

光化学とバイオマスのこの 10 年とこれからの 10 年

A Decade of Photochemistry and Biomass – Reflections and Future Horizons

光化学・バイオマス部会 堀端 章*

1. はじめに

日本太陽エネルギー学会員の皆様、学会設立 50 周年おめでとうございます。光化学・バイオマス部会を代表して本稿を呈上させていただくことは大変な光栄なことと感じておりますが、一方で、本来は農学分野あるいは育種学分野の研究者である私がこの任を務めますことに戸惑いもあります。必ずしもこの分野の全体を見渡す能力を持ち合わせていないため、浅薄な知識からくる誤謬もあるとは存じますが、「この 10 年とこれからの 10 年」と題して論考を進めたいと思います。

この 10 年を振り返るにあたり、まず、「太陽エネルギー」に掲載された本部会に関連する特集記事を概観した。本部会が主となったものばかりではないが、2015 年から 2024 年までの 10 年間に、21 件の特集記事が組まれていて、ペロブスカイト太陽電池 2 件、人工光合成 3 件、ソーラーシェアリングを含む次世代農業 3 件、燃料電池 1 件、蓄電池 2 件、カーボンリサイクル 3 件、バイオマス 3 件、水素エネルギー 2 件、エネルギーの効率的な管理 2 件、他となっている。この分野が、単に光化学とバイオマスだけでなく、蓄電池、水素エネルギー、ソーラーシェアリング、カーボンリサイクルなど、他の分野と相互に乗り入れながら発展してきたことがうかがえる。

2. ペロブスカイト太陽電池の実用化

なかでも、この 10 年における顕著な進歩はペロブスカイト太陽電池の実用化である。40 周年記念に出稿された塙藤徳氏の寄稿文¹⁾では、発電効率が初期の 3.8% から 20.1% に向上したことが取り上げられている。2024 年、物質・材料研究機構の研究グループは、実験室レベルではあるが、20% 以上

の変換効率を維持しながら 60℃ の高温環境下で 1000 時間以上の連続発電に耐えるペロブスカイト太陽電池について報告している²⁾。また、東京都市大学の研究グループは、ペロブスカイト / シリコンタンデム太陽電池において、従来の結晶型シリコン太陽電池と同等の 26.5% の変換効率を実現したと報告している³⁾。このように、この 10 年間で、ペロブスカイト太陽電池は、耐久性面でも性能面でも実用化を考える水準にまで向上している。実際、本稿執筆中に開催されている大阪・関西万国博覧会では、長さ 250 m のバス停の屋根にペロブスカイト太陽電池を設置して、社会実装実験が行われている。また、パナソニックパビリオンには、透明なガラス型ペロブスカイト太陽電池が展示されている。軽量で、薄くて曲げることもできるペロブスカイト電池は、これまでシリコン型太陽電池が利用できなかった場面においても利用することができ、太陽光発電をとりまく社会的環境を大きく変える可能性がある。積水化学工業では、フィルム型ペロブスカイト太陽電池の量産化にすでに着手している。

3. 人工光合成の新たな展開

工学的な光化学研究は、人工光合成というキーワードが示すように、もともとは植物の光合成を模倣するところから始まった。しかし今や、単純な模倣ではなく、新たな展開を見せ始めている。

植物の光合成は、葉緑体の光化学系 II において、光エネルギーを利用して水 (H_2O) からプロトン (H^+) と電子 (e^-) を得るところから始まる。この時に生じるプロトンと電子から、後の様々な生化学反応にエネルギー源として用いられる ATP (Adenosine Triphosphate) などが生成される。こ

* 近畿大学生物理工学部

これらの反応は酵素化学的反応であって、適正な環境下においてのみ起こる。また、生化学的システムに介入して光合成の速度を向上するような試みが続けられているが、反応系が複雑なために、顕著な進歩は見られない。実際、筆者は植物育種学分野で研究を行っているが、植物体の形態を改良するなど、光合成器官の空間的配置を改善することによって光合成効率の向上が図られてきた。それでも数%向上させられれば大きな成果と言われるのが現状である。

