

日立財団倉田奨励金人文・社会科学研究部門シンポジウム

『科学技術社会における人文・社会科学的アプローチの重要性』

「遺伝子ドライブの倫理的・法的・社会的課題に関する環境衛生倫理学的考察」

藤木篤 (神戸市看護大学)

2023年3月18日(土) 13:30-15:30 @ コモレ四谷タワーコンファレンス Studio & Lounge

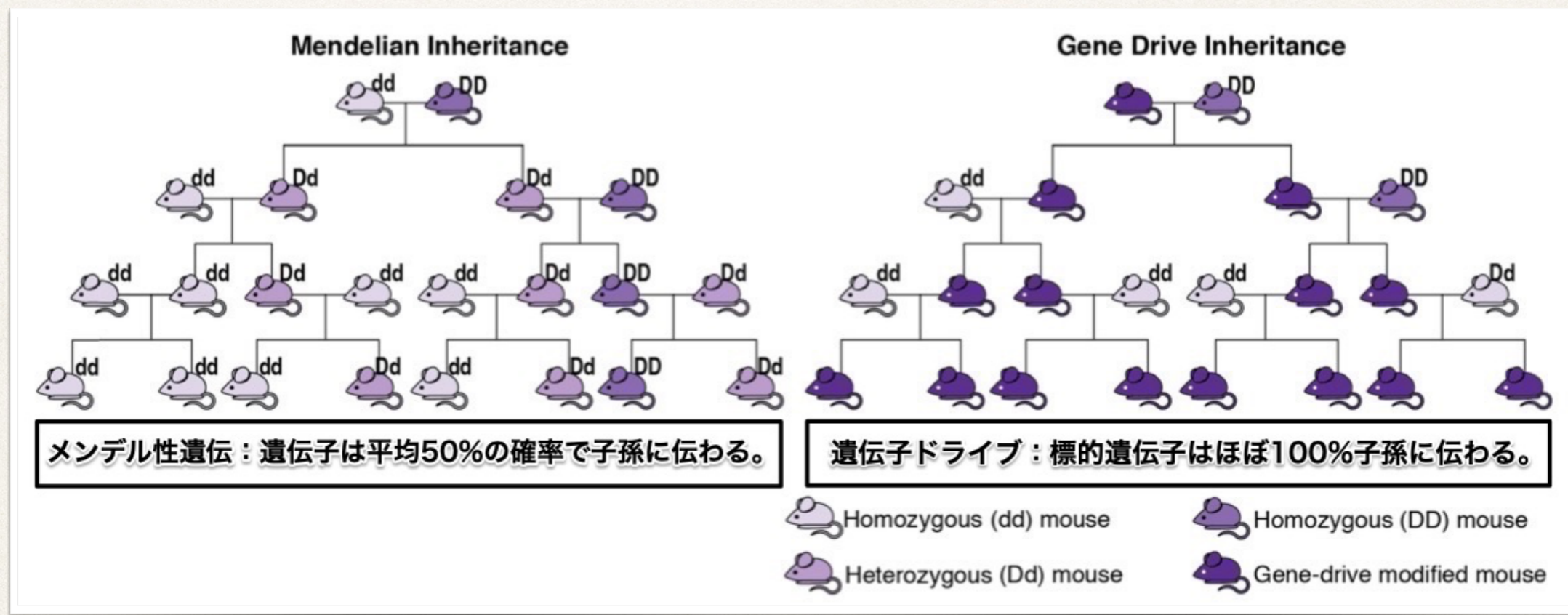
“遺伝子(ジーン)ドライブでこれまで人間に許されなかったことが可能になります。進化の操作です。これにより私たちの自然への介入はまったく異なるレベルに達しました。”

– Dr. Fern Wickson (Research Professor of Environmental Governance, Norway) in *Gene Drive Film*

本研究の目的

- ❖ 本研究は、遺伝子ドライブの倫理的・法的・社会的課題を明らかにした上で、環境保全と公衆衛生の双方に配慮した有害生物管理を実現する際の同技術の有効性と限界について検討することを目的とする。

遺伝子ドライブとは



図の出典：NASEM 2016, Figure 1. (発表者により一部改変)

- ❖ 「特定の遺伝因子を生物種集団内に優先的に拡散させる現象またはその技術の総称」[全国大学等遺伝子研究支援施設連絡協議会 2017 (※現 遺伝子研究安全管理協議会 (令和4年4月1日に名称変更))]
- ❖ 「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」[NASEM 2016; 大庭 2018]

遺伝子ドライブの登場

- * 遺伝子ドライブは、不妊虫放飼法のひとつのヴァリエーションとして登場した。[Macias *et al.* 2017]
- * 背景には「ゲノム編集技術を用いて農業害虫や衛生害虫の特徴を改変するような遺伝子操作を加えることで、害虫が引き起こす様々な問題を解消できないか」という意識がある。[丹羽 2016]
- * ゲノム編集技術の手法を巧みに組み合わせることによって、遺伝子ドライブを容易に引き起こせるという可能性は、まずキイロショウジョウバエにおいて実証され[Gantz & Bier 2015]、さらにはマラリア媒介虫であるハマダラカにおいても同様の事象が生じることも実証された[Gantz *et al.* 2015]。(cf. [丹羽 2016]) こうして、マラリア原虫への耐性を備えたハマダラカが実験室内で産み出された。[小林 2016]
- * ただし遺伝子ドライブの安全性を巡って、現在でも多くの議論がある。[e.g. Ledford 2015]

不妊虫放飼法

- ❖ 不妊虫放飼法(sterile insect release method または sterile insect technique; SIT)とは、対象害虫を大量増殖し、それらを「不妊化」して対象地域に放飼し、野生メスの産む卵を孵化できなくして、次世代個体数を減らす技術である。
- ❖ 不妊化にはほぼすべての場合、放射線照射が用いられる。
- ❖ 薬剤抵抗性の発現を促す殺虫剤の長期使用や、害虫の減少が餌不足による天敵の減少をもたらさざるをえない天敵連続放飼と違って、害虫減少が抑圧速度を加速する唯一の技術として、(大量増殖施設の建設費などの大きなコストを別にすれば)侵入害虫などの根絶に最も適した技術である。[傍点は発表者による。以下同様]

→遺伝子ドライブは、不妊虫放飼法のヴァリエーションのひとつと見なされる。

(cf. [Macias *et al.*, 2017])

沖縄のウリミバエ根絶事業

- * 沖縄、奄美、小笠原にはミバエという果実・野菜を食い荒らす害虫がいたため、防疫のため出荷ができなかった。
- * 放射線を用いて、繁殖能力を持たないオスの成虫を大量に飼育、累計530億匹を野に放つことによって根絶を成し遂げた。→「もう一つの沖縄戦」
[小林, 1999 p.12]
- * 1993年、沖縄の農産物の本土出荷が認められた。
→考え方によっては、経済的利益のために特定種を絶滅させたことに。
- * 農薬は一切使用せず。またミバエ類は外来種であり、本来は現地に存在しなかった種である。地球上からいなくなったわけでもない。

