

科学技術振興機構（JST）社会技術研究開発センター（RISTEX）

「人と情報のエコシステム（HITE）」領域委託研究プロジェクト報告

分子ロボティクス研究の現状とE L S Iに関する検討： 今後のテクノロジーアセスメントに向けて

平成30年5月（公開版）

標葉隆馬 成城大学文芸学部マスコミュニケーション学科 准教授
田中幹人 早稲田大学大学院政治学研究科ジャーナリズムコース 准教授
吉澤剛 大阪大学大学院医学系研究科 准教授
小長谷明彦 東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授

(所属：平成 30 年 5 月時点)

<謝辞>

本テクノロジーアセスメントノート（以下、TA ノートという）は、平成 28 年度科学技術振興機構（JST）社会技術研究開発センター（RISTEX）「人と情報のエコシステム（HITE）」領域における委託研究「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」、「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」、ならびに同領域平成 29 年度委託研究「情報技術・分子ロボティクスを対象とした議題共創のためのリアルタイム・テクノロジーアセスメントの構築」（CoRTTA）、「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」の一環として作成されたものである。

この TA ノート作成に当たりご協力をいただきました分子ロボティクス分野の研究者の方々ならびに小長谷研究室のスタッフの皆様、そしてサイエンス・メディア・センター（SMC）の方々から心から御礼を申し上げる。

<はじめに>

科学技術の進展は社会にとって様々な変化をもたらす可能性があることから、萌芽的な科学技術をめぐるリアルタイム・テクノロジーアセスメント (RTTA) は、科学技術政策の一環として今後ますます重要なテーマとなることが予想される。そこで、本テクノロジーアセスメントノート (以下、TA ノート) は、そうした萌芽的な先端科学技術領域について、その基礎研究の時点から、当該領域が将来的に関わりうる倫理的・法的・社会的含意 (Ethical, Legal, and Social Implications: ELSI) についての議論をスタートさせるとともに、その議論状況を RTTA 事例として検討していくことで、日本における RTTA の実施と制度面における課題検討に資することを目的としている。

本 TA ノートは、分子ロボティクスという情報科学、工学、生命科学、化学、医学などの多様な分野が関わる先端学際領域における ELSI について、今後の本格的な TA 議論を促す足がかりとするために実施した企画調査の一部を取りまとめたものである。

具体的には、分子ロボティクス分野の研究者への将来ビジョンについてのインタビュー、他分野における萌芽的科学技術の過去事例から得られる教訓についての検討、それらを踏まえて行った分子ロボティクス/JST 分子ロボット倫理合同研究会でのワークショップでの議論を中心とした速報的なものとなっている。したがって、科学・技術的正確性や実現可能性の検討ではなく、分子ロボティクスの将来やその ELSI 的側面の「語られ方」を記録することを重視していることが本 TA ノートの特徴である。

本 TA ノートを端緒とし、分子ロボティクスにおける今後のさらなる RTTA 実施においては、当該領域に関わる社会的関心の所在に関する分析結果や当該技術の最先端の研究動向に関する精緻な調査も踏まえた TA ノートを順次作成していくことが望ましい。

目次

1. 分子ロボティクス分野の状況	
1.1 分子ロボティクスの発展	p5
1.2 日本における分子ロボティクス技術の現在と将来の可能性	p8
2. 分子ロボティクス技術の ELSI に関する未来洞察	p11
3. 分子ロボティクスを巡る科学技術イノベーション政策の視点	p17
4. 分子ロボティクスの倫理的・法的・社会的含意 (ELSI) を過去の事例から考える	
4.1 遺伝子組換え生物 (GMO) 事例からの学習	p20
4.2 ナノテクノロジー事例からの学習	p22
4.3 合成生物学事例からの学習	p23
4.4 ヒトゲノム情報解析・PoC 事例からの学習	p25
4.5 再生医療事例からの学習 (再生医療分野から見る科学コミュニケーションの課題)	p29
参考文献	p31

1. 分子ロボティクス分野の状況

本章は、2016年11月30日と12月9日に東京工業大学・小長谷明彦教授に対して行ったインタビューならびに提供いただいた資料、2017年1月22日ならびに2月11日に実施された分子ロボティクス/JST分子ロボット倫理合同研究会の発表内容ならびに配布資料の内容から抜粋・箇条書きしたものである。本TAノートの一般読者（政策担当者、ジャーナリスト、一般市民等）に、分子ロボティクス分野の概況を示すことを意図したものであり、分子ロボティクスに関するより詳細な科学的知見や具体的な研究内容等については、新学術領域の分子ロボティクス分野のホームページ等をご覧頂きたい¹。

1. 1 分子ロボティクスの発展

<本節の要約>

分子ロボティクス分野は、1990年代から研究が進められてきたDNA分子コンピューティング、2006年に登場した「DNAオリガミ」により、DNAを素材とした3次元構造のデザインや回路設計が可能になり、DNAを利用したロボティクスの可能性が注目されるようになった。このような流れを背景として、日本では、2012年に「分子ロボティクス」が新学術領域として採択されており、その裾野を広げる活動が始まりつつある。

- 分子ロボティクスは、1990年代から研究が進められてきたDNA分子コンピューティングなどの情報分野からもたらされたアイデアに基づいている。DNAの相補性を利用して組み合わせ問題などを解くという考え方が基本になっている。DNAを使った論理回路、化学反応系の制御が可能だと考えられるようになったことで、アメリカを中心として一部の研究者集団により分子プログラミング領域へと発展していったことが研究領域の背景となっている。DNAやRNAを素子として利用する。
- 2006年には、ロズムンド(Rothmund)²により「DNAオリガミ」という概念が登場した

¹ <http://www.molecular-robotics.org/>（最終アクセス 2018年4月9日）

² コンピューターサイエンス分野出身の研究者である。分子ロボティクス分野が学際領域であることがわかるだろう。

(Rothmund 2006)。DNA 配列の組み合わせを利用することで様々な物理的な構造が作れるというアイデアである。短い配列をどこに挟み込むかで、数十～100 ナノレベルの任意形状の構造を作れる。この DNA オリガミと、DNA を利用した and 回路や or 回路などの回路構造技術をとともに利用することでロボットの作成が可能になる。エポックメイキングなアイデアとして認知された³。

- 日本では、2012 年に新学術領域として分子ロボティクス PJ が立ち上がった。日本ではその以前に東北大学の村田智教授⁴が従来型とは異なる生体分子ロボットを作ることを目的に分子ロボティクス研究会を作っており⁵、そのキックオフ会合が最初のきっかけの一つとなっている。
- 新学術領域の提案書にアマーバロボット (Hagiya *et al.* 2014) を盛り込んだことを皮切りに、DNA、微小管などの生体分子を使ってロボットを作ろうとの提言を行ってきている。
- DNA で「ニコちゃんマーク」を作成し、しかも構造を安定して維持することが可能になっている(Rothmund 2006)。現在では、可動部分をもつもの、計算を行うもの、暗号を解くものなども作成されている。
- 2011 年にチャン(Zhang)が状態が変わると剥がれて別の分子と結合する DNA ピンセット (DNA tweezers) の技術を実現した (Yurke *et al.* 2000; Genot, *et al.* 2011; Zhang and Seeling 2011)。同年に葛谷は DNA オリガミの構造を回転させて少分子を捕まえる DNA ペンチ(DNA Pliers)の技術を実現した(Kuzuya *et al.* 2011)。

³ ロズムンドらのものはランダムにしか動かないロボットで、判断やコントロールは不可能だった。そこで日本では、より賢い分子ロボティクス研究をしたいと考えたという。したがって、アメリカでも日本でも、ロボティクス分野は、「何かを実現するため」という訳ではなく、全く新しい原理を作り出そうという研究者の興味によりもたらされた領域であったといえる。

⁴ <http://www.molbot.mech.tohoku.ac.jp/research.html> (最終アクセス 2017 年 3 月 4 日)

⁵ http://molbot.org/index.php?option=com_content&view=article&id=52&Itemid=62 (最終アクセス 2017 年 3 月 4 日)

