

戦略的創造研究推進事業
(社会技術研究開発)
研究開発実施終了報告書

「人と情報のエコシステム」

研究開発領域

研究開発プロジェクト「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」

研究開発期間 平成 29 年 10 月～令和 3 年 3 月

小長谷 明彦
(恵泉女学園大学、客員教授)

目次

1. プロジェクトの達成目標	3
1-1. プロジェクトの背景	3
1-2. プロジェクトの達成目標	4
2. 研究開発の実施内容	4
2-1. 実施項目およびその全体像	4
2-2. 実施内容	6
3. 研究開発成果	11
3-1. 目標の達成状況	11
3-2. 研究開発成果	12
3-3. 今後の成果の活用・展開に向けた状況	14
4. 領域目標達成への貢献	14
5. 研究開発の実施体制	16
5-1. 研究開発実施体制の構成図	16
5-2. 研究開発実施者	16
5-3. 研究開発の協力者	18
6. 研究開発成果の発表・発信状況、アウトリーチ活動など	18
6-1. 社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など	18
6-2. 論文発表	21
6-3. 口頭発表（国際学会発表及び主要な国内学会発表）	21
6-4. 新聞報道・投稿、受賞など	22
6-5. 特許出願	22

1. プロジェクトの達成目標

1-1. プロジェクトの背景

本提案は、2016 年度に企画調査研究として採択された『分子ロボット技術に対する法律・倫理・経済・教育からの接近法に関する調査（代表小長谷）』と『リアルタイム・テクノロジーアセスメントのための議題共創プラットフォームの試作（代表標葉）』との共創による成果を土台としている。2016 年度から 2020 年度に至る両グループによる共創は、分子ロボット研究者と倫理研究者による数々の領域横断的なワークショップおよびシンポジウムの開催を通じて、先進的倫理研究およびテクノロジーアセスメントの実践の場としての「分子ロボット倫理」の深耕および普及に寄与した。

本プロジェクトの最大の課題は、革新的な新興技術である「分子ロボット」を推進する上で、倫理的な課題(ELSI)や責任ある研究とイノベーション(RRI)という考え方を分子ロボット研究者や学生にいかにして浸透させるかであった。多くの自然科学研究者にとって、ELSI や RRI の考え方はなじみがなく、ともすれば自身の研究の推進を妨げるネガティブなイメージを持っている場合も少なくない。このような自然科学研究者コミュニティにおいて、何を実践すれば、ELSI や RRI が研究コミュニティに浸透するかについては、それ自体、試行錯誤が伴う「研究」と言っても過言ではない。

本プロジェクトの活動の中心は、自然系研究者と倫理系研究者による研究会やシンポジウムの共催や併催である。これにより、自然系研究者による分子ロボットに関する講演の中に倫理系研究者の講演を入れ込むことで、自然な形で ELSI や RRI といった倫理的な考え方になじませるといった効果が期待できる。しかしながら、言葉として理解することと実際に研究において実践することのギャップは大きく、単に共催や併催を続けるだけでは「分子ロボット倫理」の浸透は期待できない。

本プロジェクトでは、より有効な手法として、「分子ロボット研究ガイドラインの策定」ならびに、「国際学生コンテストにおける ELSI を記載した学生チームへの米国渡航費用の支援」を実践した。前者は、「分子ロボット倫理原則」を実際に研究コミュニティの総意として策定できたこと、および、「誰がガイドラインを決めることができるのか」という点に関して「分子ロボット研究者の自治」を意識させることができた、という意味で有用であった。後者は学生や若い研究者に ELSI や RRI の概念を国際学生コンテストの中で実践してもらうことができたという意味で有用であった。

本プロジェクトでの手法が他の自然科学研究者のコミュニティに通用するかどうかは定かではないが、分子ロボットコミュニティに関しては、その後継研究プロジェクトである科研費学術変革領域「分子サイバネティクス」の総括班の中に、ELSI が研究項目として含まれていることから、「分子ロボット倫理」が徐々にではあるが研究コミュニティの中に根付かせることができたのではないかと理解している。

1-2. プロジェクトの達成目標

<目標とするアウトプット>

- メディアの動向分析とホライズン・スキヤニングを活用した分子ロボット課題候補リストの提示
- ステークホルダー参加型の議題共創プラットフォーム (NutShell) を用いた分子ロボット ELSI に関するリアルタイム技術アセスメント
- 分子ロボット研究者と橋渡し研究・倫理・規制科学の専門家によるインターネットを活用したダイナミックな分子ロボットガイドライン案の策定
- リアルタイム技術アセスメントおよびガイドライン案に関する研究会およびシンポジウムの開催
- 分子ロボット国際学生コンテストにおいて ELSI について言及した学生チームへの渡航費用などの支援と分子ロボットガイドライン普及の実践
- 上記の活動の記録と回顧的分析によるリアルタイム技術アセスメント (RTTA) 方法論の評価と RTTA 研究へのフィードバック

<期待されるアウトカム>

上記アウトプット目指して研究を遂行することにより以下のアウトカムが期待される。

- 分子ロボット技術に関する ELSI の課題抽出と掘り下げ
- 分子ロボットに対する社会的認知度の向上
- 分子ロボットガイドライン案の策定
- 分子ロボット研究者における ELSI への関心の高まりと ELSI 研究の定着
- 社会に受容される分子ロボットの実用化への貢献
- 「ELSI 研究とリアルタイム技術アセスメント研究の共創」の社会技術方法論の有用性の検証

