりと暮らしたい。 (G; CW1)
- ✚ どうして進化を人間は求めてしまうのか。今ある大切なものを1個ずつ大事に見ないといけない。進化すれば良いという考えは見直すべき時期に来ているのではないか。(G; CW1)

3. 発言内容への補足

- 自由な発想に基づく科学技術の進歩が、伝統や既成の道徳、あるいは社会の安定・安全といった他の価値よりも優先されるべきかどうか、また他の価値といかに共存することができるかという論点は、対話における重要な話題のひとつであると同時に、国・社会・文化レベルの科学技術のあり方を考えるうえでも重要な論点である。これらの価値に対して国や社会がとる姿勢によっても、新規技術の規制のあり方・受容のされ方は大きな影響を受ける。

1.4. 知的好奇心か社会貢献か

1. ポイント

「知的好奇心に基づく科学研究・探求」という視点からの市民からの問いかけは、知識探求をめぐる動機とそのあり方について省察的に考える機会となる。対話に参加していた分子ロボット研究者の中には、社会に貢献できるような一人前の研究者になるためには、キャリアの初期には純粋な知的好奇心に基づいた科学研究の経験を積まねばならないと考える者もいた。

2. 関連する市民の発言例

 分子ロボットへの知的好奇心と倫理観・道徳観の狭間で悩むこと、バランスの取り方などで悩むことはあるか。 (o; CW2)

3. 発言内容への補足

- 現代の科学技術研究には、知的好奇心に駆動される（知的）**好奇心駆動型**の研究と、社会貢献を旨とする**使命達成型**の研究の2類型があるとされるが[村上 1999: 43]^{vii}、分子ロボット研究の場合、たとえば次のように生命についての知識探究あるいは「理解」が好奇心駆動型の研究に、その応用としての社会への技術展開・応用が使命達成型の研究にあたるものと、分子ロボット研究者自身には理解されていると解釈できる、以下のような語りが見られる。

分子ロボット研究者の発言例

科学技術には二つあって、何かを理解しようとする、世の中がどうなっているんだろうとか、私達がどうしてこういうところでこういう生活をしているんだろうと、そういう自然と湧いてくるような疑問を解決するという知識の探究ですね。そういうものと、あとはそれをたまたま利用して、何か新しいものをつくるとか、新しい技術をつくると、その二つに分かれると思うんですね。今Aさんが仰っていたのは、技術のほうをなぜそんなにどんどん進めていくのかということなんですけれども、研究者というのは前半のほうも結構やっているんで、私としては前半のほうの何かを知りたいということを通して、皆さんに情報提供をするというのが一つの仕事だと思っています。それを実際に技術を通して展開するかどうかというのは、こういうところで議論をして、不必要であれば無理に展開する必要はないのではないかなと思います。

- こうした語り方は、倫理の問題・市民との対話の対象・規制の対象となるのは使命達成型の研究であり、好奇心駆動型の研究ではないという区別についての認識の表明と解釈することもできる。しかし両者は基礎と応用、プロセスとその結果としてのプロダクトという区別に対応すると解することもでき、独立の実践として区別することはしばしば容易でない。実際にライフサイエンスの研究者自身もまた、しばしば「**作れないものを理解することはできない** (What I cannot create I do not understand)」というリチャード・ファインマンの定式を引用し、製作と理解の密接な結び付きに言及することもある[Calvert 2013: 4-5]。

2. 生命・遺伝子・知性に関する論点

本節では、分子ロボットをめぐる諸論点のうち、生命科学としての特徴に起因する諸論点を取りあげる。

2.1. 生命・知性の創造

1. ポイント

生命を創造するという行為は、これを批判的に論じる人びとからは「**神を演じる(Playing God)**」ことに例えられ[グッドフィールド 1979]^{viii}、隣接領域である合成生物学においても、倫理的な懸念事項として議論されてきた[President Commission for the Study of Bioethical Issues 2010]。

生命科学者は一から「生命を創る」ことの難しさを実感しており、単なる「既存の生命の操作」を超えた**生命の創造**が現時点で可能であると考えることには慎重になっている[岩崎 2017]。他方、対話から見えてくる市民にとっての「生命の創造」への懸念とは、それが科学者から見て「既存の生命の操作」であるのか「生命の創造」であるのかにかかわらず、自然界に存在しないような生命体を人工的に作り出すことに対する倫理的危機感である。それゆえ生命科学者にとっては一からの生命の「創造」ではなく既存の生命の「改変」に過ぎないとみえるものも、市民の立場からすると「生命の創造」に映る可能性があることには注意が必要であり、またそうした考え方が存在する以上、社会においてそれが「生命の創造」あるいはそれに類する行為とみなされ、倫理的な議論の焦点となる可能性があるという。

2. 関連する市民の発言例

- ✚ 分子ロボットは単純な細胞の生物っぽい感じがする。自分で複製できるとか。それってロボットじゃないよなって思いながら聞いていた。(C; AW1)
- ✚ 基本的にロボットだということは納得するが、この技術が進歩してゆくと、ゆくゆくは生命を人工的に作ることにつながるような気がする。(B; AW2)
- ✚ 自分が研究者だったら、生命を作りたいなど、たぶん思います。(B; AW2)

3. 発言内容への補足

- 自己複製能や突然変異の可能性を有する分子ロボットの場合、それが（少なくとも）きわめて生命に近い存在であるということは研究者自身認めるところであり、仮に分子ロボットが「生命」とであるとみなされる場合、あるべき倫理的配慮の性質や法的な位置づけは大きく変わりうる。
- 分子ロボットが生命なのかロボットなのかといった議論は、分子ロボットがカルタヘナ法をはじめとする遺伝子組換え生物などを規制する既存の法律の枠組みによって規制されるべきなのか、それとも分子ロボットを対象とする新たな法的枠組みを設けるべきなのかといった議論をも含む[小長谷 2019]。
- 分子ロボットは、知性的存在の製作という観点からは、人工知能（AI）の製作にも類似した行為と見ることもできる。分子ロボットが既存の AI と最も異なる点は、それが物質的な基盤を持つということであり、この観点からは、分子ロボットは**物質的な知性**の製作と解釈することができるとも考えられる。分子ロボットはこの観点から固有の検討が必要とされる可能性がある。たとえば、自律的に絵を描く分子ロボットが発明されたとしたら、その作品の著作権は分子ロボット自身に帰属するのだろうか（cf. [平野 2017]）。さらに、分子ロボットが自然生命を超越する**シンギュラリティ**は存在するのか^{ix}、超越するとすればどのような意味においてであるかといった挑戦的な議論も考えられるだろう。

2.2. エンハンスメント（人間・環境の「強化」）

1. ポイント

生命倫理の議論において、**エンハンスメント**という術語はふつう、人工の医療技術を用いて人間の能力を拡張・強化することを指す[児玉 2009]。エンハンスメントは、治療として用いられている技術を人間の「強化」あるいは「改良」に利用することは倫理的に許容されるのかという問題を提起する[Juengst 2003]。たとえば遺伝子変異により生じる筋ジストロフィー治療のための遺伝子操作技術を使って、スポーツ選手の遺伝子を操作することは許容されるべきだろうか？このような技術を用いて筋肉を強化した場合、それは「ドーピング」に当たるのだろうか？あるいは成長ホルモン欠損症を抱える子供に人工的に生成した成長ホルモンを投与することは望ましいとしても、ホルモン分泌が正常な低身長の人に成長ホルモンを投与することは許容されるべきか？また、一体どこまでが「治療」にあたり、どこまでが「強化」に相当するのか？などなどといった問題である。

分子ロボットをめぐる市民対話においてエンハンスメントという言葉は、人間の能力の強化という意味に加えて、自然環境に対して人間が働きかけることで、自然環境の働きを強化するという意味でも用いられた。環境への働きかけは、人間への働きかけの場合とは異なる倫理的問題の系を構成すると考えられるが、類推的に問題を構成することもできるだろう。たとえば分子ロボットをつうじた環境への介入が、「自然が本来有しているポテンシャルを引き出すもの」と解釈される場合、望ましいものとして受け止められる可能性が考えられる。一方、その介入が「自然の本来のポテンシャルを超えた搾取」とみなされたり、「自然を改変する行為」とであるとみなされた場合には、望ましくないものとして受け止められるかもしれない。また、こうした場合に「自然の本来のポテンシャル」がどのようなものとみなされるのかは、それ自体が専門家・市民を含めた議論の焦点であるという点も留意しなければならない（同型の議論を展開している『**4.3 食の安全**も参照されたい）。

2. 関連する市民の発言例

- ✚ (不妊治療を受けているので) 卵子を若返らせて子供ができるロボットが欲しいです^x。
- ✚ 先ほど話したリンの話みたいな、非常に自然界のすごいバランスの中でできてるので、これにいいからということで一部分だけクローズアップして、そこに対して影響を出してしまうと、結果全体的にバランスを崩しちゃうだろうなというのは、やっぱり不安に思います。 (B; AW1)

2.3. 遺伝子組換え技術・ゲノム編集技術

1. ポイント

遺伝子組換え生物（Genetically Modified Organisms；以下 **GMO**）にかかわる ELSI 対話はすでに長年の蓄積があるため、そこからさまざまな教訓を引き出すことができる[cf. 標葉 2019: 283-285; 2020 80-84]。先駆的事例であるイギリスにおいては、1990 年代に牛海綿状脳症（Bovine Spongiform Encephalopathy；BSE、狂牛病としても知られる）の発生が社会問題となり、さまざまな市民対話を実施された。そこから以下のような反省的知見が得られている。たとえば：

