

## 生物機能を利用した物質生産分野の 技術戦略策定に向けて

2017年2月

<b>1</b> 章	生物機能を利用した物質生産技術の概要	2
1-1	バイオエコノミーと工業用途の拡大予測	2
1-2	我が国におけるバイオエコノミーへの対応と物質生産分野への期待	3
<b>2</b> 章	生物機能を利用した物質生産技術の置かれた状況	4
2-1	市場規模(国内・海外)	4
2-2	個別技術の研究開発動向	6
2-3	各国のバイオエコノミー関連政策と研究開発投資	8
<b>3</b> 章	生物機能を利用した物質生産分野の技術課題	11
3-1	細胞内プロセスの設計	11
3-2	設計に基づいた遺伝子改変	12
3-3	生物を利用した物質生産の最適化	12
<b>4</b> 章	おわりに	13

TSCとはTechnology Strategy Center(技術戦略研究センター)の略称です。

# 生物機能を利用した物質生産分野の技術戦略策定に向けて

## 1章

### 生物機能を利用した物質生産技術の概要

#### 1-1

#### バイオエコノミーと工業用途の拡大予測

生物の機能を利用した技術（バイオテクノロジー）は、健康・医療（新治療法や診断法など）、一次生産（食料、飼料、繊維など）、工業（酵素、バイオ燃料、バイオプラスチックなど）といった幅広い分野で使われている（図1）。また、公衆衛生の向上、省エネルギー、地域社会の発展など、

幅広い社会課題の解決にも貢献が期待され、米国や欧州などでは、OECDの「The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy Agenda」（2009年）以降、バイオテクノロジーと経済活動を一体化させた「バイオエコノミー」という概念に基づく総合的な戦略を発表している。

上述のOECDのレポートによると、バイオエコノミー市場は、2030年にはOECD諸国のGDPの2.7%（約1.6兆ドル、約192兆円）に成長し、特に、酵素やバイオ燃料、バイオプラスチックといった物質生産等の工業用途が、全体の39%に達すると予測されている。

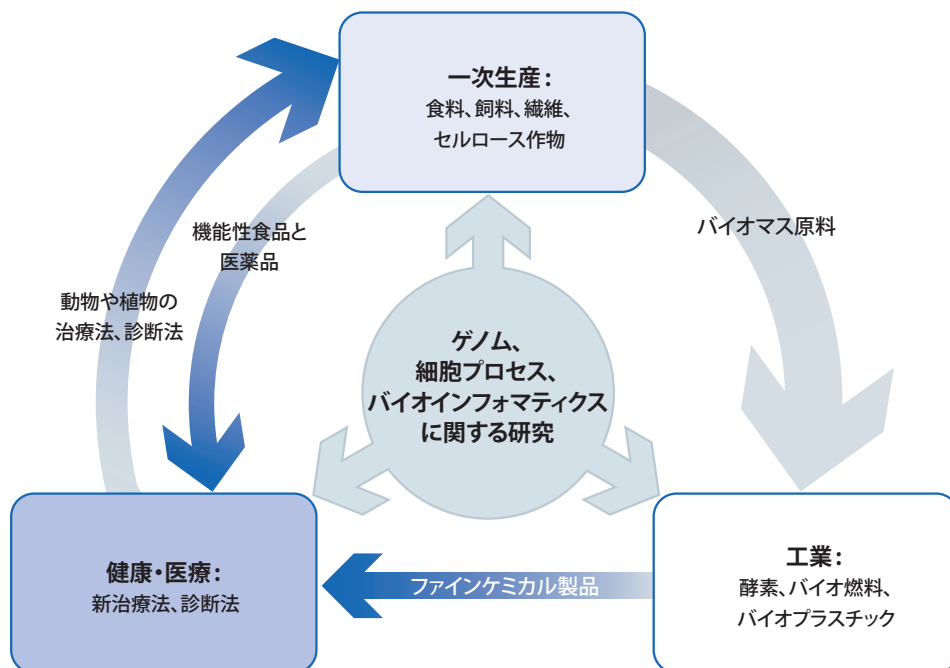


図1 バイオテクノロジーの関係図<sup>※1</sup>

出所：OECD『The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy Agenda』（2009）

DOI：10.1787/9789264056886-en

※1 NEDO 技術戦略研究センターにて翻訳。

# 生物機能を利用した物質生産分野の技術戦略策定に向けて

## 1 我が国におけるバイオエコノミーへの -2 対応と物質生産分野への期待

我が国には、微生物を用いた物質生産（特に発酵）に関する長年の蓄積があり、この分野の研究開発では広い裾野を持つ。また2015年の大村智先生のノーベル賞受賞に代表されるように、バイオテクノロジーの基礎研究も盛んに行われてきている。

