

光合成燃料電池パネルの建築への適用性検討

新 述 隆 太 小 田 観 世 川 上 比 奈 子
(技術本部) (原子力本部) (摂南大学)

片 岡 弘 安 水 野 良 治 大 塚 清 敏
(元大林組)

Study on the Applicability of Photosynthetic Fuel Cell Panels for Buildings

Ryuta Niinobe Miyo Oda Hinako Kawakami
 Hiroyasu Kataoka Ryoji Mizuno Kiyotoshi Otsuka

Abstract

Recently, the disposal of non-vegetables and other food products has increased annually, and CO₂ is emitted as combustible waste during their treatment. Photosynthetic fuel cells generate energy from discarded plants. This is expected to reduce waste and provide a new source of renewable energy source. Furthermore, it can be used as highly aesthetic building materials, and architectures using such materials would be called photosynthetic architecture. In this study, we installed large-scale photosynthetic fuel cell panels outdoors and observed their color changes and electric power generation throughout the year to validate their applicability in architecture. This paper presents the experimental results. In future studies, the applicability of this method to buildings in the future is further explored.

概 要

近年、規格外野菜などを含む食品ロスは、世界的に増加傾向にあり、それらを可燃ごみとして処理する過程でCO₂が発生している。光合成燃料電池は、規格外野菜等からエネルギーを生成する技術であり、廃棄物の有効活用、及び新たな再生可能エネルギーの創出を期待されている。また生成過程において、植物の光合成のために透過性のある素材を利用することから、緑色の光に彩られた空間を創出する建材としての利用も可能であり、これらを用いる建築は光合成建築と呼ぶこともでき、注目を集めている。本研究では光合成燃料電池の実建築への適用可能性を検証するため、大型化した光合成燃料電池パネルを屋外に設置して、一年間に亘って観察した。実験を通して得られた光量と溶液の色変化、溶液濃度、触媒の種類、起電力等の相関を本論文で報告する。溶液色の持続性等の課題が判明したが、今後も建築への適用に向けた検討を進める。

1. はじめに

昨今では持続可能な社会の実現に向けて、物質の循環、資源の消費と環境負荷が低減された「循環型社会」が、新たな社会モデルとして注目を集めている。太陽光、風力、地熱、バイオマス等の自然から得られる再生可能エネルギーは温室効果ガスを排出せず、国内で生産できることから、エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ重要な国産エネルギー源である。国内における年間発電量のうち再生可能エネルギーが占める割合は、2021年度では2割に達している¹⁾。再生可能エネルギーに関する研究は活発に行われており、さらに環境負荷の低減が進むと考えられる。

一方で、農林業、食品産業では毎年、大量の植物が廃棄されており、その多くは可燃ごみとして処理されるため、CO₂排出量を増大させる一因となっている。伐採された樹木は建材などに活用されるが、葉については廃棄せざるを得ない。また形状や大きさ、傷などの理由で出荷基準に満たない規格外野菜が、年間収穫量の約20%存在

することが農林水産省から発表されている²⁾。

このような課題を解決する技術として、規格外野菜を活用して、エネルギーを生成する光合成燃料電池が、廃棄物の削減及び新たな再生可能エネルギーとして期待されている^{3) 4)}。光合成燃料電池は、植物から抽出された葉緑体溶液と光合成するために透過性のある素材から構成される。現在は小型の試験体で検証されているが、大型化できれば、緑色の光に彩られた空間を創出する建材利用の可能性もあり、この光合成燃料電池を利用した建築は光合成建築⁵⁾と呼ぶこともでき注目を集めている。ソーラーパネルのような大きなエネルギーを生むことはないが、廃棄物の活用によるエネルギーの生成によって、環境負荷を低減するため、「循環型社会」に求められる新たな建築モデルになる可能性を秘めている。

本研究では光合成燃料電池の建築への適用性を検討するために、大型の光合成燃料電池パネルを試作した。これを屋外に設置し、一年間に亘って多様な条件で、発電量や溶液の色変化を観察した。結果及び実験を通して得られた知見を報告する。