- つまり、分子の状態もまた DNA により制御できることが示された。こうした試みから、濃度差を利用して DNA を合成しつづける回路（増殖回路）を作ることが可能になり、複雑な論理演算を高速で行わせることが可能となった。このような鎖置換反応をシーソーゲート（Seesaw gate）とよび、基礎研究で汎用されるようになりつつある（Qian *et al.* 2011; Qian and Winfree 2011）。
- 2012 年にはダグラスにより抗がん剤（抗体）を DNA オリガミで包み、がん細胞を発見・認識すると折り紙を開いて薬物を放出するという DDS 設計が考案されている（Douglas *et al.* 2012）。
- 2016 年のノーベル化学賞を受賞した Jean-Pierre Sauvage、Sir J. Fraser Stoddart Bernard L. Feringa らは、複数の分子を組み合わせて行う分子マシンの合成を超分子⁶レベルまでもってきた⁷。ただし、あくまでも分子を組み合わせただけで、設計の自由度は低い。このような超分子に、DNA オリガミや DNA 論理回路などのナノ設計技術、プログラミング技術を持ち込むことで、さらに複雑な分子システムを自己組織化により作り出すことが可能になる。現在の半導体加工技術でも数十ナノレベルまで微細加工できるが、分子ロボティクスでは異なるアプローチでデザインしたものを作りだすことができる⁸。

⁶ 複数の分子が分子間相互作用（水素結合や π - π 相互作用、疎水性相互作用、ファンデルワールス力など）を介してお互いを認識し、会合することで形成される分子集合体のこと。

⁷ https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2016/press.html（最終アクセス 2017 年 3 月 4 日）

⁸ 小長谷教授はこうした分子ロボティクス分野の発展について「化学だけではこのような発想は出てこないだろうし、生物物理だけでもダメだっただろう。情報、ロボティクスなども加わっていたことで学際的に展開できたことが、私たちの新学術領域 PJ に発展できた要因だろうと思う。」と述べている（2016 年 12 月 9 日 ヒアリング）。

1. 2 日本における分子ロボティクス技術の現在と将来の可能性

<本節の要約>

日本における分子ロボティクス分野の展開では、「感覚」・「運動」・「知能」を3つの重要要素に据えている。2012年の新学術領域の立ち上げ以降、アメーバ型・スライム型の分子ロボットの研究が進みつつあり、既に要素技術は作成において成果が出始めている。将来的には多細胞型や電子デバイスも取り込んだハイブリット型などのより複雑な分子ロボットの構成に進んでいくことが計画されている。このような中で、NEDOの人工筋肉のプロジェクトが採択されるなど、今後の短期的な展開も進みつつある。

- 現在までの日本における分子ロボティクス分野の状況を表す一例として、新学術領域「分子ロボティクス」(2012–2016年度)では50名程度の研究者が参加していた。化学の専門家が多く、生物物理、(数は少ないが)情報系の分野の研究者などが参加している。現状においては医学領域の専門家はアドバイザーでの参加となっている。
- アメーバはリポソームで囲まれた構造体だが、リポソームは20マイクロメートルが限界。つまり、アメーバを大きくするにはリポソームではない素材が必要となり、ゲルによるスライム型ロボットが検討されている。
- DNA そのものでゲルを作り、更にゲル内で計算可能にできることで(いわば「考えるゲル」)、消費電力が極めて小さいブレインコンピューティングの可能性が見えてくる。生体分子で神経回路や脳を作ることで、今のAIとは比べ物にならない省電力性能が可能になる。
- アメーバのような単細胞型と多細胞型ロボットの間には大きなギャップがあるものの、異なる細胞型ロボットを組み合わせることでより複雑なシステムが可能になる。
- 中長期的には、多細胞型ロボットに、生体分子だけではなく電子デバイスも取り込んだハイブリッド型を想定している。

- DNA プログラミングを分子アクチュエーターと連動させるために、東京工業大学の小宮助教らのグループは酵素を用いた等温環境下での DNA の指数増幅反応ならびに時間差反応制御技術を開発している(小宮 2015)。
- 光をあてると開裂する DNA の開発を名古屋大の浅沼浩之教授のグループおよび北陸先端科学技術大学院大学の藤本建造教授のグループが行っている (Asanuma *et al.* 2014; Kamiya and Asanuma 2014; Fujimoto *et al.* 2013)。生体にあるままの DNA ではなく、化学修飾したものを使うことが多い。このようなアプローチは化学を専門とする研究者が多く入っていることで可能になっている。
- 中長期の方向性の一つは各要素技術を統合するというもの。東北大野村研 (アメーバ班) が中心となって行っている (Sato *et al.* 2017; Saito *et al.* 2014)。感覚班による DNA オリガミセンサー、知能班で作った DNA 増幅回路なども取り込み、統合してロボットにしようという計画である。研究の進捗は順調であり、要素技術の確立はできており、今後はさらに統合を進めていくことになる。
- アメーバ班では、単一分子を制御する野村研での「アメーバ型ロボット」以外に、多数の分子の相互作用を利用した分子集団によるアクチュエータも研究されていた。
 - 例えばリポソーム内に β シート構造をもつペプチドを発現させ、光応答を利用して β アミロイドのように重合させる技術 (鳥取大学・松浦教授) など (光刺激によりペプチドがリポソーム表面からはずれて重合するので、彗星の尾のような形を作って動く) (Inaba *et al.* 2018)
 - 名古屋大学・瀧口講師らのグループでは、リポソーム内に微小管やアクチン線維を詰め込み、圧力や浸透圧の変化による重合脱重合平衡状態の遷移や、光照射による蛍光修飾した線維の切断を利用することでリポソームを伸長圧縮する動きを実現できている (Hayashi *et al.* 2016; Tanaka *et al.* 2018)
- 分子ロボットの本体として注目される巨大リポソームの作製技術は、これまで研究者ごとに職人技のように洗練化され、要素技術統合が阻まれていた。これを標準化し研究者間で共有することが分子ロボティクス研究推進の重要な課題の一つだった。そこ

で、分子ロボティクスのアメーバ班の班員が中心となり、2014年に東大・豊田研で開発した巨大リポソーム作成技術についてブートキャンプを実施した。その後も鳥取大や岐阜大でブートキャンプを開催し、最終的に、20研究グループにおいて標準的な巨大リポソーム作製技術が共有化され、その後の分子ロボティクス研究の推進力の一つとなった（豊田ほか 2012）。

- 分子ロボティクス新学術領域の研究からスピニアウトした人工筋肉研究を、NEDOのプロジェクトとして集中的に進めている。
 - リポソームは大きさ 20 マイクロメートルほどだが、微小管は 5~100 マイクロと大きいため、リポソーム内に微小管を入れて重合させると外部に突き出てしまう。そのためリポソーム抜きで微小管だけを重合させればいいのではないかと考え、微小管と分子モーターにより集団運動を制御することが検討された (Keya *et al.* 2018)。光刺激で収縮させることが可能になったことで、NEDOの人工筋肉（サルコメア）PJにつながった。2016年度から4年間でヒトの筋肉の10分の1スケールの力を出せるようにすることが目標（実現すれば、いろいろなものを動かせるようになることが期待される）

2. 分子ロボティクス技術の ELSI に関する未来洞察⁹

ホライズン・スキャニングは、政策立案などのプロセスで行われつつある未来洞察の手法である。とりわけ、将来的に社会・経済・政治・環境に大きなインパクトをもたらすことが期待される萌芽的な科学技術を対象に行われることが多い。また、その活動については、可能性は低いものの実現した場合に非常に大きなインパクトをもたらす変化（ワイルドカード）や、将来に関する微弱な予兆（ウィークシグナル）についての検討が重要となっている¹⁰。

このような萌芽的科学技術を巡る未来洞察や社会的関心を探索するアプローチでは、当該分野の専門家だけではない様々なステークホルダーの参加の元での、関心や論点の抽出が重要であり、その議論の中で現れてくる様々な「語り」が重要なデータとなる。そのため、本章の記載はワークショップでの議論・参加者のその場での発言をできる限り編集を抑えた形で紹介することとした。

このような前提のため、第 2 章ならびに第 3 章で提示される論点は必ずしも当該技術の研究開発の現状とそぐわないものも含まれる。すなわち、実際にそういったワーストケースが起こりうるかどうか、あるいは検討すべきものであるかどうかは別の議論である点に留意が必要である。しかしながら、萌芽的科学技術を巡る「語り」のあり方を見ることから、その技術的發展に伴う社会的関心へのケアを行う事は重要であると考えられる。

⁹ この章は、2017 年 1 月 22 日に行われた分子ロボティクス研究会/JST 分子ロボット倫理合同研究会とワークショップでの議論を中心にまとめたものである。ワークショップは、本 TA ノートの第 4 章で提示されている過去の事例の紹介（4.1~4.3 を中心に紹介がされた）の後で行われた。

¹⁰ ホライズン・スキャニングに関する端的な資料としては、例えば以下のものがある。文部科学省科学技術・学術政策研究所科学技術動向センター「ホライズン・スキャニングに向けて～海外での実施事例と科学技術・学術政策研究所における取組の方向性～」*STI Horizon*, 1(1): 13-17.