さらに、近年の次世代シーケンサー等分析装置の急速な進歩により、各種オミクスデータ（遺伝子やその発現系に関わる生物情報）が蓄積されつつあり、これらの情報を基にターゲット物質の品質や生産性を向上させる遺伝子改変の設計が現実味を帯びてきた。また、新しいタイプの遺伝子改変技術であるゲノム編集技術（表1）の登場によって、高確率で意図したとおりの遺伝子改変を行うことや、これまで遺伝子改変のために多大な手間と費用を必要としていた倍数体生物（植物等）の改変を効率的に行える可能性が広がってきた。このような背景により、「細胞内プロセスの設計」、「設計に基づいた遺伝子改変」、「生物を利用した

表1 主な遺伝子改変・制御技術の種類<sup>※2</sup>

	主な種類	主要な方法
遺伝子改変技術	突然変異導入	化学変異原曝露、放射線放射、重イオンビーム
	遺伝子組換え	
	ゲノム編集	ZEN、TALEN、CRISPR/Cas9
遺伝子制御技術	発現制御	RNAi、エピゲノム
	発現場所制御	オルガネラ改変

■ は従来技術

出所：NEDO技術戦略研究センター作成（2016）

物質生産の最適化」というサイクル（図2）を構築し、ターゲット物質を計画的に高効率・高品質で生産することが可能になってきたと言える。

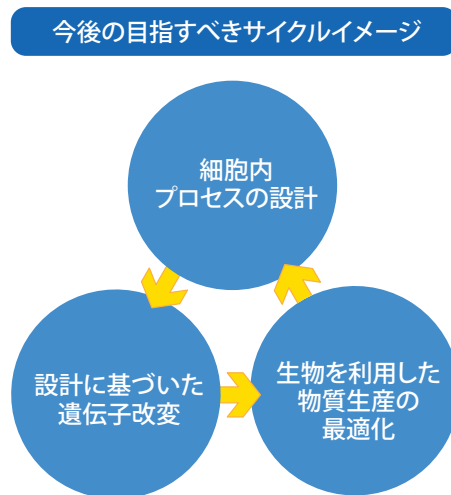


図2 生物を利用した物質生産の課題解決サイクルイメージ  
出所：NEDO技術戦略研究センター作成（2016）

米国国防高等研究計画局（DARPA）における「Living Foundries」プログラム（2011年～）においても、「設計（design）⇒構築（built）⇒試験（test）⇒学習（learn）」という同様の物質生産サイクルが提唱され、ロボットと多数のDNAシーケンサーを用い、試行数を増やすことで有用な改変を多く獲得するアプローチが採られている。

一方、資金や人員が限られる我が国では、複雑なオミクス情報全体をあらかじめ総合的に計算した上で緻密な設計を行うアプローチで、より複雑で高度な物質生産を高効率に行えるトータルシステムを開発することを狙って、ビッグデータや人工知能等の情報処理技術と最先端のバイオ技術を融合させ、より高度に機能をデザインした生物細胞“スマートセル”を活用した産業を「スマートセルインダストリー」と定義し、その構築に向けた取組を始めている。

※2 ZFN (Zinc Finger Nuclease)、TALEN (Transcription Activator-Like Effector Nucleases)、CRISPR / Cas9 (clustered regularly interspaced short palindromic repeats / CRISPR associated proteins)、RNAi (RNA interference)

# 生物機能を利用した物質生産分野の技術戦略策定に向けて

## 2章 生物機能を利用した物質生産技術の置かれた状況

### 2-1 市場規模（国内・海外）

我が国のバイオ産業の市場規模は2015年に約3兆円で、そのうち工業分野は11%である（図3）。一方、米国では、約38兆円超<sup>※3</sup>の市場規模があり、工業分野の割合は32%超に達している（図4）<sup>※4</sup>。米国のバイオテクノロジー収益の推移（図5）からは、工業分野の成長率が2000年代初頭から約10%、2008年頃からは約20%と加速的に拡大していることがわかる。

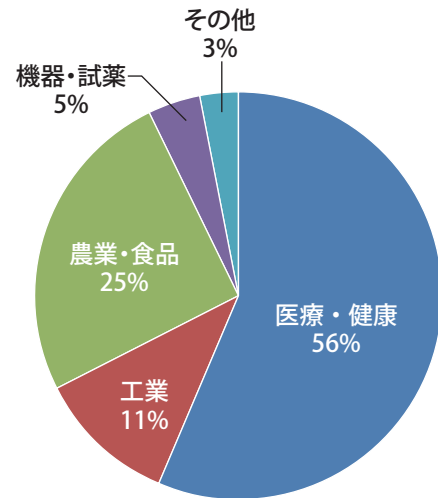


図3 国内バイオ産業の市場内訳(2015年)