2. 光合成燃料電池の原理と特性

2.1 発電原理

光合成燃料電池は植物の葉緑体から抽出された膜タンパク複合体である光化学系II複合体 (PSII) を使用する。光合成とは光エネルギーを利用して、水と二酸化炭素から糖と酸素を合成する反応であり、この反応において葉緑体内に存在するPSIIを含む細胞膜が、光の吸収、電子とプロトンの移動、水分解反応などに大きく関与している。本来は植物の生命活動のために光合成を行うPSIIであるが、本技術では、界面活性剤を用いることで、葉緑体からPSIIを分離し、可溶化して得られたPSII溶液を利用する^{6,7)}。このPSII溶液に光エネルギーが当たると酸素と水素イオンおよび電子が生成されて発電する。

Fig. 1に光合成燃料電池の原理を示す。図に示されるように、光合成燃料電池はPSII溶液が注入された透明な容器、電解質、および燃料極・空気極の電極から構成されている。燃料電池から電力を得るには、燃料極に水素イオンを、空気極に酸素を供給する必要がある。光合成燃料電池では、燃料極には光合成で得られた水素イオンを供給し、大気に曝された空気極側に大気中の酸素が供給される構造となっている。PSII溶液に光が入射すると光合成により水から水素イオンと電子が生成され、燃料極に水素イオンが供給される。水素イオンは電解質を通過するとともに、生成された電子は、回路で電気機器などで仕事をして、空気極へ到達する。同時に大気から空気極へ供給された酸素は電子を受けて酸素イオンとなり、電解質を通過した水素イオンと結合して水が生成され、この過程で燃料電池から電力を得ることができる。また空気極側で生成された水は外部へと排出される。

2.2 特性

PSII溶液は伐採樹木や廃棄野菜の葉から作ることができる。今回の実験ではハウレンソウの葉からPSIIを抽出した。ハウレンソウの葉と二糖類であるスクロースからなる破砕液に界面活性剤を加えることで、PSII溶液を得た。

光エネルギーを使わない一般的な燃料電池では、電子は通さず、水素イオンだけを通す電解質としてナフィオンが用いられる。その分子構造内にはフッ素やスルホン酸基が含まれており、腐食性が高く、製造及び廃棄の過程で環境負荷が大きく高コストである。それに対して、光合成燃料電池は魚のうろこなど天然由来の廃棄食材を電解質として活用しており、ナフィオンに比べて環境負荷が小さく低コストである³⁾。過去に行われた実験では、体積20mLのPSII溶液を用いた光合成燃料電池を屋内の蛍光灯下に置くことで、積分放射照度0.57mW/cm²に対し、0.23mW/cm²の出力が得られたことが報告されている⁸⁾。ただし効率を論じる場合、入力として太陽光の他に燃料電池の燃料であるPSII溶液を生成する際に消費するエネルギーについても考慮すべきであるが、ここでは考慮し

ていない。これを建材として利用することで、光から電気を生み出す光合成する建築として期待されている。Photo 1に光合成建築の模型を示す。

3. 光合成燃料電池の性能実験

3.1 光合成燃料電池試験体

3.1.1 パネル形状 photo 2に試験体として製作した大型パネル（以降、パネル）を示す。パネル形状は縦500mm、横500mm、厚さ40mmで、パネル側面には縦105mm、横35mmの長方形の電極を左右4個ずつ取付けた。パネル1枚により発電できる有効な電極面積は72cm²である。

3.1.2 電極 電解質には厚さ100μm程度のキチン膜を吸引濾過法により製膜して使用した。電極部には、カーボンシートに白金カーボン塗料を塗布し、キチン電解質膜と接合し、溶液と空気に触れる集電板にはステンレスメッシュと導電性スポンジを利用した。

