



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

Vol. **36**

バイオプラスチック分野の 技術戦略策定に向けて

2019年11月

1 章	バイオプラスチック分野の概要	2
	1-1 分類・定義	3
	1-2 取り巻く社会状況	4
2 章	バイオプラスチック分野の置かれた状況	7
	2-1 市場規模(国内、海外)・予測	7
	2-2 特許出願・論文発表の動向	10
	2-3 国内外の研究開発(政策)状況	14
3 章	バイオプラスチック分野の技術課題	16
4 章	おわりに	22

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

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

1章 バイオプラスチック分野の概要

軽量であり加工性に優れるといった特性を持ち、安全・安心・利便性などをもたらす素材として幅広く活用されているプラスチックであるが、1980年代以降の生産量の世界的な増加に伴い、プラスチックごみによる海洋汚染が問題視されるようになった。2015年には、世界で約800万トン以上のプラスチックが陸から海に流出しているという、国・地域ごとに海洋流出量を推測した研究成果が発表された^{※1}。2016年にはエレンマッカーサー財団が「New Plastic Economy」において、2050年に海洋中のプラスチック量が魚の量以上に増加するとの報告を発表する^{※2}など、プラスチックの製造から廃棄までのライフサイクル全般に対する管理体制の強化やこれ以上の汚染を防止する新素材の開発について世界的に注目が集まっている。新素材開発では、海洋で二酸化炭素と水に生分解される海洋生分解性プラスチックや、木材などの天然資源から得られるセルロースナノファイバー（CNF）などの高機能材料の活用が期待されている。

さらに、化石資源の枯渇や化石資源の利用に伴って発生する二酸化炭素等の温室効果ガスによる地球温暖化に対して、国際的な取組が加速している。2015年にフラ

ンス・パリで開催された温室効果ガス削減に関する国際的取り決めに話し合う「国連気候変動枠組条約締約国会議（通称COP）」において、いわゆる「パリ協定」が合意され、二酸化炭素など温室効果ガスの計画的な削減を目的とした国際的な枠組みが構築された。日本においても、2016年5月に地球温暖化対策計画が閣議決定され、バイオマス（生物資源）を原料とするプラスチックの利用促進により石油由来のプラスチックを代替することで、廃プラスチックの焼却に伴う二酸化炭素排出量の抑制を目指している。

プラスチックごみによる海洋汚染問題やパリ協定発効を一つの契機として、プラスチックを取り巻く社会環境が大きく変動している中で、国・産業界などの各主体においてプラスチックに対する新たな取組が開始されたところである。このような社会背景を受けて、技術戦略研究センターでは、次の2点を柱とする「バイオプラスチック分野の技術戦略」を策定し、地球環境問題の解決と日本の産業競争力の更なる向上を目的とした。

- プラスチック原料を化石資源から生物資源に転換することによる温室効果ガス削減
- プラスチックによる新たな海洋汚染を抑制するための新素材開発

※1 Plastic waste inputs from land into the ocean, Jenna R. Jambeck et al., Science, 347, 768-771 (2015) など

※2 エレンマッカーサー財団Webサイト
<https://newplasticseconomy.org/assets/doc/npec-vision.pdf>

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

1-1 分類・定義

バイオプラスチックはさまざまな意味を含んだ言葉であることから、図1のように分類・定義した。

原料は「石油由来」と「バイオマス由来」に分けられる。バイオマス由来のうち、生分解性を示すものと生分解性を示さないものに分類できる。バイオマス由来で生分解性があるものを「生分解性バイオマスプラスチック：Bio-degradable/Bio-based Plastics」としてBBPと略す。代表的なBBPとしてPBS（ポリブチレンサクシネート）、

PHA（ポリヒドロキシアルカン酸）、PA4（ポリアミド4）、PLA（ポリ乳酸）などがある。

また、バイオマス由来で生分解性がないプラスチックを「非生分解性バイオマスプラスチック：Non-biodegradable/Bio-based Plastics」としてNBPと略す。代表的なNBPとして、バイオポリエチレン（バイオPE）、バイオポリエチレンテレフタレート（バイオPET）、バイオポリウレタン（バイオPU）などがある。これらのNBPは、原料となるモノマー等はバイオマス由来であるが、ラジカル重合や共重合によりポリマーになった際には石油由来のプラスチックと化学構造は同じである。

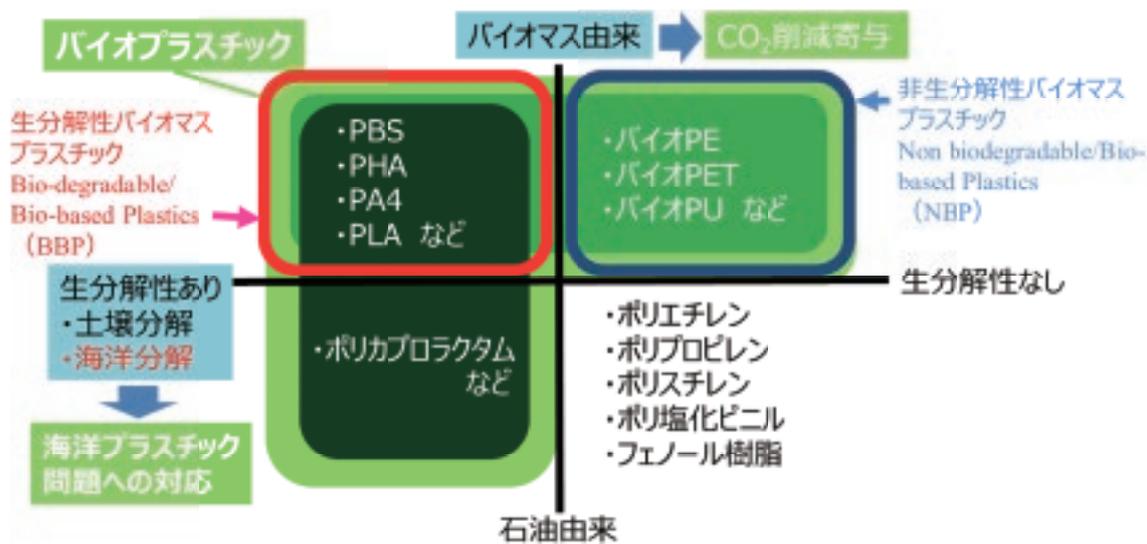


図1 バイオプラスチックの分類と定義
出所：各種資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2018)

1-2 取り巻く社会状況

(1) プラスチックごみによる海洋汚染の マイクロプラスチック問題

大きさが5mm以下の微細なプラスチックごみをマイクロプラスチックと定義されている^{※3}。マイクロプラスチックによる海洋汚染の報告は1970年代から始まっている。例えば、Carpenterらは、サルガッソ海西域におけるマイクロプラスチック汚染を調べ、1km²あたり平均で3,500個、290gのマイクロプラスチックを回収したことを報告している^{※4}。その後、本格的にプラスチック生産が増加したことに対応して、2000年代からマイクロプラスチック関連の報告が増加した。特に有名なものとして2015年に発表されたJambeckらの「Plastic waste inputs from land into the ocean」がある^{※1}。世界では年間に約3億1千万

トンのプラスチック、合成繊維、ゴム、塗料などが生産されているが、この論文では世界全体で480万～1,270万トンが海洋へ流出しており（2010年推計値）、特に中国やインドネシアの沿岸部からの流出が多いとされている。日本も30位ではあるものの2～6万トンが海洋へ流出しているとしている（表1）。

マイクロプラスチックは海洋中のPCBs（ポリ塩化ビフェニル）、PBDEs（ポリ臭化ジフェニルエーテル）などの残留性有機汚染物質を吸着している恐れがあり、これらの汚染物質の生物濃縮による人体への影響が懸念されている。例えば、Wardropらは、レインボーフィッシュにあらかじめPBDEsを吸着させたマイクロプラスチックを与えて、体内でのPBDEsの代謝や生物濃縮を調べている^{※5}。マイクロプラスチックの生成過程や環境・生物への影響については、今後も継続して科学的根拠に基づく議論が必要である。

表1 プラスチックの国別海洋流出状況

順位	国名	流出量(万トン)	沿岸人口(百万人)
1	中国	132～353	263
2	インドネシア	48～129	187
3	フィリピン	28～75	83
4	ベトナム	28～73	
5	スリランカ	24～64	
⋮			
20	米国	4～11	113
⋮			
30	日本	2～6	