- 対話においては、問題を科学・技術的問題に限定せず、参加者が不安を抱く社会的・政治的課題もまた議論の対象としなければならないこと
- 対話をつうじて参加者はベネフィットに加えてリスクに対しても関心が高まるということ
- 十分な規制や社会に対する明確なベネフィットの提示なしに行われる商業化に対する反感が強いということ
- 政府や多国籍企業に対する不信感があること、そして何よりも、萌芽技術の社会実装を考える場合には、その早期からコミュニケーションを継続することが重要であること

などである。

日本における GMO 対話実践からは、本邦における周辺領域の科学・技術の受容状況について学ぶことができる。日本においては 1990 年代半ばより GMO の食品利用が進展したことなどを背景に、急速に GMO についての認知が進んだ。日本では GMO に対する忌避感は根強く、北海道では野外栽培試験に対する強い規制をかける条例が策定されている。そうしたことを背景として、北海道では風評被害などへの懸念から、2005 年に「北海道遺伝子組換え作物の栽培等による交雑等の防止に関する条例」が交付されている。この条例では GMO に対する野外栽培に関し、国の基準よりもはるかに高い基準が要請されていることなどもあり、研究者側からは懸念の声も漏れている。詳細は標葉[2019: 285]を参照されたい。

遺伝子組換え技術がある生物に別の生物の遺伝子を導入する技術であるのに対し、**ゲノム編集**とは、遺伝子を挿入・削除・改変する試みである。この技術を利用したゲノム工学は、2010 年代に確立された **CRISPR-Cas9** システムの開発により、現在急速に発展している。ゲノム編集技術に関しても、すでに GMO と同様対話実践が行われてきており[三上・立川 2019]、そうした隣接分野における対話実践の経過は十分参考になる可能性がある^{xi}。

2. 関連する市民の発言例

- ✚ 遺伝子組換えでできた食べ物ばかり食べているから、不妊治療者がこれだけ増えたのではないかという噂を聞いた。安全性が担保できない技術はこれ以上進めてほしくない^{*}。
- ✚ 自分の理解だと、今までの遺伝子組換えってゲノム編集ですよ。 (i; CW1)

3. 発話内容への補足

- 農業・畜産領域への分子ロボット技術の応用においては、分子ロボット技術が遺伝子組換え技術と比較される可能性も十分にあることを念頭においておく必要がある。分子ロボット技術の社会実装のやり方次第では、遺伝子組換え技術に対するネガティブなイメージが、分子ロボットに対して付与される可能性もあることに留意する必要がある。
- 本報告が対象とした分子ロボット市民対話では、遺伝子組換え技術とゲノム編集の違いについて詳細な説明はなされなかったため、市民には遺伝子組換え技術と区別されることなく認識されている。しかし遺伝子組換えとゲノム編集が「同じ」技術であるか「異なる」技術であるかということ自体ひとつの重要な争点であることに加え[三上・立川 2019: 4-5]、両者が置かれている社会的な文脈は大きく異なるため、必要に応じて関連する論点を説明・提供する必要がある。

3. 分子ロボットに固有の論点

本節では、分子ロボットに特徴的な性質およびライフコースの各段階について、それぞれ論点を示している。

3.1. 名称

1. ポイント

分子ロボットに関する市民との対話に固有の焦点は、まずその「**分子ロボット**」という名称である。「ロボット」という言葉はさまざまに定義されうるけれども[NEDO 2014]、分子ロボット研究者によるロボットの定義はとくに、「センサー、知能・制御系、駆動系の3つの要素技術を有する、知能化した機械システム」という産業用ロボットの定義[ロボット政策研究会 2006: 7]に準拠するものである。

一方、日常的な語法において、ロボットという語は「人間のために便利に働いてくれる機械」を想起させる。つまりロボットという語は機械であって「生命体ではない」ことを含意している。市民との対話においても、分子ロボット研究者は「生命ではないもの」を製作しているという第一印象をもって迎えられる。しかし、分子ロボットは生体分子を材料としており、またその基盤となる技術の多くは生物学における遺伝子操作技術等に由来している。理解が進むにつれ、分子ロボットの製作はほとんど「生命の創造」と変わらないのではないか、という印象を入びとにあたえる場合もある。

2. 関連する市民の発言例

分子ロボットは単純な細胞の生物っぽい感じがする。自分で複製できるとか。それってロボットじゃないよなって思いながら聞いていた。(C; AW1)

私は最初、分子ロボットは漠然と農業の自動化のことだと思っていたんですね。例えば、ハウスの温度調整を自動でやるとか、そういったことをロボットがしてくれるのかなと思っていたんですけども、分子レベルでロボットを入れるということで、安全と聞いてもちょっと漠然とした不安感があるなと思います。(i; CW1)

3. 発言内容への補足

- 研究者にとっては、概念を定義や性質によって特徴づけられるものと考えるため、名称は概念にとって非本質的な事柄であり、単なるラベルに過ぎないと考えてしまうことがあるかもしれない。しかし非研究者との対話においては、概念の名称の引き起こす連想は、対話の在り方を方向づける重要な要因のひとつであることに少なからず留意する必要がある（対話に参加した分子ロボット研究者には「分子ロボットは名前がよくない」と言われたことがある者もいる）。対話においては、「それはロボットと呼ばれているが、本当はそれはロボットではないのではないか？」といった懐疑にもつながる問いも示された（☞**2.1 生命・知性の創造**）。
- 「分子ロボット」はアカデミックな領域においてはすでに国際的に広まっている言葉でもあり、多数の研究者の合意がなければその名称を変更することは困難であるとも考えられる。しかし社会実装を前提とするならば、「分子ロボット」という名称が本当に適切であるかどうかをあらためて検討する機会を設けることも考慮に値する。

3.2. 発展シナリオ

1. ポイント

分子ロボット研究者の村田らは、**分子ロボットの発展シナリオ**として図2のような段階的發展を提案している[村田 2019: 7]。

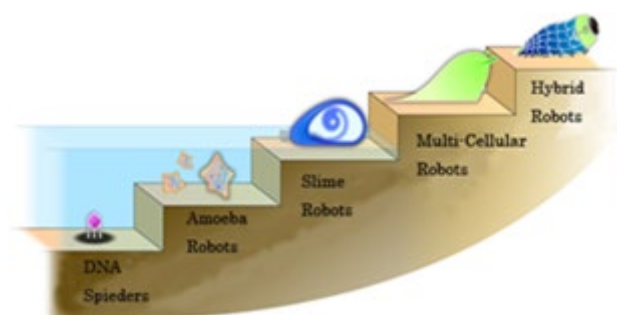


図2 分子ロボットの発展シナリオ^{xii}

もっとも低次の分子ロボットから順に、単分子に機能を盛り込む「分子スパイダー（第0世代）」、リポソームに分子デバイスを封入する「アメーバ型（第1世代）」、ゲルに分子デバイスを分布させる「スライム型（第2世代）」、多細胞化された「多胞型（第3世代）」、電子技術との生体の混淆体である「ハイブリッド型（第4世代）」と名付けられている。次の段階へのステップアップにはそれぞれ技術的な「壁」（ランダム性の壁、スケールの壁、多様性の壁、生化学反応の壁）があるとされており、高次の分子ロボットになればなるほど製作は困難である。本ノート執筆時点で、第1世代のアメーバ型まで作成に成功しており、第2世代のスライム型までが一部製作されている。複雑化・高機能化にあたっては多細胞化が不可欠であると考えられており、現段階での課題となっている。

現時点では、分子ロボットに具体的な実用的機能を付加できる段階にはない。そのため、現時点での対話においては、どのような機能をつけたいか／つけてもよいか、といった議論が中心となっている。今後さらに研究・開発が進み、具体的に何らかの機能が実装されるという段階になれば、さらなる対話が必要となるだろう。

分子ロボット倫理委員会では、ELSI研究者と分子ロボット研究者が協働してより詳細な**分子ロボット研究のロードマップ**を作成することを計画しており、分子ロボットの発展シナリオについても更新される可能性がある。

2. 関連する市民の発言例

現時点だとアメーバ型の分子ロボットまでできるようになっているという話があったと思いますけれども、それだと何ができるのか。その先の多細胞型の分子ロボットだと今後、何ができるようになるのか。その後技術の進歩がどれくらいのタイムスケジュールでできるようになると見込まれているのか。そういったことが分かれば教えていただきたい。(j; CW1)

3.3. 材料

1. ポイント

分子ロボットは DNA などの**生体分子**を材料とすることがその特徴である。金属製のロボットとは異なり、外界と自らを隔てるシャースを細胞膜や油、DNA でできたゲルといった材料で製作される。こうした素材は微生物等により自然に分解されるため、現時点での分子ロボット研究における技術的課題は、環境負荷をかけないことよりも、むしろ適切な期間環境の中で残存させるかという点であると考えられている。このような残存を可能とするために、プラスチックによる分子ロボットのコーティングなども模索されている。

具体的な材料は用途に応じて適切なものが選択されるべきである。たとえば飲用・服用の分子ロボットや人体に入れる医療用分子ロボットなどの場合には、食品添加物など同様の材料を用いて、人体に対する安全性を確保するといった手法も提案されているが、こうした議論には「食の安全」をめぐるこれまでの議論を応用して考えることもできるだろう。特定の機能を実装する場合にはセラミックスなどの無機物を組み合わせることも考慮されているが、無機物が含まれる場合にはそれ自体が環境負荷の高い廃棄物になるのではないかという懸念も市民の側から示されている。

DNA ゲルなどによって作成される分子ロボットは**生分解性**を持ち、微生物によって自然に分解されると考えられており、環境に対して与える影響が大きいと市民に説明する分子ロボット研究者の発言もあった。しかし生分解性があることと「環境に優しい」ことがどういう関係にあるかということについては、慎重に検討を要するだろう（☞3.5.8 分解）。