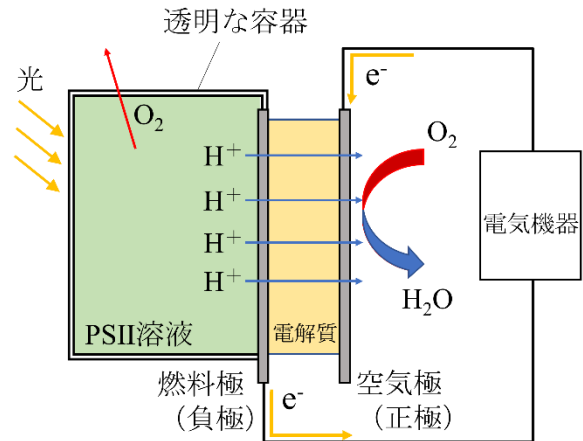


Fig. 1 光合成燃料電池の原理
Mechanism of Photosynthetic Fuel Cell



Photo 1 光合成建築の模型⁵⁾
An Image of Photosynthetic Architecture

3.1.3 PSII溶液 溶液は植物の葉（ホウレンソウ）から抽出したPSIIと界面活性剤により作成する。パネル1枚に対して、37kgの植物の葉を使った7.2Lの破碎液と300mLの界面活性剤から7.5Lの溶液を作成した。これを希釈なしの溶液として、葉の量を調整することで、濃度の異なる溶液を作成した。界面活性剤については、ポリソルベートまたはTriton X-100の2種類を用い、性能の違いを評価した。

3.2 実験方法

3.2.1 実験条件 本実験では光合成燃料電池の大型パネルを5枚作成し、うち4枚(以降パネルA~D)を屋外に、1枚を屋内に設置し、Table 1に示すような実験条件により計測を実施した。Photo 3に実験状況を示す。実験は約2か月間を1サイクルとし、PSII溶液の濃度及び界面活性剤の種類を変えて5サイクル実施し、各サイクルの開回路電圧

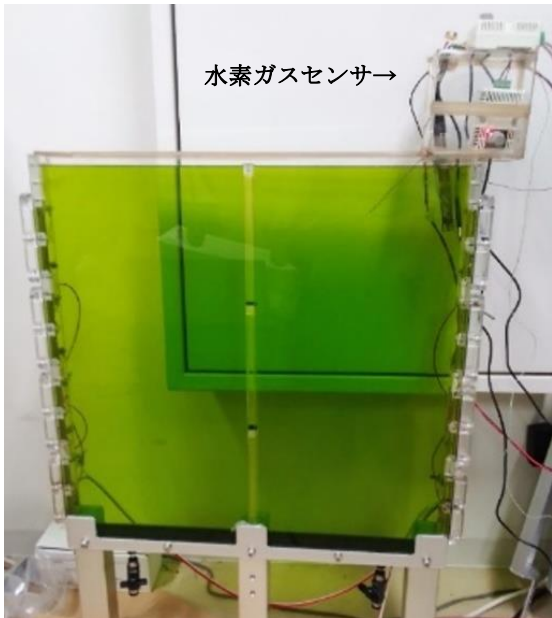


Photo 2 光合成燃料電池パネル
Photosynthetic Fuel Cell Panels

及び出力の経時変化を測定した。溶液はサイクルごとに作成し、入れ替えて実験を行った。

3.2.2 パネル設置・計測システム 南向きと東向きのパネル2枚をL字型に配置し、2組（合計4枚）を鉛直に設置した。溶液の入れ替えは、廃液をパネル下方から排出し、パネル上方から新しい溶液を送液ポンプで注入した。各パネルには電圧計の他にフォトセルを取り付けており、南北東西方向の光量(mW/cm²)を、開回路電圧と共に10分間隔で自動計測した。南北からの光量の合計を南向きパネルの、東西からの光量の合計を東向きパネルの光照射量とした。屋内に設置したパネルでは上記に加え、水素ガスセンサにより水素発生量の増減と共に、pHを計測した。

