

植物から電気エネルギーを採る -師管液成分化合物を燃料とする燃料電池-

岡野 光俊*

Harvesting electric energy from plants
-Polymer electrolyte fuel cells
using the ingredients of phloem saps-

Mitsutoshi Okano*

In the first half, significance of harvesting electric energy from plants is discussed. In the second half, polymer electrolyte fuel cells which utilize the ingredients of phloem saps are discussed. Photosynthetic products are transported through the sieve tube. Sucrose is the typical chemical structure of them during the transportation. As sucrose and their related compounds possess the plural numbers of hydroxy groups, they can be used as fuel of polymer electrolyte fuel cells of the direct methanol fuel cell type.

1. はじめに

エネルギーは、電気エネルギー、光エネルギー、化学エネルギー、原子力（核）エネルギー、力学的エネルギー、熱エネルギーに分類されるが、現代社会において最も便利に使われているのは電気エネルギーである。これは、電気エネルギーが、容易に、光エネルギー、熱エネルギー、力学的エネルギーに変換できることによる。よって、エネルギーの議論においては、電気エネルギーの議論が最も重要である。

本総説の前半では、植物から電気エネルギーを得ることの意味について、エネルギー分野全体を見渡しながら考察する。後半では、植物から電気エネルギーを得る手法として著者が最も注目するところの師管液成分化合物を燃料とする燃料電池について考察する。

2. 太陽光エネルギー利用と植物利用

2. 1 太陽光エネルギーによる持続可能社会

エネルギー白書¹⁾によれば、我々が利用するエネルギーの源であるところの一次エネルギーは、石油、天然ガス、LPガス、石炭、原子力、太陽光、風力

等に分類されている。原子力を除くと、化石燃料と太陽光や風力等となる。化石燃料は、いずれも太古の昔に生存した植物や動物が長い年月をかけて変化して生成したものとされており、元をたどれば、太陽光エネルギーが化学エネルギーの形で蓄積されたものである。太陽光や風力等も太陽光エネルギー由来であるので、結局、原子力を除く全てのエネルギーは太陽光エネルギー由来ということになる。

石油や石炭などの化石燃料は、言うまでもなく枯渇性エネルギーである。シェールガスの利用の本格化もあり、化石エネルギーの枯渇は当面考えられないが、やがて枯渇するものである。人類は化石エネルギーにたよらない方法を追及すべきであることは間違いない。つまり、完全に持続可能な人類社会を築くためには、現在降り注いでいる太陽光エネルギーのみを使って、人類が必要とするエネルギーをまかなう必要がある。

2. 2 太陽光エネルギーで足りるのか？

現代社会は膨大なエネルギー消費の上に成り立っており、エネルギー消費量は年々増加している。エネルギー白書の元データとしても利用される BP Statistical Review of World Energy²⁾があるが、その June 2012²⁾によるならば、世界の一次エネルギー使用量

* 東京工芸大学工学部生命環境化学科/ナノ化学科教授
2012年9月14日 受理

は2006年に110.5億toeであったものが、5年後の2011年には122.8億toeとなっている(toeは、tonne of oil equivalent(原油換算トン)の略で、1トンの原油を燃焼させたとき得られるエネルギーを意味し、エネルギーの最も基本的な単位ジュール(J)で表現するならば、約42GJに相当する)。122.8億toeは、 5.2×10^{20} Jに相当する。

これに対し、地球に降り注ぐ太陽光エネルギーの量は、次のように考えられている。³⁾1年間に地球が受ける太陽光エネルギーは 5.5×10^{24} Jで、地表や海洋面に達するエネルギーは 3.0×10^{24} Jとされている。人類が消費するエネルギーの約5800倍である。陸地の1%の面積において、10%の効率で太陽光エネルギーを利用できると、2011年の使用料の1.7倍程度のエネルギーを確保できる計算になる。一次エネルギーが発電に利用されていることを考えると、最初から電気を作る太陽電池の想定では、1.7倍ではなく、もう少し余裕があると考えられる。現実的には、陸地の1%に太陽電池を敷き詰めるのは容易ではない。今後、人口増加や途上国でのエネルギー利用増加も予想される。人口増加抑制と省エネにより、エネルギー使用量を増加させない努力が将来にわたって求められる。しかしながら、今ならばまだ太陽光エネルギーで足りるのである。