2. 関連する市民の発言例

🌈 ロボットである以上、何らかの素材を媒介としますけれども、有機物であれば、人間の体内で消化されたり、土の中でしたら、ロボット自体が肥料になるのかなと思うのですけれども、そうなると、活動場所に制限がかかってくるのかなと思ったのです。無機物であれば、活動の場は広がりますけれども、それ自身が産廃物となり得ないのかなというところが気になりましたので、素材は何を検討しているのかを、教えていただきたく思いました。
(k; CW2)

3.4. 使用環境

1. ポイント

対話実践においては、農業分野などのように近い将来に現実化しうると考えられる応用領域のみならず、**宇宙や高温下・高圧下などの極限環境**において分子ロボット技術を応用できるのかどうかという興味を持つ人も少なくなかった。こうした領域は、とりわけて社会における期待を集める可能性がある。分子ロボット研究者も、現時点では展望の域を出ない応用領域と考えてはいるものの、そうした極限環境での応用の可能性について否定していない。

2. 関連する市民の発言例

✚ 私は宇宙が好きで宇宙に住みたいなと思っている。例えば農業で言えば無重力で生育ができるだとか、二酸化炭素がなくても生育できるだとか、あとはそれを植えさえすれば人間が住める環境を勝手につくってくれるとか、そういうことができれば夢が広がる。実用的ではないかもしれないが、ロマンだなと思っている。そういうのが実現できたら嬉しいと思う。(j; CW1)

✚ 身体の酸素供給が少なくなると、人間は酸素ポンペを背負わないといけないじゃないですか。分子ロボットを使うと、極限環境にもいけたりするのか、宇宙で何か実験をするときに分子ロボットを使えるのか。耐久性があるのかどうか、耐熱性なども疑問に思いました。(l; CW2)

✚ 福島の原子力施設でロボットが活用されているようだけれども、故障して止まって、そのまま放置されているという話も聞く。そういうことから考えて、人体に悪影響にある環境で使用し、その後何事もなく、地球に還元されるようになるのか (l; CW2)

3.5. ライフコース

ポイント

分子ロボットのライフコースに基づく論点整理は、一連の対話イベントをとおして得られた主要な成果のひとつである。分子ロボットには、その**ライフステージに応じた固有の検討事項**が存在すると考えられる。

分子ロボットの設計においては、ライフステージごとに設計上の選択がありうる。それぞれのステージでの選択に応じて、技術としての不確実性・社会でのリスクの高低が変化すると考えられる。たとえば「自己増殖する」分子ロボットは、「自己増殖しない」ロボットと比較して不確実性が高く、社会に与えるリスクが高くなる可能性があり、より強い規制を生じさせる必要があるかもしれない。

本論点に関してのみ、他の論点とは異なる書式を採用する。**Choice**の中には、それぞれのライフステージにおける具体的な選択肢の例を提示する^{xiii}。これらの選択肢は、分子ロボットのライフコースというスキームを用いた議論の可能性を例示するものであり、すべての可能性を網羅することを目的とするものではない。それぞれの Choice にどのような可能性があるのかということも、さらに議論されることが望ましい。

3.5.1. 生産

Choice

- 実験室で少量生産する
- 工場で大量生産する
- 生体内で複製する

- 現在、分子ロボットの製作は研究開発フェーズであり、実験室で少量生産されている。分子ロボットを社会に供給するフェーズに至った場合、その製造については、医薬品や農薬と同様、健康・環境・安全保障等において深刻なリスクを引き起こしうると認められる場合、製造に対する規制を検討する必要がある可能性がある。
- 対話では分子ロボットが実際に市場での販売が現実的とみられる段階に至った場合、生産方法としては**工場での大量生産**という方法になるであろうことが示唆された。大量生産を視野に入れる場合、市場に対する影響や市場に関するさまざまな倫理的課題（4.4 市場と公正を参照のこと）をも視野に入れて考える必要がある。
- **生体内での複製**による分子ロボットの生産を視野にいれる場合、工場による大量生産とは異なる、生体に対するリスクや複製によるリスクも勘案しなければならない。

3.5.2. 流通

Choice

- 乾燥させて流通させる
- 凍結させて流通させる

- 分子ロボット研究者によれば、市場販売段階における分子ロボットの輸送法としては、現時点では**乾燥**や**冷凍**などの方法による保存・輸送の在り方が考えうるとされる。
- 生産過程と同様、分子ロボットが誰でも簡単に購入できることによって健康・環境・安全保障等の観点からリスクが生じる場合には、用途に応じて流通に対する規制を検討する必要があると考えられる。

3.5.3. 使用

Choice

- 大量使用する
- 環境に影響を与えない範囲で少量使用する
- 開放系で使用する
- 実験系で使用する

- 環境への影響は、分子ロボットを使用する量にも依存する可能性があるということを考慮する必要がある。少量であれば環境影響の少ないものでも、**大量に使用**すれば環境に無視できない影響を及ぼすかもしれない。
- 使用についても生産・流通と同様、健康・環境・安全保障等の観点からリスクが生じる場合には、使用に関する基準の策定・法整備を検討する必要があると考えられる。

3.5.4. 作用

Choice

何に	どこで
- 動物に - 植物に - 微生物に - 無生物に	- 体表で - 体内で - 細胞内で - 核内で

- 分子ロボットが**作用する場**により分類することは、すなわち、土壌などの環境内で作用するのか、家畜や作物内で作用するのか、それとも人体内で作用するのかといった分類をすることは、分子ロボットが持つリスクを評価するためのひとつの方法でありうる。それぞれについて、法的な規制のあり方も安心に関する心理的効果も大きく異なり、また許容されるリスクも異なるからである。
- 食・農業領域への応用において土壌内で作用させることを考える場合、その機能は農薬に類似していると考えられ、規制も農薬に準じるべきと考えられることになるかもしれない。同様に、家畜内で作用させることを考える場合その機能は飼料に類似していると考えられ、飼料安全法の基準に即した運用が必要とされるだろう。人体内での作用を考える場合、医薬品に類似した機能を持つ場合には、医薬品・医療機器等法に基づき、医薬品そのものの効能・安全性の審査に加えて、製造者の登録・審査も必要となってくるかもしれない。食品の場合、特定保健用食品や遺伝子組換え作物は事前の申請・承認が必要であるが、分子ロボットの特性あるいは分子ロボットが影響を及ぼした食品の性質によっては同様の取り扱いが生じてくるかもしれない。食品添加物としての使用が検討される場合、食品添加物は指定制であり、原則として食品衛生法に記載されたリストに含まれる添加物以外を使用することは認められていない点に留意が必要となる。新たな食品添加物の登録は、厚生労働省に申請することができる[厚生労働省 n.d.]。いずれの場合にも関係者との十分な協議なしに開発することはリスクをとまうため、規制官庁や利害関係者と十分に相談・議論し、状況を正確かつ適切に把握する必要がある。

- 人体内での使用可能性はもちろん医療の新たな可能性を拓くものであり、環境内での使用可能性も人間社会への福祉の向上に繋がりをものとするものである。分子ロボット技術倫理綱領第1条にあるように、リスク・ベネフィットを総合評価しながら、負担やリスクを最小化させる対策を講じつつ研究開発を行うことが望まれる。

(参考) 分子ロボット技術倫理綱領第1条

1. リスク・ベネフィットの総合評価 (Comprehensive assessment of risks and benefits)

分子ロボット技術に携わる者は、その技術の複雑性に鑑み、人間・環境への負担ならびに予測されるリスクと利益を総合的に評価し、もたらされる利益を最大化するだけでなく、負担とリスクを最小化するための対策を講じなければならない。

関連する市民の発言例

- ✚ 分子ロボットが使用された農業でつくられたものを人が摂取すると、分子ロボットが人に害を与えることはないのでしょうか。 (j; CWI)
- ✚ 医療分野での開発が進み、ガンを食べてくれるアメーバとか、ミトコンドリアを活性化してくれる、アンチエイジングアメーバとかできたら嬉しい。ぜひ生殖分野で、卵子活性化、卵子老化防止の分子ロボットを開発してほしいとも思っている^x。

3.5.5. 制御

Choice

- 外部から制御可能にする
- 自律して行動し、外部からの制御を必要としないようにする
- 封じ込めの方法を検討する

- 分子ロボットを制御する機構としては、光に応答して変形・蛍光発光する仕組み（**光応答性**）などが試行されている。土壌中など可視光が届かない領域の制御についても、赤外線などの利用による制御の可能性が考えられる。制御可能性は、環境下における分子ロボットのリスク評価に必要な条件となるものと考えられる。
- 環境中への流出の抑止および流出時のリスクを低減する**封じ込め**のあり方については、遺伝子組換え生物についてはカルタヘナ法に**物理的封じ込め**、**生物学的封じ込め**に関する定めがあるが^{xiv}、分子ロボット特有の封じ込めの考え方として**化学的封じ込め**といった考え方も検討されるべきではないか、という分子ロボット研究者の意見もあった。
- カルタヘナ法における遺伝子組換え生物の生物学的封じ込めでは、病原性・伝達・伝播性の観点から安全と判断された宿主とベクターの組み合わせ（（特定）認定宿主ベクター系）を指定することにより実施されてきた。2015年にアメリカの研究グループが、自然界に存在しない人工合成アミノ酸を用いなければ生存できないような封じ込めの手法を発表した[Mandell et al. 2015; Rovner et al. 2015]。このような新規の封じ込め手法をさらに推し進めて、分子ロボットの動作機構自体に自然界に存在しない化学物質を用いることで封じ込めを行うという考え方が、化学的封じ込めという考え方である。

