

GteX メンバーによるミニ・ホライゾンスキャンニング ラウンドテーブル ディスカッション 開催報告

松尾真紀子(東京大学)、湯本勲(大阪大学)、本田孝祐(大阪大学)¹

※本レポートの英訳版は以下よりアクセス可能

https://www.gtex-microbe.jp/wp-content/uploads/2024/09/20240905_mini-HS.pdf

1. はじめに

技術が急速に進展する中、将来的にいかなる研究技術開発が進展し、それがどのような社会影響をもたらすのかを想定してバックキャストし、今何ができるのかをあらかじめ関係者間で議論し、対応を検討する「先見的ガバナンス(Anticipatory Governance)」の構築が求められている。将来的な技術の芽・兆しとなる動向を時間軸でとらえ、その技術がもたらす様々な好機(opportunity)や課題を検討する活動を「ホライゾンスキャンニング」という。

OECD では現在合成生物学に関する専門家会議を立ち上げ議論しているが²、その活動の一環として、同専門家会議メンバーにホライゾンスキャンニングのアンケート調査が行われた。こうした動きを踏まえ、GteX³のバイオものづくりにかかわる研究者が考えるアイデアのOECD へのインプット、および日本のバイオものづくりにおけるリサーチコミュニティ自らの今後のあり方についての検討材料とすることも視野に、GteX メンバーを対象にOECD の質問事項と同様のアンケートを実施した(2024年5月)。限られた時間であったが、様々な情報が得られたことから、その結果を振り返るミニ・ホライゾンスキャンニングラウンドテーブル ディスカッション(以下、ラウンドテーブル ディスカッション)を GteX の有志のメンバーにより企画し、議論した(2024年7月)。本開催報告はその概要をまとめたものである。

2. ラウンドテーブル ディスカッションの実施概要

(1)OECD のホライゾンスキャンニング質問事項とラウンドテーブル ディスカッションの進め方

OECD のホライゾンスキャンニングに関する質問事項を GteX のメンバー(37名)に対してアンケート調査(期間:2024年5月21日~24日)を行い、16件の回答を得た。

OECD の質問事項は以下の4項目(もとの質問は Appendix 1 参照)

- ①合成生物学を前進させるためには、いかなる新しい科学的知識と研究分野が必要か

¹ 本ラウンドテーブル実施とりまとめに当たりリサーチアシスタントの萩野勝己さん(東京大学)の協力を得た。

² OECD ウェブサイト、Synthetic Biology Briefing Document, 3 April 2024, Global Forum on Technology (GFTech)

<https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/networks/global-forum-on-technology/global-forum-on-technology-synthetic-biology-brief-2024.pdf>

³ JST 革新的GX技術創出事業(GteX)・バイオものづくり領域(PO:近藤昭彦(神戸大学))「多様な微生物機能の開拓のためのバイオものづくり DBTL 技術の開発」(研究代表:本田孝祐)

②どのような合成生物学由来の製品やイノベーションが予想され、合成生物学に革新的な影響を与えるか

③いかなる合成生物学由来の製品・イノベーションが、いかなる分野に大きな影響を与えると予想するか？

④合成生物学のイノベーションを拡大するための課題と機会は？

(それぞれ理由と時間軸も提示せよ:1-5年、5-10年、10年以上)

上記のアンケート回答を図表にまとめたもの(Appendix2)をベースに、2024年7月18日、ハイブリッドでラウンドテーブル ディスカッションの開催し、科学技術動向の振り返り(質問項目の①と②に相当)と社会インパクト・課題の振り返り(質問事項の③と④に相当)二つのテーマについて議論した⁴。

(2)議論の概要

一つ目のテーマの科学技術動向についての振り返りでは、まず GteX メンバーへのアンケート結果であったということもあり、メンバーの関心が色濃く反映された結果、技術対象のフォーカスが限定的であるという印象が論じられ、より俯瞰的な立場からの議論が必要とされた。図表の拡充をするうえで、プロセス系、人工光合成、プロテインシーケンサー、発酵生産、培地の最適化等の項目の追加が挙げられた。

