

日本の針路、この考えはどうだ！

科学技術立国としての日本

『他国にエネルギーを依存しないために。植物を用いた日本型バイオリファイナリーの構築に向けて日本が進むべき方向性を提案する』

京都大学大学院農学研究科応用生命科学専攻修士課程1年

かまた  
釜田 陽光

## 目次

|  |    |  |    |
|--|----|--|----|
| 梗概                                     | 39 | 3. 1. 4. 天然ゴム生産プロセスの持続可能性                          | 47 |
| 1. 序論                                  | 39 | 3. 2. 天然ゴム生産プロセスを模倣した<br>バイオリファイナリーシステムの構築         | 48 |
| 2. 現状のバイオリファイナリーの変遷と問題点                | 41 | 3. 2. 1. 天然ゴム生産プロセスを<br>模倣する上での課題                  | 48 |
| 2. 1. エネルギー・化学合成原料になる<br>ポテンシャルを秘める植物  | 41 | 3. 2. 2. 植物の物質隔離機構<br>  特に柑橘の分泌腔に着目する              | 49 |
| 2. 2. アメリカにみるバイオエタノール生産                | 42 | 3. 2. 3. 遺伝子組換えに着目した<br>植物の能力の最大化                  | 50 |
| 2. 3. 日本で重要視される木質バイオマスの利用              | 44 | 4. 植物を用いた日本型バイオリファイナリーの実現に<br>向けて国レベルで取り組む必要性のあること | 51 |
| 3. 日本型バイオリファイナリーの構築を目指して               | 44 | 5. 最後に   | 52 |
| 3. 1. 天然ゴム生産プロセスをヒントにする                | 44 | 6. 謝辞  | 53 |
| 3. 1. 1. 植物の物質生産・蓄積機構への着目<br>  植物のミルクー | 45 | 7. 引用文献・参考資料                                       | 53 |
| 3. 1. 2. マレーシア科学大学への訪問                 | 46 |  |    |
| 3. 1. 3. タイのゴム畑                        | 46 |  |    |

## 梗概

日本は石油資源、天然ガスなどのエネルギー資源の多くを他国からの輸入に頼っている。石油は燃料だけでなく、化学合成の原料として様々な物質生産にも必要である。そのため、エネルギー資源の獲得状況が不安定であることは科学技術の進展を阻む要因となる。したがって、安定的なエネルギーの確保は日本国として急務の課題であるといえる。一方で、石油に代表される化石燃料の大量消費は二酸化炭素といった温室効果ガスの放出など、環境破壊の片棒を担ぐこととなり様々な問題を生む。そこで近年着目されてきたのが、「バイオリアファイナリー」である。バイオリアファイナリーとは石油などの化石資源を用いず、その代わりに生物由来資源からあらゆる化合物、物質を作ろうという考え方である。生物由来資源の中でも特に植物は温室効果ガスの二酸化炭素を吸収し、これを利用して様々な物質を生産できる。すなわち、植物をバイオリアファイナリーの原料として用いることは持続可能性のある方法であると考えられてきた。しかし、既存の植物を用いたバイオリアファイナリーは日本において最適化されているとはいえず、植物を分解するコストなど様々な問題を抱えている。そこで筆者は、「日本型バイオリアファイナリー」の構築を目指したいと考えるに至った。本論文では、日本型

バイオリアファイナリーの実現、そのための課題解決の基盤となる例である「天然ゴム生産プロセス」と、「最新研究である「植物の物質隔離機構」と「遺伝子組換え技術」の知見から論じていく。特に、筆者が中学時代から興味を持ち続けた「植物のミルク」というものを足がかりに、大学の学部時代に得た経験と現在修士課程で着目していることについて紹介する。そして、科学技術立国日本として、エネルギー問題に悩まされることにならないようにするにはどうしたら良いのか、という問いに対して、答えとなりうる方向性を提案する。

## 1. 序論

近年の世界情勢は混沌としており、ウクライナ戦争、パレスチナ・イスラエル戦争など世界の様々な国・地域で紛争が絶えない。人類はその全ての活動にエネルギーを必要としているが、社会の不安定な状況により、主たるエネルギー資源の石油価格は高騰している。また、化石資源の産出場所は局的であり、これにより国家間のエネルギー格差が存在する。日本のエネルギー自給率は低く<sup>1)</sup>、エネルギー価格は他国の情勢に大きく左右される。このことは、日常の暮らしに悪影響を及ぼすだけでなく、科学技術立国たる日本の技術力の進歩を危うくさせる。さらに石油はさまざまな物質へ変換され、

工業製品、農薬、医薬品など、様々な物質の原料となる。そのため、自国における安定的なエネルギー供給は喫緊の課題といえる。さらに、環境への配慮から、石油資源に依存しない持続可能なエネルギーの生産が世界規模で重要視されており、持続可能かつ安定供給可能なエネルギーの創出が渴望されている。そこで近年着目されている考え方が「バイオリファイナリー」である。バイオリファイナリーとは、植物や微生物などの生物由来資源からエネルギー・物質を獲得し、利用するという考え方である。従来の石油資源を利用する石油リファイナリーと対の考え方でとらえられ、産学官問わず様々な分野において活発に議論されるテーマである。しかし一般の多くの方にはあまり聞き馴染みのない言葉かもしれない。かくいう私も高校時代に初めてバイオリファイナリーについて知り興味を持った。このことがきっかけで植物とエネルギーについて考えるようになり農学部への進学を決めた。現在もその興味は途切れることはなく、植物と物質生産について日々研究を行っている。

現状の日本は植物を用いたバイオリファイナリー分野において諸問題の解決に至るような突出した技術を確立しているとは言い難い。詳しくは後述するが、バイオリファイナリー分野で先頭を走っているのはアメリカと言って良いだろう。アメリカは平野に広大な農地を確保でき、均一かつ大量にバ

