



アセトン・ブタノール発酵～今昔物語

小林 元太

はじめに

いきなり唐突な展開であるが、「芋で零戦を飛ばす」という話を聞いたら、読者の皆さんはどう思うだろうか？ 零戦とは、言わずと知れた第二次世界大戦期における大日本帝国海軍の主力艦上戦闘機であり、一世を風靡した零式艦上戦闘機（れいしきかんじょうせんとうき）の略称であることは多くの人に知られている。さて、「その零戦を芋で飛ばす…?」、まあ普通の人には何のことだかさっぱりわからないことであろう。しかし、これは石油資源に乏しい我が国で大真面目に取り組まれた実際の話である。しかもそれほど大昔の話ではなく、ほんの数十年前に産学官をあげて大真面目に取り組んだ発酵の話である。この突拍子もないような話の鍵は…そうアセトン・ブタノール発酵なのである。

アセトン・ブタノール発酵の歴史

アセトン・ブタノール（ABE）発酵の歴史は古く、微生物によるブタノール生産に関する研究は19世紀後半にまで遡り、近代微生物学の先駆者として有名な Pasteur によりブタノール生産菌が初めて発見された¹⁾。日本においても1930年代前半から廃糖蜜を発酵原料とした ABE 発酵の工業化が開始され、第二次世界大戦開戦後は航空燃料用途のブタノールを生産するために世界の広い地域で ABE 発酵が行われた。その頃、欧米では戦闘機の高速化が進められ、我が国でも軍用航空燃料として100オクタン（オクタン価 100）が要求されるようになり、日本海軍も1934（昭和9）年の次期艦上戦闘機の設計に際し、あえて艦上機としての性能を要求せず、近代的高速機を求めたと言われている。これが後に太平洋戦争の花形戦闘機である零戦へとつながっていくこととなる。戦闘機の高速化に対応するためには燃料にも技術革新が求められることとなり、それまでの戦闘機用92オクタンガソリンにイソオクタンを混入することでそのオクタン価は達成されるが、分解ガソリン製造時の廃ガスの成分を利用してイソオクタンを作っていた米国と比べ、石油精製規模が小さい日本では、同じ方法では必要量を確保することはできなかったと言われる。そこ

で、海軍は、アセチレン→アセトアルデヒド→ブタノール→イソオクタンという一連の合成プロセスを設計した。当初は合成法でのブタノール製造が模索されたようであるが、戦況の悪化に伴い、発酵法によるブタノール生産が計画され、そのブタノールからのイソオクタン製造が図られることになった。鈴木信一先生が、『醗酵と工業』に寄稿されている「旧海軍とアセトン・ブタノール発酵」にも海軍が発酵ブタノールから航空機燃料用のイソオクタンを生産しようとする様子が描かれており大変興味深い²⁾。海軍は昭和農産加工（現・メルシャン）八代工場や台湾高雄にて、陸軍は東亜化学興業（現・協和発酵）防府工場にてアセトン・ブタノール発酵生産を行おうとしていた。また、有馬啓先生が1944（昭和19）年に刊行された「アセトン・ブタノール醗酵工業」の序文には以下のような記述があり、当時のエネルギー状況がうかがい知れ、これもまた大変興味深い。まさに「芋で零戦を飛ばそう」という機運だったに違いない³⁾。以下、抜粋（原文まま）

「アセトンブタノール醗酵は始め1911年 Fernbach、更に1914年 Weizmann により本菌が発見せられて以来、主として米國英國に於いて工業化せられて来たのであるが、最近に至り我が國に於いて内地或ひは外地に操業し、又は新たに計畫中の工場次第にその多きを加へ、今や我が國新興醗酵工業の一として重要視されるに至った。之は本醗酵工業の産物たるブタノール、アセトン等が高オクタン價航空燃料、航空機塗料溶剤製造原料として必要缺くべからざるものであるが爲であり、今日之が増産の緊要なるは言を俟たぬところである。由來ブタノール生産には合成法と醗酵法とがあり、兩者その利點を譲らず、何れを採るかは輕々に決し難いところであるが、醗酵法に於いては所要電力及び資材少なくして濟み、且つ操作は誠に簡單である。今之を原料より見るときは合成法は有限なる地下資源に期待せねばならぬのに反し、醗酵法は大地と、太陽エネルギーと人の勤勞の存するかぎり無限に生産されゆく農産資源に頼ることが出來、且つその副産物たるガスを利用し、醗酵廢液を飼料として家畜を養ひ、肥料を得、之を以て再び作物を生産すると云ふが如き一物の無駄なき一環を畫かしむるならば、誠に

