

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～¹

Study on Photosynthetic Architecture Based on Algae - Integration of Window with PSII Biofuel Cells Using Algae Waste -

川上 比奈子² 摂南大学工学部住環境デザイン学科

岩橋 暁成 摂南大学大学院理工学研究科

松尾 康光 摂南大学工学部生命科学科

KAWAKAMI, Hinako Department of Living and Environmental Design,
Faculty of Science and Engineering, Setsunan University

IWAHASHI, Akinari Division of Life Science, Graduate School of Science and
Engineering, Setsunan University

MATSUO, Yasumitsu Department of Life Science,
Faculty of Science and Engineering, Setsunan University

Abstract

As well known, the realization of a zero-waste society is strongly desired. Especially, the architecture elements provided the energy-neutral living environment are also necessary. In the energy generation field, new carbon-neutral renewable energy is desired. In order to solve these problems, we have focused on the algae, which is one of the most promising fuel sources in bioenergy, and created the architecture elements based on the photosynthesis of algae. In the present work, as examples, the photosynthetic screen as an interior and the photosynthetic window as the boundary between indoor and outdoor are shown. It was found that the photosynthesis screen using the photochemical system II solution (PSII solution) extracted from algae operates during 20 days at least, although the color of the PSII solution gradually changes from green to yellow (brown). On the other, the photosynthetic window was found to operate at the open-circuit voltage of 0.4V for two weeks with the slight color fading, at least. These results indicate that the “photosynthetic architecture” using the algae also becomes a future-oriented architecture element that provides an energy-neutral living environment.

キーワード: 藻類, バイオ燃料電池, 光合成, 建築, 窓, エネルギー, 酸素

Keywords : biofuel cell, photosynthesis, architecture, energy, oxygen, green, light

¹ 【原稿受付】 2020 年 11 月 13 日, 【掲載決定】 2021 年 1 月 25 日

² 【主著者連絡先】 川上 比奈子 摂南大学, 教授 e-mail: kawakami@led.setsunan.ac.jp
〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8, 摂南大学工学部 住環境デザイン学科

1. はじめに

近年、廃棄されていたものを「資源」と捉え直して循環させる「循環型社会」の実現が強く望まれている。廃棄されていたものとして、一般に、製品や原材料、ゴミがあげられるが、野菜や伐採樹木の葉、そして藻類などの植物も「資源」と捉えられる。

人間は、植物なしで生きていくことができないにもかかわらず、現代の社会活動、経済活動をめぐる様々な理由から、私たちは、多くの植物を廃棄せざるを得ない。例えば、農業・食品業界においては、規格外の野菜が廃棄され、建設業界においては、土地造成や建築建設の際、樹木を伐採せざるを得ない。林業界においても、伐採された樹木の幹は建材などに活用されるが、葉の部分は打ち捨てられる。海や河川に繁殖する藻も食品化されたり健康増進に必要な要素を抽出した後の残余は廃棄される。このように年々、膨大な量の植物が廃棄され続け、その多くは可燃ごみとして処理され、結果、環境負荷を増大させる原因になっている。

一方、エネルギー分野では、環境負荷を減少させるために多くの再生可能エネルギーに関する研究がなされており、太陽光、風力、波力・潮力、流水・潮汐、地熱、バイオマスなど、自然の力で補充されるエネルギーを、人間の活動全般にわたって利用する実例が増加し、「次世代クリーンエネルギー」として知られる燃料電池の研究も精力的に行われている^(1~3)。

我々は廃棄される植物を「資源」と捉え、その植物の光合成を利用してエネルギーと酸素を生成する建築、「光合成建築」の研究に取り組み、2017年から国内外の展示会や各種メディアにおいて提案を発表してきた^(4~13)。「光合成建築」とは、廃棄される野菜や伐採樹木の葉を活用した光バイオ燃料電池を建築エレメントに一体化したもので(図1,2)、「循環型社会」と「次世代クリーンエネルギー」の両方の実現を目指す試みである。その目的は、太陽光パネルのように大きなエネルギーを生むことにはなく、いずれ廃棄せざるを得ない植物なのであれば、それらからたとえ微量であってもエネルギーと酸素を生むこと、いわば小さなエネルギーの生成と自然への酸素の還元によって環境負荷の減少に寄与することを目的としている。



図1 光合成建築：森の別荘」案
イノベーションジャパン 2018 出展

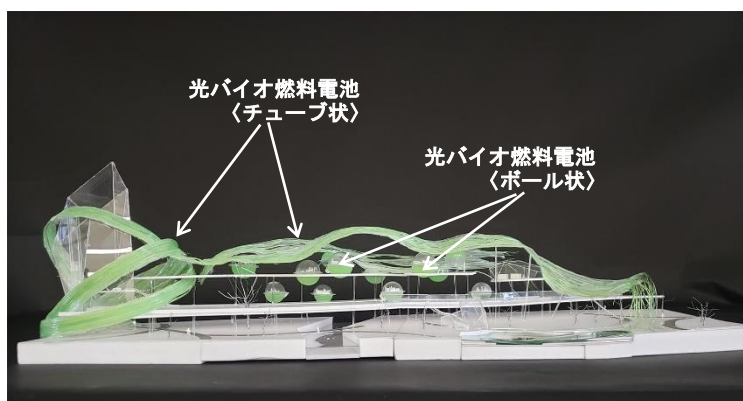


図2 「光合成建築：未来の駅」案
日中大学フェア（日本技術展）2019 出展

これまでに、光合成と建築を組み合わせさせた研究は、太陽光パネルを樹木のように組み立てたもの⁽¹⁴⁾や藻類の光合成によって酸素を生成させるプロダクト⁽¹⁵⁾、微細藻類の光合成をメタンに変換して熱エネルギーを生成させる建築⁽¹⁶⁾などの提案があるが、我々のように植物の光合成を活用した燃料電池を建築と一体化し、エネルギーと酸素の両方を生成させる研究はまだなされていない。

「光合成建築」の特長の一つは、燃料電池が建築のエレメントそのものとして機能することである。一般に建築に関わるエネルギーのほとんどは建物に付加される。あるいは、建物とは分離または独立した状態で

機能する。例えば、太陽光発電パネルは、一般に、屋根に付属的に取り付けられるか、あるいは建物屋上や広い土地や海上に独立して設置される。また、風力、潮力、重水・潮汐などによる再生エネルギー施設は、人間の住環境から完全に切り離された建造物として建てられる。これらに対して、我々の研究は、窓、壁、屋根など、人間の生活や社会・経済活動のために建設せざるを得ない建築の構成要素を光バイオ燃料電池に置きかえ、無理なくエネルギーと酸素を創り出そうとするものである。また、植物の光合成のために透過性のある素材を採用することから、各エレメントは光を通すことができ、デザイン次第で緑色の光に彩られた美しい空間を創出できるという特長も備えている。