イオリファイナリーの原料となる穀物を生産できる。しかし、アメリカと比較したとき、日本の国土面積は小さく、平地も少ないため大規模なバイオマス生産には向かない。一方、日本のおよそ3分の2は森林であり比較的植物資源には恵まれている。森林に生える木々は「木質バイオマス」というものに分類される。木質バイオマスには植物の細胞を構成する強い成分が沈着しており、植物からエネルギー資源を得るには「分解」のプロセスが重要である。しかし、木質バイオマスは分解が困難であり、バイオリファイナリーへの転嫁は難しい。この課題を克服すべく現在でも多くの研究が進められており様々な議論が展開されている<sup>2)</sup><sup>3)</sup>。さらに、バイオリファイナリーによって得られたエネルギーと化学合成の原料はその製造に係るコストが大きく、石油資源と価格競争で優位に立てないといった問題も存在する。「植物を用いてエネルギーを得る」というと聞こえは良いが、実際に課題は山積みで、一口にバイオリファイナリーといっても日本は単にアメリカ型のそれを模倣するようなことはできないだろう。エネルギーおよび物質生産なくして科学技術は進歩しないといえるため、科学技術立国日本として今求められていることは、「日本型バイオリファイナリー」の確立であると筆者は考える。そこで本論文では、他国に頼らない持続可能なエネルギー・物質の確保に向けて今後日本が目指すべき方向性につ

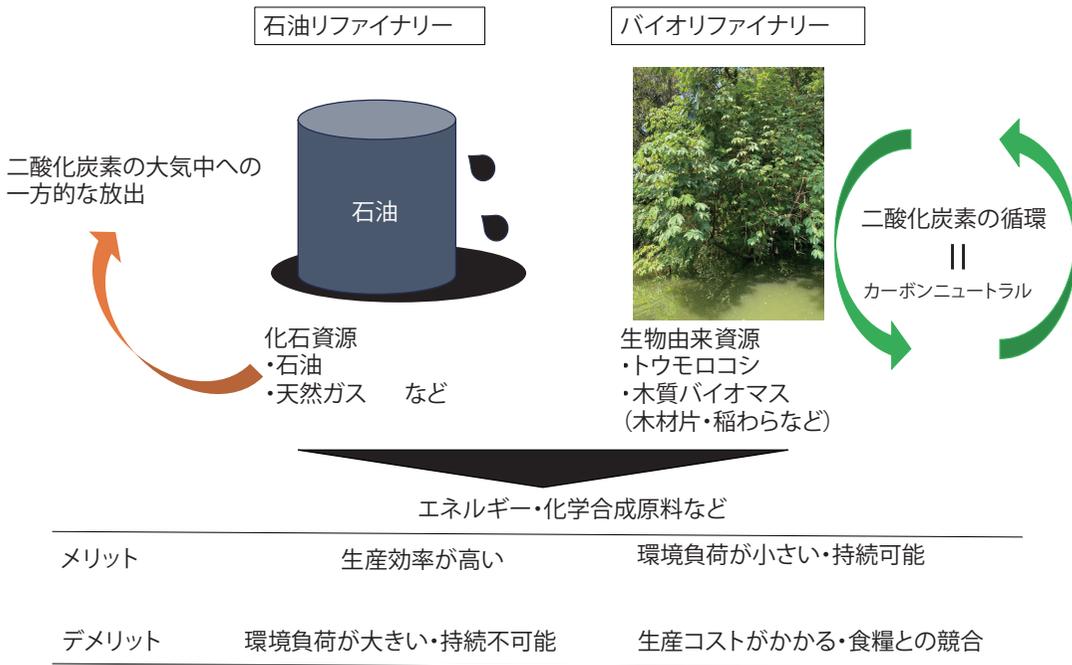


図 1. 石油リファイナリーとバイオリファイナリーの対比

近畿大学 サイト <https://www.nara.kindai.ac.jp/labo/research/033.php> (2025年2月27日閲覧)  
 をもとに筆者が作図

いて、筆者の経験や今行なっている研究をもとに提案する。

## 2. 現状のバイオリファイナリーと問題点

### 2.1. エネルギー・化学合成原料になるポテンシャルを秘める植物

バイオリファイナリーの原料は様々である。例えば、植物、微生物、藻類といった生物を用いる方法がある。この中で筆者は、植物の持つポテンシャルに着目している。植物は細胞壁と呼ばれる層を形成しており、細胞壁の主要な成分にはセルロース・ヘミセルロース・リグニンと呼ばれる物質がある<sup>4)</sup>。セルロースを分解するとグルコースという糖に変換される。グルコースはバイオエタノールというエネルギーに変換できる。また、ヘミセルロースはグルコース以外の糖に変換できる。そして、リグニンという物質は「芳香族化合物」というものを構成単位としており、様々な物質へ変換できるポテンシャルがある。実際にバニラの香り成分・バニリンはリグニンから作ることができる<sup>5)</sup>。また、トウモロコシやサトウキビには大量のグルコースが含まれ、直接バイオエタノールへ変換可能である。これは後述するアメリカ型のバイオリファイナリーの代表例である。そして、世界には様々な植物種が存在し、天然ゴムや薬用成分、毒成分などを作り、高価値物質として、工業製品、医薬品の原料にもなる<sup>6)</sup>。

