ミニレビュー

バイオエコノミー時代のバイオテクノロジーの役割[#]

柴田 大輔*

京都大学・エネルギー理工学研究所

(2020年6月16日受理)

The roles of biotechnology in the Bio-economy era

Daisuke SHIBATA

Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

Keywords: Paris Climate Agreement, Decarbonized Society, Renewable Energy, SDGs, ESG investment.

はじめに

OECD（経済協力開発機構）が、産業革命以降続いてきた化石資源依存から脱却した持続可能な社会の経済活動として、バイオエコノミーという考え方を2009年に提唱した。¹⁾ OECDは、2030年までには世界のバイオ市場がモノづくり（工業）、農業、健康分野で年間1.6兆ドルに達すると予想している。化石資源に依存した人類の生活が直面する最大の課題の一つが、地球温暖化が引き起こすと予想される気候変動であり、農業や経済に多大な影響を引き起こすと懸念されていることが、バイオエコノミー提案の背景にある。

バイオエコノミーは経済面からの提案であるが、その後の気候変動に関する議論や現代社会の課題解決に向けた活動にも影響を与えている。1997年に採択された京都議定書の段階では、人類の活動が気候変動を引き起こしていることに関して、一部では懐疑的な見方もあった。しかし、2015年の気候変動に関するパリ協定では、産業革命以前と比べて世界の平均気温上昇を「2度未満に抑える」との目標に関し、196の国と地域の賛同が得られた。2015年には、国連が

2030年までに達成すべき目標として「持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals, SDGs）」を定めた。SDGsの本質は、化石資源に依存して発展してきた現代社会が抱える様々な「負の遺産」である気候変動、環境汚染、貧富の格差拡大、飢餓、紛争などの解消を目指す目標と理解できる。パリ協定と同じ年にSDGsが採択されたことは偶然ではない。バイオエコノミーに関する国際会議などでは常にSDGsとの関連において議論されている。

図1には、化石資源依存の社会から脱炭素社会に移行する際の枠組みとそれを取り巻く経済活動の関係性をまとめた。パリ協定は脱炭素社会を要請しているが、単に化石燃料の使用抑制だけでなく、現代社会が直面する負の遺産を同時に解消するための枠組みとして、バイオエコノミーに加えて、資源を持続可能な形で再利用するサーキュラーエコノミー、先進国と発展途上国間の貿易を公平に行うフェアトレードなどの経済活動と共に脱炭素社会を実現させると考えるべきだろう。ただし、この実現は容易ではなく、政府が支援する仕組みとして、公共調達（後述）、補助金などが必要である。これらは税金から出るので、国民の理解が必要となる。経済界は、ESG投資や投資撤退の形で後押ししている（後述）。化石燃料由来のエネルギーを再生可能エネルギーに代替する運動RE100（Renewable Energy 100%）に参加する企業が増えており、経済活動そのものが大きな変換点に差し掛かっている。

化石資源に依存した社会からの脱却とは、化石燃料エネル

[#] 第45回大会シンポジウムの内容を取りまとめた解説。

* 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: shibata.daisuke.h93@kyoto-u.jp

© 日本農薬学会

図1. 化石資源社会から脱炭素社会への移行を取り巻く状況。

ギーを再生可能エネルギーに変換するだけでなく、現代生活に不可欠となっている化成品群からの脱却でもある。持続可能な炭素源（有機物）である植物バイオマスから化成品代替物を製造することはバイオエコノミーの主要な課題であり、バイオテクノロジーが期待される所以である。今までのような「性能が良いものを作れば売れる」という発想ではなく、「脱炭素社会に貢献する」ことを前提とした革新的イノベーションが求められている。

世界の多くの国々では、バイオエコノミー戦略を鮮明にして、新たなイノベーションによる産業創出の機会であると捉えている。日本では、2017年に国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）がバイオエコノミー調査報告書²⁾をまとめ、2018年6月21日には、バイオ戦略³⁾が閣議決定されている。このバイオ戦略では、課題設定項目の多くは、従来のバイオテクノロジーの延長になっているケースが多く、エネルギー問題であるとの視点が弱く、対応が必要だろう。バイオエコノミーに関する解説としては文献4)–6)がある。

