

アカデミアから見た 合成生物学の産業化

早稲田大学 電気・情報生命工学科

木賀大介 (きが だいすけ)

略歴

生化学・生物物理学の実験バックグラウンド

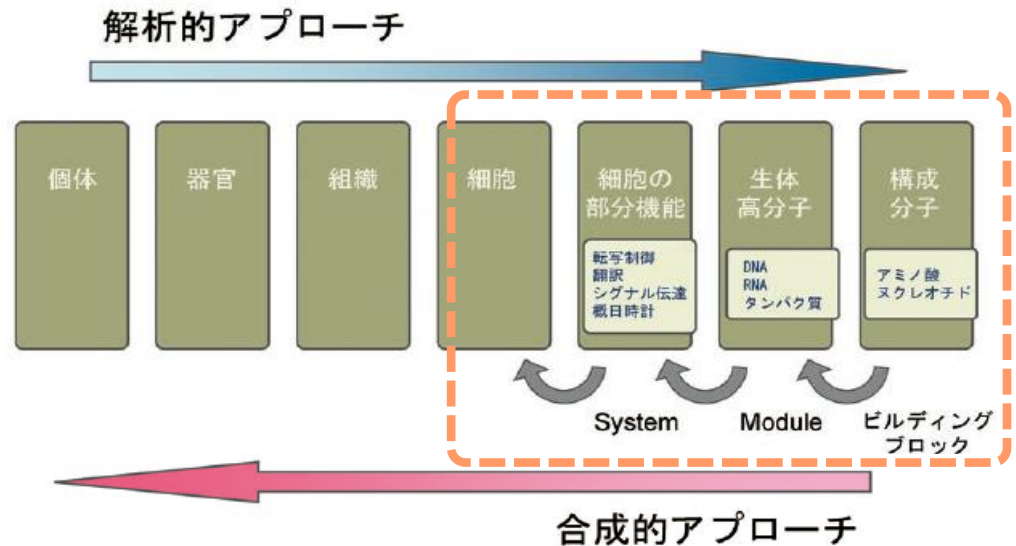
- 1994年 東大理学部 **生化学**科卒業、1999 年博士号取得。
- 理化学研究所など各所でのポスドクの後
(横山茂之G、菅裕明 研究室),
- 2004年 東京大学助手(駒場・物理教室・陶山明 研究室)
- 2005年 東工大(独立)助教授・准教授(**知能システム科学**専攻)
- 2016年 より早稲田大・教授。(電気・情報生命専攻) Wet-Dry (AI)
両輪の研究
- 2006年-, **合成生物学分野の学生国際コンテスト”iGEM”**の
東工大・早稲田チーム監督。
 - 2012年、文科省 科学技術・学術政策研究所により、
ナイスステップな研究者(人材育成部門)に選定。
2014年、工学教育賞、学生教育
「人材プール」
- 2015年, 学術振興会賞 (**合成生物学による人工生命システムの構築**)

合成生物学の適用先は、理学も、医・工・農学も

- 生命：各階層における要素の組合せ
- 生命の各階層での要素群の新たな組合せを構築することが研究手段

背景

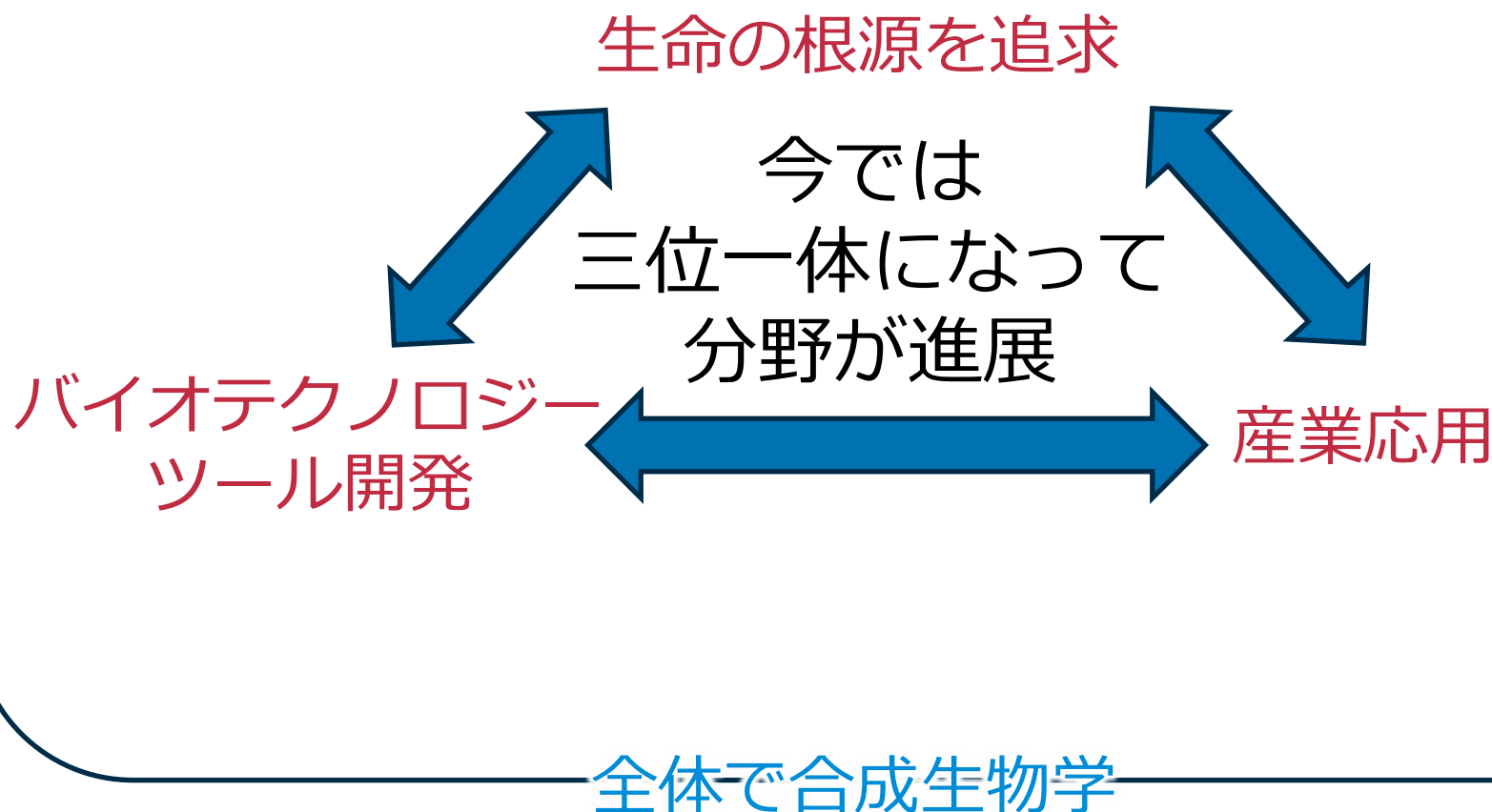
- 生命情報の蓄積
- 生体分子合成手段の進展 (DNA, タンパク質)