出所：各種資料を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2019）

※3 環境省Webサイト
<https://www.env.go.jp/press/104995.html>

※4 Plastics on the Sargasso Sea Surface, Edward J. Carpenter, K. L. Smith, Jr., Science, 175 (1972)

※5 Chemical Pollutants Sorbed to Ingested Microbeads from Personal Care Products Accumulate in Fish, Peter Wardrop, Jeff Shimeta, et al., Environ. Sci. Technol. 50, 4037-4044 (2016)

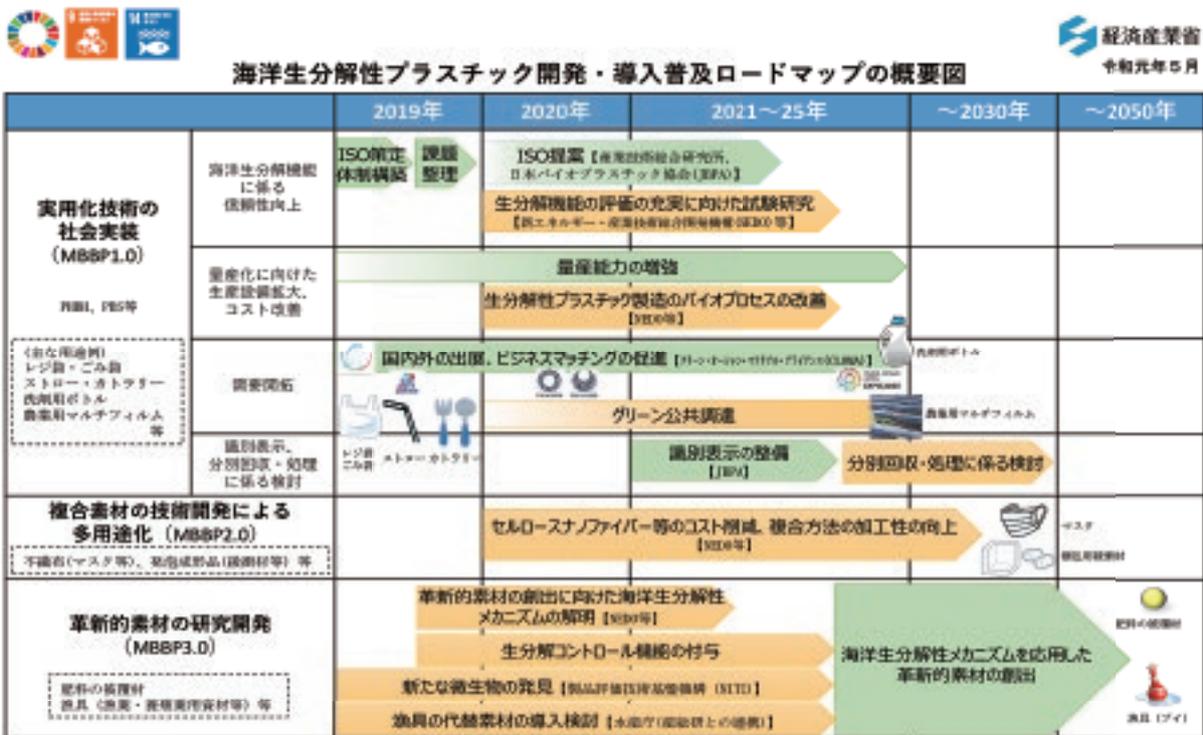
バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

(2) プラスチックごみによる海洋汚染に対する政府や産業界の対応

海洋プラスチックごみ問題に対して活発に国際的に議論されている中、地球規模の海洋汚染問題を解決するためには、G7のような先進国のみならず新興国も含めた世界全体での取組が不可欠であり、日本としては経済活動の制約ではなくプラスチックごみの海への流出をいかに抑えるかが重要である。そこで国内対策として、環境省は2018年6月には海岸漂着物処理推進法を改正し、漂流ごみ等の円滑な処理の推進やマイクロプラスチック対策を追加した。また、第4次循環型社会形成推進基本計画（2018年6月閣議決定）では、プラスチックの資源循環を総合的に推進するための戦略（プラスチック資源循環戦略）を策定した。経済産業省では、海洋プラスチックごみ対策として2019年5月に「海洋生分解性プラスチック開発・導入普及ロードマップ」を公表し、新素材開発などのイノベーションを通じた海洋プラスチックご

み問題への解決策を提示した（図2）。その後、政府では海洋プラスチックごみ対策の推進に関する関係府省会議を立ち上げ、プラスチックごみによる新たな海洋汚染を生み出さない世界の実現を目指した日本としての具体的な取組を取りまとめた「海洋プラスチックごみ対策アクションプラン」を策定し、2019年6月に開催されたG20サミットにおいて「大阪ブルーオーシャンビジョン」として合意された。

上述の動きを受けて、産業界による海洋プラスチックごみ問題への対策の自主的な取組も国内外で活発化している。2019年1月には、海洋を中心とする環境中のプラスチック廃棄物問題の解決を目指して化学、プラスチック加工、小売りなどを手掛ける世界各国の企業がアライアンスを設立し基金を創設するなど、マイクロプラスチックによる海洋汚染に対する国際的な枠組みの整備が始まったところである。具体的な例として「Alliance to End Plastic Waste (AEPW)」が挙げられる^{※6}。このアライアンスは約30のグローバルな化学



※MBBP:植物由来(バイオマス)の海洋成分解性プラスチック(Marine Bio-degradable Bio-based Plastics)
 ※海洋生分解性プラスチック:海洋中で微生物が生成する酵素の働きにより水と二酸化炭素に分解されるプラスチック
図2 海洋生分解性プラスチック開発・導入普及ロードマップの概要図
 出所:経済産業省 Web サイトより(2019)

※6 AEPW Web サイト
<https://endplasticwaste.org/about-the-alliance-to-end-plastic-waste/>

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

企業を中心に設立され、海洋プラスチックごみの抑制、管理、使用後のソリューションを推進する施策を展開している。

国内でも2019年1月に、海洋プラスチックごみ問題の解決に向け、プラスチック製品の持続可能な使用や代替素材の開発・導入を推進し官民連携でイノベーションを加速するため、「クリーン・オーシャン・マテリアル・アライアンス」(CLOMA)が設立された(2019年7月時点で238の企業・団体が参加)。

(3) 欧米で進むバイオエコノミー政策と日本のバイオ戦略2019

2009年にOECD(経済協力開発機構)から「The Bioeconomy to 2030」が発表され、これまでの化石資源中心のエネルギー・ものづくり産業体系からバイオマスとバイオテクノロジーを活用した産業構造への転換が求められている。「The Bioeconomy to 2030」では、2003年のバイオ

産業への研究開発投資は約9割が健康医療分野であったが、2030年では、健康医療分野は25%に留まり、ものづくりやエネルギー利用等の非医療分野に集中投資することが示された。さらに、OECDの報告書では、OECD加盟国における2030年のバイオ産業市場は全GDPの2.7%(約200兆円規模)に拡大し、このうち工業分野が39%、農業分野が36%を占めると予測している*7。日本でも欧米のバイオエコノミー政策を参考にバイオ戦略を策定しており、2018年6月にバイオ戦略検討ワーキンググループから検討の中間とりまとめが公開された。さらに検討を加えた結果、2019年6月11日に統合イノベーション戦略推進会議にて、バイオ戦略2019が決定された。2030年に世界最先端のバイオエコノミー社会を実現するため、9つの市場領域を設定し、シーズブッシュ型からニーズプル型の戦略とした(図3)*8。市場領域のなかで「①高機能バイオ素材」、及び「②バイオプラスチック」は、本書で取り上げた技術領域の多くが含まれている。



図3 バイオ戦略2019で設定された4つの社会像と9つの市場領域

出所：統合イノベーション戦略推進会議資料(内閣府, 2019)

*7 平成28年度成果報告書「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」p.3 (NEDO, 2017)

*8 統合イノベーション戦略推進会議 Web サイト
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/biosenryaku2019.pdf>