3.5.6. 追跡

Choice

- 分子ロボットそのものを追跡できるようにする
- 分子ロボットの流通過程を追跡できるようにする

- 分子ロボットの追跡可能性（**トレーサビリティ**）は環境下の安全性を評価する上でもきわめて重要な技術的要点となるだろう。トレーサビリティは、BSE 問題のケースにおいても、リスクの適正な管理を可能にする概念として注目された。トレーサビリティは、リスクを管理することにより安全を確保することはもちろん、生産・流通過程の公正を担保するという観点からも重要であり、分子ロボット技術倫理綱領第3条に定められた**セキュリティ**への対応、および第4条に定められた**説明責任と透明性の担保**を実現する核となる概念であるといえる。
- 分子ロボットのトレーサビリティとしては、**サプライチェーンのトレーサビリティ**と、**分子ロボットそのもののトレーサビリティ**の2つの種類のトレーサビリティを考えることができる。「サプライチェーンのトレーサビリティ」とは、食の安全の領域で検討されてきたトレーサビリティであり、品目や入出荷記録を記録することで対象食品（この場合には分子ロボット加工製品）の移動を把握できるようにするものである（cf. [農林水産省 2008; FAO/WHO 2006]）。「分子ロボットそのもののトレーサビリティ」とは、外部からの刺激に対して何らかの応答を返す仕組みを分子ロボットに組み込むことで、分子ロボットを監視するようにできることを意味する。トレーサビリティは、不確実性を伴う萌芽科学技術が社会において定着する過程で重要となる考え方である（**4.1 不確実性・信頼・予防原則**）。
- サプライチェーンのトレーサビリティは、商品の安全を管理し品質を保証するために用いることができる。とくに、食中毒や食品事故などの際に当該加工商品を回収したり、事後の健康影響をモニタリングするうえで重要である。

関連する市民の発言例

- ✚ なぜ追跡が必要なのかが分からなかった。 (D; AW2)
- ✚ 追跡方法があるということは売りにもありそう。 (B; AW2)
- ✚ 遺伝子組換え作物のとき、その個体がそこで「これは遺伝子組換えですよ」っていうことが他から判別できるような印、マーカーが必要だという話があった。分子ロボットも別の用途に悪用したり、環境に悪いことや作物に悪影響を与えることもできないわけではないだろう。悪用や副作用を考えるとそういうマーカーが必要なのではないかなと思う。 (E; AW1)

(参考) 分子ロボット技術倫理綱領第3条

3. セキュリティとデュアルユース問題への留意 (Paying attention to security and dual-use issues)

分子ロボット技術に携わる者は、材料や情報の適正な取り扱い、実験に関わる者の管理・監督など、輸送時の管理や情報漏洩の観点も考慮したセキュリティ対策を検討するべきである。また、デュアルユースに関する問題にも注意を払う必要がある。

3.5.7. 増殖

Choice

- 自己増殖能を付与する
- 宿主があれば増殖可能であるようにする
- 増殖しないようにする

- 生命のさまざまな特徴のなかでも、**自己増殖能**は分子ロボットにとって重要な側面であるというのが、分子ロボット倫理研究会のメンバーの主要な見解であった。自己増殖能は、分子ロボットの社会に対するリスクを考えるうえで、最も留意しなければならない要素のひとつである。対話において、分子ロボット研究者は、分子ロボットに自己増殖能を付与することが、社会・環境に対する制御不能な影響を及ぼす可能性に自覚的であった。同時に、自己増殖能を全面的に禁止することは、分子ロボットの未来の可能性を大きく制限するものであると考える分子ロボット研究者もいる。
- 自己増殖能の付加の是非については、対話に参加した専門家のあいだでも温度差・グラデーションが存在する。ただし自己増殖能を与えた場合に、意図せざる増殖が起きないようにするための封じ込めが必要であるという点については一致を見ている。
- このような分子ロボット研究者の認識にもかかわらず、市民対話において自己増殖能が論点として話題にのぼることは少なかった。自己増殖能にまつわるリスクに関しては、研究者と市民の間で理解のギャップがある可能性が考えられるので、とりわけ将来のリスクについて議論する文脈においては、事前に十分な説明を尽くす必要があると考えられる（cf. **4.1 不確実性・信頼・予防原則**）。

3.5.8. 分解

Choice

- 生分解性を与える
- 自己破壊能を付与する
- 分解されないようにする

- 分子ロボット対話の文脈では、「環境に優しい」「地球に優しい」という言い回しは、生分解性のアイデアと密接に結び付けられて語られている。生分解性の概念が「環境に優しい」という考え方と結び付けられる背景には、たとえばプラスチックなどの生分解性の低い材料による環境破壊などの問題がある。しかし、「環境に優しい」という概念は複雑であり、生分解性というひとつの特性に一意に還元できるものであるのかどうかという点については、慎重な検討を要する。同時に、分解能力の制御は、トレーサビリティと並んで、環境下でのリスクを制御・評価するための基幹となる技術のひとつである。
- 生体分子で構築された分子ロボットは、環境中や生体内で糸に反して分解されてしまうことがある。分子ロボット研究者の視点からは、現時点での技術的課題としては、環境下に残らないことにすること以上に、環境下・生体内で、意図した期間、残存し続けさせることのほうにあると考えられている。分解されないことによるリスクはもちろん、意図せざる分解のリスクについても考慮にいれる必要がある。

3.5.9. 生成物

Choice

- 完全に分解されるようにする
- 一部残存するようにする

- 分子ロボットは環境に働きかける何らかの機能を与えられ、環境下にその機能を利用して生み出された生成物をもたらす。また機能を終えた分子ロボットは、その残骸が環境下に残存する可能性がある。

関連する市民の発言例

 役目を終えたロボットの残骸がどうなっていくのか気になる。 (h; CW1)

3.5.10. 変異

Choice

- 自然環境下で変異するようにする
- 自然環境下で変異しないようにする
- 封じ込めの方法を検討する

- 自己増殖能の付与が社会・環境に制御不能なリスクをもたらしうると考えられる主な要因は、変異を引き起こすことで事前に予測されていない性質や機能を有するようになる可能性があると思込まれるからである。
- 食の領域への応用の文脈において分子ロボットと農薬を比較した場合、下記の発言例のように、変異のリスクがある点が農薬とは大きく異なる点として挙げるができる。

関連する市民の発言例

✚ 例えば、草の種を食べてくれたけど、急に「俺、こっちのほうを食べたいな」と言って、作物をムシャムシャしたりとか、例えば、土壌の中で、急に悪い子になって、それが広がって、急に悪さして、それが広がるとか、本当に永久に良い子で、その子たちは、働いてくれるのだろうかというのが、ちょっと1つ大きくあります。(A; AW3)

3.5.11. 進化

Choice

- 自然環境下で進化するようにする
- 自然環境下で進化しないようにする

- さまざまな変異をつうじて環境に適応する個体が発生する過程を長いタイムスケールで考える場合、「分子ロボットの進化」について考えることができる。社会や環境に対するリスクという観点から考えた場合、自己増殖能や変異可能性は規制されるべきものとされうる。カルタヘナ法においても、宿主やベクターは伝達・伝播性の観点から分類され、病原性と伝達・伝播性の程度に応じて規制の度合いが異なっている。
- 他方、不適切な規制は生物進化についての知識探究そのものを阻害する可能性もあるかもしれない。すでに分子工学技術を用いることで、自然状態とは異なる環境を実験室に構築し、試験管内で進化させることをつうじて新たな知見が得る研究も進められている[村田編 2019: 189-190]。分子ロボット技術倫理綱領第1条にあるように、リスクとベネフィットを総合的に評価したうえで規制の在り方を考える必要がある。

(参考) 分子ロボット技術倫理綱領第1条

1. リスク・ベネフィットの総合評価 (Comprehensive assessment of risks and benefits)

分子ロボット技術に携わる者は、その技術の複雑性に鑑み、人間・環境への負担ならびに予測されるリスクと利益を総合的に評価し、もたらされる利益を最大化するだけでなく、負担とリスクを最小化するための対策を講じなければならない。

3.6. 多様な用途

1. ポイント

分子ロボットには医薬品・食品・農薬・飼料・食品添加物等、さまざまな用途がありうる。それぞれの用途に応じて異なる法的・倫理的・社会的課題が存在する。

医薬品の場合には、医薬品・医療機器等法に基づき、医薬品そのものの効能・安全性の審査に加えて、製造者の登録・審査も必要となっている。人間を対象とする医学研究の倫理的原則を定めたヘルシンキ宣言など、医療の基礎的な倫理原則にも留意しながら、慎重に研究・開発を進めていくことが必要となる。

食品の場合も、特定保健用食品や遺伝子組換え作物は事前の申請・承認が必要である。分子ロボットを利用した食品の場合もこれらに準ずるものと考えられる。食品におけるナノテクノロジーの利用とも共通の課題が生じる可能性がある^{xv}。

農薬の場合、人間・家畜・環境に対する影響は、農薬取締法により、製造・輸入・販売・使用すべての段階において規制されている[農林水産省 n.d.]。日本における農薬の製造は登録制であり、独立行政法人農林水産消費安全技術センター（Food and Agricultural Materials Inspection Center; FAMIC）による検査を経て、登録された農薬のみを製造・輸入・販売することができる。農薬取締法に基づいて効果や害、毒性・残留性についての評価を行い、認可された場合にのみ生産・流通・販売が許可される[農林水産省 n.d.]。食品中の農薬の残留基準等については食品衛生法により、生産過程における農薬の使用については農薬取締法により規制されている。仮に分子ロボットが作物に吸収され作物中に残留する可能性がある場合には、作物中の残留量についての基準を設定する必要があるかもしれない[農林水産省 2019]。

飼料については、飼料安全法の基準や規格を満たす必要がある。飼料安全法ではとくに残留農薬・重金属・かび毒・メラミン・動物由来たんぱく質・遺伝子組換え生物については特段の配慮が必要とされている。家畜に吸収させる飼料として使用される場合、食品安全基本法・飼料安全法に基づく飼料の安全性評価などが必要となる可能性が考えられる。