そのうえで、主として、データ、ラボオートメーション、AIについての議論が行われた。データについては、データベースの重要性、研究結果の保存のリポジトリの課題が論じられた。データを共通のフォーマットで保管することは理想的であるものの、そうした標準化には様々な課題(例えば測定方法や計測機器の技術的進展が速いためすぐに陳腐化してしまう)があり、また研究内容も様々であるため現状統一のフォーマットはなく、それらを標準化する場合は研究者にメリットのある形で展開することが重要との指摘があった。実験データの収集に関してはコストはありつつも技術的に可能であるが、生データの処理・加工、データベースへのつなぎの部分は課題が多く、海外の成功事例などからも学ぶ必要がある。ラボオートメーション、AIの利活用については、技術の性質から研究に貢献できる場所(データの精度・高速化や画像処理)と、できないところ(生物ならではの特性が大きいところや職人芸的な作業が要されるところ)が理解されてきたところなので、その整理をしてどこに注力をすべきか考える必要がある(ただし技術の進展で後者についても長期的に解決される可能性はある)。AIを用いた酵素レベルの改変は技術的に可能になってきているが、ゲノムレベルになると難しく、表現型の評価の部分はまだこれからの状況にある。ここでAIやラボオートメーションが進むと所望の表現型を持つ最適なゲノム配列が探索できる技術などにも将来的にはつながる可能性がある

⁴ 研究者・専門家としてどの立場・観点で意見するかにより、意見の内容も出し方も変わってくるのが想定されたため、ラウンドテーブル ディスカッションにおいては、日本の合成生物学の研究コミュニティ全体を向上させるうえで政策担当者に求めたいことや必要となることを、極力俯瞰的な立場に立って論じることを意識していただいた。

る。その他、データセキュリティの確保の必要性についてや、AI やラボオートメーションが進展すると教育の在り方が変わる可能性があるといった指摘もあった。データ、ラボオートメーション、AI は相互にリンクしており、今後深堀できる重要なテーマと言える。

二つ目のテーマの社会インパクト・課題については、まずインパクトのある分野について議論があった。アンケート結果にもあるようにやはり医療が影響の大きな分野であるとする一方、食料などへの適用のインパクトも議論する必要があるとされた。さらに、GteX としてはやはり環境・エネルギー問題に注力することが重要で、海外から調達し続けることのみで成立するような産業構造を目指すのではなく、日本にある原材料から太陽光を用いて有用物質を永続的に作れるようなシステムを目指す研究開発に注力すべきで、そこでの技術ギャップをシミュレーション等により検討することが必要という議論がなされた。その観点で行くと、図表に欠けている点として静脈産業、すなわち廃棄物や下水汚泥・浄水汚泥などの未利用資源の活用も考慮されることが必要とされた。これらを考慮する際には、国内のバリューチェーンの下流におけるバイオ資源のアベイラビリティの把握はもちろんのこと、社会実装するうえでは、それらの調達のコストや実施上の制約も配慮すべきという指摘もあった。次に、標準化と人材育成について議論があった。標準化については、ラボ等での成功例をベースに、特にデータや AI に関する国際的な標準化のルール化に早期からコミットする必要性についての意見、国やトップダウンに実施するよりも研究者が国際的なプロジェクト等を通じてボトムアップに手間暇かけて構築すべきとする意見、良いものができてそこに需要があれば自動的に普及していくであろうとする意見、科学ベースの必要性(LCA の標準化等において)を論じる意見などがあった。人材育成や教育は急務とされ、エンジニアリング寄りの人材の育成、バリューチェーン全体を俯瞰する能力やアントレプレナーシップやELSI/RRR も含めたマルチスキルの教育の必要性、日本における博士の意義やキャリアパスの課題が論じられ、人材育成も教育も一朝一夕にはできないので長期的継続的取り組みが必要とされた。その他、規制、アカデミアと産業界の連携上の課題(論文化、知財・特許等に対する考えの違い)、大学発ベンチャーへの支援のあり方、などについても議論があった。