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

2章 バイオプラスチック分野の置かれた状況

2-1 市場規模（国内、海外）・予測

(1) 国内の市場規模

バイオプラスチックを取り扱うメーカー、小売りなどをまとめた国内業界団体として、日本バイオプラスチック協会（JPBA）がある。また、バイオマスを活用したプラスチック製品に対して、バイオマスマークを発行している一般社団法人日本有機資源協会（JORA）がある。さらに、プラスチック産業における代表組織として日本プラスチック工業連

盟（JPIF）が活動している。バイオプラスチックに関するこれらの国内団体に対してヒアリングを行い、国内市場規模等を調査した（図4）。

バイオプラスチック全体の市場規模は約4万トンであり、そのうち9割以上をNBPが占めている。2017年の日本のプラスチック原材料生産実績は1,100万トンであることから、国内プラスチック市場に占めるバイオプラスチックの割合は0.4%である。なお、ここではPLAをBBPには分類せず、NBPとしている。現在のPLAの国内での用途は生分解性という機能よりも、融点や熱収縮性などの物理的・化学的特性を活かした用途に利用されていることから、NBPに分類されている点に留意する必要がある。

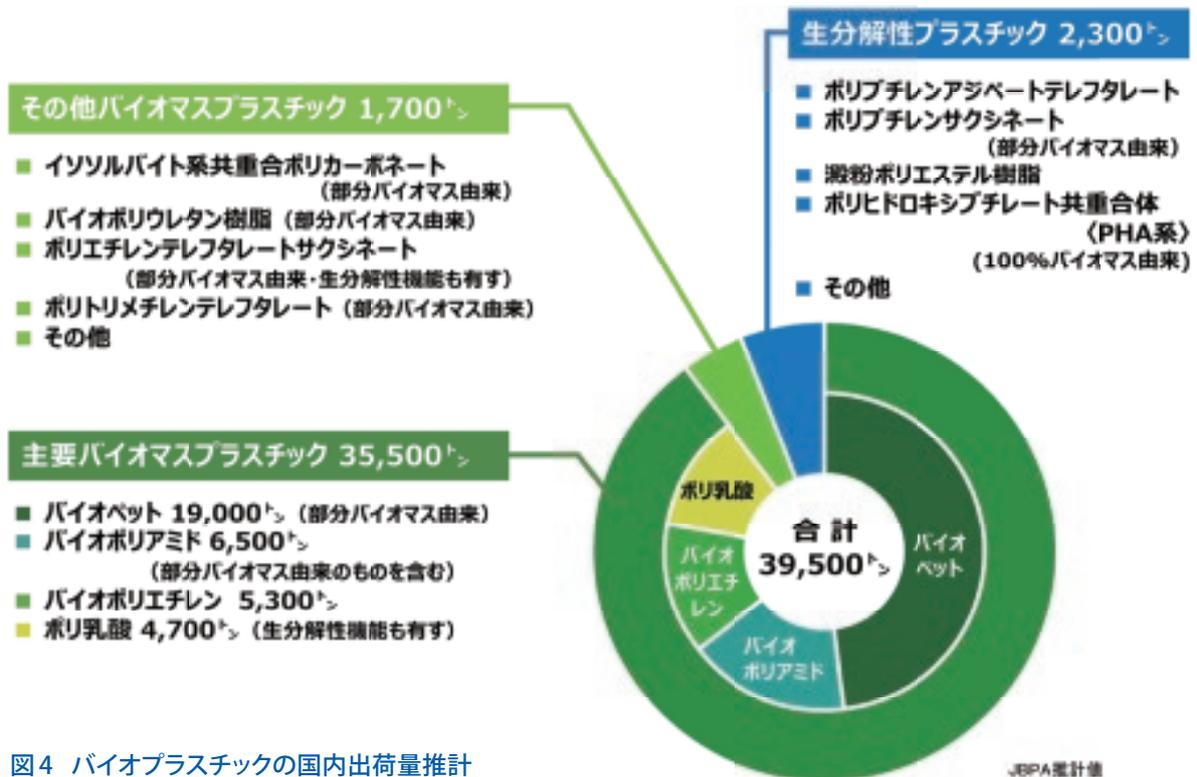


図4 バイオプラスチックの国内出荷量推計
出所：日本バイオプラスチック協会資料（2017）

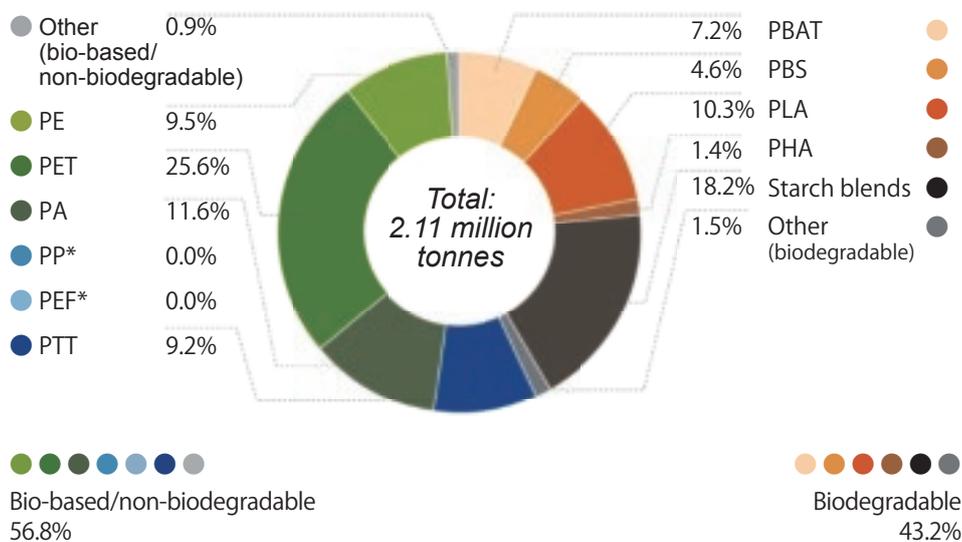
バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

(2) 海外の市場動向

海外のバイオプラスチック関連の団体として、European Bioplastic 協会（欧州 BP 協会）が代表的である。欧州 BP 協会では毎年度、世界のバイオプラスチックの生産能力の現状と予測を行っている（図5、6）^{※9}。欧州 BP 協会がまとめた世界のバイオプラスチックの生産能力（2018年）を図5に示す。世界市場ではNBP（図の Bio-based/non-biodegradable に該当）が約6割、BBP（図の Biodegradable、ただし石油由来も含む）が4割を占めている。NBP が9割を占める日本の市場とは対照的であ

る。また、2018年では世界全体で211万トンのバイオプラスチック生産能力があり、そのうち生産能力が大きいものから順に、バイオPETが26%、デンプンブレンドBBP（図の Starch blends）が18%となっている。デンプンブレンドBBPは、使い捨てプラスチックの使用規制が導入されているフランスやイタリアなど欧州各国での利用が進んでいることが推察される。バイオPETの生産能力が最も大きく、続いてバイオPA、PLA、バイオPEの順になっているところは、日本国内の出荷量と同様の傾向を示している。

Global production capacities of bioplastics 2018 (by material type)



*Bio-based PP and PEF are currently in development and predicted to be available at commercial scale in 2023

Source: European Bioplastics, nova-Institute (2018)
 More information: www.european-bioplastics.org/market and www.bio-based.eu/markets

図5 世界のバイオプラスチックの生産能力（2018年）

出所：欧州バイオプラスチック協会 Web サイトより（2018）

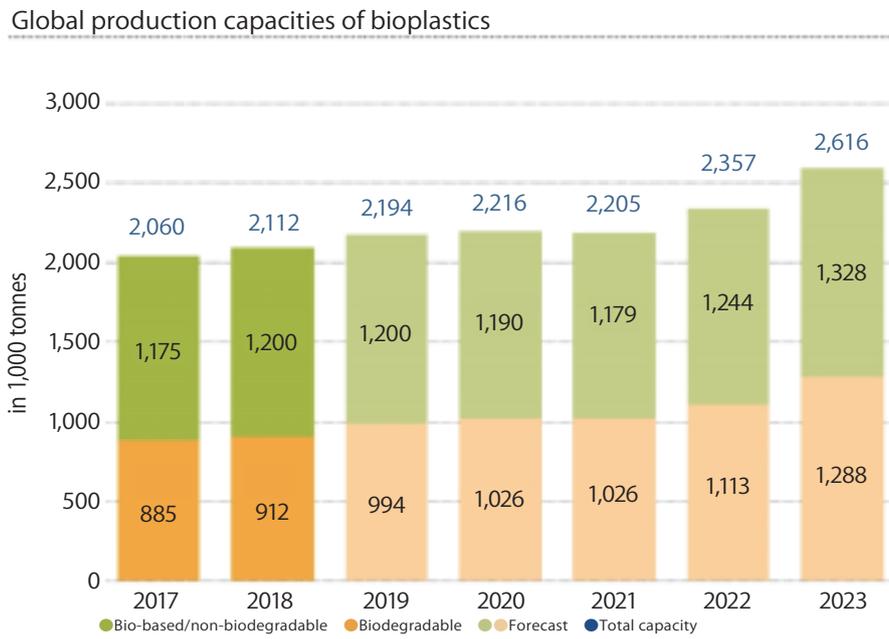
※9 欧州バイオプラスチック協会 Web サイト
<https://www.european-bioplastics.org/market/>

