

# 国立国会図書館 調査及び立法考查局

Research and Legislative Reference Bureau  
National Diet Library

論題 Title	勃興するバイオエコノミーと岐路に立つ日本—「デジタル×バイオ」時代の到来—
他言語論題 Title in other language	Emerging Bioeconomy and Japan at the Crossroads: The Dawn of an Era of “Digital×Bio”
著者 / 所属 Author(s)	山本 一彦 (YAMAMOTO Kazuhiko)／神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科教授
書名 Title of Book	ゲノム編集技術—最前線で生じつつある課題と展望— 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (Genome Editing Technologies: Issues arising on the frontline and future prospects)
シリーズ Series	調査資料 2021-4 (Research Materials 2021-4)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考查局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2022-02-22
ページ Pages	—
ISBN	978-4-87582-887-7
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	—

- \* この記事は、調査及び立法考查局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。
- \* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

「科学技術に関する調査プロジェクト」シンポジウム



勃興するバイオエコノミーと岐路に立つ日本  
～「デジタル×バイオ」時代の到来～

2021年9月24日  
神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科  
山本一彦



Bacchus Bio innovation

Copyright 2021 © Kazuhiko Yamamoto. All Rights Reserved.

スライド 1

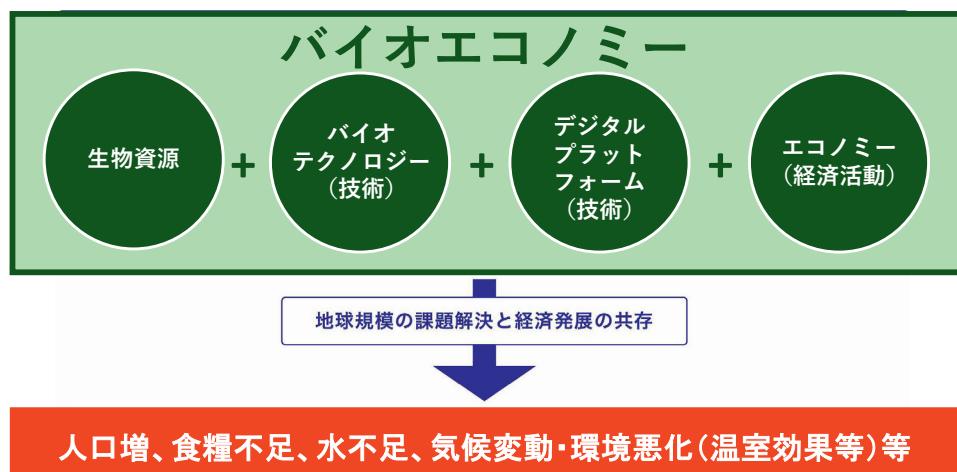


勃興するバイオエコノミー

スライド 2

## 世界の潮流～勃興するバイオエコノミー～

近年の世界では、最新のテクノロジーと生物資源を用いて、地球規模の課題の解決と経済発展の共存を目指す考え方方が、台頭している。



Bacchus Bio innovation

Copyright 2021 © Kazuhiko Yamamoto. All Rights Reserved.

3

スライド 3

## 米国スターフレーヤー（バイオベンチャー）の登場

DNA合成	ゲノム編集（遺伝子治療）	ゲノム編集（遺伝子治療）
<b>Twist Bioscience (2013年設立)</b>	<b>CRISPR Therapeutics (2013年設立)</b>	<b>Beam Therapeutics (2017年設立)</b>
<b>資金調達額（上場迄） 235百万USD</b>	<b>資金調達額（上場迄） 127百万USD</b>	<b>資金調達額（上場迄） 222百万USD</b>
<b>資金調達ラウンド：8回</b>	<b>資金調達ラウンド：3回</b>	<b>資金調達ラウンド：2回</b>
<b>Nasdaq上場（2018年11月）</b>	<b>Nasdaq上場（2016年10月）</b>	<b>Nasdaq上場（2020年2月）</b>
上場時の評価額 上場時の調達額 最新の時価総額	上場時の評価額 上場時の調達額 最新の時価総額	上場時の評価額 上場時の調達額 最新の時価総額
<b>372百万USD 70百万USD 5,621百万USD</b>	<b>590百万USD 56百万USD 8,875百万USD</b>	<b>843百万USD 173百万USD 6,324百万USD</b>

最新の時価総額:2021/9/21 時点

Bacchus Bio innovation

Copyright 2021 © Kazuhiko Yamamoto. All Rights Reserved.