3.3 実験結果

3.3.1 発電量 Fig. 2に10分毎に計測した界面活性剤別の開回路電圧 (2022/12/1-2023/1/29)を例示する。ポリソルベートの溶液では、40日後も0.8V程度の開回路電圧を維持しているが、一方でTriton-X-100の溶液では、10日以降、0.4V程度に低下する結果となり、開回路電圧及び出力の維持という観点からポリソルベートがより適し

Table 1 実験内容
Cases of Outdoor Experiments

試験期間	屋外南向き		屋外東向き		屋内	備考
	A	C	B	D		
2022/5/26~ 2022/7/27	Pol 10	Tri 10	Pol 10	Tri 10	Tri 10	
2022/7/28~ 2022/9/26	Pol 60	Tri 60	Pol 60	Tri 60	Tri 60	
2022/9/27~ 2022/11/30	Pol 40	Tri 40	Pol 40	Tri 40	Tri 40	Photo 4, Photo 5に結果を記載
2022/12/1~ 2023/1/29	Pol 20	Tri 20	Pol 20	Tri 20	Tri 20	Fig. 2, Fig. 5に結果を記載
2023/1/30~ 2023/4/11	Pol 35	Pol 25	Pol 15	Pol 5	Tri 35	Fig. 3, Fig. 4に結果を記載
2023/4/12~ 2023/8/29	Pol 35	Pol 35	Pol 35	Pol 35	Pol 35	

注：上段に界面活性剤の種類別、下段に希釈濃度（倍）を記載。なお、ポリソルベートをPol、Triton X-100をTriと表記

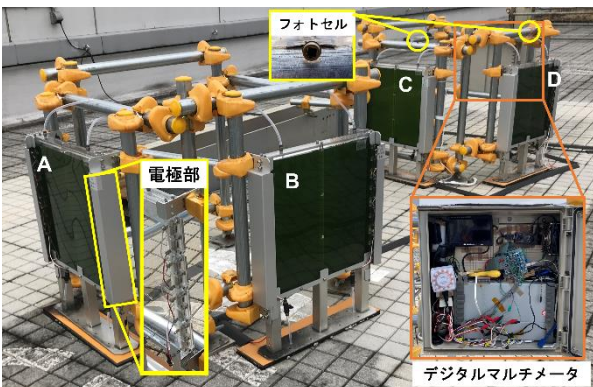


Photo 3 実験状況
Experiment Situation

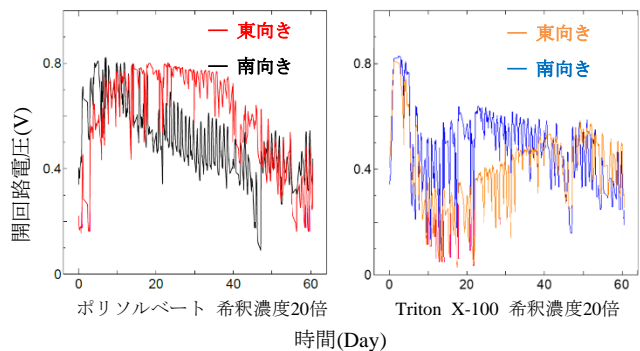


Fig. 2 界面活性剤別の開回路電圧の経時変化
Power Generation for Different Surfactant

ていることが明らかとなった。またこの期間の積算光量については、南向きパネルで62.0kJ/cm²、東向きパネルで46.0kJ/cm²であった。ポリソルベート側では光量の少なかった東向きパネルの方が開回路電圧を維持しているが、Triton X-100では逆の結果となった。全期間を通していても同様な結果となっており、積算光量の差異と開回路電圧の経時変化については一貫性がなく、相関が見られなかった。

ポリソルベートの濃度による電圧、出力の差を確認するため、各パネルで濃度を変えた。Fig. 3にパネルA, B, C, DのPSII溶液の希釈濃度別の開回路電圧の経時変化、光量と開回路電圧の経時変化(2023/1/30-2023/4/11)を例示する。開回路電圧の値は、概ね日照に応じた光量の変化とともに増減するが、PSII濃度の違いによって、期間中の経時変化が異なる。濃い溶液（希釈濃度5倍、15倍）