2. 研究開発の実施内容

2-1. 実施項目およびその全体像

実施項目①: チームコミュニケーションツールを用いた分子ロボットに関するリアルタイム技術アセスメントの試行

実施項目①-1: リアルタイム技術アセスメントとの共創

実施内容

分子ロボットに対する社会的認知度を向上し、分子ロボット技術に関する ELSI の議題抽出と掘り下げを実現するためには、専門家同士の議論だけでは不十分であり、社会に向けて情報を発信し、フィードバックを得るプロセスが不可欠である。このような社会からのフィードバックを実現するためのツールとして標葉グループでは「リアルタイム技術アセスメント(RATTA)システム」の開発を進めている。今年度は、開発された RATTA を用いて「分子ロボット」に関するリアルタイム技術アセスメントを試行する。RATTA を活用して分子ロボット ELSI の議題抽出やガイドライン策定に関連した議論を行う。

実施項目②: 分子ロボットガイドライン案策定

実施項目②-1: 分子ロボット原則および基礎研究ガイドライン案の策定

実施内容

分子ロボットのガイドライン案策定に関しては、概念の階層性から、分子ロボット原則案、基礎研究ガイドライン案、医薬品研究ガイドライン案と深めてゆく予定である。2019 年度からは、「分子ロボット基礎研究ガイドライン」を公開することを目指す。このために、2018 年度に公開した「分子ロボット原則案」をベースに分子ロボット若手研究者との議論を深め、さらに、RATTA を活用して社会からのフィードバックを得るとことで、分子ロボット研究の社会的コンセンサスの獲得を目指す。

実施項目②-2: 研究会・ワークショップ・シンポジウム開催

実施内容

分子ロボット研究者と倫理研究者ならびに医学関係者との相互理解を促進するために研究会およびシンポジウムを開催する。具体的には、分子ロボットガイドラインに関して分子ロボット研究者との議論を図るため計測自動制御学会分子ロボティクス研究会との共催で分子ロボット倫理研究会を開催する。過去に ELSI について検討を行った事例の検討と共有を基盤として、分子ロボティクスがどのような社会的インパクトを持ちうるかについて想像し、実際に研究開発に関わる研究者らと議論を行うことで論点抽出を行うためにワークショップを開催する。さらに、分子ロボットに関する倫理およびテクノロジーアセスメントを国際的な文脈の中に位置づけるために分子ロボット倫理シンポジウムを開催する。分子ロボット創薬に焦点をあて、技術アセスメントの専門家を招聘し、意見を広く求める。

実施項目③: 分子ロボット研究者および学生への ELSI 啓蒙の継続

実施項目③-1: 国際学生コンテスト支援

実施内容

分子ロボット ELSI やガイドラインは策定しただけでは意味がなく、分子ロボットの研究に反映されることに真の価値がある。BIOMOD に参加し、各国の研究テーマの ELSI 課題について調

査する。合成生物の国際学生コンテンツにおいても ELSI の啓蒙は浸透するのに3年以上要したという。BIOMOD での ELSI についても継続して実施することが重要と考えている。

実施項目	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度
①-1:リアルタイム技術アセスメント研究との共創	原則案に関する共創	原則案に関する共創	基礎研究ガイドライン案に関する共創	分析と検証
②-1:分子ロボットガイドライン案策定	原則案策定	原則策定	基礎研究ガイドライン案策定	公表
②-2: 研究会・ワークショップ・シンポジウム開催	研究会 シンポジウム	研究会 国際シンポジウム	研究会 国際シンポジウム	ワークショップ
③-1: 国際学生コンテンツ支援	実施	実施	実施	

2-2. 実施内容

実施項目①: チームコミュニケーションツールを用いた分子ロボットに関するリアルタイム技術アセスメントの試行

実施項目①-1: リアルタイム技術アセスメントとの共創

(1)目的:

本実施項目は、「人と情報のエコシステム」領域に参加している標葉グループとの共創により分子ロボットに関するリアルタイム技術アセスメントを実施することを目的とした。

(2)内容・方法・活動

2017年度の段階においては、RTTA システムが完成していなかったため、代替手段として、WORDPRESS のフォーラム機能を用いた情報共有や議論の場を実現した。また、これまでの分子ロボット倫理研究会で発表された資料を分子ロボット倫理テクニカルノート、分子ロボット ELSI、分子ロボット RRI、分子ロボット原則案、分子ロボット基礎研究ガイドライン案、分子ロボット医薬品研究ガイドラインに分類し、整理した。

2018年度は、分子ロボットに対する社会的認知度を向上し、分子ロボット技術に関する ELSI の議題抽出と掘り下げを実現するためには、専門家同士の議論だけでは不十分であり、社会に向けて情報を発信し、フィードバックを得るプロセスが不可欠であると考えた。この

ような社会からのフィードバックを実現するための、標葉グループが開発した「研究者の議論プラットフォーム」に参加登録した。

2019 年度は、標葉グループと共同でノルウェーにおいて国際ワークショップを開催し、技術アセスメントの専門家と先端技術のアセスメントの課題について議論した。さらに、BIOMOD 国際会議で参加チームの ELSI 問題について標葉グループと議論した。

