

全米科学・工学・医学アカデミー『近未来の遺伝子ドライブ』概要

京都大学大学院文学研究科・研究員

大庭弘継

1 はじめに

『近未来の遺伝子ドライブ：科学の進展、不確実な状況でのかじ取り、公共の価値と研究の整合』（*Gene Drives on the Horizon: Advancing Science, Navigating Uncertainty, and Aligning Research with Public Values*）¹（以下、本報告）は、日本の学術会議に相当する全米科学・工学・医学アカデミーズ（National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine：NASEM）²が、2016年6月に刊行した報告書である³。なお全米科学・工学・医学アカデミーズは、「議会・政府省庁・その他財団等の関係組織からの国家の科学技術問題に関する依頼に基き、委員会を設置し、検討、提言を行う」⁴組織でもある。本報告は、米国国立衛生研究所（NIH）とNIH財団（FNIH）の諮問を受けたものである⁵。

本報告が検討対象とする遺伝子ドライブ（Gene Drive）とは、生物に特定の遺伝子を組み込み（遺伝子改変、遺伝子組換え）、その遺伝子を子孫に顕性（優性）⁶遺伝させる技術を指す。この技術は、近年のゲノム編集技術の進展が可能にし、これによって、例えばマラリア耐性遺伝子を持つ蚊、つまりマラリアを媒介しない蚊を「自然界の蚊集団に迅速に広める」ことが可能になり、マラリアの根絶に寄与することが期待される⁷。

しかしながら、この改変は生物に対し不可逆的な影響をもたらすことが危惧され、また予期せぬ結果の恐れもあると指摘されている。そのため、本報告は「遺伝子ドライブによる遺伝子組み換え生物を自然環境に放つには、さらなる研究と評価が必要」⁸と結論している。補足だが、遺伝子ドライブによる不可逆的な影響を回避するための技術開発も進んでいる⁹。

共同議長は、ジェームズ・P・コリンズ（James P. Collins）とエリザベス・ハイトマン（Elizabeth Heitman）が務めている。コリンズは進化生態学の研究者（evolutionary ecologist）でアリゾナ州立大学教授であり、ハイトマンは科学・医療倫理の研究者でヴァンダービルト大学教授である¹⁰。

ゲノム編集とその関連技術の進展は、日本にとっても重要な課題であるため、本概要を公開する。¹¹本概要の構成は、本報告書の短報（Report in Brief）全訳ならびに短報収録の図と表、そして報告書本体の目次の翻訳である¹²。作成に際し、児玉聡氏（京都大学大学院文学研究科准教授）に貴重なコメントとアドバイスをいただいた。記して感謝したい。

2 短報（Report in Brief）全訳

遺伝子ドライブで改変された生物は、容易に解決できない課題への対処、たとえば昆虫媒介感染症の根絶や脅威と危険にさらされた種の保全などに、有望である。しかしながら、現時点のいくつかの実験室での研究における概念実証では、遺伝子ドライブで改変した生物を環境に解き放つ決断を支持するには不十分である。生物と生態系に不可逆的な効果を引き起こす遺伝子ドライブの潜在性は、リスクを評価するのに強力な（robust）方法を要求する。試験、ステークホルダーと社会（public）の関与、明快な規制監視における段階的方法は、新たな知識の増進を止めることなく、遺伝子ドライブ研究の、事前予防的で段階を追った（step-by-step）アプローチを可能にすることができる。

遺伝子ドライブは、有性生殖をつうじて、ある遺伝要素が、一つの生物からその子孫に継承される能力を強化するという、遺伝的形質を偏らせるシステムである。多様な遺伝子ドライブが自然で生じている。

研究者は 20 世紀をつうじて、これら自然のメカニズムを研究し続けたが、遺伝子編集の CRISPR/Cas^{1 3} の開発まで、遺伝子ドライブを生み出すことはできなかった。

2015 年初頭以来、実験室科学者 (laboratory scientists) は、CRISPR/Cas9 をベースにした遺伝子ドライブが、酵母菌、ミバエ、蚊の個体群のほぼ 100% に標的とした遺伝子を伝搬させるという、概念実証についての 4 本の論文を公刊した。生物学者は、遺伝子ドライブを用いて、解決策が制限されるかそもそも存在しない、公衆衛生、農業、環境保全、その他、多様な問題に対処することを提案している。