ごく最近、我々は建築エレメントへの展開を目指した実証実験として、屋内の屏風や間仕切りとして機能し、かつ、エネルギーと酸素を生成できる「光合成スクリーン」(約 1600mm×1580mm)を実作した⁽¹⁷⁾。図 3 は高等植物の葉緑体から光化学系II複合体 (PSII) を抽出して作成した「光合成スクリーン」の一例である。この「光合成スクリーン」の基本単位となる「光合成パネル」は、透明なアクリル板 (A4 サイズ: 300mm×212mm, 厚み約 3mm) 2 枚とこれに組み込まれた自然由来 (うろこ) を電解質とした電極で構成されている。このアクリル板 2 枚の間に PSII 溶液が注入されて燃料電池として機能する。図 3 の「光合成スクリーン」は、44 組の「光合成パネル」すなわち光バイオ燃料電池を、背面の 10 本のアクリル製支柱により自立させ、かつ、各パネルが回転できるようにしたものであり、大きな時計を稼働できる程度のエネルギーと酸素を生み出すことに成功したものである。

このスクリーンの形状は約 100 年前、フランスで活躍した建築家・家具デザイナー、アイリーン・グレイによる漆塗り屏風「ブリックスクリン」のデザインに着想を得た^(18,19)。グレイは通常

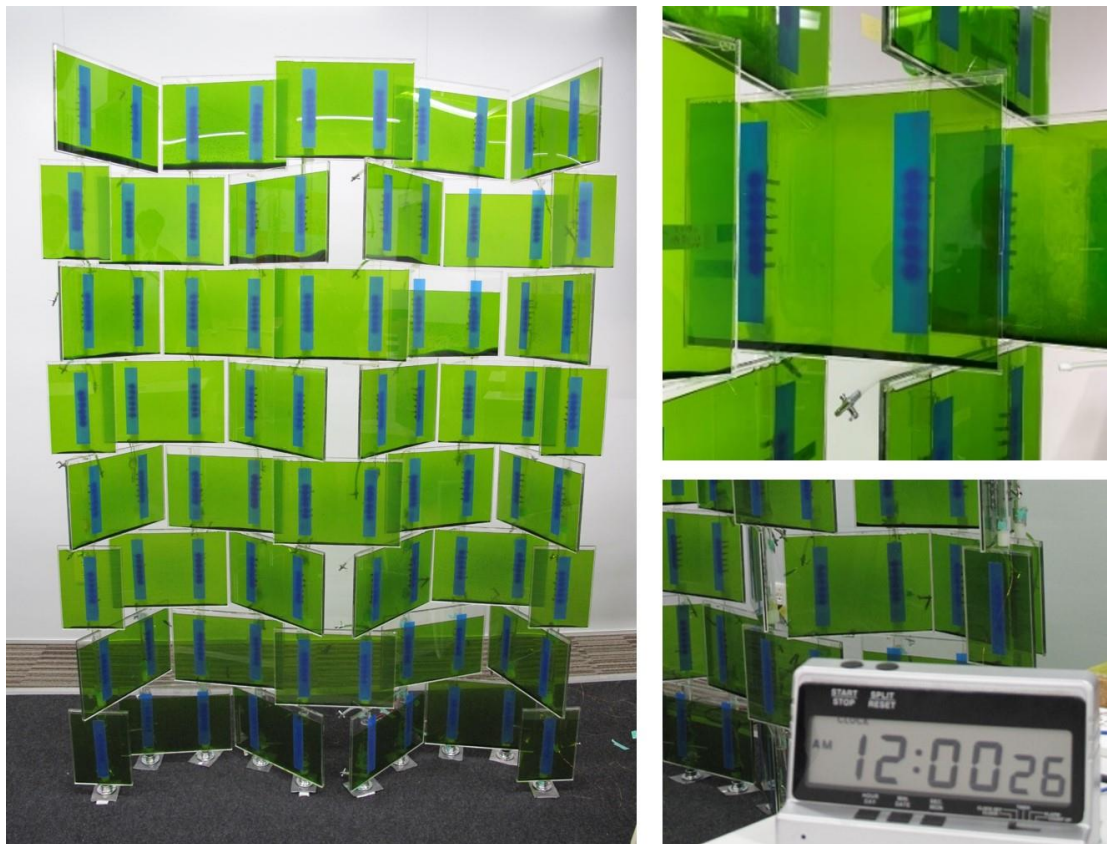


図 3 高等植物の PSII 溶液を利用した「光合成スクリーン」

の屏風の一部を複数に分解し回転させることで、各パネルの漆塗りの光沢によって光と実像を映し合い、かつ回転によってもたらされた空隙から裏側の領域の光景を視覚効果に取り込み、結果、住空間の在りようを一変させた。我々は、漆塗りによる光沢の替りに、植物本来のグリーン色により、折曲げ角度や見る角度によってパネルどうしの色が重なり合い、複雑なグラデーションを生み出し、かつ酸素を発生させ、時計やLEDなどの家庭用電化製品の電力を賄えるように発展させた。植物の種類や濃度によってPSII溶液の色は多様であり、時間の経過によって変化するため、生活や行動のシーンに合わせて様々な使用法、楽しみ方がある。

この光バイオ燃料電池とインテリアエレメントが一体化された「光合成スクリーン」をもし、大きさを拡大して窓や壁や屋根に展開すれば、建築そのものが燃料電池となり、かつ、美しい緑の空間を内外に実現することができる。2017年当初、光バイオ燃料電池を建築のエレメントに融合させることで、エネルギーと酸素を生み植物本来の緑色を活かした建築空間を創出できるのではないかとした仮定の一部を実証できたわけである。

この試みに成功した後、我々はPSII溶液に利用した高等植物を藻類に替えて実証実験を行った。よく知られているように、藻類は食料とも競合しないバイオマスであり、次世代エネルギーにとって極めて有望な原料と考えられている。そのため、藻類バイオマスのエネルギーへの変換・利用方法についても、新しい概念と方法が探られている。その例として、前述の微細藻類の光合成によってメタンガスに変換し、熱エネルギーを生成させるといった建築はあるが、酸素は生成されず、外壁に独立して装置が取り付けられているため、内部空間とは関係がない。また、藻類を取り込んだビニールを建築の外壁に取り付けて光合成させ、酸素を発生させたり、育てた藻を食物にするという試み⁽¹⁵⁾も提案されているが、やはり建築に付加したものでありエネルギーは生成しない。ましてや我々が目標とする藻類の光合成メカニズムを直接利用した燃料電池そのものを建材として活用し、エネルギーと酸素、そして緑色光による美しい空間の3つを同時に創出できる建築やプロダクトを提案する研究は、まだ発想されてもいない。

本論文では、エネルギー、酸素、緑の空間を同時に実現する「光合成建築」への展開のうち、廃棄される藻類を原料としたPSII溶液を初めて作成し、「光合成スクリーン」への実施例、および屋外との境界となる建築エレメント、窓への展開を想定した実証実験とその結果について示す。

2. PSII溶液の水素発生原理と溶液の調製

「光合成建築」において、酸素の放出とエネルギーを生む水素イオンの生成は葉緑体内に存在する光化学系II (PSII) 溶液内で行われる。ここでは、光合成建築へ埋め込む光バイオ燃料電池の燃料となるPSII溶液の水素発生原理と溶液の調製について示す。