興味深き又自然に則したる工業と云ふべきである。南方資源開発を思ふとき醱酵工業に俟つところ大なるものがある。而も今日の情勢下にあつては、国内食料と醱酵資源は次第に相衝突を來す恐れがあるのであるが、非食料の農林産資源即ち木材、ツンドラその他の廢物の本醱酵原料としての活用も重要な研究題目である。本醱酵は實際上のみならず、學術上に於いても亦誠に興味深いものがあるのであつて、著者はアセトン・ブタノール醱酵及び之に類縁の諸醱酵の最近に至るまでの内外の研究文献を網羅し之が紹介引用に努めた。本醱酵に関する研究は今日誠に日進月歩の勢にあり、本稿素より不備の點が多いのであるが今後の研究に俟つこととする。」

しかし、第二次世界大戦終戦後の1940年代後半から1950年代にかけて、石油化学工業の発達・拡大により、合成法によるブタノール生産が普及し、ABE発酵によるアセトン・ブタノール生産量が急激に減少し、1960年代頃には南アフリカなどの一部の地域を除き、ABE発酵による工業生産は完全に衰退した。しかし、1970年代半ばに起きた石油ショックにより、石油の枯渇性が危惧され、石油化学工業の依存からの脱却が重要視されるようになった。一方、石油の大量消費による大気中炭酸ガスが増大と地球温暖化の因果関係が問題とされるようになった。このような状況から、枯渇性の石油に代わる資源として、炭酸ガスの固定化能力に優れ、世界中に豊富に存在するバイオマスに着目され、発酵法による未利用バイオマスからの化学原材料生産が広く模索されるようになった。このような状況の下、1980年初頭よりABE発酵研究の機運が増大し、世界各国で基礎および応用研究が再開され、バイオマスの有効利用法の一つとして現在に至っている⁴⁾。

アセトン・ブタノール菌の種類とその代謝

工業的アセトン・ブタノール菌は偏性嫌気性、芽胞形成能を有するグラム陽性桿菌 *Clostridium* 属細菌に属し、*C. acetobutylicum*, *C. beijerinckii*, *C. saccharoperbutylacetonicum*, *C. saccharobutylicum* の4種が知られている^{5,6)}。アセトン・ブタノール菌の有用性は、エタノール生産に用いられる酵母とは異なり、デンプンやグルコースなどの食糧として利用可能な糖類以外にも広範な糖類を利用できることにある。アセトン・ブタノール菌の代謝は非常に複雑であり、ABE発酵においては、菌体増殖期によってその代謝産物が大きく変化する。対数増殖期は、酢酸・酪酸を生産する酸生成期であるが、定常期に至ると代謝転換が生じ、アセトン・ブタノール・エタノールを生産する溶剤生成期となるのである。図1にアセトン・ブタノール菌の代謝経路および代

謝酵素を示す⁷⁾。

菌体内に取り込まれたグルコースなどのヘキソースは、解糖経路を経てピルビン酸へと変換される。また、ペントースに関しても、解糖経路中のフルクトース-6-リン酸あるいはグリセルアルデヒド-3-リン酸として代謝される。ピルビン酸はピルビン酸-フェレドキシンオキシドレダクターゼにより酸化的脱炭酸され、アセチルCoAへと変換される。