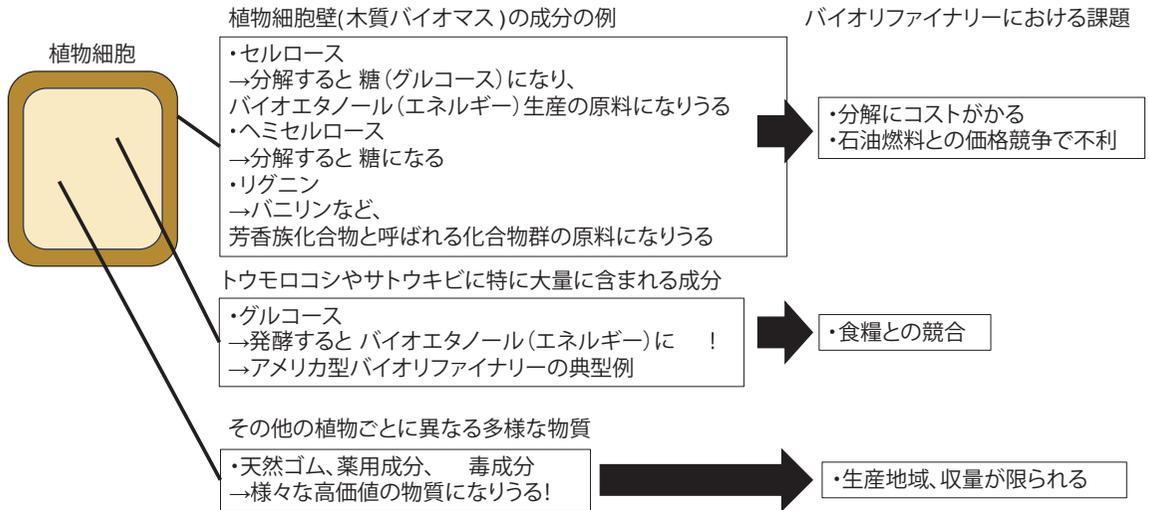


図 2. 植物のバイオリファインリーと既存の問題点の概略図

(財)地球環境産業技術研究機構 編 (2008) 図解 バイオリファインリー最前線 工業調査会。記載の情報などをもとに筆者が作成。

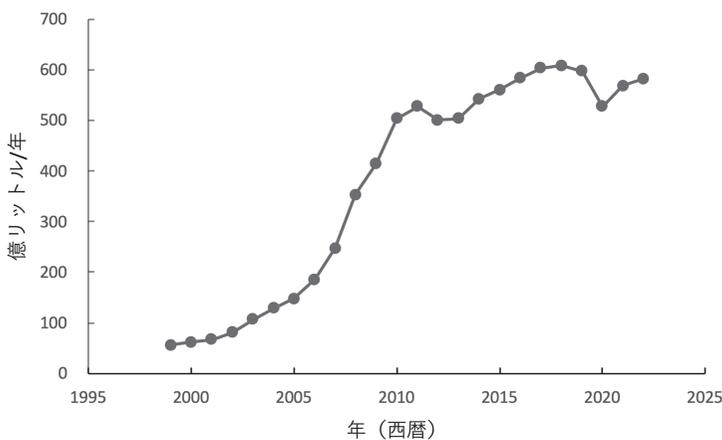
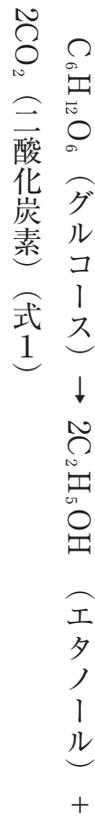


図 3. アメリカのバイオエタノール生産量の推移

U.S. Department of Energy Alternative fuel data center <https://afdc.energy.gov/data/search?q=biofuel> から引用し筆者が作図

2.2. アメリカにみるバイオエタノール生産  
 バイオリファインリーをリードしてきた国はアメリカである。1999年8月に発令された大統領令13134号(バイオエネルギーとバイオ製品の開発と促進)をきっかけに、バイオ製品の開発が推進されてきた<sup>7)</sup>。その中でも顕著に生産増加が加速したのがバイオエタノールである<sup>8)</sup>。(図3)。

バイオエタノールは、トウモロコシやサトウキビに含まれるグルコースを「発酵」というプロセスによって生成する物質である。化学式を用いると式1のように示すことができる。



式1の反応で二酸化炭素が生成されており、この反応だけを見ると単に温室効果ガスを放出しているだけで環境負荷が大きいように思える。一方、植物自身は光合成というプロセスで二酸化炭素を吸収して、グルコースを作っている(式2)。



したがって、式1と式2の反応をトータルで見れば、グルコースを分解してエタノールを製造する際、同時に二酸化炭素は植物によって再びグルコースに変換される。したがって、カーボンニュートラルといえるわけだ。しかし、このバイオエタノールの需要が高まったことで、トウモロコシの総生産量に対するバイオエタノールへの利用割合が増加した(図4)。そのため、本来食糧や飼料であったトウモロコシがバイオエタノールへ投じられることで、トウモロコシの価格高騰などが問題となってきた。実際にこのことは食糧生産を犠牲にエネルギー生産を行っていると解釈でき、深刻な問題として捉えられている。さらに、バイオエタノールの製造工

程において、資材の運搬など様々なエネルギーが必要である。これらの多くは石油資源由来であるため、バイオエタノール生産が完全にカーボンニュートラルかと問われればそうではない。

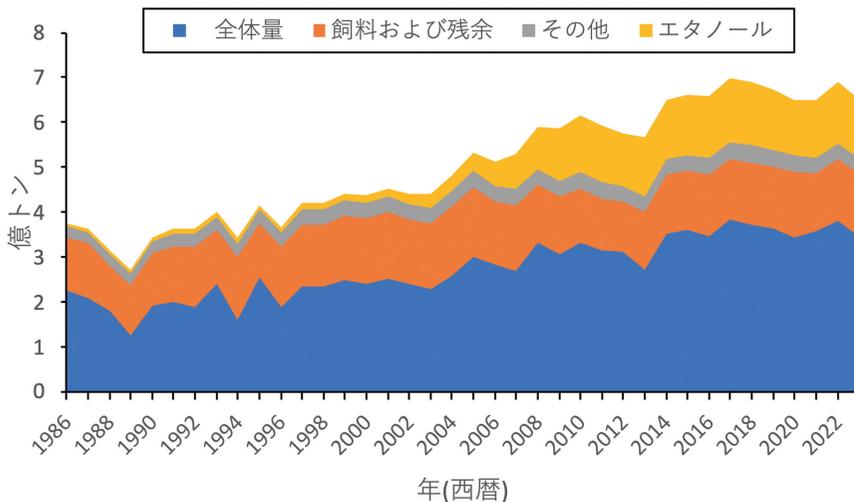


図4. アメリカのトウモロコシの使用用途別の生産量の推移

U.S. Department of Energy Alternative fuel data center <https://afdc.energy.gov/data/search?q=biofuel> から引用し筆者が作図