2.1. PSII溶液の水素発生原理

よく知られているように、光合成は、光エネルギーを利用し、水と二酸化炭素から糖を合成する反応である。この光合成において中心的役割を果たしているのが葉緑体内のチラコイド膜であり、この膜上には光の吸収、電子とプロトンの移動、水分解反応などに関する光化学系I (PSI) や光化学系II (PSII) などの膜タンパク質複合体が存在することが知られている⁽²⁰⁻²²⁾。図4に、光合成の中心的役割であるチラコイド膜の模式図を示す。図4に示すように、光照射によりPSIIで水分解反応が起こり、水素イオンと酸素と電子が生成され、一般に、生成された電子はシトクロム b6-f 複合体に渡され、PSIでのニコチンアミドアデニンジヌクレオチドリン酸 (NADPH) の反応に使用さ

れる。また、生成された水素イオンは通常、アデノシン三リン酸（ATP）に渡される。PSIIの水分子の脱プロトン化は、マンガン（Mn）クラスターで行われることも知られている⁽²³⁻²⁵⁾。

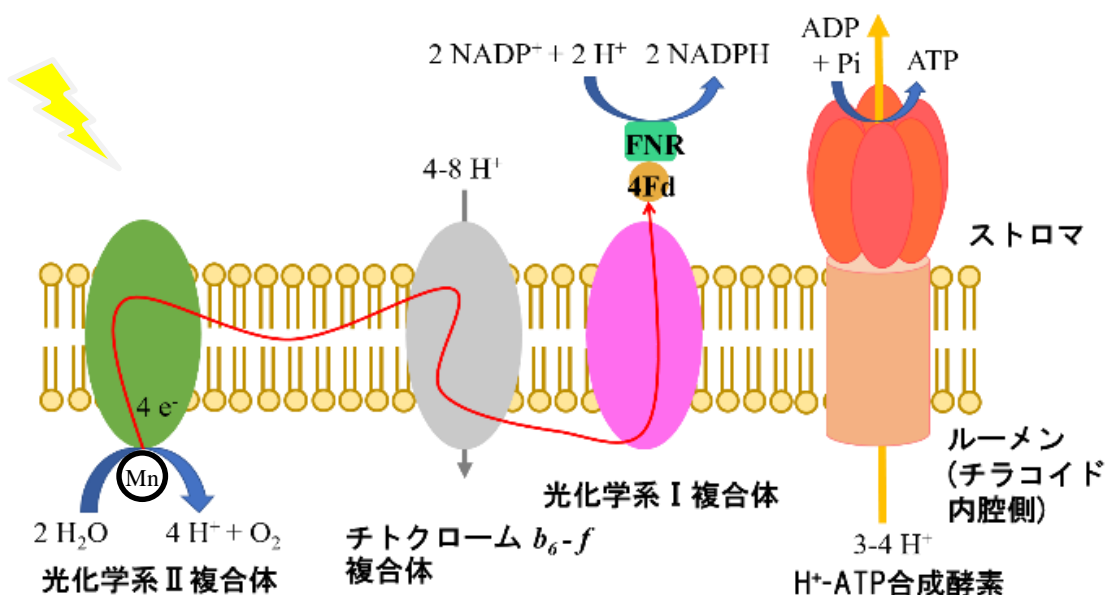


図4 チラコイド膜の模式図

Mn クラスターは歪んだ椅子型構造を持ち、水分子の結合を歪ませ、結果として、水分子の脱プロトン化が光エネルギーにより実現できる。このPSIIの特徴を考慮すると、Mn クラスターを壊すことなくPSIIを抽出することにより水素イオンを生成することができると考えられる。Miyao, ShenそしてEnamiらは、非イオン性界面活性剤を使用したPSIIの抽出を報告しており^(26,27)、界面活性剤を利用することにより、PSIIをチラコイド膜から分離することが可能である。本研究では界面活性剤を用いてこの生体膜を可溶化し、PSIIをチラコイド膜から分離した後、建築エレメントへ導入する。これにより、PSII溶液は光照射による水分解反応により酸素は空气中へ還されるとともに、水素イオンと電子は光バイオ燃料電池を稼働させ、光合成建築によるエネルギー生成が実現される。

2.2. PSII溶液の調製

PSII溶液は、藻類廃材（株式会社富士エス・エル・アイより提供）を用いて抽出した。PSII溶液の抽出は、藻類粉末13gをpH7.0のリン酸緩衝液50mLで懸濁・攪拌した後、20 W/V%の非イオン性界面活性剤（Triton x-100：Nacalai tesque Inc.）を95mL加えてさらに攪拌してチラコイド膜を溶解することにより作成した。図5は一例としてさまざまな濃度のPSII溶液を示している。図5に示されるように、pH7.0のリン酸緩衝液で希釈することにより、濃い緑色から透明度の高い黄緑色といったさまざまな色彩・透

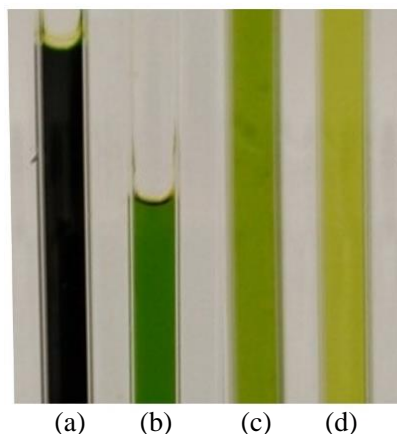


図5 抽出されたPSII溶液
(a)希釈なし, (b)5倍希釈,
(c)10倍希釈, (d)20倍希釈

明度の緑色の溶液を得ることができる。得られた PSII 溶液は光バイオ燃料電池のアノードに導入し、これを燃料として使用する。

3. PSII 光バイオ燃料電池

PSII 溶液により生成される水素は、効率よくエネルギーへ変換されることが望まれる。水素を効率よくエネルギーに変化する方法として、燃料電池を利用する方法が知られている。燃料電池では、水素と酸素から水が生成されるときに得られるエネルギーを取り出す。したがって、PSII 溶液から得られた水素を直接燃料電池に供給することができれば、光合成の過程により生成された水素からエネルギーを得ることができる。ここでは、本研究で用いた光バイオ燃料電池の構成について示す。

3.1. コラーゲン燃料電池電解質

本研究で用いた燃料電池は、電解質、燃料ともにバイオマテリアルから成る。使用した電解質は、コラーゲン膜（ティラピアの脱灰鱗：新田ゼラチン(株)）である。コラーゲン膜は半透明膜であり、157°C まで軟化することなく、燃料電池として使用する温度において優れた熱安定性を有することがすでに知られている⁽²⁸⁾。燃料電池の電解質として使用したコラーゲン膜の厚さは、約 135 μm である。コラーゲン電解質の加湿下におけるプロトン伝導性は、コラーゲンペプチドの側鎖の OH、CO および NH 基の間に形成された水架橋を介したプロトン（または H₃O⁺）の移動によって引き起こされることがわかっており、その直流プロトン伝導度は約 1×10⁻³ S/m である⁽²⁹⁾。このプロトン伝導度は Nafion™ などのイオン交換膜に比べると小さいが、PSII で生成される単位時間当たりの水素生成量もさほど多くないため、コラーゲン電解質は PSII 光バイオ燃料電池の電解質として非常によくマッチしている。