アセチルCoAは、さらに二量化されアセトアセチルCoA、続いて脱水・還元によりブチリルCoAへと変換される。酸生成期においては、これらアセチルCoAおよびブチリルCoAから、それぞれ酢酸・酪酸が生成され、菌体増殖と代謝に重要なATPを2分子獲得する。一方、増殖が定常期にいたると溶剤生成へと代謝がシフトする。ひとたび代謝転換が起こると、それまでに生成した酢酸および酪酸を、それぞれアセチルCoA、ブチリルCoAへと再同化する。この反応は、CoAトランスフェラーゼの働きにより、アセトアセチルCoAからアセト酢酸に変換する反応と共役して起こる。さらに、アセチルCoAとブチリルCoAは、それぞれエタノールとブタノールに還元され、最終生産物として菌体外へと排出される。

また、アセチルCoAとブチリルCoAの再同化の際に生じたアセト酢酸は、アセト酢酸デカルボキシラーゼにより脱炭酸され、アセトンへと変換される。ABE発酵における各種最終代謝産物は、菌体にとって、代謝の過程で生じる余剰電子を廃棄する手段としての役割も担っている。解糖経路およびピルビン酸の酸化的脱炭酸反応においてNADHが余剰電子として生じる。このNADHはアセトアセチルCoAからブチリルCoAへの還元反応に用いられるほか、酸生成期ではヒドロゲナーゼの働きにより水素として放出される。一方、溶剤生成期では水素の生成量は減少し、NADHはアセチルCoAとブチリルCoAからエタノール、ブタノール生成への還元力として用いられる。つまり、発酵のフェーズによって電子の受渡し先を変更しつつ、そのバランスを保つことにより代謝を制御しているのである。アセトン・ブタノール菌の溶剤の生成比は、酢酸や酪酸および人工電子供与体を添加することで大きく異なることが知られている⁷⁻¹¹⁾。つまり、アセトン・ブタノール菌の代謝は、炭素および電子の流れのバランスにより厳密に制御されているのである。

