

ハイトマテリアルの基本的考え

Phytomaterial Industrial Technology Development Co. Ltd

(日本は「植物国家」だった)

1. 植物産業(phytoindustry)の時代

ブラックゴールドからグリーンゴールドへ

大阪大学教授で応用生物工学の小林昭雄先生は、19世紀がゴールドの時代であり、20世紀がブラックゴールドの時代であったのに対して、21世紀はグリーンゴールドの時代になる、といっています。

金(ゴールド)が富であった時代から、石炭・石油といった化石燃料と鉄を中心とする鉱物資源(ブラックゴールド)をもちいる大工業の時代をへて、いま植物(グリーンゴールド)が資源として脚光を浴び、やがて主役として登場しようとしているのです。

なぜ、ブラックからグリーンへの移行が起こっているのでしょうか。

その背景にあるのは、一つは、地球温暖化をはじめとする環境問題の深刻化です。世界的な規模で、環境をこれ以上破壊しないような産業のありかたが求められています。また、もう一つは、石油の枯渇が現実的な問題になっていることです。石油の究極埋蔵量の半分を産出したときを示すピーク・オイル(peak oil)が2005年から2020年の間にやってくるといわれており、燃料においても原材料においても石油に代替するものを見つけ出さなければならないという機運が高まってきています。このようなところから、植物の利用が注目を浴びることになっているわけです。

そして、植物は、実際にそれだけの潜在的な可能性を秘めているのです。奈良先端科学技術大学院大学教授でバイオサイエンスの新名惇彦先生は「21世紀、植物が地球を救う」といっています。これまでの燃料、原材料の代わりに植物が生み出すものを燃料、原材料として使うことによって、環境を保全し持続可能な社会をつくりだすことができるというのです。

植物が工業原材料を生産する

植物による燃料、原材料生産とは、どういうことでしょうか。

人間はもちろん動物の生命も植物の存在によってはじめて可能になったものです。二酸化炭素を吸収し酸素を放出する植物の営みがなければ、大気のバランスを維持することはできません。それだけでなく、人間が消費する食糧の大部分は、植物が光合成によって作りだした有機物から得られるものです。動物性の食糧であっても、植物が作りだした有機物を変成したものなのです。また、繊維製品や紙なども、もともと植物が作りだしたセルロースを主成分にしていますし、化石燃料自体、太古の植物が定着した太陽エネルギーを利用しているわけです。

このように、地球上において、太陽エネルギーをみずからの内部で変換して第一次生産物＝直

接生産物をつくりだしているのは植物だけであり、私たちはその第一次生産物を利用して生命を維持しているのです。そのとき、例えば化石燃料やそこからつくりだされる石油化学製品などのように、植物みずからの生命活動の二次的生産物＝間接生産物に大きく依拠してきたのが、これまでのブラックの時代だったわけです。

そして、そうした産業のありかたが限界に近づいているいま、植物の有機物生産能力があらためて注目されています。植物がつくりだす物質の生産効率を 10% 上げれば、化石燃料の代替も可能だというシミュレーションも出ています。このようにして、植物の二次的生産物ではなく、第一次生産物、つまり植物がいまつくりだしている物質そのものをもっともっと燃料や原材料として利用していこうという考え方が大きな流れになってきているのです。

これを産業化したものを私たちは「植物産業」(phytoindustry)と呼んでいます。

植物産業と農工革命

人類は、以前から薪や木炭を燃料にし、木材や植物繊維を原材料としてきました。植物の第一次生産物を燃料や原材料として利用してきたのです。ところが、二次的生産物を利用するほうが効率的だということで、石油と石油製品主流の時代に移行していくにしたがって、植物の第一次生産物の利用は後景に退いていきました。いま、それが見直されようとしているのです。

しかし、私たちが構想している植物産業は、かつての利用を単純に復活しようというものではありません。私たちが考えている植物産業は、次の三つの要素を含んでいます。

第一に、現存の植物が生み出す有機物を利用するだけでなく、バイオテクノロジーを利用して、私たちが燃料や原材料に利用するために必要としている有機物をみずから効率的に生産する新種の植物をつくりだすことをめざしています。

第二に、新種植物に限らず、そうした有用植物を低コストで効率的に大量栽培するために、ハイトカルチャコントロールテクノロジーを利用して、非土壌栽培の「植物工場」(phytofactory)をつくりだすことをめざしています。