これに対して、工学的な人工光合成は、光触媒や金属触媒を用いて、水 (H_2O) を水素 (H_2) と酸素 (O_2) に分離してから、得られた水素を一酸化炭素 (CO) や二酸化炭素 (CO_2) と反応させて、炭化水素などを生成する。触媒を用いた反応なので、触媒の活性さえ失わなければ、高温下で反応効率が向上する。また、高効率の触媒が発見・開発される度に、反応効率や精製される物質の多様性が増し、今や効率だけ考えれば植物の光合成を上回る状況にある。

Takizawa *et al.*⁴⁾ は、2種類のイリジウム錯体を生体膜を模した脂質二重膜上に配置することによって、効果的に二酸化炭素を還元して一酸化炭素に変換する光化学反応を起こさせる斬新な機構を提案している。また、NTT は、窒化ガリウム (GaN) を光触媒として用い、気相中の二酸化炭素を、水素、一酸化炭素あるいはギ酸 (HCOOH) に変換するデバイスを開発した。しかも、わずか 350 時間の連続運転で杉の木 1 本分の年間炭素固定量を上回ったと報告している⁵⁾。このように、人工光合成に関する研究の進歩は著しく、植物の光合成を上回る成果をあげつつある。

複数企業が参画する NEDO の人工光合成型化学原料製造事業化開発⁶⁾ では、得られたグリーン水素を起点にして、二酸化炭素と反応させることによって、エチレン (C_2H_4) やプロピレン (C_3H_6)などを製造する研究が進められており、これが実現できれば、化石燃料に依存することなく、現在使用されているプラスチックのほとんどを製造することが可能になる。

4. バイオマス

バイオマスについては、木質バイオマス、バイオマスのガス化、エネルギー作物の多様化について述べたい。

まず、木質バイオマスについては、その利用法などがほぼ確立し、国際市場が成熟する過程にある。我が国においても国際規格との整合性が図られ、

2023 年 6 月 15 日に日本農林規格において木質ペレット燃料の規格が定められた⁷⁾。このような国際規格への準拠は、我が国における木質バイオマスの製造と流通を支えるものである。現時点で、我が国は木質バイオマスの輸入国であるが、豊富な森林資源を抱えるため、後述するように将来的には輸出国にもなり得ると考えている。

次いで、バイオマスのガス化は、この 10 年間に著しく進歩した分野と言える。当初は、バイオマスを水素や一酸化炭素に改質し、それを燃料として発電等を行うことが考えられていた⁸⁾。現在はここからさらに、メタン (CH_4) やオレフィン類 (C_2H_4 , C_3H_6) への変換が可能になりつつある。これらの炭化水素の生産は多くの化成品の製造につながる。また、水素と二酸化炭素を原料とする触媒反応によって、メタンを生産する「メタネーション」技術の開発も進められた⁹⁾。言うまでもなく、メタンは都市ガスとして通常のガスの配管に流すことができ、使用する機器を変更する必要もない。天然ガスの代替として好適である。このように、バイオマスは、ガス化を通じて、化成品とエネルギーとの双方への展開が見え始めている。

筆者が比較的良く理解しているエネルギー作物の分野については、残念ながらあまり大きな進歩は見られない。すでに述べたように、光合成の効率の悪さから、エネルギー作物を生産して収穫すること自体が、太陽光発電等と比較してメリットをあまり感じられない状況になっている。これまでは、光エネルギーを化学エネルギーとして貯蔵できるバイオマスが、再生可能エネルギーの不安定性を補完する調整弁として役立つとされてきたが、人工光合成の進歩の速度を考えると、その優位性もいつまで維持されるか心許ない。このような環境のなかでも、ここ数年話題となっているのが、藻類バイオマスである。単細胞微生物の緑藻類や珪藻類の一部の種は、光合成産物を脂質に変換して貯蔵するため、ここから得られる油脂をジェット燃料等に利用しようとする試みである。株式会社 IHI では、緑藻類のボツリオコカス (*Botryococcus braunii*) からバイオジェット燃料の国際規格に準拠した燃料を生産し、ジェット機に試用している¹⁰⁾。電源開発株式会社では、2種の海洋性珪藻類 (*Fistulifera solaris* および *Mayamaea* sp.) から、持続可能な航空燃料 (Sustainable Aviation Fuel, SAF) の事業レベルの生産を目指している¹¹⁾。むしろ、この 2 種に関しては、油脂に機能性の脂肪酸であるエイコサペンタ