バイオリファイナリーとしてのABE発酵

バイオマスをABE発酵の原料として利用する場合、まず、現在の世界情勢を考慮する必要がある。国連食糧

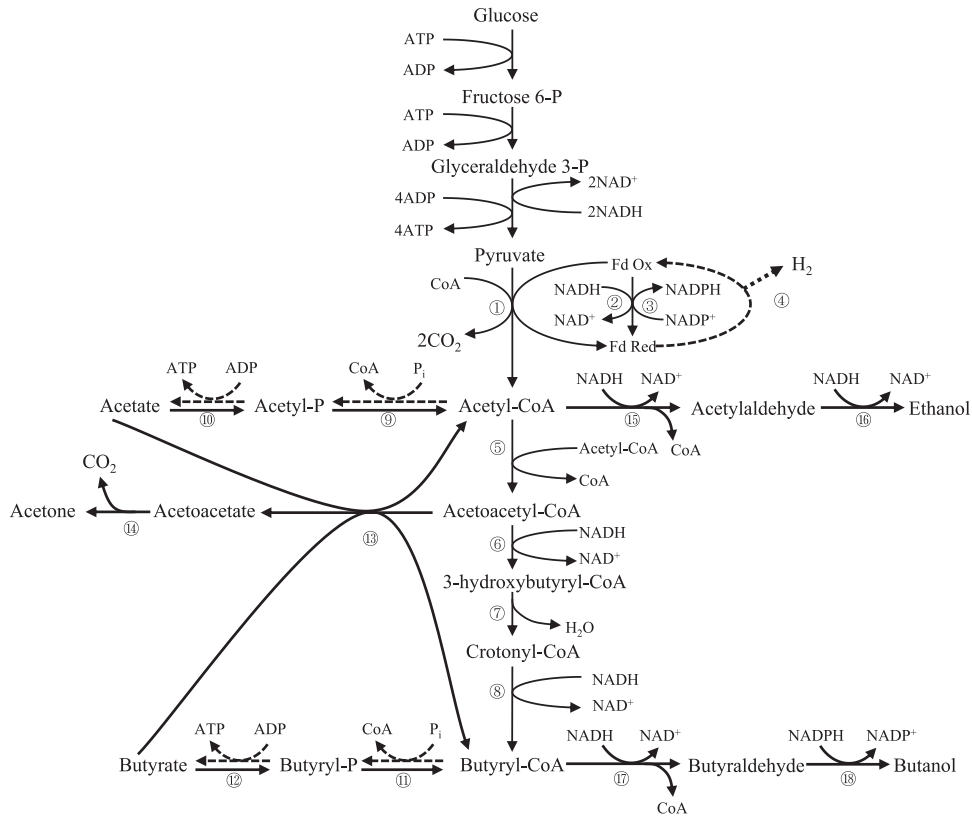


図1. アセトン・ブタノール菌の代謝経路図。①ピルビン酸-フェレドキシンオキシドレダクターゼ、②NADH-フェレドキシンレダクターゼ、③フェレドキシン-NADレダクターゼ、④ヒドロゲナーゼ、⑤チオラーゼ、⑥3-ヒドロキシブチリル-CoA デヒドロゲナーゼ、⑦クロトニルCoA ヒドラターゼ、⑧ブチリルCoA デヒドロゲナーゼ、⑨ホスホトランスアセチラーゼ、⑩酢酸キナーゼ、⑪ホスホトランスブチリラーゼ、⑫酪酸キナーゼ、⑬CoA トランスフェラーゼ、⑭アセト酢酸デカルボキシラーゼ、⑮アセトアルデヒドデヒドロゲナーゼ、⑯エタノールデヒドロゲナーゼ、⑰ブチルアルデヒドデヒドロゲナーゼ、⑱ブタノールデヒドロゲナーゼ。破線は酸生成期の代謝流束、太い実線は溶剤生成期の代謝流束を表す。

農業機関 (FAO) によると、2050年には世界人口は現在の約1.5倍の90億人に増加する一方で、主要穀物の生産量は年に数パーセントの増加しか見込めないのである。すなわち、有限性資源の枯渇という環境・エネルギー問題に加え、食糧不足という食糧問題も現実には解決しなければならない。つまり、発酵原料にはわれわれの食糧になりえないものを用いることが望ましい。これまで世界中でさまざまな種類の ABE 発酵原料の探索が行われてきたが、バイオマスの中でも特に生物系廃棄物からのアセトン・ブタノール生産について述べる。

(1) サゴおよびサゴデンプン廃液の利用¹²⁾

サゴは東南アジアに広く分布する熱帯植物で、光合成能力が高く、大気中の二酸化炭素の吸収量に優れたカーボンニュートラルなバイオマスである。また、抽出して得られるサゴデンプンの生産性は25 ton/ha/yearと他の植物資源と比較して非常に高いことから小麦、米、トウモロコシ、ポテト以外のデンプン源としてその利用価値は高い。しかし同時に、サゴからデンプンを抽出した後

のサゴデンプン廃液は利用されることなく廃棄されており、新たに河川や土壌の環境汚染の原因となっている。石崎らは *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 (N1-4株) をアセトン・ブタノール菌として用いてサゴデンプン廃液の ABE 発酵への利用を検討した。サゴデンプン廃液のみでは N1-4 株の増殖を促進することができず、ブタノール生産量も低いものだった。しかし、サゴデンプン廃液にトウモロコシ工場より産業廃棄物として排出されるコーン・スティープ・リカー (CSL) および1%程度のサゴデンプンを添加すると増殖が促進され、ブタノール生産量も3.5 g/lに達することができた。よって、サゴデンプン廃液は炭素源、CSLは窒素源として ABE 発酵に応用可能なバイオマスであることが明らかとなっている。

(2) オイルパーム廃液の利用¹³⁾

オイルパームもサゴと同様に東南アジアに広く生息する熱帯植物の一つであり、果実から抽出されるパームオイルは食用油、マーガリン、石鹼工業の原料などに利用

されている。しかし、パームオイルの製造工程で排出されるパームオイル廃液も環境汚染の原因となっている。LeeらはN1-4株を用いてパームオイル廃液のABE発酵への利用を検討した。パームオイル廃液のみでもN1-4株の増殖は可能であり、ブタノール生産量も2.5 g/lに達した。さらに、パームオイル廃液には高分子多糖が多く含まれているため、加水分解処理を行い、ブタノール生産量を4.4 g/lへと増加させた。また、ABE発酵後ではパームオイル廃液のBODを64%も削減し、ABE発酵はバイオエネルギー生産方法のみならず、パームオイル廃水処理技術としても可能である。