1. バイオエコノミー時代の経済動向

パリ協定以降、環境（Environment）や社会（Society）やガバナンス（Governance）への取り組みを投資の際の指標とするESG投資が広がっている。2019年の時点で、ESG投資は世界の運用資産の3割近く（約3,400兆円）を占めている（日本経済新聞2019年11月10日）。そのうち半分程度は、脱炭素社会に向けた再生可能エネルギー投資などの環境関係である。環境に特化したグリーンボンド（環境債）の扱いも増えており、2019年で世界での発行額が累積で約100兆円を超えている（日本経済新聞2019年10月25日）。二酸化炭素の排出量が多い石炭火力発電に対しては評価が厳しく、投資そのものを引き上げるダイベストメント（投資撤退）も

始まっている。数年前までは日本の銀行の動きは鈍かったが、2020年に入り、日本の大手銀行による石炭火力発電への投資の抑制が検討されている。SDGs債の発行も増えており、世界では2018年で18兆5千億円に達している（日本経済新聞2019年7月18日）。SDGsに取り組む企業も増えており、環境や社会に対する意識を持ち、どのように行動するかが会社の存続に繋がる状況になっている。

バイオエコノミーの目的が化石資源からの脱却である以上、バイオ製品の製造過程が化石資源エネルギーに依存していたのでは意味がない。バイオ製品の製造エネルギーに占める再生可能エネルギーの比率を高めることが重要であり、国としてのエネルギー政策が問われることになる。特に、バイオ製品を輸出する場合、問題となる可能性がある。欧州連合（EU）は、バイオエコノミーを新たなイノベーションによる産業振興につながるとして積極的に推進している。EUは、独自の認証制度を駆使して域内のメリットを最大化しているので、バイオエコノミーにおいてもその動向には注目すべきである。EUでの再生可能エネルギーの導入率は高く、再生可能エネルギーの割合が低いバイオ製品を排除する認証制度が成立すると、バイオ製品の性能が優れていたとしても、日本のように再生可能エネルギーの導入率が低い国で製造した製品がEU市場に参入できない可能性が出てくる。つまり、バイオ製品の製造にはエネルギー問題を念頭において開発することが求められる。

バイオエコノミーの推進には、バイオ由来製品の積極的な買い上げが初期において必要となる。バイオ由来製品は化成品に比べて割高なために、普及が進みにくい。アメリカ農務省（USDA）では公共調達に際して、BioPreferred制度⁷⁾があり、政府が優先的にバイオ由来製品を買い上げ、普及を後押ししている。公共調達で割高な製品を税金で購入する以上、バイオエコノミーの推進の意義を、再生可能エネルギー導

入の意義とともに、国民に理解してもらうことが大切になる。

日本ではバイオエコノミーへの取り組みが欧州などと比べて遅れており、産官学での議論が不十分である点は否めない。例えば、プラスチックによる海洋汚染が話題になっているが、単に環境問題であるだけでなく、脱化石資源であるとの視点から、植物バイオマスの利用をどのように進めるのか、それに伴うコストを誰がどのように負担すべきかなど、単に政府が政策を決めるだけではなく、企業、アカデミア、市民を含めた幅広いステークホルダー間の議論が必要だろう。

2. バイオエコノミー時代のバイオテクノロジー

植物バイオマスは、太陽エネルギーによって生育し、炭素循環に組み込まれているという意味で持続可能な社会形成に必要な原材料である。バイオエコノミー時代には、化石資源から作られる化成品に代わって、植物バイオマスから工業製品を作ることが求められている。化成品が市場に広く出回るようになったのは、20世紀半ば以降であるが、現代生活には不可欠なものとなり、その代替は容易ではない。植物バイオマスを使うバイオ製品では、化成品の同等品に比べてコスト高になることが懸念され、研究開発の進捗が遅かった。しかし、バイオエコノミーの時代には、積極的なバイオ製品開発が求められる。

バイオテクノロジーは、農業、工業生産、医薬品開発と幅広い分野をカバーするが、本稿では、植物バイオマスを使ったバイオテクノロジーを主に取り上げる。

2.1. 植物バイオマスとエネルギー問題

バイオエコノミーを議論する際には、化石燃料からのエネルギー代替を考える必要がある。植物バイオマスをエネルギー源として使う際の課題を整理しておく必要がある。以下では、植物バイオマスは必ずしも効率的な再生可能エネルギー源ではないことを指摘する。