## 2.3. 日本で重要視される木質バイオマスの利用

こうした背景をもとに近年注目を集めてきたものが、非食糧である「木質バイオマス」の利用である。つまり、木材片や稲わらなど、普段我々が食さない植物の部位をバイオエタノールのようなエネルギーや化学合成原料の生産に用いるという考え方である。日本は特に森林が多く、稲作が盛んなため、この分野に研究は盛んに行われている<sup>9)</sup>。木材片などの「木質バイオマス」には細胞壁成分のセルロースが含まれる(図2)。熱を加えるなどしてセルロースを分解してできたグルコースを発酵させることで、バイオエタノールが生産できる。しかし、木質バイオマスの細胞壁には複雑かつ強固なリグニンが多量に沈着している(図2)。リグニンはセルロースの分解の弊害となるため、あらかじめ除去する必要がある。しかしセルロースやリグニンのような細胞壁成分は互いに結びついているため、除去のプロセスも多段階にわたり、コストがかかる。トウモロコシのように、既にグルコースが多く含まれた材料であればこうした問題は起こらないが、木質バイオマスはそう簡単に分解できるようなものではない。そのため、化石燃料と比較したとき、生産コストの観点から価格競争に負けてしまう。さらに、セルロースと分離(除去)されたリグニンは、ドロドロの残渣の状態で回収される。そのため、高価値の物質に変換しにくく、利用用途が限られる。

したがって、非食糧の木質バイオマスのリファイナリーを効率的に行うには多くの課題が残されている。

ここまでの既存のバイオリファイナリーの背景を踏まえると、トウモロコシやサトウキビを用いたアメリカ型のバイオエタノール生産は日本の国土面積や食糧との競合の観点から推進をばかられる。また、エネルギーは回収できても、化学合成品のような価値のある物質の生産プロセスがおざなりになっている。そのため、日本においては木質バイオマスの利用を推進することが一つ方向性として正しいように考えられる。しかし、木質バイオマスの利用においてはセルロースの分解に多くのエネルギー・コストを使ってしまい、石油由来のエネルギーと価格競争で張り合えない。また、リグニンをういた多様な物質生産にも制限がある。これら問題を解決することが日本型バイオリファイナリーの構築において重要であると考えた。

## 3. 日本型バイオリファイナリーの構築を目指して

### 3.1. 天然ゴム生産プロセスをヒントにする

### 3. 1. 1. 植物の物質生産・蓄積機構への着目

#### ―植物のミルク―

本章では、前章で挙げた問題点に対して解決策を議論していく。上述の木質バイオマスの利用において、高価値の物質生産が難しいことが特に課題であると認識した。価値ある物質生産のプロセスを組み込むことで、価格競争や需要の観点から、石油リファイナリーより優位に立てるのではないかと考えた。そのため、植物の物質生産・蓄積機構に着目することは重要である。これを踏まえ、ここでは筆者が日頃から興味を持っている「植物のミルク」とバイオリファイナリーを絡めて論じる。植物のミルクと聞くとあまりピンとこない方もいるかもしれないが、道端に生えているタンポポ、野菜として食すレタスなどの茎を切断する時に出てくる白濁した液をミルクと呼んでおり、意外と身近な植物から観察できる(図5)。中学生の頃、ガガイモという蔓性の植物の茎を切った時の大量のミルクが出てきたことが印象的で、それ以降自由研究などのネタにしてきた。このミルクは外敵からの防御に働き、植物が「生き物」であることを再認識させてくれるだけでなく、何か生命の力強い「意思」を感じることができた。実は植物のミルクは人類にとって非常に大きな役割を担っている。有名なものとしてはパラゴムノキから採れる天然ゴム、ケシのミルクから採れるモルヒネが挙げられる。天然ゴ



図5. タンポポの根本を切った時に出てくる  
ミルク(筆者撮影)

矢印で示している白い液体が植物のミルク

ムは様々な工業製品に利用され、特にタイヤの原料として極めて重要な資源である。また、モルヒネは強力な鎮痛剤として用いられる。このように、我々は植物のミルクから大きな恩恵を受けて生活している。パラゴムノキの原産地は南米である。しかし、葉枯病による被害を受けたことで原産地での栽培は停滞し、現在はタイやインドネシアなどの東南アジア諸国で栽培が盛んに行われている<sup>10)</sup>。大学の学部時代、私はどうしてもこのパラゴムノキを現地で見たいと思い旅行計画を立てた。

### 3.1.2. マレーシア科学大学への訪問

まず筆者は、マレーシアに行く計画を立てた。現在マレーシアでは天然ゴム生産からパーム油の生産へ移行しており、生産量自体はかつてほど多くはない<sup>10)</sup>。一方、マレーシア科学大学の研究チームから、パラゴムノキに関する研究論文がいくつか出されていたため<sup>11)</sup><sup>12)</sup>、情報収集も兼ねてマレーシア科学大学へ訪問した。マレーシアは言語や文化の違いがあり、大学訪問まで不安も多かった。しかし、現地には日本人の研究者の方がおりその方の案内で大学の研究設備など、お聞きすることができた。この日本人の研究者の方はパラゴムノキとは別の分野の専門ではあったが、パラゴムノキの研究状況についてもネットや文献では得られない様々なことを聞くことができた。そしてパラゴムノキが実際に大学構内に生えている様子を見ることができた。想像よりも葉が大きく、自分の背丈よりもかなり大きい樹木であることがわかった(図6)。また、マレーシアのような温暖な気候に適応しているようで、相当暑い日であったが生き生きとしていた。筆者がパラゴムノキを実際に拝むことができた記念すべき第一回であった。