小林重郎『530億匹の闘い - ウリミバエ根絶の歴史』、築地書館、1994年

小林照幸『害虫殲滅工場 - ミバエ根絶に勝利した沖縄の奇蹟』、中央公論新社、1999年

第一回原子力歴史構築賞

「コバルト60ガンマ線を利用したウリミバエの根絶」

❖ コバルト60のガンマ線を利用した不妊虫放飼法

沖縄県では、ウリミバエを根絶するためにコバルト60のガンマ線を利用した不妊虫放飼法を採用した。

❖ ウリミバエの根絶防除事業

久米島において、コバルト60を利用した不妊虫放飼法によるウリミバエ根絶実験防除を1972年に開始し、1978年に根絶を達成した。

久米島での根絶の成果を基に、沖縄県全域からウリミバエを根絶する計画を立て、週2億頭規模の不妊虫大量増殖施設を建設した。

宮古群島で1984年から、沖縄群島で1986年から、八重山群島で1990年から不妊虫放飼を開始し、1993年10月に沖縄県全域でのウリミバエ根絶を達成した。

第1回（平成20年度）「原子力歴史構築賞」受賞内容紹介 | 日本原子力学会

http://www.aesj.net/activity/activity_awards/1st-kouchikusyo

コバルト60ガンマ線を利用したウリミバエの根絶

Eradication of the Melon Fly by the use of Cobalt-60 Gamma-rays

沖縄県病害虫防除技術センター



▲沖縄県病害虫防除技術センターの全景



▲ウリミバエの成虫

Point

ウリミバエの不妊化にコバルト60を利用
日本で初めて不妊虫放飼法によりウリミバエを根絶
沖縄県全域からのウリミバエ根絶によるウリ類等の出荷拡大

受賞後の声

ウリミバエの根絶は、国、県、市町村、農協、委託業務団体、大学等、多くの関係者の協力によって達成した事業である。今回の受賞に際し、関係者の皆様に改めて感謝の意を表するとともに、ウリミバエ根絶防除事業を評価して下さった日本原子力学会に深く感謝申し上げます。

“遺伝子ドライブは、病気の蔓延を防ぎ、昆虫や雑草の農薬や除草剤への抵抗性を減じることで農業を支援し、有害な外来種を制御できる可能性があります。”

– Esvelt, Kevin M., et al. "Concerning RNA-guided gene drives for the alteration of wild populations." *Elife* 3 (2014): e03401.

遺伝子ドライブでマラリアと闘う

- * マラリア原虫に対する耐性遺伝子を持つ蚊をマラリアに苦しむ地域に迅速に広めることができれば、この感染症を永久に根絶できる可能性がある。このほど、遺伝子ドライブでそれが実現でき得ることが示された。
- * これまでの研究から、体内に熱帯熱マラリア原虫が寄生しても、その増殖と伝播を阻止することのできる遺伝子が組み込まれた蚊が報告されているが、このような耐性遺伝子を野生型の蚊集団に迅速に広める方法がなかったのである。
- * MITの政治学者 Kenneth Oyeは、「遺伝子ドライブを用いた野生型の集団の改変などの技術的進歩に、規制や政策議論が追いついていない」と言う([Oye *et al.* 2014])。遺伝子ドライブは全生態系を変化させ得る力を持つと考えられるため、論議が必要な技術なのだ。→cf. 科学技術社会論学会第21回年次研究大会 (2022年度) オーガナイズドセッション「遺伝子ドライブを巡るELSIとDURC」吉良報告

マラリアの現状

- ❖ 毎年、40万人以上の入々がマラリアで亡くなっています。マラリアは予防可能で治療もできる病気です。死者の3分の2は、5歳以下の子どもたちと推定されています。[WHO, 2020]
- ❖ 2019年の死亡者の94%はWHOアフリカ地域であったと推定されています。[CDC]
- ❖ *World Malaria Report 2020*では、過去20年間のマラリアへの世界的な対応を形成した主要な出来事やマイルストーンを振り返ります。この期間は、15億件の感染と760万人の死亡を回避するという、マラリア対策において前例のない成功を収めた時期です。[WHO, 2020]

World Malaria Report 2020

<https://www.who.int/teams/global-malaria-programme/reports/world-malaria-report-2020>

CDC - Malaria - Malaria Worldwide - Impact of Malaria

https://www.cdc.gov/malaria/malaria_worldwide/impact.html

WORLD MALARIA REPORT 2020



YEARS OF GLOBAL PROGRESS & CHALLENGES



Over the last 2 decades, malaria-affected countries have achieved remarkable success, but the fight is not over

7.6
MILLION

lives saved globally since 2000

94% of them in Africa



World Health Organization

#EndMalaria

AFRICA CONTINUES TO CARRY THE HIGHEST BURDEN OF MALARIA GLOBALLY

In 2019, Africa had:

94%

of the world's **malaria cases & deaths**



World Health Organization

#EndMalaria

NEW MALARIA-FIGHTING TOOLS
are critical to accelerate progress



World Health Organization

#EndMalaria

Article

Bill Gates endorses genetically modified mosquitoes to combat malaria



- * "Gene drives, I do think, over the next three to five years will be developed in a form that will be extremely beneficial."
- * "Of course, that makes it a key tool to reduce malaria deaths."

Bill Gates endorses genetically modified mosquitoes to combat malaria - The Verge (Jun 17, 2016)
<https://www.theverge.com/2016/6/17/11965176/bill-gates-genetically-modified-mosquito-malaria-crispr>

"The Outreach Network for Gene Drive Research"



- * "The Outreach Network for Gene Drive Research"の目的は、公共の利益 the public good のために遺伝子ドライブ研究の価値に関して関心を高めることです。[中略] このネットワークの中核となる活動は、ビル・アンド・メリンダ・ゲイツ財団の支援を受けています。

A secret weapon against Zika and other mosquito-borne diseases



"[B]iological control of harmful insects can be both more effective and very much more environmentally friendly than using insecticides, which are toxic chemicals. That was true in Rachel Carson's time; it's true today."

遺伝子編集によるネズミの根絶：自然保護か虐殺か？

- ＊ 「遺伝子ドライブ」テクノロジー（DNAの継承に偏りを生じさせ、世代を重ねるごとに野生動物の遺伝子を改変し、種ごと絶滅させられるほど非常に強力な手法）は従来、昆虫と酵母菌で実証されたただけだった。
- ＊ アメリカでは、ネズミを対象にした実証実験が開始されたという。改変された遺伝子を持つネズミを自然界の母集団へ放つと、改変された遺伝子が拡散し、種ごと形質を変えたり、絶命させたりできる。
- ＊ 環境保護団体 Island Conservationは、遺伝子ドライブによる「daughterless（≒メスを生まない）」ネズミ、つまりオスだけを生む種を作り出す研究を進めている。
- ＊ 遺伝子編集でメスのネズミを根絶する「ミッキーしかいない世界」は、固有種を外来種から守る自然保護といえるのだろうか。それとも自然保護の名を借りた根絶計画に過ぎないのだろうか。