現時点での多くの研究は、人間に感染症を運ぶ蚊のような生物のコントロールや改変に焦点を当てている。

この領域の急激な動きは、有望でもあり懸念でもある。それゆえ、アメリカ国立衛生研究所 (NIH) とアメリカ国立衛生研究所財団 (FNIH) は、全米科学・工学・医学アカデミーズに対し、遺伝子ドライブに関する最新の知見と責任ある使用のための考慮事項を調査するための広範な専門家による委員会を招集するよう要請した。

人間の価値観の可視化 (Charting Human Values)

責任ある科学の問題の領域は、——研究をするべきかどうか、またなぜ、どのように研究をするべきか、から、遺伝子ドライブで改変した生物を環境に放出するべきかどうか、またいつ、どこで、そうするべきか、まで——は、全ての段階で人間の価値観に依存している。

生態系における人間の位置づけや自然に対する広範な関係性といったものへの視点は、遺伝子ドライブに関して生じつつある論争において、重要な役割を有している。たとえ研究者が遺伝子ドライブをつうじて感染症の伝播を減少させようと努力したとしても、野生の種を変化させ、おそらく撲滅する能力は、多くの人々にとって本質的に好ましくないものとなるだろう。種の絶滅にいきつくやり方での遺伝子ドライブ使用の提案は、特に慎重な審査が必要となる。

人間の福利と環境を保護するという広く共有されている責任は、遺伝子ドライブの研究や遺伝子ドライブ改変生物を解き放つことを制限する、公共政策のガイドラインを要求する。研究プロセスに対する事前予防的手段を統合することは、潜在的に摩擦を引き起こす諸責任のバランスを取る助けとなるだろう。

生態系と環境への考慮事項 (Ecological and Environmental Considerations)

遺伝子ドライブの分子生物学における研究は、遺伝子ドライブの効果や生物学的生態系的帰結を評価するうえで不可欠な領域である、集団遺伝学や生態系力学の研究を上回る速さである。遺伝子ドライブによる潜在的な (当該生物での) オフターゲットや (他の種や環境への) ノンターゲットへの効果を含めて、生物への生態系的・進化論的考慮事項とその生態系に関する知見の間に、著しいギャップが存在する

一般的に言えば、遺伝子ドライブは、自然の中核種 (keystone species) に不用意な危害を引き起こしかねないという、生態系への最大の脅威をもたらしかねないのであるが、遺伝子ドライブ改変生物が侵襲性の種をコントロールできるのであれば、生態系への潜在的効果は有益として判断されるかもしれない。特にノンターゲットの種にもたらすリスクという点で、意図せざる結果は考慮されるべきである。知見のギャップに対処するため、遺伝子ドライブ研究は、多様な研究領域における生命科学者ならびに社会科学者との協同を必要とする。

潜在的危害を低減する段階的試験と科学的アプローチ (Phased Testing and Scientific Approaches to Reducing Potential Harms)

遺伝子ドライブ改変生物の実地試験 (field testing) と環境への放出の前に、ターゲットとする生物、その環境との関係性、潜在的な意図せざる結果への詳細な知見の構築が不可欠である。また、意図せざる放出の潜在性を低減させる閉じ込めと封じ込めの戦略を考慮することが不可欠である。

遺伝子改変した蚊の試験について WHO が示したアウトラインのように、段階的試験の流れは、遺伝子ドライブ研究の段階を追った (step-by-step) アプローチを可能にする。そういった流れにおける各々の段階は、次の段階に進むべきかどうか、いつ次の段階に進むかを決定するチェックポイントを含めて注意深い研究と評価を促進し、また他の潜在的な段階における効果を伝達し把握するための重要なデータを提供することになる。

生態系リスクアセスメントの必要性 (the Need for Ecological Risk Assessments)

遺伝子ドライブ研究の文脈で、生態系リスク評価は必要とされる。生態系リスク評価は、代替戦術の間での比較を可能にし、関係する一般人を巻き込み、不確実性の原因を特定し、研究上の指示と新興の遺伝子ドライブ技術に対する公共政策上の指示をより適切に伝達するようになる。鍵となる二つの特長は、(1) 因果関係 (cause-and-effect) の流れを突き止める能力と、(2) 特定の結果をもたらす可能性を定量化する能力、である。アメリカ環境保護法によって要求される環境アセスメントと環境影響評価書 (environmental impact statements) は、他の文脈では有益なものとして広く認識されているが、遺伝子ドライブ改変生物のリスクを特徴づけるツールとしては不十分である。