2. 3 太陽光エネルギーを何で捕えるか

太陽光エネルギーを現実的に利用している代表と言える二つは、太陽電池と植物である。この2者を比較してみよう。

太陽電池の変換効率(太陽光エネルギー → 電気エネルギー)は非常に高い。既に20%を超えている。多接合型の採用により、30%を超える効率のものが開発されつつある。⁴⁾しかし、太陽電池の製造・設置その他にはエネルギーを必要とする。これに必要なエネルギーを超えて発電しなければ意味がない。エネルギーペイバックタイムの考え方が重要である。太陽電池のエネルギーペイバックタイムの見積もりについては、膨大な資料がある。⁵⁾一般的な太陽電池の場合、2から8年とする計算があるが、大変難しい計算であるので、この数字を疑問とする声も多い。

植物では、理論上最大値で8%、実際の最高記録が2~3%、通常、1%程度と言われる(太陽光エネルギー → 化学エネルギー)。光合成にはC

3型、C4型、CAM型があり、光合成の効率が異なることが知られているが、上記の数値を超えるものではない。^{6,7)}この数値は化学エネルギーとしての値であるので、これを電気エネルギーに変換するならば、さらに幾分か小さくなる。

しかしながら、植物の場合は環境に貢献する面がある。生態系を支え、二酸化炭素を吸収して炭素の循環を促し、酸素の供給もする。

以上のように、植物の太陽エネルギー変換効率は、半導体の太陽電池と比較して高くない。それでも植物からのエネルギー獲得は魅力的である。

2. 4 宇宙での大量発電なら植物有利?

植物による発電がさらに魅力的となる領域がある。それは宇宙。

宇宙において電気を使用する場合、太陽電池か原子力電池を利用している。太陽光の届くところでは、太陽電池を使うことができるので、地球の周りを回る人工衛星では太陽電池が主流である。以前は原子力電池が利用されたこともあるが、地上への落下の危険性が大きいので、現在は使用されない。人類が月や火星に進出し、大量の電気を使用する場合を仮定してみよう。太陽電池は、その製造に巨大な設備を必要とするので、現地での製造は、地球並みの発展を遂げた後でなければ不可能である。現地製造せず、大量の電力を得るための太陽電池を全て地球から運ぶのも、打ち上げに大量のエネルギーが必要であることを考えると非現実的である。

これに対し、植物を生育させることは、人間が生きる環境が確保されているならば、むしろ容易と言える。これは近年の植物工場の成功を見てもわかる。^{8,9)}植物の栽培には土さえもいらず、水と栄養となる元素の水溶液があれば太陽光のもとで可能なのである。また、容易に理解されるように、植物の栽培は酸素の供給と二酸化炭素の除去の働きをすることも注目に値する。植物からのエネルギーの獲得を、その能力の半分程度に抑えるならば、残りの半分に関しては食糧生産に回すことも可能であろう。詳細は省略するが、燃料電池部分の製造は、太陽電池に比べると容易であり、小さくすむと考えられる。

2. 5 前半のまとめ

このように考えてみると、人類が使用するエネルギーを植物から得ようとすることは、きわめて合理的かつ魅力的なことと考えられる。

3. 植物からの直接発電

3. 1 植物中に存在する化学物質

植物は、太陽光エネルギーを化学エネルギーの形で蓄える。植物の体の中には、様々な化合物が含まれている。形を作り上げているのは、良く知られているように、セルロースである。セルロースは、グルコース（糖の一種）がつながってできている高分子である。植物が行う光合成を簡潔に説明するとき、「太陽光を使って、二酸化炭素と水から糖を合成する」としばしば表現される。この言葉に端的に表わされているように、植物は糖とその類似の様々な化合物が体内に大量に存在し、様々な活躍している生物なのである。