出所：日経バイオ年鑑2016(日経BP社)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

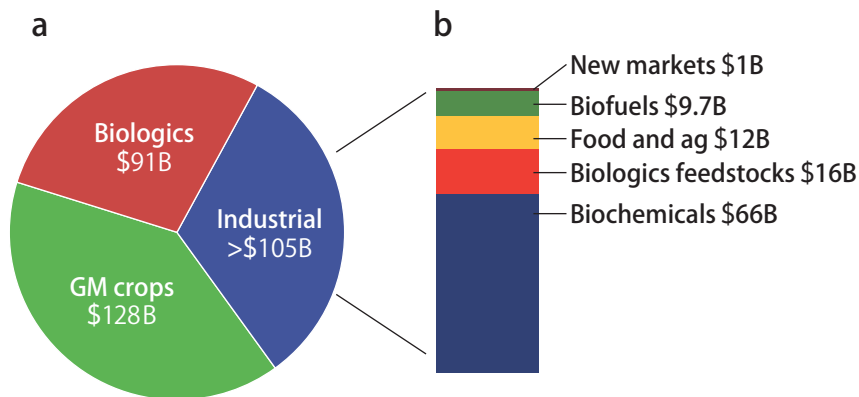


図4 2012年の米国バイオテクノロジー業界の収益(3240億ドル超)。(A) 総収益に対するサブセクター毎の貢献 (B) 工業分野の内訳

出所：NATURE BIOTECHNOLOGY VOLUME 34 NUMBER 3 MARCH 2016

※3 3240億ドル超を1ドル=117円で換算。

※4 積み上げている個々の製品・サービスは日本国内と米国では異なる。

# 生物機能を利用した物質生産分野の技術戦略策定に向けて

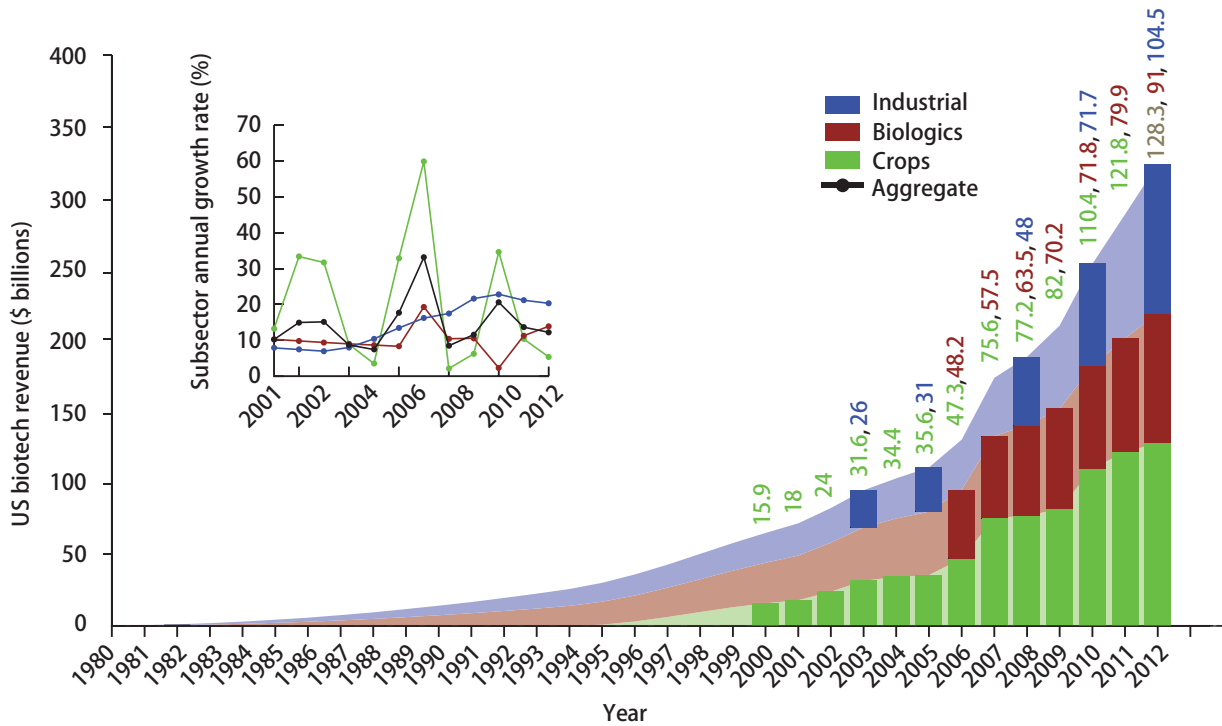


図5 1980年～2012年の米国バイオテクノロジー業界の収益推移（推計値）

出所：NATURE BIOTECHNOLOGY VOLUME 34 NUMBER 3 MARCH 2016

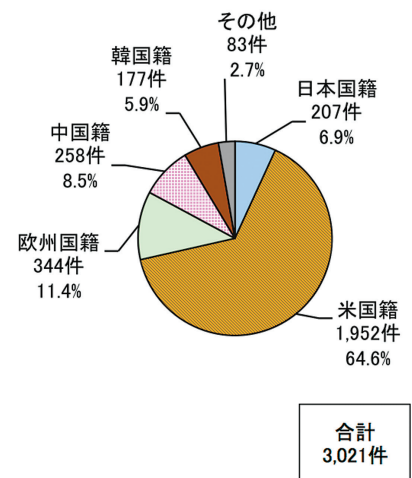
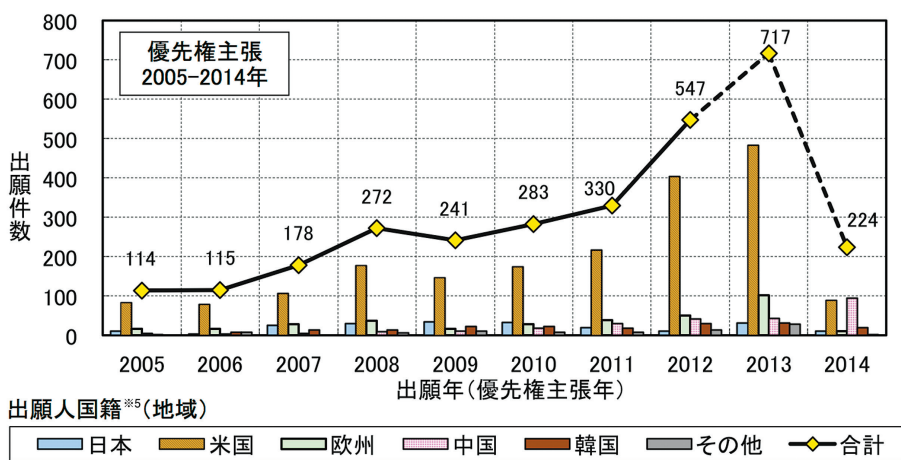
# 生物機能を利用した物質生産分野の技術戦略策定に向けて

## 2-2 個別技術の研究開発動向

### (1) ゲノム編集技術の特許

遺伝子改変技術のうち、ゲノム編集技術では、TALEN (2010年) や CRISPR/Cas9 (2012年) が開発されて以

降、出願数が加速的に増加している。また、出願人を見ると、米国籍が非常に多く、ランキング上位もほぼ米国が独占している (図6)。



順位	出願人	出願件数
1	Sangamo BioSciences, Inc. (米国)	86