4

スライド 4

## 米国スタープレーヤー（バイオベンチャー）の登場

バイオファウンドリ	バイオファウンドリ	バイオファウンドリ
Amyris (2003年設立)	Ginkgo Bioworks (2007年設立)	Zymergen (2013年設立)

資金調達総額（※） 1,400百万USD	資金調達総額（※） 2,428百万USD	資金調達総額（※） 1,374百万USD
資金調達ラウンド：14回	資金調達ラウンド：8回	資金調達ラウンド：6回
<b>Nasdaq上場（2010年9月）</b> 上場時の評価額 650百万USD 上場時の調達額 85百万USD 最新の時価総額 3,907百万USD	<b>NYSE上場（2021年9月）</b> 上場時の評価額 14,990百万USD 上場時の調達額 1,630百万USD 最新の時価総額 14,940百万USD	<b>Nasdaq上場（2021年4月）</b> 上場時の評価額 3,000百万USD 上場時の調達額 500百万USD 最新の時価総額 1,374百万USD
最新の時価総額:2021/9/21 時点		※ グラント、借入金を除く

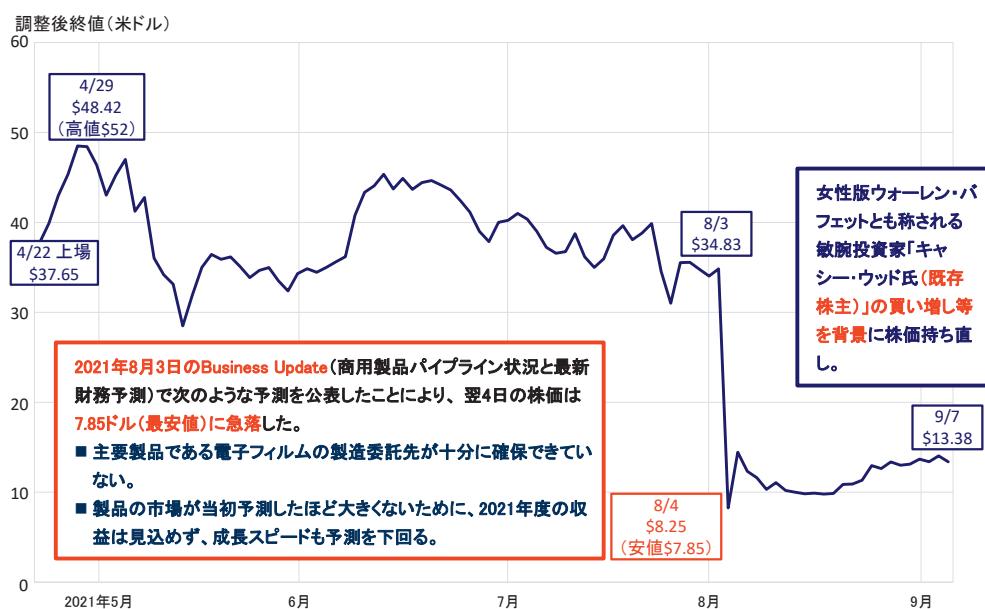
Bacchus Bio innovation

Copyright 2021 © Kazuhiko Yamamoto. All Rights Reserved.