MIT Tech Review: 遺伝子ドライブによるネズミの根絶は、自然保護といえるのか？

世界初、遺伝子改変でマウスを根絶する試み

- * オーストラリアで、「t-CRISPR法」と呼ばれる遺伝子編集技術を用いて、メスを不妊化させることにより、(侵略的外来種としての)ハツカネズミの根絶を計ろうとする計画がある。この度、屋内での実験が実行に移されたという(屋外での野外実験は未実施)。
[COSMOS 2022]
- * いわば遺伝子編集技術を応用した「不妊"獣"放飼法」と言えるかもしれない。
- * 「今回の成果は、侵略的マウスの抑制を目的とした遺伝子ドライブの開発に向けて大きな一歩を踏み出したといえます。」 [Gierus *et al.* 2022, significance]

World first trial to eradicate mice with gene modification | COSMOS [November 10, 2022]

<https://cosmosmagazine.com/nature/gene-trial-to-eradicate-mice/>

A new gene drive tool could help solve the challenge of invasive mice

<https://genedrivenetwork.org/blog/261-a-new-gene-drive-tool-could-help-solve-the-challenge-of-invasive-mice>

Gierus, L., Birand, A., Bunting, M. D., Godahewa, G. I., Piltz, S. G., Oh, K. P., ... & Thomas, P. Q. (2022). Leveraging a natural murine meiotic drive to suppress invasive populations. *bioRxiv*.

<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2213308119>

遺伝子編集技術で外来種のネズミを根絶する世界初の試み。メスを不妊に _カラパイア

<https://karapaia.com/archives/52317677.html>

遺伝子ドライブで外来種駆除は生態系破壊の恐れ

- ❖ 遺伝子ドライブには危険が伴う。この手法が制御不能になり、予定よりも広い範囲で、意図していなかった方法で生態系全体を変えてしまう事態も、想像に難くない。事実、遺伝子ドライブの先駆者のひとりであるMITのケビン・エスベルトは、数年前から安全性に対する懸念を表明している。
- ❖ 2017年11月16日付でPLOS ONE上で発表された論文によれば、より強固な安全対策を設けない限り、編集された遺伝子は、侵入生物がいない地域にまで広がってしまうという。エスベルトらは、「遺伝子ドライブは、最終的には新しい非常に侵襲的な種を作り出すのと同じことだ」 [Esvelt & Gemmell 2017, p.3]と主張している。
- ❖ エスベルトらは、制御不能にならないように遺伝子ドライブを微調整することは可能だと指摘する。だが、実際に使えるほどに成熟したアイデアはまだないのが現状。そうしたアイデアが登場するまでは、遺伝子操作された動物や昆虫を大量に野に放つのを延期した方が賢明かもしれない。「性急にことを運ぶのに伴う代償としては、あまりにも大きすぎます」とエスベルトらは結論づける。

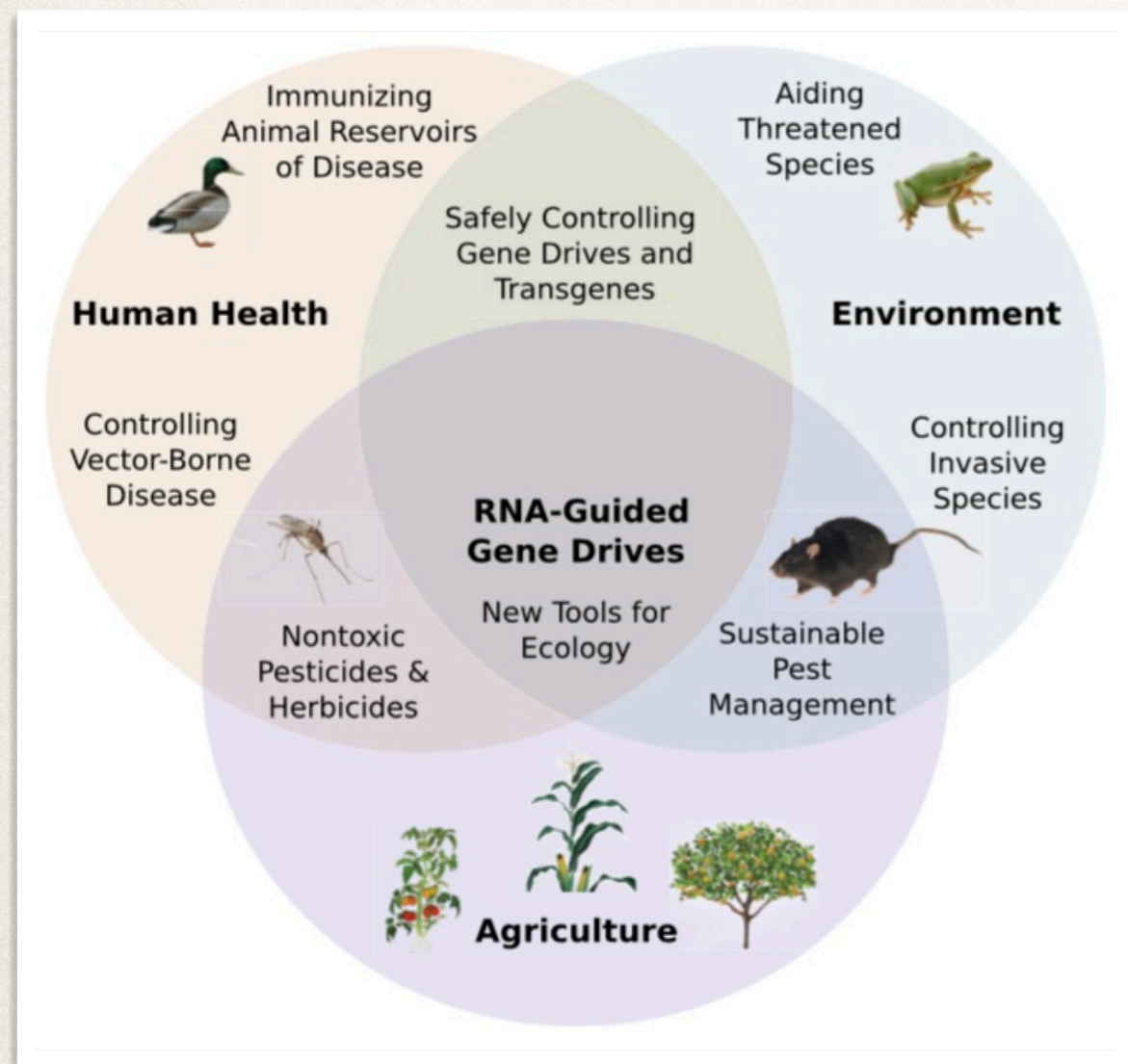
MIT Tech Review: 遺伝子ドライブで外来種駆除は生態系破壊の恐れ、研究者が指摘

Gene editing can now change an entire species - forever



"Gene drives are so effective that even an accidental release could change an entire species, and often very quickly. [...] [I]t could be a disaster if your drive is designed to eliminate the species entirely."