3. 最後に

ホライズンスキニングで得られた情報はあらゆる検討のベースとなることから、単に政策立案に有用であるだけでなく、科学者・技術者の研究活動の方向性の検討や技術開発・予算や投資獲得における説得性の増強のエビデンス、ELSI 検討の材料としても有用なものとなる。

今回は OECD におけるホライズンスキニングのアンケートを契機として GteX の有志により実施したが、短期間での実施にもかかわらず、科学技術動向と社会インパクト・課題についての様々な情報が得られた。科学技術動向については、データ、ラボオートメーション、AI は様々な論点を持つ重要なテーマとされた。社会インパクト・課題については、標準化と人材育成に多くの議論がなされ、また、日本のバイオ資源のアベイラビリティ等、環境的・社会的文

脈(ソフトサイエンス)を前提とした研究活動を目指すべきとした重要な指摘もなされた。

こうした知見は、今後日本のバイオものづくりの分野における研究開発のリサーチコミュニティとして様々な活動を実施する際にも有用な情報となることが理解されたので、将来的には、より目的を明確化して設計し、GteX としてのホライゾンスキャニングを実施することも有益との示唆が得られた。

Appendix 1 OECD によるオリジナルの質問項目。

- 1)What new scientific knowledge and research fields are needed to drive synthetic biology forward?
- 2)What technological developments are on the horizon that you expect to revolutionise synthetic biology?
- 3)What synthetic biology derived products and innovations do you foresee having a major impact and in which sectors?
- 4)What are the challenges and opportunities for scaling synthetic biology innovations?

Appendix 2 質問への回答のまとめ

※なお、赤字は、ラウンドテーブル ディスカッションを踏まえて追記したポイントである。

1)合成生物学を前進させるためには、どのような新しい科学的知識と研究分野が必要か

	1 year →	5 years →	10 + years →
遺伝子合成技術	長鎖遺伝子の設計・合成の技術	→ スマートセル用のゲノム合成技術	
細胞制御技術	・細胞活性制御 ・転写・翻訳因子の制御	→ 転写・翻訳系全体の包括的制御	
モニタリング	代謝評価の <i>in vivo</i> アッセイ	→ ・バイオセンサによるモニタリング ・大容量系のリアルタイムモニタリング	
AIの活用	計算生物学と生物情報学	→ ・様々なデータの収集 ・物質生産のためのAI ・オミクスデータのAI解析 ・AIによる生物の設計と操作	→ データベース化
生産効率化	膜輸送メカニズムの解明とライブラリー化	→ ・ライブラリーの拡大 ・高生産効率デバイスの開発	
バイオプロセス	・発酵生産 ・培地の最適化	→ プロセス系の技術開発	
その他		→ ・CO ₂ から燃料・食料へ変換する人工細胞 ・タンパクシーケンサー ・人工光合成	

質問 1 の回答まとめ

2) どのような合成生物学由来の製品やイノベーションが予想され、合成生物学に革新的な影響を与えるか

	1 year	5 years	10 + years
代謝設計	<ul style="list-style-type: none"> ・数理モデルによる設計 ・代謝経路の <i>in vivo</i> アッセイ技術 	合理的な代謝経路を設計するためのAIの開発	<ul style="list-style-type: none"> ・AIによる効率化 ・収量の最大化 ・持続可能なエネルギー効率の高い生産
ゲノム設計	<ul style="list-style-type: none"> ・合理的なゲノム配列を決定するAI ・正確で高効率な遺伝子改変(CRISPRベース) 	ゲノム編集株評価のための迅速な配列決定	遺伝子組換えの自動化
人工細胞	高付加価値な化学物質を効率的に生産する人工細胞		AIによる人工細胞設計
リボソームの包括的工学化	翻訳因子のエンジニアリング(aaRS, EF-Tu)	翻訳系の包括的なエンジニアリング(+ Ribosome, tRNA)	
その他		計算と機械化によるオンデマンド微生物細菌叢の形成	実験の自動化によるDBTLサイクルの高速化