現代社会が使っているエネルギー量が膨大であることを考えれば、植物バイオマスのエネルギーに依存することには無理がある。人類が火を使用するようになって以来、現在に至るまで、薪（植物バイオマス）はエネルギー源として使われてきた。地上の植物バイオマスが固定する太陽エネルギー（ 3.0×10^{21} J/年）は人類の使用する全エネルギー（ 3.0×10^{20} J/年）の10倍以上なので、⁸⁾ 植物バイオマスのエネルギー利用も理論的には可能ではある。しかし、地球上に薄く広く存在する植物バイオマスを回収し、加工することを含めたエネルギー収支を考えると、植物バイオマスのエネルギー利用には限界がある。植物バイオマスのエネルギーに関しては文部科学省HPに掲載されている内嶋善兵衛氏による資料が参考になる。⁹⁾

植物バイオマスの主要成分である多糖類（セルロース、ヘ

ミセルロース）からバイオ燃料を生産する研究開発が盛んに行われてきた。しかし、植物の栽培、収穫、加工に要するエネルギーと、バイオ燃料に含まれるエネルギーを比較すると、多くの場合にはエネルギー収支はプラスになっていない。⁹⁾ アメリカではトウモロコシのデンプンから、ブラジルではサトウキビのショ糖から多量のバイオエタノール生産が行われている。これらは、経済政策、農業保護政策としての側面が強く、また、食料とエネルギーの競合になっている点も問題である。¹⁰⁾

処分に困る畜産廃棄物や農産廃棄物をメタン発酵させ、回収したメタンを燃焼して電気エネルギーを回収するバイオガス発電が行われている。¹¹⁾ 規模が小さいためにエネルギー回収効率は低いが、発酵残渣（消化液）に含まれる植物バイオマス由来の栄養分（リン酸など）を循環的に使うことに意義がある。

このように、植物バイオマスはエネルギーとしては利用効率が低いので、再生可能エネルギーとしての利用には限界がある。しかし、地球上で普遍的に、豊富に存在するので、地域性、社会性などを考慮して利用することには意義がある。

植物バイオマスは、栽培と加工などに多量の化石燃料由来エネルギーを利用していることに留意すべきである。現代社会の農業生産では耕運、肥料、収穫、保存、運搬に多くのエネルギーを使っており、それらのエネルギー量を少なくすることは重要な課題である。2020年1月26日に日本政府で閣議決定された「戦略的環境イノベーション戦略」のなかには、農業での化石燃料由来のエネルギー利用を削減するために、「ゼロエミッション農林産業」が研究開発項目として入っている。¹²⁾

2.2. 再生可能エネルギー導入の意味

植物バイオマスからのエネルギー生産に限界や制限がある以上、植物バイオマスの栽培から加工に至るまでに必要なエネルギーを他の再生可能エネルギーに依存することになる。当面は、現実的な選択肢として化石燃料エネルギーを使わざるを得ないが、再生可能エネルギーに代替することが常に強く求められる。企業活動で使うすべてのエネルギーを再生可能エネルギーに変えることを宣言するRE100運動に参加する企業は大手を中心に増えており、バイオテクノロジー分野も例外ではない。

再生可能エネルギーの問題は本稿の範囲を超えるが、バイオエコノミー時代にはエネルギーを意識した研究開発が求められるので、再生可能エネルギー導入の現状を簡単に紹介する。農業生産への再生可能エネルギーの導入に関しては拙著を参照されたい。¹³⁾

2020年現在では、風力発電、太陽光発電のコスト（設備の設置、維持、廃棄までも含む）は、世界的には石炭火力発電のコストよりも安くなっている。2000年代までは再生可

図2. 主要バイオマスからの化成品代替製品の製造概略。

能エネルギーは高コストであり、バイオエコノミーを推進する際の最大のネックの一つであったが、2012年ごろから、太陽光発電、風力発電から得られる再生可能エネルギーの生産コストは劇的に低下した。日本での再生可能エネルギーの生産コストはまだ高いが、いずれは低下するだろう。

日本では、東日本大震災の影響で原子力発電の運用が難しく、化石燃料依存が続いており、再生可能エネルギーの導入は欧州に比べて遅れている。バイオエコノミーの推進には、再生可能エネルギーの導入への積極的な取り組みが必要となる。再生可能エネルギーの導入は、様々な要因が入り組み、必ずしも容易ではないが避けて通ることはできない。