第三に、そのようにして植物が生産した有機物を、その性質を生かして目的とする燃料や原材料、製品に加工するために、ナノテクノロジーを利用して、植物性物質加工技術と製造工程をつくりだすことをめざしています。

いま、農業革命(agricultural revolution)、工業革命(industrial revolution)に続いて、農業とも違い工業とも違い、両者をともに含んだ農工革命(agri=industrial revolution)が到来しようとしているのです。そして、そうした新しい段階において、その農工革命を具体化したものとして植物産業が新しい時代を開こうとしているのです。

2. 植物原料(phytomaterial)の生産技術

次々に実用化されている植物原料

いま、さまざまな分野で、植物由来の原材料、いわゆる植物原料(phytomaterial)が次々と実

用化され、熱い視線を浴びています。

例えば、トウモロコシがつくったデンプンを発酵させて乳酸に変化させ、これをたくさんつないで樹脂状にすると、高温高压下で成型できるポリ乳酸樹脂ができます。これがプラスチック代替品として、食品の包装材、食品トレイから、手術用糸、パソコンやコピー機の部品、自動車の内装部品、さらには非接触 IC カードなどにまで使われています。

また、ココナッツの汁に含まれる糖類を食べさせた酢酸菌が体外に紡ぎ出したセルロースの塊がナタデココですが、これからセルロース分子の鎖を束ねた「バイオナノファイバー」をつくりだして、これを曲がる透明基板の原材料に利用し、有機 EL をつくったり、シート状のバイオナノファイバーにプラスチックを少量添加して鋼鉄並みの強さの材料を鋼鉄の 5 分の 1 の軽さでつくったりしています。

サトウキビの糖蜜を発酵させ蒸留してバイオマスエタノールを生産し、これを燃料として利用したり、ガソリンに混ぜてエタノール混合ガソリンとして自動車に使ったりしています。この場合、よりバイオマス収量が高い高バイオマス量サトウキビの品種をつくりだして、それを利用する試みがおこなわれています。

これらを原材料として生産される製品も増えてきていますし、利用する植物も、キャッサバ、竹、バナナ、パームヤシ、大麻などと幅が広がりつつあります。

これらの植物原料は生分解性がありますので、これを用いた製品は、使用後は回収、再成型されたり、生ゴミ処理機などで土へと分解されたりします。この土を農園や山に戻せば、植物がまた生まれることになり、焼却したとしても、そのとき出た二酸化炭素は植物がそのまま吸収する量なので、大気中の二酸化炭素は増加しません。このような循環型の資源利用、カーボンニュートラルな原料特性が注目されていることもあって、植物原料の開発が急速に促進されているのです。

こうした植物原料の生産に使われている技術は、日本ではいまのところは、おもに植物性物質の糖化・抽出・醗酵・化学変換といった従来型の技術で、これに植物遺伝子組み換え技術としてのバイオテクノロジー、植物性物質加工技術としてのナノテクノロジーが部分的に加わっています。私たちは、これらのバイオテクノロジー、ナノテクノロジーといった先端技術を植物原料の生産に適合するようにさらに発展させるとともに、これに植物栽培技術としてのハイトカルチャコントロールテクノロジーを加え、植物産業の体系化をめざしています。

バイオテクノロジーの植物遺伝子組み換えによる新しい植物の育種

バイオテクノロジーによって、植物原料を生産するうえで次のようなことが可能になります。

まず、先ほど見たたくさんの糖蜜をつくれる高バイオマス量サトウキビの品種をつくりだしたように、遺伝子組み換えによって、その植物がつくっている有用物質をもっともっと大量につくることができる品種に変えることができます。

また、これまで植物がつくっていなかった物質をつくる植物を新たにつくりだすことができます。それによって、例えば、ウィルスの増殖を抑え、C 型肝炎の特効薬になるインターフェロン

とか、化粧品の重要な成分として使われている軟骨成分であるヒアルロンサンとか、成長ホルモンとかのような有用な動物性物質をつくる植物をつくり出すことができるのです。

さらには、種子や葉に分解酵素を高濃度に集積させる植物をつくり出すことができます。このような植物は、「自爆型植物」と呼ばれ、簡単な処理でみずから集積した分解酵素を働かせてブドウ糖などに分解されます。そうすれば、そこでつくられたブドウ糖を利用してポリ乳酸やエタノールなどをつくることができます。

また、ほとんどがセルロースからできている樹高 100m に達する樹木をつくり出すこともできます。こうした樹木を植物ドームのような人工構造物のなかで成長させれば、そこから大量のセルロースを得て、利用することができます。