<本章の要約>

ワーストケースシナリオを今の段階から考え、検討可能性のある論点の整理と議論を喚起し、萌芽的な研究の段階から ELSI に関する積極的な議論と発信が前提となる。その中でも、中期的なテーマとして、デュアルユースの問題や医療領域への応用に際してどのような論点がありうるのか、適切な規制と制度はどのようなものかについて今から議論を重ねる必要がある。また、研究者にとっても予測困難な問題（やってみないとわからない問題）に対して、研究者がその「知識の製造物責任」をどこまで負う必要があるのかなども議論の射程に含まれる。

- 後で「●●の議論が必要だったのに」ということにならないようにするために、幅広い領域の専門家と上流の段階から早めはやめの議論をする必要がある（GMO の教訓を踏まえる）。
- 医療領域（病原因子の発見など）への応用が考えられることから、倫理問題を考えることが必要となる。
 - 研究倫理をはじめとする様々な専門家との議論が必要
 - 医療目的では、工業化、標準化、品質保証等をどうすべきなのかということを経験者や関係行政機関と事前から議論を重ねていく必要がある。何が論点で重要なかなどのコンセンサス形成が必要となる。
- デュアルユース問題の議論の必要性。また規制するならどのような指針にするのかなど論点は直近の課題になりうる¹¹。
- 社会の在り様を変えるという点ではイノベーションもワーストケース表裏一体になりうることへの注意が必要であるという視点

¹¹ HIV 様の分子ロボットを開発することも技術的には可能であるなどの見解がなされていた。またこの点について、本 TA ノートを分子ロボット倫理プロジェクトのメンバーに回覧した際、「(デュアルユース問題が) 発生した場合に委員会を立ち上げて議論する」などを分子ロボティクスの指針において記載する必要があるかもしれないなどの指摘がなされている。

- 可能性であった技術が実現した時の社会の姿をどのように想像し、また共有していくのかという課題がある
 - 「責任ある研究・イノベーション (Responsible Research and Innovation: RRI)」の議論における重要な問いとも重なる (吉澤 2013)

- どのような研究／研究段階から倫理の議論が必要なのかという問いかけ
 - ナノテクノロジーの倫理と生命倫理のハイブリットな形の新しい倫理の議論が必要ではないかという意見があった¹²

ワーストケースシナリオを考える¹³

【不可知の問題を想像する】

- 分子ロボティクスは、早晚 AI による設計に移行せざるを得ないのでは無いか (すでに始まっているとの意見もある)。その場合、例えばディープラーニングの仕組みについて理解できないうちに、それを利用することは、未知の技術に頼った、ブラックボックスのプロダクトを創り出すのでは無いか？

- 分子ロボティクスが RNA-タンパク質といったセントラルドグマを「省略する」工学技術であることには、何か問題が無いのだろうか？

- 設計意図は機能にどこまで反映できるのか？副作用についてどのように検討するか？
 - リチウムイオン電池のように、科学的にはよくわかっていて設計されたものでも、制御条件によっては、「あるメーカーのものは良く爆発する」ということが起こりうる。同様の問題の発生はないか？
 - 「善玉コレステロール型分子ロボットをつくったはずが悪玉コレステロール型分子ロボットになるといった可能性はないか？」などのワーストケースの想定。

¹² この点について、本 TA ノートを分子ロボット倫理プロジェクトのメンバーに回覧した際、「開発の目的や機能をきちんと研究者同士で共有し、想定外の事態が発生した段階ですぐに対応して修正していく仕組みが必要と考えられる」とのコメントがなされている。

¹³ 2017年1月22日に行った WS において、出来る限りのワーストケースを想像するという作業をおこなった。その際、あえて想像力を逞しくして問題を想定することで論点抽出を促すという方法をとった。また本ノートでは、SF 的な不安感などもあえてそのまま乗せている。

- 実際に事故が起こってしまったあとで、科学者が設計のミスに気付くということは防ぎようが無いのではないか？
 - 「茶のしずく石鹼」の事件のように、「言われてみれば、そういう機序で問題が起こることもある」ということはこれまでもあった。
 - 研究者はどこまで「製造物責任」があるのかという問題でもある

- 生体高分子との親和性がある「素材」を用いる分子ロボットに、「自律性」や「自己複製」の機能を搭載することにはやはり不安を感じる。
 - （自然界にあるものではファージが一番近いという話を受け）「ファージは自分自身では複製機能を持たないが、宿主である大腸菌内で自己複製に必要な部品を宿主の遺伝子を使って合成させることでできる。同様な仕組みで分子ロボットを複製することができる可能性はある」との見解が提示された。
 - 「副作用を見込んでフェイルセーフ設計するのは不可能に近いのでは？」という懸念の表明¹⁴
 - 分子ロボットに、害をなし得る既存の生命やウイルスによる「寄生」などが発生する可能性は無いだろうか？またそれは予見不可能では無いか？¹⁵
 - 「自己複製機能の実装は「進化」の可能性に繋がるのではないか？これをどのように制御しうるのか？」といった懸念¹⁶
 - （可能性がかなり低いとしても）万が一に生じた場合に大きな論争になりうる論点・懸念へのケアを平時からどのように行うかという課題¹⁷
 - 「これらの論点の多くは、いずれも「自然界とのインタラクション」を危険要素

¹⁴ この点について、本 TA ノート分子ロボット倫理プロジェクトのメンバーに回覧した際、「完全に防ぐことは困難であるため、起きた場合の対処方法を検討することも必要となるかもしれない。例えば、分子ロボットを自爆させるなど」とのコメントがなされている。

¹⁵ この点について、本 TA ノート分子ロボット倫理プロジェクトのメンバーに回覧した際、「分子ロボットと害をなしうる生命やウイルスとの親和性が高いならば、その点が改善されない限り、実用化の道は難しい。それが無いことを検証する基礎的研究は必須の検査項目となるだろう」とのコメントがなされている。

¹⁶ この点について、本 TA ノート分子ロボット倫理プロジェクトのメンバーに回覧した際、「分子ロボットが DNA や RNA、タンパク質などにどのような影響を与えるのか、基礎的研究が必要である。人に使う前に行う必要な検査の一つとなる可能性がある」とのコメントがなされている。

¹⁷ この点について、本 TA ノート分子ロボット倫理プロジェクトのメンバーに回覧した際、健康や環境影響への適切な科学的アセスメントの必要性が指摘された。

としている。これは（アシロマ会議が行ったような）「封じ込め」対策では予見できないのではないか？」という懸念¹⁸

【「利己的な目的」、「良い目的」による「悪用」の可能性】

- 分子ロボティクス分野の利用法で「人工精子」の開発が出てくるのではないかと。もしそうなるのであれば、これは既に問題となっている他の倫理問題、たとえば優生学などの問題を引き受けることに繋がる。狙った（優秀な）形質を持った DNA を選択的に取り込んで人工授精時に「運ぶ」精子が可能になるなど。デザイナーベビーの問題が絡んでくるのではないかと。¹⁹
- 「光による制御について、可視光外でスイッチが入る仕組みがあれば、気付かず作動させられる分子ロボットに「感染」させることで何かできるのでは」という懸念²⁰
- 早晚、「最新技術『分子ロボット』を使った」と称する化粧品やダイエット食、がん治療などが出てくるはず。最初は分子ロボット研究者は失笑するのみであっても、気付いたときには一大勢力になっており、経済という異なる次元のなかで動いているので、なかなか手出しできないことになるのではないかと。²¹