(3) 焼酎粕および生ごみの利用¹⁴⁾

焼酎粕と生ごみは大量に排出される生物系廃棄物である。筆者らはABE発酵を行うことにより、焼酎カス・生ごみのBOD, COD, 全窒素量, 全リン量, 全炭素量, 懸濁物質量をそれぞれ, 30%, 45%, 29%, 29%, 26%, 40%に削減することに成功している。

(4) 余剰汚泥の利用¹⁵⁾

活性汚泥法は廃水処理に現在もっとも広く普及している技術であり、その処理能力も高い。しかし、日本の活性汚泥プロセスでは年に4000万m³以上の余剰汚泥が発生し、一部を除いて有効利用されずに焼却や埋め立てにより廃棄されているのが現状である。筆者らはN1-4株を用いて余剰汚泥のABE発酵への利用を試みた。余剰汚泥のみでは加水分解処理の如何に関わらず、N1-4株の増殖を促進することができず、ブタノールはほとんど生産されなかった。しかし、余剰汚泥にグルコースや生ごみを添加すると増殖が促進され、ブタノール生産量もそれぞれ、9.3 g/lおよび5.8 g/lに増大した。さらに、ABE発酵後では、余剰汚泥の懸濁物質量を最大で53%に削減することに成功している。よって、ABE発酵は活性汚泥プロセス後の新たな処理プロセスとして有効であると考えられる。

(5) その他のバイオマス利用

上記で述べた4種類以外のバイオマスを利用した例をあげてみる。オランダ国内の有機性廃棄物¹⁶⁾、アメリカの大豆工場で廃棄される大豆モラセス¹⁷⁾、フランスの農産廃棄物¹⁸⁾などを原料としたABE発酵に成功している。

ABE発酵は環境低負荷型であり省エネルギー型であるという優れた特徴を備えている。表1に示すように、アセトン・ブタノール菌には菌種に関わらず、多種類のバイオマスを発酵原料として利用できる能力がある。

表1. バイオマスを発酵原料としたABE発酵

アセトン・ブタノール菌	発酵原料
<i>C. saccharoperbutylacetonicum</i> N1-4	サゴデンペン サゴデンペン廃液
<i>C. saccharoperbutylacetonicum</i> N1-4	オイルパーム廃液
<i>C. saccharoperbutylacetonicum</i> N1-4	焼酎蒸留廃液, 生ごみ
<i>C. saccharoperbutylacetonicum</i> N1-4	余剰汚泥
<i>C. acetobutylicum</i> ATCC824 ^T	有機性廃棄物
<i>C. acetobutylicum</i> ATCC824 ^T	廃木材
<i>C. acetobutylicum</i> IFP913	農産廃棄物
<i>C. beijerinckii</i> BA101	大豆モラセス
<i>C. beijerinckii</i> BA101	コーン廃液
<i>C. saccharobutylicum</i> NCP262 ^T	乳清

高ブタノール生産システムの開発

ABE発酵は嫌気発酵のご多分に漏れず、好気発酵と比較して増殖速度が小さく、最大菌体濃度も高くないために、その生産性が低い。また1.0–1.5%程度のブタノールの蓄積により、発酵が停止するために、その生産量も高くは望めない。そこで、これらの問題を解決するためにさまざまな高ブタノール生産システムの開発が検討されてきている。筆者らによるその例をいくつか紹介する。