2	Harvard College (米国)	64
3	Massachusetts Institute of Technology (米国)	61
4	Dow AgroSciences LLC (米国)	30
5	DuPont (米国)	28
6	Cellectis (フランス)	26
7	University of California (米国)	25
8	Sigma-Aldrich Co. (米国)	23
9	University of Texas System (米国)	21
10	BASF (ドイツ)	16
	General Hospital Corporation (米国)	16

図6 ゲノム編集技術に関する特許出願件数とランキング (2005 ~ 2014年)

出所：平成28年度NEDO委託調査「バイオエコノミーの現状分析とスマートセルが変える未来像に関する調査」(委託先：三菱化学テクノリサーチ、2016)

※5 出願人国籍は、最先の優先権主張国で代用。

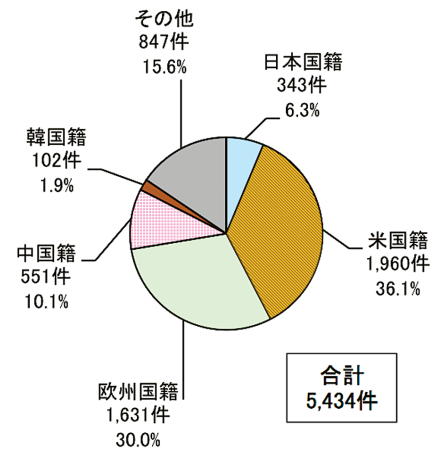
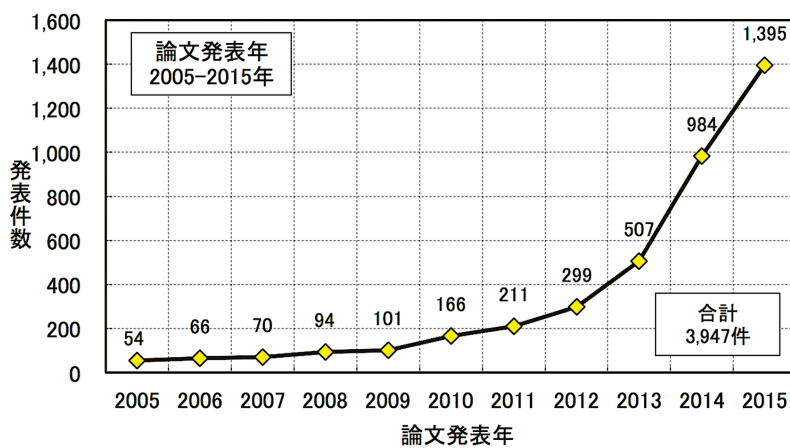


# 生物機能を利用した物質生産分野の技術戦略策定に向けて

## (2) ゲノム編集技術の論文

ゲノム編集技術に関する研究は、2012年以降、急激に発表論文数が増加している分野であることがわかる。特許出願人に比べて米国籍の割合は低いが、ランキングの1位から6位までが全て米国で占められている(図7)。

なおランキングの大半は大学が占めているが、特許件数で1位であった米国企業のSangamo BioSciencesがランキングされていることは注目に値する。同社はゲノム編集技術の医療応用に取り組んでいる。