5

スライド 5

## Zymergen ~ NASDAQ上場から現在迄の株価推移~



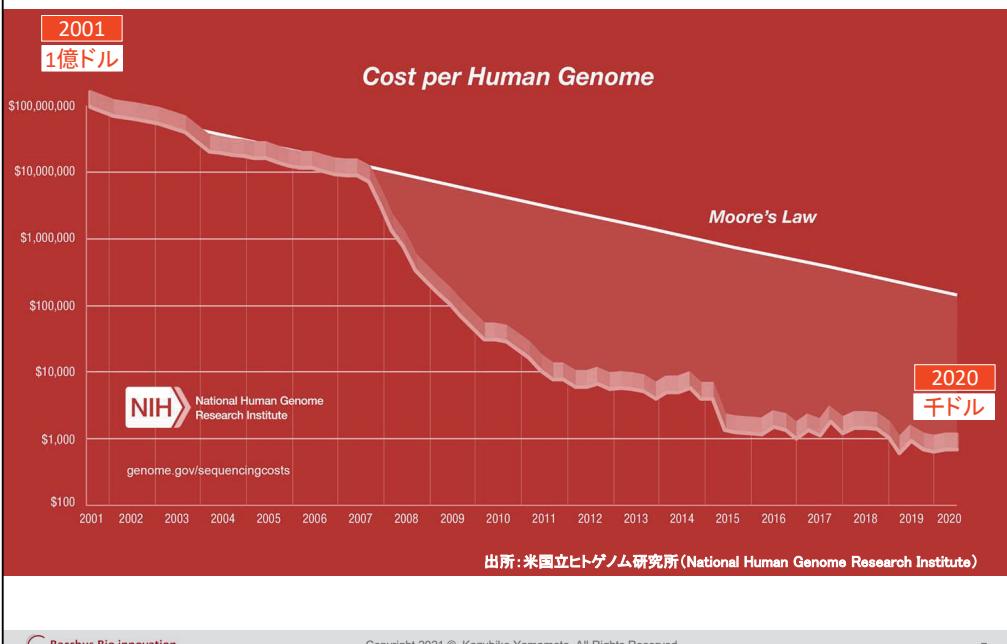
Bacchus Bio innovation

Copyright 2021 © Kazuhiko Yamamoto. All Rights Reserved.

6

スライド 6

## 背景にあるテクノロジーの革新（1）



Bacchus Bio innovation Copyright 2021 © Kazuhiko Yamamoto. All Rights Reserved. 7

スライド 7

## 背景にあるテクノロジーの革新（2）

近年、ゲノム編集、DNA合成といった技術に基づく合成生物学と、BD（ビッグデータ）、AI、Robotics（自動化技術）、IoT、Cloud等が統合化された デジタルプラットフォームとの融合が急速に進んでいる。

ゲノム解読コストの  
低減・短時間化

■ 2001年からの20年間で10万分の1以下に。一説では  
1990年から30年間で1億分の1以下といわれる。

IT/AI技術の進化

■ AIによりゲノム配列と生物機能の関係解明が進み  
デザインが可能に。

ゲノム編集技術の登場

■ ゲノム編集技術の登場により、狙った生物機能の発  
現が可能に。

DNA合成技術の進歩

■ 自動化技術の高度化と相まって、短期間かつ低コス  
トでデザインしたDNA配列の合成が可能に。

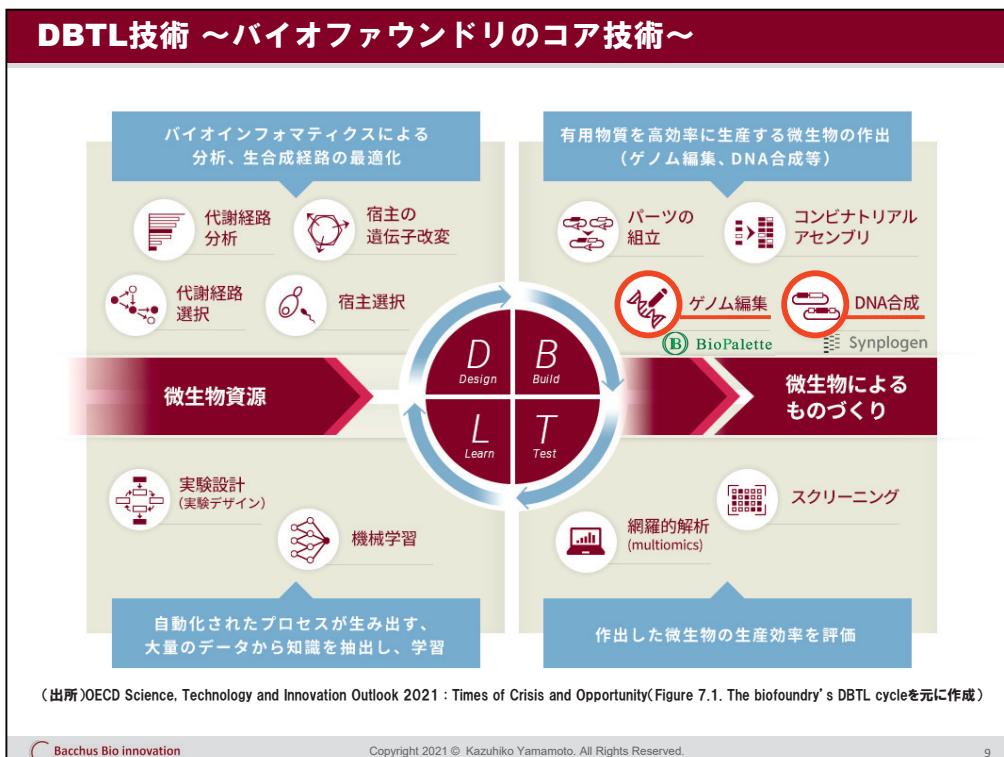
(出所)「バイオテクノロジーが生み出す新たな潮流(平成29年2月)」経済産業省生物化学産業課(一部加筆)