### 3.1.3. タイのゴム畑

マレーシア科学大学の訪問で実際にパラゴムノキを見るこ



図6. マレーシア科学大学の構内に植えられているパラゴムノキ (筆者撮影)

とはできた。しかし、肝心のミルクII天然ゴムを回収する様子や、ゴム畑について見ることはできなかった。そこで次に筆者は、タイへの旅行計画を立てた。タイといえばプーケットなどのリゾート地で有名である。色々と情報を探っていると、一緒に旅行計画を立てていた同伴者があるリゾート施設のツアーの一貫でゴム畑を見に行けるといふもの見つけてくれた。タイのリゾート体験と筆者の知的興味の両方を満たすことができるということで、プーケット島から小型ボートでヤオ・ヤイ島というところまで足を運んだ。そして、ついに天然ゴム畑を訪れることに成功した。さらに、この時実際に天然ゴムの回収を体験することができた。回収方法はシン

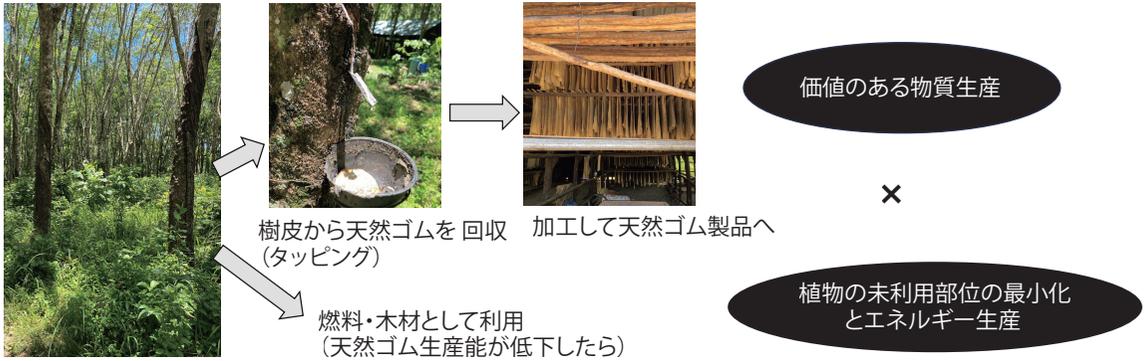


図7. 天然ゴムの生産プロセス

タイのゴム畑にて筆者撮影の写真を用いて作図

プルであった。まず、パラゴムノキの樹皮を金属の刃がついた道具で傷をつける。すると、傷口に沿って白濁した樹液が出てくる。この樹液をお椀のような容器に回収するのである。この操作は「タッピング」と呼ばれ、想像以上にコツが要るようで苦戦したが、なかなか面白い体験であった。この操作で得た樹液に化学物質を添加し、加工することで天然ゴム製品へと変換される(図7)。

### 3. 1. 4. 天然ゴム生産プロセスの持続可能性

この天然ゴムの回収プロセスの驚くべき点は、樹木自身の生命を断つことなく、何年にもわたって天然ゴムを回収できるということである。実際にパラゴムノキの天然ゴム生産寿命は25から30年ほどもあるようだ<sup>13)</sup>。既存のバイオリファイナリーのプロセスは植物の分解＝死を基本としている。また、この分解には二酸化炭素の放出を伴う。そのため、トウモロコシ・サトウキビ、そして非食糧バイオマスはバイオリファイナリーの工程に組み込まれることで利用効率にかかわらずほとんどが最終的に二酸化炭素へ分解されてしまう。一方、天然ゴムの回収システムは植物体の大規模な死を伴わないという点で特異である。タッピングを行った樹皮の傷は次第に固まり、木としてすぐに枯れるようなことはない。そのため、人間の利用したい部分のみを採取でき、木部などその他の必要な部分は分解する必要がない。したがって、必要な物質(この場合は天然ゴム)以外は植物体にとどめておける。そして、生産寿命を終えたパラゴムノキは燃料や木材として利用することができる<sup>13)</sup>。つまり、パラゴムノキを用いた天然ゴムの回収システムは植物の非利用部位の回収を生じないプロセスであり、持続可能性があると考えられる。さらに、合成ゴムの技術開発が急速に進展している現在においても、天然ゴムと同等の性質を持つゴムを合成することは困難であ

る。そのため、世界情勢に左右されつつも現代までその生産量は衰えることはなく、常に需要は絶えることなく、その性質から価格競争などで合成ゴムにとって完全に代わられることもない。したがって、このシステムをヒントにすれば日本型バイオリファイナリー構築に向けた方向性が見えてくるかもしれないと考えた。すなわち、天然ゴム生産のシステムを模倣したシステムが持続可能なバイオリファイナリー構築に向けて必要である。筆者なりに要点を抽出すると、

①植物の未利用部位の最小化し、狭い土地でも利益を最大化する

②天然ゴムのような価値のある物質生産プロセスを組み込み、価格競争に負けないようにする

という2点を考慮したバイオリファイナリーシステムの構築が実現することが課題の解決につながると考えた。

### 3.2. 天然ゴム生産プロセスを模倣したバイオリファイナリーシステムの構築

本節では、前節で挙げた天然ゴム生産プロセスから得たヒントをもとに、今後加速していくべき取り組みについて、筆者の研究分野の話を交えて、少し専門性の高い部分にも触れながら議論していく。特に「植物の物質隔離機構」と「遺伝子改変技術」の2つをキーワードにして日本型バイオリファイ