関連する米国のガイドラインと技術資料は、遺伝子ドライブ技術の生態系リスク評価を指導するには、まだ十分ではない、というのも有毒な化学物質がもたらす人々や生態系へのリスクの評価に圧倒的に焦点を当てており、多様なストレス要因 (stressors) や終点、もしくは累積したリスクの評価を、まだ適切には取り扱えないからである。

コミュニティ、ステークホルダー、社会の関与 (Engaging Communities, Stakeholders, and Publics)

遺伝子ドライブを含めた諸活動の意志決定において、影響を受けるコミュニティや幅広い社会が関与することは重要であるとの幅広い合意がある。環境に遺伝子改変生物を放出するかどうかの決定についての科学的帰結と同様に、[一般の] 関与の結果は必須である。したがって、関与は後付けであってはならない。それは努力、配慮、資源、先進的な計画が必要である。

社会の関与と熟慮のためのメカニズムは、バイオテクノロジーを監視する多くの米国の官庁の中にすでに存在するが、どのように社会の関与を研究や政府に還元するかが一般に明確ではなく、またこの点でのベスト・プラクティスも欠如している。研究機関、資金拠出団体、規制団体を含めた諸機関を統制するために、遺伝子ドライブについての研究、生態系リスク評価、公共政策での決定に、どう社会の関与を組み入れていくのか、明確な政策とメカニズムを開発し維持していく必要がある。

遺伝子ドライブのガバナンス (Governance of Gene Drives)

研究のガバナンスは、研究者個人の責任からはじまり、専門職のガイドラインへと形成され、しばしば法的拘束力のある政策や強制力のある規制へと拡大される。しかしながら、これらのメカニズムの多くは、潜在的で、即時かつ長期の環境や公衆衛生への影響を識別するには不適切である、というのも管轄権が明確でなく、遺伝子ドライブの特性を識別するという難題にさらされるか、社会の関与に不十分な仕組みが提供されているからである。

---研究者の責任と専門職のガイドライン (Investigator Responsibility and Professional Guidelines)

近年、研究機関、資金拠出団体、専門学会は、一致協力して研究におけるプロフェッショナルなベストプラクティスを励行している。研究者、研究機関、専門学会は、遺伝子ドライブ研究における責任ある科学の教育と訓練を維持し提供する責任を有している。

---連邦のガイドライン (Federal Guidelines)

NIH の拠出による実験室ベースの研究は、バイオセーフティーに関する NIH のガイドラインと研究機関バイオセーフティー委員会 (Institutional Biosafety Committees : IBCs) の監視に統制される。実験室研

究に対する衛星と環境保護のための強力なシステムの導入から数十年たつにもかかわらず、IBCs はいまだ遺伝子ドライブのバイオセーフティーを効果的に評価する専門家も資源も有していない。

---連邦の規制 (Federal Regulations)

米国において、遺伝子ドライブ改変生物は、米国食品医薬品局、米国農務省、米国環境保護庁を含む米国「バイオテクノロジー規制の調和的枠組み (Coordinated Framework for the Regulation of Biotechnology)」の規制の下に入ることとなるだろう。しかしながら、遺伝子ドライブ改変生物と使用されるコンテキストの潜在的な多様性は、多くの規制のオーバーラップとギャップをさらけ出すことになる。「バイオテクノロジー規制の調和的枠組み」に現状では含まれていないが関連する諸機関の役割を含めて、遺伝子ドライブ改変生物の実地での放出に関する規制の責任の割り当てを、米国政府は明確にする必要がある。

画一的なアプローチは適切ではないと述べておくことは重要である。研究活動の各段階（研究計画の作成から放出後の監視まで）は、改変生物や開発された遺伝子ドライブのタイプによって、様々なレベルの懸念が持ち上がるだろう。遺伝子ドライブ研究のガバナンスと規制は、特定の活動によってもたらされる危険 (hazards) に比例したものであるべきで、ケースバイケースで評価されるべきである。遺伝子ドライブに関連する不確実性が存在するため、実験室とフィールドスタディーズにおいては、遺伝子ドライブの潜在的な危害と利益が責任をもって探究されるよう、規制は、基礎的、応用的、および基礎から応用への橋渡しの研究を促進するものである必要がある。