遺伝子ドライブの使用範囲が拡大される可能性



- * 遺伝子ドライブは汎用的あるいは応用範囲の広い技術である。将来的に遺伝子ドライブが他分野へ応用される可能性も考えておく必要がある(左図)。
- * 遺伝子組み換え作物(GMO)の安全性と生態系への影響、あるいはその普及と制限を巡る議論の再来となる可能性も。

図の出典：Esvelt, Kevin M., *et al.* "Concerning RNA-guided gene drives for the alteration of wild populations." *Elife* 3 (2014): e03401., **Figure 7.**

米NASEMが想定する 遺伝子ドライブの応用範囲

- ❖ 公衆衛生
- ❖ 生態系保全
- ❖ 農業
- ❖ 基礎研究

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016). *Gene drives on the horizon: advancing science, navigating uncertainty, and aligning research with public values*. National Academies Press.
<http://nap.edu/23405>

Public Health



Aedes aegypti

Image Source: US Centers for Disease Control and Prevention

- Control or alter organisms that carry infectious diseases that affect humans, such as dengue, malaria, Chagas, and Lyme disease
- Control or alter organisms that directly cause infection or disease, such as Schistosomiasis
- Control or alter organisms that serve as reservoirs of disease, such as bats and rodents

Ecosystem Conservation



Hemignathus munroi
(*Akiapōlā'au honeycreeper)

Image Source: US Fish and Wildlife Service

- Control or alter organisms that carry infectious diseases that threaten the survival of other species
- Eliminate invasive species that threaten native ecosystems and biodiversity
- Alter organisms that are threatened or endangered

Agriculture



Fruit damage from spotted wing drosophila infestation

Image Source: US Department of Agriculture

- Control or alter organisms that damage crops or carry crop diseases
- Eliminate weedy plants that compete with cultivated crops

Basic Research



DNA Double Helix

Image Source: National Institutes of Health

- Alter model organisms to carry out research on gene drive function and effects, species biology, and mechanisms of disease

遺伝子ドライブに関する技術的楽観論と耐性株出現の懸念

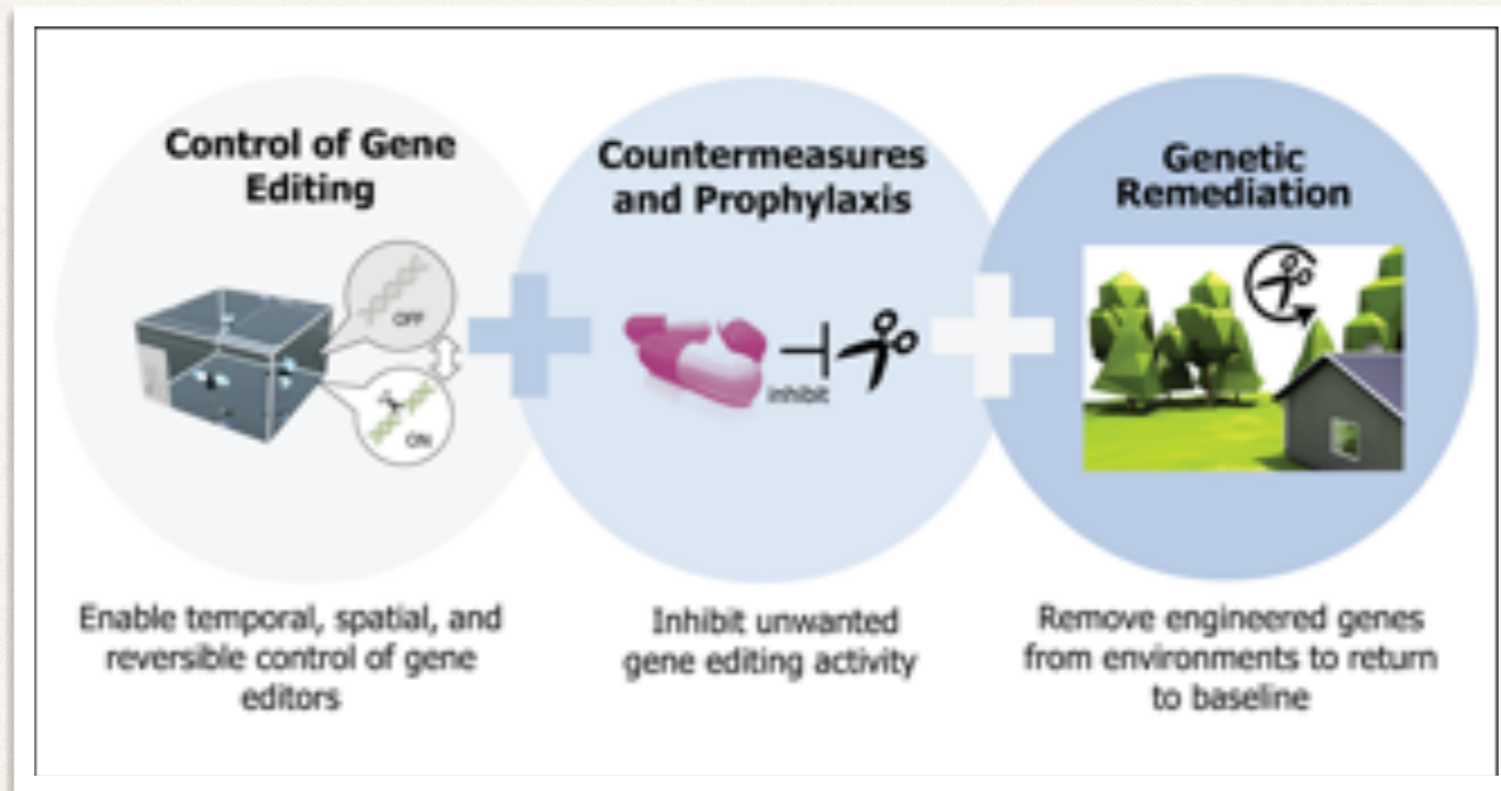
- ❖ もし想定外あるいは不慮の事態が生じた場合、悪影響を上書きするような第二のドライブ(リバーサルドライブ reversal drive (cf. [Vella *et al.* 2017])や免疫ドライブ immunizing drive)を実行すればよい、という意見もある。前者は誤ったドライブ(の影響)を取り除いて、対象となる生物をほぼ元の状態に戻すものであり、後者は不正なドライブが標的とする遺伝子配列を攻撃し、先制的に変化させるものである。[Wade 2015]
- ❖ 一方、キイロショウジョウバエを用いた実験で、遺伝子ドライブに対する抵抗性遺伝子の形成が確認された[Champer *et al.* 2017] という報告もある。

Vella, M. R., Gunning, C. E., Lloyd, A. L., & Gould, F. (2017). Evaluating strategies for reversing CRISPR-Cas9 gene drives. *Scientific reports*, 7(1), 11038.