バイオ製品が脱炭素社会に受け入れられるためには、植物バイオテクノロジーの研究開発において、全工程でのエネルギー利用を考慮して、再生可能エネルギーの導入が容易な工程を積極的に選ぶことが求められる。そのことがバイオ製品の社会受容につながる。

2.3. 炭素源としての植物バイオマス

植物バイオマスは化成品代替物を作り出すための炭素源（有機物）として使うことができる。地球上の全植物バイオマスの内訳は、セルロース、ヘミセルロース、リグニンがそれぞれ約50%、約20%、約20%である。セルロース、ヘミセルロースは加水分解によって単糖として使うことができる。リグニンは芳香族環構造を持った不規則な重合体であるので、分解物は芳香族化合物や炭化水素化合物などの混合物となる。規模の大きな化成品代替物の生産には、これらの分解物を利用することになる（図2）。今後は、微生物利用によるバイオテクノロジーや化学工業テクノロジーによる化成品代替物の生産技術の研究開発が進むだろう。

再生可能エネルギー導入コストの低下（上述）は、大気中の二酸化炭素を再生可能エネルギーを使って固定して化成品代替となる有機物製造に使う道を開くことになる。化石資源の燃焼によって、今まで、大気中に放出されていた二酸化炭素を回収し、再生可能エネルギーを使って有機物（炭化水素）を製造する研究（Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS）が進んでいる。「戦略的環境イノベーション戦略」にもCCUSが開発項目に入っている。¹²⁾

植物バイオマスとCCUSの利用は競合する考え方である。前者は人類が利用してきた長い歴史があり、かつ、地球上に20万種類以上の植物が存在しており、途上国であれ先進国であれ利用が可能である。後者は今後の技術であることから、当面は競合は生じないであろう。植物バイオマス利用では、最先端の遺伝子工学により様々な化合物を作り出せる可能性があり、CCUSとは異なる分野での技術開発が期待される。

図3. 多様な植物バイオマスの利用プロセス。

2.4. 植物バイオテクノロジーの課題

植物バイオマスの利用は、伝統的な木材利用から最先端の遺伝子組換え技術を用いたものまで多種多様である。図3には、植物バイオマス利用の主だった植物種と製造過程をまとめた。従来の手法で製造されている製品に関しては、製造工程での再生可能エネルギーの導入率の向上が求められる。化成品との価格競争で不利な製品については、公共調達、補助などの支援が必要である。しかし、それらの支援は国民の税金を使うために、バイオエコノミー時代での工業生産品を社会でどのように支えるのかを議論したうえでの合意形成が必要となる。

遺伝子組換え技術、ゲノム編集技術などの最先端テクノロジーの活用が期待される。国際アグリバイオ事業団 (ISAAA) の報告書によれば2017年の遺伝子組換え作物の栽培面積は1億8980万haとなっている。¹³⁾ ただし、バイオエコノミー時代に求められる高度な製品開発に関しては、植物バイオマスの研究開発は今後の課題である。国内では、植物バイオマスの高度利用を含めたスマートセルプロジェクト (NEDO, 2016–2020年度) などがある。¹⁵⁾

植物バイオテクノロジー分野での技術開発に関しては、代謝改変のためのAI (人工知能) を用いたゲノム情報解析、メタボローム解析、合成生物学の手法が重要になると予想される。特に、メタボローム解析^{16,17)} は、農作物の成分評価、農薬の生態系への影響評価などに威力を発揮するだろう。

一方で、植物への遺伝子導入は一部の植物で成功しているだけであり、多くの工業原材料を生産している植物に応用できる状況にはない。その主な原因は、遺伝子導入後の再分化技術が試行錯誤に依存しており、多くの場合、再分化条件を見出すことができていない。再分化の遺伝子レベルでの解明が進めば、植物種の壁を超える技術の発展が期待できる。また、動物研究では、iPS研究で知られているように、クロマチン制御 (染色体構造の制御) が遺伝子発現に重要であるが、植物でのクロマチン制御の研究は少ない。クロマチン制御による植物代謝工学は今後の重要な研究分野となるだろう。