産業応用

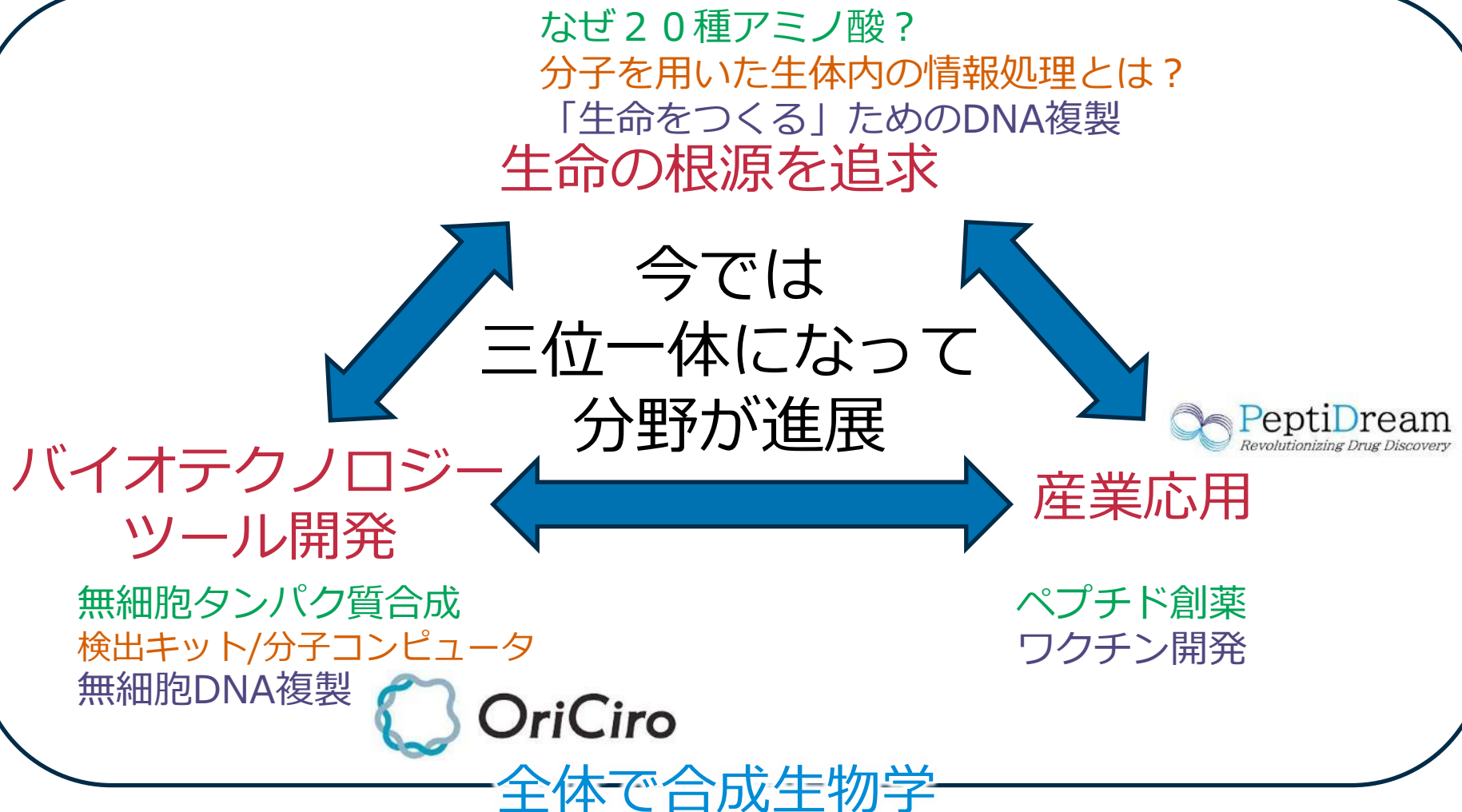
- バイオものづくり
- 創薬
- 超生体組織

合成生物学の適用先は、理学も、医・工・農学も



合成生物学の適用先は、理学も、医・工・農学も

細胞が生きるための制約を超越した無細胞系に注目が高まる

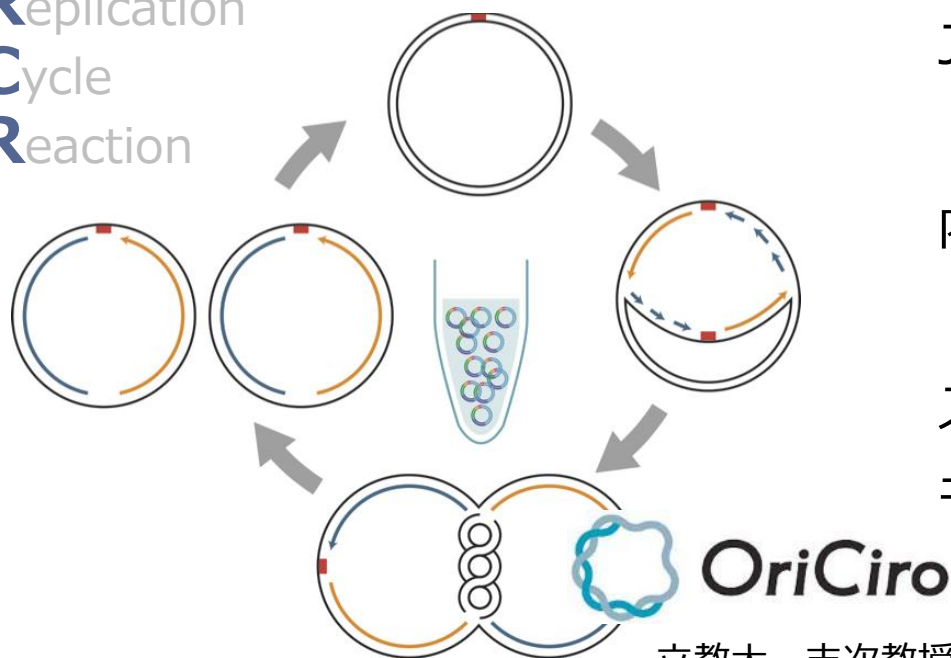


アカデミア発技術の産業応用のために、特許化支援、産業化調査の支援が重要
(JST-ImPACTのチームビルディングに対応する過程を、より幅広いアカデミアに適用)

無細胞合成生物学関連の日本発スタートアップ例

26種の精製タンパク質により染色体複製サイクルの再構成に成功
(Su'etsugu et al., NAR 2017)

Replication
Cycle
Reaction



立教大 末次教授提供

JST さきがけ(2011-15)