---潜在的なデュアルユース問題 (Potential dual use issues)

遺伝子ドライブ研究はまた、バイオセーフティー、バイオセキュリティ、技術の潜在的なデュアルユース（例えばミスユース）といった懸念ももたらす。科学コミュニティは、政策立案者とともに遺伝子ドライブ改変生物の意図的・非意図的なミスユースに対抗するセーフガードを見分けるとともにベストプラクティスを促進する義務を有している。

---国際連携の必要性 (Need for international coordination)

責任あるガバナンスは、明確に定義されたグローバルな規制のフレームワーク、政策、実行のためのベストプラクティスの標準とともに、国際的かつ包摂的であるべきである。遺伝子ドライブ改変生物が放出されるかもしれない低所得国と中所得国は、ガバナンスも含めて考慮されるべきである。

最近の実践では、WHO のような国際機関や、教育研究コミュニティ自身によって作成されたガイドラインのもと、遺伝子改変した蚊に関するおびただしい数のフィールド研究が行われている。これらの標準は、遺伝子ドライブ改変生物のガイドライン構築においても、有益な土台を提供するべきである。

将来の連携と協同 (Future Coordination and Collaboration)

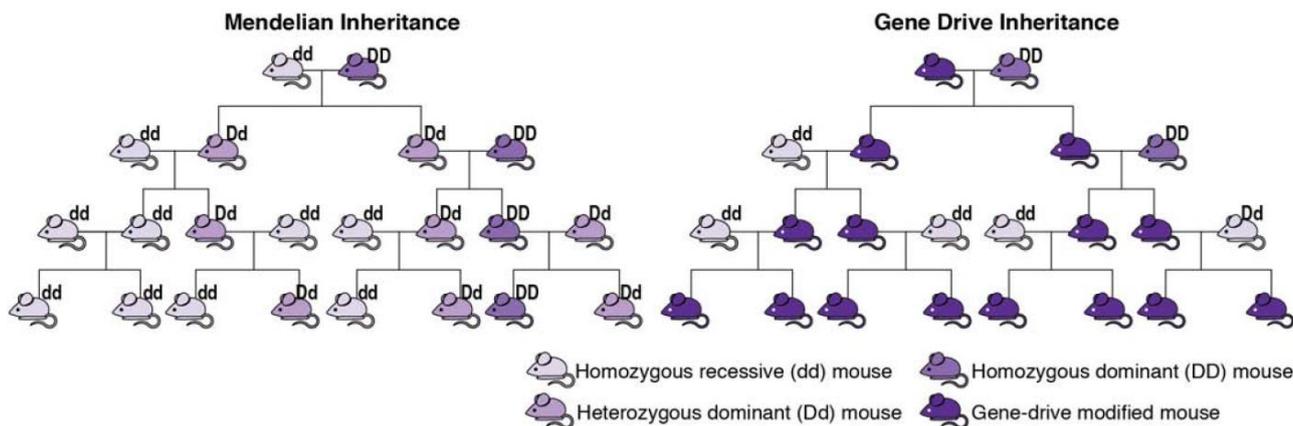
遺伝子ドライブ改変生物の環境への放出を支持する、現時点で使用できるエビデンスは不十分ではあるとしても、遺伝子ドライブの基礎研究と応用研究によってもたらされうる利益は有意義であり、実験室研究と高度にコントロールされたフィールド知見を継続することを正当化する。

本報告書は、遺伝子ドライブ研究の資金拠出者が、遺伝子ドライブの分子生物学についての知見のみならず、人工遺伝学、進化生物学、生態系ダイナミクス、生態系リスク評価や社会の関与といった、遺伝子ドライブの責任ある発展と応用に不可欠な、基礎研究と応用研究の領域における知見との、ギャップを低減するように連携、そしてもし可能であれば協同することを、推奨する。本報告書はまた遺伝子ドライブ研究の資金拠出者が、遺伝子ドライブのデータと遺伝子ドライブ研究の標準手続 (SOP) についてのオープンアクセスかつオンラインのリポジトリを構築することを推奨する。