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

(3) 世界市場の予測

図6の欧州BP協会の成長予測によると2019年から2021年にかけてNBP（図のBio-based/non-biodegradableに該当）の伸びがいったん止まるが、2022年から再び増加傾

向を示している。BBP（図のBiodegradable、ただし石油由来も含む）においては、2020年から2021年まで足踏みするが、2022年から急増する。



Source : European Bioplastics,nova-Institute (2018)
 More information : www.european-bioplastics.org/market and www.bio-based.eu/markets

図6 世界のバイオプラスチック生産能力の成長予測

出所：欧州バイオプラスチック協会 Web サイトより（2018）

2-2 特許出願・論文発表の動向

(1) 特許出願

バイオプラスチックを図1で定義したBBPとNBPに分類し、重要と思われるポリマーについて特許分析をおこなった。さらに、機能的充填剤として期待されるセルロースナノファイバー（CNF）についても同様に特許分析を実施した。

①BBP

海洋生分解性を示すポリマーの代表としてPHAをとり

あげて分析した。PHAは微生物が直接プラスチックを合成することや生分解性であることから注目を集めている。最初に見出されたのはホモポリマーのポリヒドロキシ酢酸（PHB）であった。しかし、融点が高いなどの課題があったため、PHBとポリヒドロキシ吉草酸（PHV）の共重合体を産生する菌株が発見され1981年に欧州で実用化された。PHAの発見自体は1981年であったが、1999年以降のPHAの特許出願件数の推移を図7に示す。年を追うごとに件数が増加しており、特に2016年は600件近くまで急増している。

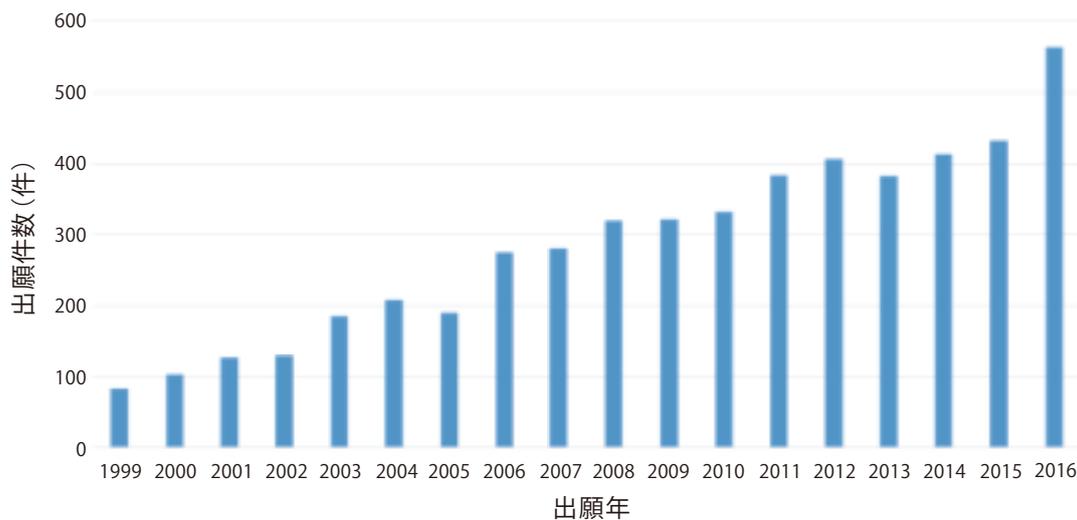


図7 PHAの出願件数の推移（1999年～2016年）

出所：Derwent Innovation™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2018）

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

次に年代別の出願人ランキングを表2に示す。1999年～2003年ではキャノンが1位、カネカ8位であったが、2004年以降にはキャノンはランキング外となった。一方、カネカは着実に特許出願を続け、2014年～2018年では首位になるなど、PHAの技術開発においてカネカはトップ企業として世界をけん引しているといえる。

②NBP

NBPの出願件数の推移と国別のシェアを図8に示す。対象期間でおおよそ2,500件の出願があり、出願件数は増加傾向にある。一方、国別の出願件数を調べると中国が半数近くを占めており、2位米国、3位日本と続くことが分かった。

表2 PHAの年代別 譲受人／出願人のランキング

1999-2003		2004-2008		2009-2013		2014-2018	
CANON INC.	69	ABBOTT CARDIOVASCULAR SYSTEMS INC.	89	HALLIBURTON CO. (HOLDING)	46	KANEKA CORP.	33
ABBOTT CARDIOVASCULAR SYSTEMS INC.	33	HALLIBURTON CO. (HOLDING)	76	KANEKA CORP.	36	ZTE MICROELECTRONICS TECHNOLOGY CORP.	31
MEDTRONIC INC.	22	KANEKA CORP.	35	PROCTER & GAMBLE CO.	32	CHINESE ACADEMY OF SCIENCE	27
PROCTER & GAMBLE CO.	19	MEDTRONIC INC.	34	CYMABAY THERAPEUTICS INC (FORMERLY METABOLIX INC).	31	INVISTA SARL	26
CYMABAY THERAPEUTICS INC (FORMERLY METABOLIX INC).	16	PROCTER & GAMBLE CO.	24	BASF SE	29	LG GROUP	20
HALLIBURTON CO. (HOLDING)	15	BOSTON SCIENTIFIC CORP.	21	UNIV DONGHUA	25	HALLIBURTON CO. (HOLDING)	17
SCIMED LIFE SYSTEMS INC.	11	BASF SE	20	CHINESE ACADEMY OF SCIENCE	22	UNIV JIANGNAN	16
KANEKA CORP.	11	TOSOH CORP.LTD.	19	TEPHA INC.	19	SICHUAN REVOTEK CO., LTD.	15
COUNCIL OF SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH	9	DU PONT (E.I.) DE NEMOURS & CO.	15	LG GROUP	19	HUAWEI TECHNOLOGIES COMPANY LTD.	15
KIMBERLY-CLARK CORP.	9	TEPHA INC.	14	TSINGHUA UNIVERSITY	16	UNIV DANKOOK IND ACADEMIC COOP FOUND	12
						INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES CORP.	12
合計	629	合計	1,275	合計	1,831	合計	1,937

出所：Derwent Innovation™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2018）

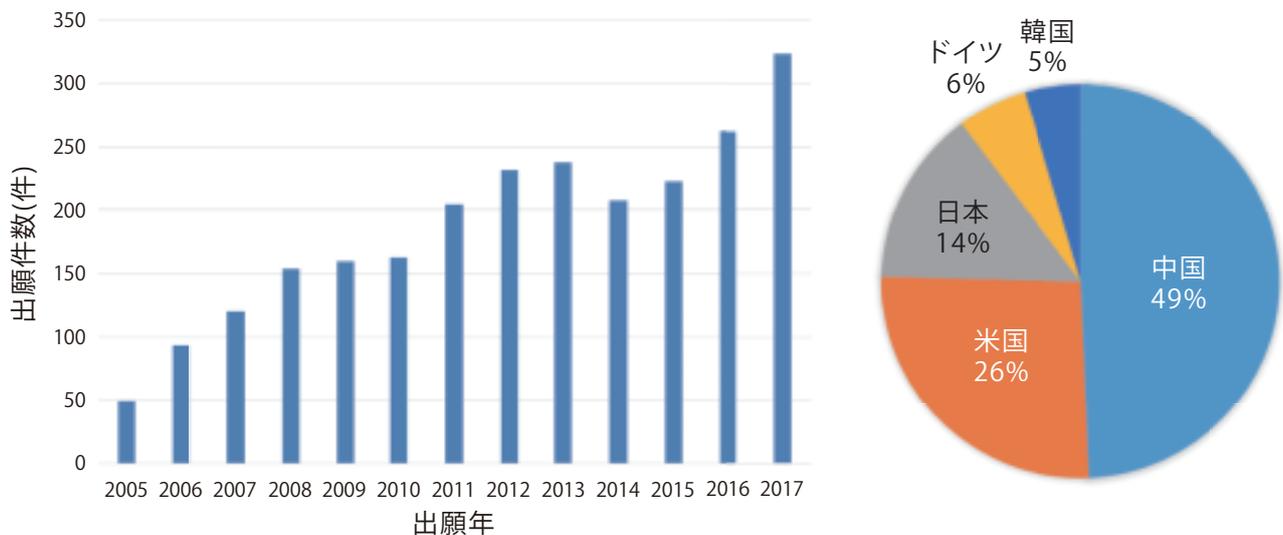


図8 NBPの出願件数の推移と国別シェア (2005年～2017年)

