



温室効果ガス削減とバイオ液体燃料

田中 浩

19世紀に米国で石油の本格的な商用生産が始まって以来、世界の石油消費量は増加の一途をたどっている。2018年における全世界の石油消費量は約47億トンであり、世界の主要一次エネルギーのうち、もっとも消費量が多い状態が続いている¹⁾。石油は常温常圧で液体であることから、他の一次エネルギーのうち固体である石炭、気体の天然ガス、さらには原子力などと比べて貯蔵や輸送が容易で、かつ燃焼特性に優れるという特長を持つ。

石油の用途としてもっとも多いのは陸送や空輸などで使われる液体燃料であり²⁾、ガソリンやディーゼル燃料、航空機のジェット燃料などとして消費されている。輸送機器とともに容易に移動でき、内燃機関で効率良く燃焼し、出力を制御しやすい特性は、液体燃料ならではの長所である。

一方で、石油の可採年数は2018年末時点で50年と言われている¹⁾。実際には油田の新規発見や技術の進歩などにより枯渇をある程度先送りできるだろうが、遠くない将来において輸送機器による石油の大量消費が不可能となることは議論の余地がない。また、石油をはじめとする化石燃料を消費した後に発生するCO₂によって大気中のCO₂濃度が上昇し、さらに、このCO₂が太陽光による熱の一部を効率良く吸収することで急激な地球温暖化を招き、結果として世界中で海水面の上昇や生態系の破壊などが助長される恐れがあると広く指摘されている³⁾。

このような地球規模での被害拡大を軽減するために、1992年に気候変動枠組条約 (United Nations Framework Convention on Climate Change) が国連で採択され、主に大気中のCO₂濃度の急激な上昇を抑制するためのルール作りが行われた。この条約に基づいて、気候変動枠組条約締約国会議 (Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change, COP) が毎年開催されている⁴⁾。特に、1997年に京都で開催された第3回締約国会議 (COP3) では、主要先進国にCO₂などの温室効果ガスの発生量抑制義務を課した「京都議定書 (Kyoto Protocol)」が規定された。その後、2013年の第21回締約国会議 (COP21) では、温室効果ガス総排出量の55%以上をカバーする、発展途上国を含む主要国がCO₂などの発生量を抑制することで、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2°Cより十分低く

保ち、1.5°Cに抑える努力をするという、具体的な共通目標が設定され、「パリ協定 (Paris Agreement)」として採択された。

こうした世界中の危機感とは裏腹に、大気中のCO₂濃度は上昇し続けている。産業革命以前の平均的な値とされる278 ppmに対して、2019年の世界平均濃度は400 ppmを超えているのが現状である⁵⁾。

バイオ液体燃料の位置づけ

バイオ液体燃料は、輸送機器用燃料として燃焼時におけるCO₂発生量抑制に大きく貢献する切り札として期待されている。まず、化石燃料のように、地中に固定されたCO₂発生源を積極的に掘り起こす必要がない。また、CO₂を吸収して生産されるバイオマスを原料として使用することから、カーボンニュートラルの概念を考慮すれば、燃料として使用したときのCO₂排出量を化石燃料の場合と比べて実質的に削減することができる。ここでカーボンニュートラルとは、「対象とするバイオマスが、生物による光合成によって生成した有機物なのであれば、バイオマスを燃焼することなどにより放出されるCO₂は、生物の成長過程で光合成により大気中から吸収したCO₂であることから、バイオマスは、ライフサイクルの中では大気中のCO₂を増加させない」という特性のことである⁶⁾。

バイオ液体燃料の開発動向

気候変動枠組条約以前のバイオ液体燃料 温室効果ガスの削減が叫ばれる以前にも、バイオマスを原料とした液体燃料の製造は多く試みられてきた。たとえば、太平洋戦争中には日本国内で石油代替として植物由来の糖類から燃料用ブタノールやエタノールを製造する研究開発が進められた。1970年代のオイルショックに伴う石油価格高騰の際には、ブラジルが世界に先駆けて自国で生産されるサトウキビからのガソリン代替燃料の生産に大々的に着手している⁷⁾。これらの試みは、いずれも石油の安定的な入手が困難となった際の代替品の確保としての位置づけであった。