2020 年度は、コロナ禍で対面式のワークショップならびにシンポジウムの開催が困難であったため、ZOOM を用いたオンラインの定例ミーティングならびに農業関係者および一般市民とのオンラインワークショップを開催し、分子ロボットを農業応用する際の懸案事項ならびに課題を標葉グループと共創して分析した。

(3) 結果：

標葉グループとの共創により、分子ロボット研究の倫理的課題をリアルタイムで整理、分析しながら分子ロボット研究の将来像を描くことができた。特に、倫理問題を語る時は、倫理法律社会的課題（ELSI）よりも責任ある研究とイノベーション(RRI)の考え方のほうが自然科学研究者には自然と受け入れてもらえることがわかった。また、ステークホルダー、特に、一般市民や農業関係者との対話の仕方を学べた点は有用であった。

(4) 特記事項：

2020 年度は恵泉女学園大学に客員教授として移籍したこともあり、これまで東京工業大学の研究室の学生および秘書を動員して進めてきたイベント業務を科学コミュニケーション研究所に業務委託した。科学コミュニケーション研究所はオンラインでの対話ワークショップ開催に関して豊富な経験とノウハウをもっており、分子ロボット研究者と倫理研究者との共創の場の実現法として同研究所が提供する対話ワークショップのフレームワークが期待以上の成果をもたらしたことを特記事項として報告します。

実施項目②：分子ロボットガイドライン案策定

実施項目②-1：分子ロボット原則および基礎研究ガイドライン案の策定

(1) 目的：

本実施項目は、九州大学河原直人特任講師との共創により分子ロボットに関するリアルタイム技術アセスメントを実施することを目的とした。

(2) 内容・方法・活動：

2017 年度の段階においては、分子ロボットガイドラインに関しては概念の階層性に基づ

き分子ロボット原則案、基礎研究ガイドライン案、医薬品研究ガイドライン案の順に策定する方針を採用した。九州大学病院 ARO 次世代医療センター河原特任講師を中心に、生命・医療倫理、全米プロフェッショナル・エンジニアリング協会 (NSPE) 基本綱領、合成生物学に関する倫理原則を精査し、2018 年 3 月に分子ロボット原則「案」を策定し、分子ロボット研究者に提示した。ただし、原則案を提示した際に、この原則を誰がどの立場で発表するかに関して、分子ロボット研究者の間でコンセンサスがとれず、さらに 1 年間、分子ロボット研究者を交えて原則案を再検討することが了承された。

2018 年度は、2017 年度に提示した分子ロボット原則の英語版の策定を行なうと共に、英語表記と日本語表記をすり合わせた分子ロボット原則 1.1 版を策定し、公開した。また、年度末には、分子ロボット若手研究者を含めて策定した分子ロボット原則 1.2 版を分子ロボティクス年次大会において公開した。

2019 年度は、分子ロボット研究を社会とのコンセンサスを得ながら推進するために必要な「分子ロボット基礎研究ガイドライン案」に関する検討を開始した。

2020 年度は、「分子ロボット基礎研究ガイドライン案」を引き続き検討し、2021 年 2 月に分子ロボット研究者と倫理研究者による対話ワークショップを予定している。

(3) 結果：

分子ロボット原則を策定し、分子ロボット研究者のコミュニティから公開した。分子ロボット基礎研究ガイドラインに関しては、コロナ禍の影響でワークショップやシンポジウムを開催できなかったため、倫理研究者を中心とした原案の作成を継続することになった。

(4) 特記事項：

ガイドラインに関しては、コミュニティ内部でのコンセンサスを得るために多くの時間が必要であり、計画通り進めることは困難であることがわかった。対話のために時間がかかっても研究コミュニティの総意としてまとめていくことが重要だと理解している。

実施項目②-2: 研究会・ワークショップ・シンポジウム開催

(1) 目的：

本研究項目は分子ロボット研究コミュニティが開催する研究会・ワークショップ・シンポジウムに分子ロボット倫理の発表を共催または併催することで、ELSI や RRI の考え方の浸透を図ることを目的とした。

(2)内容・方法・活動：

2017 年度は、分子ロボット研究者、倫理研究者ならびに医薬学関係者との相互理解を促進するために、2 回の分子ロボット倫理研究会（2017 年 11 月, 2018 年 1 月）と標葉グループとの協働で分子ロボット RRI 洞察ワークショップ(2018 年 2 月)を開催した。分子ロボット倫理研究会は計測自動制御学会分子ロボティクス調査研究会と共催することにより、分子ロボット研究者を含めて分子ロボット原則について議論できる場を設定した。また、分子ロボティクス年次大会（2018 年 3 月, 東北大学）との併催で分子ロボット倫理シンポジウムを開催し、分子ロボット原則案を公開した。

2018 年度は、分子ロボット研究者と倫理研究者ならびに医学関係者との相互理解を促進するために、CBI 学会 2018 年大会において、第 2 回国際分子ロボット倫理シンポジウムを開催し、分子ロボット倫理原則の英語版を公開した。また、分子ロボット倫理研究会(2018 年 11 月)を人工知能学会 SIGMBI 研究会および分子ロボティクス研究会との共催で開催した。さらに、分子ロボット倫理シンポジウム(2019 年 3 月)を分子ロボティクス年会と併催し、分子ロボット原則 1.2 を公開した。