図1に代表的な糖であるところのスクロースとグルコースの構造式を示した。

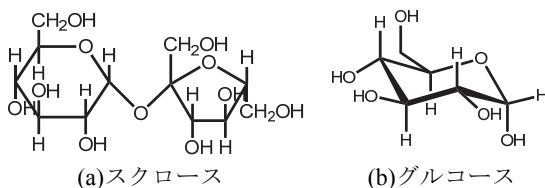


図1 典型的な糖の構造

この構造を見るとわかるように、糖の分子構造の中には、ヒドロキシ基(-OH)の構造が多くみられる。ヒドロキシ基は、アルコール類に見られる構造である。これらのことから明らかなように、糖はアルコールに類似した化合物である。もっともシンプルなアルコールであるメタノールを燃料とする燃料電池(ダイレクトメタノール燃料電池¹⁰⁾と呼ばれる)が良く知られているので、ダイレクトメタノール燃料電池を知る者ならば、「糖も燃料となるのでは?」と考えるのは、きわめて自然である。スクロース、グルコース、フルクトースなどの糖や糖アルコールであるソルビトールやマンニトールが燃料電池の燃料化合物となることは、著者らも既の実験により確認している。^{11,12)}

3. 2 植物のどの部分から電気をとるか

植物が太陽光エネルギーを利用して作り上げた化学エネルギーを、人間社会で最も便利に使われているエネルギーの形態である電気エネルギーへと最も直接的に効率良く変換する方法は、燃料電池と

言える。

燃料電池には様々なタイプがあるが、ここで想定しているのは、常温において魅力的な特性を示すことが知られている高分子固体電解質型燃料電池で、図2のような大変シンプルな構造を持つものである。

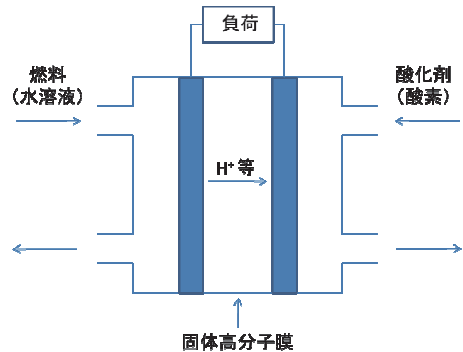


図2 固体高分子形燃料電池の概略図

(陽イオン交換膜を利用するタイプの例)

次に、植物のどの部分からエネルギーを取り出すか、燃料電池の話抜きに、広い視野から考えてみよう。

図3は、光合成による植物体の形成の概略を炭素に注目して示したものである。全体は大きく三つの部分に分けて考えることができ、①光エネルギーを化学エネルギー(化合物の中に閉じ込められたエネルギー)に変換する部分、②得られた化合物を運ぶ部分、③運ばれてきた化合物を利用して目的のものを作る部分、である。¹³⁾

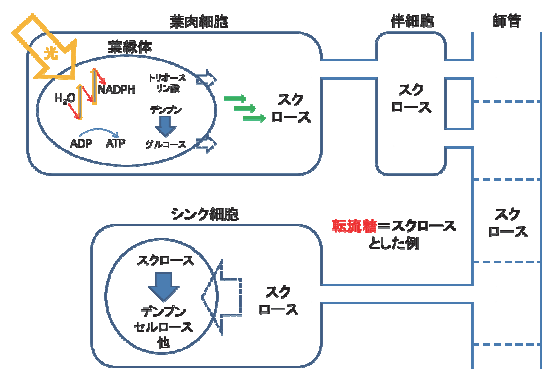


図3 光合成による植物体の形成

葉緑体の中で合成される具体的な化合物として

は、デンプンが良く知られているが、その前段階ではトリオースリン酸が重要な化合物である。デンプンは高分子であり、分子量が大きく輸送に適さないため、より小さな別の化合物の形に変換して輸送する。この輸送の目的で利用される化合物は転流糖と呼ばれる。図3は転流糖をスクロースとした例を示している。地球上には多くの植物が生息するが、転流糖は、スクロースである場合がほとんどである。一つの植物では一種類の化合物のみと限られるわけでもないようであるが、スクロースの濃度が高い場合が多い。バラ科植物の転流糖であるソルビトールやセリ科植物の転流糖であるマンニトールは、大変興味深い、その理由等については別の論文に示したので、ここでは省略する。¹⁴⁾転流された糖は、果実などを作るために利用される。