順位	研究機関・企業	論文件数
1	Harvard Medical School (米国)	163
2	University of California, Berkeley (米国)	100
3	Massachusetts Institute of Technology (米国)	88
4	Massachusetts General Hospital (米国)	80
5	Sangamo BioSciences, Inc. (米国)	78
6	Broad Institute (米国)	71
7	中国科学院 (中国)	63
8	京都大学	60
	広島大学	
	Institut Pasteur, Paris (フランス)	

図7 ゲノム編集技術に関する論文発表件数とランキング (2005 ~ 2015年)

出所：平成28年度NEDO委託調査「バイオエコノミーの現状分析とスマートセルが変える未来像に関する調査」(委託先：三菱化学テクノリサーチ、2016)

## 2 各国のバイオエコノミー関連政策と -3 研究開発投資

1章に記載したように、OECD のレポートを契機に各国でバイオエコノミーに関するレポートが発表されるようになった。近年の各国における主なバイオエコノミー関連政策は以下のとおりである。

### (1) 欧州連合 (EU)

EU は、2012年にバイオエコノミー戦略である「Innovation for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe」(European Commission, 2012)を公表、7年間で約5,180億円を投資し、2030年までに石油由来製品の30%、輸送燃料の約25%を生物由来に置換するとした。また、2014年にはHorizon 2020において、EUはICT等とともにバイオを重要課題に位置付け、社会的な課題解決に向けて、「食糧安全保障」、「持続可能な農業及びバイオエコノミー」、「安全かつクリーンで、効率的なエネルギー」、「気候への対処、資源効率及び原材料」等を取り上げた。

### (2) 英国

英国では、2015年にバイオエコノミー指針である「Building a High value bioeconomy」(HM Government, 2015)を公表、合成生物学の実用化を加速してバイオエコノミーを推進する戦略として、目標値を明確化した。2016年には、バイオエコノミー戦略として、「Biodesign for the Bioeconomy UK Synthetic Biology Strategic Plan」(Synthetic Biology Leadership Council, 2016)が発表され、「合成生物学は、設計・構築・試験・分析のサイクルを加速させて生物をデザイン(BIO-DESIGN)する方法に進化し、経済的、社会的ベネフィットを与える」としている。また、バイオエコノミーを達成するツールとして合成生物学を位置付け、社会実装の段階に入りつつあると宣言している。

### (3) ドイツ

ドイツでは、2010年にハイテック戦略2020 (Hightech-Strategie 2020)が発表され(2006年に発表されたハイテック戦略の更新)、石油依存の製造プロセスを見直し、2013年にバイオエコノミー国家戦略、2014年に行動計画を打ち出すことが示された。また、この年に発表された「National Research Strategy BioEconomy 2030」(Federal Ministry of Education and Research)では、知識ベースのバイオエコノミーが創出するチャンスを活かし、バイオベースの製品の成長を加速することで、ドイツが主要なイノベーションセンターとなって国際競争力を強化することが示された。2015年には、世界での主導的役割を目指し、第1回グローバルバイオエコノミーサミット(バイオエコノミー会議)をベルリンで開催した。

### (4) 米国

米国では、2012年に「National Bioeconomy Blueprint」(The White House)が発表された。さらに、Biomass Research and Development (R&D) Boardによる「Billion Ton Bioeconomy Vision」や2016年の「Federal Activities Report on the Bioeconomy」(Federal Agencies, 2016)には、2030年に10億トンのバイオマスを用い、化石由来燃料25%を代替、約2,300万トンのバイオ由来製品と850kWhの電力供給を目指すとともに、110万人の雇用と約28兆円の市場の創出といった目標も記載されている。

他にも、フィンランドやマレーシア等でもバイオエコノミーに関する政策が近年発表されており、バイオエコノミーに関する様々な取組が世界各国で行われ始めている状況にある。また、我が国を含む各国では、バイオテクノロジー関連研究への投資も進められている(表2)。