科学的要素や技術的要素を含めたフィールド試験をおこなうサイトの選定における考慮事項は、影響を被る一般の関係する人々の価値観、ローカル、地域的、国家的ガバナンス組織の能力、ローカルコミュニティに関与する研究者の能力。サイトの選定にあたっては、遺伝子ドライブの安全な調査と遺伝子ドライブ改変生物の安全な開発を実行し監視できる、すでに科学的能力とガバナンスのフレームワークを持つ諸国にある場所が、選好（preference）されるべきである。

3 理想化されたメンデル性遺伝と遺伝子ドライブの遺伝のイラスト (An Idealized Illustration of Mendelian Inheritance versus Gene Drive Inheritance)

遺伝子ドライブの特徴を説明するため、本文中で言及される図 1 を、解説の邦訳とともに下記に示す。



遺伝子ドライブは、1866年に修道士グレゴール・メンデル（Gregor Mendel）によって最初に発見された遺伝の一般規則（the conventional rules）の例外として説明されることが多い。メンデル性遺伝（左）の下では、子孫は平均して遺伝子を継承する機会が50%ある（dまたはD）。遺伝子ドライブ（右）では、子孫はほとんど常に標的とされた遺伝要素（濃紫色）を受け取り、最終的な帰結は特定の遺伝子型の優先的な増加となる。この理想化された例では、標的とされた遺伝要素は集団の100%に最終的に顕在化するが、常にそうなるとは限らない。

4 遺伝子ドライブ研究の潜在的応用 (Table 1 Potential Applications for Gene Drive Research)

本体ならびに短報で示された遺伝子ドライブ研究の具体的な応用（表1）について下記に翻訳する。

●公衆衛生 (Public Health)

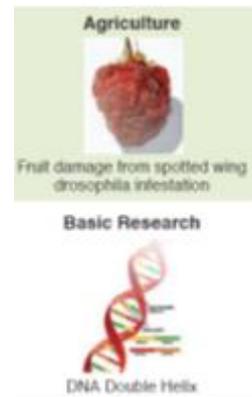
- ・ Dengue熱、マラリア、シャーガス病、ライム病のような、人間に影響する感染症を媒介する生物のコントロールもしくは改変
- ・ 住血吸虫症 (Schistosomiasis) のような、感染もしくは疾患を直接引き起こす生物のコントロールもしくは改変
- ・ コウモリやげっ歯類 (rodents) のような、疾病の保菌動物 (reservoirs of disease) として機能する生物のコントロールもしくは改変

●生態系保全 (Ecosystem Conservation)

- ・ 他の種の生存を脅かす感染症を運搬する生物のコントロールもしくは改変
- ・ 在来の生態系や生物多様性を脅かす外来種 (invasive species) の撲滅 (eliminate)
- ・ 絶滅危惧、絶滅のおそれのある生物の改変¹⁴



- **農業 (Agriculture)** : オウトウショウジョウバエ繁殖による果実類への害
 - ・ 作物を害したり病気を伝播したりする生物のコントロールもしくは改変
 - ・ 耕作での農業と競合する雑草の撲滅



- **基礎研究 (Basic Research)** : DNA 二重らせん
 - ・ 遺伝子ドライブの機能や効果、種生物学、疾病のメカニズムなどの研究の一部としての、モデル生物の改変

5 報告書本体の目次

要約 (Summary)

1 イントロダクション (Introduction)

研究の目的 (Purpose of the Study)

遺伝子ドライブとは何か? どのように使用できるのか? (What Are Gene Drives? And, How Could They Be Used?)

ケース・スタディ (Case Studies)

重要な定義と概念 (Key Definitions and Concepts)

結論 (Conclusions)

リファレンス (References)

2 遺伝子改変生物についての分子生物学、集団遺伝学、生態学の知見の現状 (The State of Knowledge of the Molecular Biology, Population Genetics, and Ecology of Gene-Drive Modified Organisms)

利己的遺伝因子とドライブ・メカニズム (Selfish Genetic Elements and Their Drive Mechanisms)

クリスパーキャス 9 に基づく遺伝子ドライブ (CRISPR/Cas9-Based Gene Drives)

個体群生態学と生態系への考慮事項 (Population Ecology and Ecosystem Considerations)

結論 (Conclusions)

リファレンス (References)

3 遺伝子改変生物の問題を検討するためのケーススタディ (Case Studies to Examine Questions about Gene-Drive Modified Organisms)

遺伝子ドライブ改変生物の進歩の基本的な基準 (Basic Criteria for the Development of Gene-Drive Modified Organisms)