以上のような植物の中のどの部分から発電用の化合物を得るか（どのように燃料電池を装着するか）という問題を考える。

一つ目のポイントは、効率である。物質の変換を含めすべての過程にはエネルギーの消費が必要になると考えられる。であるならば、図3に見られる様々な過程のうち、なるべく川上の部分からエネルギーを得る方が、元の光エネルギーからのロスを少なくしてエネルギーを得られることになる。

二つ目のポイントは、植物体へ与える影響である。わかりやすい表現をするならば、燃料電池を装着したことにより植物が死んでしまうようなことは避けたいわけである。光エネルギーを化学エネルギーへ変換する部分である光化学系とその周辺の電子伝達系近傍からエネルギーを得ようとする研究は石油ショック頃から盛んに行われたが、結局は光合成の働きが不調となってしまう結果を招き、これまでに実用に向けた検討に入るほどの成果を上げていないものはないと言える。¹⁵⁻¹⁷⁾複雑に関係しあい調和している葉緑体内の反応システムに直接アクセスして利用するまでには、我々の化学は進歩していないと認識せざるを得ない。このように考えてくると、輸送中の化合物である転流糖の重要性が見えてくる。光合成系やシンク細胞での合成系への影響を最小限にすることができると考えられるからである。

3. 3 燃料電池の接続はどのようにするか

3. 2までの議論により、転流糖に代表される植

物の師管液成分化合物を燃料とすることが望ましいことがわかった。ここでは、より具体的に、燃料電池の装着方法を考えたい。

植物の師管液の組成を研究した論文には、師管液の採取方法が様々に示されている（アブラムシ法が有名）。¹⁸⁾しかしながら、いずれの方法によっても得られる師管液の量は大変少量である。これは、植物が自己防衛のために、水分と栄養分の流出を止めようとするからである。生命を維持するための栄養分に余裕がある状態はしばしば見られるが、水分に余裕がある状態というものは考えにくい。このように考えてくると、燃料電池を装着する場合、師管液全体を燃料電池へ供給するというよりは、師管液中の成分化合物のみを燃料電池へ拡散させるという考え方が望ましいことがわかる。

次に、師管液成分化合物の濃度について確認しておきたい。転流糖は各植物で1種類に決まっているわけではないが、多くの植物においてスクロースが主な転流糖である。¹⁹⁻²¹⁾イネの師管液中の濃度は最大で200 mMから600 mM近くに達すると報告されている。²²⁾燃料電池の実験では、まず10mM以上あれば十分と言えるであろう。

燃料化合物の摂取部位としては、茎の一部を切断しての師管へのアクセス、または果実部分へ入った直後の部分が興味深い。ここでは、比較的容易であるところの后者について紹介する。師管液にこだわらずに果実を可とする考え方もあるが、あくまでも図3を考え、上流での化合物の採取を念頭に考えている。通常、果実は水分も豊富であるので、搾汁により発電することは容易である。

果実の実り始めの時期に、この部分へ燃料電池を装着する場合、たくさんの小さな果実がなる植物は望ましくなく、広い範囲から一か所へと栄養を集めてくる植物が望ましい。次から次へと実を結ぶイチゴよりも、1個の大きな実をつけるスイカの方が利用しやすいことになる。詳しい検討は行っていないが、スイカは植物体全体に占める実の割合がきわめて大きい魅力的な植物である。太陽エネルギーを受けている葉の面積から考えても、驚くほど大きな実をつける。

3. 4 初歩的実験の例²³⁾

スイカを実際に栽培し、実の成長が始まった段階で燃料電池を装着した我々の実験の例を紹介する。

実の中へと輸送されてくる師管液成分化合物を燃料電池へ導いているという想定である。

屋外のプランターにて栽培したスイカをプランターごと実験室へ持ち込み、室内の蛍光灯下で実験を行っている。数時間の実験終了後は、燃料電池を装着したまま屋外へ戻し、翌日再び実験室へ持ち込んで実験するという方法を採用した。