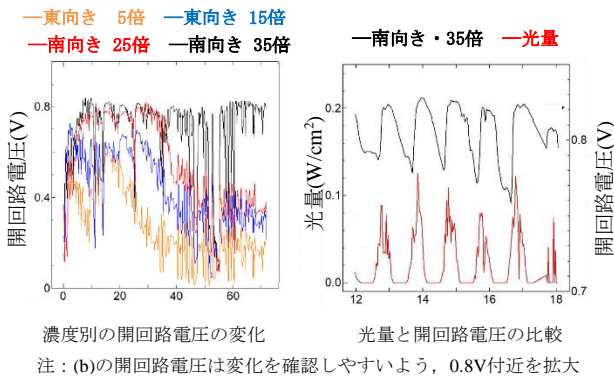


Fig. 3 開回路電圧の経時変化 (ポリソルベート)
Time Series of Open-Circuit Electric Potential for Four Different Solutions by Their Concentration

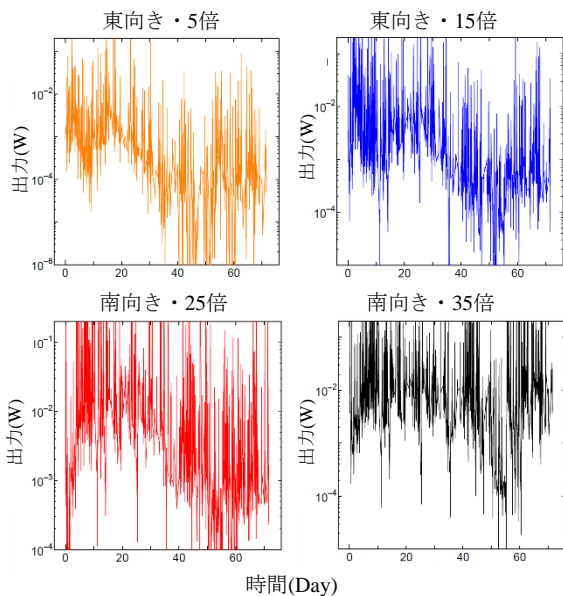


Fig. 4 希釈濃度別の出力の経時変化 (ポリソルベート)
Dependences of Power Generation on Degree of Dilution of Surfactant Containing Solution

の場合には、2日後と20日後付近で開回路電圧のピークを持つが、薄い溶液（希釈濃度35倍）では、注入後10日後に最大値に達し、その後約2か月間に亘って最大値を維持した。

Fig. 4はパネルA, B, C, Dの出力の経時変化(2022/1/30-2023/4/11)を示している。図中で示されている出力については、logスケールでプロットしたものである。なお、Fig. 4の(a)~(d)の縦軸については最低値に合わせてスケールを調整している。希釈濃度25倍、35倍では、10日以降では10mW~20mWの出力が得られることがわかる。一方で希釈濃度35倍以外のパネルでは、液注入後数日は高い出力が得られるものの、20日以降では時間経過とともに出力が低下する傾向にあることがわかる。なお、2か月間の積算光量については、南向きパネルで44.9kJ/cm²、東向きパネルで52.5kJ/cm²であった。本期間の全ての希釈濃度のPSII溶液（5倍~60倍）から発電は確認された。また希釈濃度と界面活性剤の種類により開回路電圧、電力の経時変化に大きな違いが観測された。以上から、発電面で最適な界面活性剤の種類とPSII溶液の希釈濃度に対する知見が得られた。

3.3.2 pHと水素発生量 Fig. 5に屋内に設置したパネル溶液の水素発生量とpHの経時変化(2022/12/1-2023/1/29)を示す。水素発生量は約10日上昇後、低下し、その後遅れて開回路電圧は減少し、pHが低下する結果が得られた。pHは光照射量に準じて変動しており、光合成により発生した水素イオンの濃度を表している。開回路電圧は