【害意・悪意のある利用について】

- デュアルユースに関わる議論は不可避ではないかと
 - 「ミュータント」をより効率的に設計する、あるいは工学的発想に基づいて生物

¹⁸ この点について、本 TA ノート分子ロボット倫理プロジェクトのメンバーに回覧した際、『封じ込め』対策は必要。作用機序等から考えて起こりうる有害事象への対応はきちんと検討しておく必要がある。それ以外で十分に情報がなくて有害事象が起こることの予測がつかない場合がある」というコメントが提示された。

¹⁹ この点について、本 TA ノート分子ロボット倫理プロジェクトのメンバーに回覧した際、ゲノム編集などの他の先行事例での動向と議論を検討する必要性が指摘された。

²⁰ この点について、本 TA ノート分子ロボット倫理プロジェクトのメンバーに回覧した際、「分子ロボットにおいて品質の問題が問われる時期がいずれかの時期に来ると思われる。どのような形で品質管理を行っていけば良いか検討が必要と思われる。目的から外れた分子ロボットは排除する必要がある」とのコメントが提示されている。

²¹ この点について、「分子ロボットの定義は重要である。定義を明確にして社会と共有していくことが必要と考えられる」との指摘が分子ロボット倫理の研究メンバーから指摘がなされている。

学的・化学的な強化（エンハンスメント）を行う技術として利用可能では？

- 軍事利用は魅力的なものだろう。軍事利用を目指すものは、「解毒」のために技術開発をして欲しい、として研究者に呼びかける。こうした警戒感は研究者の側にあるだろうか？

- 優生学への利用へ警戒感は強く必要ではないか

- 分子ロボティクスの技術が信頼できるものであればあるほど、それは「設計」に基づいた機能を実現することが出来ることを意味する。
- 「偶然を装った優生学」、「マイルドな民族浄化」の危険性は無いのだろうか？
例えば、数代にわたって出生率が低下していく仕組みを工学的に作り上げれば、100年単位で「ある民族」を表現形質に基づいて「浄化」することができるのでは。この場合、交雑が進んだ「人種」は標的にならないように設計しておけば、「浄化」は促進される。

3. 分子ロボティクスを巡る科学技術イノベーション政策の視点²²

<本章の要約>

分子ロボティクス分野は、萌芽的な学際融合領域であるがゆえに、分野の将来像を見据えた、人材像とカリキュラムの形成と合わせて教育の「場」自体を増やしていくことが課題となっている。現在、学生コンペなど積極的な活動が行われており、そこでの教育効果は現場の研究者も強く感じている。ELSI に関する教育としては、隣接領域でもある合成生物学において学生コンテストである iGEM で全員参加のセッションを行うなどの積極的な取り組みが行われており、参考となる。またこれらの取り組みは、教育イノベーション政策の観点からも考慮されるべきものであり、一種の「インパクト」として分野の評価の論点にもなりうる。

- 分子ロボティクス分野の現在の取り組みには教育イノベーションの面から考察できる側面がある。そこでは以下のような問いと特徴が見出されている。
 - 分子ロボティクス分野の将来、どのようなフィールドにしたいか？
 - どういう人材に来てほしいか、どういった人材を育てたいか？
 - ✓ 融合領域ゆえの複数分野のマインドを持つ人材の育成
 - どのようなカリキュラムが必要であり、また今後提案していくか？
 - 教育の「場」自体が少ない現状をどのように克服するか？
 - 化学と情報学の融合をどのように促進するか？
 - コミュニティ全体として、どのように学生を盛り上げていくか？

- 世界を見渡すと、欧米を中心に DNA オリガミ、DNA プログラミングをやっている大学が登場し始めており、学部生による分子デザインの国際的なコンペなどもある。しかしながら、倫理に関するコンペは現在のところない。
 - 先行事例である合成生物学では、iGEM などの国際的な学生コンペに必ず ELSI に関するセッションが設けられるなどの活動が行われている。

²² この章は、2017年1月22日に行われた分子ロボティクス研究会/JST分子ロボット倫理合同研究会とワークショップでの議論を中心にまとめたものである。

- 学生コンテストの「効果」の大きさは現場の研究者にとっての実感である。この教育効果は中長期的な「インパクト」として考えられるものである。
 - Team Science 経験をする非常に良い機会となっている

- 社会やメディアとの関係を研究者も考える必要がある。
 - 「分子ロボット」という語の認識範囲の問題とも関わるテーマである。
 - 萌芽的段階で一番してはいけないことは何か？（研究コミュニティとして）
 - ジャーナリストの視点からは、潜在的な被害者がわかりにくく、記事にしづらいという事情もある。多様な関係者で早期に議論してガイドラインをつくっていくという取り組みも、報道するストーリーとしては地味すぎるという課題。どのように継続的なメディア発信とその関係性の構築を行っていくか？

- イノベーションとそのための政策的方向性について
 - スケールアップの可能性
 - 既存の分子の組み合わせでかなりのイノベーションが可能
 - DNA でない人工分子の可能性。また DNA ナノテクの先にある先端研究の可能性。
 - 「分子ロボ」そのものが医療に貢献できるのか
 - DDS の例：分子ロボ・分子信号処理・診断→出す薬の処方在那里で変える
 - 特許戦略のとりかた
 - 「業」との手を組む方法、アカデミアの関わり方
 - 現時点ではとにかくオープンな形で進めていくことが肝要である
 - ✓ オープンイノベーションの在り方への提案／問題提起が可能であるという捉え方もできる
 - 息の長い研究が必要であり、そのための長期的な視野に立った政策的支援とファンディング戦略が必要となる
 - イノベーションと倫理的議論は不可分のものであるという認識が前提となる

- 分子ロボティクスのイノベーションを考える際には規制官庁との関わり方についても検討が必要となる

- 環境に分子ロボを散布することで想定しなかったデータが取れる可能性がある
(微生物など)
 - ✓ 一方で分子ロボを環境に散布することのリスクの考慮も必要である (その方法についてもまた検討課題となる)
 - 人間が分子ロボットを飲む治療により侵襲性のある手術の減少する可能性がある
 - ✓ 分子ロボの医療応用におけるリスクが現在では不明の部分も多い
 - 実用化へ向けて企業との連携する際の規制・制度上のハードルについてのより詳細な検討が必要である。²³
- 分子ロボットの定義を明確にすることは重要である。現状では、分子ロボットの機能が十分に開発されていない状況にある。したがって、今後生じるかもしれない弊害などについて議論するにも推論が多くて議論も多岐に渡ってしまうところがある。今後、機能が明確になってくれば、それに伴って生じるであろう有害事象なども少しずつ明確になってくるものと予想される。²⁴
- 今後、新たな開発を行う場合は、その開発の目的や機能を明確にし、制御したり、生じる可能性のある有害事象などを把握していく必要があるのかもしれない。また、それらのデータを集めて分析していくために学会などの組織・機関でデータなどを管理していく必要があるのかもしれない。
 - 分子ロボットを人や動物に使う場合と自然界で使う場合とで異なるところがあるので、すなわち、人や動物に使う場合はその個体の有害事象ということになるが、自然界に使った場合は広くばらまかれてしまう可能性もある。人や動物でも感染性の病原体と同じような動態を示すロボットを作った場合は同じかもしれないが、より広く環境への影響がないかの検証が必要となってくる可能性がある。そのような場合に対する品質管理のためのマニュアルや検証方法の検討が必要となってくる。

²³ この点について、本 TA ノート分子ロボット倫理プロジェクトのメンバー間に回覧した際、「オープンイノベーションで開発した場合の問題点、②特許や知的財産に関する問題点、③有害事象などの課題の整理、④分子ロボットの定義、⑤分子ロボットの開発の目的とその機能が企業等の必要としているものと合致するかなどの問題点がある」とのコメントがなされている。