Nicholas Wade, Gene Drives Offer New Hope Against Diseases and Crop Pests - The New York Times (Dec. 22, 2015)
<https://www.nytimes.com/2015/12/22/science/gene-drives-offer-new-hope-against-diseases-and-crop-pests.html>

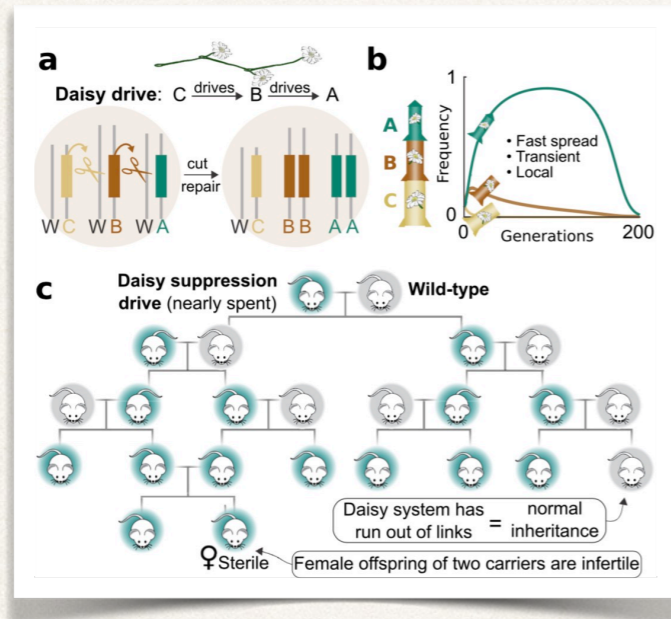
Champer, J., Reeves, R., Oh, S. Y., Liu, C., Liu, J., Clark, A. G., & Messer, P. W. (2017). Novel CRISPR/Cas9 gene drive constructs reveal insights into mechanisms of resistance allele formation and drive efficiency in genetically diverse populations. *PLoS genetics*, 13(7), e1006796.

「安全な」遺伝子ドライブ? : *Safe Genes*

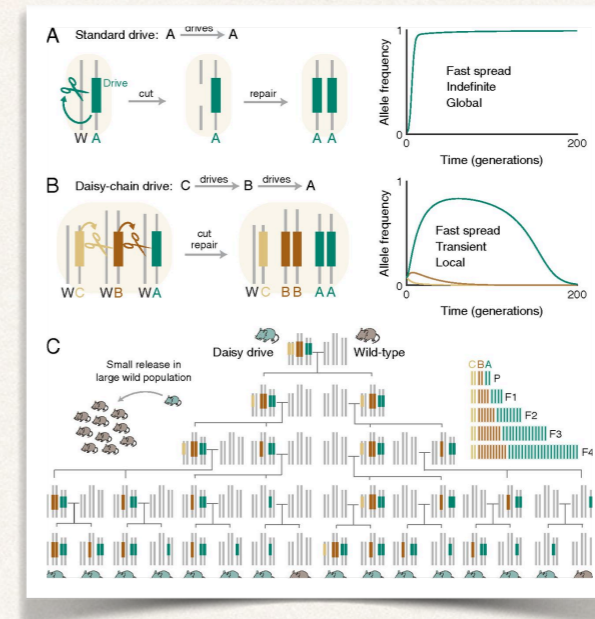


- * より安全な (≡よりコントロール性を高めた) 遺伝子ドライブの開発が望まれている。現在、米・防衛高等研究企画庁 (Defence Advanced Research Project Agency, DARPA) がスポンサーとなって、Safe Genesプロジェクトが進められている。
- * 資金源との関係から、軍民両用の用途両義性を有した技術 (デュアル・ユース) としての側面に、懸念を表明する報告書もある。cf. [CSS, VDW, ENSSER 2019, p.13] →cf. 科学技術社会論学会第21回年次研究大会 (2022年度) オーガナイズドセッション「遺伝子ドライブを巡るELSIとDURC」 四ノ宮、大庭報告

自己消滅型遺伝子ドライブ：デイジードライブ



Esvelt, K. M., & Gemmell, N. J. (2017)



Noble, C., et al. (2019).

❖ 理論研究の段階であるが、「自己消滅型 self-exhausting」 [Noble et al. 2019]の「安全な」 [Esvelt & Gemmell 2017] 「デイジー(チェーン)ドライブ」の研究も進められている。

❖ 「遺伝子ドライブの研究の安全性を確保するには、種全体に拡散するような遺伝子ドライブを作らないことです。幸い拡散が止まる遺伝子ドライブを作るとは可能だと考えています。限られた世代にのみ形質が遺伝するものです。」 [Esvelt, 2020 in *Gene Drive Film* (発表者により公式字幕から一部改訳)]

❖ Esvelt, K. M., & Gemmell, N. J. (2017). Conservation demands safe gene drive. *PLoS biology*, 15(11), e2003850.

❖ Min, J., Noble, C., Najjar, D., & Esvelt, K. M. (2017). Daisyfield gene drive systems harness repeated genomic elements as a generational clock to limit spread. *BioRxiv*, 104877.

❖ Min, J., Noble, C., Najjar, D., & Esvelt, K. (2017). Daisy quorum drives for the genetic restoration of wild populations. *BioRxiv*, 115618.

❖ Noble, C., Min, J., Olejarz, J., Buchthal, J., Chavez, A., Smidler, A. L., ... & Esvelt, K. M. (2019). Daisy-chain gene drives for the alteration of local populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(17), 8275-8282.

「最新式」 遺伝子ドライブとその関連技術

Approach	Examples	Temporal Dynamics	Geographic Reach
Gene Drives	Linked-homing, Medea, CleaveR, TARE/TADE	Self-propagating (low threshold)	Non-localized
	Translocations, Underdominance, UD ^{MEL}	Majority wins (high threshold)	Localized
	Daisy, split-homing, killer rescue	Self-limiting (temporary limited)	
Non-Drives	SIT, RIDL, fsRIDL, pgSIT		

- * 「リンクドホーミングドライブ」「スプリットホーミングドライブ」のいずれも、個体数抑制 population suppression / 集団の改変 population modification のどちらにおいても使用可能。前者については、生態学的に孤立した島嶼部など、アクセスが制限された場所で放出するといった、地理的に局限する努力が必要。自己増殖式のため、リスク緩和方策としてリバーサルドライブ等の対策も求められる。後者については(時間的にも地理的にも)本来的に制限されているため、「安全」かつ「効果的」で、さらに「自己制御式」であることから(リバーサルドライブ等の)対策も不要。

遺伝子ドライブに対する専門機関の態度

* Gene Drive の環境への影響の大きさを鑑み、遺伝子協は、Gene Drive に関して下記のとおり注意喚起を發します。[全国大学等遺伝子研究支援施設連絡協議会 (※現 遺伝子研究安全管理協議会 (令和4年4月1日に名称変更)) 2017]

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。

→Gene Drive生物は、その遺伝的性質を対象となる生物種集団内に急速に拡散させる潜在的能力があり、遺伝子組換え生物等の使用等の規制による生物の多様性の確保に関する法律に則った適切な拡散防止措置が極めて重要です。

* 米国科学アカデミーは遺伝子ドライブに関する報告書の中で、「現時点において遺伝子ドライブによって改変された生物を環境中に放つことを支持するための十分な証拠がない。しかしながら、遺伝子ドライブが持つ可能性は大変に意義深いものであり、施設内での研究あるいは厳格に管理された状況下で野外実験を進めることは容認する」という態度を示している。[The National Academies of Science, Engineering, and Medicine 2016, p.177]