2019 年度は、分子ロボット倫理研究会を分子ロボティクス研究会と共催し（2019 年 6 月 25 日）、CBI 学会 2019 年大会において分子ロボットの農業応用に向けた倫理に関するシンポジウムを開催した(2019 年 10 月)。また、標葉グループとの共創の一環として、オスロ首都大学においてノルウェーの技術評価の専門家と国際倫理ワークショップ(2019 年 10 月 30 日、オスロ首都大学)を開催した。さらに、分子ロボット倫理研究会を人工知能学会 SIGMBI 研究会および分子ロボティクス研究会と共催し、分子ロボットの医薬応用と倫理について議論した。さらに、2020 年 3 月 16 日、17 日に福岡にて分子ロボット倫理シンポジウムを分子ロボティクス年次大会と併催する予定であったが、コロナ禍のために開催を中止した。

2020 年度は、コロナ禍のため、対面式のワークショップやシンポジウムは中止とし、分子ロボットの農業応用に対するオンラインワークショップ(農業従事者との対話：2020 年 8 月 29 日、一般市民との対話：30 日)を開催した。また、2021 年 2 月には分子ロボティクス研究者との分子ロボット基礎研究ガイドラインに関するオンラインワークショップを予定している。

(3)結果：

研究会・ワークショップ・シンポジウムを共催または併催することで、ELSI および RRI の考え方を研究コミュニティになじませることはできた。

(4) 特記事項：

分子ロボット倫理の講演やセッションがあることに対して、研究者コミュニティの中で違和感はなくなってきたが、個々の研究の中で分子ロボット倫理が実践されるところまではなかなか浸透していない。継続的な働きかけが望まれる。

実施項目③: 分子ロボット研究者および学生への ELSI 啓蒙の継続

実施項目③-1: 国際学生コンテスト支援

(1) 目的:

本研究項目は分子ロボット研究コミュニティが主宰する分子ロボット国際学生コンテスト日本大会に参加する学生チームに ELSI を実践してもらうことを目的とした。

(2) 内容・方法・活動:

2018 年度においては、分子ロボット ELSI の啓蒙を図るために、国際学生コンテスト (BIOMOD) を活用し、参加する学生やメンターとなる若手研究者に ELSI について考える事業を行った。具体的には、BIOMOD 国内大会 (2018 年 8 月 26 日) に参加するチームに ELSI 課題を課し、各チームの ELSI について WIKI に記載したチームを対象に米国への渡航費用を支援した。また、BIOMOD に参加し、各国の研究テーマの ELSI 課題について調査した。

2019 年度は、前年度に引き続き、分子ロボット ELSI の啓蒙を図るために、BIOMOD 国内大会 (2019 年 8 月 31 日、東京) を活用し、参加する学生やメンターとなる若手研究者に ELSI について考える事業を行った。また、BIOMOD2019 (サンフランシスコ) に参加し、各国の研究テーマの ELSI 課題について調査した。さらに、BIOMOD2019 (サンフランシスコ) の後開催された Board Meeting において、分担者の村田 (BIOMOD Foundation, Board member) は学生に対する ELSI の啓もうに関する問題提起を行った。

2020 年度は、コロナ禍のため BIOMOD 世界大会は中止となったが、BIOMOD 国内大会はオンライン大会として開催することになった。オンライン開催ということで、これまでの大学対抗ではなく、参加学生がシャッフルされたチーム編成となった。実験がないため、WIKI および YOUTUBU を用いたコロナに打ち勝つ分子ロボットに関するアイデアコンテストとなった。小長谷が BIOMOD JAPAN2020 のレクチャーの一環として、分子ロボット倫理の講義を行った。

(3) 結果:

年度を重ねるごとに、学生チームの ELSI に対する理解が深まることが確認でき、やはり、実際の活動の中で ELSI や RRI を実践することが ELSI や RRI の正しい理解につながること

がわかった。

(4)特記事項：

学生や若手研究者が ELSI や RRI の考え方を学んでも、一過性に終わってしまっただけでは研究コミュニティへの浸透は期待できない。このような活動の継続が望まれる。

3. 研究開発成果

3-1. 目標の達成状況

実施項目①：チームコミュニケーションツールを用いた分子ロボットに関するリアルタイム技術アセスメントの試行

実施項目①-1：リアルタイム技術アセスメントとの共創

標葉グループとの共創により、小長谷グループが推進する「分子ロボット倫理プロジェクト」および分子ロボットコミュニティの活動が、リアルタイムに「技術アセスメント」されていたと考えている。リアルタイム技術アセスメントに必要なのは、「何かツールを使うかどうか」あるいは「ツールとして何を使うかどうか」ではなく、いかに、継続的にコミュニケーションをとれるかどうかだと理解している。

現在、標葉グループとはほぼ毎週のように定期的なオンライン会議を実施しているが、そのような頻度の高いコミュニケーションを行うことにより、分子ロボット技術のどこに倫理的課題があり、ステークホルダーとのギャップがどこにあるかについて、広く、深く理解できてきたと考えている。

実施項目②：分子ロボットガイドライン案策定

実施項目②-1：分子ロボット原則および基礎研究ガイドライン案の策定

ガイドラインの策定に関しては、「分子ロボット原則」を策定するために約1年、さらに、分子ロボット研究者コミュニティの理解を得るために約1年を要した。ガイドラインの策定には予想以上の時間が必要であり、また、それをコミュニティに広げるにはさらなる時間と努力が必要である。長い道のりとなるが、今後ともガイドライン策定を継続することがいつか役に立つ日が来ると信じている。