有害な重金属を取り込んで濃縮する働きをもった植物を育種することもできます。こうした植物を有害重金属に汚染された土壌に植えれば、汚染物質を吸収して除去してくれます。また、こうした技術によって金のような特定の金属のみを高度に濃縮する植物をつくることができれば、海水などから金を大量に集めることも可能になるでしょう。

このような遺伝子組み換えを可能にする技術として、アグロバクテリウム法による植物細胞の形質転換技術、パーティクルガン法による葉緑体の形質転換技術がすでに確立されています。前者の技術によって、花粉症緩和米がつくられ、農林水産省で実証試験がおこなわれるまでいっていますし、まだ実証試験はおこなわれていませんが、人インターフェロン生産米もつくりにされています。後者の技術によっては、葉緑体に動物性タンパク質を高濃度に蓄積することに成功しています。これらの技術は、今後ますます発展することが期待されています。

ハイトカルチャコントロールテクノロジーによる植物栽培技術の革新

現在、植物原料を生産するトウモロコシやキャッサバなどの植物は、ほとんどが普通の農地で栽培されたものを収穫して使っています。しかし、利用する植物の幅が広がってくると、植物原料を生産する目的に特化して効率的に栽培する必要があります。また、遺伝子組み換え植物の栽培のためには特別の施設が必要になってきます。

そこで考えられたのが、遺伝子組み換え植物でも安心・安全に栽培でき、同一作物を大量生産できる閉鎖系植物工場システムです。これには、セラミックスを使ったハイトカルチャコントロール技術を活用します。

このセラミックスがもつ毛細管現象を利用した給水・溶液コントロールシステムは、無動力で自動的に溶液を供給することができ、溶液消費量を最低限に抑えることができます。また、軽量のセラミックスによる非土壌栽培ですから、ユニットが軽量です。そして、小さな栽培面積に多数の固体を同一条件で集約的に栽培することができます。同一条件での集約的な栽培ですから、一括管理が可能になるのも大きな利点です。

このような技術をもとにすれば、閉鎖空間のなかに栽培ユニットを積み重ねた閉鎖系多段式植物工場をつくることができます。そうなれば、都市近郊のビルの中に植物原料生産作物を栽培する植物生産工場が実現することもできます。

このような非土壌栽培のクリーンな閉鎖系栽培システムをつくれれば、遺伝子組み換え植物が外部に出るリスクを防ぐことができ、さまざまな実験的な作物の栽培が可能になり、いまともすれば規制の緩やかな海外に流出してしまっているバイオテクノロジーの先端技術開発を国内で促進することにつながり、新たな植物原料生産作物をつくりだしていくことにつながっていきます。

ナノテクノロジーによる植物性物質加工技術の発展

このようにしてつくりだした植物原料物質も、実際の製品に利用していくうえでは、その物性そのままでは利用しにくい場合が少なくありません。例えば、ポリ乳酸はそのままでは熱に弱く、60℃で変形してしまいますし、バナナ繊維は撚りがないため、そのままでは糸に紡ぐことができません。そのため、加工過程でなんらかの添加剤を加えるなどの処理が必要になってきます。

このとき、超微細粒子を扱うナノテクノロジーが非常に有効です。先ほどあげた鋼鉄並みの強さの材料を鋼鉄の5分の1の軽さでつくるバイオナノファイバーの技術は、ナノテクノロジーの応用によってはじめて可能になったものです。こうした植物ナノテクノロジーとしては、ホルムアルデヒド浸潤法、高圧圧縮法、ナノファイバー接着技術、超微細表面加工技術などのテクノロジーが開発されています。

しかし、植物ナノテクノロジーは、金属やプラスチックのような人工素材ではなく、生物である植物が直接つくりだした素材を相手にするので、単なる分子レベルの構造制御ではなく、植物の生きた働きとシンクロナイズしたアプローチが必要になってきます。その点では、植物遺伝子組み換え技術や植物栽培技術と一体になって協働するとき、より大きな力を発揮できるようになるといえるでしょう。

3. 植物原料(phytomaterial)生産の体系

体系化された植物原料生産

従来の植物原料生産は、トウモロコシからポリ乳酸を生産する場合を例にとりますと、通常のとウモロコシの種子を畑に蒔いて、生長したトウモロコシを農産物として収穫し、その一部からデンプンを抽出して醗酵させ、ポリ乳酸をつくるという過程をとります。日本では、こうして出来上がったポリ乳酸をアメリカから輸入して、それを加工して生分解性プラスチックなどを製造しているのが実情です。