Bacchus Bio innovation

Copyright 2021 © Kazuhiko Yamamoto. All Rights Reserved.

8

スライド 8



スライド 9

### 背景にあるテクノロジーの革新（3）～日米バイオベンチャー比較～

ゲノム編集ベンチャー	CRISPR Therapeutics Editas Medicine Beam Therapeutics	切らないゲノム編集技術 BioPalette <small>神戸大学</small>
DNA合成ベンチャー	Twist Bioscience	長鎖DNA合成技術(OGAB法) Synplogen <small>神戸大学</small>
バイオファウンドリ	Amyris Ginkgo Bioworks Zymergen	統合型バイオファウンドリ Bacchus Bio innovation <small>神戸大学</small>

Bacchus Bio innovation Copyright 2021 © Kazuhiko Yamamoto. All Rights Reserved.

スライド 10

## 背景にあるテクノロジーの革新

生物を「観察する」「知る」「解析する」時代から、  
生物を「デザインする」「利用する」時代へ…。

「デジタル×バイオ」テクノロジーの革新を背景にした、  
ベンチャー企業の台頭等によって、生物の力を利用した  
有用物質の大量生産や安定供給が可能になる



農業、健康・医療、工業(物づくり)など、幅広い分野へ貢献  
～バイオエコノミー時代の到来～

 Bacchus Bio innovation

Copyright 2021 © Kazuhiko Yamamoto. All Rights Reserved.

11

スライド 11



神戸大学発バイオベンチャー

スライド 12

## 神戸大学発バイオベンチャーの概況（7社）

社名	資本金等	事業内容、最近のトピックス等
株バイオパレット 設立:2017年2月	15.5億円 (資本準備金含)	ゲノム編集ベンチャー 2020年、国内最大手VC(ジャフコ)に対する第三者割当増資を行い、10億円の追加資金調達を実現。2020年、神戸ポートアイランド内にある「神戸クリエイティブラボ(CLICK)」に、商用ラボを立ち上げた。
株シンプロジェン 設立:2017年2月	11.2億円 (資本準備金含)	DNA合成ベンチャー 2019年、国内最大手VC(ジャフコ)に対する第三者割当増資により10億円を調達。2020年、神戸ポートアイランド内にある「神戸クリエイティブラボ(CLICK)」に、商用ラボ/ファクトリーを立ち上げた。
ViSpot株 設立:2017年9月	4,000万円	ウイルス安全性評価機関 大手消費財メーカーとのジョイントベンチャー。同社からデットとエクイティで4.9億円の資金を調達。
アルジー・ネクサス株 設立:2019年1月	400万円	微細藻類関連バイオベンチャー 神戸大学と台湾・成功大學の研究成果を事業化。
株シンアート 設立:2019年3月	1,000万円	合成バイオ・合成化学関連ベンチャー 2020年、大手化学メーカーとの戦略的提携に基づくマイルストーン収入により、2020年度(創業2期目)で黒字化を実現。
株バッカス・ バイオイノベーション 設立:2020年3月	12.2億円 (資本準備金含)	統合型バイオファンドリ 2021年2月に12億円の資金調達を実施。今後の事業開始に向けて、資金調達活動を継続しつつ、商用ラボ/ファクトリーを立ち上げ中。
株イムノロック 設立:2021年4月	220万円	創薬ベンチャー 経口ワクチン(癌、コロナ等)など複数の有力なパイプラインを持つ。