田代ら¹⁰⁾はブタノールの前駆体である酪酸に着目し、pHを指標に酪酸をフィードするpH-stat流加培養法を考案した。酪酸のみをフィードした場合、ブタノールは生産されなかったが還元力としてグルコースを供給すると生産された。また酪酸とグルコースのフィード比1.4で残グルコース濃度をほぼ0に維持して、ブタノール収率は約1.5倍に増加し、高い収率を示す新奇なブタノール生産法を構築した。次に、田代ら¹⁹⁾は中空糸膜を用いた高密度連続培養法を考案し、アセトン・ブタノール・エタノール生産性を検討した。高密度ではない連続培養では生産性は1.85 g/l/hであったが、高密度連続培養では11.0 g/l/hに増加した。しかし、液量の制御が48時間で不可能となり、培養液を引き抜くbleedingを行った。その結果、世界最高水準の生産性7.55 g/l/hと207時間の操作安定性を示すシステムを構築した。さらに、田代ら¹¹⁾は非増殖菌体を用いた酪酸からの新規ブタノール生産方法を考案し、ブタノール対炭素源収率を検討した。酪酸のみからは生産できなかったが、グルコースの添加によるブタノール生産は促進された。また、還元力の供給に電子供与体の添加を試みた結果、メチルピオローゲンにより収率は0.671 C-mol/C-molにまで増加した。もし副産物生産がないホモブタノール発酵が可能であれば、1 Mのグルコースから最大1 Mのブタノールが生産

され、その理論収率は、 $1\text{ M} \times 4/1\text{ M} \times 6 = 0.667\text{ C-mol/C-mol}$ と算出される。本発酵法により理論収率に匹敵するブタノール生産方法の構築に初めて成功した。

進藤ら²⁰⁾は、複雑な代謝経路を有するアセトン・ブタノール発酵の動的モデル化および感度解析によるキー代謝経路の決定を行った。ABE発酵菌の既知の代謝経路に基づき、生体反応系解析シミュレータWinBEST-KIT¹⁹⁾を用いてABE発酵の動的モデル化を行った。モデル内のパラメータは、N1-4株を初発グルコース濃度62.0 mMで回分培養した際の実験値を再現するように決定した。初発グルコース濃度を種々に変えた回分培養の実験データは、既知の代謝経路のみで構築した本モデルでは再現が困難であったため、酪酸の再同化がCoAトランスフェラーゼ経路および酪酸生産経路の逆経路で行われることを考慮してモデルを再構築した。その結果、実験データの各物質濃度の時間的挙動が定性的に一致し、本モデルの有用性が検証できた。この動的モデルは、刻一刻と変化する代謝物の動的変化を常に把握できるので、今後は発酵生産過程全体のボトルネックの同定、ブタノール生産の最適培養条件の設定などへの応用が期待される。

ABE発酵菌株の分子育種

高ブタノール生産を目的として、高ブタノール生産プロセスのみならず、菌株の分子育種も積極的に行われている。特に、ゲノム情報が明らかとなっている*Clostridium acetobutylicum* ATCC824^Tについては、アンチセンスRNA法による酪酸キナーゼ抑制によってブタノール生産量が増加し²²⁾、CoAトランスフェラーゼ抑制株ではブタノール生産量が減少した²³⁾と報告されている。一方で、高ブタノール生産株である*Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4株についてもアンチセンスRNA法を応用したヒドロゲナーゼ遺伝子群を抑制することによるソルベント生産制御の報告がなされている。ヒドロゲナーゼはABE発酵のエレクトロフローを制御しているキー酵素であるので、その活性制御はソルベント生成に大きな影響を及ぼすと考えられている。中山ら²⁴⁾の報告によれば、ヒドロゲナーゼ遺伝子群*hupCBA*をアンチセンスRNA法により活性抑制を行ったところ、水素生産量は3.1倍、アセトン生産量は1.6倍に増加したが、ブタノール生産量は76%に減少した。このことよりHupCBAは水素取り込み型ヒドロゲナーゼと推定された。このことから水素放出型ヒドロゲナーゼの抑制により、ブタノール生産量増加が期待される。また、ABE発酵菌の遺伝子群を利用したイソプロパノール生産を目的とした分子育種に関する研究も報告されて