食品に対して直接添加することを検討する場合、その機能は食品添加物に類似していると考えられる。食品添加物は指定制であり、原則として食品衛生法に記載されたリストに含まれる添加物以外を使用することは認められていない。新たな食品添加物の登録は、厚生労働省に申請することができる[厚生労働省 n.d.]。また、**食の安全**に関する特段の配慮が必要となることに注意が必要である（☞4.3 食の安全）。

4. 社会実装に関する論点

本節では、萌芽科学技術の社会実装一般にかかわる諸論点を取りあげる。

4.1. 不確実性・信頼・予防原則

1. ポイント

新しい科学技術は未来への影響を正確に予測することが難しく（萌芽科学技術の**不確実性**）、とくにその技術が人びとの生活に大きな影響を与えることが見込まれる場合、「その新しい技術は本当に生活の安全を脅かすものではないのか」という**不安**を人びとが抱くことがある。

新しい技術が**安全**であることを客観的に示すことができればそうした不安感を取り除かれるかもしれないが、不確実性のゆえに100%安全であることを示すことはしばしば困難である。また、人びとの**安心**の問題[村上 2005]は、技術的な安全の問題であると同時に**信用・信頼**の問題でもあるがゆえに、科学的リスク評価に基づく安全性の保障がただちに人びとの安心感をもたらすわけではないという点にも注意が必要である。

さらに、安全であるとされた技術がのちに深刻な危害を引き起こした場合、当の萌芽技術のみならず、**科学技術の進歩そのものに対する不信**が増幅される可能性があることにも注意する必要がある^{xvi}。場合によっては、対話において新規技術の不確実性を率直に認めることも選択肢となりうることを強調しておきたい。

萌芽科学技術の不確実性への対応としては、2つの両極となるアプローチが考えられる。すなわち、実際に危険であることが発覚するまでは特段の規制は必要ないとする態度（**許諾不要のイノベーション**）[Thierer 2016]と、危険でないことが明らかになるまで研究開発すべきではないとする態度（**予防原則**）である^{xvii}。前者のアプローチを取る者は規制がイノベーションの効率性を阻害すると主張し、危険を促す側に举证責任があると考え。後者のアプローチを取る者は取り返しのつかない危害の可能性に警鐘を鳴らし、危険がないことを対策を引き延ばす理由としてはならないと主張する[国連環境開発会議 1992]。分子ロボットをめぐる対話は、リスクの所在を探索し、そうしたリスクに対して予防原則をどの程度まで適用すべきかをめぐる議論も含むものである。

2. 関連する市民の発言例

- ✦ まだ新しいものなので安全性が信用できない。 (G; CW1)
- ✦ 遺伝子組換えでできた食べ物ばかり食べているから、不妊治療者がこれだけ増えたのではないかという噂を聞きまして、安全性が担保できない技術はこれ以上進めてほしくないです^x。
- ✦ 新しい技術なので、それが本当に人間にとって安全なものなのかどうかというのは、完全に分かるには長い時間がかかるのかなと思いますし、仮に本当に安全だったとしても、やはり自分達というのは、結構新しいものとかに対しては、なんとなく漠然と恐怖を持ったりすることがあると思うので、本当にこれが安全なんだというのは、しつこく訴えていくと共に凄く慎重に進めていかないと浸透しないんだろうなと思いました。 (i; CW1)

3. 発言内容への補足

- 農業者の発言例からは、食という生活に密接にかかわる分野に分子ロボットという萌芽科学技術が介入することへの不信・不安を読みとることができる。最後の発言例にもあるように、ある技術が安全なものであると社会に信頼されるためには長い時間が必要であり、科学的なリスク評価によって安全であると示すことがただちに信頼の獲得につながるわけではないことには注意が必要である（具体例として『4.3 食の安全も参照のこと）。

4.2. 悪用の危険（デュアルユース・マルユース）

1. ポイント

科学技術の悪用の問題や、技術の進歩から悪用可能性を単純に分離できないというジレンマの存在（いわゆるデュアルユース・ジレンマの問題）は、20 世紀の生命科学の発展の裏面として常につきまといてきた^{xviii}。

すでに➡1.4 知的好奇心か社会貢献かの項で述べたように、一般的に科学者が研究に従事する際の動機はそもそも技術の開発のみにあるわけではなく、ましてや技術の悪用を意図して研究開発にあたっているわけではない。しかしこれまでに現実に起こった悪用の経験を踏まえるならば、悪意をもった第三者が新規技術を利用して犯罪やテロリズムに及ぶ可能性をある程度予想したうえで、必要な予防措置を取ること、あるいは悪用や予想しなかった使用の可能性が判明した場合には、迅速な情報を共有するなどの対応が現代の科学者の責任に含まれる。分子ロボット技術倫理綱領第3条に「デュアルユースに関する問題にも注意を払う必要がある」と定められているのも、こうした考え方が反映されている。

（参考）分子ロボット技術倫理綱領第3条

3. セキュリティとデュアルユース問題への留意（Paying attention to security and dual-use issues）

分子ロボット技術に携わる者は、材料や情報の適正な取り扱い、実験に関わる者の管理・監督など、輸送時の管理や情報漏洩の観点も考慮したセキュリティ対策を検討するべきである。また、デュアルユースに関する問題にも注意を払う必要がある。

2. 関連する市民の発言例

- ✦ それと、悪用ってどんなふうに使われるか、ちょっと分からないですけど、ざっくり、悪用されることがないかなということが、ちょっと心配だなと思いました。 (h; CW2)
- ✦ 人間が作るものなので悪用することもできる。マイナスなイメージを考えることもできるからちょっと怖い。見えないから怖い。 (h; CW2)
- ✦ 新たな法律を作らないと、悪用されかねない面も、ありそう。 (o; CW2)
- ✦ 殺人に使われそうと思って。分子ロボットは役目を終わると、体に吸収されたり排出されたりすると聞いたので、もし殺人とかに使われたら証拠を立証できるのかと思ったのです。 (o; CW2)

3. 発言内容への補足

- 物理学者フランク・オッペンハイマーは、アメリカがナチス降伏により原爆開発の当初の目的が失われた後も原爆開発が中止されることなく継続されてしまった理由について、原爆開発に携わる研究者たちが**テクノロジーの罠**に嵌ってしまったからであると分析した。彼のいうテクノロジーの罠とは、「すでに動き出してしまった開発プロセスが自らの慣性により動き続けてしまい、止めることができなくなる状況」のことである。研究者は、研究開発競争の中にあっても自らの研究活動の目的や意味について常に自問自答し、惰性によって盲目的に研究開発を進めることのないように注意する必要がある。

4.3. 食の安全

1. ポイント

技術は人びとによってさまざまな形で意味が付与されるけれども、食や農業に分子ロボット技術を応用する場合には、技術による改変がもつ**文化的意味**にとりわけ注意を払う必要がある。たとえばある食品が「人為的に加工された」「自然ではない」食品（したがって、改変前の食品とは質的に異なっている食品）とみなされる場合には、遺伝子組換え食品の先例からも示唆されるように、**食の安全**に関してネガティブな印象を与える可能性がある。分子ロボットにより改変された食品も、たとえば遺伝子組換え食品と同様、分子ロボットによる改変があったことを示す表示が必要になる可能性もあるかもしれない。

新規技術により生産された食品を従来技術により生産された食品と質的に異なるものとみなすかどうかは、しばしば人によって意見が分かれる。遺伝子組換え食品のケースでも（cf. [2.3 遺伝子組換え技術・ゲノム編集技術](#)）、その初期には遺伝子組換えと従来の伝統的な育種との間に質的な違いはなく、したがって規制は遺伝子組換え技術の使用そのものではなく、生産物そのものの性質に基づいて（**プロダクト・ベース**）従来品の規制の枠組みを拡張する形で規制するべきであるとする立場と、遺伝子組換えという技術を用いて生産された生産物は従来の食品とは質的に異なるものであり（**プロセス・ベース**）、したがって遺伝子組換えによって生産された生産物全体を従来品と区別して独立のカテゴリーで一元的に管理すべきであるという考え方があった^{xix}。

ただし、以下の発言のように、新規技術により生産された生産物が「質的に異なる」と考えるかどうかは、専門家の問題でもあると同時に**市民自身の文化的意味づけ**の問題でもある^{xx}。

2. 関連する市民の発言例

- ✦ 目に見えるものじゃないので不安だ。新しい技術のために、安全性の検証とかがされていないのが不安。また、それを牛が食べてお肉になったとき、「今までのお肉と、何が違うんだろう」というところで、それがいままでのお肉と同じものだと言えるのかなと感じた。
(C; AW2)
- ✦ 遺伝子組換え作物のとき、その個体がそこで「これは遺伝子組換えですよ」ということが他から判別できるような印、マーカーが必要だという話があった。分子ロボットも別の用途に悪用したり、環境に悪いことや作物に悪影響を与えることもできないわけではないだろう。悪用や副作用を考えるとそういうマーカーが必要なのではないかなと思う。(E; 農家)