ケーススタディ 1: デング熱を操作するためのネッタイシマカとヒトスジシマカの使用 (Case Study 1: Using Aedes Aegypti and Aedes Albopictus Mosquitoes to Manage Dengue)

ケーススタディ 2: ヒトマラリアと戦うためのガンビエハマダラカの使用 (Case Study 2: Using Anopheles Gambiae Mosquitoes to Combat Human Malaria)

ケーススタディ 3: ハワイにおける鳥マラリアと戦うためのネッタイイエカの使用 (Case Study 3: Using Culex Quinquefasciatus Mosquitoes to Combat Avian Malaria in Hawaii)

ケーススタディ 4: 島々における生物多様性保護のための外来のハツカネズミの個体数のコントロール (Case Study 4: Controlling Populations of Non-Indigenous Mus Musculus Mice to Protect Biodiversity on Islands)

ケーススタディ 5: 放牧地と森林の生物多様性保護のための外来のヤグルマギク (ケンタウレア・マキユロザ) のコントロール (Case Study 5: Controlling Non-Indigenous Centaurea Maculosa Knapweeds to Protect Biodiversity in Rangelands and Forests)

ケーススタディ 6：農業生産性の向上のためのオオホナガアオゲイトウ（パルマーアマランス；ブタクサ）のコントロール（Case Study 6: Controlling Palmer Amaranth to Increase Agriculture Productivity）

ケーススタディ 7：ゼブラフィッシュを使用した遺伝子ドライブ研究のための脊椎動物のモデルの開発（Case Study 7: Developing a Vertebrate Model for Gene Drive Research Using Zebrafish）

リファレンス（References）

4 人間の価値観を可視化する（Charting Human Values）

遺伝子工学についての議論における中心的価値観の考慮事項（Central Value Considerations in Debates About Genetic Engineering）

遺伝子ドライブの人間への潜在的利益（Potential Human Benefits of Gene Drives）

遺伝子ドライブの人間への潜在的害（Potential Human Harms of Gene Drives）

環境への潜在的な影響に関連した価値観（Values Relevant to Potential Environmental Effects）

公正への懸念（Concerns About Justice）

結論（Conclusions）

リファレンス（References）

5 潜在的害を低減する段階的試験と科学的アプローチ（Phased Testing and Scientific Approaches to Reducing Potential Harms of Gene Drives）

段階的試験の流れ（The Phased Testing Pathway）

閉じ込め、封じ込め、緩和戦略（Containment, Confinement, and Mitigation Strategies）

他の種類における改変生物のフィールド研究とバイオコントロールの企図からの知見（Learning from Field Research and Biocontrol Efforts with Other Types of Modified Organisms）

結論と推奨（Conclusions and Recommendations）

リファレンス（References）

6 遺伝子ドライブ改変生物のリスク評価（Assessing Risks of Gene-Drive Modified Organisms）

リスクとは何か？（What Is Risk?）

環境インパクト評価対リスク評価（Assessing Environmental Impacts Versus Assessing Risks）

遺伝子ドライブ改変生物の生態系リスク評価への主要な考慮事項（Key Considerations for Ecological Risk Assessments of Gene-Drive Modified Organisms）

原因-結果の概念的モデル（A Conceptual Cause-Effect Model）

2 つのケーススタディを用いた原因-結果の概念的モデルの説明（Illustrating a Conceptual Cause-Effect Model Using Two Case Studies）

結論と推奨（Conclusions and Recommendations）

リファレンス（References）

7 コミュニティ、ステークホルダー、社会への関与（Engaging Communities, stakeholders, and Publics）

コミュニティ、ステークホルダー、社会（Communities, Stakeholders, and Publics）

関与へのモチベーション（Motivations for Engagement）

関与への課題（Challenges of Engagement）

関与に導くフレームワーク（Frameworks to Guide Engagement）

Conclusions and Recommendations

リファレンス（References）

8 遺伝子ドライブ研究と応用のガバナンス（Governing Gene Drive Research and Applications）

ガバナンスとは何か? (What Is Governance?)