ま と め

化石資源に依存した社会から脱炭素社会に移行するための経済体系としてバイオエコノミーが提唱されている。同時に、化石資源社会の負の遺産である環境問題、貧富の格差などを解消するためのSDGsが国連で提唱されている。バイオエコノミーやSDGsを支える経済活動としてESG投資、環境債などが広がっており、企業活動において脱炭素社会を目指すことが求められている。再生可能エネルギーは最も安価なエネルギー源となっており、バイオテクノロジー分野でも再生可能エネルギーの活用を意識した研究開発が求められる。植物バイオマスは化石資源を代替する炭素源 (有機物) を提供しており、植物バイオテクノロジーによる化成品代替製品

の生産に関するイノベーションと産業創出が期待される。

謝 辞

バイオエコノミーに関しては、一般財団法人バイオインダストリー協会の坂元雄二氏、藤島義之氏 (現在, NEDO)、(株)三菱ケミカルリサーチ増田宏之氏らとの意見交換を踏まえて記述しており感謝いたします。

引 用 文 献

- 1) OECDバイオエコノミー提案: <https://www.oecd.org/futures/longtermtechnologicalsocietalchallenges/42837897.pdf> (2020年5月31日閲覧)
- 2) NEDO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 https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201708/20170000000796.html (2020年5月31日閲覧)
- 3) バイオ戦略2019: 令和元年6月11日統合イノベーション戦略推進会議決定 <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougouinnovation/pdf/biosenryaku2019.pdf> (2020年5月31日閲覧)
- 4) 五十嵐圭子: バイオサイエンスとインダストリー **75**, 344–348 (2017).
- 5) 増田宏之, 小林 幹: アグリバイオ **2**, 1164–1167 (2018).
- 6) 柴田大輔: バイオサイエンスとインダストリー **77**, 64–67 (2019).
- 7) アメリカ農務省 (USDA) BioPreferred制度: <https://www.biopreferred.gov/BioPreferred/> (2020年5月31日閲覧)
- 8) 瀬戸山 亨, 堂免一成: 光触媒/光半導体を利用した人工光合成, 堂免一成, 瀬戸山 亨監修, エヌ・ティー・エス社, p. 5, 2017.
- 9) 文部科学省 3. 各論 付属資料-1 (第3章関係): https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/shiryo/attach/1287193.htm (2020年5月31日閲覧)
- 10) 松永和紀: メディア・バイアス, 光文社, pp. 217–232, 2007.
- 11) 村田 武, 河原林孝由基: 自然エネルギーと協同組合, 筑波書房, pp. 1–18, 2017.
- 12) 戦略的環境イノベーション戦略: 令和2年1月21日統合イノベーション戦略推進会議決定 <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/kankyousenryaku2020.pdf> (2020年5月31日閲覧)
- 13) 柴田大輔: 生存圏研究 **15**, 19–27 (2020).
- 14) 国際アグリバイオ事業団 (ISAAA) の報告書: <https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/53/executivesummary/pdf/B53-ExecSum-Japanese.pdf> (2020年5月31日閲覧)
- 15) スマートセルインダストリー: <https://www.nedo.go.jp/content/100884792.pdf> (2020年5月31日閲覧)
- 16) Iijima, Y. Nakamura, Y. Ogata, K. Tanaka, N. Sakurai, K. Suda, T. Suzuki, H. Suzuki, K. Okazaki, M. Kitayama, S. Kanaya, K. Aoki and D. Shibata: *Plant J.* **54**, 242–250 (2008).
- 17) N. Akimoto, T. Ara, D. Nakajima, K. Suda, C. Ikeda, S. Takahashi, R. Muneto, M. Yamada, H. Suzuki, D. Shibata and N. Sakurai: *Sci. Rep.* **7**, 1243 (2017).

略 歴

柴田大輔（しばた だいすけ）

生年月日：1954年2月21日

最終学歴：京都大学大学院農学研究科博士課程修了（農学博士）

研究テーマと主な職歴：バイオテクノロジー全般とそれを支える基盤技術開発とエネルギー問題。三井業際植物バイオ研究所主任研究員，かずさDNA研究所研究部長を経て，現在，東北大と岐阜大で客員教授，京大エネルギー理工学研究所および生存圏研究所で特任教授，バイオインダストリー協会理事。

趣味：新しいことにチャレンジ。