# 生物機能を利用した物質生産分野の技術戦略策定に向けて

表2 バイオテクノロジー関連研究への投資

国・地域	プロジェクト名 (団体名)	研究開発費	支援母体	主な実施者	プロジェクト概要
欧州連合	Bio-Based Industries Joint Undertaking (2015～)	約96億円 (7,800万ユーロを1ユーロ＝123円で換算)	EU、 産業界	—	化石燃料ベースの素材を代替するバイオ素材に関する研究から、不毛な耕作限界地で育てられたカルドン等の油料作物やバイオ潤滑剤、化粧品、バイオプラスチックへの変換を狙った工業規模の検証等、合計10プロジェクトが始動。
英国	Industry Biotechnology Catalyst (2010～2015)	約92億円 (7,500万ユーロを1ユーロ＝123円で換算)	Innovate UK, BBSR, EPSRC	Biome Technologies, Algaecytes Ltd, Palm Paper Ltd, Institute of Food Research 等	生物資源の持続可能な活用による材料、化学薬品、バイオエネルギーの加工・生産に関する研究開発支援を目的としたプログラム。セルロース化合物からバイオポリエステル生産、海藻からの嫌気性消化によるバイオメタン燃料の生産等、20以上のテーマを実施。
	SynbiCITE (2013～)	約14億円 (1,000万ポンドを1ポンド＝142円で換算)	EPSR, BBSR, TSB	Imperial College London, Microsoft, FUJIFILM Diosynth, Cambridge University, Oxford University 等	合成生物学での産学両セクターの研究を融合し、研究の事業化推進を目的としたセンターを設立。拠点はImperial College London。英国国内の17の大学・学術機関の研究資源と研究者、及び13の企業(マイクロソフト、シェル、グラクソ・スミスクライン等)が参加。
ドイツ	BioSC	約71億円 (5,800万ユーロを1ユーロ＝123円で換算)	ノルトライン・ヴェストファーレン(NRW)州 イノベーション科学研究省	—	NRWは欧州の主導的なバイオエコノミー拠点を目指すため、ユーリッヒ研究センター、アーヘン工科大学、ボン・デュッセルドルフ総合大学を中心に、統合的なバイオエコノミーの基盤開発に向けたバイオエコノミー科学センター(BioSC)を設立。「バイオポリマー/機能化表面及び材料」、「バイオ燃料」、「バイオ医薬品、診断及び診断技術」の3つの重点プロジェクトを実施。
米国	Advanced Tools and Capabilities for Generalizable Platforms (ATCG) (2011～2013)	約35億円 (3,000万ドルを1ドル＝117円で換算)	DARPA	MIT, J. Craig Venter Institute等	生物学的なデザイン、構築、評価、学習のサイクルに係る時間とコストを10分の1にし、新素材、燃料、医薬品等の開発の効率化を狙う。
	1000 Molecules Program (2013～)	約129億円 (1.1億ドルを1ドル＝117円で換算)	DARPA	MIT, Harvard University等	ATCGで開発したツールを活用し、従来の石油系原料を使用して作成することが不可能な物質の創製、既知物質の高効率生産、新規物質の開発のための、1,000分子もの原料化合物の合成を目指す。

# 生物機能を利用した物質生産分野の技術戦略策定に向けて

国・地域	プロジェクト名 (団体名)	研究開発費	支援母体	主な実施者	プロジェクト概要
日本	革新的バイオマテリアル実現のための高機能化ゲノムデザイン技術開発 (2012～2016)	約25億円	経済産業省	高機能遺伝子デザイン技術研究組合 (TRAHED) など	大規模なゲノム情報を基盤とした遺伝子設計技術と長鎖DNA合成技術の融合により、新たに設計された遺伝子クラスターを組み込んだ微生物を作製する。これにより、従来は合成が困難であった物質の生産、有用物質生産効率の大幅な向上、環境負荷の低減及びこれら微生物による生産プロセスの開発効率を飛躍的に向上させる技術の開発を目指す。
	密閉型植物工場を活用した遺伝子組換え植物ものづくり実証研究開発 (2011～2015)	約5億円	経済産業省	産総研など	密閉型遺伝子組換え植物工場において、ワクチン・機能性食品等の高付加価値な有用物質を高効率に生産するための基盤技術開発及び実証研究事業。
	植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発 (2016～2020)	約17億円 (28年度)	経済産業省、NEDO	産総研、神戸大など	情報技術を利用した合理的な遺伝子設計と、大規模な遺伝子組換えの融合による物質生産を目指す。
	ImPACT「超高機能構造タンパク質による素材産業革命」 (2014～2018)	—	内閣府、科学技術振興機構	理化学研究所、慶應義塾大、スパイバーなど	生物由来の構造タンパク質の異次元性能発現メカニズムの解明と基盤技術群を確立し、超高機能なタンパク質をつくる遺伝子を微生物に組み込んで人工的に大量生産し、産業用素材として活用することを目指す。
	SIP「次世代農林水産業創造技術(アグリイノベーション創出)」 (2014～2018)	約30億円 (26年度)	内閣府、農研機構	農研機構、筑波大、東京大、森林総合研究所、水産総合研究センターなど	ロボット、ICT、ゲノム等の先端技術による超省力・高生産な日本型スマート農業モデルを確立し、知財化・標準化によって海外展開を狙う。育種技術関係では、ゲノム編集技術、放射線育種技術、オミクス解析技術等を利用して、これまで長い年月を要した品種開発の期間を短縮する技術を確立し、国内外の多様なニーズに対応した作物の開発を目指す。
	新学術領域「生物合成系の再設計による複雑骨格機能分子の革新的創成科学」 (2016～2020)	—	文部科学省、日本学術振興会	東京大、北里大、東京工業大など	生合成システムの合理的な再構築による効率的、実用的な物質生産系を構築し、希少有用物質の安定供給や、天然物を凌ぐ新規有用物質の創出等を目指す。

出所：各種資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2016)

# 生物機能を利用した物質生産分野の技術戦略策定に向けて

## 3章 生物機能を利用した物質生産分野の技術課題

我が国のバイオエコノミー、とりわけ物質生産分野を発展させるためには、1章で示した図2の課題解決サイクルを構成する「細胞内プロセスの設計」、「設計に基づいた遺伝子改変」、「生物を利用した物質生産の最適化」の各技術についての迅速な研究開発が必要である。以下にそれぞれの課題を記す。