第1世代のバイオ液体燃料 気候変動枠組条約の締

結など、世界的な温室効果ガス削減の気運が高まる中で、第1世代と呼ばれる液体燃料の開発が世界的に活発化した。第1世代とは、一般に穀物や食用植物油脂など、主に食用の農作物を原料として利用していることを指す。サトウキビ、トウモロコシといった穀物からは、糖類を発酵してエタノールを得て、これをガソリンと任意の比率で混合して使用することができる(図1上)。また、大豆油などの油脂類は油脂中のグリセリンをメタノールに置き換えること(エステル交換反応)でディーゼルエンジン用の燃料となる(図1下)⁸⁾。食用可能なこれらの原料は、大量入手が容易で、かつ液体燃料化するための工業技術も既存方式の応用が主であったことから、第1世代のバイオ液体燃料は商用生産技術が早期に確立され、特に欧米やブラジルでは広く利用されている¹⁾。

一方でこの方式は、食料や飼料として流通している栄養価の高い原料を大量消費することから、食料と競合して農産物価格の高騰を招きかねないこと、また、一部の方式では耕作や施肥などのプロセスを考慮すると実質的に温室効果ガス発生量の削減には寄与しないとの指摘がある⁹⁾。

第2世代のバイオ液体燃料 第1世代の方式の問題点を回避しうるバイオ液体燃料として、第2世代と呼ばれる燃料があげられる。この第2世代バイオ液体燃料の生産では、トウモロコシの茎やワラなど可食部以外の農業残渣、成長の速い草本や樹木、あるいは食用に適さない植物油脂といった、食料と競合しない未利用の植物資源を原料と位置づけた¹⁰⁾。

このうち、農業残渣や草木は、糖類の一種であるセルロースおよびヘミセルロース、そしてそれらを立体的に接合するリグニンが複雑に絡み合ったリグノセルロースが主要構成物である。リグノセルロースは化学的・生物学的にきわめて安定しているため、この難分解性の複合

体をいかに低コスト・低エネルギーで工業利用しやすい単糖などに分解し、第1世代の技術も活用しつつ液体燃料として市場に安定供給できるかに多くの開発資源がつき込まれている。たとえば、セルロース分解のための高性能の酵素の開発、ヘミセルロースに含まれる難発酵性の単糖であるキシロースを高速でエタノール発酵できる酵母や細菌の模索・遺伝子改変、さらには生物工学的アプローチのほかにも物理・化学的プロセスの検討が鋭意進められている。本稿執筆時点(2020年7月)で、大幅な温室効果ガス発生量削減と、石油を代替できるような安価かつ大量生産が可能なりグノセルロース由来のバイオ液体燃料はまだ登場しておらず、今後のさらなる進展が期待される場所である。

第2世代の原料のうち、非食用の植物油脂についてはジャトロファがあげられる。この作物は半乾燥地域でも生育する低木で、種子からは食用に適さない油脂が得られる。農地と競合しにくく、灌漑用水の消費量削減も期待されるが、燃料用途として効率の高い大規模栽培手法が確立されていないこと¹¹⁾、乾燥状態が過酷になると生産効率が落ちることから¹²⁾、耕作適地の選定を含めた全体システムの最適化が必要である。

第3世代のバイオ液体燃料 第1世代は食料との競合が課題視され、第2世代は大量生産技術の確立が難航する中で、第3世代として脚光を浴びつつあるのが、微細藻類などの微生物を原料とする液体燃料である(図2)。特に微細藻類は、細胞内に油脂や炭化水素といった液体燃料として利用しやすい物質を大量に貯蔵する特性を持った種が数多く報告されている¹⁰⁾。微細藻類を安価に大量培養できれば、第1世代のような食料との競合から解放され、第2世代のように加工しにくい物質を扱う必要もない。陸上植物が生育できないような耕作不適地も利用できる。そして何よりも、単位面積あたりの燃料生