3. 発言内容への補足

- 上で引用された発言は、「市民自身の文化的意味づけ」が、「消費者にとって受け入れられるかどうか」という、農業者にとっての生活の根幹にかかわる問題と結びついていることを意味している。そのため、たとえば仮に研究者が「新規技術により生産された食品は従来品と質的に異なるものではない」という見解を持っていたとしても、消費者がそのような見解に疑念を抱いている場合には、農業者にとっても受け入れ可能なものとはならない可能性がある。農業への介入は、農業従事者がそれまで慣れ親しんできた農業の在り方に決定的な変化をもたらす可能性があり、農業従事者には外部からの「圧力」と認識される可能性があることをよく理解する必要がある。当事者である農業従事者との**信頼関係**を確立し、寄り添いながらともに変化してゆくという姿勢が重要である。
- 国際食品規格（コーデックスマニュアル）において、食の安全に関するリスクの分析は、毒性などを評価する**リスク評価**、リスク評価の結果を踏まえて必要な施策を実施する**リスク管理**、リスク分析の全過程においてステイクホルダーと意見を交換する**リスクコミュニケーション**の3つの要素からなるとされる[FAO/WHO 2003]。このうち、食品の危険性を評価するリスク評価は科学的に評価を行うこととされる一方、リスク管理においては、倫理・宗教的・文化的要因や消費者の不安や関心など、**科学以外の正当な要因**(Other Legitimate Factors)を考慮するべきであるとされている。

- 遺伝子組換え食品のリスク評価においては、すでに安全性が確認されている従来の食品との**実質的同等性**に基づいて評価することとされている^{xxi}。実質的同等性は「長らく安全に食されてきた歴史を持つ long history of safe use」「既存の対応物 conventional counterpart」と比較することで遺伝子組換え食品の安全性を評価するという、安全性評価の基礎となる概念である。
- 「実質的同等性」は、あくまで安全性評価についての考え方であり、新たな食品が従来の食品と**同一であることを意味するわけではない**[OECD 2000: 20]。とくに、既存の品種と萌芽技術によってもたらされた新種とのあいだには、**社会的な信頼**という観点からは大きな違いがあることに注意しなければならない^{xxii} (cf. **4.1 不確実性・信頼・予防原則**)。幅広い社会的信用は科学に基づくリスク評価によって一朝一夕に築かれるものではなく、究極的には長期にわたって安全であることが実際に立証されてはじめて築かれるものであることに注意する必要がある。
- 遺伝子組換え食品の場合、食品に「遺伝子組換え」であると表示することは、消費者に自らのリスク評価に応じた**選択の権利**を与える(ゲノム編集に関する同様の議論については三上・立川[2019: 84]を参照のこと)。分子ロボットにより加工された食品に関しても、分子ロボットであることを示す「マーカー」が必要と考える意見もあった。

4.4. 市場と公正

1. ポイント

市場販売フェーズにおいては研究者や狭義の当事者にとどまらない、幅広い立場の人びとがその過程に参加することとなる[Callon 1986]。そこでは分子ロボットの研究者や ELSI 専門家のコントロール可能な範囲を超えた倫理的問題が生じる可能性があることに留意しておく必要がある。

市場販売を検討するフェーズに至った場合、とくに大量生産が視野に入ってきた場合には、公正で持続可能な**サプライチェーン**を構築することも視野に入れる必要があるかもしれない。その具体化においては、たとえば公正なサプライチェーンの形成をめぐる近年の議論が参考になるだろう。日本貿易振興機構（JETRO）は、「サプライチェーンと人権」に関する先進国の政策と執行情況についてのレポートを作成している[日本貿易振興機構 2021]。

2. 関連する市民の発言例

🌈 農業ロボットとかで、大農家と小さい農家の格差が広がりそう。高くて実際には大農家しか買えなさそう。小さい農家が淘汰されていってしまう懸念がある。実際に今、大きな企業化した大農家、企業みたいな大きな農家はどんどん農地を買って広げて、大きな機械でたくさんの土地を耕して風景を悪くしていて、家族経営の小さい農家は機械を買えず、大きな企業みたいな農家ばかりが増えている。小さい農家はロボットとかはあまり導入しなさそう。（G; CW1）

3. 発言内容への補足

市場における商品として分子ロボットを普及させる場合に生じる問題については、社会的公正と密接に関連しているために、慎重に検討する必要がある。たとえば、分子ロボット技術が生産性を高める一方で著しく高価である場合には、競争力をもたない小規模農業者は淘汰されるのではという懸念が生じてくる。また、独占や寡占についても注意する必要がある。

5. 参考文献

Callon, M. [1986] “Some elements of a sociology of translation: domestication of the scallops and the fishermen of St Briec Bay”, *Power, action and belief: a new sociology of knowledge?*, J. Law (ed.), Routledge.

Calvert, J. [2013] “Engineering Biology and Society: Reflections on Synthetic Biology”, *Science, Technology and Society*, Vol. 18 No. 3, pp. 405-420.

European Commission [2013] “Fact sheet: Science with and for Society in Horizon 2020” <https://wayback.archive-it.org/12090/20181221014151/http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/sites/horizon2020/files/FactSheet_Science_with_and_for_Society.pdf>

Elizabeth, P. [2017] “To be a responsible researcher, reach out and listen”, *Science*. <<https://www.science.org/content/article/be-responsible-researcher-reach-out-and-listen>>

FAO/WHO [2003] 「コーデックス委員会の枠組みの中で適用されるリスクアナリシスの作業原則」, Japanese edition. <https://www.maff.go.jp/j/syouan/kijun/codex/standard_list/pdf/manual.pdf>

FAO/WHO [2006] 「食品検査・認証制度における道具の一つとしてのトレーサビリティ/プロダクトトレーシングに関する原則」, Japanese edition. <https://www.maff.go.jp/j/syouan/kijun/codex/standard_list/pdf/gl60.pdf>

Gianni, R., J. Pearson and R. Reber (eds.) [2019a] *Responsible Research and Innovation: From Concepts to Practices*, Routledge.

Gianni, R., B. Reber and J. Pearson [2019b] “Introduction: RRI: A critical-constructive approach”, Gianni, R., J. Pearson and R. Reber (eds.) *Responsible Research and Innovation: From Concepts to Practices*, Routledge, pp.1-7.

Jasanoff, S. [1995] Product, Process, or Programme: “Three Cultures and the Regulation of Biotechnology”, In Bauer, M. et al. (eds.) *Resistance to New Technology: Nuclear Power, Information Technology and Biotechnology*, Cambridge University Press.

JST CRDS [2022] 「ELSI から RRI への展開から考える科学技術・イノベーションの変革」 <<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-RR-07.html>>

Juengst, E. T. [2003] “Enhancement Uses of Medical Technology”, Encyclopedia of Bioethics, Post, S. G. (ed.), pp. 753-756.

Mandell, D. J. M. J. Lajoie, M. T. Mee, R. Takeuchi, G. Kuznetsov, J. E. Norville, C. J. Gregg, B. L. Stoddard and G. M. Church [2015] “Biocontainment of genetically modified organisms by synthetic protein design”, *Nature* 518 (7537):55-60.

<<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4422498/>>

OECD (Organization for Economic Co-operation and Development) [1993] *Safety Evaluation of Foods Derived by Modern Biotechnology: Concepts and Principles*, <<https://www.oecd.org/science/biotrack/41036698.pdf>>

OECD (Organization for Economic Co-operation and Development) [2000] 「新規食品および飼料の安全性に関するタスクフォースの報告書」, <http://dbarchive.biosciencedbc.jp/archive/diam_safety_literature/LATEST/document/093/093-fulltext.pdf>

President Commission for the Study of Bioethical Issues [2010] New Directions: The Ethics of Synthetic Biology and Emerging Technologies. <www.bioethics.gov>

NEDO（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）[2014] 「NEDO ロボット白書：社会を変えようとするとき、そこにロボット技術はある！」, <<https://www.nedo.go.jp/content/100567345.pdf>>

Rovner, A. J., A. D. Haimovich, S. R. Katz, Z. Li, M. W. Grome, B. M. Gassaway, M. Amiram, J. R. Patel, R. R. Gallagher, J. Rinehart and F. J. Issacs [2015] “Recoded organisms engineered to depend on synthetic amino acids”, *Nature* 518: 89-93.

<<https://www.nature.com/articles/nature14095>>

Shanahan, Murray [2015] *The Technological Singularity*, The MIT Press.

Thieler, A. [2016] Permissionless Innovation and Public Policy: A 10-Point Blueprint, George Mason University Mercatus Center. <https://permissionlessinnovation.org/wp-content/uploads/2016/04/PI_Blueprint_040716_final.pdf>

Ulam, S. [1958] “John von Neumann”, Bulletin of the American Mathematical Society 64(3): 1-49. <<https://www.ams.org/journals/bull/1958-64-03/S0002-9904-1958-10189-5/S0002->>

9904-1958-10189-5.pdf>

WHO [2019] “Statement on governance and oversight of human genome editing”
<<https://www.who.int/news/item/26-07-2019-statement-on-governance-and-oversight-of-human-genome-editing>>

WHO [2021] “Human genome editing: recommendations”
<<https://www.who.int/publications/i/item/9789240030381>>

Yoshizawa, G., R. v. Est, D. Yoshinaga, M. Tanaka, R. Shineha and A. Konagaya [2018]
“Responsible innovation in molecular robotics in Japan” In *Chem-Bio. Infomatics Journal*, Vol. 18, pp. 164-172.

カーツワイル, レイ [2007] 『ポスト・ヒューマン誕生：コンピュータが人類の知性を超えるとき』, 井上健（監訳）, 小野木明恵・野中香方子・福田実（翻訳）, NHK 出版.

ギボンズ, マイケル [1997] 『現代社会と知の創造—モード論とは何か』, 丸善ライブラリー.

グッドフィールド, J. [1979 (1977)] 『神を演ずる—遺伝子工学と生命の操作—』 中村桂子訳, 岩波現代選書.

グールド [2008] 『人間の測りまちがい：差別の科学史』, 上下巻, 河出文庫.

ケヴルズ, ダニエル J. [1993] 『優生学の名のもとに—「人類改良」の悪夢の百年』, 西俣総平訳, 朝日新聞社.

レヴィン, フィリップ [2021] 『14 歳から考えたい優生学』, 斉藤隆央訳, すばる舎.