出所：Derwent Innovation™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2018）

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

③ CNF

CNFに関する出願件数の推移と国別シェアを図9に示す。対象期間でおよそ2,500件の出願があり、出願件数は増加傾向にある。一方、国別の出願件数を調べると中国が半数以上を占めており、2位日本、3位米国と続くことが分かった。

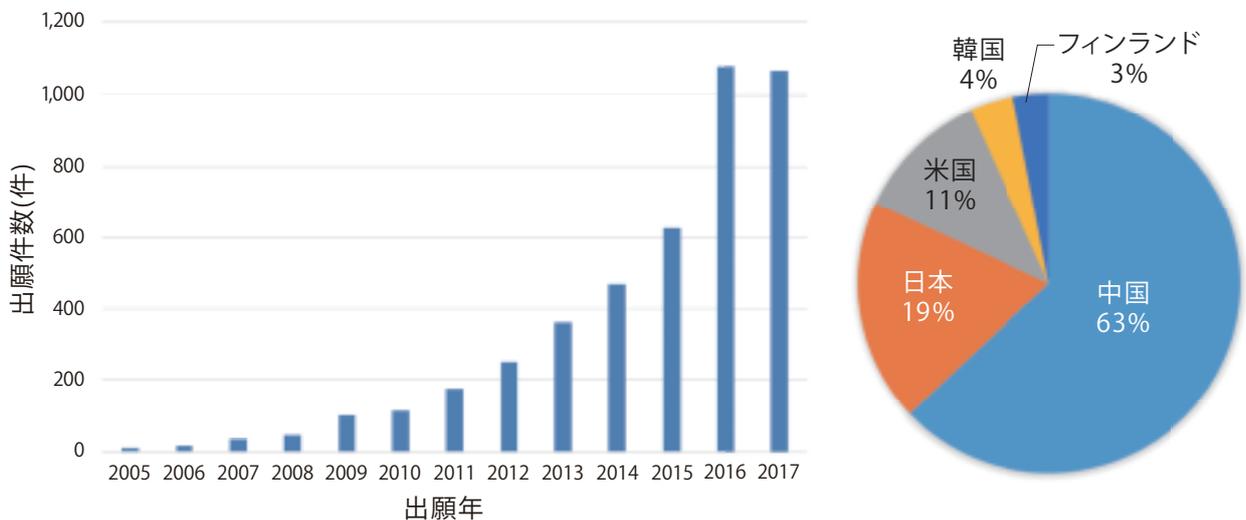


図9 CNFに関する出願件数の推移と国別シェア (2005年～2017年)

出所：Derwent Innovation™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2018)

(2) 論文発表

① BBP

年代ごとの国別論文発表数を図10に示す。BBPに関する論文は1991年を境に急激に発表数が増加している。米国が当初からもっと多くの論文を発表しているが、2006年から中国が大きく発表数を伸ばしている。日本の論文発表の傾向をみると、1986年から2015年まで日本は世界で常に4位以内の位置を占めており、生分解性ポリマーに関する研究開発が活発であることが推察される。

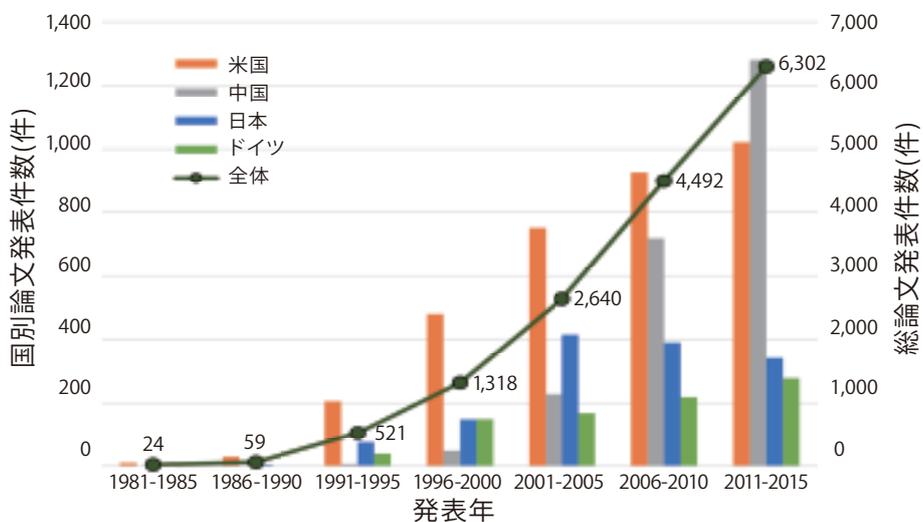


図10 BBPに関する国別論文発表件数推移 (1981年～2015年)

出所：Web of Science™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2018)

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

② NBP

年代ごとの国別論文発表数を図11に示す。BBPと同じく1990年代から発表数が急増している。米国の発表数は調査した年代ですべて1位であり世界的にもこの分野では最も研究開発が行われている。日本の論文数と順位は2005年までは12～6位であったが、2006年以降は4位を維持しており、論文数の急増などから研究開発が積極的に進められていることが推察される。

③ CNF

年代ごとの国別論文発表数を図12に示す。1996年から2000年にかけて論文発表数が増加し、2001年から2010年では急激に増加している。日本の発表数順位は、1991年から2015年まで2～4位の位置を占めており世界の中でも研究開発においては競争力を有している。

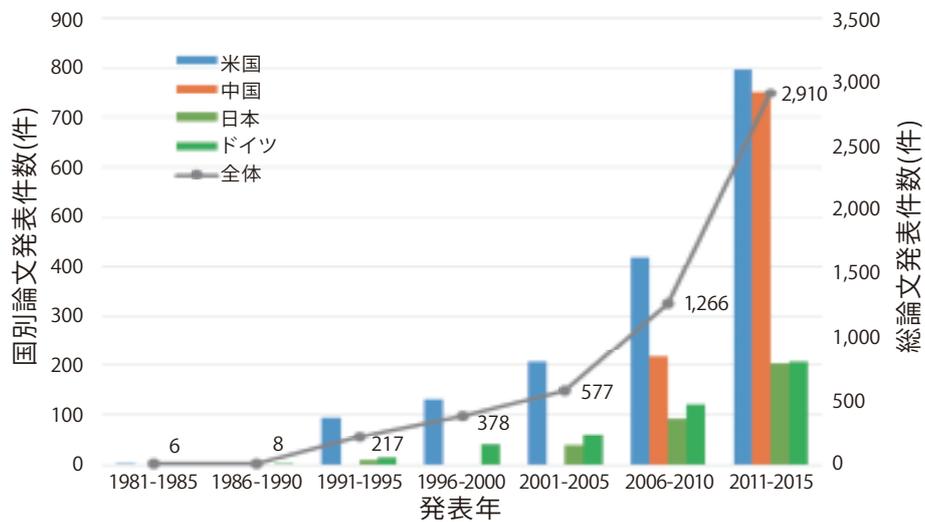


図11 NBPに関する国別論文発表件数推移 (1983年～2015年)

出所：Web of Science™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2018)