図4は燃料電池の装着の様子である。スイカの株の大きさは、長さ40.8 cm、燃料電池装着前のスイカの実の大きさは、直径2.5 cmであった。写真では、上側が燃料極側、下側が空気極側になっている。

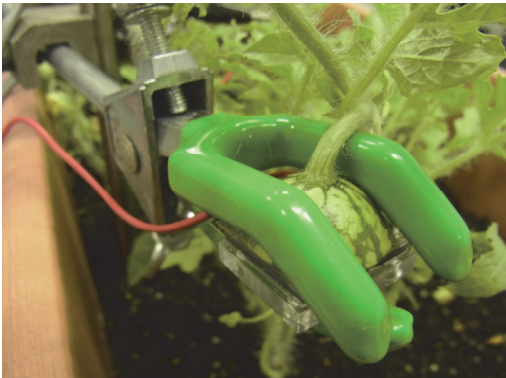


図4 スイカへの燃料電池の装着

空気極側は、空気（酸素）が拡散して供給される構造で、触媒としての白金ブラックを担持したカーボンペーパーを使用している。燃料極側は、師管液成分が拡散して供給される構造で、以下に示す結果は、金属触媒を使用せずにケッチェンブラックのみを使用したものによる結果である。

ポテンシオスタットを使用し、0.1 Vの電圧を維持しながら2時間の発電を行わせた場合、電流は非常にゆるやかに減少していったが、平均約5 μA の電流が流れた。1日（2時間の実験）で約 3.6×10^{-2} Cの電気量、 1×10^{-3} mWhのエネルギーが得られた計算になる。エネルギーとしては大変少ないが、植物から電気得られることを明確に示した実験である。この実験では4日目になって燃料電池装着部が枯れてきてしまい実験終了に至っている。植物に極端な負担をかけることなく電気を得る方法を模索していく必要がある。

3. 5植物の新しい評価基準が生まれる

以上のように、燃料電池を利用して、植物から直接電気エネルギーを得ることができることがわか

った。では、この目的に適した植物とはどのような植物であろうか？下記（1）から（3）は魅力的である。

- （1） 年間を通して生育する植物。
- （2） 植物体に対して大きな実をつける植物。
- （3） 年間を通して実をつけ続ける植物。

しかし、実際には、特に四季の明確な日本では、植物には、成長に適した気候がある。また、生育段階というものも顕著である。茎を伸ばし葉をつける時と実を結ぶときは植物の状態はかなり異なり、師管液成分にも変化がみられる。実のみで考えても、実のつき始めと熟した後とは、実に含まれる化合物の種類と濃度が異なることが知られている。我々が実験対象の一つとして選択しているスイカでは、熟す前の赤くないスイカと熟した後の赤いスイカの両者から搾汁を得、後者を利用した場合に電池特性が高くなるという結果を得ている。植物からの発電を限界まで行おうとすると、季節や成長段階により、発電の限界が異なってくることを意味する。

ところが、前述したように、宇宙空間での栽培を考えると、そこには季節変動がほとんどないので、継続的な植物の生長や発電が可能となる可能性もあって興味はつきない（宇宙での植物の栽培の研究は着実に進んでいる^{24,25)}）。

従来、収穫量の多さ、病気、冷害、干害に対する強さ、おいしさ等の観点から植物の品種改良がおこなわれてきたが、より効率よくエネルギーを得る観点からの植物の品種改良が試みられるならば大変興味深い。

4. まとめ

本研究は、植物をエネルギー源として利用する研究の一つであるが、植物からエネルギーを獲得するための比較的新しい技術としては、バイオエタノールが話題となり実際に行われている。論文の前半でも述べたように、植物による太陽エネルギー変換効率はまだあまり高くない。そこで得られた植物体のごく一部であるトウモロコシの実の部分のみについて、さらにエネルギーをかけて加工し、エタノールを製造するのは、効率の良いエネルギーシステムにはなりえない。現在、現実的にある範囲で役に立っている技術ではあるが、将来の技術としては魅力に欠ける。