* いずれにせよ、無規制のままが良いと考えている研究者、国は現状においてほとんどないと思われる。 26

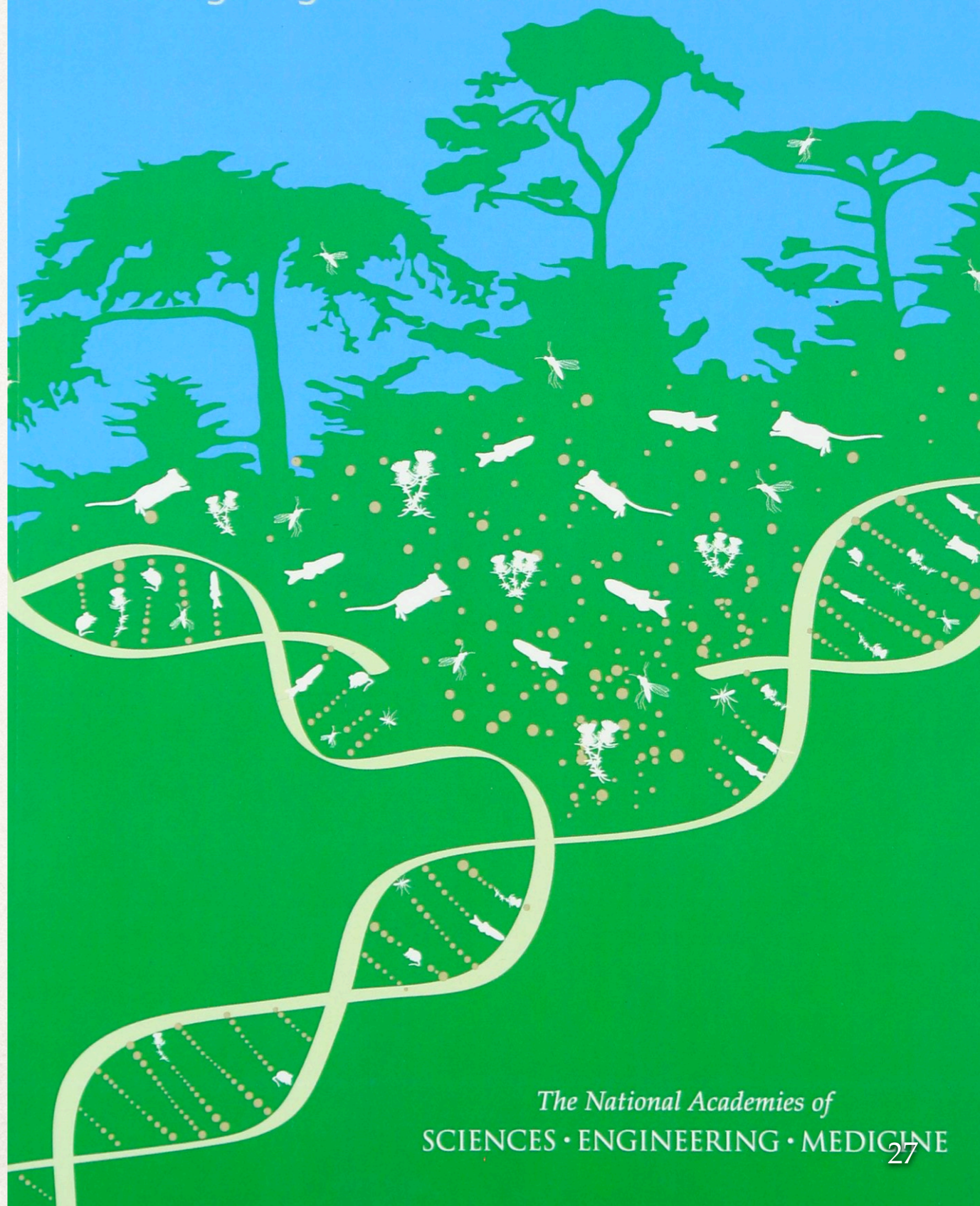
Gene Drives on the Horizon

- ❖ 「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方法を要求する。試験、ステークホルダーと社会の関与、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。」 (邦訳は[大庭 2018]を参照)

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016). *Gene drives on the horizon: advancing science, navigating uncertainty, and aligning research with public values*. National Academies Press.

<http://nap.edu/23405>

Gene Drives on the Horizon Advancing Science, Navigating Uncertainty, and Aligning Research with Public Values



The National Academies of
SCIENCES • ENGINEERING • MEDICINE

科学技術ガバナンスのひとつの到達点：予防原則



- ❖ 予防原則は、1992年の「環境と開発に関するリオ宣言」の第15原則で「予防的方策 precautionary approach」として言及された。
- ❖ EU圏内では、欧州環境庁(EEA)が予防原則の重要性を強調する報告書『早期警告からの遅ればせの教訓』("Late lessons from early warnings")を作成・公開している [EEA 2001; 2013]。
→最新版では「偽陽性」"false positive"の事例も紹介する、副題にinnovationを明記するなど、方向性の変化が見られる。



出典1：Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896-2000 — European Environment Agency

https://www.eea.europa.eu/publications/environmental_issue_report_2001_22

出典2：Late lessons from early warnings: science, precaution, innovation — European Environment Agency

<https://www.eea.europa.eu/publications/late-lessons-2>

Gene Drives at Tipping Points

❖ 「結論として、SPAGES (Self-propagating artificial genetic elements, 「自己増殖する人工遺伝因子」)と遺伝子ドライブは、複数のレベルで転換点に達する恐れがある。[von Gleich & Schröder 2020, p.248]

- (a) 農業生態系において、意図的に放出された遺伝子ドライブを施された生物による曝露が極端に拡大し、予期せぬ相互作用の範囲が大幅に拡大するプロセスで。
- (b) 技術的影響力と実現可能性の向上を通じて (現在既にそうした可能性は現実のものになりつつあるが、自身の能力を無制限に過大評価するのではなく、むしろヨナス (1979) の言う「恐れに基づく発見術」 'heuristics of fear' を用いてアプローチすべきである)。
- (c) 拡張されたリスク管理と予防的規制が必要とされる、遺伝子工学のリスクガバナンスにおいて。
- (d) それなしでは広範囲にわたるイノベーションの実現は不可能であるような、社会的受容への視野において。ここでは社会経済学的側面と倫理的側面が重要な役割を果たす。

von Gleich, A., & Schröder, W. (2020). Gene drives at tipping points: precautionary technology assessment and governance of new approaches to genetically modify animal and plant populations (p. 256). Springer Nature.

Gene Drives at Tipping Points | SpringerLink

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-38934-5>

Arnim von Gleich
Winfried Schröder *Editors*

Gene Drives at Tipping Points

Precautionary Technology Assessment and Governance of New Approaches to Genetically Modify Animal and Plant Populations

 Springer Open

GENE DRIVES

- ❖ Critical Scientists Switzerland (CSS), the Federation of German Scientists (VDW) and the European Network of Scientists for Social and Environmental Responsibility (ENSSER)の三団体が2019年5月に公開した、遺伝子ドライブに関する報告書。
- ❖ 科学的・技術的側面だけでなく、ELSI(倫理的・法的・社会的問題)の面からの検討がなされている。
- ❖ 「予測不可能性の高さ、知識の不足、農業生態系を含む生物多様性や生態系への深刻な悪影響の可能性を考慮して、本報告書では、十分な知識が得られるまで、あるいは問題に対する別の解決策が得られるまで、遺伝子ドライブ生物 (Gene Drive Organisms, GDOs) の放出 (実験的なものを含む) を保留することを推奨する。[中略] 予防原則を適用するという知恵は、この新しく強力な技術に直面する際の最良の指針となるだろう。」 [CSS, VDW, ENSSER 2019, p.13]

Critical Scientists Switzerland (CSS), Vereinigung Deutscher Wissenschaftler (Federation of German Scientists, VDW), European Network of Scientists for Social and Environmental Responsibility (ENSSER). (2019). *Gene Drives. A report on their science, applications, social aspects, ethics and regulations.* <https://genedrives.ch/wp-content/uploads/2019/05/Gene-Drives-Report.pdf>.