2013独立

内閣府-JST ImPACT

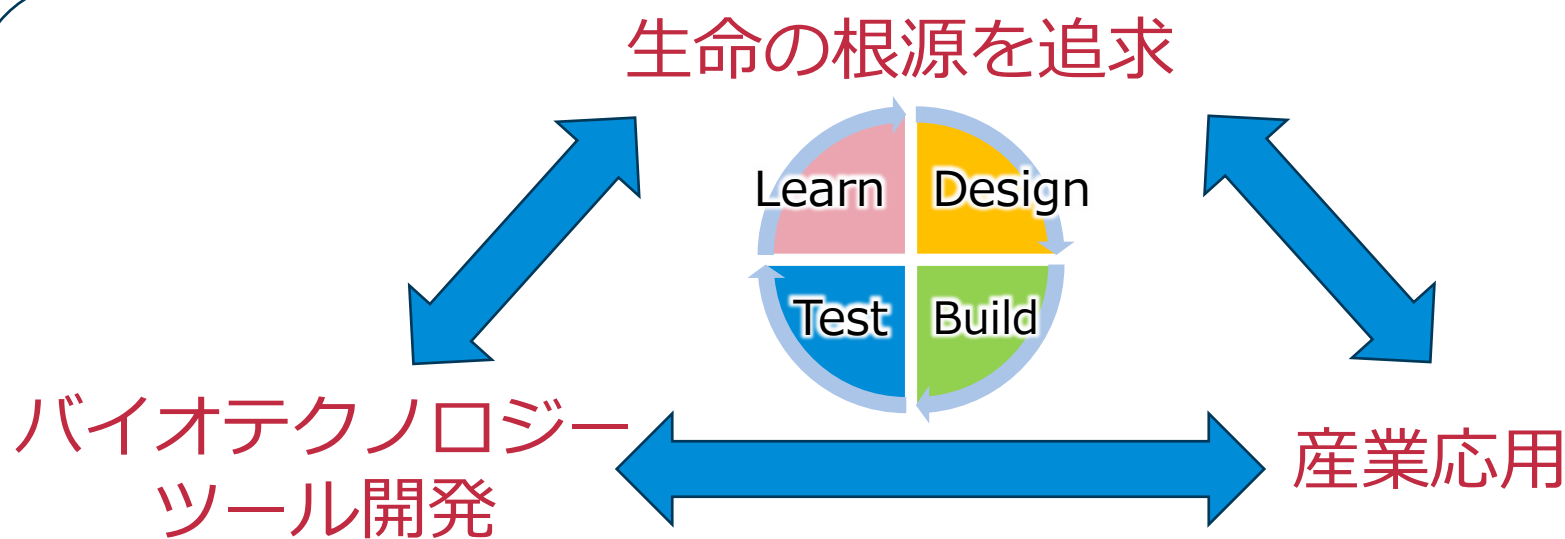
JST支援の国際特許出願

スタートアップ創出 (2018)

モデルナ社に売却 (116億円 2023)

Wet実験とDry理論の両輪による研究推進

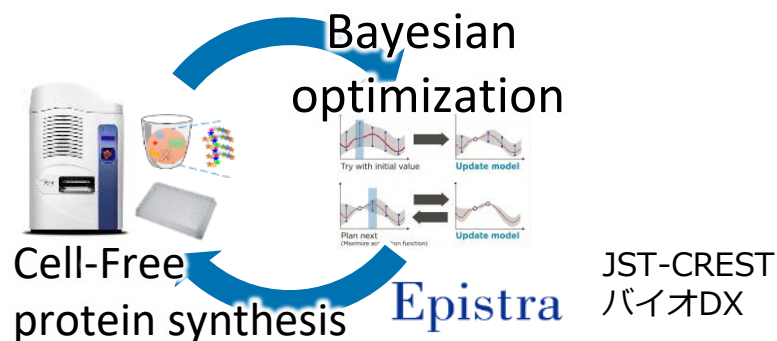
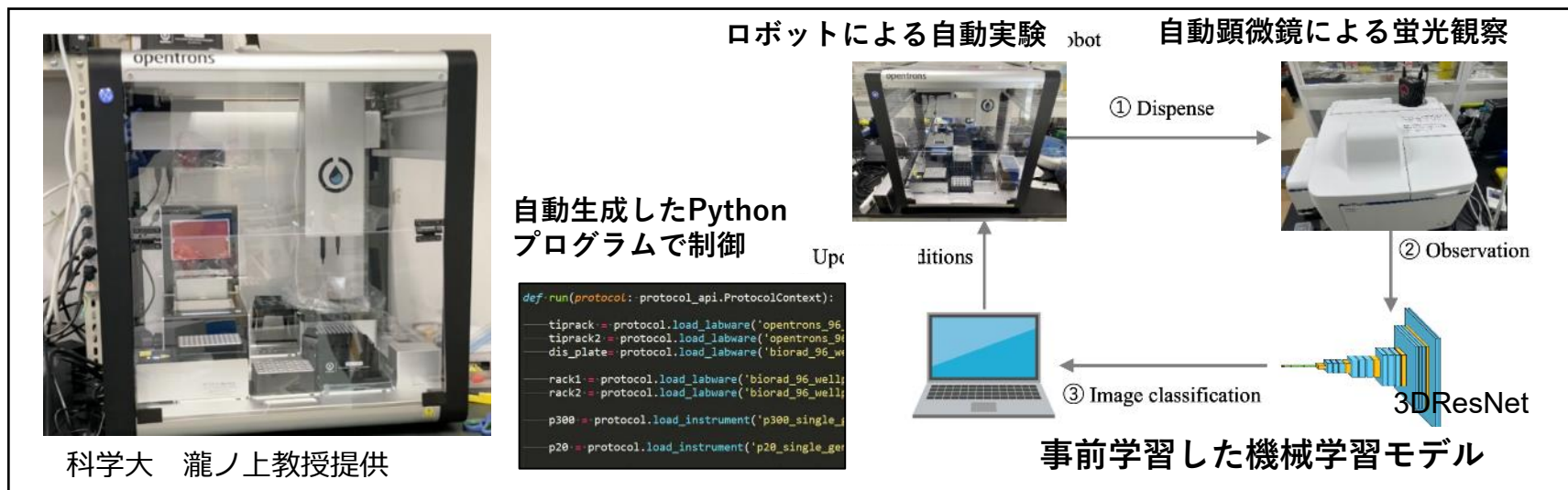
生命の各階層での要素群の新たな組み合わせを構築することが研究手段
膨大な種類の「ありえる」組合せの中から有効な組み合わせを得るために、
組み合わせのAIによるデザインと、実験自動化による多サンプル構築・評価が望ましい



理論と実験を融合させるDBTLサイクルは、バイオものづくり限定ではなく、
合成生物学/人工細胞システム研究全般での基本姿勢
(DBTL = Design-Build-Test-Learn)