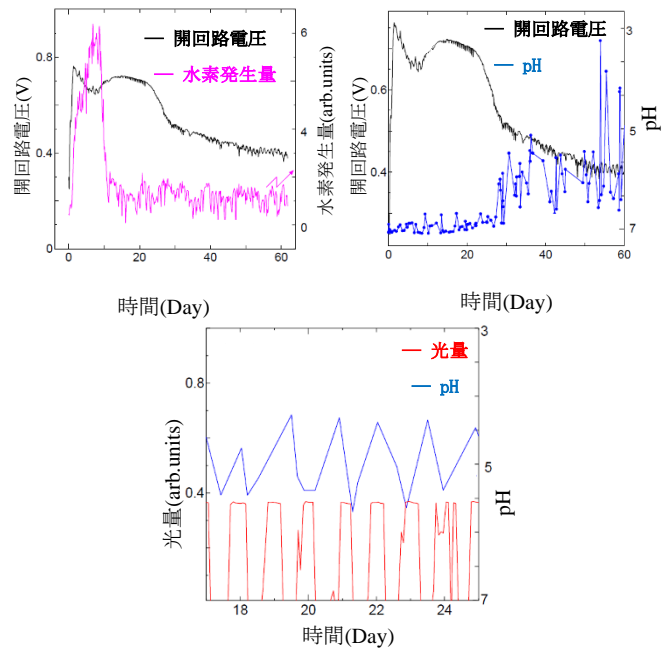


Fig. 5 水素発生量とpHの経時変化
溶液はTriton X-100にて20倍に希釈
Variations with Days of Hydrogen Production and pH of Solution

20日辺りを境に急速に減少しており、それと同時にpHは低下していることを考慮すると、光合成で生成された水素イオンが発電に利用されず、溶液中に残存していると推察される。

3.3.3 光量と色変化 Photo 4,5に色変化の過程を示す。当初緑色であった溶液は、徐々に黄色へ変化する。その後、ポリソルベートを用いた溶液では白濁し、Triton X-100を用いた溶液では透明になった。初期の段階からTriton X-100はポリソルベートに比べ、透明度は高い。色変化はPSII溶液の濃度と光量に依存しており、濃度の薄い溶液ほど、また光量が多いほど褪色しやすいことが分かった。実際に10倍に希釈した溶液では2か月後も色が残ったが、60倍に希釈した溶液は3日で透明になった。透明になる現象については、光によってクロロフィル中のマグネシウムの脱離が促進され、フェオフィチンへ変化したことに起因すると考えられる。フェオフィチンもクロロフィルに近い光の吸収スペクトルを持つことが一般的に知られており、クロロフィルの場合と同様に水素イオンの生成は行われ、透明になっても継続して発電される。実際にFig.3に示した希釈濃度35倍のPSII溶液も、40日後には透明になっていたが発電は確認されている。

4. 建築への適用性

4.1 建築への適用による効果

Fig. 6には光合成燃料電池パネルの都市設備として想定される利用例を示している。光合成燃料電池パネルは建築のエレメントそのものとして機能が期待されている。透過性の素材を用いることから、光が差し込むと緑色の影を落とし、デザイン性の高い空間を創出できるという

特徴を持っている。また光の波長を調整することで、溶液を赤色にできることが先行研究により明らかになっており、建築エレメントとして高い汎用性を兼ね備えている⁵⁾。

また適用時の効果を評価するため、ビルに搭載した場合の発電量を試算した。Fig.7に光合成燃料電池パネルを搭載したビルの例を示す。Table 2に(a)光合成建築のビル発電量の試算条件、(b)発電量試算結果を示す。この試算では、発電量の理論値として先行研究から得られた値を用いている⁸⁾。その結果、ビルに光合成燃料電池パネルを搭載することで、理論上ビル一棟当たり最大54kWの発電が見込まれ、生活で消費されるエネルギー(住宅用途を想定)の22.9%を賄うことが可能であると試算された。し