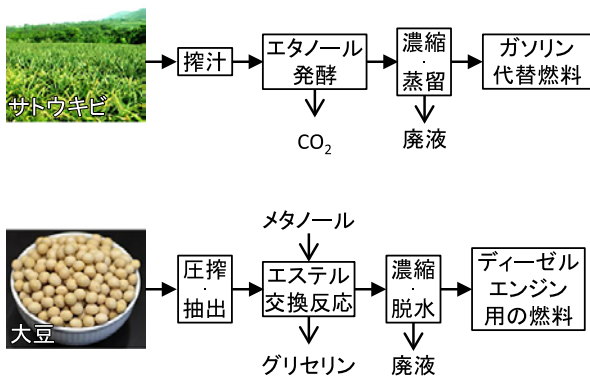


図1. 第1世代バイオ液体燃料の製造工程概略。(上)糖類からのガソリン代替燃料。(下)油脂からのディーゼルエンジン用燃料。 ※学会HPのPDFではカラー表示されます。



図2. 第3世代バイオ液体燃料の原料となる微細藻類の生産風景¹⁴⁾。 ※学会HPのPDFではカラー表示されます。

産能力が非常に高いとされている。たとえば、仮に米国のすべての大豆用耕作地で微細藻類によるバイオ燃料を生産した場合、米国全土で消費される石油由来のディーゼル燃料の全量を十分に代替できるとの試算がある¹³⁾。

このように第3世代では、従前の世代の方式における各種欠点を克服することが期待されるが、微細藻類の生育環境が陸上ではなく水中であることに起因する新たな難点も浮き彫りにされている。まず、増殖させたくない他の藻類や細菌、カビ、原生動物の侵襲を少なからず受ける。これら招かれざる微生物群は、培養対象の微細藻類と粒径や比重が大差なく、容易に排除できない。培養環境の工夫や選別機の改良などである程度は混入を防止できるものの、特定の微細藻類のみを大規模かつ常に優占させる手法の確立は、試行錯誤を伴う難題である。

首尾良く目的の微細藻類を培養できたとしても、それらを収穫するためには、目的物質よりも遙かに大量の培養液を脱水・分離する必要がある。遠心脱水や加熱などの手法を安易に適用すると、動力や熱源がCO₂排出に直結し、バイオ燃料としての温室効果ガス削減効果を帳消しにしてしまう。微細藻類の特性に応じて効率良く脱水する新技術の組合せが重要となる。

CO₂源の確保も課題である。第1世代、第2世代で利用している陸上高等植物が大気中のCO₂を難く吸収できるのに対し、微細藻類は水中の溶存CO₂を取り込むため、高速で増殖させるにはCO₂を人為的に培養液に溶解させる必要がある。空気中のごく希薄なCO₂を水中に供給するには効率が悪いので、火力発電所や製油所などの副産物として排出される高濃度CO₂を利用することが多いが、その発生源と、培養に適するための地勢条件はなかなか一致せず、純技術的な努力のみでは最適解を引き出せない。

このように、実用化にはまだまだ時間を要する第3世代ではあるが、各種障壁を乗り越え、液体燃料の市場に広く浸透して温室効果ガスの発生を大幅削減すべく、今後のさらなる研究の深化が期待される。

その他のバイオマス由来の液体燃料 微細藻類を遺伝子操作し、光合成の効率を高めるなど最終産物の生産能力を高める形質を付与した生物を用いて液体燃料を生産する方式を第4世代と呼ぶ場合がある¹⁵⁾。人為的に遺伝子を操作することで第3世代の各種弱点を克服できる可能性を秘めているが、一方で、遺伝子組換え生物が自然界に漏れ出して未知の影響を及ぼすリスクをいかに制御するかが大きな課題となる。

食料関連産業由来の廃油を再利用した燃料も短期的には大いに期待される。揚げ物などとして利用した後に廃

棄された植物性油脂や、家畜の脂肪分のうち食用に供されなかった部位などを利用すれば、食料との競合を回避でき、第1世代から確立されている油脂の燃料化技術を応用できる。この方式で生産されたバイオ液体燃料は、すでに一部が実用化されている¹⁶⁾。廃油由来燃料の最大の泣き所は、原料の供給が限定されるため、理窟上の最大生産量が規定され、石油を強力に代替できるような表舞台には登場しにくいところである。

農業残渣など幅広いバイオマスを熱分解して得られる可燃性ガスを、FT (Fischer Tropsch) 合成と呼ばれる触媒反応や微生物による反応を用いて液化するBTL (Biomass to Liquid) も、バイオ燃料生産技術の本命の一つである。石炭や天然ガスを液化する技術はすでに商用化に成功しており、それを応用して米国や欧州ではバイオマスを原料とした商用規模での運用が一部始まっている¹⁷⁾。