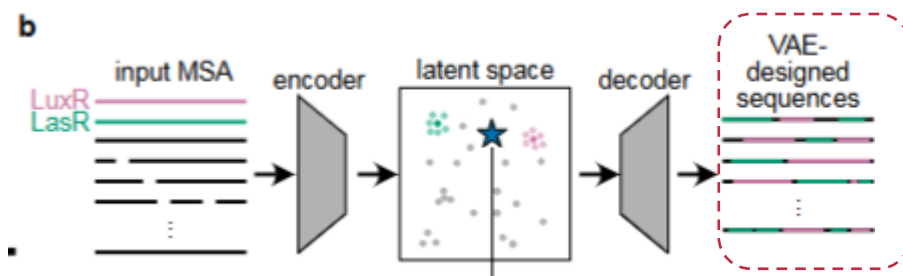
Wet実験とDry理論の両輪による研究推進

膨大な種類の「ありえる」組合せの中から有効な組み合わせを得るために、
組み合わせのAIによるデザインと、実験自動化による多サンプル構築・評価が望ましい



合成生物学の中で、無細胞系はAI-実験自動化に特に適している。どのような試薬を組み合わせるか、また、各試薬の量の組合せを最適化することが、無細胞システムの効率化に必要とされる。計算機による組み合わせ生成と、分注ロボットを活用した実験を行うことで、無細胞反応用の組み合わせの探索を効率的に追求することができる。

生成AIによりアミノ酸の並びを組合せ、新規タンパク質を創出
<https://doi.org/10.64898/2025.12.31.697150>



新奇タンパク質の配列をAIで生成した後に、多種のDNA合成が必要。現在は海外企業に発注する必要がある。情報セキュリティの観点から、多種DNA合成（オリゴプール合成）を可能にする半導体プロセスを国産DNA合成技術にも導入することが望ましい。

生命起源の研究から進化工学の着想が生まれる例の一つ

Wet実験とDry理論、社会実装の融合に 対応できる人材プールを拡充するための教育

- ・学部時代から融合領域での研究に対応した教育をおこなうことが重要であり、合成生物学分野では国際学生コンテストが重要な位置を占めている。
- ・**日本でもコンテスト形式の教育を幅広く行うべき。**

早大
電気・情報生命工学科



日本では分子コンピュータ/分子ロボティクス領域にも学際教育の伝統がある
コンテストの運営だけでなく、学部生を指導する大学院生やスタッフへのインセンティブも重要

・国際学生コンテスト



©iGEM Foundation

- ・理論と実験を両輪としたチームでプロジェクト推進
自分とは異なる得意分野のメンバーの能力を引き出す「共通言語」
- ・起業家精神の涵養、多数のスタートアップ設立

評価項目

- ・新奇的なアイディア
- ・社会実装に向けた調査
- ・セーフティ・セキュリティ

学部生のうちから産業化における「トレードオフ」について知る



©SIAT

人工細胞部門:

主催者は、学生のアイディアを受けつけ、
バイオフィアウンドリ(実験自動化大規模施設)を活かした
実験アウトソースを請け負う

バイオ研究者が情報系ツールと向き合い、
専門家と話すための「言葉」を会得するには

- レベル1: ツールとして使う。
 - インストラクションがあれば多くの方が活用可能
- レベル2: AIを活用して自らコーディング
 - AIコーディングを活用すると、「プログラミング好きだった」方は最新のコードの理解と改変も容易
 - 生成AIの活用により、各言語の細かい文法を覚えなくてもよくなった。生成AIに対して、コードの改訂指示を出す能力を涵養することが有効。

まとめ：

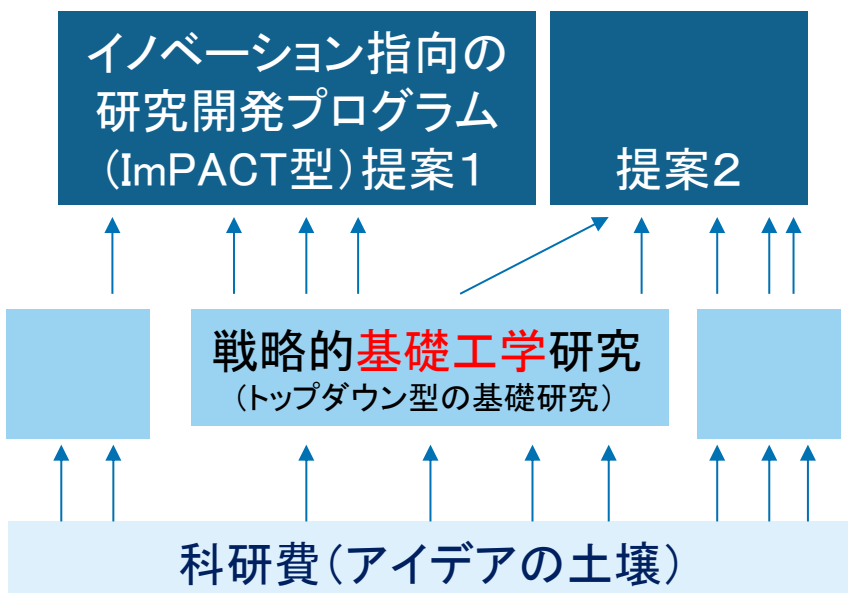
アカデミアから見た合成生物学の産業化

- 産業応用展開を加速可能な、生命の根源への興味から生まれ、生命を超越する合成生物学テクノロジー基盤ツールの開発を推進すべき
 - 無細胞合成生物学(セルフリー系、人工細胞システム)が、
改変の自由度が高く、次の合成生物学の最先端に位置する
- AI X 実験自動化の推進が重要
 - 生成AIが出力したDNA配列を実体化する、半導体プロセス応用DNA合成
 - 情報系ツールの使い方教育2段階
- Wet-Dry-社会実装の融合領域人材プール拡充に学生コンテストが有効
 - 融合領域の推進方法を会得し、起業家精神を涵養される。
 - 主専門に加え、異分野の専門家に「正しく」質問して協業する能力を会得できる。
 - 起業時に直面する、自らの熱意、社会の受容と需要、各種のトレードオフの存在を意識できるようになる。
 - 社会人教育を含め、コンテスト後も「コミュニティ」を継続する仕組みも重要。
- アカデミア発技術の産業応用のために、
特許化支援、産業化調査の支援が重要