ナリーの構築について述べる。

#### 3.2.1. 天然ゴム生産プロセスを模倣する上での課題

手のひらを返すようであるが、天然ゴム生産プロセスも完璧ではない。日本で行うバイオリファイナリーに組み込む上で4つの課題がある。まず、日本にパラゴムノキは自生していないためそもそもパラゴムノキを大量に植樹することは困難である。次に、天然ゴムだけを回収すれば良いわけではないということである。産業上重要な物質は多岐に渡り、医薬品、農薬、工業製品など様々である。次に、食糧との競合である。アメリカ型のバイオリファイナリーは元々食糧のトウモロコシがバイオエタノール生産に用いられることで競合が起きていた。一方、パラゴムノキの場合は非食用の植物であり、植樹面積を拡大すれば自ずと食料用の作物を生産する面積が減少すると考えられる。したがって、トウモロコシ生産の例とは別の要因によって食糧との競合が起こりかねない。最後に、天然ゴム生産能がなくなったパラゴムノキは最終的に燃料として利用はできるとはいえ、バイオエタノールのような代物ではないということである。つまり、結局は「木質バイオマス」であるため、分解してバイオエタノールなどのエネルギーとするには手間がかかる。この問題点を「植物の物質隔離機構」への着目と「遺伝子改変技術」によって解

決したい。

### 3.2.2. 植物の物質隔離機構

—特に柑橘の分泌腔に着目する—

パラゴムノキから出てくる天然ゴムは、植物の「乳管」という組織に高濃度に蓄積している。我々が天然ゴムを回収する時には、この乳管を傷つけているのである。このように、植物がある物質を隔離する機構というのは、天然ゴムのようなミルクに限った話ではない。例えば、世界で最も生産されている果物である柑橘類にも似たような物質隔離機構が存在する。それが「分泌腔」と呼ばれるものである。ミカンのオレンジ色の皮を剥くとき、表面にプツプツとした構造を見ることができるとはならないだろうか。それが分泌腔であり、この中には、人間にとって有用な物質や、時には毒となるようなものまで様々なものが含まれている(図8)。これらは化学合成品の原料や代替品として用いることができるかもしれない。そのため、植物の物質隔離機構を研究することは、高価値の物質生産の増量につながり、筆者の目指す日本型バイオファイナリー実現へ近づく。そこで筆者は修士課程になり、この柑橘の分泌腔に着目して研究するようになった。パラゴムノキとは異なり、柑橘は日本でも様々な品種が栽培されており、生食や加工品など色々な形で食料として親しまれ

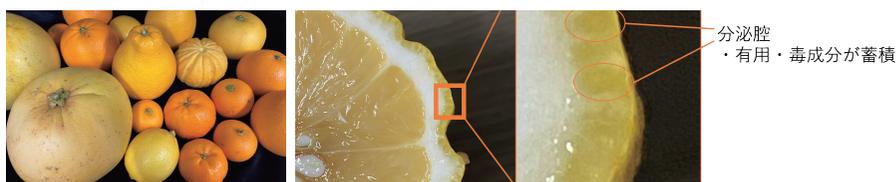


図8. 柑橘の外果皮に存在する分泌腔 (筆者撮影)

そこで、筆者は現在柑橘の分泌腔の形成メカニズムや、そこに蓄積する物質がどのようになっているかについて研究を行っている。

ている。そして、果実の分泌腔自体は皮の部分に存在しているため、少なくとも生食ではほとんど我々が口にすることはない。この性質は、パラゴムノキにはなく、日本型バイオファイナリーを構築する上で、有利な点なのではないかと考えた。また、パラゴムノキと同様に、果実の収穫は植物体全体の死を意味せず翌年にまた同じ木から果実を回収できる。そして、一本の木が果実を生産し続ける年数も長い。つまり、柑橘類をバイオファイナリーに組み込むことで、天然ゴム生産プロセスを模倣したバイオファイナリーを構築する上で課題となっていた、日本での生育可能性、価値ある多様な物質生産、食糧作物との農地面積の競合の3つを解決できると考えた(図9)。

### 3.2.3. 遺伝子組換えに着目した植物の能力の最大化

ここで簡単に遺伝学の話をする。全ての生物は「遺伝子」を持っている。遺伝子はDNAと呼ばれる二重らせん構造をもった物質であり、DNAには4種類の「塩基」と呼ばれる単位が存在する。この塩基の並びによってそれぞれの遺伝子が規定されている。現代になってこの遺伝子を改変する技術は目まぐるしく進歩している。元々の遺伝子を壊したり、新しい遺伝子を追加したりすることで今までになかった能力を持つ植物を作ることができる。一番身近な言葉としては「遺伝子組換え作物」が挙げられる。消費者の観点からはあまり良い印象を持たれることがないが、人類の進歩において遺伝子を任意に操作する技術は極めて重要で、物質生産や農業分野など、多岐にわたって利用されている。これをバイオリファイナリーに用いる植物にも適用できないかというのが一つの考えである。ここで、木質バイオマスの最大の問題点はその分解のしにくさである。したがって、これを遺伝子改変技術によって分解しやすい木材を作ることでもできるかもしれない。実は近年、植物の細胞壁の成分を改変することで、分解を前提とした木材を作る技術も着々に進歩しているようである<sup>14)</sup>。これにより、リグニンの利用幅も広がる可能性がある。また、こうした遺伝子組換え技術は前節で取り上げた柑橘の分泌腔やそこに蓄積する有用成分の増強などにも使えるかも