これに対して、私たちがめざしている植物産業においては、バイオテクノロジー、ハイトカルチャーコントロールテクノロジー、ナノテクノロジーを一体化して、植物産業の体系を形成します。ですから、トウモロコシにかぎらずさまざまな植物の葉緑体に分解性の酵素を蓄積するように遺伝子組み換えをほどこし、この植物を閉鎖系多段式植物工場で栽培し、みずから集積した分解酵素を働かせて葉・茎・幹などすべてをブドウ糖などに分解させます。そして、こうして得られたブドウ糖を利用してポリ乳酸やエタノールなどの植物原料を生産します。これを必要に応じ

て、ナノテクノロジーを応用した加工過程にまわし、最終製品ができます。

植物産業というフィールドでとらえますと、植物遺伝子組み換えをになうバイオテクノロジー部門が産業の川上（上流）、効率的な植物栽培をになうハイトカルチャコントロールテクノロジー部門が川中（中流）、植物性物質の加工をになうナノテクノロジー部門が川下（下流）ととらえることができます。このような一貫した体系をもって植物原料生産に特化したシステムを組み立てるのが、私たちの構想の意図なのです。

植物由来の原料生産としては、いろいろなものがおこなわれていますし、可能性もさまざまに開けていますが、私たちは、当面は、燃料用のバイオエタノール、バイオジーゼル、そして植物プラスチック原料としてのポリ乳酸について、新しい生産技術と生産体系を具体化することをめざします。

新しい技術の技術特性によるコストダウン

このように体系化された植物原料生産システムにおいては、従来農産物生産のかたわら、ここで生産された農産物の一部を利用して植物原料を生産していたのに比べて、はじめから植物原料生産に特化してシステムを組み立てていますから、さまざまな点で効率的になることはもちろんです。

また、問題は、植物原料をどのような最終製品にもっとも的確に利用するかというところにありますから、製品への加工の段階から、栽培の段階、植物の選定・遺伝子組み換えの段階にフィードバックして、より効率的なやりかたを見つけるべきですが、その点、一体化された植物産業プロセスが構築されていれば、このフィードバックが容易になるところに利点があります。

この植物原料生産システムの中心は、セラミックスを利用した非土壌栽培のクリーンな閉鎖系多段式植物工場です。遺伝子組み換えによる新種植物の実験や検証もここで安全、確実に効率的におこなうことができます。また、この栽培方法は、その植物の栽培において、さまざまなメリットをもたらします。

植物を大量生産するときに土壌栽培よりも非土壌栽培のほうが効率的な場合が多いため、水耕栽培ないし水気耕栽培が広くおこなわれています。土壌栽培だと肥料成分の多くが流出したり、土に吸収されたりして失われるのに対し、非土壌栽培なら、そのロスがなくなるなどのメリットがあるからです。

しかし、水耕栽培ですと、肥料成分を含んだ栽培溶液を循環させたり、栽培溶液に酸素を送り込んだりする必要があり、そうした設備のために栽培コストが大きくなります。これに対して、私たちがつくるセラミックスによるクリーンルーム栽培ですと、根が栽培溶液に浸かっていないので、酸素不足になることもなく、酸素を送り込んだり、栽培溶液を循環させたりする必要がありません。

そして、軽量の栽培ユニットを多段式に積み重ねて構成することによって、必要面積を約5分の1にまで省スペース化することができますし、4毛作が可能になりますので栽培サイクルを非常に速めることができます。

大規模温室での栽培に比べてみますと、セラミックスによる自動給水で循環も必要ないため水使用量が大幅に節減でき、水管理の労力、コストもずっと少なくてすみます。また、セラミックスをはじめ堅牢で軽量の素材で栽培ユニットが構成されていますので、維持管理が簡便で低コストです。こうした維持管理簡便化によって、約7分の1のコストで済むと推計できます。

さらに、従来の温室栽培ですと、大量の産業廃棄物が生じますが、このシステムでは、栽培ユニットの基本素材であるセラミックスは何度でもリユースできますので、産業廃棄物量を推計で約20分の1に減らすことができます。

閉鎖系人工栽培システムでは、電力コストが大きな比重を占めます。この点では、太陽光の蓄電によるLED（発光ダイオード）の利用など、最新の光技術を導入することによって電力コスト削減を追求します。