<参考>

特許化支援・産業化調査の支援 をうけた研究開発プログラムが重要

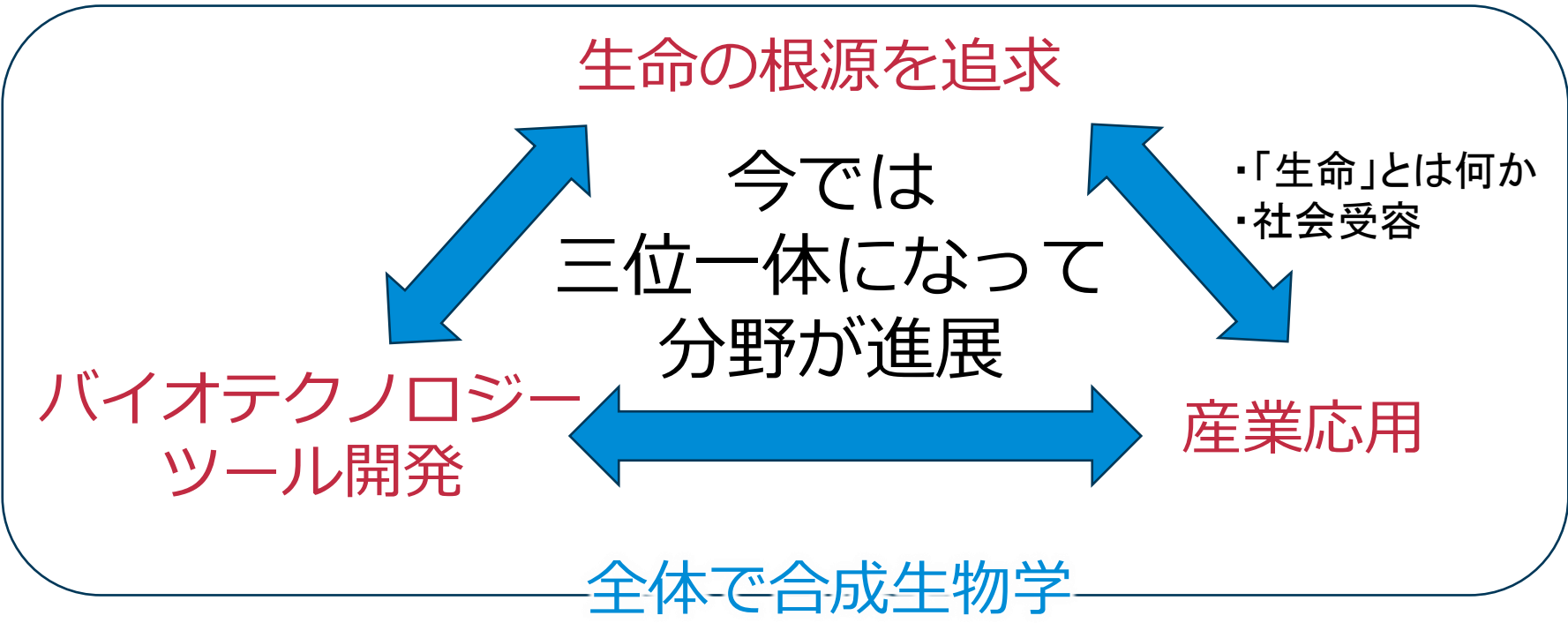
イノベーションに繋げるための制度設計について



1. 名前を変える
イノベーション指向であることを明示するため
2. トップダウン型の基礎研究とImPACT型を接続
有望な研究群を再編成して
ImPACT型への格上げを設計
3. 複数の領域を設定
大まかな分野は文科で設定
「人工細胞研究」内外の領域と競合・協力
4. 具体的領域およびPMは公募 (and 推薦含む)
協力なPMを選抜 (支援とインセンティブ)
ImPACT型ではPMを再選抜 (同じでも良い)
5. ImPACT型では「つくりこみ(戦略立案)」を重視

合成生物学の適用先は、理学も、医学・工学・農学も

生命の各階層での要素群の新たな組合わせを構築することが研究手段



合成生物学の適用先は、理学も、医学・工学・農学も

生命の各階層での要素群の新たな組み合わせを構築することが研究手段

ありえた・ありえる 生命の形

生命の根源を追求

- ・ ミニマルセル
(既存生物のゲノム縮小)
トップダウン アプローチ
- ・ 地球生命の起源
(既存生命から遡れない)
ボトムアップ アプローチ
- ・ 別天体の生命・普遍生物学
アストロバイオロジー

「人工細胞システム」研究
の黎明期



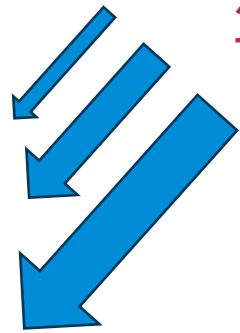
バイオテクノロジー ツール開発

ツール自体が
プラットフォーム産業化

産業応用

- ・ バイオものづくり (代謝工学)
(天然細胞に複数遺伝子を導入・改変)
- ・ リポソーム型 DDS (薬剤送達)

「細胞まるごと」を使わないことで制約を回避



生命の根源を追求

なぜどの生物も

20種類のアミノ酸で
タンパク質を合成？

バイオテクノロジー
ツール開発



産業応用

遺伝暗号の改変・再構成

(**21種類**以上のアミノ酸を同時使用
または
アミノ酸を**19種類**未満のみ)

- ・ JST ERATO (1996-2001)横山情報分子プロジェクト
- ・ NEDO 産業技術研究助成事業

ペプチド・タンパク質医薬品の革新

- ・ 非標準アミノ酸含有ペプチド創薬(2006)
ペプチドリーム社、東大発ベンチャー 時価総額**2000億円**
- ・ 21アミノ酸、6塩基を同時使用する大腸菌
Synthorx社：Sanofi社が**25億\$**で買収(2019)
- ・ コドン圧縮大腸菌
GRO Biosciences社(US)：Merck社と**10億\$**規模の契約(2024)
Pearl Bio社(UK)：シリーズBで**6040万\$**獲得(2024)

「細胞まるごと」を使わないことで制約を回避

合成生物学 = 生命の各階層での要素群の新たな組合わせを構築することが研究手段

しかし、新たな組み合わせを天然細胞に閉じ込める限り、

「天然細胞を生かす生理条件」が制約

となってしまう

「試験管内」に
細胞機能を再構成する

生命の根源を追求

なぜ菅教授の研究が
いち早く応用展開できたか



バイオテクノロジー
ツール開発

遺伝暗号の改変・再構成

産業応用

ペプチド・タンパク質医薬品の革新

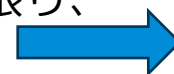
- ・ 非標準アミノ酸含有ペプチド創薬(2006)
ペプチドリーム社、東大発ベンチャー 時価総額2000億円
- ・ 21アミノ酸、6塩基を同時使用する大腸菌
Synthorx社：Sanofi社が25億\$で買収(2019)
- ・ コドン圧縮大腸菌
GRO Biosciences社(US)：Merck社と10億\$規模の契約(2024)
Pearl Bio社(UK)：シリーズBで6040万\$獲得(2024)