おり^{25,26)}、ABE発酵菌株の遺伝子群はバイオマスコンビナート構想における重要なプラットフォームであることが示唆されている。

我が国のABE発酵に対する動向

農林水産省と経済産業省は2007年（平成19年）11月21日に「バイオ燃料技術革新協議会」を立ち上げ、セルロース系バイオマスからバイオ燃料などを効率的に生産するため「バイオ燃料技術革新計画」の策定を進めることを提言した。それに先立つ同年5月に地球環境、エネルギー多様化の観点から、経済産業省と自動車業界、石油業界が協力し「次世代自動車・燃料イニシアティブ」とりまとめを公表し、その中で、バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議の「国産バイオ燃料の生産拡大工程表」との整合を図りつつ、セルロース系バイオマスからバイオ燃料などを効率的に生産するため「バイオ燃料技術革新計画」の策定の必要性について提言を行った。その後、産学官からなる「バイオ燃料技術革新協議会」を農林水産省と連携して開催し、本協議会において、セルロース系バイオ燃料の生産についての具体的な目標、技術開発、ロードマップなどを内容とする「バイオ燃料技術革新計画」の策定を進めると公表した。この「バイオ燃料技術革新計画」は主にセルロース系バイオマスからのバイオエタノール生産が主眼とされているが、バイオ燃料技術革新協議会第一回委員会においては、バイオリファイナリー連携WGの論点中にブタノールに関する記載があり、バイオ燃料技術革新協議会第二回委員会における「バイオ燃料技術革新計画（案）平成20年3月」においては「バイオリファイナリー連携分野」のロードマップ上に「バイオマスからの有効化学品の直接生産（発酵法）」としてブタノールの発酵生産技術は緊急性が高い課題としてあげられている。バイオマス中間体からのプロピレンへの化学転換法においては、エタノール、プロパノール、ブタノールなどのアルコール類を出発原料とすることが明確に示されている。

一方、財団法人科学技術戦略推進機構では、汎用ポリオレフィン樹脂の原料であるナフサの需給がタイトになると予測し、「バイオマス由来原料からのオレフィン製造の可能性」について検討を行って「バイオマスコンビナート（BMC）構想」を提言している²⁷⁾。このBMC構想では、バイオマスから得られる粗留エタノールを原料として触媒を用いた化学反応によりエチレン/プロピレンを生産する化学変換技術と、糖を原料とした発酵法すなわちバイオ変換技術による二つのオレフィン原料製造技術の確立を提唱している。バイオ変換技術においては、アセトン・ブタノール発酵によって生産されるブタノー

ルをエタノールと共存させることによってプロピレン製造原料として利用すること、およびアセトン還元することによってイソプロパノールを製造することの二つが期待されている。そのためにはABE発酵の高効率化と代謝制御が不可欠な要素技術開発としてあげられている。

演者らは、上記のようなバイオマスを原料としたエネルギーや化学物質生産技術としてのABE発酵を検証するべく、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「新エネルギー技術研究開発/バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発 (先導技術開発)」受託研究において独立行政法人 産業技術総合研究所および九州大学・東京農業大学と共同研究を開始し、バイオブタノールの効率的な発酵生産法の開発を実施してきた。この研究開発項目には、高効率ABE発酵生産プロセスの開発、高性能ABE発酵菌株の分子育種およびバイオインフォマティクス技術を応用したABE発酵の代謝制御解析があげられており、我が国で唯一のABE発酵に関するナショナルプロジェクトとして期待されている。

終わりに

最後に、冒頭にて紹介した有馬啓先生の「アセトン・ブタノール醗酵工業」の結文の一部を紹介する。この言葉は、当時の戦況が悪化する一途の我が国における現状そのままを言い当てた言葉であるが、それはそのまま現在にも当てはまると思われる。原文のまま抜粋するので少々読み辛い部分もあるがご容赦願いたい。