Bacchus Bio innovation

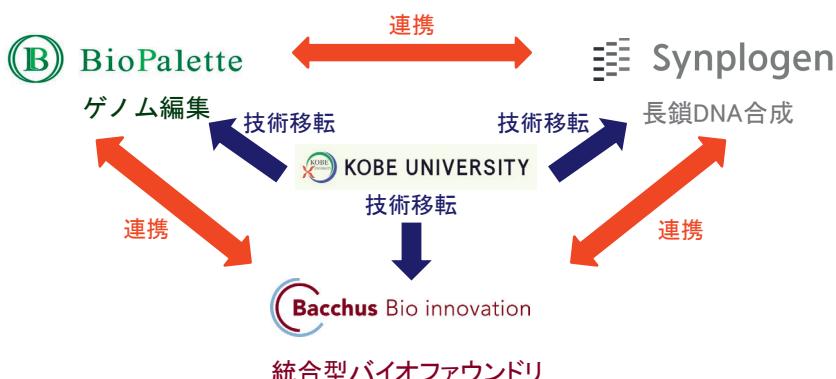
Copyright 2021 © Kazuhiko Yamamoto. All Rights Reserved.

13

スライド 13

## 神戸大学とバイオベンチャー（主要3社）の緊密な連携

- 神戸大学における継続的な新技術開発・ノウハウ蓄積
- 開発・蓄積された技術・ノウハウを、ベンチャー各社に技術移転することにより持続的にイノベーションを実現
- 主要バイオベンチャー3社の緊密な連携関係（CLIKへの集結）



Bacchus Bio innovation

Copyright 2021 © Kazuhiko Yamamoto. All Rights Reserved.

14

スライド 14



## ゲノム編集技術 産業応用における課題

スライド 15

### ゲノム編集技術～単独での商業化は容易ではない～

#### <遺伝子治療>

ゲノム編集技術に加えて、**ウイルスベクター等のデリバリー技術(DNA合成技術等)**とその**製造技術(プロセス開発:DBTL技術等)**が必要

#### <産業バイオ>

ゲノム編集技術に加えて、**コンビナトリアル手法(DNA合成技術等)**によってゲノム編集を試行するシステムと**スケールアップ技術(プロセス開発:DBTL技術等)**が必要



スライド 16

## ゲノム編集技術～単独での商業化は容易ではない～

### ＜課題解決に向けた取り組み＞

ゲノム技術に強みを持つ主要バイオベンチャー3社の緊密な連携  
関係の構築

- バイオパレット：ゲノム編集技術
- シンプロジェン：DNA合成技術
- バッカス・バイオイノベーション：DBTL技術



- 一般的に、初期段階ではバラバラに存在する個別の基盤要素技術（ブレークスルー）を戦略的かつ早期に連携
- 各産業におけるバリューチェーンを意識した統合的プラットフォームの構築による迅速な社会実装（イノベーション）



スライド 17



BioPalette

genome editing

<https://www.biopalette.co.jp/>

スライド 18



スライド 19

## パネリスト報告 2

### 勃興するバイオエコノミーと岐路に立つ日本 —「デジタル×バイオ」時代の到来—

神戸大学大学院  
科学技術イノベーション研究科 教授  
山本 一彦

バイオエコノミーという概念ですが、私はスライド3のようにまとめています。生物資源を活用して物質生産等を行って、持続可能な経済プラットフォームを作っていく。生物資源は、そもそもコンピュータが0と1というデジタル情報としてプログラミングされているかのごとく、A、G、C、Tという四つの塩基でプログラミングされています。しかし、つい最近までは、生物資源をデジタル情報として扱うまでのパワーがありませんでした。簡単に申しますと、生物資源のデジタル情報は情報量が膨大かつ複雑で、つい最近までアナログとして扱わざるを得ませんでした。それが最近、デジタル技術の飛躍的なコストパフォーマンスの向上によって、まさにデジタル情報として生物資源を扱えるようになりました。同時に、合成生物学の分野での技術革新が進み、ゲノム編集、DNA合成等の最先端のバイオテクノロジーが開発されてきました。

これらが整って、新しい経済プラットフォーム、バイオエコノミーを実現する可能性が出てまいりました。バイオエコノミーを実現することで人口増、食糧不足、水不足など現在人類が抱えている問題を解決し、人類と地球環境の共存を可能とするような経済プラットフォームにパラダイム転換を行っていくのが、今の潮流です。

では、バイオエコノミーを牽引（けんいん）するスタープレーヤーとはいかなるものなのでしょうか（スライド4）。当然、既存の大企業もございますが、現在、世界では、特に米国では資本金数百億円で創業され、短期間に上場して1兆円近くの時価総額を誇る巨大な有力ベンチャー企業がスタープレーヤーとしてバイオエコノミーを牽引しています。