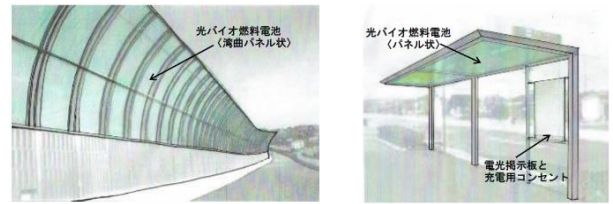


Fig. 6 光合成建築の都市設備としての利用例⁴⁾
Concepts of Application to Urban Infrastructures



Fig. 7 光合成燃料電池パネルを搭載したビルの例⁹⁾
Buildings Having Photosynthetic Facade

注入直後 0kJ/cm² 2日後 2kJ/cm² 14日後 9.9kJ/cm² 61日後 46kJ/cm²

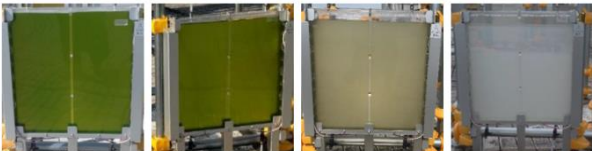


Photo 4 40倍希釈PSII溶液の色変化(ポリソルベート・南向き)
Color Changes according to Cumulative Sunshine (Polysorbate)

注入直後 0kJ/cm² 2日後 2kJ/cm² 14日後 9.9kJ/cm² 61日後 46kJ/cm²

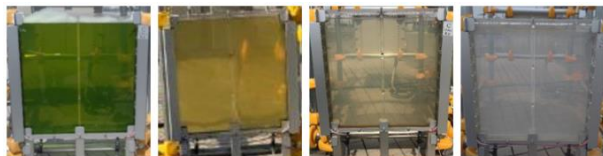


Photo 5 40倍希釈PSII溶液の色変化(Triton X-100・南向き)
Color Changes according to Cumulative Sunshine (Triton X-100)

Table 2 光合成建築のビル発電量試算条件
An Estimation of Possible Electric Supply for A Building Size Structure

(a) 想定建物

横幅 (m)	階高 (m)	階数	面数	パネルの割合	1階当たりの世帯数	液量 (m ³)
21	3	30	6	0.8	15	272.16

(b) 発電量

	出力密度 (W/m ²)	全出力 (kW)	出力/世帯 (kW/day)	賄えるエネルギー (%)
理論値	200	54.4	2.90	22.9
実測値	10.7	2.90	0.15	1.22

注：世帯毎の消費電力は総合資源エネルギー調査会省エネルギー基準部会資料参照¹⁰⁾

かし現状の出力は理論値の20分の1程度であり,出力の向上が課題である。なお,光合成燃料電池パネルには,窓に溶液を注入することで断熱効果による省エネルギーが期待されるが,試算には反映していない。

4.2 課題

4.2.1 緑色の持続性 これまでの実験により,溶液は数日から10日程度で褪色することが分かった。これは建築への適用に対しては意匠上の大きな課題となる。色の変化は,室内の試験体と比較すると太陽光からの「紫外線入射の影響」または「強い光量の影響」に起因していると考えられ,パネルに入射する紫外線をカットする,または光量を減らすことにより,緑色の持続性を高められる可能性がある。緑色の保持は,クロロフィルの保持と同義であり,クロロフィルが水分解に作用していることを考慮すると,出力の長期持続にも効果的であると考えられる。従って入射光の光量と波長帯を制限することで,長期にわたる緑の空間の実現と出力の長期持続が期待できる。

4.2.2 高出力化 実験では初期にPS II 溶液中に水素が発生することや,開回路電圧の減少とともに水素イオンが増加する結果が得られた。これは光合成により生成した水素イオンが,電極部や電解質がボトルネックとなり十分に発電に使われていないことが推察される。パネルの容量に合わせて電極部の面積を増やすこと,プロトン伝達能の高い電解質を使用することで高出力化が期待できる。