エン酸 (eicosapentaenoic acid, EPA) などを含むため、石鹸、スキนครリームなどの化粧品としての上市が先行している¹²⁾。

バイオマスそのものをエネルギーと考える視点から、バイオマスから食糧や木材など生活に必要な資材を製造し、その過程で生じる廃棄物系バイオマスをエネルギーと考える視点へと移行する必要がある。

5. 次世代の農林水産業

前項で、再生可能エネルギー資源としてのバイオマスの積極的な生産に否定的な見解を示したが、食糧生産のための農業、木材生産のための林業は継続されなければならない。現在、農地に太陽光発電ユニットを置く営農型太陽光発電が推進されているが、農地や山林のエネルギーを生産する場所としての潜在的価値は高いと考えられる。特に山林では、未利用のバイオマスが放置されている状況である。上述の人工光合成を起点とするメタンの生産においても二酸化炭素を必要とする。大気中に含まれる低濃度の二酸化炭素を収集する機構としての植物の役割は大きい。林地残材を回収してバイオマス発電を行い、その際に生じた二酸化炭素をメタンの生産に利用できれば、大気中からの二酸化炭素の回収コストを大幅に軽減できる。

また、山林は水源涵養能力が高く、平野部への水資源の安定供給に不可欠である。山林の荒廃が進むと、平野部の農業に支障が出てくる。また、山林が雨水を十分に保持できなければ、下流の河川の氾濫にもつながる。さらに、山林から平野を通過して海にそそぐ河川がもたらすミネラル等の栄養分は、植物性プランクトンを育て海産資源の豊かさにつながっている。筆者も参画した和歌山県の研究事業で課題となった沿岸漁業資源の減少は、山林の荒廃に起因するとされた。

次世代の農林水産業を活性化させ、国土保全と食糧安全保障を確保するためには、林業の再生から取り組まなければならない。林業は、植え付けから伐採までの期間が長く、毎年の収入が不安定であるため、就労者がなかなか増加しない。間伐材や林地残材の利用を積極的に推進し、林業の持続可能性を向上させることが様々な課題を解決するための端緒となる。森林バイオマスの利用は、単なるエネルギー問題ではなく、一次産業全体の底上げを担う最重要ポイントである。このような経済活動のなかで、木質バイオマスの国産化および国際規格に準拠するこ

とによる輸出の振興は次世代の林業の経済的安定性を確保する上で重要になると考えている。

農業においては、営農型太陽光発電の積極的な導入により、荒廃農地の再生を計ることが求められる。農業機械各社から自動農機の開発と販売開始が続いており、将来的には発電設備下での農作業を完全に自動化できる可能性がある。この自動化の実現と同時に、人が農機に乗って操作するスペースを削減できるため、発電設備の設計基準も変わると思われる。農産物についても、本来利用する部分（可食部）を除いた部分からも有用な資源を抽出利用した上で残る残渣を廃棄物系バイオマスとして利用するような、カスケード型の利用が検討されている。

水産業もバイオマスと無縁ではない。水産加工場からは大量の廃棄物が出る。畜産業から排出される廃棄物と同様に、廃棄物系バイオマスとして利用可能である。また、貝殻は、養鶏の餌や農地の土壌改良資材としてすでに利用されているが、海水中に溶け込んだ二酸化炭素が固定されたものであるため、メタネーションにおける二酸化炭素の供給源としても有望である。

6. おわりに～これからの10年

筆者の理解が不十分な部分も多々あると思うが、この10年の間に光化学とバイオマスの関係性は少なからず変化した。植物の光合成を模倣するところから始まった光化学は、光合成よりも効率が良くなりつつあるとは言え、食糧生産はまだ農業に頼らざるを得ない。しかし、エネルギー生産に関しては、次の10年の間に光化学が明確に先行するようになるであろう。