実施項目②-2:研究会・ワークショップ・シンポジウム開催

本プロジェクト期間中に都合15回の研究会、ワークショップおよびシンポジウムを開催した。ほとんどが、分子ロボット研究者との共催および併催であり、倫理的な考え方を分子

ロボット研究者に浸透させることに貢献したと考えている。

実施項目③: 分子ロボット研究者および学生への ELSI 啓蒙の継続

実施項目③-1: 国際学生コンテスト支援

国際学生コンテストにおいて自チームの倫理的課題を発表した学生チームを対象に渡航費用を支援するという手法を実践した。飽で釣るという、極めて安易な手法であったが、予想以上の効果があった。最初に開始した 2018 年度は一部のチームを除いて極めて表層的な分析しかしていなかったが、2019 年度は全チームが非常に深いレベルまで自分達の研究課題の ELSI について分析していた。倫理は学ぶものではなく、実践すべきものであることを改めて感じさせられた。

3-2. 研究開発成果

実施項目①: チームコミュニケーションツールを用いた分子ロボットに関するリアルタイム技術アセスメントの試行

実施項目①-1: リアルタイム技術アセスメントとの共創

(1)内容:

倫理研究者との共創がなければ、分子ロボット倫理プロジェクトは何も進展しなかったと言っても過言ではない。ELSI はともかく、RRI やテクノロジーアセスメント、ガイドライン作成や対話ワークショップなど、倫理研究者コミュニティの中では標準的な考え方や実践手法であっても、自然科学研究者だけでそのようなフレームワークを実践することは極めて困難である。また、逆に、分子ロボットコミュニティの中で倫理的なフレームワークを実践することにより、フレームワークの有効性が見えてきたのではないかと理解している。

(2)活用・展開:

分子ロボット研究者が受け入れやすいフレームワークを整理すると以下ようになる。分子ロボット研究者にとっては、ELSI よりも RRI のほうが受け入れられやすい。これは、ELSI が分子ロボット研究の外側から型を嵌める(ようにみえる)のに対し、RRI は個々の自然科学系研究者の価値観に訴えることができるためと考えている。また、分子ロボット研究の将来像を見据える上で、一般市民やステークホルダーとの対話ワークショップの有用性を実感することができた。こちらは、まだ、十分な分析がなされているわけではないが、対話ワークショップに参加した分子ロボット研究者からも強い賛同を得ている。

(3)その他:

対面式の研究会やワークショップが開催できなかった代わりに ZOOM を用いたオンラインワークショップを開催した。その準備のために、毎週、定期的な倫理研究者と分子ロボット研究者とのミーティングを 30 分という短い時間ではあるが開催することにした。結果的に、倫理研究者と分子ロボット研究者の相互理解が深まり、2020 年度は本当の意味での「共創」が進んだのではないかと考えている。

実施項目②：分子ロボットガイドライン案策定

実施項目②-1：分子ロボット原則および基礎研究ガイドライン案の策定

(1)内容：

倫理研究者との共創により分子ロボット原則を策定することができた。このような原則を策定することも倫理研究者の協力がなければ不可能であったと考えている。また、一方で、ガイドラインをコミュニティの中で承認してもらうことの難しさも実感した。ガイドラインの内容だけでなく、ガイドラインに対して賛同を得てもらうためのプロセスも非常に重要である。

(2)活用・展開：

基礎研究ガイドラインの策定を倫理研究者との共創で継続中である。プロジェクト期間内に策定することはできなかったが、継続して働きかけていきたいと考えている。

(3)その他：

分子ロボット原則の改訂版に携わった分子ロボット研究者が分子ロボット倫理の後継プロジェクトで中心的役割を果たしており、結果的に分子ロボット倫理の後継者の育成に役だった。

実施項目②-2:研究会・ワークショップ・シンポジウム開催

(1)内容:

プロジェクト期間中に分子ロボット倫理に関する数々の研究会・ワークショップ・シンポジウムを開催した。これにより、分子ロボット倫理の考え方をコミュニティに浸透させることができた。

(2)活用・展開:

コロナ禍により、対面式の研究会・ワークショップ・シンポジウムの開催ができなくなっているが、オンラインでの開催でカバーしてゆきたい。

(3)その他:

特になし。

実施項目③：分子ロボット研究者および学生への ELSI 啓蒙の継続

実施項目③-1：国際学生コンテスト支援

(1)内容：

国際学生コンテスト(BIOMOD)での米国渡航費用支援は学生や若手研究者に ELSI や RRI の考え方を理解してもらう手法として有効であった。

(2)活用・展開：

プロジェクト期間中は支援できたが、学生チームの ELSI の実践が経済的支援なしで継続するかどうかは不明である。プロジェクト終了後の動きを注視したい。

(3)その他：

特になし。

3-3. 今後の成果の活用・展開に向けた状況

真に革新的な技術は先例がないので「倫理」が不可欠である、という認識は、近年自然科学研究者の間でも常識になりつつあると理解している。Moon shot symposium において ELSI が議論されたのはその一例であろう。ただし、先端的プロジェクトにおいて ELSI を実践できるかどうかについては極めて懐疑的であり、その最大の問題点は日本における ELSI を実践できる人材が不足しているという点につきる。