5. まとめ

光合成燃料電池を大型化したパネルを試作して,屋外及び屋内で発電実験を実施した。PSII溶液の濃度,触媒の種類,日照量,pHなどのパラメータから発電量を評価した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 使用する界面活性剤の比較については,PSII溶液の透明度はTriton X-100を使用した溶液の方がポリソルベートを使用した溶液より高い。一方,出力の安定性からは,ポリソルベートのほうが発電性能は高い。
- 2) 溶液の希釈濃度全て(5倍~60倍希釈)において,電力を得ることは可能であった。最大出力は希釈濃度が高い溶液(35倍,40倍)ほど大きくなる。一方で希釈濃度の低い溶液(5倍,10倍)は発電性能の低下が起こりやすい。
- 3) 溶液色は緑色から黄色,その後Triton X-100は透明へ,ポリソルベートは白濁する。変化の速度は,低濃度の溶液ほど速く,また日照量が多いほど速い。「緑色の空間」と「エネルギー生成」の特長を建築へ適用するためには,緑色の持続性,及びさらなる高出力化が課題となる。今後もこれらの課題解決に向けた検討を進める。

謝辞

本研究の実施にあたり,八洲電機株式会社の千田様,秋山様より共同研究の開始時から多くのご協力を頂きました。また,ケミックス株式会社佐藤様には試験体の作製において多大なご尽力を頂きました。本論文のPSII溶液作製およびデータ解析に当たっては,摂南大学理工学部の松尾康光教授にご協力いただきました。加えて,瀬溝人生氏,高橋佑輔氏,杉山葵氏,堤丈瑠氏ならびに生命科学科共生機能材料学研究室の多くの皆様と,俣野将磨氏,新出浩人氏を中心とした住環境デザイン学科インテリア・建築デザイン史研究室の皆様にご実験参加・協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁:令和3年度(2021年)エネルギー需給実績(確報),2022-04-21
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline1 (参照 2023-5-20)
- 2) 農林水産省:”農産物の生鮮販売や加工・業務用途における多様なニーズに対応した取り組みの可能性”,2007-03.
https://www.maff.go.jp/j/study/syoku_cost/pdf/data03_5.pdf, (参照 2023-07-13)
- 3) 川上 比奈子,松尾 康光:藻類を用いた「光合成建築」に関する考察~ 廃棄する藻類を利用した PS II バイオ燃料電池と窓の一体化~,摂南大学融合科学研究所論文集,Vol. 6, No. 1, 2020
- 4) 川上比奈子,松尾康光:「光化学系IIを利用した光バイオ燃料電池およびその利用物」(特願2019-097215)
- 5) 摂南大学,Photosynthetic architecture, ”光合成×建築”,2022-09-01.
2020<https://www.psarchit.com/>, (参照 2023-5-20)
- 6) Shen, J. R., I. Enami : Isolation of photosystem II, Low temperature science, Vol. 67 p. 275, 2009
- 7) Miyao, M. : Isolation of intact chloroplasts, thylakoids and photosystem II membranes from higher plants, Low temperature science, Vol. 67, pp. 197, 2009
- 8) 川上比奈子,松尾康光:光バイオ燃料電池と一体化する光合成建築, J. Jpn. Soc. Colour Mater, Vol. 93, No. 12, pp.393-398, 2020
- 9) 株式会社大林組:おおばや氏とぼく, ”光合成する建築”, 2022-10-14
<https://www.obayashi.co.jp/makebeyond/gallery/> (参照 2023-05-20)
- 10) 経済産業省, ”総合資源エネルギー調査会省エネルギー基準部会(第17回)(書面審議)-配付資料”,経済産業省,2012-01-05.
https://www.meti.go.jp/committee/summary/0004310/017_haifu.html (参照 2023-05-23)