3.2. PSII 光バイオ燃料電池の構成

図 6 は光バイオ燃料電池の概略図を示している。図 6 に示されるように、光バイオ燃料電池は、PSII 溶液、コラーゲン電解質（うろこ）、およびステンレスメッシュプレートと Pt-C 触媒から成る電極（燃料極・空気極）で構成されている。燃料電池からエネルギーを得るには、水素イオンと酸素をそれぞれ燃料極と空気極に供給する必要がある。一般的には、水素ガスと酸素ガスが燃料電池の燃料として使用される。本研究では、酸素ガスは空気中から直接導入し、水素イオンは、PSII 溶液をプロトンソースとして燃料極に直接導入する。そのため、PSII 溶液が導入される透明な容器には、直径 5mm の穴をあけ、バイオ燃料電池を取り付け、PSII 溶液と燃料極・電解質が接触するよう作成されている。これにより、燃料極とコラーゲン電解質が PSII 溶液と接触し、水素イオンと燃料極と電解質の三相界面が形成される構造になっている。PSII 溶液の漏れを防ぐために、透明なシーリング材を使用し、バイオ燃料電池は透明容器に取り付けられている。また、図 6 に示されるバイオ燃料電池の電解質と電極部分は、コラーゲン電解質を直

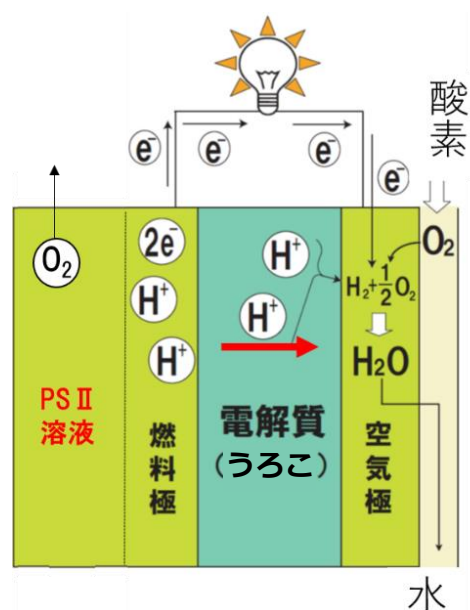


図 6 PS II バイオ燃料電池の構造 (模式図)

径 4.5mmφ の Pt-C シートからなるアノードとカソードで挟み、さらにステンレスメッシュプレートにより電子を集電する構造になっている。光が PSII 溶液に入射されると、PSII 溶液で水素イオンが生成され、水素イオンはコラーゲン電解質を通過するとともに、生成された電子は、図 6 に示す外部回路で仕事をして空気極に到着する。空気極では、外部回路を通った電子と電解質を通った水素イオンと空気中の酸素が反応して水が生成され、この過程において燃料電池からエネルギーを得ることができる。図 7 は、光バイオ燃料電池が、蛍光灯下において実際に発電している様子を示している。一個あたり約 20mL の PSII 溶液が注入された一辺 3cm のキューブ 3 個で構成された光バイオ燃料電池により、赤色 LED ランプを点灯できることがわかった。この結果は、光バイオ燃料電池が外部から水素ガスを導入することなく、PSII 溶液への光照射により生成される水素イオンを燃料とする新しいエネルギー源になることを示している。

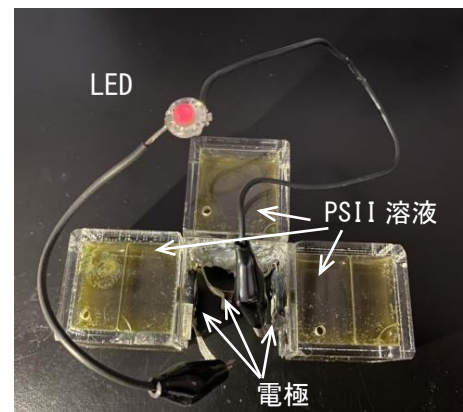


図 7 PSII 光バイオ燃料電池による LED の点灯

4. 「街の住宅：窓への適用」の構想例

「光合成パネル」の建築エレメントへの実証的な展開として、最も無理なく適用できるのは、窓である。窓は一般的な建物にとって必要不可欠な構成要素であり、かつ、太陽光を建築内に取り入れる機能が求められるため、そもそもガラスなどの透過素材が使用されるからである。例えば、図 8 に示した「街の住宅」案は、住宅のリノベーションにおいて、窓部分だけを「光合成パネル」にとり替えると仮定した場合の構想例である⁽³⁰⁾。たとえ緑地の少ない都市部の住宅にあっても、「光合成パネル」の窓を通して緑色光が室内に入りこみ、あたかも自然に囲まれたような落ち着いた雰囲気の中で暮らすことができるだろう。また、天窓に適用すれば、天井から降り注ぐ緑の光によって、木漏れ日の中で過ごすような住空間を演出できるかもしれない。

以下では、まず、藻類廃材を「光合成スクリーン」の燃料へ適用した実証実験を示し、次に、建築エレメントのうち窓へ適用した「光合成窓」の実証について述べる。



図 8 住宅建築と一体化する「光合成パネル」の水平窓と天窓から降り注ぐグリーン光

5. 藻類廃材を利用した「光合成建築」

5.1 「光合成スクリーン」

第1章で述べたように、ごく最近、我々は建築エレメントへの展開を目指した実証実験として、間仕切りや壁として機能する「光合成スクリーン」を高等植物から抽出したPSII溶液を用いて製作した。ここでは藻類廃材を利用して、PSII溶液を抽出し、「光合成スクリーン」への可能性について調べた。基本要素となる「光合成パネル」は、図3の「光合成スクリーン」と同様に、透明なアクリル板（A4サイズ、厚み約3mm）2枚と光バイオ燃料電池で構成されており、アクリル板2枚の間にPSII溶液を注入し、溶液が漏れないよう処理しつつ、パネル上部に酸素を空气中に排出する