師管液の中には、糖以外にも含まれている化合物がある。濃度も高く重要なものとしては、アミノ酸がある。養分として根から吸い上げた窒素をもとに合成したものである。炭素の転流が糖により行われるように、窒素の転流はアミノ酸により行われる。アミノ酸も光合成産物であるので、これも燃料として利用できないのかということは当然考えられる。我々の予備的な実験では、現在の実験条件では、全く反応しないわけではないが、糖よりも反応性がかなり低いということがわかっている。植物へ与える影響を考えると、大量に蓄積される糖の反応性の方が高いということは望ましいと推測しているが、詳細は相当綿密な実験を繰り返さないと明らかにできそうにない。

電極上に生体由来酵素を固定して利用するバイオ燃料電池というものが知られており、かなり研究が進んでいる。²⁶⁾本論文で論じた問題に興味を持つならば、バイオ燃料電池についても合わせて調べることをお勧めする。

将来、太陽光エネルギーを大規模に利用するため、「広大な面積が太陽電池で真っ黒に覆われるより、植物の緑に覆われていた方が気持ち良い」と考えるのは著者だけであらうか？

参考文献

- 1) <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2011energyhtml/index.html>
- 2) <http://www.bp.com/sectionbodycopy.do?categoryId=7500&contentId=7068481>
- 3) 渡辺 正、中林誠一郎 *電子移動の化学 電気化学入門* 朝倉書店: 東京, 1996.
- 4) Yamaguchi, M. *ケミカルエンジニアリング* 2011, 56, 169.
- 5) みずほ情報総研株式会社 *平成 19~20 年度 新エネルギー・産業技術総合開発機構 委託業務成果報告書, 2009* (機構のホームページから入手可能)
- 6) 山崎 巖 *光合成の光化学* 講談社: 東京, 2011.
- 7) 渡辺 正、金村聖志、益田秀樹、渡辺正義 *電気化学* 丸善: 東京, 2001.
- 8) 古在豊樹 *人工光型植物工場* オーム社: 東京, 2012.
- 9) 古在豊樹 *太陽光型植物工場* オーム社: 東京, 2009.
- 10) 渡辺政廣 *実力養成化学スクール 燃料電池* 丸善: 東京, 2005.
- 11) 篠原宏明 *東京工芸大学工学部卒業論文, 2011.*
- 12) 茂木勇人 *東京工芸大学工学部卒業論文, 2012.*
- 13) 東京大学光合成教育研究会 *光合成の科学* 東京大学出版会: 東京, 2007.
- 14) 岡野光俊 *東京工芸大学工学部紀要* 2011, 34, 78.
- 15) 柴田和雄、今村 昌、池上 明編著 *太陽エネルギーの生物・化学的利用 I* 学会出版センター: 東京, 1979.
- 16) 柴田和雄、今村 昌、池上 明編著 *太陽エネルギーの生物・化学的利用 I I* 学会出版センター: 東京, 1979.
- 17) Okano, M; Iida, T.; Shinohara, H.; Kobayashi, H.; Mitamura, T. *Agric. Biol. Chem.* 1984, 48, 1977.
- 18) 山口裕文、堀内昭作、森源治郎 *応用植物科学実験* 養賢堂: 東京, 2007.
- 19) 山谷知行 *朝倉植物生理学講座 2 代謝* 朝倉書店: 東京, 2001.
- 20) 茅野充男 *現代植物生理学 5 物質の輸送と貯蔵* 朝倉書店: 東京, 1991.
- 21) 加藤 潔、島崎研一郎、前島正義、三村徹郎 *植物細胞工学シリーズ18 植物の膜輸送システム* 秀潤社: 東京, 2003.
- 22) Hayashi, H.; Chino, M. *Plant Cell Physiol.* 1990, 31, 247.
- 23) 安田有希、田中翔一、竹内健人、岡野光俊 unpublished data, 2012.
- 24) http://www.jaxa.jp/article/special/kibo/takahashi_j.html
- 25) 谷 晃、宇宙における植物生産技術の開発 動向と展望、SHITA シンポジウム 2001.
- 26) 加納健司 *化学と工業* 2010, 63, 897.