自然科学の分野でも、領域横断的な研究者の育成は困難であるが、自然科学と社会科学の両方に知見や経験がある研究者を育てるのはさらに困難である。もっと、クロスオーバーな研究を推進できるような大学院および研究所の組織変革が必要と考えている。

4. 領域目標達成への貢献

「分子ロボット」は正確には情報技術ではないが、情報を扱うことができる分子装置なので、広い意味の「情報技術」として、領域目標達成への貢献を記す。

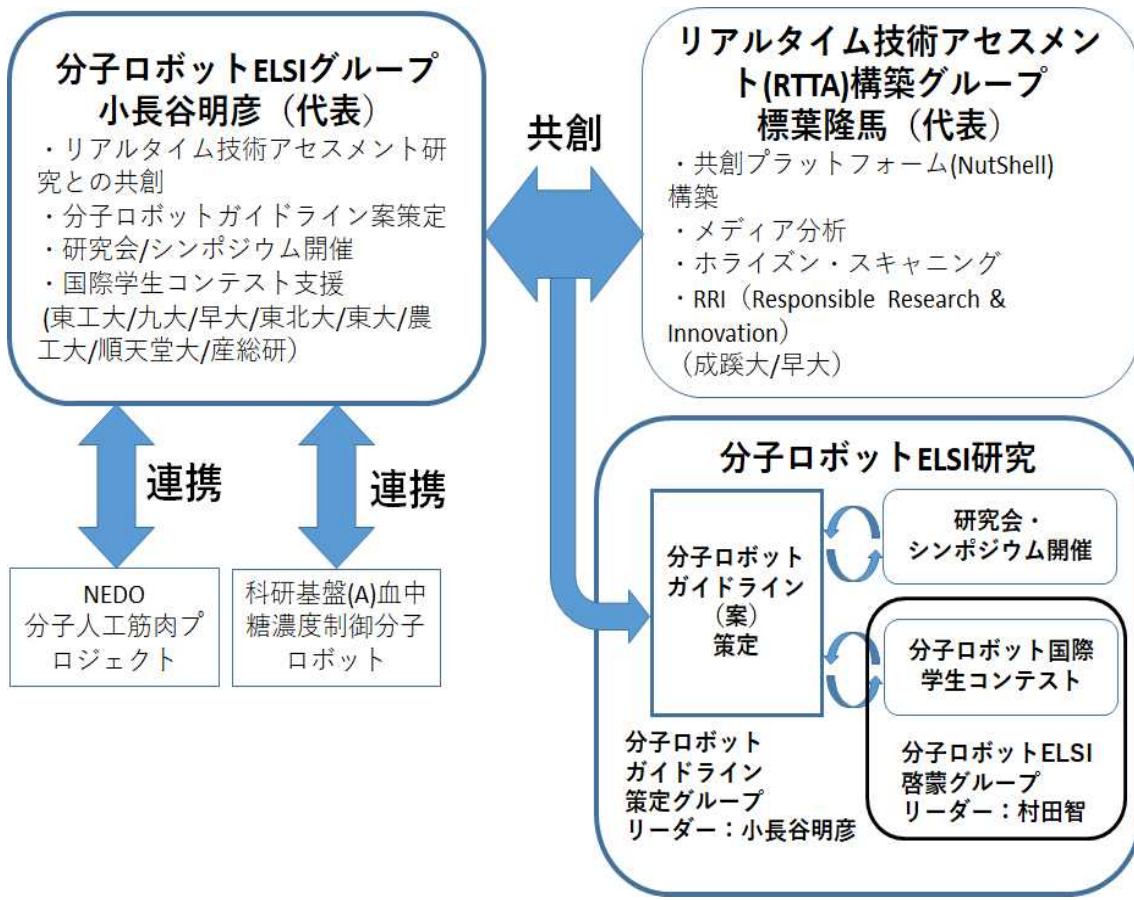
① 分子ロボットが社会に与える影響（正負）に関しては、RRI 洞察ワークショップにおいて、深く議論した。ブレインストームした課題を時間軸に沿って関連づけることで、課題の因果関係を分析できた。この分析手法は他の課題に対しても広く応用可能であろう。

② 望まれる方向性を示すためには、どのような「価値創造(value creation)」を求めるかという「哲学」が重要になると理解している。真の「価値創造」は必ずしもお金を儲けることではない。強欲な「金融工学」が世界の富の偏重をきたし、コロナ禍が「グローバリゼーション」のような価値観が虚構であることを露呈した。自然科学研究においても、従来のエネルギーを多用する局所最適化による「効率化」ではなく、持続可能な「効率化」への変革が求められている。化学エネルギーを原料とする「分子ロボット」がその一助を担えると良いと考えている。

③ 社会と技術の望ましい共進化のためには、何かしらの「情報共有」は必要と思われるが、特別な「プラットフォーム」が必要となるかどうかはわからない。インターネットやスマートフォンはそのようなプラットフォームの一つではあるが、むしろ、社会を変革するための本質は、そのようなプラットフォームを用いて、どのような「情報」を収集し、どのような「価値観」を共有するかであろう。「情報」をインターネット上の情報に限定しないほうが、むしろ、社会にとって望ましい共進化につながると考えている。例えば、分子ロボットを用いて体内から情報を取り出すことができれば、健康や医療に役立てることができるであろう。

5. 研究開発の実施体制

5-1. 研究開発実施体制の構成図



5-2. 研究開発実施者

(1) 分子ロボットガイドライン策定グループ

(リーダー氏名：小長谷 明彦， 恵泉女学園大学人文学部)