²⁴ 本項目は、本ノートに対して寄せられたコメントとして 2018 年 3 月に追記したものである。

4. 分子ロボティクスの倫理的・法的・社会的含意（ELSI）を過去の事例から考える

第章では、過去に検討されてきた科学技術を巡る ELSI の事例とその議論を概観する。過去事例の検討作業を通じて、今後の分子ロボティクス領域における ELSI の議論の土台作りと活発化への貢献を目指す。

4. 1 遺伝子組換え生物（GMO）事例からの学習

<本節の要約>

メディアとの関係、また研究者と社会の間のコミュニケーションを考える上で、遺伝子組換え（GMO）の事例は様々な教訓を教えてくれる事例である。日本における注目事例としては、北海道における野外での栽培研究に対する条例がある。国の指針よりも遥かに厳しい基準を示すこの条例は、2003 年から議論がスタートし、2005 年に施行されている。この動きに対して、研究者側からの目だった活動は例えば条例施行直前の 6 学会合同声明などであった。しかしながら、マスメディア上における関心は 2000 年前後をピークに既に過ぎており、研究者が社会における議題設定・構築に参加できなかった（参加し損ねた）事例と捉えることもできる。一方で、GMO の事例は、技術確立直後に行われたアシロマ会議のような、研究者側からの早めはやめの議論と発信が重要であることを教えてくれる。

- 日本の現状において、GMO 利用、特に食品利用に対する忌避感は根強いという事実がある。北海道では風評被害などへの懸念から、2005 年には野外栽培試験に対して国の基準よりも遥かに厳しい基準を設定した条例が施行されており、研究者側からも研究の阻害などを懸念する声が上がった。
- 北海道の条例に対する研究者側からの声でもっとも大きな動きの一つは、2005 年に出された関連 6 学会合同声明²⁵である。しかしながら、この声明は条例施行の直前に公開

²⁵ <https://jspp.org/16appeal/teigen2005.html> (2018 年 2 月現在アクセス切れとなっている)。関連するニュースとしては例えば以下のものがある <https://cbijapan.com/news/796/> (最終アクセス：2018 年 2 月 17 日)

されており、またそのときには既にマスメディアにおける関心のピークも過ぎた後であった（メディア報道のピークは2000年前後であり、この時は食品利用を巡る不安やリスクなどに注目が集まった報道がされていた）（Shineha *et al.*, 2008）。

- なお、GMOを巡る報道は、最初からネガティブなトーンであったわけではない。1990年代半ばまでは、医療・産業応用への期待感が強いポジティブなトーンの記事が多い（Shineha *et al.*, 2008）。これらの状況を踏まえて敢えて言うならば、（それだけが要因ではないものの）GMOの議論の例は、研究者側がメディアにおける議題設定・構築のプロセスに参加できなかった（参加しなかった）例として捉えることも出来る。

- イギリスではGM Nationという大規模コミュニケーション・市民参加の試みが行われている。この試みから得られる最大の教訓の一つは「とにかく早い段階から継続的に発信・コミュニケーションを行うことの重要性」である。その上で、以下のような鍵となる論点が提示されている（Hails & Kinderler 2003; Barbagallo & Nelson 2005; Pidgeon *et al.* 2005; Rowe *et al.* 2005; Horlick-Jones *et al.* 2006; Horlick-Jones *et al.* 2007; 平川 2008）。

- 人々の持つ多様な不安：食品や環境への安全性といった科学的・技術的な側面に限らず、社会的・政治的課題まで含めた懸念に目を向ける必要がある。
- リスク - ベネフィットの理解：ベネフィットを知ると同時に、リスクへの関心もまた高まる（特に長期的な観測が必要なリスクについての関心の高まり）。
- 安易な商業化に対する反発：より多くのテスト、しっかりとした規制の枠組み、（生産者だけでなく）広く社会へのベネフィットの提示が要求されている。
- 政府・多国籍企業への不信感：GM Nation自体がただのアリバイ作りで結果は無視されてしまうのではないか、また多国籍企業の利益が優先されるのではないかといった危惧（実際のところ、多くの参加者は総論としての遺伝子組換え作物の利点は認めていた。しかし多国籍企業への疑念は払拭されなかった）。
- 更なる情報提供と試験研究：信頼できる情報源からのより多くの情報提供と、更なる試験研究の必要性を認めている。
- 発展途上国の事情に対する特別な関心：食糧増産などの形で、遺伝子組換え

作物は発展途上国に貢献し得るという認識がなされている。しかし同時に、公平な貿易、より良い食料分配システムの構築、収入や当該国の地位向上といった開発全体の推進が重要であるという認識も提示された。

➤ 議論に対する歓迎と価値：対話・議論への参加は歓迎されており、また自身の意見表明のみならず、専門家も含めた他者の意見を聞き議論できる機会が尊重されている。

- GMO を巡る各国の規制やガイドラインは、科学者たちの自発的議論がベースとなっている。アシロマ会議が持つ早期からの自発的議論とその発信というアプローチの重要性は、分子ロボティクスを含む萌芽的先端領域では共有されるべきものといえる。

4. 2 ナノテクノロジー事例からの学習

<本節の要約>

ナノテクノロジー領域では、GMO の経験などから ELSI などを含めた多様な論点についてのテクノロジーアセスメントが早期から行われてきた経緯がある。その中で、日本ではアスベストを巡る議論を契機としてカーボンナノチューブをはじめとするナノマテリアルに関する厚生労働省の予防的措置が 2008 年に通知されたことが話題となった。その中では、予防的措置の対象がナノマテリアル全体に及び、またその内容が曖昧であったことなどにより、ナノ関連ビジネスの遅滞などの影響も生じた。

- 多層カーボンナノチューブをマウスの腹腔内に直接投与した場合に、アスベストのように入皮腫が生じる影響が観察されたことを受けて、厚生労働省においてナノマテリアルに関する予防的措置が通知された。²⁶
- しかし、曝露評価について具体的な成果が出ていないものの、多層カーボンナノチューブは使用量も少なく、大量に直接曝露する機会も限られているため、第二のアスベストというほどの危険性をただちに生ずる可能性は低いと考えられる。

²⁶ i2ta 『多層カーボンナノチューブに関するリスク評価・管理の最近の動向 - 厚生労働省による予防的対応を受けて』 TA Note、2017 年 1 月 22 日吉澤発表資料より。

- 世界的にも早い時点で、ナノマテリアル全体について予防的措置をとるよう厚生労働省より使用機関等に対し通知が出された。ただし、その内容は曖昧で、措置の根拠も明確でなかった。またカーボンナノチューブだけではなく、ナノマテリアル全体が対象となったことが特徴的である。
- ナノマテリアルの環境・健康・安全影響については、厚生労働省、経済産業省、環境省がそれぞれ独自に検討をおこなっている。一方、内閣府においては、各省のナノテクノロジー研究についての連携が図られている。しかし、ナノマテリアルの環境・健康・安全影響について、最新の科学的知見を総合的に比較・評価し、どのような措置をとるべきかについて内閣府の戦略的な方針は示されておらず、その点で各府省の連携は有効に機能していない。

4. 3 合成生物学事例からの学習

<本節の要約>

合成生物学の分野では、GMO の教訓を活かす形で研究領域の形成当初から ELSI や政策に関わる議論に関心と注意が払われ、国内外の研究者コミュニティで積極的な議論が行われてきた特徴がある。その中で、潜在的なリスクとベネフィット、バイオテロなど安全保障や技術貿易に関わる課題、倫理的議論、研究に関わる規制、インフラ整備、イノベーション政策のあり方など様々な論点への配慮がなされつつある。またどのような将来的なシナリオがありうるのかについての不足や、技術の管理責任と情報公開の透明性を通じた社会との信頼関係などの課題も指摘されている。