#### 果実

- ・外果皮：分泌腔を利用した価値ある物質の生産
- ・中身：食料として

- ・日本で生育可能
- ・多様な物質生産
- ・植物未利用部位の最小化
- ・食糧との競合の回避
- ・小規模でも実施可能

石油リファイナリーに価格競争で負けない！

アメリカ型にはない強み！

#### ・木部

- 果実の生産能が低下後は「木質バイオマス」としてエネルギーに変換
- 遺伝子改変技術でバイオエタノール生産・副産物（リグニン）の利用幅拡大

### 日本型バイオリファイナリーの構築

図9. 柑橘を用いたバイオリファイナリープロセスの概略図

近畿大学附属農場にて筆者撮影の写真を用いて作図

しれない。そのため、これら技術を積極的に利用していくことが今後求められると考えられる。筆者自身も植物の遺伝子操作にかかる技術を習得しながら研究を進めている。

#### 4. 植物を用いた日本型バイオリファイナーの実現に向けて国レベルで取り組む必要性のあること

ここまで、天然ゴムの生産プロセスを模倣したバイオリファイナーの構築をする上で、柑橘の分泌腔に着目した研究や木質バイオマスを遺伝子改変技術によって分解しやすくするなどの研究の必要性について述べてきた。一方で、こうした研究は時間・場所・労力・お金がかかることも事実である。そのため、実際にこれらの研究を推進していくためには国レベルで大きな動きが必要であると考える。例えば、実際に遺伝子組換え作物を作ろうとしても、カルタヘナ法（遺伝子組換え生物等の使用等の規制による生物の多様性の確保に関する法律（平成15年法律第97号）を遵守する必要がある。この法律では遺伝子組換え作物の使用規定について定めており、遺伝子組換え植物が環境へ放出される場合は第一種使用等の使用形態に則って、栽培管理しなければならない。そのためには、環境へのリスクなどを十分に考慮することが必要

になる<sup>15)</sup>。2024年現在、日本で第一種使用規程が承認された遺伝子組換え農作物の一覧を見ることができる。これによれば、いくつかの作物が承認を受けることができているようだ。一方で、筆者の着目している柑橘類は承認を受けた作物一覧の中に含まれない（表1）。また、果物全体においてもパイヤの一種にとどまる。そして、木質バイオマスとい

| 作物名          | 分類・用途など |
|--------------|---------|
| アルファルファ      | 穀物      |
| イネ           | 穀物      |
| オンシジウム       | 鑑賞      |
| カーネーション      | 鑑賞      |
| カラシナ         | 野菜      |
| クリーピングベントグラス | 草       |
| シクラメン        | 鑑賞      |
| セイヨウナタネ      | 食用油     |
| ダイズ          | 穀物      |
| テンサイ         | 砂糖      |
| トウモロコシ       | 穀物      |
| トマト          | 野菜      |
| パイヤ          | 果物      |
| バラ           | 鑑賞      |
| ファレノプシス      | 鑑賞      |
| ペチュニア        | 鑑賞      |
| ワタ           | 綿       |

表 1. 2024年4月24日現在のカルタヘナ法に基づき第一種使用規程を承認した遺伝子組換え農作物一覧

(農林水産省公表資料 <https://www.maff.go.jp/j/press/syuan/nouan/attach/pdf/240606-1.pdf> をもとに作成。分類・用途などの欄は筆者の観点から追記)

えば、木材になりうる木本植物であるが、これについても柑橘類、スギ、ヒノキのような顕著な木本は見られない。このようなことから、日本においては木本植物の野外における遺伝子組換え作物の生育について実施がされていないことが分かる。もちろん遺伝子汚染のリスクの観点から、遺伝子組換え作物を野外で作るというのは一定の危険を伴う。一方で、イネやトウモロコシなどの穀物は遺伝子汚染のリスクを考慮しつつ、適切に試験・管理されてきた実績がある。そのため、今後日本において、エネルギー確保の観点から遺伝子組換え作物の利用拡大を検討してみてもはどうだろうか考える。そのためには、十分なリスク管理をすることは前提ではあるが、遺伝子組換えをした果物・木本植物を生育できるような農地整備を行う必要性があると筆者は主張したい。現在は農地面積自体も減少している(図10)。その根本原因は、農業の担い手不足など第一次産業の後退であると考えられる。その意味でも、筆者の提案する植物を用いた日本型バイオリアファイナリーの構築は、エネルギー問題の解決と有用物質生産を組み込んだお金になるシステムであると考えている。そのため、減少するはずの農地をこうした遺伝子組換え作物の生産試験地にあてるなどの試みをしてみてはどうだろうか。こうした国レベルの働きを通して、今後、遺伝子組換え作物の研究・試験地の拡充や植物の物質隔離機構の解明に向けた基礎的な

研究が進展することが望まれる。

## 5. 最後に

本論文では天然ゴムの生産プロセスを参考にして、日本で栽培可能な柑橘類を用いた物質生産機構と遺伝子組換え技術

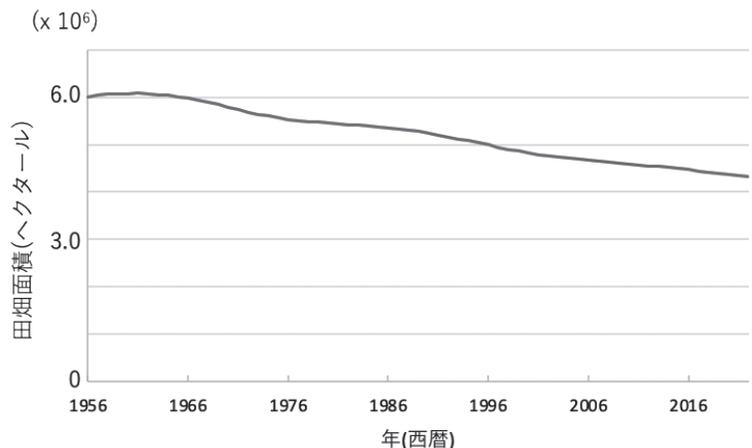


図10. 日本国内の田畑の累計面積の推移

農林水産省 本地・けい畔別耕地面積累年統計 <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500215&tstat=000001013427&cycle=0&year=20220&month=0&tclass1=000001032270&tclass2=000001034721> をもとに筆者が作図