ロボット政策研究会 [2006] 「ロボット政策研究会 報告書 ～RT 革命が日本を飛躍させる～」,
<<https://www.jara.jp/various/report/img/robot-houkokusho-set.pdf>>

岩崎秀雄 [2017] 「〈生命〉とは何だろうか—表現する生物学、思考する芸術」 講談社学術文庫.

株式会社東レリサーチセンター[2010] 「食品分野におけるナノテクノロジー利用の安全性評価情報に関する基礎的調査報告書」 <
<https://www.fsc.go.jp/fsciis/survey/show/cho20100100001>>

河村賢・標葉隆馬 [2020] 「萌芽的科学技術をめぐるデュアルユース問題を考えるために」『ELSI Note』 No. 02.

厚生労働省 [n.d.] 「よくある質問（事業者向け）」
 <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryoku/shokuhin/syokuten/qa_jigyosya.html>

国連環境開発会議 [1992] 「環境と開発に関するリオ宣言」
 <https://www.env.go.jp/council/21kankyo-k/y210-02/ref_05_1.pdf>

児玉 聡 [2009] 「エンハンスメント」
 <<http://plaza.umin.ac.jp/~kodama/bioethics/wordbook/enhancement.html>>

小長谷明彦 [2019] 「分子ロボットの社会受容」村田智（編）[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』, 2019 年度版, 情報計算科学生物学会出版, e Book Series: No.3, 第 7 章 1 節, pp. 277-283.

桜木真理子, 森下翔, 河村賢 [2021] 「合成生物学分野に関する米国大統領生命倫理委員会報告書の概要」, 『ELSI Note』 No. 13, <https://elsi.osaka-u.ac.jp/system/wp-content/uploads/2021/07/ELSI_NOTE_13_2021_210720.pdf>

標葉隆馬 [2019] 「分子ロボットを巡る ELSI を考えるために」村田智（編）[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』, 2019 年度版, 情報計算科学生物学会出版, e Book Series: No.3, 第 7 章 2 節, pp. 283-291.

標葉隆馬 [2020] 『責任ある科学技術ガバナンス概論』, ナカニシヤ出版.

日本貿易振興機構 [2021] 「特集 サプライチェーンと人権」
 <https://www.jetro.go.jp/world/scm_hrm/>

農林水産省 [n.d.] 「農薬の基礎知識 詳細」
 <https://www.maff.go.jp/j/nouyaku/n_tisiki/tisiki.html>

農林水産省 [2008] 「(3) 食の安全と消費者の信頼の確保」
 <https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h20_h/summary/p1_c2_t1_03.html>

農林水産省 [2019] 「国内産農産物における農薬の使用状況及び残留状況調査の結果について(令和元年度)」 <https://www.maff.go.jp/j/nouyaku/n_monitor/r1.html>

平野晋 [2017] 『増補版 ロボット法：AI とヒトの共生にむけて』, 弘文堂.

分子ロボット倫理研究会 [2021] 「分子ロボットをめぐる対話要点集 2020 年度版」
 <https://cbi-society.org/home/documents/eBook/ebook4_MolRobo2020.pdf>

三上直之・立川雅司 [2019] 『「ゲノム編集作物」を話し合う』, ひつじ書房.

村上陽一郎 [1999] 『科学・技術と社会: 文・理を越える新しい科学・技術論』, 光村教育図書.

村上陽一郎 [2005] 『安全と安心の科学』, 集英社新書.

村田智 (編) [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』, 2019 年度版, 情報計算科学生物学会出版, e Book Series: No.3.

ⁱ 「分子デバイス」とは、金属製のロボットとは異なり、部品の持つ性質 (e.g. 金属の電気伝導度など) でなく、生物のタンパク質と同様に分子の物理的形状により機能を発揮するような素材であるとされる[村田 2019: 2]。

ⁱⁱ 本市民対話に先行する分子ロボットに関する ELSI/RRI 実践については Yoshizawa et al. [2018] を参照のこと。

ⁱⁱⁱ 各発言ごとに発言者の名前をアルファベット記号の仮名で、発言がなされたワークショップを略称で示している。仮名については付録 2 を、ワークショップの略称については表 1 をそれぞれ参照のこと。

^{iv} CW1 における専門家の情報提供の内容は、AW1 と同様、農業応用に関する話題を中心とした内容であり、両者の間に大きな内容の相違はない。

^v **責任ある研究・開発(RRI)** という表現は、2000 年代に用いられた「責任ある開発(Responsible Innovation)」という概念を発展的に継承する形で、2010 年代の欧州委員会の科学技術政策の主要な焦点となった概念である。具体的には、2013 年に発表された 2014~2020 年の欧州連合の資金提供プログラム「Horizon 2020」におけるサブプログラム「社会とともにある・社会のための科学」のポリシーへの導入[European Commission 2013; Elizabeth 2017]、2014 年の欧州委員会による「ローマ宣言」での欧州機関および各国への RRI 体制構築への呼びかけなどが挙げられる。Horizon 2020 の後継プログラムである Horizon Europe における RRI の位置づけはやや複雑である。詳細は JST CRDS[2022]を参照のこと。また、RRI というコンセプトについての総説としては標葉[2020: 222-246]、より学術的に概念を掘り下げた研究としては Gianni et al. [2019a] を参照のこと。

^{vi} 人種差別の科学史については、とくにスティーヴン・グールドの古典[グールド 2008]を参照のこと。優生学については、ケヴルズ[1993]を参照。優生学に関する文献リストとしては、フィリッパ・レヴィン[2021]

の文献リストを参照のこと。

vii 同様の区分には、科学論者ギボンズ[1997]による**モード論**がある。ギボンズは科学には2つのモードがあるとする。モード1の科学とは知的好奇心に基づくアカデミックな研究活動であり、モード2の科学とは解決すべき問題が先に定義され、そのために分野横断的な知識を利用するタイプの研究活動である。

viii 「**神を演じる**」(Playing God)という表現は、1975年に開催された遺伝子組換え規制に関する記念碑的会議「アシロマ会議」の席上にて発された、微生物学者の「自然を規制する必要はない。しかし、たわむれに神を演ずるものは規制すべきだ」という言葉[グッドフィールド 1979 (1977)]に端を発する。作家・科学史家のジューン・グッドフィールドは著書『神を演ずる：遺伝子工学と生命の操作』において、遺伝子組換えという新技術によって「すべての生物に共通な基本的性質をもちながら、しかもこれまでこの世に存在したことのないまったく新しい生命体を作り出す創造主になろうとしている」[グッドフィールド 1979 (1977): 4]ことに警告を発した。以来、「神を演じる」という表現は「人間による生命の創造」という行為の不敵さをシニカルに形容するものとして用いられてきた。

このような表現を使用することそのものに対して支持と反対双方の意見がある。近年の有力な反対意見として、2010年に合成生物学にまつわる生命倫理問題に関する米国大統領諮問委員会発行の報告書『新しい方向性：合成生物学と萌芽テクノロジーについての倫理』[Presidential Commission for the Study of Bioethics Issues 2010]がある。本報告書はヴェンター研究所が2009年に製作した世界初の自己複製合成ゲノムが『生命の創造』の一步を踏み出すものではないのかという懸念や、合成生物学によって人間が「神を演ずる」ことになるのではないのかという懸念が人びとの間に存在していることに触れつつ、上記合成ゲノムは既存のゲノムの改変種であるので生命の創造に相当するものではないとした。さらに同報告書では「『生命の創造』や『神を演じる』などのセンセーショナルなバズワードやフレーズは、はじめはその根底にある科学とその社会への影響への注目を高めるかもしれないが、究極的にはこれらのトピックに関する公共討論のコアにある科学的問題と倫理的問題両方の理解を妨げる」[桜木・森下・河村 2021: 6]として、この表現に批判的な立場をとっている（詳細は本報告書の日本語版サマリーである[桜木・森下・河村 2021]を参照のこと）。この表現が単に「センセーショナルなバズワード」なのかどうかという点についての評価は差し置くとしても、人口に膾炙する可能性のあるフレーズを用いるときには、そのフレーズがもたらすであろう正負両面の社会的インパクトを慎重に考慮に入れる必要があるだろう。

ix **シンギュラリティ（技術的特異点）**とは、大まかにいって技術成長が制御不能かつ不可逆的に人類社会を変革してしまう時期を表す造語である。誰が、いつから、どのような定義でこの語を用いるようになったのかという点については不正確な知識が流通している（SF作家のヴァーナー・ヴィンジの造語であるとされ

たり、後述するレイ・カーツワイルの使用が過度に強調されることもある)。イギリスの人工知能を研究するマリー・シャナハン^xは、この語をこの意味ではじめて用いたのは数学者のフォン・ノイマン[Ulam 1958]だとしているが[Shanahan 2015]、おそらくこの使用が知られている限り最も古い用例である。日本では邦訳があることもあり、発明家であり未来学者でもあるカーツワイルが「テクノロジーが急速に変化し、それにより甚大な影響がもたらされ、人間の生活が後戻りできないほどに変容してしまうような、来るべき未来」[カーツワイル 2007]をあらわす概念として再定式化したことがよく知られている。

^x プライバシーにかかわる内容のため、ワークショップおよび発話者の記載を省略する。

^{xi} 2018年に中国・南方科技大学の賀建奎が、ゲノム編集技術によってヒト胚を改変し、その赤ちゃんが誕生したことを報告した(賀建奎事件; 賀建奎は不法な医療行為に携わったとされ、懲役3年の実刑判決)。この事件を受け、WHOはヒトゲノム編集のグローバルレジストリの作成を発表するとともに、ゲノム編集技術の臨床応用に対する監督を全世界の政府に求めた[WHO 2019]。2021年7月にはヒトゲノム編集に関するWHO勧告が発行されるなど[WHO 2021]、目下さまざまな規制が見られる領域であり、関連する周辺領域の動向として継続的に注視することが重要である。