このように、私たちの植物産業技術を駆使してコストダウンを図ることによって、植物原料が従来の化石燃料系の原料とのコスト差を大きく縮めることができると考えています。

4. 植物産業(phytoindustry)の可能性と展望

植物産業の特性

植物産業は、従来型の農林業でもなければ従来型の工業でもない新しい産業です。

それは生命あるものを対象とする産業であり、そうであるがゆえに合自然的な活動でなければならないという点では農林業と共通しますが、その生命の活動を人間の利用目的に合致するように編成し管理していくという点では工業と共通しています。

そして、植物産業は、一極化を必要とする大型技術ではなく分散型の小型技術を用いた地域分散型産業です。

それは大規模な設備を必要としませんし、目的と規模に応じて多様な展開が可能な産業です。また、エネルギー消費量が少なく、廃棄物が少ないエコロジカルな産業ですし、軍事産業の対極にある平和産業です。

さらには、植物の種類が少ない欧米よりも、多様な植物が豊富に生育しているアジア・アフリカ・ラテンアメリカに適合する産業でもあります。

日本は「植物国家」だった

作家で武蔵野美術大学講師の石川英輔さんは、江戸時代の日本を「植物国家」と呼んでいます。それは、ひとつには、江戸時代の日本人が、消耗品や耐久消費財のほぼ100パーセントをかなり成長の早い植物の加工品だけに頼っていたからです。それらの品物が使えなくなる頃には、それらをつくるために使われていた植物原料の大部分が生長してもとにもどっています。そういう形で持続可能な社会が営まれていたのです。食糧も、少しの魚以外はほとんどが植物でした。考えてみれば、これは、人間が植物によって生かされている社会だったといえます。

私たち日本人は、sustainable society とか carbon neutral とか いわれるものを、そんな概念

を必要としない自然な形で生きていたのです。

そのころ、西洋は、植物原料ももちろん使っていましたが、石と鉄の文明を築きあげていました。そして、18世紀から19世紀の工業革命によって、それを全面化したのです。

日本人だからこそできるイノベーション

20世紀の日本は、西洋文明の石と鉄、それをまわしていく石炭・石油という硬くて黒い存在で構成されている、un sustainable で carbon positive な世界に巻き込まれていって、自分たちが植物によって生かされているという感覚が失われていったのではないのでしょうか。

私たちは、ふたたび、あの「植物国家日本」にもどろうとすることによって、地球温暖化をはじめとする環境問題の深刻化にどう対処するのか、石油の枯渇による原料資源の代替にどう対応するのか、という世界的な課題に具体的な回答をあたえるべき役割を負っているのではないのでしょうか。

そして、私たちは、そうした課題に対して、植物性素材の素晴らしさをもう一度見直し、最新のテクノロジーを用いることを通じて、その優れた性質を甦らせるだけではなくて、かつて使われていなかった用途にも最大限に生かすことによって応えたいと考えています。

もちろん、それは江戸時代の植物原料利用への単純な回帰ではありません。そうではなくて、工業革命以後に開発されてきたさまざまな技術を駆使して、植物そのものが潜在的にもっていた可能性を、農業的にではなく工業的に全面開花させるという媒介的な回帰なのです。

その媒介的回帰のためには、植物という存在そのものについてかつてあった根源的な認識を甦らせ、それと人間との関係について、いまのこの状況のもとで新たな認識をもつことが必要とされます。

植物原料としてのバイオナノファイバー研究の第一人者である京都大学生存圏研究所の矢野浩之教授は、「それぞれの戦略で進化を遂げ、今地球上に存在している生物の構造とその機能には、現在人類では及びもつかない強さやしなやかさがあるということである。このような生物材料に関する研究を通じて、生物材料利用の根底には、すべての生物を尊敬しその強さやしなやかさを借りるアプローチが必要なのではないか」と言っています。

このような「生物とシンクロナイズした共生型科学」を日本は世界に発信していくべきです。

それは十分に可能です。そのような共生型科学の考え方が、すべてのものに同じ生命を感じ、その生命がつながりあう環のなかで自分たちが生かされていると感ずる日本人の伝統的な精神のありかたに根ざしているからです。その意味では、植物産業は、同じような伝統的精神に裏打ちされることで世界を席卷した日本のアニメーション、ゲーム産業に続き、それよりも大きな意義をもつ日本の得意産業になる可能性をもっています。

私たちは、そうした日本発世界へのイノベーションを担いたいと願っています。

(06.11.21.)