役割：全体プロジェクトの運営・管理・調整、 標葉グループとの共創、 分子ロボットガイドライン案の策定、 研究会およびシンポジウム開催。

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
山村 雅幸	ヤマムラ マサユキ	東京工業大学	情報理工学院	教授
木賀大介	キガ ダイスケ	早稲田大学	先端生命医科学センター	教授

河原 直人	カワハラ ナオト	九州大学	病院A R O次世代医療 センター	特任講師
村田 智	ムラタ サトシ	東北大学	大学院工学研究科	教授
萩谷 昌己	ハギヤ マサミ	東京大学	大学院情報理工学研究 科	教授
瀧ノ上 正浩	タキノウエ マサヒロ	東京工業大学	情報理工学院	准教授
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
川野 竜司	カワノ リュウジ	東京農工大学	工学研究院	准教授
小野 喜志雄	オノ キシオ	順天堂大学	国際教養学部	客員教授
小宮 健	コミヤ ケン	東京工業大学	情報理工学院	助教
佐藤佑介	サトウ ユウスケ	東京工業大学	情報理工学院	研究員
榎本輝也	エノモト テルヤ	東京工業大学	情報理工学院	研究員
川又生吹	カワマタ イブキ	東北大学	大学院工学研究科ロボ ティクス専攻	助教

(2) 分子ロボット ELSI 啓蒙グループ

(リーダー氏名：村田 智，東北大学大学院工学研究科)

役割：ELSI の立場から分子ロボット国際学生コンテストの運営に参画し、学生およびメンターとなる若手研究者に対して ELSI の重要性を浸透させること。

氏名	フリガナ	所属機関	所属部署	役職 (身分)
○村田 智	ムラタ サトシ	東北大学	大学院工学研究科	教授
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
阿部 純代	アベ スミヨ	東北大学	大学院工学研究科	技術支援員
小野 喜志雄	オノ キシオ	順天堂大学	国際教養学部	客員教授

5-3. 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	准教授	リアルタイム技術アセスメントに関する助言
田中 幹人	タナカ ミキヒト	早稲田大学	准教授	メディア分析に関する助言
吉澤 剛	ヨシザワ ゴウ	オスロ都市大学 労働 研究所	リサーチフェ ロー	ホライズン・スキャニン グに関する助言
Jane Calvert	ジェーン カルバート	エジンバラ大学	教授	プロジェクトに対する助 言、海外類似事例に関す る専門的知見の提供
Ira Bennett	イラ ベネット	アリゾナ州立大学	准教授	プロジェクトに対する助 言、教育事例に関する専 門的知見の提供
Rinie van Est	リネ ヴァン エスト	ラテナウ研究所	主任研究員	プロジェクトに対する助 言、TA と政策反映に 関する専門的知見の提供"

6. 研究開発成果の発表・発信状況、アウトリーチ活動など

6-1. 社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など

6-1-1. 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
2017年11 月11日	分子ロボット倫理ワ ークショップ	東工大田町キャ ンパス	分子ロボットガイドライン に関する講演会	10名
2017年11 月25日	分子ロボット倫理研 究会・人工知能学会 SIGMBI 研究会と 共催	慶應大学矢上キ ャンパス	分子ロボットの医薬応 用(分子人工膵島細 胞、分子人工筋肉)と の技術評価に関する講 演会	50名
2018年1 月19日	分子ロボット倫理研 究会・分子ロボティ クス研究会と共催	JR博多シティ 会議室(福岡)	分子ロボット制御理論 の最新の話題と分子ロ ボット原則に関する意	21名

			見交換	
2018年2月18日	分子ロボット RRI 洞察ワークショップ	東工大田町キャンパス	ELSI に関する講演会・グループ討議（分子ロボットに関する起きて欲しい未来と起きてほしくない未来）	33名
2018年3月5日	分子ロボット倫理シンポジウム・分子ロボティクス年会と併催	東北大学片平さくらホール	分子ロボット原則 1.0 版の公開および議論	78名
2018年10月9日	The 2nd International Symposium on Molecular Robot Ethics	タワーホール船堀	分子ロボット原則英語版および分子ロボット原則 1.1 版の公開と議論	35名
2018年11月23日	分子ロボット倫理研究会・人工知能学会 SIGMBI 研究会および分子ロボティクス研究会と共催	慶應大学矢上キャンパス	分子ロボット倫理と医薬応用（分子人工膵島細胞、分子人工筋肉）に関する講演会	45名
2019年3月16日	分子ロボット倫理シンポジウム・分子ロボティクス年次大会と併催	東工大大岡山キャンパス	分子ロボット原則 1.2 版の公開	97名
2019年6月25日	分子ロボット倫理研究会・分子ロボティクス研究会と共催	福岡県九州工業大学サテライト福岡天神	分子ロボット研究開発ガイドライン策定に向けた議論	15名
2019年10月23日	分子ロボット倫理シンポジウム	タワーホール船堀	環境対策における分子ロボットの倫理問題について	20名
2019年11月13日	OsloMet Workshop on the Ethics of Molecular Robotics	オスロ首都大学	オスロ首都大学の研究者との共同による分子ロボットと合成生物学に関する技術評価	日本側 4 名、ノルウェー側 6 名