〔(中略)～最後に醗酵法と合成化学の方法とを見るに、非食品工業的醗酵生産品の多くのものは合成法による、石炭を原料としてアセチレン又は一酸化炭素と水素から出発するか、石油を原料として所謂クラッキングによる生産物、又は天然ガスから出発するのである。之に比すると醗酵法は糖分子の酸化的又は還元的クラッキングでありその原料は芋、穀類、砂糖類、木材分解物等である。両方法には何れも得失はあるが、試みに醗酵法の利点を挙げれば、合成石油のフィッシャー教授の説の如く、石炭、石油の如き特定の限定された資源を要せず、何れの土地でも可能であり又炭酸ガスと太陽エネルギーを利用するので無盡蔵で永久的である。又前述の如き醗酵産物を含めて完全なる一つのクローズド・サイクルを形成せしめ得るから、残りなく且つ永續的に物資を利用生産することが出来る。また醗酵工業は原料が一見国民の食糧問題と衝突するが如き観を呈するのであるが、農産原料を非食品工業的原料に使用しうるために農産物の

過剰生産による価格の低下を防ぎ且つ又平時に於いて食糧を国民の必要量以上に生産して居れば、今次戦争の如きに際しても非食品用途の一部を止めれば間に合ふのである。〕

今でも「芋で零戦を飛ばせる」という気はないが、時世を考えてバイオエネルギーを語る上では実に心に残る言葉である。今まさにアセトン・ブタノール発酵の温故知新が必要なのではないだろうか。

文 献

- 1) Jones, D. T. *et al.*: *Micriobiol. Rev.*, **50**, 484 (1986).
- 2) 鈴木信一: 発酵と工業, **44**, 774 (1986).
- 3) 有馬 啓: アセトン・ブタノール工業, p. 1, 大雅堂 (1944).
- 4) 吉野貞蔵: 発酵ハンドブック, p. 19, 共立出版 (2001).
- 5) Jones, D. T. *et al.*: *FEMS Microbiol. Rev.*, **17**, 223 (1995).
- 6) Keis, S. *et al.*: *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, **51**, 2095 (2001).
- 7) Hartmanis, M. G. N. *et al.*: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **20**, 66 (1984).
- 8) Chauvatcharin, S. *et al.*: *Biotechnol. Bioeng.*, **58**, 561 (1998).
- 9) Chen, C. K. and Blaschek, H. P.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **65**, 499 (1999).
- 10) Tashiro, Y. *et al.*: *J. Biosci. Bioeng.*, **98**, 263 (2004).
- 11) Tashiro, Y. *et al.*: *J. Biosci. Bioeng.*, **104**, 238 (2007).
- 12) Ishizaki, A. *et al.*: *Biotechnology for Sustainable Utilization of Biological Resources in the Tropics*, **12**, 1 (1998).
- 13) Lee, T. M. *et al.*: *Biotechnol. Lett.*, **17**, 649 (1995).
- 14) 田代幸寛ら: バイオサイエンスとインダストリー, **61**, 544 (2003).
- 15) Kobayashi, G. *et al.*: *J. Biosci. Bioeng.*, **99**, 517 (2005).
- 16) Lopez-Contreras, A. M. *et al.*: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **54**, 162 (2000).
- 17) Ropars, M. R. *et al.*: *Bioresour. Technol.*, **42**, 197 (1992).
- 18) Qureshi, N. *et al.*: *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, **26**, 290 (2001).
- 19) Tashiro, Y. *et al.*: *J. Biotechnol.*, **120**, 197 (2005).
- 20) Shinto, Y. *et al.*: *J. Biotechnol.*, **131**, 45 (2007).
- 21) Sekiguchi, T. *et al.*, *J. Bioinfo. Comput. Biol.*, **4**, 621 (2006).
- 22) Desai, R. P. *et al.*: *App. Environ. Microbiol.*, **65**, 936 (1999).
- 23) Tummala, S. B. *et al.*: *J. Bacteriol.*, **185**, 1923 (2003).
- 24) Nakayama, S. *et al.*: *App. Microbiol. Biotechnol.*, **78**, 483 (2008).
- 25) Hanai, T. *et al.*: *App. Environ. Microbiol.*, **73**, 7814 (2007).
- 26) Jojima, T. *et al.*: *App. Microbiol. Biotechnol.*, **77**, 1219 (2008).
- 27) 中川 隆: バイオプラスチックの高機能化・再資源化技術, p. 311, NTS (2008).