### 3-1 細胞内プロセスの設計

近年、シーケンス技術の向上や低コスト化などにより、大量のゲノム情報が蓄積されつつある(図8)。また、その他の各種オミクス情報に関する基礎研究も盛んに行われている。しかし、これらのオミクス情報を統合した細胞内プロセスの完全な再構築には至っていない。

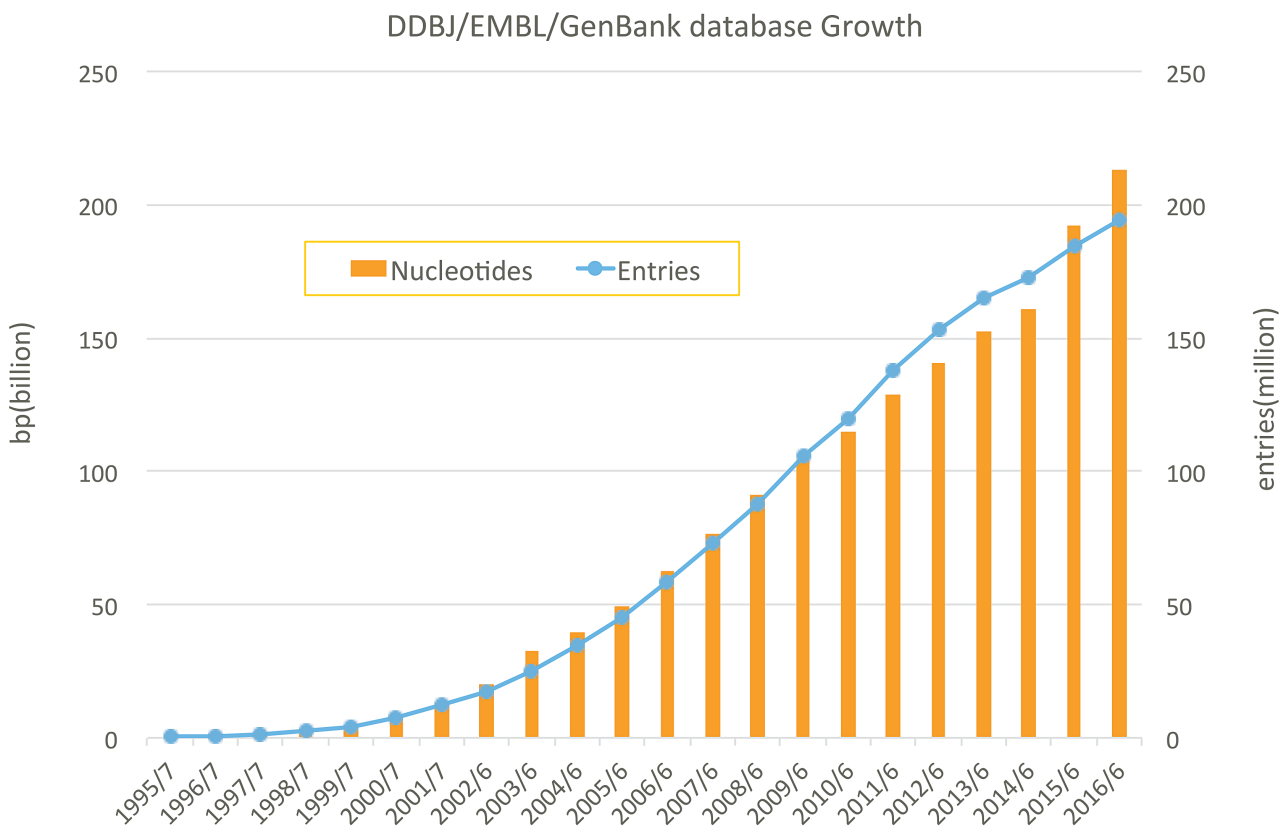


図8 日米欧の塩基配列データベースの推移

出所：DDBJ (DNA Data Bank of Japan) ホームページを基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2016)

# 生物機能を利用した物質生産分野の技術戦略策定に向けて

今後は、これらのオミクス情報を高精度かつ体系的に取得し、機械学習等の情報科学・統計学的な手法によって統合的に解析する技術の確立が必要である。すなわち、多階層のオミクス情報を互いに紐付けするためのマルチオミクス計測技術（同一検体の各種オミクスデータの連続した変化を取得する技術）と、各階層で情報形式が異なるオミクスデータを統合的に扱うための新規理論・情報処理技術の開発が課題となる。

これらの技術の確立は細胞による物質生産の、よりシステムティックな制御を可能とし、高性能な生産生物の作出の試行錯誤に要していた時間コストやエネルギーコストの大幅な削減が期待される。また、細胞が本来持っている代謝経路の利用だけでなく、新たな代謝経路の導入・制御により、細胞の生産能力を最大限に活用することも期待できる。

## 3 -2 設計に基づいた遺伝子改変

1章で述べたとおり、近年、ZFN、TALEN、CRISPR/Cas9といったゲノム編集技術が次々と登場したことにより、高度な正確性をもって遺伝子改変を行えるようになっただけでなく、これまで遺伝子改変が困難であった生物における改変の成功確率も上がってきた。しかし、これらのゲノム編集技術にも、以下のような課題がある。