読者諸氏は、「未来少年コナン」という1978年に製作された宮崎駿監督のアニメ作品をご存知であろうか。ゴミの埋め立て地がプラスチック鉱山と化した、現代の工業文明の崩壊した後の世界を舞台にしている。その中で、太陽エネルギーシステム（それも宇宙空間で人工衛星が収集したエネルギーを地上に伝送するシステム）をエネルギー源として、採掘されたプラスチックからパンを作るシーンが描かれている。太陽エネルギー学会の設立間もない、今から47年前にこのような技術水準への到達を夢見た宮崎駿氏の慧眼にも驚くが、それを次の10年で実現しそうな光化学・バイオマス分野の研究者の方々のたゆまない努力も大いに誇るべきである。

参考文献

- 1) 埴藤徳 (2015) 太陽光化学・バイオマス利用の将来展望. 太陽エネルギー 41 (3) : 33-44
- 2) D. B. Khadka, Y. Shirai, M. Yanagida, H. Ota, A. Lyalin, T. Taketsugu and K. Miyano (2024) Defect passivation in methylammonium/bromine free inverted perovskite solar cells using charge-modulated molecular bonding. Nature Communications 15 : 882
(<https://doi.org/10.1038/s41467-024-45228-9>)
- 3) 東京都市大学 (2023) 世界初, 変換効率が30%に迫る, 曲げられる太陽電池を開発—新構造の薄型シリコン太陽電池にペロブスカイト太陽電池を積層—
<https://www.tcu.ac.jp/news/all/20230919-53175/>
(2025 年 7 月 12 日閲覧)
- 4) S. Takizawa, T. Okuyama, S. Yamazaki, K. Sato, H. Masai, T. Iwai, S. Murata and J. Terao (2023) Ion pairing of cationic and anionic Ir(III) photosensitizers for photocatalytic CO₂ reduction at lipid – membrane surfaces. Journal of the American Chemical Society. 145 : 15049-15043 (<https://doi.org/10.1021/jacs.3c03625>)
- 5) 日本電信電話株式会社 (2023) 半導体光触媒を用いた人工光合成において世界最長の連続動作時間を実現.
<https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/10/27/231027a.html>
(2025 年 7 月 12 日閲覧)
- 6) 下平靖雄 (2024) 産業構造審議会グリーンイノベーション部会 エネルギー構造転換分野 WG 説明資料
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/022_10_00.pdf
(2025 年 7 月 12 日閲覧)
- 7) 農林水産省 (2023) 日本農林規格 JAS0030
https://www.maff.go.jp/j/jas/jas_kikaku/attach/pdf/kokujikaisei-459.pdf
(2025 年 7 月 22 日閲覧)
- 8) 笹内謙一 (2022) 国内におけるバイオマス小規模ガス化発電の最新の動向と課題. えねるみくす, 101 : 660-668
(https://doi.org/10.20550/jieenermix.101.6_660)
- 9) 経済産業省資源エネルギー庁 (2021) ガスのカーボンニュートラル化を実現する「メタネーション」技術.
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/methanation.html>
(2025 年 7 月 22 日閲覧)
- 10) 株式会社 IHI (2021) 微細藻類から製造したバイオジェット燃料を国内定期便に供給.
https://www.ihico.jp/all_news/2021/other/1197433_3355.html
(2025 年 7 月 23 日閲覧)
- 11) 電源開発株式会社 (2022) 微細藻類を活用した新規事業創出の検討を開始しました～スタートアップスタジオスピリット社への会員加入～
https://www.jpowers.co.jp/news_release/2022/03/news220311.html
(2025 年 7 月 23 日閲覧)
- 12) 電源開発株式会社 (2025) 微細藻類への取り組み
<https://www.jpowers.co.jp/bs/other/microalgae/>
(2025 年 7 月 23 日閲覧)

著者略歴



堀端 章 (ホリバタ アキラ)

1991 年 3 月京都大学大学院農学研究科修了。

同年 4 月三菱ケミカル株式会社に就職し、株式会社植物工学研究所に出向して水稻品種“夢ごこち”の育成に携わる。1993 年 4 月近畿大学生物理工学部に助手として採用されて以来、専攻する植物育種学分野のみならず、農学と工学の境界分野での教育・研究に携わる。