合成生物学の適用先は、理学も、医学・工学・農学も

合成生物学 = 生命の各階層での要素群の新たな組み合わせを構築することが研究手段

しかし、新たな組み合わせを天然細胞に閉じ込める限り、

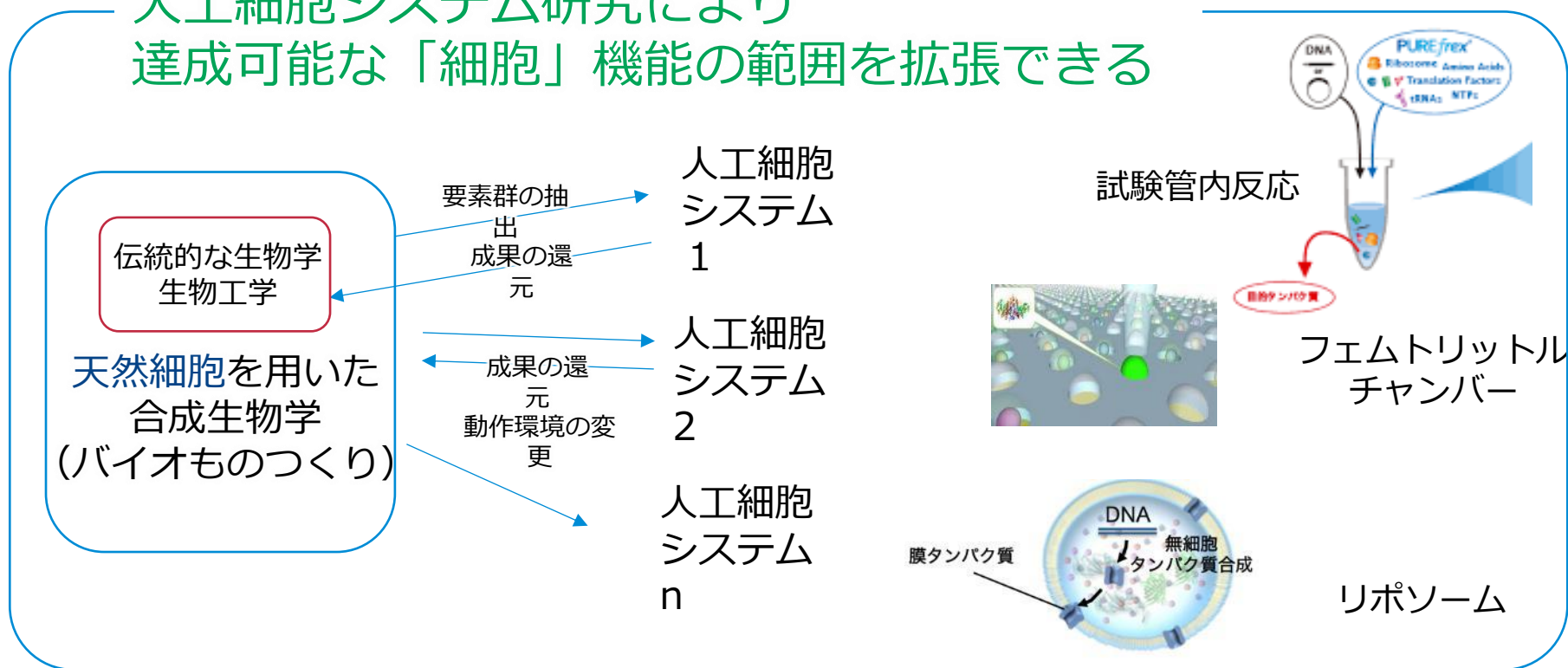
「天然細胞を生かす生理条件」が制約



「試験管内」に
細胞機能を再構成する

となってしまう

人工細胞システム研究により
達成可能な「細胞」機能の範囲を拡張できる



合成生物学の国際コンテスト iGEMに関する紹介記事・サイト

Wet-Dry-社会実装の融合領域の「人材プール」

2004年に開始。近年では毎年4000人以上が参加している。
コンテスト経験者が構成する「iGEM Community」が
コンテストだけでなく、合成生物学領域に広く影響力を持つ。
経験者により、国内外で250社以上のスタートアップが設立された。



©iGEM Foundation

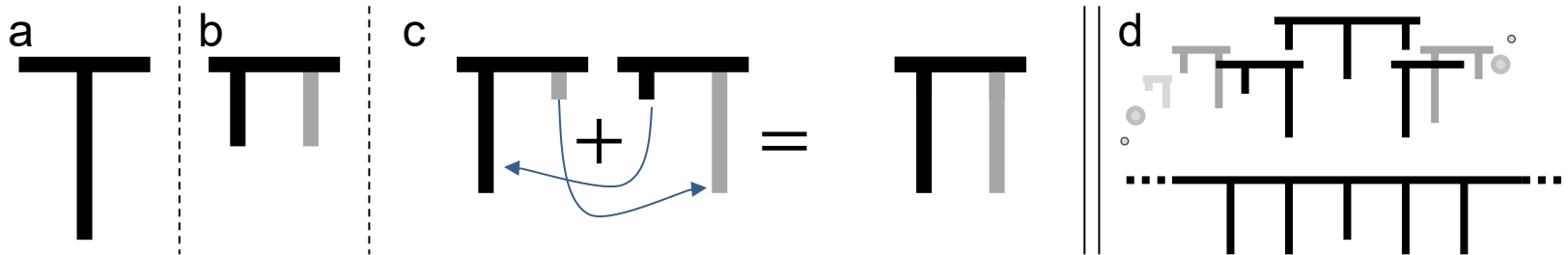
- 生物工学会誌 2023 年 101 巻 6 号 p. 301-305
– https://www.jstage.jst.go.jp/article/seibutsukogaku/101/6/101_101.6_301/_article/-char/ja/
- 日経サイエンス 2024年3月号
– https://www.nikkei-science.com/202403_054.html
- 朝日新聞記事 2025年6月13日
– <https://www.asahi.com/articles/DA3S16234098.html>
- JST サイエンスポータル オピニオン(2011年)
• https://scienceportal.jst.go.jp/explore/opinion/20110214_01/index.html

分野融合領域の「人材プール」とは： Γ (ガンマ)

一人で掘れる学問分野の広さと深さに限界があっても、一人が主たる分野以外に若干でも別分野の「言葉」を理解し、これを組み合わせの取り掛かりとすれば、融合領域のチームとして深く広くなる。この「言葉」の会得のためにも、学部時代から主専門以外にも異分野の専門知識を学ぶことが重要である。そのために**融合学科/専攻**が有効であり、また、学生の主体的な異分野融合を涵養している**合成生物学の国際学生コンテスト**も有効な手段となっている。



融合学科の例：早大
電気・情報生命工学科

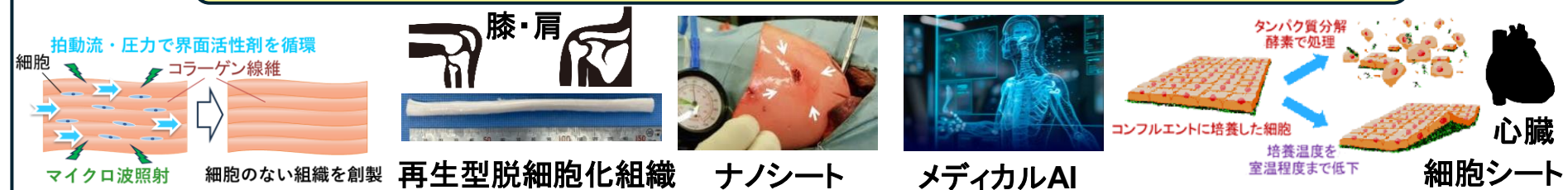


- a 広い教養と深い専門を持つT型人才。
- b 2の専門を持つ人材が望ましいが、大文字の Π でなく小文字の π となってしまうことも多い。
- c 主たる専門を深く、もう一つの専門については浅くとも専門家への正しい質問が可能な段階に達していれば、複数の専門家が組み合わせることで、分野融合研究が可能になる。
- d 3人以上の専門家の組合せにも、別分野の言葉の「翻訳」が可能な人材が重要である。