遺伝子ドライブのガバナンスへの主要な考慮事項 (Key Considerations for Governing Gene Drives)

米国における遺伝子ドライブ研究と応用に関連するガバナンスのフレームワーク (Relevant Governance Frameworks for Gene Drive Research and Applications in the United States)

バイオセキュリティへの考慮事項 (Biosecurity Considerations)

グローバルな文脈における遺伝子ドライブのガバナンス (Governance of Gene Drives in Global Contexts)

結論と推奨 (Conclusions and Recommendations)

リファレンス (References)

9 包括的な考慮 (Gene Drives on the Horizon: Overarching Considerations)

用語集 (Glossary)

略語 (Acronyms)

付録 (Appendixes)

¹ 報告書の本体、概要、プレスリリースは、下記を参照されたい。

<https://www.nap.edu/catalog/23405/gene-drives-on-the-horizon-advancing-science-navigating-uncertainty-and>

² 全米科学・工学・医学アカデミーズ (NASEM) は、全米科学アカデミー (The National Academy of Science (NAS))、The、全米工学アカデミー (The National Academy of Engineering (NAE))、全米医学アカデミー (The National Academy of Medicine (The Institute of Medicine (IOM) を 2015 年に改組)) の 3 組織からなり、さらにその主要管理機関として全米研究評議会 (National Research Council (NRC)) が位置する。組織の詳細については下記の JST の資料を参照。 <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2007/FU/US20071001.pdf>

なお、日本語文献で、この NASEM の訳語は、表記ゆれが存在する。例えば Wikipedia では「全米アカデミーズ」の訳語も使い、JST は過去に「ナショナルアカデミーズ」の訳語を用いている。ごく最近では、日本学術会議が NASEM について「全米科学アカデミー」の訳語を用いているが、これは NAS との混同の恐れがあると思われる (<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-t251-1.pdf> 参照)。

³ なお正確には、この報告書を出した委員会の正式名称は、下記のとおりである。「人間以外の生物における遺伝子ドライブ研究に関する委員会：責任ある行為への勧告、生命倫理会議、地球と生命学分科会、全米科学・工学・医学アカデミーズ (Committee on Gene Drive Research in Non-Human Organisms: Recommendations for Responsible Conduct; Board on Life Sciences; Division on Earth and Life Studies; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine)」

⁴ 同上の JST の資料を参照。

⁵ NIH (the National Institutes of Health) と FNIH (Foundation for the National Institutes of Health) の諮問事項 (報告書本体、p.13)

(1) 科学の現状と、遺伝子ドライブを組み込んだ生物を開発し使用することで潜在的に生じる意図せざる危害を低減するアプローチ、の評価

(2) 遺伝子ドライブの自然界放出 (field release) に伴う倫理的、法的、社会的考慮事項の検討

(3) 遺伝子ドライブ使用による環境ならびに公衆衛生への影響を評価する既存のガバナンスメカニズムとリスク評価ガイドラインの適切さの判定

なお、諮問事項の詳細については、報告書本体 pp.16-17 または、本研究の Statement of Task (<http://nas-sites.org/gene-drives/2015/08/04/about-the-study/>) を参照のこと。

本報告を受けた動きだが、NIH の所長である F・S・コリンズ (Francis S. Collins、遺伝学者) は、報告書刊行日に Statement on the National Academy of Sciences Report on Gene Drives in Non-Human Organisms を発表して報告書の方向性を承認し、特に「遺伝子ドライブに関する意思決定についてのステークホルダーの関与が必要だ」と強く支持している。

<https://www.nih.gov/about-nih/who-we-are/nih-director/statements/statement-national-academy-sciences-report-gene-drives-non-human-organisms>

⁶ 2017 年 9 月、日本遺伝学会は「遺伝学用語改訂について」を示し、従来の「優性/劣性」の用語を「顕性/潜性」への改訂を示している。なおこの変更を含む用語の改訂は、2017 年 9 月刊行の『遺伝単 ~遺伝学用語集 対訳集つき~ (生命の科学遺伝別冊)』で示されている。<http://gsj3.jp/revisionterm.html> 参照。

⁷ Heidi Ledford & Ewen Callaway (2016) 「遺伝子ドライブでマラリアと闘う」、Nature ダイジェスト Vol. 13 No. 2

⁸ JST デイリーウォッチャー、<http://crds.jst.go.jp/dw/20160825/201608259515/>

⁹ 遺伝子ドライブの安全対策についての基本的な方向性は、ハーヴァード大学ヴィース研究所 (Wyss institute) の下記 HP を参照、<https://wyss.harvard.edu/gene-drive-reversibility-introduces-new-layer-of-biosafety/>。また最近の動きについては、JST の下記記事も参照。DARPA 「遺伝子編集研究の安全な道筋」