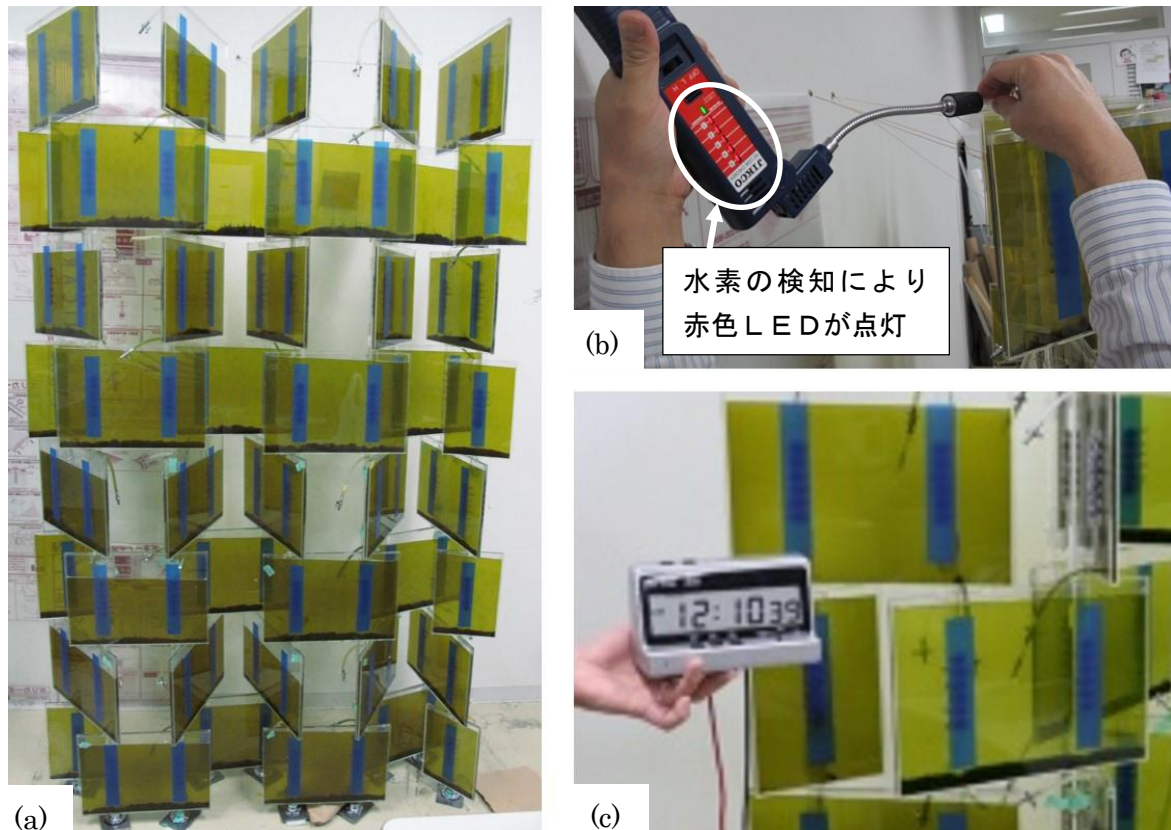


図9 藻類廃材を利用した光合成スクリーン

ための穴を設けている。図9(a)のように、「光合成スクリーン」は44組の「光合成パネル」と10本のアクリル製支柱から成る。図9(b)は藻類廃材を利用した光合成パネル（1枚）の水素発生を水素センサーで確認している様子を示している。水素センサー（JHC-HY, Ichinen Jikco Co., LTD.）は半導体式水素センサーであり、水素の吸引により、水素センサーのフロントの赤いLEDランプが点灯し、20ppmの水素吸引でLEDランプは全灯する。図9(b)に示されるように、フロントのLEDランプはすべて点灯し、少なくとも20ppm以上の水素ガスが光合成パネルより発生していることを示唆している。この結果は、藻類廃材を利用した光合成パネルでも、光照射にともない水分解反応を実現し、水素が得られることを示唆している。また、図9(c)に示されるように、光合成パネルから得られた電力により、大きな時計を稼働できることがわかる。この結果は、高等植物だけでなく、藻類廃材を利用して、酸素とエネルギーを生成する「光合成スクリーン」の実作に成功した

ことを示している。図 10 は藻類廃材を利用した光合成パネルの経時変化を示している。図 10 のように、注入時に緑色の PSII 溶液は、10 日経過すると枯葉のような黄色・黄土色に変化し、時間による自然の移ろいも感じることができる。さらに、20 日経過すると、図 10(c) のように黄色が少し濃くなるが、図 10(d) に示されるように、時計は稼働していることがわかる。このように、光バイオ燃料電池を建築エレメントへ融合させることにより、少なくとも 20 日間は酸素とエネルギーを生みつつ、植物本来の色付きを体験できる建築空間を創出できる。また緑色のパネルと黄色のパネルを混合することにより、色づく秋の森にも似た空間の演出が可能になる。