文部科学省認可第1号 ～2大学共同教育課程 大学院～ 社会人産医官学の医療分野の人財育成

早稲田大学  東京女子医科大学
Science & Engineering Medicine

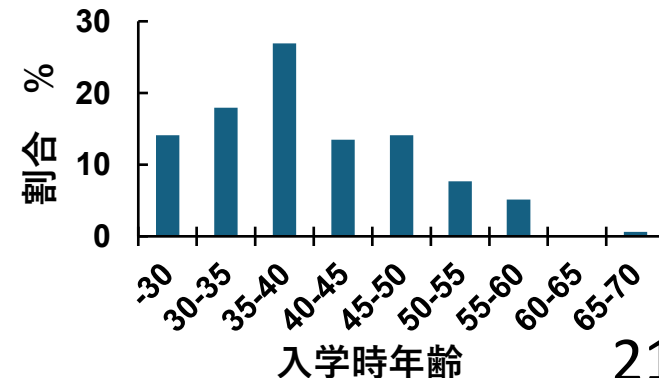
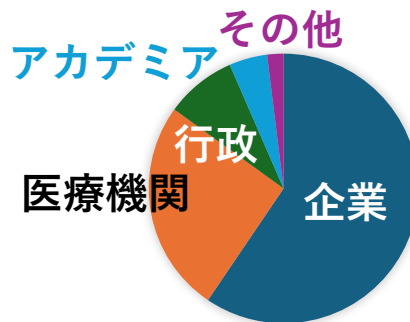
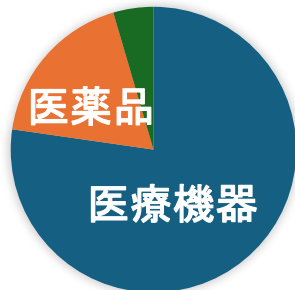
革新的医薬品・医療機器・再生医療製品の実用化



社会実装を加速する 評価・予測・決断 のための科学 (医療レギュラトリーサイエンス)

定員(年間10名)に対する充足率(2010-2025年) 95.6% (計153名)
学位取得者 74名

再生医療等製品



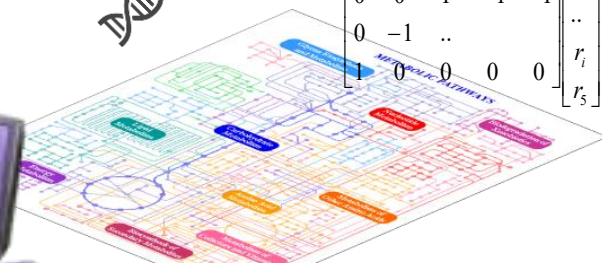


BRENDA

データベース



$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & .. & & \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_i \\ r_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$



ゲノムスケール代謝モデル

代謝シミュレーション講習・演習（例）

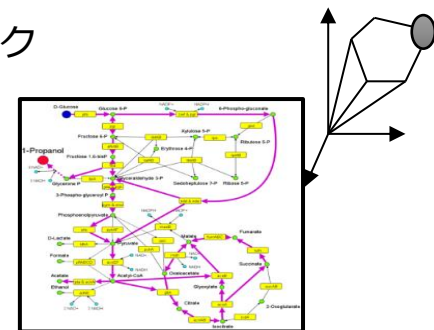
- ◆概要講義
- ◆シミュレーションモデルの理論（講義）
- ◆シミュレーション実習（代謝解析）
- ◆シミュレーション実習（育種デザイン）
- ◆ゲノムスケールモデル構築例紹介
- ◆応用に向けた討論・利用の工夫など

細胞内反応の予測精度を向上しバイオテクノロジー開発速度を飛躍的に向上させる



シミュレーション成果の応用例

- ◆モノづくり微生物育種デザイン
- ◆培地最適化
- ◆がん細胞の代謝理解
- ◆藻類のCO₂固定能予測
- ◆実験デザイン



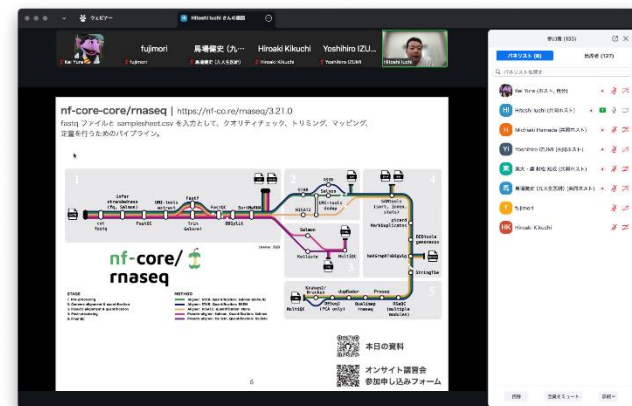
参加者のべ 200名(企業研究者、国研研究者、大学教員、学生)



生命科学・創薬研究支援基盤事業 「創薬等先端技術支援基盤プラットフォーム(BINDS)」 BINDSオンライン・オンサイト講習会（早稲田大学 2025年度～）

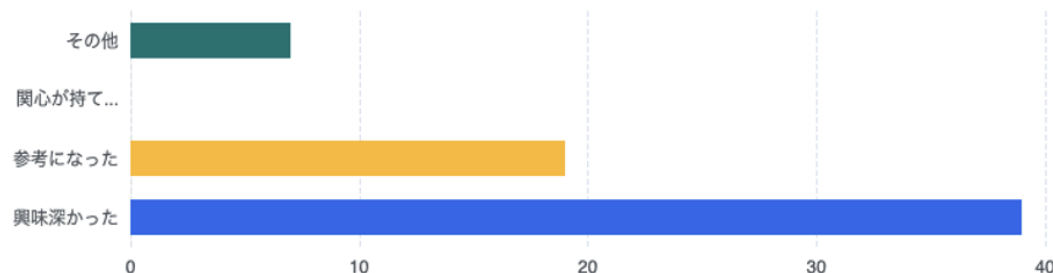
- 10月3日にオンライン講習会を開催
- 参加登録者は196名。実参加者は128名。アカデミアや産業界から参加あり。広く全国から参加あり。
- インシリコ解析（RNA-seq解析とタンパク質立体構造予測）を実施。

- 11月21日に早稲田大学にてオンサイト講習会(約3時間半)を実施。
- 申し込み者 大学関係者4名、企業関係者1名。
- 主催者が用意したパソコンを用いて、全員が RNA-seq 解析の全工程 (fastq ファイルから発現変動解析まで)を実際に自分の手で実施した。
- 講習会終了後、参加者1名から自分の環境で解析を行えたとの報告を受けている。
- タンパク構造の計算機解析の実習も行った。