(Setting a Safe Course for Gene Editing Research)、JST デイリーウォッチャー、<http://crds.jst.go.jp/dw/20161021/201610219872/>。「遺伝子編集技術に関する Safe Genes プログラムの開始」(Building the Safe Genes Toolkit) JST デイリーウォッチャー、<http://crds.jst.go.jp/dw/20170914/2017091412383/>。

¹⁰ ジェームズ・コリンズの専門は、生物多様性、科学史、環境倫理、進化、保全、エコロジーであり、現在の研究トピックは、宿主病原体相互作用 (host-pathogen interaction) や個体群動態論 (population dynamics) などである。編著に James P. Collins and Martha L. Crump. Extinction in Our Times. Global Amphibian Decline. (2009).Oxford University Press などがある。

エリザベス・ハイトマン (Elizabeth Heitman) の専門は、臨床医療、生体医学、公衆衛生における倫理やその文化的側面である。主要著作に The Ethical Dimensions of the Biological and Health Sciences 2nd Edition by Ruth Ellen Bulger (Editor), Elizabeth Heitman (Editor), Stanley Joel Reiser (Editor), Cambridge University Press; 2 edition (June 24, 2002) などがある。

委員会メンバーとその専門を列挙する。Nicole L. Achee : 昆虫学者、Vicki Chandler : 育種学、Jason A. Delbornests : 環境政策、Brandon S. Gaut : 進化遺伝学、Stephen Higgs : 節足動物によるウイルス媒介、Gregory E. Kaebnick : 価値観とバイオテクノロジー、Ann Kingiri : バイオセーフティ、Wayne Landis : 生態系リスク評価・環境毒性学 (Environmental Toxicology)、Lynn Riddiford : 昆虫の脱皮と変態、Joyce Tait : 合成生物学・遺伝子組み換え技術、Lisa A. Taneyhill : 分子生物学や生化学の技術を利用した神経堤形成 (neural crest formation)、Joseph Travis : 自然選択のエコロジー (the ecology of natural selection)、Paul E. Turner Molecular : 分子ウイルス学 (Virology)、David E. Winickoff : 環境法、環境政策である。また委員会には、6 人のプロジェクトスタッフがクレジットされている。

なお、委員とは別に、報告書は 14 人の査読者によるレビューを受けている。

活動期間については明示されていないが、公開されているウェビナー (WEB 会議) の情報は、2015 年 11 月 2 日から 2016 年 1 月 5 日であり、公開は 2016 年 6 月のため、一年未満の活動ではなかったかと推察する。

¹¹日本においても、全国大学等遺伝子研究支援施設連絡協議会（大学遺伝子協）は、Gene Drive に関するワーキンググループを設置し、「Gene Drive の詳細な取り扱いについて議論」を行っており、2017年9月20日の「Gene Drive の取り扱いに関する声明」で下記のとおり通知している。

1. Gene Drive に関する情報を機関内に周知すること。
2. Gene Drive を用いた遺伝子組換え実験計画の有無を把握すること。
3. 適切な拡散防止措置が執られていることを確認すること。

(http://www1a.biglobe.ne.jp/iden-kyo/upfile/GeneDrive_JPN_20170920.pdf)

¹² 頻出する用語にのみ言及するが、organisms は生物、modify と alter はともに改変と訳した。

¹³ いわゆる CRISPR-Cas9 (Clustered regularly-interspaced short palindromic repeats, CRISPR associated protein 9) の浸透が、特定遺伝子を顕性遺伝させる遺伝子ドライブの実現に寄与した。この CRISPR-CAS9 を用いて、2015年初頭にジョージ・チャーチ (George Church) 率いる研究チームが、初めて遺伝子ドライブを生み出したといわれる (報告書本体、p.13)。

¹⁴ IUCN (国際自然保護連合) のレッドリストでは endangered species を包摂する形で threatened が使用されているため、本稿では、米国の「絶滅の危機に瀕する種の保存に関する法律」に関する米国海洋大気庁 (NOAA) HP での、threatened と endangered の使い分けを参考に、訳語を分けた。

<https://oceanservice.noaa.gov/facts/endangered.html>