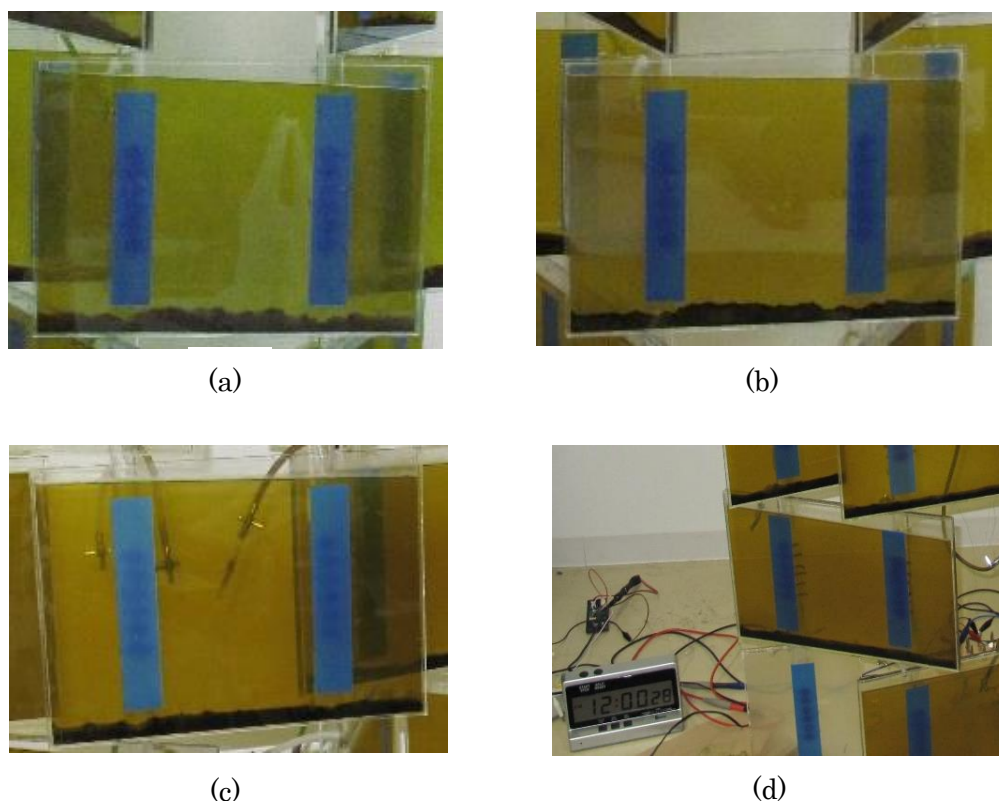


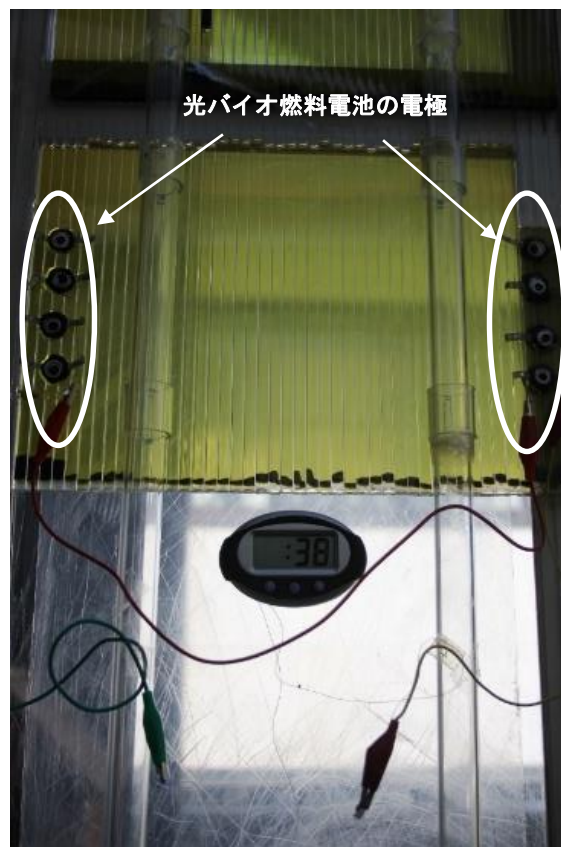
図 10 藻類廃材を利用した光合成スクリーンの経時変化 (a) 1 日後, (b) 10 日後
(c) 20 日後, (d) 20 日後の発電の様子

5.2. 光合成パネルの窓への適用

前節では、藻類廃材を利用した建築エレメントへの実証実験として、間仕切りや壁として機能する「光合成スクリーン」(図 10) の実作を示した。これは屋内の蛍光灯下で稼働するスクリーンを想定したものであり、藻類を利用した建築エレメントとしては初めての試みである。ここでは、第 4 章で示した窓への適用の構想例をもとに、屋外への展開を目指し、「窓」へ適応した初めての実証例を示す。「光合成窓」は、A4 サイズの 1 cm の縦スリットをもつ厚み約 6mm の透明なポリカーボネート中空板からなる。中空板の底は透明なポリカーボネート用の接着剤でシーリングされ、PSII 溶液が漏れないように処理されている。また、パネル上部は閉じず、酸素が空气中に還るように設計されている。図 11 は一例として 4 枚のポリカーボネート中空板からなる「光合成窓」の実作を示している。4 枚のパネルを並べ、一番下のパネルにのみ、両端にそれぞれ



(a)



(b)

図 11 藻類廃材を用いた光合成パネルの窓への適用

れ4つの電極を取り付けている。これらのパネルは透明なアクリルパイプの支柱を用いてつながられ、窓枠に取り付けられている。ここで、図 11 の PSII 溶液は、廃棄される藻類廃材を用いて作成している。図 11(a) のように、藻類廃材から抽出した PSII 溶液は太陽光下においても透明度の高い綺麗な黄緑色の溶液となる。また、光合成窓を通して黄緑色光は室内をあたかも自然の緑を集約した落ち着いた空間を実現できる。図 11(b) は、この光合成窓の発電の様子を示している。このように、光合成窓の両端に埋め込まれた光バイオ燃料電池により、時計が動作していることがわかる。このように、光合成パネルを屋外の窓に適用しても、発電可能であることがわかる。次に、この光合成窓に適用した光バイオ燃料電池（単セル）の2日目の発電特性を調べた結果を図 12 に示す。図 12 に示されるように、藻類廃材より抽出した PSII 溶液の光バイオ燃料電

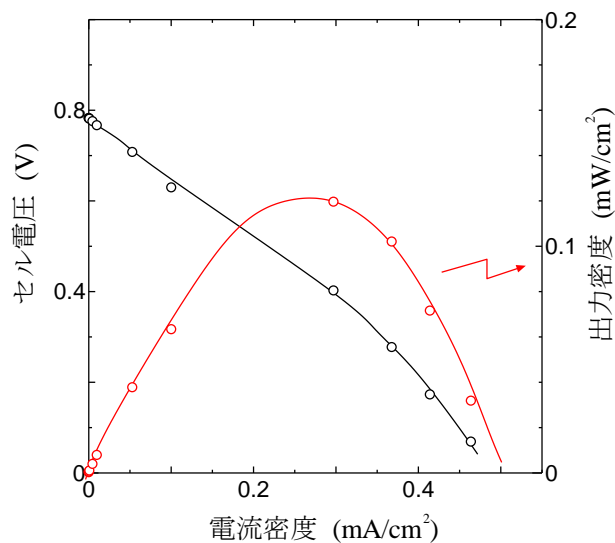


図 12 光バイオ燃料電池の電流密度とセル電圧の関係

池におけるセル電圧は電流密度の増加に伴い、ほぼ直線的に減少することがわかる。この結果は典型的な燃料電池の電流密度とセル電圧の特性を示している。さらに、この結果から求めた出力密度と電流密度との関係を、図 12 の赤丸で示す。図 12 に示されるように、光合成窓に取り付けられた光バイオ燃料電池（単セル）により得られる最大出力密度は、 0.12 mW/cm^2 となる。また、その開回路電圧は水素を燃料として得られる 0.8 V と同程度であり、本研究の光バイオ燃料電池が PSII の水素生成を燃料として稼働することを示唆している⁽¹⁷⁾。

次に、光合成窓の経時変化を光合成窓の色彩および開回路電圧から見てみる。図 13 は、4 枚の光合成パネルで構成される光合成窓の経時変化を示している。ここで PSII 溶液は、藻類粉末 13 g をリン酸緩衝液 50 mL に溶かした液体に、 $20 \text{ W/V}\%$ の非イオン性界面活性剤を 95 mL 加え、さらに 1 L のリン酸緩衝液で希釈した 1.2 L の溶液から抽出し、パネルに注入した。図 13 の一番下のパネルには抽出した PSII 溶液の最上層の溶液（上清画分）を注入、上から二番目のパネルには上清から 2 番目の画分を注入、一番上のパネルには 3 番目の画分を注入し、上から三番目のパネルには最下層の溶液を注入している。図 13 に示されるように、最初の 6 日程度は色の変化は見られないが、徐々にその色は薄くなり、23 日程度経過すると色あせてくることがわかる。注入時に半透明の黄緑色の PSII 溶液は、2 週間経過すると時間とともに薄くなるが、光合成スクリーンにみられたような黄色への変化はほとんど見られない。これは太陽光が紫外線などの蛍光灯にはない波長の光を含んでいることに起因すると考えられるが、これを明らかにするためにはさらなる詳細な研究が必要である。また、色の変化は各パネルで少し異なることに気づく。パネルに注入した PSII 溶液は、上記のとおり、さまざまな画分の溶液が注入されており、最上清画分である上から 4 番目のパネルが最も早く薄くなり、一番最下層の画分を注入した上から 3 番目の