- 合成生物学は、健康福祉・エネルギー・環境・農業・バイオコンピューターなど様々な領域での展開が期待されている。その一方で、合成生物学分野では早くから ELSI に関わる議論への注意が行われてきた。この ELSI を巡る議論では、GMO の議論を参照点として行われてきた経緯がある。
- これまでに指摘された主だった ELSI と科学政策上の論点としては以下のものがある

(Balmer and Martin 2008; OECD 2014; Marris *et al.* 2014)。

- コントロール下ではない条件での環境放出のリスク
 - バイオテロの潜在的可能性
 - テクノロジーアセスメントの限界
 - 各種規制や予防原則との兼ね合い
 - 倫理的課題の検討
 - 特許・知的財産権の扱いと技術貿易に関わる過大
 - ガバナンスとリスクマネジメントの政策的位置づけ
 - オープンソースイノベーションのあり方
 - 研究インフラ整備の課題
- **Hart Research Associate** が公表した米国における意識調査では、「合成生物学」というキーワードの認知自体は年々上昇傾向にあるものの、リスクとベネフィットの関係については慎重あるいは判断保留の態度が認められる (Pauwels 2013; Hart Research Associate 2013)。
 - 合成生物学に対する問題意識やフレーミング（問題設定／論点の枠組み）として、人工的な生命へのアンビバレンツな態度、どのようなシナリオがありうるのかについての理解の欠如、潜在的な応用の可能性と問題、信頼関係の構築（監督責任と透明性）などが指摘されている (Pauwels 2013)。
 - 国内では、「細胞を創る」研究会において、ELSI を巡る議論やセッションが行われてきた経緯がある。
 - 合成生物学の国際学生コンペである iGEM では、全員参加の ELSI に関するセッションが行われるなど、積極的な教育と議論の場の設定が試みられている。

4. 4 ヒトゲノム情報解析・PoC²⁷事例からの学習

<本節の要約>

個人に対する遺伝検査サービスを提供する企業は2000年代初期から存在していたが、ゲノム解読コストの大幅な低下はそのようなサービスの利用を更に助長する可能性がある。遺伝情報に関する専門家や医師を迂回する形でのサービスの提供が行われることには現在までに多くの課題が指摘されており、サービスとして提供される場合においても、その質の確保と規制の手段を明確にしていくことが重要である。

- ヒトゲノム計画以降、ゲノムの配列決定技術は指数関数的に高速化し、コストが減少している。それに伴い、現在は個人が自身のゲノム情報に比較的簡易にアクセスできる時代に突入しつつある（「1000ドルゲノム」の時代）。このような中で、「バイオバンク」の整備、膨大なゲノム情報の登場による医学研究・医療現場が急速な変化（稀少遺伝疾患、がん治療、薬理ゲノミクス、着床前診断、出生前診断、発症前診断など）などに関する議論と制度設計が注目されている。さらに、消費者が直接インターネットや販売店から購入できる Direct-to-Consumer (DTC) 遺伝検査も登場している。
- 臨床現場における膨大なゲノム情報の分析・利用・活用が一つの重要なテーマとなっている。その中で診断の AI 化などの議論や導入が進みつつある。このような状況を視野に入れた状態でゲノム情報の活用に関する社会の側の理解と適切な対応もまた重要なテーマとなる。
- 「偶発的所見 (incidental finding)」の取り扱い、また「知らないでいる権利」の保障にどのように取り組むのかも検討課題となる。遺伝子検査・診断の結果をどのような取扱いスキームの下で返却するのか（または返却しないのか）についての議論が、各国の事情を背景としつつ、医療者の法的義務の観点なども射程に含みつつ、まさしく進

²⁷ この項目の論点メモは、2017年1月に実施した専門家ヒアリングならびに、本報告執筆者も作成に参加した以下の資料に依拠している。詳細はそちらを参照されたい。総合研究大学院大学『ヒトゲノム解読の現状とELSIに関する検討報告：今後のテクノロジーアセスメントに向けて』2014年7月。

<https://ir.soken.ac.jp/?action=repository_action_common_download&item_id=4755&item_no=1&attribute_id=24&file_no=1>（最終アクセス 2017年3月4日）

行中である (e.g. Dondorp & de Wert 2013; Clayton *et al.* 2013)。

- 個人に対する遺伝検査サービスを提供する企業は 2000 年代初期から存在していたが、ゲノム解読と分析・活用の大幅なコスト低下はそのようなサービスの利用を更に助長する可能性がある。遺伝情報に関する専門家や医師を迂回する形でのサービスの提供が行われることには現在までに多くの課題が指摘されており、サービスの質の確保と規制の手段を明確にしていくことが重要である。
- 遺伝検査サービスに対する規制：米国に拠点を置く遺伝検査会社が提供するサービスに加え、日本の企業もすでに DTC の市場に参入している。株式会社ディー・エヌ・エーが東京大学医科学研究所との共同研究として 2014 年 4 月に設立した「DeNA ライフサイエンス」が、7 月から遺伝子検査サービス「MYCODE」を提供すると発表しており、今後もこのようなビジネスが拡大していくことが予想される。これらの遺伝子・ゲノム解読サービスが、日本国内でどのような規制を設けるのか、もしくは設けないのかについて、その方向性を明確にする必要がある。現在までの具体的動きとしては以下のようになっている
 - 日本人類遺伝学会：個別化医療に関する研究の進展を受け、日本人類遺伝学会は 2008 年に「DTC 遺伝学的検査に関する見解」²⁸を提示し、また 2010 年には「一般市民を対象とした遺伝子検査に関する見解」²⁹を公表している。サービスの科学的妥当性や、検査・管理の制度の必要性などの課題を提起している。
 - 日本医学会：「医療における遺伝学的検査・診断に関するガイドライン」(2011 年)³⁰、「拡がる遺伝子検査市場への重大な懸念表明」(2012 年)などの公表がされている³¹。とりわけ、「医療分野・事業分野等領域毎に所掌官庁の異なる多領域にまたがる遺伝子検査を統合的に規制・管理する部署を、一案として消費者庁に設置するという選択肢を示すとともに、その下位組織として各省庁に共通基準で分掌管理させるシステムの構築と立法化を早急に整備される

²⁸ <http://jshg.jp/dtc/> (最終アクセス 2017 年 3 月 4 日)

²⁹ http://jshg.jp/news/data/Statement_101029_DTC.pdf (最終アクセス 2017 年 3 月 4 日)

³⁰ <http://jams.med.or.jp/guideline/genetics-diagnosis.pdf> (最終アクセス 2017 年 3 月 4 日)

³¹ 内容としては、基本的には人類遺伝学会の見解を踏襲したものとなっている。

よう求める」³²という指摘は特徴的である。しかし、消費者庁を始め各省庁において立法化に関する目立った動きは現在までほとんど見られない。

- 経済産業省：急速に広がる遺伝子検査ビジネスを検討するため、経済産業省が 2012 年に有識者による研究会を立ち上げている。その報告書（2013）によれば、遺伝子検査ビジネスには「重大な問題の兆し」はあるものの「直ちに法制化して事業者の経済的権利を束縛する」対応は必要ないとしている（p.156）。また経産省は遺伝子検査を成長分野と見なし、その「健全な発展」を図るために、「事業者が遵守すべき事項」と消費者のための「事業者選定における注意事項」を提示している。しかし現在のところこれらは「注意喚起」でしかない。優良業者の認証制度も将来的には検討するようであるが、現段階では科学的根拠の乏しいビジネスを規制することができないことが予想される。
- その他に、日本臨床検査標準協議会・遺伝子関連検査標準化専門委員会が、「遺伝子関連検査に関する日本版ベストプラクティスガイドライン」、日本衛生検査所協会「遺伝学的検査受託に関する倫理指針」（2011 年）、「遺伝子関連検査の質保証体制についての見解」（2013 年）、などの業界団体指針がある。ここでは、遺伝学的検査受託における法律遵守、検査精度向上、被験者へのインフォームドコンセント実施、ELSI への配慮、一般市民へのインターネット等を用いての直接的な検査への勧誘・宣伝広告の禁止、施設認証、検査の質保証、検査従事者の水準・資格、職員に対する教育、リスクマネジメントなどが論点となっている。