例えば、DNA合成については2013年設立のTwist Bioscience社が、現在時価総額が約6000億円で、短鎖DNA合成の市場を寡占しています。また、先ほどの御報告にもございましたCRISPR-Cas9に基づいた遺伝子治療のゲノム編集企業、CRISPR Therapeutics社も時価総額約1兆円で、数々のパイプライン<sup>(1)</sup>を臨床に送り込んでいます。さらに、CRISPR-Cas9に続く新しいゲノム編集技術、ベースエディティング（塩基編集）に基づく遺伝子治療の会社として、Beam Therapeutics社が2017年に設立され、2020年に上場して、現在の時価総額は約7000億円になっております。そしてこちらも、着実にパイプラインの開発を続けております。

個別の基盤要素技術を集積させて物質生産を総合的、技術的にプロデュースする会社がバイオファウンドリと呼ばれています（スライド5）。ここで、バイオファウンドリ分野における有力3社について簡単に触れておきます。

2003年設立のAmyris社は、現在、時価総額4000～5000億円。Ginkgo Bioworks社は先週

---

(1) 新薬又はその他の医療用製品などの候補を指す。

2021年9月17日、上場されました。上場時の時価総額は1兆6000億円で、2000億円近い資金を上場時に取り込みました。また、バイオファウンドリのZymergen社は2021年4月に上場し、現在時価総額は1500億円ほどです。2021年の8月3日に当面の主力商品である微生物を使って製造した原料を使用する高機能フィルム素材（製品）が、ラボレベルでは開発ができているものの、大量生産するための委託先が見つからない、コストの関係からマーケットのサイズが当初より小さくなるということが判明しました。この結果、本年度、来年度、大きな売上を計画していましたが、それが0になると発表するに至りました。それと同時にCEOが辞任して、米国では1日で株価が80%下落しました（スライド6）。暴落です。しかし、同社には、上場時に調達した5億ドル、500億円以上の資金が手元に残っておりました。しかも、主要な基盤要素技術は集積されておりましたし、またDBTL技術（後述）のプラットフォームを使った様々な具体的なビジネスもあるということで、米国の著名な投資家で既存株主であるキャシー・ウッド（Cathie Wood）氏らが同社株式を買い増し、株価は若干持ち直しております。

これから見て取れるのは、スタープレーヤーは出ておりますが、まだ誰が勝者になるかは明確ではございません。バイオエコノミーは、まだ始まりの始まりの段階だということだと思います。

スライド7は、ヒトのゲノムを読むのにかかるコストです。20年前の2001年には1億ドル、100億円強かかっておりました。今は1,000ドル、10万円くらいでしょうか。足元はもう少し下がって数百ドルといわれています。10万分の1にコストは低減しております。

ゲノム編集、DNA合成といった技術に基づく合成生物学の進展と、デジタルのプラットフォームの融合、まさに「デジタル×バイオ」と呼べるかと思いますが、こちらの融合が急速に進んでおります（スライド8）。ゲノム解読のコストに代表されるデジタルのコスト低減は、2001年からの20年で10万分の1、一説ではヒトゲノム計画が始まった1990年から30年間で1億分の1以下に下がりました。また、実際のプラットフォームのコストも飛躍的に低減されたことにより、様々なデジタル上での試行錯誤が可能になり、AIに代表される解析プログラムの開発も進んでおります。同時に、バイオ側では、ゲノム編集技術が登場しました。そして、編集ではなくDNAをゼロから合成する技術が登場し、バイオテクノロジーとデジタル技術の融合が進んでおります。

ざっと代表的プレーヤーを比較してみます。①ゲノム編集技術の登場という視点、②DNA合成技術の進歩という視点と、それらの基盤要素技術を使った後ほど紹介する③DBTL技術（デジタル×バイオの総合プロデューサー的な役割）という視点、これら三つの視点で見てまいります。

DBTLというのは、生物をデザイン（Design）して、有用物質を生産できるようにビルト（Build）して、作り込んで、それが想定どおり動いているかテスト（Test）して、そこから学習（Learn）します。学習して、さらに理解、その次にデザインの効率を上げていくという一定のサイクルです（スライド9）。工学では当たり前のことですが、これまで生物では難しかったことです。それが現在では可能になりました。その中で重要な基盤要素技術であるのはゲノム編集とDNA合成です。