図 13 光合成窓の外観の経時変化

パネルが37日後も比較的濃いままとなる。この結果は、色の継続する日数は抽出したPSII溶液に含まれるPSII-LHCII超複合体のような比較的重いタンパク質成分の量に強く依存すると推察される。すなわち、色が薄くなる結果は、PSII複合体（PSII-LHCII超複合体を含む）の減少を意味していると示唆される。それゆえ、この結果は、PSII溶液の最適な濃度を調整することにより、さらに長期にわたり溶液の色彩およびエネルギーを維持できる可能性も示唆している。これらの結果も新しい結果であるが、この比較的重い成分の同定と色彩との詳細な関係についてはさらなる研究で明らかになるだろう。

次に、光バイオ燃料電池の開回路電圧 (V_{ocv}) の経時変化から、光合成窓の特性を調べた結果を図14に示す。図14に示されるように、開回路電圧は日数の経過に強く依存性することがわかる。

藻類廃材を太陽光下で使用した場合には、図13に示されるように、光合成窓を設置して、1日で開回路電圧は0.8Vまで増加し、最初の2日間、約0.8Vの起電力を維持し、その後徐々に減少し、14日付近までは0.4V以上の電圧を維持することがわかる。さらに、時間の経過に伴い、開回路電圧は徐々に減少し、1か月後には0.25V程度となることがわかる。このように、本PSII燃料電池は電圧の減少は見られるが30日以上にわたり、起電力を発生できることがわかる。この結果は、PSII複合体の量が水素・起電力の発生に寄与することを考慮すると、図13に見られる光合成窓の経時変化に伴うPSII溶液の色の変化、すなわちPSII-LHCII超複合体を含むPSII複合体の減少と定性的に一致している。また、図13の開回路電圧は一日ごとに波打っているが、これは日の出とともに水素発生が起これ、夜間は発生する水素量が減少することに起因する。このように、藻類廃材を使ってPSII溶液を抽出できれば、光合成建築は環境に影響を与えることなくエネルギーを得ることができる。したがって、光合成建築は、新しい建築空間をつくる次世代の環境に優しいエネルギーの可能性を秘めている。現在、水素発生量をより増やすために、界面活性剤の種類と成分を調整している。これらの結果は次の論文で明らかになるだろう。

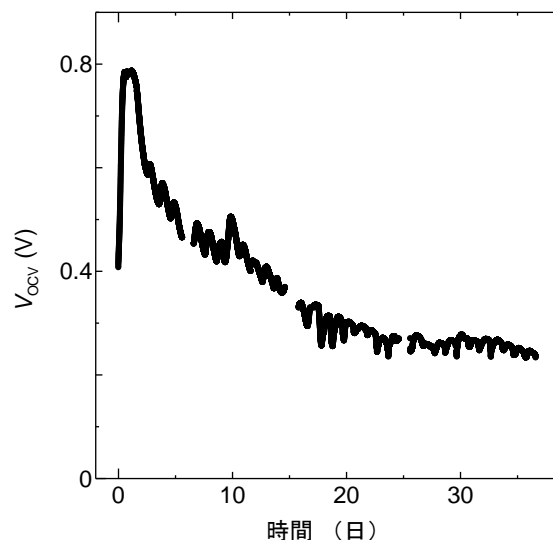


図14 光合成窓の開回路電圧の経時変化

6. まとめ

本研究では、エネルギーニュートラルの住環境の実現を目指して、藻類廃材から抽出したPSII溶液を燃料とした建築エレメントを実作し、その特性について調べた。特に、本研究のエネルギー生成は、藻類の複雑な処理によりメタンガスやエタノールを抽出するのではなく、単に光合成の機能を引き出しているだけであるため、藻類からエネルギーを非常に有効に安価に効率よく得ることができる。結果として、PSII溶液は藻類から簡単に抽出でき、これを用いて「光合成スクリーン」の実作に成功した。また、この「光合成スクリーン」は、スクリーンの色彩は黄緑色から黄色へ変化するものの、20日にわたり発電可能であることもわかった。

さらに、建築エレメントのうち室内外の境界である窓への適用として、「光合成窓」についても実作した。その結果、「光合成窓」の色彩は透明な黄緑色のままで、時間経過とともに色あせるが、少なくとも

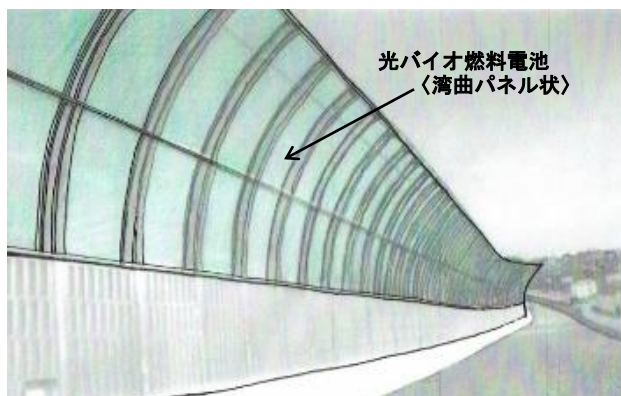


図 15 「光合成建築」道路遮蔽板への展開案

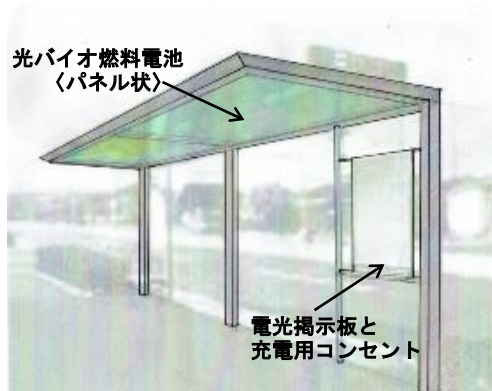


図 16 「光合成建築」バス停への展開案

2週間は光バイオ燃料電池1個に対して0.4V以上の起電力をもって発電することがわかった。これらの結果は光合成によりエネルギーを生成する建築エレメントは、高等植物だけでなく、チラコイド膜を有する藻類においても実作可能であることを示唆している。

「光合成建築」に関する研究は、住宅だけでなく人間の活動全般にわたるプロダクトに廃棄植物による光合成を活用した透光性を備える光バイオ燃料電池を一体化させ、少しでも環境負荷を減少させようとする試みである^(4, 7)。現在、電極の形状・サイズ、接着方法、溶液の抽入・排出方法に検討を加え、高いデザイン性を有した新しい建築・インテリア・エクステリアの創出を探っている。例えば、住宅の窓や壁よりも小規模のプロダクトや逆に大規模なインフラ建造物、公共性の高い屋外施設(図15, 16)などへの展開を想定し、さらに実証実験を行っていく予定である。

また本研究は、決して大容量の電気エネルギーを生み出すことを目的としていないが、今後、PS II 溶液の製造工程の簡略化、原料となる植物の種類や製造工程の違いによる電流、電圧・発電時間の測定、耐久性やメンテナンス性、コスト削減に関する研究を計画している。