GENE DRIVES

A report on their science, applications, social aspects, ethics and regulations



"Gene Drive Film"

- ❖ ENSSER、VDW、CSS協力のもと、環境団体 "Save our Seeds"によって作成されたドキュメンタリーフィルム。

- ❖ 動画説明文より(発表者により一部改訳)：

「遺伝子ドライブ生物は、おそらくこれまでに開発された遺伝子工学の最も危険な応用です。[中略] 遺伝子ドライブ生物は、自然界の同種のを置き換えるか、さらには根絶するように設計されています。それらの放出は、生態系と食物網に予測できない結果をもたらす可能性があります。元に戻すことはできません。最悪の場合、それはさらなる種の絶滅と生態系全体の崩壊につながる可能性があります、人間の健康と食物 nutrition を脅かす可能性があります。」

[中略]

Save Our Seedsは、ドイツ、ヨーロッパ、そして世界中での遺伝子ドライブ生物の放出に関する世界的なモラトリアムを要求しています！」

モラトリアムの設定を巡って

- * Critical Scientists Switzerland (CSS), the Federation of German Scientists (VDW) and the European Network of Scientists for Social and Environmental Responsibility (ENSSER)の三団体は2018年11月8日、遺伝子ドライブの研究開発について、予防原則に基づきモラトリアムを設けるよう声明を発表した[CSS, VDW, ENSSER 2018]。
- * 一方、The United Nations (UN) Convention on Biological Diversity (CBD)は2016年に遺伝子ドライブに関する世界規模でのモラトリアムの導入を否定している[Callaway 2016]。2年後、国連は遺伝子ドライブに制限をかけることについては同意したが、モラトリアムの設定については再び否定した。2018年11月29日、エジプトのEl-Sheikhで開催されたCBD会議において遺伝子ドライブ生物の放出を一時的に禁止する案を受け入れなかったのである[Callaway 2018]。

Callaway, Ewen. (2016). 'Gene drive' moratorium shot down at UN biodiversity meeting. *Nature News & Comment* (Dec. 21, 2016)
<https://www.nature.com/news/gene-drive-moratorium-shot-down-at-un-biodiversity-meeting-1.21216>

Callaway, Ewen. (2018). UN treaty agrees to limit gene drives but rejects a moratorium. *Nature* (Nov. 29, 2018)
<https://www.nature.com/articles/d41586-018-07600-w>

Critical Scientists Switzerland (CSS), Vereinigung Deutscher Wissenschaftler (Federation of German Scientists, VDW), European Network of Scientists for Social and Environmental Responsibility (ENSSER). (2018). *What is on the horizon? Biodiversity and gene drives: science, culture, ethics, socio-economics and governance.*

https://genedrives.ch/wp-content/uploads/2018/12/First-statement_Gene-Drive-Project.pdf

屋外実験の重要性と今後の展開

- ❖ 実験室での研究は、遺伝子ドライブ技術が疾病管理プログラムに利益をもたらすかどうかを判断するために必要な重要な安全性と有効性のデータを提供する一方で、これらの技術が大規模な使用に適しているかどうかを判断するために必要なデータを提供するには不十分である。実験室からフィールドへの移行は、研究開発プロセスにおいて不可欠なステップである。
- ❖ 遺伝子ドライブ技術が野外評価のために承認された場合、初期の野外試験は性能と安全性を確保するために小規模で行われ、その後より大規模で複雑な環境へとスケールアップされることになる。段階的アプローチに従うことで、遺伝子ドライブ技術が有効かつ安全であるかどうかを評価するために、利害関係者により信頼性の高い性能および安全性データを提供することができる。

安全性に対する懸念と 倫理的・法的・社会的議論の必要性

- * 侵略的外来生物の駆除や、重篤な感染症を媒介する衛生昆虫・動物の制御、そして農業と競合する雑草の撲滅のための技術として、遺伝子ドライブが有望視されている。
- * しかし科学者達からは、遺伝子ドライブの安全性に関する懸念も示されている[e.g. Esvelt *et al.* 2014; Esvelt & Gemmell 2017; Ledford 2015; Reeves *et al.* 2018]。
- * 現在は同技術に対しては、専門家の間でも意見が分かれている状態である。そのため、将来的に社会全体での議論へとフェーズが移行した場合には、さらなる紛糾が予想される。したがって、今後生じうる議論に備え、遺伝子ドライブの倫理的・法的・社会的課題を事前に明らかにしておくことには、一定の意義があると考えられる。
- * 「アメリカでは、遺伝子ドライブを含む近年の遺伝学の発展が、いわゆる市民参加の専門家と同じく倫理学者の需要を生み出している。こうした専門家は、入り組んだ、高度に技術的な領域の研究について、人々に真剣に考えてもらうにはどのようにすればよいか、という悩ましい問題を抱えている。」
[Kahn 2020] →cf. 科学技術社会論学会第21回年次研究大会 (2022年度) オーガナイズドセッション「遺伝子ドライブを巡るELSIとDURC」立川報告

「生き物の運命を握る鍵を手に入れた時、 あなたは どうする？ ～討論劇で問うジーン ドライブの是非～」(北海道大学 CoSTEP)

- ❖ 今から10数年先の未来。
- ❖ 日本では蚊が媒介する感染症の流行により多数の重症者が生じている。この病気の特効薬は未だ開発途中にある。新たにゲノム編集を応用したジーンドライブを用いて、原因となる蚊を根絶する計画が提案された。この技術の利用を巡って肯定側と否定側それぞれの専門家が招集され、市民法廷が開催されることとなった。
- ❖ 参加者のあなたはジーンドライブの利用についてどのような判決を下すことになるのだろうか？

対話day企画2「生き物の運命を握る鍵を手に入れた時、あなたは どうする？ ～討論劇で問うジーンドライブの是非～」を2月6日14:00～16:00にて開催します

<https://costep.open-ed.hokudai.ac.jp/event/20573>

討論劇で問う ジーンドライブの是非

今から10数年先の未来。

日本では蚊が媒介する感染症の流行により多数の重症者が生じている。この病気の特効薬は未だ開発中である。新たに、ゲノム編集技術を用いたジーンドライブ技術を用いて、原因となる蚊を根絶する計画が提案された。この技術の利用を巡って肯定側と否定側それぞれの専門家が招集され、市民法廷が開かれることとなった。

参加者のあなたはジーンドライブの利用についてどのような判決を下すことになるのだろうか？

主催 北海道大学 CoSTEP 対話の場の創造実習
「劇団 DoSTEP 2021」
問い合わせ先 櫻村剛 / 北海道大学 CoSTEP 准教授
tanemura@open-ed.hokudai.ac.jp