米国の場合、現在、ゲノム編集ベンチャーは遺伝子治療を中心に医療分野で事業化を進めております。我が国にもゲノム編集に立脚したベンチャー企業が複数あります（スライド10）。私が在籍しております神戸大学は、CRISPR-Cas9に続くベースエディティング（塩基編集）と

いう非常に有望なゲノム編集技術について、神戸大学が持っている基本特許に基づくバイオパレット社を創業しております。

DNA合成につきましては、短鎖DNA合成は一旦米国のTwist Bioscience社が勝者になっていますが、中ぐらいの長さ及び長いDNAの合成については、現状、まだ商業化が実現されているとは言いがたい状況です。その中で、神戸大学の技術開発に基づく長鎖DNAの「OGAB法」という技術に基づくシンプロジェン社を創業して、現在、遺伝子治療の分野を中心に、長鎖DNA合成のビジネス化を着々と進めております。

DBTLに基づく物質生産の総合プロデューサー企業、バイオファウンドリは、米国では先ほど御紹介した3社が中心となっていますが、勝者がこの3社のどこになるか、はたまたヨーロッパ、中国、別のところから出てくるかまだまだ予断を許しません。一方、日本にはバイオファウンドリという企業は、今のところバッカス・バイオイノベーション1社しかありません。これがアジア初のバイオファウンドリです。現在巨額の資金調達活動を続けながら立ち上げ中で、年が明けましたら本格的にサービス展開ができる予定です。

生物を「観察する」、「知る」、「解析する」時代から、生物を「デザインする」、「利用する」時代へと移っております（スライド11）。そのことによって、有用物質の大量生産や安定供給を可能にしたい。それによって地球環境と人類の共存を図ることを考える。それがバイオエコノミーの結果と考えます。

神戸大学発バイオベンチャーの主要な3社については少し触れましたが、ゲノム編集のバイオパレット社、DNA合成のシンプロジェン社、統合型バイオファウンドリであるバッカス・バイオイノベーション社となっております（スライド13）。神戸大学における継続的な新技術開発のノウハウの蓄積が背景にあり、そちらをゲノム編集、DNA合成、バイオファウンドリの各3社に技術移転を行っています（スライド14）。さらにこの3社を令和2（2020）年10月に神戸のポートアイランドにできたウェットラボ<sup>(2)</sup>の巨大ビル（クリエイティブラボ神戸）に集積させました。同じフロアを中心には3社を集約し、連携を図っています。

なぜこのようなことを考えたかということが報告の最後の内容です（スライド16）。例えば、ゲノム編集技術単独では、商業化はなかなか難しい。例えば、遺伝子治療について言えば、ゲノム編集技術に加えて、ウイルスベクター等のデリバリー技術、これにはDNA合成技術等が必要です。さらにその製造技術、プロセス開発が必要です。これにはバイオファウンドリ(DBTL技術)が必要ということです。これらが整わないと本格的な社会実装は進みません。

産業用バイオにおいても、例えばゲノム編集技術だけではなかなか難しくて、微生物による物づくりを効率的に行うために、ゲノム編集にコンビナトリアル手法（DNA合成技術等）を組み合わせたりする技術<sup>(3)</sup>やDBTL技術、さらにはスケールアップを行うための技術が必要になります。

ゲノム技術に強みを持つ、例えば神戸大学が作りましたベンチャー3社は、緊密な連携関係を構築することで、一般的に初期段階ではバラバラに存在する個別の基盤要素技術（ブレークスルー）を、戦略的かつ早期に連携させて、各産業におけるバリューチューンを意識した統合的プラットフォームを構築する。それを迅速に構築して社会実装することを通じたイノベーションの実現を目指しております（スライド17）。

(2) 実際に薬品、装置、実験生物などを使った実験を行える研究施設。

(3) 組合せ論的に（combinatorial）多種多様なDNAを効率的に合成し、ゲノム編集に活用する技術。

本日のテーマであるゲノム編集の領域において神戸大学と致しましては、バイオパレット社を創業し、こちらを中心にしてゲノム編集技術によってバイオエコノミーの実現に貢献してまいりたいと考えております（スライド18）。御清聴ありがとうございました。

（やまもと かずひこ）