- ゲノム情報やヘルスケア情報を使った DTC サービスは、既に検査を主体としたビジネスモデルではなくなりつつあり、むしろ膨大な個人情報を価値あるデータセットとして商品化する方向にも進んでいる。
- 現在の個人情報保護法における「同意」の制度は、ゲノムやヘルスケア情報サービスの実態に比して非常に薄い内容となっている（ページのスクロールをもって同意とみなせる形で本当によいのか？）

³² http://jams.med.or.jp/rinshobukai_ghs/pressconf_0301.html (最終アクセス 2014 年 5 月 28 日)

- 格差社会を背景とした情報搾取、情報弱者の問題とも関わる論点となりうる。
- ゲノム情報やヘルスケア情報は、保険・結婚・就職などの差別につながる可能性のある個人情報であるが、日本には遺伝差別禁止法などの法令整備がなされていない（仮に出来たとしても、理念法に留まる可能性が高く、その制度的リスクは検討課題となる）
- 現在では、経済産業省なども規制には余り踏み込んでおらず、NPO による認定企業制度に留まっている。
- 企業文化やビジネスマインドの違いが今後重要な論点になりうる。
- サービスとステークホルダーが広がる中で、「被害者は誰か？その被害者たちは自分たちの状況を認識できているか？」という問いが発生しうる。また生じている問題に対して、適切な専門家がない（Lay-Expert しかいない）状況がありうる。

4.5 再生医療事例からの学習（再生医療分野から見る科学コミュニケーションの課題）

<本節の要約>

先端研究と社会間のコミュニケーションの最近の事例として、再生医療分野における調査事例がある。そこでは、研究者側が科学研究や医療応用の科学的妥当性やメカニズムを強調する傾向にある一方で、一般の人々はリスク、実際にかかる治療費、万が一の事態における対応方策、責任体制などむしろ技術の実現後の事柄について関心を抱く傾向にあることが見出されている。コミュニケーション活動を行う際には、このような関心の差異を念頭におく必要がある。実用化以前の段階で、技術の社会実装後の社会を想起し、そのビジョンを共有することは難しい作業であるが、その分野の研究者こそが第一に担いうる創造的な仕事でもある。

- 日本再生医療学会が行った質問紙調査がある。再生医療分野研究者 1115 名³³、一般モニター回答者 2160 名から得られた結果から、一般の人々と研究者のコミュニケーションにおける関心事項の差異が示唆されている。
- 一般の人々の「知りたい事柄」と研究者の「伝えたい事柄」の間とに差異が存在する。研究者は、科学的妥当性や再生医療のメカニズム、またその必要性などを重視しており、また伝えたいと考える傾向にある。その一方で、一般の人々の関心事は、科学的内実よりも、むしろ再生医療が実現した際の事柄への関心（ベネフィットは勿論だが、それ以上に生じうるリスクや、問題発生時の対応、責任体制、実際にかかる費用等）にある（Shineha *et al.* 2018）。
 - 日本再生医療学会が、三井住友海上保険と共同で行っている「再生医療等臨床研究補償制度」は、現状の制度の穴をカバーすると共に、上記関心に（少なくとも）部分的には応える取り組みということが出来る³⁴。
- 一般モニター回答において、サンプル提供について好意的な回答をする割合は高い結

³³ 再生医療学会員を対象とした調査である学会員を研究者として扱っている。

³⁴ 通常の臨床研究のための保険からさらに踏み込み、医師・医療機関に法律上の賠償責任がない場合も補償対象とし、また再生医療等安全性確保法では定めのない患者に対する補償にも対応するなどが盛り込まれた新制度である。

<http://www.mskhoken.com/dantai/jsrm/index.html>（最終アクセス 2018 年 2 月 17 日）

果となった。一方で、時に重視する事柄について、研究者が「個人情報の保護」や「採取時の痛み」などを重視しているのに対して、一般モニターでは「信頼できる医師による助言」や「誰がサンプルを使用するか」を研究者よりも重視するなどの違いがある (Shineha *et al.* 2018)。

- 新規な技術に肯定的な人であっても、技術の内容によっては忌避感を感じる場合があることに注意が必要である。再生医療の場合は、全体的な肯定感・許容度に比して、ヒト動物キメラの作製について一般モニターの忌避感が強い。生体資料を収集するような研究の場合、用途によっては、インフォームドコンセントの取得などに際して同様の注意が必要となる (Inoue *et al.* 2016)。
- 研究者が自身の分野をとりまく政策的基盤や制度状況について余り知らない、あるいは無関心である状況については適宜のモニタリングが必要となる。また何かしらの事件が起きた際に、当該分野の研究者における認知度などはコミュニティ内での教育を行う際に重要となる (Shineha *et al.* 2018)³⁵。
- メディアとの関係において、研究者・研究所側が出すプレスリリースになんらかの誇張が入ると、メディア報道でもかなりの割合で誇張が入ることになる。一方で、プレスリリースが抑制的に書かれている場合は、メディア報道において誇張が入る割合が5分の1程度に抑制される (Summer *et al.* 2014)。
- 研究者におけるコミュニケーション参加においては、時間的制約・負担、資金、評価システムの整備などのハードルの解消が課題として指摘されている (Shineha *et al.* 2009, 2017; 科学技術振興機構 2013)。

³⁵ 再生医療分野については、再生医療三法や幹細胞投与事件など、再生医療を巡る社会的制度や事件についての認知度である。再生医療三法については研究者内で、計 27.9%が「聞いたことがあるが概要は知らない」・「まったく知らない」回答をしている。また幹細胞投与事件については 38.4%が「知らなかった」と回答している。

参考文献リスト

- Asanuma, H, Kashida, H, and Kamiya, Y. (2014) “De novo design of functional oligonucleotides with acyclic scaffolds,” *The Chemical Record*. 14(6): 1055–1069.
- Barbagallo, F, and Nelson, J. (2005) “Report: UK GM dialogue - Separating social and scientific issues,” *Science Communication*, 26(3): 318-325.
- Balmer, A, and Martin, P. (2008) *Synthetic Biology: Social and Ethical Challenges*.
<http://www.synbiosafe.eu/uploads/pdf/synthetic_biology_social_ethical_challenges.pdf>
(最終アクセス 2018 年 2 月 17 日)
- Marris, C, Jefferson, C, and Lentzos, F. (2014) “Negotiating the dynamics of uncomfortable knowledge: The case of dual use and synthetic biology,” *BioSocieties*, 9(4): 393-420.
- Dondorp, WJ, and de Wert, GM. (2013) “The ‘thousand-dollar genome’: An ethical exploration.” *European Journal of Human Genetics*, 21(S1): S6-S26.
- Douglas, SM, Bachelet, I, and Church, GM. (2012) “A Logic-Gated Nanorobot for Targeted Transport of Molecular Payloads,” *Science*. 335: 831–834.
- Fujimoto, K, Yamada, A, Yoshimura, Y, Tsukaguchi T, and Sakamoto, T. (2013) "Details of the ultra-fast DNA photocrosslinking reaction of 3-cyanovinylcarbazole nucleoside; Cis-trans isomeric effect and the application for SNP based genotyping", *J. Am. Chem. Soc.* , /135:43: 16161-16167.
- Furutani, M, Uemura, A, Shigenaga, A, Komiya, C, Osaka, A, and Matsuura, K. (2015) “A photoinduced growth system of peptide nanofibres addressed by DNA hybridization,” *Chemical Communications*, 51: 8020–8022.
- Genot, AJ, Zhang, DY, Bath, J, and Turberfield, AJ (2011) “Remote Toehold: A Mechanism for Flexible Control of DNA Hybridization Kinetics,” *Journal of the American Chemical Society*, 133 (7): 2177–2182.
- Hagiya, M, Konagaya, A, Kobayashi, S, Saito, H, and Murata, S (2014) “Molecular Robots with Sensors and Intelligence,” *Accounts of Chemical Research*, 47 (6): 1681–1690.
- Hails, R, and Kinderlerer, J. (2003) “The GM public debate: context and communication strategies,” *Nature Reviews Genetics*. 4(10): 819-825.
- Hart Research Associates. (2013) *Awareness & Impressions Of Synthetic Biology A Report Of Findings Based On A National Survey Among Adults*