謝辞

本研究において使用した藻類は、株式会社 富士エス・エル・アイ 社長 仲里啓 氏および会長 仲里正孝 氏のご厚意により無償で提供いただいたものである。この場を借りて深謝の意を表す。また、本研究の一部は 公益財団法人 八洲環境技術振興財団の研究助成を受けて実施したものである。

参考文献

- (1) R. Kleijn and E. van der Voet, *Renewable and sustainable Energy Reviews.*, **14** (2010) pp.2784.
- (2) M. Z. Jacobson and M. A. Delucchi: *Energy Policy.*, **39**, 1154 (2011).
- (3) B. Sorensen, *Elsevier Academic Press*, (2005).
- (4) 川上比奈子, 松尾康光, 発明の名称:「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)(2019年5月23日)
- (5) 川端隆, 川上比奈子, 松尾康光, “「光合成」でつなぐ融合型基礎実験の開発”, 工学教育研究講演会講演論文集 (2019)
- (6) A. Iwahashi, T. Yamada, Y. Matsuo and H. Kawakami, "Novel Biofuel Cell Using Hydrogen Generation of Photosynthesis ", *J. Funct. Biomater.* **11** (2020) 81(p.1-15).
- (7) 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」”,

- 色材協会誌（招待論文）（2020年12月発行予定）
- (8) 川上比奈子, 松尾康光:光合成建築, イノベーションジャパン 2018 (2018年8月30日~8月31日)
 図1: 奥田一成, 小林佑樹, 亀川良将 (住環境デザイン学科 2018年度卒業生): 「森の別荘」デザイン・模型制作
- (9) Y. Matsuo, T. Furuseki and H. Kawakami, “Protonics with tissue derived Biomaterials, 9th World Congress on Chemistry and Medicinal Chemistry” (2019)
- (10) 川上比奈子, 松尾康光:光合成建築, 日中大学フェア&フォーラム・日本新技術展 (2019)
 図2: 名富心, 古川勝成, 三宅菜月, 山川航希, 田中小夏, 松田久瑠実, 木下寧々 (住環境デザイン学科 2019年度卒業生): 「光合成建築: 未来の駅」デザイン・模型制作
- (11) 川上比奈子, 松尾康光:廃棄される自然からエネルギーをつくろうー捨てられる植物が光合成をしてLEDランプを灯す! ?ー, 2019年度ひらめき☆ときめきサイエンス (2019年12月8日)
- (12) H. Kawakami and Y. Matsuo, “Beautiful renewable energy”, Impact -Advancing technology-, (2020) pp.39-41.
- (13) 報道
- ・川上比奈子, 松尾康光:記者会見メディア向け説明会, 摂南大学 (2020年2月25日)
 - ・川上比奈子, 松尾康光:世界が注目「光合成建築」, J: COM デイリーニュース~北河内~ (2020年2月26日)
 - ・川上比奈子, 松尾康光:建築に光合成燃料電池, 日刊工業新聞 (2020年2月27日 28面)
 デジタル版 <https://www.nikkan.co.jp/articles/view/549552>
 - ・川上比奈子, 松尾康光:光合成パネル - 『植える』建築実用化目指す, 建設通信新聞 (2020年2月27日 11面) デジタル版 <https://www.kensetsunews.com/archives/424153>
 - ・川上比奈子, 松尾康光:「光合成建築物」で発電, 毎日新聞 (2020年3月5日 21面・大阪)
 デジタル版 <https://mainichi.jp/articles/20200305/ddl/k27/100/279000c>
 - ・川上比奈子, 松尾康光:摂南大学, 植物の葉緑体を利用した「光合成パネル」, WEB サイトメガソーラービジネス (2020年3月12日)
<https://project.nikkeibp.co.jp/ms/atcl/19/news/00001/00678/?ST=msb>
 - ・川上比奈子, 松尾康光:酸素と電気を生み出す「光合成建築」植物・生物由来で循環型社会を目指す, 日経クロステック (2020年4月9日)
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00154/00846/>
 - ・川上比奈子, 松尾康光:酸素と電気を生み出す「光合成建築」植物・生物由来で循環型社会を目指す, 日経アーキテクチュア (2020年4月23日 13頁)
- (14) 佐野由佳: 平田晃久氏が太陽光パネルによる展示, テーマは光合成, 日経クロステック (2012年3月9日) <https://xtech.nikkei.com/kn/article/knp/column/20120307/560950/>
- (15) 菊池雪代: 「藻のファサード」で変わる建築, BIQハウス, 日経クロステック (2014年1月16日) <https://xtech.nikkei.com/kn/article/building/news/20140110/647469/>
- (16) ジュリアン・メルキオッリ: 人類はついに光合成を手に入れた! 人工の葉が酸素を作り出す奇跡 (2014年8月11日) <https://nge.jp/2014/08/11/post-3496>
- (17) 岩橋暁成, 高橋佑輔, 古関智樹, 川端隆, 坂東宏一, 寺西翔太郎, 松井沙也花, 川嶋美鈴, 後藤田祐登: 「光合成スクリーン アイリーン・グレイへのオマージュ」制作 (2020年2月)
- (18) G.Philippe, “Eileen Gray Designer and Architect” , *Benedikt Taschen.*, (1993) p.48.

- (19) 川上比奈子, デザイン学研究, **6** (2004) p.50.
クラウディア・パスケーロ他: 光合成する「バイオカーテン」で都市の空気をきれいに——
英デザイン事務所が目指す“合成生物”としての建築 (2019年6月1日)
<https://wired.jp/2019/06/01/cities-air-pollution-clean-photosynthesis/>
- (20) J. H. A. Nugent, A. M. Rich, A. M. Evans, *Biochimica et Biophysica Acta* **1503** (2001) p.138.
- (21) Johnson, M. P. Photosynthesis, *Essays Biochem.* **60** (2016) p.255.
- (22) D.R. Ort, C. F. Yocum, *The Netherlands: Kluwer Academic Publishers*, 1996
- (23) H. Nagashima, M. Asada, H. Mino, *Biophysics and Physicobiology* **15** (2018) p.45.
- (24) B. Zhang, L. Sun, *Dalton Transactions* **41** (2018) p.14381.
- (25) A. Zouni, H.-T. Witt, J. Kern, P. Fromme, N. Krauß, W. Saenger, P. Orth, *Nature* **409** (2001) p.739.
- (26) J.-R. Shen, I. Enami, *Low temperature science*, **67** (2009) p.275.
- (27) M. Miyao. *Low temperature science*, **67** (2009) p.197.
- (28) Y. Matsuo, *The Journal of Fuel Cell Technology*, **13** (2014) p.60.
- (29) Y. Matsuo, H. Ikeda, T. Kawabata, J. Hatori, H. Oyama, *Mat. Sci. Appl.* **8** (2017) p.747.
- (30) 瀬下大輔, 近澤由紀, 安野要 (住環境デザイン学科 2018年度卒業生): 「街の住宅」デザイン・模型制作 (2018)