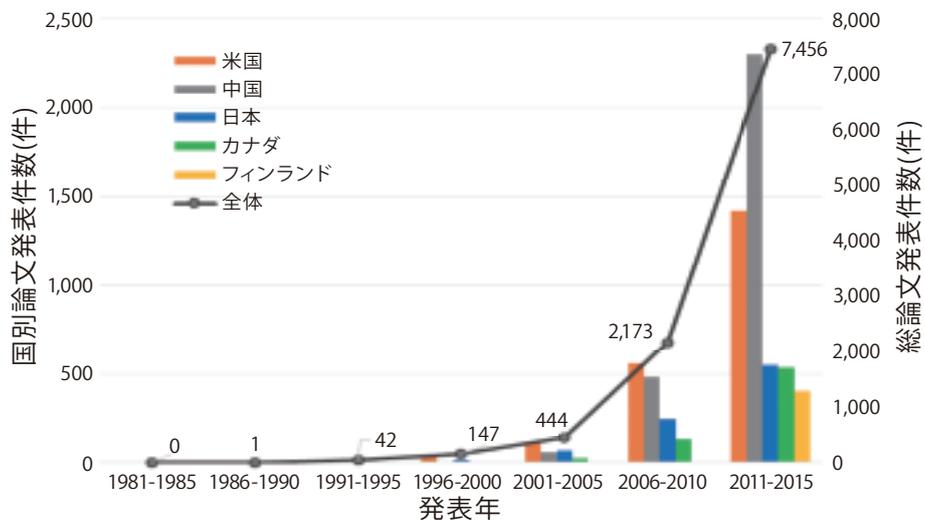


図12 CNFに関する国別論文発表件数推移 (1981年～2015年)

出所：Web of Science™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2018)

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

2-3 国内外の研究開発（政策）状況

(1) 日本

国内のバイオプラスチックに関する研究開発投資は主に、経済産業省、農林水産省、文部科学省及び内閣府が担っている。バイオプラスチックに関連する主な研究開発投資を表3に示す。

表3 国内のバイオプラスチック関係の研究開発投資の一例

所管組織	課題名	開発期間・投資金額
NEDO (経済産業省)	グリーン・サステナブルケミカルプロセス基盤技術開発	2009～2014 総額約130億円
NEDO (経済産業省)	非可食性植物由来化学品製造プロセス技術開発	2013～2019 総額約71億円
農林水産省	木質バイオマスの利用拡大	2014～2019 (2019)240億円の内数
内閣府	(第1期SIP ^{*10})木質リグニン等からの高付加価値素材の開発	2014～2018 総額18億円
科学技術振興機構(JST) (文部科学省)	先端的低炭素化技術開発(ALCA) 特別重点技術領域:ホワイトバイオテクノロジー 実用技術化プロジェクト:バイオマスの化成品化及びポリマー化のための高効率生産プロセスの開発	2015～2019 (2015～2018)208億円の内数

出所：各種資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2018）

表4 DOE BETOの次期プロジェクトの概要と投資金額

タイトル	内容	投資金額
BioEnergy Engineering for Products Synthesis	触媒やバイオテクノロジーの活用によってバイオマスや廃棄物をバイオ燃料に効率的に転換する技術開発	30億8千万円 16課題
Efficient Carbon Utilization in Algal Systems	発電所や工場等から排出されたCO ₂ や大気中CO ₂ の回収方法の改善による藻類の成長速度の向上	16億5千万円 7課題
Process Development for Advanced Biofuels and Biopower	米国内のバイオマス原料及び廃棄物からのコスト競争力のあるバイオ燃料及びバイオ化学品の生産プロセスの開発	24億2千万円 10課題
Affordable and Sustainable Energy Crops	バイオ燃料・バイオ化学品等の生産に用いる非可食エネルギー作物の生産	16億5千万円 3課題

出所：各種資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2018）

(2) 米国

米国の政府機関の中でバイオ関係のプロジェクトを実施しているのは、主にエネルギー省 (DOE) 及び農務省 (USDA) である。DOEではBioenergy Technology Office (BETO) がバイオ燃料、バイオベース製品、バイオエネルギーに関する研究開発を実施している。BETOは、36課題についてトータルで7,900万ドル（約88億円、1ドル110円換算）のプロジェクトを開始することを2018年9月に表明した。詳細については表4にまとめた^{*11}。

*10 SIP : Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (戦略的イノベーション創造プログラム)

*11 <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/bioenergy-technologies-office-closed-funding-opportunities>

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

(3) 欧州

2014年から2020年までの7か年計画である科学技術計画（Horizon 2020）の中で、バイオテクノロジーやバイオリファイナリに関する研究投資はKey Industrial Technologiesの優先課題として設定されており、EU各国で大規模に実施されている。Horizon 2020の下で

運営されているBBIJU（Bio-based Industries Joint Undertaking：バイオベース産業共同事業体）を代表するBIC（Bio-based Industries Consortium）は、Horizon 2020からの出資を含む37億ユーロ（約4,600億円、1ユーロ=124円で換算）の資金を活用してバイオエコノミー社会の実現に向けた取組を進めている（表5）^{※12}。

表5 欧州のバイオプラスチック関係の研究開発投資の一例

プロジェクト名称	プロジェクト内容	予算規模と実施期間
AGRICHEMWHEY	乳清タンパク質の製造に伴って排出される廃棄物からL-乳酸、PLA、肥料の製造	27億4千万円 2018.1～2021.12
BARBARA	植物多糖類から3Dプリンターなどに活用できるバイオプラスチックの開発	3億2千万円 2017.5～2020.4
FIRST2RUN	バイオプラスチックなどの原料となる植物油を乾燥地など未利用土地で生産する植物の開発	21億1千万円 2015.7～2019.6
EXILVA	マイクロフィブリル化セルロース（MFC）の実証プラントによる商業生産に向けた開発	34億1千万円 2016.5～2019.4

出所：各種資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2018）

※12 BIC（Bio-based Industries Consortium）のWeb サイト
<https://www.bbi-europe.eu/>

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

3章 バイオプラスチック分野の技術課題

バイオプラスチックのライフサイクルの一例を図13に示す。BBP、NBPともにバイオマス由来であることから工程の中に糖原料などの発酵工程が含まれることが多い。以下では、工程をBBPとNBP、さらにCNFとに分けて技術課題について抽出する。

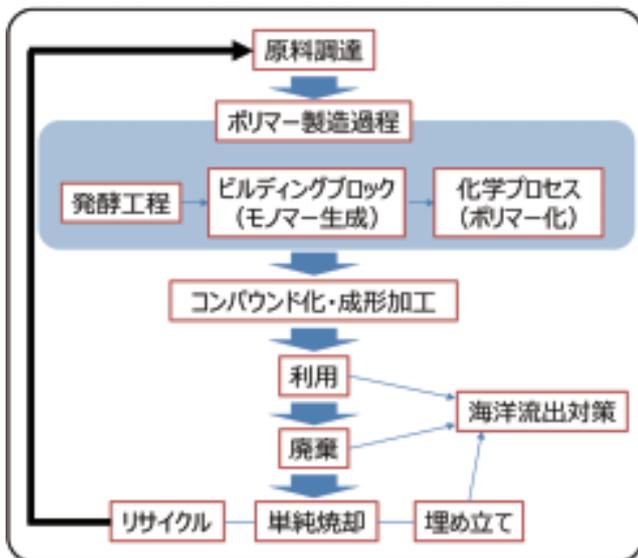


図13 バイオプラスチックのライフサイクルの一例
出所：NEDO技術戦略研究センター作成（2018）

(1) 代表的なBBPと特徴と技術課題

まず、主なBBPの種類と特徴について記す^{※13}。

① PHA

PHAはモノマーの種類やその組み合わせによって様々

なバリエーションが存在するポリマーのファミリーの総称である。PHAは100%バイオ由来で生分解性である素材で、海水中で生分解性を示すものがある。PHAは主に特定の細菌により発酵プロセスより生産され、合成されたポリマーが細菌の細胞内に蓄積される。そのため、モノマーの生産から重合反応まで、すべてバイオプロセスで製造可能である。なお、原料や発酵生産に使用する菌種は、さまざまなバリエーションがある。

② PBS

発酵プロセスで得られたコハク酸と1,4-ブタンジオールを原料とする軟質系脂肪族ポリエステルである。コハク酸のバイオマス化が先行していたが、バイオ由来の1,4-ブタンジオールも開発され、市場に投入されつつある。