- <<https://www.cbd.int/doc/emerging-issues/emergingissues-2013-07-WilsonCenter-SynbioSurvey-en.pdf>> (最終アクセス 2017 年 3 月 4 日)
- Hayashi, M, Nishiyama, M, Kazayama, Y, Toyota, T, Harada, Y, and Takiguchi, K. (2016) “Reversible Morphological Control of Tubulin-Encapsulating Giant Liposomes by Hydrostatic Pressure,” *Langmuir*, 32(15): 3794–3802.
- 平川秀幸. (2008) 「科学技術の社会的問題をめぐる公共的議論 遺伝子組換え作物の問題を例に」『蛋白質 核酸 酵素』 53(10): 1299-1305.
- Horlick-Jones, T, Walls, J, Rowe, G, Pidgeon, N, Poortinga, W, and O'riordan, T. (2006) “On evaluating the GM Nation? Public debate about the commercialisation of transgenic crops in Britain,” *New Genetics And Society*, 25(3): 265-288.
- Horlick-Jones, T, Rowe, G, and Walsh, J. (2007) “Citizen engagement processes as information systems: the role of knowledge and the concept of translation quality,” *Public Understanding of Science*, 16(3): 259-278.
- Inaba, H, Uemura, A, Morishita, K, Kohiki, T, Shigenaga, A, Otaka, A, and Matsuura, K. (2018) “Light-induced propulsion of a giant liposome driven by peptide nanofibre growth,” *Scientific Reports*, 8: 6243. <https://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-24675-7>
- Inoue, Y, Shineha, R, and Yashiro, Y. (2016) “Current Public Support for Human-Animal Chimera Research in Japan Is Limited, Despite High Levels of Scientific Approval,” *Cell Stem Cell*, 19(2): 152-153.
- 科学技術振興機構, 2013, 『研究者による科学コミュニケーション活動に関するアンケート調査報告書』 < https://www.jst.go.jp/csc/mt/mt-static/support/theme_static/csc/pdf/csc_fy2013_03.pdf > (最終アクセス日 2018 年 2 月 17 日)
- Kamiya, Y, and Asanuma, H. (2014) “Light-driven DNA nanomachine with a photoresponsive molecular engine. *Accounts of Chemical Research*,” 47(6): 166316–72.
- 経済産業省. (2013) 『平成 24 年度中小企業支援調査（個人遺伝情報保護の環境整備に関する調査）報告書 - （遺伝子検査ビジネスに関する調査）報告書』 <http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11001630/www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/bio/kai24idenshibizinesu.pdf> (最終アクセス 2018 年 2 月 17 日)
- Keya, JJ, Suzuki, R, Kabir, AMR, Inoue, D, Asanuma, H, Sada, K, Hess, H, Kuzuya, A, and Kakugo, A. (2018) “DNA-assisted swarm control in a biomolecular motor system”, *Nature*

Communications, 9: 453. <https://dx.doi.org/10.1038/s41467-017-02778-5>

小宮健. (2015) 「分子プログラミング、分子ロボティクスと高感度に核酸を検出する等温指数増幅反応系の構築」『日本化学会生体機能関連化学部会ニュースレター』 30(2): 6-9.

Kuzuya, A, Sakai, Y, Yamazaki, T, Xu, Y, and Komiyama, M. (2011) “Nanomechanical DNA origami 'single-molecule beacons' directly imaged by atomic force microscopy,” *Nature Communications*, 2: 449. <https://dx.doi.org/10.1038/ncomms1452>

文部科学省科学技術・学術政策研究所科学技術動向センター「ホライズン・スキャニングに向けて～海外での実施事例と科学技術・学術政策研究所における取組の方向性～」*STI Horizon*, 1(1): 13-17.

OECD (2014). *Emerging Policy Issues in Synthetic Biology*.

<<http://dspace2.conicyt.cl/bitstream/handle/10533/91165/EMERGING%20POLICY%20ISSUES%20IN%20SYNTHETIC%20BIOLOGY.pdf?sequence=1>> (最終アクセス 2017年3月4日)

Pauwels, E. (2013) “Public Understanding of Synthetic Biology,” *BioScience*, 63(2): 79-89.

Pidgeon, NF, Poortinga, W, Rowe, G, Jones, TH, Walls, J, and O’Riordan, T. (2005) “Using surveys in public participation processes for risk decision making: The case of the 2003 British GM nation? Public debate,” *Risk Analysis*, 25(2): 467-479.

Qian, L, and Winfree, E. (2011) “A simple DNA gate motif for synthesizing large-scale circuits,” *Journal of the Royal Society Interface*, 8(62): 1281–1297.

Qian, L, Winfree, E, and Bruck, J. (2011) “Neural network computation with DNA strand displacement cascades,” *Nature*, 475: 368–372.

Rothmund, PWK. (2006) “Folding DNA to create nanoscale shapes and patterns,” *Nature*, 440: 297–302.

Rowe, G, Horlick-Jones, T, Walls, J, and Pidgeon, N. (2005) “Difficulties in evaluating public engagement initiatives: reflections on an evaluation of the UK GM Nation? Public debate about transgenic crops,” *Public Understanding of Science*, 14(4): 331-352.

Saito, AC, Ogura, T, Fujiwara, K, Murata, S, and Nomura, MS. (2014) “Introducing Micrometer-Sized Artificial Objects into Live Cells: A Method for Cell–Giant Unilamellar

- Vesicle Electrofusion,” *PLoS ONE*, 9(9): e106853.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106853>
- Sato, Y, Hiratsuka, Y, Kawamata, I, Murata, S, and Nomura, MS. (2017) “Micrometer-sized molecular robot changes its shape in response to single molecules,” *Science Robotics*, 2(4): eaal3735. <https://dx.doi.org/10.1126/scirobotics.aal3735>
- Shineha, R, Hibino, A, and Kato, K. (2008) “Analysis of Japanese Newspaper Articles on Genetic Modification,” *Journal of Science Communication*, 2: 1-8.
- 標葉隆馬, 川上雅弘, 加藤和人, 日比野愛子. (2009) 「生命科学分野研究者の科学技術コミュニケーションに対する意識 - 動機, 障壁, 参加促進のための方策について - 」『科学技術コミュニケーション』 6: 17-32.
- Shineha, R, Inoue, Y, Ikka, T, Kishimoto, A, and Yashiro, Y. (2017) “Science communication in regenerative medicine: implications for the role of academic society and scientific policy,” *Regenerative Therapy*, 7: 89-97.
- Shineha, R, Inoue, Y, Ikka, T, Kishimoto, A, and Yashiro, Y. (2018) “Comparative Analysis of Attitudes on Communication toward Stem Cell Research and Regenerative Medicine between the Public and the Scientific Community,” *Stem Cells Translational Medicine*, 7(2): 251-257.
- 総合研究大学院大学. (2014) 『ヒトゲノム解読の現状とELSIに関する検討報告：今後のテクノロジーアセスメントに向けて』
<https://ir.soken.ac.jp/?action=repository_action_common_download&item_id=4755&item_no=1&attribute_id=24&file_no=1> (最終アクセス 2017年3月4日)
- Tanaka, S, Takiguchi, K, and Hayashi M. (2018) “Repetitive stretching of giant liposomes utilizing the nematic alignment of confined actin,” *Communications Physics*, 1: *in press*.
- 豊田太郎, 伴野太祐, 藤浪真紀. (2012) 「W/O エマルションを用いたベシクル型人工細胞の器づくり」『オレオサイエンス』 12: 77-84.
- 吉澤剛. (2013) 「責任ある研究・イノベーション：ELSIを越えて」『研究 技術 計画』 28(1): 106-122.
- Yurke, B, Turberfield, AJ, Mills, AP, Simmel, Jr., FC, and Neumann, JL. (2000) “A DNA-fuelled molecular machine made of DNA,” *Nature*, 406: 605–608.
- Zhang, DY, and Seelig, G. (2011) “Dynamic DNA nanotechnology using strand-displacement reactions,” *Nature Chemistry*, 3: 103–113.