質問 2 の回答まとめ

3) どのような合成生物学由来の製品・イノベーションが、どの分野に大きな影響を与えると予想するか？

	1 year	5 years	10 + years
環境問題	<ul style="list-style-type: none"> ・化石燃料由来の材料の代替バイオポリマー開発 ・持続可能なバイオ製造 	<ul style="list-style-type: none"> ・人工細胞工場を用いたCO₂ またはC1基質からの化学品生産 ・CO₂排出を削減するバイオ生産 ・静脈産業 (廃棄物・汚泥、浄水処理) 	
エネルギー問題	<ul style="list-style-type: none"> ・合成生物学によるバイオ燃料の生産 (SAF) ・産業用キー・マテリアルのカーボンニュートラル生産 ・海洋バイオマス資源の活用 	太陽光によって有用物質を永続的に生産し続けるシステム	エネルギー危機を解決するための合成生物学の活用
医療関連	<ul style="list-style-type: none"> ・Nアルキル ペプチド/タンパクの <i>in vivo</i> 合成 ・酵素ベースの治療 	<ul style="list-style-type: none"> ・D体タンパク質の合成 ・タンパク質/mRNAによる治療 	
その他技術	<ul style="list-style-type: none"> ・人工酵素の <i>de novo</i> 設計 ・農業/食料イノベーション 		

質問 3 の回答まとめ

4)合成生物学のイノベーションを拡大するための課題と機会は？

	1 year 	5 years 	10 + years 
研究の効率化		・ウェットラボの自動化し、生成AIの訓練に必要な全てを測定する	・複雑な実験フローの自動化
技術革新	・長鎖DNA合成技術 ・バイオインフォマティクスと構造生物学を用いた定向進化	・柔軟な <i>in silico</i> タンパク設計 ・ディープラーニングによる緻密な生物機能の設計	・収量の最大化 ・持続可能なエネルギー効率の高い生産
研究環境の改善	・研究費の拡充 ・最先端のアイデアを提案し、優秀な人材を育成する ・分野の課題と方向性の共有	・研究と産業の橋渡し ・研究者の数・質の向上 (~10年)	
社会情勢・規制	・倫理に基づく規制 ・組換え生物の規制 ・開放系における (外挿遺伝子の無い) GM微生物の拡大 ・これを実現するための検査法の確立	経済的課題(コスト)の解決	

質問4の回答まとめ

Appendix3

【ミニ・ホライズンスキヤニング ラウンドテーブル ディスカッション概要】

日時:7月18日 9時30分~11時30分

場所:大阪大学生物工学国際交流センター5階セミナー室

参加者: 本田孝祐 (大阪大学 生物工学国際交流センター)

蓮沼誠久 (神戸大学 先端バイオ工学研究センター)

松田史生 (大阪大学 情報科学研究科)

湯本勳 (大阪大学 先導的学際研究機構)

戸谷吉博 (大阪大学 情報科学研究科)

田中謙也 (神戸大学 先端バイオ工学研究センター)

青木航 (大阪大学 工学研究科)

松尾真紀子 (東京大学 公共政策学連携研究部)

萩野勝己 (東京大学 総合文化研究科)

オブザーバー:水無渉 (国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)

【当日スケジュール】

9:30~ はじめに(大阪大学 本田孝祐教授) 5分

9:35～ 「ホライズンスキヤニングとは何か・なぜ研究者が考える必要があるのか」(東京大学 松尾真紀子特任准教授)20分

9:55～ (45分)「科学技術動向 revisit」

10:40～ (45分)「社会インパクト・課題 revisit」