### ① ZFN

最初に開発されたゲノム編集技術であり、広く産業利用されているが、標的遺伝子の認識部位に制限が多く、設計と合成に時間と費用がかかる。また、編集の際には二量体の形成が必要であり、1回の操作で編集できるのは1遺伝子のみ、標的DNAの立体構造（クロマチン構造やメチル化）によって改変効率に影響を受ける、といった課題があるほか、免疫応答などによる細胞毒性の問題が起こりやすい。

### ② TALEN

標的遺伝子の認識の正確性は比較的高いが、認識部位の作成はZFNよりは簡便であるものの、やはり時間がか

かる。またZFNと同様、二量体の形成が必要であり、1回の操作で編集できるのは1遺伝子のみ、標的DNAの立体構造による影響を受ける、といった課題があるほか、細胞毒性の問題が起こりやすい。

### ③ CRISPR/Cas9

標的遺伝子の認識にRNAを使うため、タンパク質を使うZFNやTALENに比べて、デザインした認識部位の配列の導入が簡便である。また、一度に複数の遺伝子の編集ができる。ただし、オフターゲット（目的以外の部位で編集が起こること）の影響が指摘されている。

また、物質生産の効率を高めるためには、ゲノム編集技術だけでなく、化学修飾を制御するエピゲノム編集技術や、転写後遺伝子サイレンシング等も組み合わせて遺伝子発現を制御していかなければならない。

## 3 -3 生物を利用した物質生産の最適化

### (1) 生物を利用した物質生産における生物種ごとの特徴

生物を利用した物質生産においては、利用する生物種によって、生産できる物質や生産速度・開発速度、製造コスト等に違いがあるため、目的の物質生産に合った生物を選択する必要がある。一般的に、微生物での生産は開発速度が早いですが、生産できる物質に限られる。動物細胞や昆虫は、医薬品原料などの有用な物質の生産が可能だが、製造コストが高くなりやすい。植物個体での生産は、製造コストが比較的安く、環境安全性も高いと言えるが、植物個体の成長に時間がかかるため、開発速度は遅くなる。植物細胞を用いると植物個体より開発速度は上がるが、製造コストは多くの場合、上がってしまう。

## (2) 植物と微生物の課題

(1) で示した物質生産に利用する生物種から、工業用途として植物と微生物を選択し、以下に各課題を述べる。

### ①植物

植物は、栽培環境が二次代謝系を大きく変動させることが知られており、近年の人工環境栽培技術の進歩に伴い、遺伝子制御に加えて、環境制御による生産効率向上技術の開発が期待されている。密閉型の植物工場では、環境制御による生産効率を向上させるノウハウが蓄積されてきているが、個々の植物に特定の物質を生産させるためには、その植物ごとの最適化が必要であることが多い。従って、新たな有用化合物を効率的に生産するためには、遺伝子制御技術に加えて環境制御による変動誘因技術の研究開発が重要である。

### ②微生物

微生物は、ゲノムが小さく単純であるため、長鎖DNAの導入など大幅な遺伝子改変が可能であり、設計図さえ決めれば、目的の改変生物をつくるのが比較的容易である。また、増殖期間が短いため、開発速度を上げることが可能である。

一方、微生物は植物のように多様な代謝物を作ることができないため、工業利用においては、量産化のための培養条件等の最適化を行うとともに、優れた細胞内プロセスの設計を行うことが重要となる。

## 4章 おわりに

「細胞内プロセスの設計」、「設計に基づいた遺伝子改変」、「生物を利用した物質生産の最適化」のサイクルに基づく効率的な物質生産システムの構築により、生産効率の著しい増加が期待できるだけでなく、これまで安定的な生産が困難であった物質や高機能（高付加価値）物質の生産も可能になることが期待される。

さらには、これまで化学合成でしか生産されなかった新規物質（有機モノマー・ポリマー等）を、生物を利用して生産できるようになる可能性もある。このような、化学合成プロセスから生物合成プロセスへの置き換えが実現すれば、複雑な合成過程が必要であった物質を1ステップで簡便・低コストに生産できるのみならず、省エネルギー・CO<sub>2</sub>排出削減の面からも画期的な物質生産システムになると期待される。

技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight Vol.16

生物機能を利用した物質生産分野の技術戦略策定に向けて

2017年2月10日発行

TSC Foresight Vol.16 生物機能を利用した物質生産分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構  
技術戦略研究センター (TSC)

■ センター長 川合 知二

■ センター次長 矢島 秀浩

■ 新領域・融合ユニット

・ユニット長 白井 正人

・研究員 西村麻里江

長谷川健太

林 智佳子

山崎 彰子

・フェロー 加藤 紘 国立大学法人山口大学 名誉教授

・客員フェロー 湯元 昇 国立循環器病研究センター 特任部長

● 本書に関する問い合わせ先  
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

● 本書は以下URL よりダウンロードできます。  
<http://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。  
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。  
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。