22. 個々の講演について：由良敬（単一選択）

(65/67) 97% が回答しました



合成生物学とバイオセーフティ・セキュリティ

「細胞を創る」研究会でのセッション

<http://jscsr.org/>

所属は当時



会長 木賀大介

基調講演 吉倉廣（国立感染症研究所名誉所員・同研究所元所長）

セッション4 バイオセキュリティ

座長：

齋藤智也 吉澤剛

小安重夫（慶應義塾大学）

齋藤智也（東京工業大学）

四ノ宮成祥（防衛医科大学校）

科研費 グローバルな感染症等生物学的脅威を巡る新たな紛争ランドスケープの研究



セッション2

ゲノム合成時代の到来と

バイオセキュリティ・セーフティ

オーガナイザー：

田端和仁、木賀大介

内閣府-JST ImPACT 人工細胞リアクタ

相澤康則（東京工業大学）

木賀大介（早稲田大学）

四ノ宮成祥（防衛医科大学校）

末次正幸（立教大学）

隅蔵康一（政策研究大学院大学）

野地博行（東京大学、内閣府ImPACT）

横井崇秀（日立製作所）



Session 5：

『つくる研究』の安心・安全

—デュアルユースの観点から—

オーガナイザー：

木賀大介、三成 寿作

木賀 大介（早稲田大学）

三成 寿作（京都大学）

吉澤 剛（関西学院大学）

花木 賢一（国立感染症研究所）

四ノ宮 成祥（防衛医科大学校）

原山 優子（東北大学）

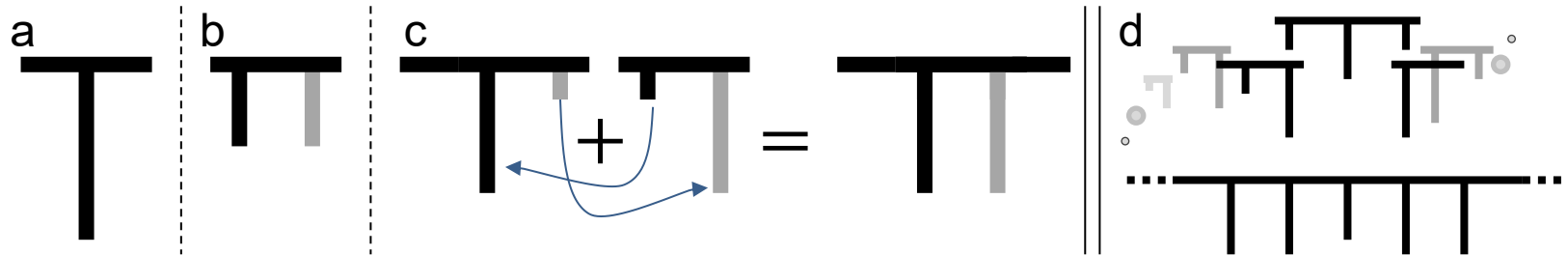
厚生労働科学研究費補助金「新型コロナウイルス感染症を踏まえたデュアルユース性が懸念される公衆衛生研究の国際動向及び倫理規範・監督体制確立のための研究」

分野融合領域の「人材プール」とは：Γ(ガンマ)

一人で掘れる学問分野の広さと深さに限界があっても、一人が主たる分野以外に若干でも別分野の「言葉」を理解し、これを組み合わせの取り掛かりとすれば、融合領域のチームとして深く広くなる。この「言葉」の会得のためにも、学部時代から主専門以外にも異分野の専門知識を学ぶことが重要である。そのために**融合学科/専攻**が有効であり、また、学生の主体的な異分野融合を涵養している**合成生物学の国際学生コンテスト**も有効な手段となっている。



融合学科の例：早大
電気・情報生命工学科



- a 広い教養と深い専門を持つT型人才
- b 2の専門を持つ人材が望ましいが、大文字のΠでなく小文字のπとなってしまうことも多い
- c 主たる専門を深く、もう一つの専門については浅くとも専門家への正しい質問が可能な段階に達していれば、複数の専門家が組み合わせることで、分野融合研究が可能になる
- d 3人以上の専門家の組合せにも、別分野の言葉の「翻訳」が可能な人材が重要である

これからの産業活動を支える 合成生物学・バイオ人材養成プログラム

- 合成生物学・バイオはこれらの産業活動を支えるテクノロジーである。従来のバイオテクノロジーやバイオインフォマティクスは、地球上に存在する生命を理解するためのツールであったのに対し、合成生物学は生命を作り出すポテンシャルがあるツールである。このツールを利用することで、人類が直面する環境問題や食料問題、自然災害などを解決する可能性を秘めているテクノロジーである。このテクノロジーを使いこなすためには、従来の分子生物学や遺伝子工学のみならず、プログラミング、統計処理、工学設計の技術のみならず、医学・薬学、農業の知識が必要であり、さらには倫理や社会実装のための制度設計への理解が不可欠である。一方で、現在の教育機関において、これら総体をもつ人材を育成するしくみはない。そのため、我が国において、合成生物学・バイオを発展させるための教育的基盤を構築することは、急務である。
- バイオテクノロジーやバイオインフォマティクスの浸透においては、若手人材に向けて数多くのセミナーや講習会を実施するとともに、大学／大学院には副専攻を設置し、関連する技術と知識を拡散することで裾野を広げ、分野の発展に寄与した。
- 合成生物学・バイオにおいても同様の取り組みが不可欠である。なお合成生物学・バイオにおいては、社会実装を見据えた倫理教育や制度設計の教育が不可欠である。これらの人材養成プログラムの実装にあたり、教育ができる人材の不足が懸念されるが、教育者の不足はビデオによる講習やAIエージェントによる実習により補うことも可能である。

参考となる教育プログラム

- 生命科学・創薬研究支援基盤事業「創薬等先端技術支援基盤プラットフォーム(BINDS)」各種講習会
BINDSオンライン・オンサイト講習会（早稲田大学 2025年度～）
BINDSユニット連携講習会（早稲田大学、東京大学など 2022年度～）
- 卓越大学院プログラム「ゲノム編集先端人材育成プログラム」（広島大学 2019年度～）
- 魅力ある大学院教育イニシアティブ「生命情報学を使いこなせる女性人材の育成」（お茶の水女子大学 2005年度～）
- 科学技術振興調整費「アグリバイオインフォマティクス人材養成ユニット」（東京大学大学院農学生命科学研究科 2004年度～）
- 東京工業大学 情報生命博士教育院（文科省 リーディング大学院プログラム 2011年度～）
- 早稲田大学 理工学術院 先進理工学部 電気・情報生命工学科
- 早稲田大学・東京女子医科大学 共同大学院 共同先端生命医科学専攻
- 日本生物工学会代謝工学研究部会 講習・演習（代謝シミュレーション）
- サステナブルな未来食の普及に向けた産官学共創コンソーシアム（早稲田大学 2025年度～）