このイベントは、2019年度 科学研究費助成事業 基盤研究 (C)「演劇を用いた科学技術コミュニケーション手法の開発と教育効果の評価に関する研究」(課題番号 19K03105)、2020年度 公益財団法人日立財団 倉田奨励金「演劇を用いた科学技術コミュニケーション手法の開発および参加者の先端科学技術の受容態度の改善に関する調査」(共に研究代表 櫻村剛)の助成によって実施されている。

デザイン | 高橋美央

生き物の運命を握る鍵を 手に入れた時、 あなたは どうする？

対話
day
2.6
14:00 - 16:00

13:50	開場	
14:00 - 14:50	討論劇	youtube
14:50 - 15:40	評決ワークショップ	zoom (要申込み)
15:40 - 16:00	評決の発表	youtube

40分ほどのオンライン討論劇を観劇後、参加者は陪審員として議論の対象となった「ジーンドライブの実施の是非」について50分ほどのワークショップに参加し、相互のディスカッションの後、評決を行います。その後、評決の発表と討論劇のエンディングが上演されます。参加形態によって視聴方法が異なりますのでご注意ください。

ONLINE

討論劇 & 評決ワークショップ

参加無料 WS 要事前申し込み

参加・申込方法
○ Zoomによる評決ワークショップへの参加を希望する方は事前の申込みが必要です。(先着20名)
○ 討論劇は Youtube から自由に観覧することができます。
いずれも以下のQRコードよりお申し込み・ご参加ください。

Communication In
Science & Technology
Education & Research Program



実行(特定日): 櫻村 剛(り) / 30歳、今回のジーンドライブ計画における主任研究者。生命科学研究所に所属。学生時代から一貫してジーンドライブをテーマに研究に取り組んでいる。
野人(否定側): 柳方 悠太(り) / 35歳、NPO法人「環境保護団体連合会」代表。ジーンドライブを肯定的に捉えている。持論は、虫が苦手、口頭で議論や対話の方が強い一面がある。
裁判長: 藤原 真実(り) / 30歳、討論劇の司会者。市議会議員として活動中。討論劇の場においては進行役を務める。

本研究の発展的継承

- ❖ 本研究課題の調査・分析内容をもとにして、JSPS 科研費挑戦的研究(開拓) [課題番号20K20493] 「遺伝子ドライブの倫理的・法的・社会的諸課題に関する学際融合研究」(代表：藤木篤、研究期間：2020年7月-2024年3月)に採択された。現在研究分担者とともに、萌芽的先端科学技術としての遺伝子ドライブの倫理的・法的・社会的諸課題に関する研究を進めている状況である。
- ❖ 2021年9月、国立国会図書館および立法考査局による「令和3年度「科学技術に関する調査プロジェクト」シンポジウム - ゲノム編集技術：最前線で生じつつある課題と展望」では、藤木が遺伝子ドライブに関する話題提供を行った。

科学技術に関する調査プロジェクト2021シンポジウム

ゲノム編集技術

—最前線で生じつつある課題と展望—

令和3年 9月 24日 (金)

14:00~17:00

※Webex によるウェビナー形式 (オンライン) で開催

対象：テーマに関心を有する研究者・専門家

募集定員：300名 (先着順、参加費無料、要事前申込み)

ファシリテータ

立川雅司氏 (名古屋大学大学院環境学研究科教授、国立国会図書館客員調査員)

パネリスト

江面 浩氏 (筑波大学生命環境系教授)

山本一彦氏 (神戸大学大学院経営学研究科教授)

橋本一憲氏 (弁理士、セントクレスト国際特許事務所副所長)

三成寿作氏 (京都大学iPS細胞研究所上廣倫理研究部門特定准教授)

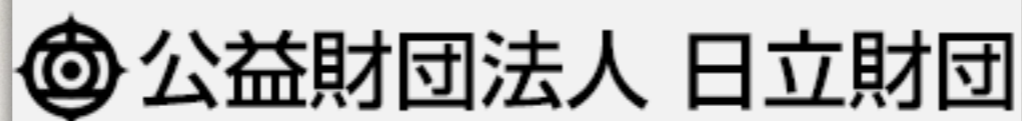
藤木 篤氏 (神戸市看護大学看護学部准教授)

コメンテータ

中村崇裕氏 (九州大学農学研究院教授)

国立国会図書館
National Diet Library, Japan

謝辞



- ❖ 本発表は公益財団法人 日立財団 倉田奨励金 人文・社会科学研究部門「遺伝子ドライブの倫理的・法的・社会的課題に関する環境衛生倫理的考察」、およびJSPS 科研費 JP 20K20493「遺伝子ドライブの倫理的・法的・社会的諸課題に関する学際融合研究」(代表：藤木篤)、22H00390「食農環境分野へのゲノム編集等先端技術応用をめぐる選択と熟議に関する研究」(代表：立川雅司)の助成を受けたものである。
- ❖ 本資料の一部は、以下の既刊論文の内容を反映したものである。
 - ❖ Fujiki, A. (2021). Reconsidering Precautionary Attitudes and Sin of Omission for Emerging Technologies: Geoengineering and Gene Drive. In *Risks and Regulation of New Technologies* (pp. 249-267). Springer, Singapore.
- ❖ 本資料は、以下の学会・研究会での口頭発表および質疑応答の内容が、相当数反映されている。
 - ❖ 藤木 篤「遺伝子ドライブに関する近年の動向」、科学技術社会論学会第21回年次研究大会 (2022年度) オーガナイズドセッション「遺伝子ドライブを巡るELSIとDURC」(オーガナイザ：藤木 篤(神戸市看護大学))、2022年11月26日
 - ❖ 藤木 篤「ジーンドライブの倫理問題」、国立国会図書館調査及び立法考査局「令和3年度「科学技術に関する調査プロジェクト」シンポジウム-ゲノム編集技術：最前線で生じつつある課題と展望」、2021年9月24日
 - ❖ 藤木 篤「害虫防除を巡る技術と思想：IPM(総合的有害生物管理)と遺伝子ドライブを主軸に」、科学技術社会論学会第18回年次研究大会 オーガナイズドセッション「害虫・農薬・環境の倫理学 — 「虫を管理する技術」をいかに評価するべきか? —」(オーガナイザ：鈴木 俊洋 (崇城大学))、2019年11月10日
 - ❖ 藤木 篤「RRIは萌芽的先端技術にどう向き合うか：ジオエンジニアリングと遺伝子ドライブを事例に」(日本哲学会第77回大会 公募ワークショップ「責任ある研究とイノベーションとは何か - 科学技術社会論と応用哲学の観点から考える」於神戸大学 (オーガナイザ：松田 毅 (神戸大学))、2018年5月20日
 - ❖ Atsushi Fujiki "Reconsidering Precautionary Attitudes and Sin of Omission in Emerging Technology: Geoengineering and Gene Drive" (Panel Session on "Causality and Responsibility" (Organizer: Tsuyoshi Matsuda (Kobe University)) in *11th International Conference on Applied Ethics @ Kyoto University*, Dec. 16, 2018
- ❖ 連絡先：fujiki@kobe-ccn.ac.jp