を用いたバイオリファイナリーについて論じた。現在、筆者は修士課程1年の学生として研究をしている。今後はより専門性を高めた研究を行うために博士課程へ進学し活動の幅を広げて行こうと考えている。一方、筆者一人でこれら全てを達成することは不可能である。また、バイオリファイナリーは、基礎研究、応用研究、マネタイズ、政策面、様々な視点の考えを取り入れる必要がある、筆者自身の専門分野の技術だけで達成できるシステムではない。その意味でも、産学官を通して、今後多くの人々がエネルギー問題、バイオリファイナリーについて今以上に興味を持っていただき、連携していくことが必要であると考ええる。その先に、他国に負けない日本独自のバイオリファイナリーの構築が実現し、科学技術立国日本を支える基盤となる未来が訪れることを願う。

## 6. 謝辞

本論文は筆者がかかわった多くの方々から頂いた情報や、ご指導によって成り立っています。マレーシア科学大学で案内をしてくださった研究者の皆様、東南アジア旅行に同行してくれた大学の同期、そして筆者の所属する京都大学大学院農学研究科応用生命科学専攻、及び同大学生存圏研究所の教員の皆様には、日頃よりご指導いただき大変ありがとうございます。

います。この場を借りて御礼申し上げます。

## 7. 引用文献・参考資料

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁 HP 2023—日本が抱えているエネルギー問題 (前編)  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyoo/energyissue2023\\_1.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyoo/energyissue2023_1.html)  
(2025年2月24日 閲覧)
- 2) Shijie Liu, Houfang Lu, Ruofei Hu, Alan Shupe, Lu Lin, Bin Liang. A sustainable woody biomass biorefinery. *Biotechnology Advances* 2012; 30: 785-810.  
DOI: 10.1016/j.biotechadv.2012.01.013
- 3) Qiaoling Wan, Yanju Lu, Long Cheng, Jingjing Shi, Li Xia, Junming Xu. Optimizing energy use in the integrated utilization of woody biomass: Process development and simulation. *Industrial Crops & Products* 2025; 225: 120426.  
DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.120426
- 4) 福島和彦・船田良・杉山淳司・高部圭司・梅澤俊明・山本浩之 編集 (2011) 第2版 木質の形成 バイオマス科学への招待 海青社.
- 5) Maeda, M.; Hosoya, T.; Yoshioka, K.; Miyafuji, H.; Ohno, H.; Yamada, T. Vanillin production from native soft wood lignin in the presence of tetrabutylammonium ion. *J. Wood Sci.* 2018; 64: 810-815.  
DOI: 10.1007/s10086-018-1766-0
- 6) 水谷正治・土反伸和・杉山暁史 編 (2018) 基礎から学ぶ 植物代謝化学 羊土社.
- 7) (財)地球環境産業技術研究機構 編 (2008) 図解 バイオリファイナリー最前線 工業調査会.
- 8) 独立行政法人農畜産業振興機構  
米国の砂糖需給と政策およびバイオエタノール産業の情勢と今後の見通しについて (2) バイオエタノールの最新情勢と需要・利用面からの検証

- [https://sugar.aic.go.jp/world/report\\_d/report\\_d0801a.htm#1](https://sugar.aic.go.jp/world/report_d/report_d0801a.htm#1)  
(2024年12月28日 閲覧)
- 9) Yuka Nakahara, Tomohiro Tabata, Tomoko Ohno, Fumiko Furukawa, Katsuro Inokuchi, Keiko Katagiri, Yosuke Hirayama. Discussion on regional revitalization using woody biomass resources as renewable energy. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 2019; 10: 243-256.  
DOI: 10.1007/s40095-019-0300-5
- 10) 小井川 広志(2021) プラントからバイオマシク: プローシミアに見る脱植民地過程の連続性・不連続性 公益財団法人 JFE21世紀財団 2021年度マシク歴史研究報告書.
- 11) Nyok-Sean Lau, Yuko Makita, Mika Kawashima, Todd D. Taylor, Shinji Kondo, Ahmad Sofman Othman, Alexander Chong Shu-Chien Minami Matsui. The rubber tree genome shows expansion of gene family associated with rubber biosynthesis. *SICEINTIF REPORT* 2016; 6:28594.  
DOI: 10.1038/srep28594
- 12) Swee Cheng Loh, Ahmad Sofman othman & G. Veera Singham. Identification and characterization of jasmonic acid- and linolenic acid- mediated transcriptional regulation of secondary laticifer differentiation in *Hevea brasiliensis*. *SICEINTIF REPORT* 2019; 9:14296.  
DOI: 10.1038/s41598-019-50800-1.  
サカタのタネ グリーンサービス株式会社 HP  
<https://www.sakata-greenservice.co.jp/commodity/material/kitoishi/>  
(2025年2月25日閲覧)
- 14) C G Wilkerson, S D Mansfield, F Lu, S Withers, J-Y Park, S D Karlen, E Gonzales-Vigil, D Padmakshan, F Unda, J Rencoret, J Ralph. Monolignol ferulate transferase introduces chemically labile linkages into the lignin backbone. *Science* 2014; 334: 90-93.  
DOI: 10.1126/science.1250161
- 15) 農林水産省 第一種使用規程承認組換え作物栽培実験指針

<https://www.aifrc.maff.go.jp/docs/anzenka/attach/pdf/GMsaibai-2.pdf>  
(2025年2月25日閲覧)