③ PLA

100%バイオ由来であり、かつ、一定の条件下ではバイオデグレダブル・コンポストブル（インダストリアルコンポストブル）なポリマーである。トウモロコシ等のデンプン作物を糖化・発酵後に得られる乳酸が重合され、ポリ乳酸が合成される。

④ スターチベースドポリマー

スターチベースドポリマーは1種または複数種のポリマーとブレンドされた生分解性を有す25～100%のバイオ由来なポリマーである。トウモロコシ等のデンプンを可塑化して他の生分解性樹脂やバイオマスプラスチックとブレンドすることで作られる。

※13 平成29年度EUとの規制協力を推進するための調査
(バイオ由来素材及びバイオプロセス等の利用促進に向けた欧州の規制動向
や欧州産業界の対応状況・関連市場動向に関する調査)
(三菱USJリサーチ&コンサルティング, 2018)

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

主なBBPの原料と製造プロセスの概要を表6に示す。原料と製造プロセスを俯瞰すると、以下の5点が課題としてあげられる。

- ① 原料となる糖原料や植物油のコスト削減。
- ② 発酵工程の効率化と製造能力の増大。
- ③ 新たな海洋生分解性プラスチックの開発と市場の拡大。
- ④ コンパウンド化や機能性充填剤などによる成形加工技術の開発。
- ⑤ 海洋での生分解性を評価する試験方法の確立。

(2) 代表的なNBPの特徴と技術課題

まず、主なNBPの種類と特徴について記す。

① バイオPE※14

サトウキビ由来の糖蜜を発酵させて得られたバイオエタノールを脱水してバイオエチレンを作り、これを重合するこ

とでバイオPEを製造している。用途は、レジ袋、化粧品・ヘアケア用品などの容器包装が多い。

② バイオPET

バイオエタノールから得られたバイオモノエチレングリコールと石油から得られたテレフタル酸の共重合で得られる。バイオマス度は30%程度である。

③ ポリエチレンフラーノエート (PEF)

バイオ由来の新規ポリマーであるPEF (ポリエチレンフラーノエート) が開発中である。フルクトースを脱水素して得られたヒドロキシメチルフルフラールを酸化して製造したフランジカルボン酸とバイオ由来のエチレングリコールを縮合すると100%バイオ由来のPEFができる。PEFはPETにくらべて酸素バリア性、炭酸ガスバリア性、水蒸気バリア性が高いなど容器用プラスチックとして優れた特性を持つ。

表6 主なBBPの原料と製造プロセス

種類	原料	製造プロセス	生分解性	成形性
PHA	・グルコース ・植物油	・発酵→微生物内での重合→ポリマーの取出し→ 精製→PHA	コンポスト ◎ 土壌 ◎ 海洋 ◎	△
PBS	・グルコース	・糖発酵→コハク酸 ・糖発酵→1,4-ブタンジオール ・コハク酸と1,4-ブタンジオールの重縮合→PBS	コンポスト ◎ 土壌 ◎ 海洋 ○	○
PLA	・グルコース	・糖発酵→乳酸→化学プロセスによる重合→PLA	コンポスト ◎ 土壌 ○ 海洋 ×	○
スターチベースド ポリマー	・デンプン	・可塑化したデンプンと生分解性樹脂等とのブレンド	コンポスト ◎ 土壌 ○ 海洋 ○	○

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2018)

※14 ARCレポート、バイオマス化学 “「石油化学」から「天然資源化学」へ”続編 (旭リサーチセンター, 2014)

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

④ バイオポリカーボネート (バイオPC)

イソソルバイド骨格 (環状のジオール) とジオール混合物とジフェニルカーボネート (DPC) を反応して作られる共重合ポリカーボネートである。イソソルバイド骨格を持つポリカーボネートは従来のビスフェノール A タイプに比べて表面硬度が高いことなどが特徴であり、自動車用部品などに活用されている。

⑤ ポリアミド11 (PA11) ※15

PA11は、トウダイグサ科に属する植物のヒマの種子から得られるヒマシ油から抽出された11-アミノウンデカン酸の縮重合によって得られる脂肪族ポリアミドである。バイオ由来プラスチックとして燃料チューブやトラックのエアブレイキチューブ等の自動車用途を中心に様々な分野で製品化

されている。

主なNBPの原料と製造プロセスを表7に示す。

NBPの低コスト化や機能付与の足かせとなる主な課題は以下の4点である。

- ① 安価で安定的に入手できる糖原料の確保
- ② 糖発酵工程の更なる効率化に必要な微生物の改良や高機能触媒の活用
- ③ ポリプロピレンなど需要の大きいプラスチックのバイオプラスチック化
- ④ 日本国内でのプレーヤー数の増加とNBPの種類多様化

表7 主なNBPの原料と製造プロセス

プラスチックの種類	NBPの種類	原料(最終化合物)	製造プロセス
熱可塑性汎用プラスチック	バイオPE	・グルコース (PE)	・糖発酵→バイオエタノール→エチレン→PE
	バイオPET	・グルコース (EG) ・石油 (テレフタル酸)	・糖発酵→バイオエタノール→エチレングリコール(EG) ・EG+テレフタル酸→PET
	PEF	・グルコース (EG) ・フルクトース (フランジカルボン酸)	・糖発酵→バイオエタノール→エチレングリコール(EG) ・糖→触媒→HMF→フランジカルボン酸 ・EG+フランジカルボン酸→PEF
エンジニアリングプラスチック	バイオPC	・グルコース(イソソルバイド) ・石油(ジフェニルカーボネート、DPC)	・グルコースの水素化→触媒→ソルビトール(脱水・環化)→イソソルバイド ・イソソルバイド+DPC→バイオPC
	PA11	・ヒマシ油 (ポリアミド)	・ヒマシ油→11-アミノウンデカン酸→縮重合→ポリアミド11

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2018)

※15 ヒマシ油から作るポリアミド、安田真穂、宮保淳、繊維と工業、66巻、137-142 (2010)

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

(3) CNFの特徴と技術課題

CNFはセルロース分子の鎖が伸びた状態で結晶を形成している幅4～20nmのナノ繊維である(図14)。特徴は、鋼鉄の1/5の軽さで、その5倍以上の強度を有している点である。

木材や竹の細胞の構造をマクロからマイクロまで俯瞰すると、細胞壁においてはCNFが鉄筋、リグニンがコンクリートの役割を果たしている(図15)。

CNFはパルプをナノレベルまで解繊することで得られるが、パルプ中のセルロース繊維は水素結合によって強固に

結合しており、解繊に必要なエネルギーも大きい。植物に含まれるセルロース繊維からCNFを取り出す手法として、①触媒や酸などでセルロース分子鎖の水素結合を緩めてからミキサーなどでナノ化する化学的解繊法、②原料をホモジナイザーなどの機械を使って物理的な力で微細化する機械的解繊法、③セルロースを分散させた液体(懸濁液)を高速で衝突させ水の運動エネルギーと衝突の衝撃で解繊する水衝突解繊法の3つに大別される。次に、解繊法別の製法、プロセス、物性について述べる。

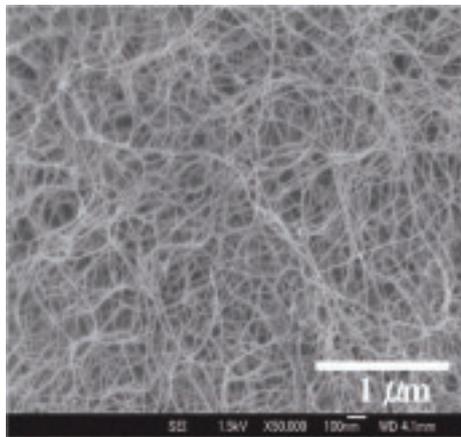


図14 CNFの電子顕微鏡写真

出所：セルロースナノファイバー—木の国ニッポンの資源—, 矢野浩之, 生存圏研究 14, 1-7(2018)