この方式ならではの弱点のひとつは、ガス化や液体化の過程の多くが他の方式と比べて高温・高圧となり、装置の初期投資費が重くのしかかることである。

まとめと展望

石油由来の輸送用燃料が湯水のように消費され、燃焼後のCO₂発生による温暖化と地球規模での悪影響が強く危惧される中で、この余殃を断ち切るべく登場した各世代のバイオ液体燃料の概要と得失を通説した。第1世代では、豊富な食用原料と既存技術を利用しての市場投入に成功したが、食料との競合が問題視された。第2世代では非食用の植物資源の有効活用が、第3世代では微細藻類の高い生産性が期待されているが、いずれも開発上の課題が多く、第1世代のような量産体制の確立には至っていない。

今後も新たな原料と加工技術を組み合わせた新規のバイオ液体燃料が模索され、各方式の優劣が活発に議論されるであろう。その際に重要な指標となるのは、燃料製造に関わる全過程で発生する温室効果ガス発生量の大小である。原料の製造や調達、中間産物への加工、副産物の適正処理、最終製品の出荷、そして、燃焼して動力源となった後の排気ガス、これらすべての工程が積み上げの対象となる。この合算値を各方式の燃料同士で公平に評価するために、たとえば環境省から算定のためのガイドラインが示されている¹⁸⁾。

バイオ燃料の評価で見落としがちで、特に留意すべきは、土地利用の変化であろう。たとえば、すでに大量の炭素源を保持している泥炭地を開墾して燃料作物の栽培用に転用する場合、一見、農地との競合を回避した好例のようにも見えるが、実際には土壌改良した時点で大量

のCO₂が発生し、これを加味すると、温室効果ガス削減に逆行するとの結果が導かれる可能性がある¹⁸⁾。

温室効果ガス削減への寄与以外にも、バイオ燃料が社会に受け入れられるためには、地球温暖化防止に貢献できるなら買ってほしいと消費者が思える価格までコストダウンができるか、耕作時にマイクロプラスチックを出さないなど、刻々と変化する社会的要請に応えられるか、化石燃料の需要に食い込むだけの十分かつ安定した生産規模を達成できるか、などが今後ますます重要になっていくであろう。

以上、難題山積のバイオ液体燃料ではあるが、生物工学のみならず、多方面の技術者の英知と長期的な粘り、そして熱意があれば、必ずや温室効果ガス削減施策の一翼を担うまでに羽ばたけるものと信じたい。

文 献

- 1) BP: Statistical Review of World Energy (2019).
- 2) 資源エネルギー庁：平成30年度エネルギーに関する年次報告 (2019).
- 3) 気象庁:IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 (2013).
- 4) 環境省：
<http://www.env.go.jp/earth/copcmipcma.html> (2020/05/31).
- 5) 気象庁：
https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html (2020/05/31).
- 6) 農林水産省：食料・農業・農村白書 (2006).
- 7) 日本エネルギー経済研究所：諸外国のエネルギー政策動向に関する調査報告書 (2018).
- 8) Kumar, A. *et al.*: *Biofuels: Greenhouse Gas Mitigation and Global Warming*, Springer (2018).
- 9) 久保田宏, 松田 智：幻想のバイオ燃料—科学技術的見地から地球環境保全対策を斬る, 日刊工業新聞社 (2009).
- 10) Alam, F. *et al.*: *Procedia Eng.*, **105**, 763 (2015).
- 11) 林 慶一：アフリカにおけるジャトロファの適正利用, 日本国際地域開発学会シンポジウム (2009).
- 12) Giwa, A. *et al.*: *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **88**, 239 (2018).
- 13) NREL: Current Status and Potential for Algal Biofuels Production (2010).
- 14) (株)IHI：
https://www.ihico.jp/ihico/all_news/2015/other/2015-5-21/index.html (2020/05/31).
- 15) Abdullah, B. *et al.*: *Sust. Energ. Rev.*, **107**, 37 (2019).
- 16) 京都市：
<https://www.city.kyoto.lg.jp/kankyo/page/0000000008.html> (2020/05/31).
- 17) Ail, S. *et al.*: *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **58**, 267 (2016).
- 18) 環境省：バイオ燃料の温室効果ガス削減効果に関するLCAガイドライン (2010).