2019年11月23日	分子ロボット倫理研究会・人工知能学会 SIGMBI 研究会および分子ロボティクス研究会と共催	慶應大学矢上キャンパス	分子ロボット倫理と医薬応用（分子人工膵島細胞、分子人工筋肉）に関する講演会	43名
2020年8月29日	「分子ロボットで、地球に優しい農業を」というテーマでの農業従事者との対話	オンライン	分子ロボットの農業応用に対する農業従事者からの懸案事項、問題点の抽出と分析	農業従事者6名＋分子ロボット関係者5名
2020年8月30日	「分子ロボットで、地球に優しい農業を」というテーマでの一般市民との対話	オンライン	分子ロボットの農業応用に対する一般市民からの懸案事項、問題点の抽出と分析	一般市民5名＋分子ロボット関係者6名
2021年2月4日	基礎研究ガイドライン策定に関するワークショップ	オンライン	分子ロボット基礎研究ガイドライン策定に関する分子ロボット研究者との意見交換	予定

6-1-2. 書籍、DVD など論文以外に発行したもの

(1) 分子ロボティクス研究会（著）、村田智（編）、分子ロボティクス概論～分子のデザインでシステムをつくる、CBI 学会出版、2019年5月

6-1-3. ウェブメディア開設・運営

(1) <https://molecular-robot-ethics.org/jp/>

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
約 175 アクセス/月

6-1-4. 学会以外のシンポジウムなどでの招へい講演 など

- (1) 小長谷明彦, ELSI, BIOMOD JAPAN 2018, 2018年8月26日, 大阪大学豊中キャンパス
- (2) 小長谷明彦, ELSI, BIOMOD JAPAN 2019, 2019年8月31日, 東京大学駒場キャンパス
- (3) Akihiko Konagaya, International Conference on Creating Value, Knowledge Creation in the Life Science, Oct 16th, 2019, Kobe University.
- (4) 小長谷明彦, 分子ロボットの倫理, BIOMOD JAPAN 2020, 2020年7月30日, オンライン講義

(5) 小長谷明彦, 科研費 学術変革領域研究 (A) 分子サイバネティクス キックオフシンポジウム, パネルディスカッション「分子ロボティクスから分子サイバネティクスへ」, 2020年12月19日 オンライン開催

6-2. 論文発表

6-2-1. 査読付き (1 件)

(1) Go Yoshizawa, Rinie van Est, Daisuke Yoshinaga, Mikihiro Tanaka, Ryuma Shineha, Akihiko Konagaya. (2018). Responsible innovation in molecular robotics in Japan, Chem-Bio Informatics Journal, 18, pp.164-172. DOI:10.1273/cbij.18.164

6-2-2. 査読なし (2 件)

(1) 和文論文: 小長谷明彦 (2020) 「分子ロボティクス: 化学エネルギーで駆動する人工物の世界を目指して」『高分子』69(5), pp.218-222.

(2) Web サイトでしか公開されていない文献: 小長谷明彦 (2020年3月1日) 「分子ロボット倫理: 分子ロボット研究開発における ELSI の実践と課題」CBI 学会誌, pp.3-20. https://cbi-society.org/home/documents/society_journal/CBI_2020_8_1.pdf

6-3. 口頭発表 (国際学会発表及び主要な国内学会発表)

6-3-1. 招待講演 (国内会議 0 件、国際会議 1 件)

(1) Akihiko Konagaya (2019年12月19日) 「ELSI Practices in University and Research Institution Projects: A Case Study of Molecular Robotics」, Moonshot International Symposium, Bellesalle Tokyo Nihonbashi, Tokyo.

6-3-2. 口頭発表 (国内会議 1 件、国際会議 0 件)

(1) 小長谷 明彦, 河原直人, 他 (2020年2月15日) 「分子ロボティクスを用いた分子人工肝臓細胞開発の現状と倫理的課題」日本臨床試験学会第11回学術集会総会, 国際医療福祉大学東京赤坂キャンパス, 東京.

6-3-3. ポスター発表 (国内会議 3 件、国際会議 0 件)

(1) Naoto Kawahara (Kyushu Univ.), Ryuma Shineha (Seijo Univ.), Akihiko Konagaya (TITECH), Formulating R&D Guidelines for Molecular Robotics, CBI Annual Meeting 2019, Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan.

(2) Naoto Kawahara (Kyushu Univ.), Ryuma Shineha (Seijo Univ.), Akihiko Konagaya (TITECH), Formulating Ethical Principles of Molecular Robotics (ver. 1.1), CBI

Annual Meeting 2018, Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan.

6-4. 新聞報道・投稿、受賞など

6-4-1. 新聞報道・投稿

(1) 日刊工業新聞 経営ひと言/東京工業大学・小長谷明彦名誉教授「日本の弱点」, 2020/4/8
05:00

<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00554331?isReadConfirmed=true>

(2) NHK サイエンス ZERO: 「極小スケールの”ものづくり大革命” DNA オリガミ」

(3) Web 記事: 坂田壱太郎(2018年11月2日) 「分子ロボット? 画期的だからこそ慎重
にならざるを得ない」日経バイオテク,

<https://bio.nikkeibp.co.jp/atcl/mag/btomail/18/11/01/00440/>

6-4-2. 受賞

なし

6-4-3. その他

なし

6-5. 特許出願

6-5-1. 国内出願 (0 件)

6-5-2. 海外出願 (0 件)