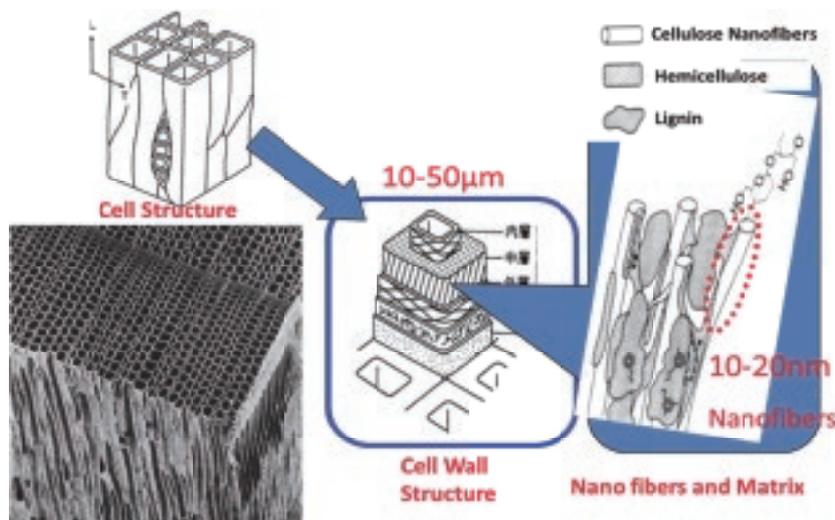


図15 木材の組織構造とCNFの関係

出所：セルロースナノファイバー—木の国ニッポンの資源—, 矢野浩之, 生存圏研究 14, 1-7(2018)

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

①化学的解繊法

化学的解繊の例を表8に示す。化学的解繊では、主に3つの方法が提案されており、そのうちTEMPO^{※16}触媒酸化法とリン酸エステル化法は実用化が進んでいる。化学的解繊法の最大の特徴は、パルプ内のCNFの表面にある水酸基に触媒を作用させて水素結合を解くため、解繊後のCNFは他の方法で解繊されたものに比べて繊維幅が小さく繊維径3～4nmのナノ分散した繊維が得られる点である。可視光波長よりも細かく均一に分散しているため光の散乱が発生せず透明である。

②機械的解繊法

機械的解繊法は原料であるパルプを水に溶かした懸濁液を高圧ホモジナイザーやグラインダー、スクリーウ押出機などにかけてナノ化する手法である(表9)。せん断力・衝撃力などの物理的な力を利用して解繊するため、繊維幅は約10～100nmと化学的解繊にくらべて大きく、透明性にも欠ける点が課題である。一方で、触媒や化学薬品などを使用せず、原料であるセルロースの物理的、化学的安定性といった基本特性を損なわずに解繊でき、疎水化パルプを使用することで容易に疎水性を付与できるといったメリットがある。

表8 CNFの主な化学的解繊の製法・プロセス・物性

製法	プロセス	物性		
		繊維径 (nm)	極性	特徴
TEMPO触媒酸化法	材料にTEMPO触媒を添加後解繊処理	3～4	親水性	高粘度、高親水性、透明性
リン酸エステル化法	材料にリン酸を添加後に解繊処理	4～60	親水性	高粘度、高親水性、透明性 安価なリン酸を使用し静電反発により解繊が容易
非プロトン性有機溶媒による解繊法	溶媒として使用する硫酸エステルがCNF表面の水酸基を修飾し静電反発により解繊	4～5	疎水性	常温で解繊 パルプが100%ナノ化
			親水性	常温で解繊 パルプが100%ナノ化

出所：2018年版セルロースナノファイバー市場の展望と戦略(矢野経済研究所, 2018)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2018)

表9 CNFの主な機械的解繊の製法・プロセス・物性

製法	プロセス	物性		
		繊維径 (nm)	極性	特徴
二軸押出機(京都プロセス)	二軸押出機で変性パルプ、樹脂を混練	4～60	親水性	CNF解繊から樹脂混練までワンパスで対応
ホモジナイザー	パルプ分散液をホモジナイザー内に流し、壁面に当たる衝突圧で解繊	10～100	親水性	水とパルプ分散液のみで製造可能
その他	製紙用のヒノキチップを二軸スクリーウ装置で粗粉碎後、グラインダーで解繊	20～300nm	原料による	木材チップの直接解繊によりリグノCNFが得られる
	グレードの異なる解繊工程を組み合わせる	20～60nm	親水性	古紙パルプからのCNFが製造可能

出所：2018年版セルロースナノファイバー市場の展望と戦略(矢野経済研究所, 2018)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2018)

※16 TEMPO (2,2,6,6-tetramethylpiperidine 1-oxyl)

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

③水衝突解繊法

水衝突解繊法は、水の運動エネルギーでセルロース分子鎖の水素結合を緩め、衝突の衝撃で解繊するものである（表10）。具体的には、水に懸濁した天然セルロース繊維を加圧装置で高圧をかけて、チャンバー内で対向している2つのノズルから1点に向かって高速ジェット噴射する。噴射された懸濁液が衝突して発生する圧力がセルロース繊維内の弱い分子間相互作用を優先的に開裂させることでナノ化する方法である。グラインダーなどを用いる機械的解繊方法とくらべて繊維のダメージが少ないことに加えて、解繊や疎水化のために化学処理を行わないことから、CNFが持つ本来の化学特性や表面特性を活かせるといったメリットがある。開裂の際にCNFの疎水表面が露出することから親水性と疎水性を同時に持つ二極性の特徴を持ち、樹脂との混合性も比較的良好である。

CNFの解繊法を軸に技術分野を俯瞰した結果、以下の4点が課題として考えられる。

- ① 京都プロセスなどの技術開発によって、CNFが社会実装可能なコストまで低減できる見通しが得られたため、さらなるコスト低減と幅広い用途展開。
- ② 樹脂の補強材の中でCNFのみが保有する生分解性という特性を活かして、海洋や土壌で生分解するプラスチックの機能向上。
- ③ 化石資源由来のプラスチックに加えて、バイオマス由来のプラスチックに対する機能性充填剤としての機能展開。
- ④ 解繊方法によって様々な特徴を持つCNFの生産が可能であり、触媒担持体、発泡剤、増粘剤など多様な分野への応用。

表10 CNFの主な水衝突解繊の製法・プロセス・物性

製法	プロセス	物性		
		繊維径 (nm)	極性	特徴
ACC ^{*17}	パルプ懸濁液を2つのノズルで対向噴射し衝突圧で解繊	10～	親水性/ 疎水性	疎水物質との混合性良好 エネルギー消費量が少ない
ウォーター ジェット	ウォータージェットを用いた湿式微粒子化装置で製造	10～50	親水性	セルロースに加えてキチン、キトサンも解繊可

出所：2018年版セルロースナノファイバー市場の展望と戦略（矢野経済研究所，2018）を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2018）

*17 ACC: Aqueous Counter Collision（水中カウンターコリジョン法）

4章 おわりに

PLA や PHA などのバイオプロセスを用いたプラスチック製造技術は1990年代から積極的に取り組まれてきたが、海洋プラスチックごみ問題の顕在化によって現在、再び注目されている。日本には発酵・醸造など微生物の機能を活用したものづくりに強みを持っており、これまでにない特性を持ったバイオプラスチックを独自に開発できるポテンシャルを秘めている。

また、木材などの天然資源から得られるCNFの製造法などでは日本が世界をリードしている分野であり、生分解性を持った機能性素材として生分解性プラスチックへの添加による機能向上が期待されている。

海洋や陸域でのプラスチックごみ問題の解決には、廃棄物管理や資源循環技術に加えてBBPやCNFに代表される日本の強みを生かしたイノベーションによる代替素材の開発が不可欠である。バイオプロセスとケミカルプロセスの融合によりプラスチックのメリットを維持しつつ、ごみ問題に適切に対応できる新素材の開発を官民一体で進めることが期待される。

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight vol.36

バイオプラスチック分野の技術戦略策定に向けて

2019年11月1日発行

TSC Foresight Vol.36 バイオプラスチック分野 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 三島 良直

■ センター次長 西村 秀隆

■ バイオエコノミーユニット

・ユニット長 瓦田 研介

・研究員 加納 周雄

藤島 義之

南 誓子

長嶋 正紀

波多野 淳一

・フェロー 大江田 憲治 株式会社セルシード 社外取締役

・客員フェロー 八十原 良彦 株式会社カネカ バイオテクノロジー研究所 高度専門研究者

湯元 昇 国立循環器病研究センター 特任部長

■ 環境・化学ユニット

・研究員 加藤 知彦 (2019年5月まで)

● 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。
<https://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。