^{xii} 画像は新学術領域「分子ロボティクス」のウェブページ< <https://www.molecular-robotics.org/outline/>>より引用した。

^{xiii} 選択肢は、分子ロボット研究者により提示された例に、ELSI研究者が適宜付け加える形で作成された。この選択肢は、分子ロボットのライフコースの各段階に関する議論を具体化することを補助するためのオープンエンドなリストであり、現実の選択肢を限定するためのリストではない。

^{xiv} 「封じ込め」という概念は分子ロボット倫理研究会における日常的な会話では現在でも用いられている。一方「封じ込め」という言葉はカルタヘナ法以前の遺伝子組換え実験を規制していた「組換えDNA実験指針」における規定上の呼称であり、現行のカルタヘナ法では「封じ込め」という言葉は用いられていない。物理的封じ込めは「拡散防止措置」という言葉に置き換えられており、生物学的封じ込めは執るべき拡散防止措置レベルを決定する変数である宿主ベクター系の規定という形で引き継がれている。

^{xv} 食品分野におけるナノテクノロジー利用の実態については株式会社東レリサーチセンター[2010]の調査を参照のこと。

^{xvi} 標葉[2020: 89]はドゥルモンドとフィッシュコフの研究を引用しつつ、「科学〔そのもの〕への信頼」は先進科学技術等への信頼に影響する重大な要因である点を強調している。

^{xvii} 概念としては予防原則のほうが歴史が長く、公的にも広く用いられている概念である。**予防原則**は1970年代のドイツにおいて環境問題の規制を論じる文脈で概念化され、1990年代以降、環境保護の文脈では一般的に用いられる語となっている（とくに環境と開発に関するリオ宣言の第15原則を参照のこと[国連環境開発会議 1992]）。**許諾不要のイノベーション**は2010年代にアメリカのアダム・シエラーにより、予防原則という考え方に対抗する形で提唱された[Thieler 2016]。ここでは萌芽科学技術に対する考え方を整理するために、ふたつの対極に位置するアプローチをあえて紹介した。

^{xviii} 二度の世界大戦における大量破壊兵器の使用に対する反省は、戦場において残虐な仕方では科学技術を使用することを禁ずる国際規範や条約（生物兵器禁止条約・化学兵器禁止条約）の成立につながり、そうした兵器に転用可能な物質の貯蔵までが厳しく管理されるに至っている。また20世紀末から21世紀初頭にかけて日本やアメリカで起こった（あるいは企図された）バイオテロ事件は、戦場における軍事利用のみならず、テロリストが戦場の外において科学技術を利用した兵器を用いる可能性にも人々の目を向けさせた[河村・標葉 2020]。デュアルユース品は、ワッセナー・アレンジメントや化学兵器禁止条約、生物兵器禁止条約をはじめとする国際的な枠組みによって、輸出制限の対象となっている。

^{xix} 従来アメリカはプロダクト・ベースの、EUはプロセス・ベースの考え方を採用していると考えられていたが（cf. [Jasanoff 1995]）、現在の日本の規制、および現行の規制枠組みであるカルタヘナ法は、両者の側面を包含しているとされる。ただし、これらの考え方の対立として大まかに説明できるケースは少なく、今なお有用な区別であると考えられる。

^{xx} 研究者と市民の萌芽技術に対する意味づけが異なった事例について、標葉は北海道における遺伝子組換え作物に関する条例の制定の事例を紹介している[2020: 100-102]。研究者は遺伝子組換え作物がすでに大量に用いられおり安全であることや未来の可能性を強調する一方、自治体や農業当事者はBSE騒動など過去の経験から風評被害を深刻なリスクとして捉えていた。標葉は両者のギャップについて「どちらかが間違っているという話ではない。むしろ、どちらにも一定の理があるにしても（あるいはそうだからこそ）、すれ違うことがままたりうるという認識をもつ必要性」[標葉 2020: 102]を強調している。そして、そのようなすれ違いの認識を踏まえたうえで、「どのような政策オプションが可能であるのか、とりうる選択肢のメリットとデメリットがどのようなものであるのかを幅広い視点から議論・共有していくこと」[標葉 2020: 102]が必要であると述べている。

^{xxi} **実質的同等性(substantial equivalence あるいは material equivalence)**とは、1993年のOECD報告書『現代のバイオテクノロジーに由来する食品の安全性評価：概念と原則』[OECD 1993]において示された、遺伝子組換え食品（GMO）の食品安全性評価のための考え方である。一見すると考え方そのものはシ

ンプルであるように思われるが、この考え方を具体的な製品に適用するにあたってはさまざまな曖昧さがあり、論争の種となってきた。詳細は松尾[2008: 207-211]を参照のこと。

^{xxii} たとえば海外の遺伝子組換え食品においては、過去「実質的同等性が証明された食品については遺伝子組換え表示をする必要がない」という判断がおこなわれ、問題となったケースがある[松尾 2008: 208]。

また、食品摂取の長期的影響については原理的な不確実性があり（具体的にどの食品のどの成分が健康に影響を及ぼしたかということを知ることはきわめて難しい）、疫学的調査によってもそうした長期的な傾向を知ることは困難であることも知られており、100%の安全を保障することは原理的に困難であることも指摘されている。

付録1 分子ロボット技術倫理綱領

分子ロボット技術倫理綱領第 1.2 版 (2019 年 3 月 14 日 改訂)

近年の急激な技術革新は、新しい物質・情報・生命観を創造する機運をもたらすとともに、それに伴う倫理の枠組みを、社会との対話を通して確立・発展させていくことが重要な課題となっている。

わが国の分子ロボットの研究開発においては、感覚、運動、知能が重要な要素として捉えられ、それぞれの要素技術やその統合化の研究開発が進められている。分子ロボット技術により複雑な人工システムの構成が実現可能になり、将来的には、情報学、工学、化学、そして、農学、医学、薬学といった幅広い分野への応用が期待されている。これまでになかったデバイスやシステムが次々と開発されており、関連する倫理的課題も多岐におよぶことが予想される。

このような背景のもと、私たちは、以下の倫理綱領を定めるとともに、分子ロボット技術に携わるすべての者にその遵守を求めるものである。

1. リスク・ベネフィットの総合評価 (Comprehensive assessment of risks and benefits)

- 分子ロボット技術に携わる者は、その技術の複雑性に鑑み、人間・環境への負担ならびに予測されるリスクと利益を総合的に評価し、もたらされる利益を最大化するだけでなく、負担とリスクを最小化するための対策を講じなければならない。

2. 安全と環境への配慮 (Consideration for safety and environment)

- 分子ロボット技術に携わる者は、分子ロボットの環境への拡散防止のための措置、安全の確保に向けた取組を行う必要がある。これは、将来世代に対する責任と配慮を含む。

3. セキュリティとデュアルユース問題への留意 (Paying attention to security and dual-use issues)

- 分子ロボット技術に携わる者は、材料や情報の適正な取り扱い、実験に関わる者の管理・監督など、輸送時の管理や情報漏洩の観点も考慮したセキュリティ対策を検討するべきである。また、デュアルユースに関する問題にも注意を払う必要がある。

4. 説明責任と透明性の担保 (Ensuring accountability and transparency)

- 分子ロボット技術に携わる者は、公共の福祉に根ざした研究開発を進展させるにあたり、研究の透明性と社会への説明責任を常に意識しなければならない。

この倫理綱領は今後にも必要に応じて見直していくものとする。

付録2 市民対話ワークショップ参加者のリスト

対話参加者の仮名 (アルファベット) ³	職種 ⁴	性別	参加ワークショップ						
			AW1	AW2	AW3	CW1	CW2	SW	TW
A	農業	女性	●		●				
B	畜産関係（排水処理）	男性	●	●	●				
C	酪農（肉牛）	女性	●	●	●				
D	農業（畑作）	女性	●	●	●				
E	酪農	女性	●		●				
F	農業（畑作）	女性			●				
G	看護師・農業（養蜂）	女性				●	●		
h	個人事業主	女性				●	●		
i	会社員（通信関係）	男性				●			
j	個人事業主	女性				●			
k	サラリーマン	男性				●			

³ 農業従事者は大文字、非農業従事者は小文字で区別している。農業従事者からの発言の解釈にあたっては、当事者性を考慮して解釈すべき発言も少なくなく、発言者が農業従事者である場合にはこれを識別できるようにしておくことが発言の適切な解釈のために有用と判断し、記号上非農業従事者の発言と区別することとした。もちろん、このように区別するからといって、農業従事者のすべての発言が「農業従事者だから」という理由から行われていると著者らが考えているわけではない。発言と発言者の属性の関係についてはそれぞれの発言によって異なり、慎重な考察を要する。記号による区別はそのような検討可能性の基礎として与えられるものである。

⁴ 職種の記載については、対話冒頭の自己紹介セッションにおける自称による記載を原則としている。

対話参加者の仮名 (アルファベット) ³	職種 ⁴	性別	参加ワークショップ						
			AW1	AW2	AW3	CW1	CW2	SW	TW
l	IT コンサルタント	男性					●		
m	事務職	女性					●		
n	専業主婦	女性					●		
o	専業主婦	女性					●		
p	ライター・事務	女性					●		
q	学生	その他					●		
r	自営業	男性						●	
s	科学館職員	男性						●	
t	科学館職員	女性						●	
u	科学館職員	女性						●	
v	科学館職員	男性						●	
w	芸人・大学教員	男性						●	
x	大学院生	男性							●
y	分子ロボット研究者	男性							●
z	分子ロボット研究者	男性							●
aa	学部生	男性							●
ab	分子ロボット研究者	男性							●
ac	技術員	女性							●

ELSI NOTE No. 17

「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

令和4年5月31日



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

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

