



第 64 回東京大学農学部

公開セミナー

「光」

講演要旨集

~~~~~ プログラム ~~~~

##### 【開会の挨拶】

挨拶 研究科長 中嶋 康博

1 3 : 3 5 ~ 1 4 : 2 5

#### 植物への LED 光照射と研究用 LED 光源システム

生物・環境工学専攻

教授

富士原 和宏

##### 【休憩（10分）】

1 4 : 3 5 ~ 1 5 : 2 5

#### 光を操り 食糧難に立ち向かえ！

生態調和農学機構

准教授

矢守 航

##### 【休憩（10分）】

1 5 : 3 5 ~ 1 6 : 2 5

#### 光から“石油”を作る植物プランクトン

水圈生物科学専攻

准教授

岡田 茂

##### 【閉会の挨拶】

司会 准教授

秋山 拓也

日 時 2023 年 6 月 17 日（土） 13:30 ~ 16:30

場 所 ハイブリッド開催（現地：弥生講堂一条ホール）

主 催 東京大学大学院農学生命科学研究科・農学部

共 催 （公財）農学会

# 植物への LED 光照射と研究用 LED 光源システム

生物・環境工学専攻 教授 富士原 和宏

## 1. 植物への LED 光照射

発光ダイオード (light-emitting diode: LED) を植物栽培用光源として利用することを意識した研究が増え始めたのは、1995 年頃からである。切掛は青色 LED の市販化である。ちなみに青色 LED の発売当時の価格は、1000 個まとめて購入しても 1 個あたり 1000 円程度であったと記憶している。現在では、電子部品の通販サイトで、発売当時のそれよりも遙かに発光効率 (消費電力 [W] あたりに得られる光束 [lm]) の大きい砲弾型青色 LED が 1 本 50 円程度で購入できる。急激な低価格化と高発光効率化が進んだ現在では、赤色 LED と青色 LED を組み合わせた LED 光源、あるいは青色 LED チップを利用した蛍光体利用白色 LED を用いた光源が、植物栽培用として人工光型植物工場で広く使用されるようになった。またそれらは、温室での補光用光源にも利用されている。

蛍光ランプや高圧ナトリウムランプを光源とする植物栽培では、明期照射光の分光分布（厳密ではないがスペクトルといつてもよい）は、栽培期間中一定であった。これに対して、LED を光源とする植物栽培では、ピーク波長の異なる LED を複数種用いることで、照射光の分光分布を 1 日の明期中に時間変化させることができだけでなく、明期中とは異なる波長帯光での暗期中の弱光照射（暗期とは呼べないかもしれない）や、日ごとに分光分布を変えるような制御も可能である。さらには、ピーク波長の異なる LED を多数種組み合わせて設置した光源を用いることで、多様な分光分布の光を照射することも可能となる。

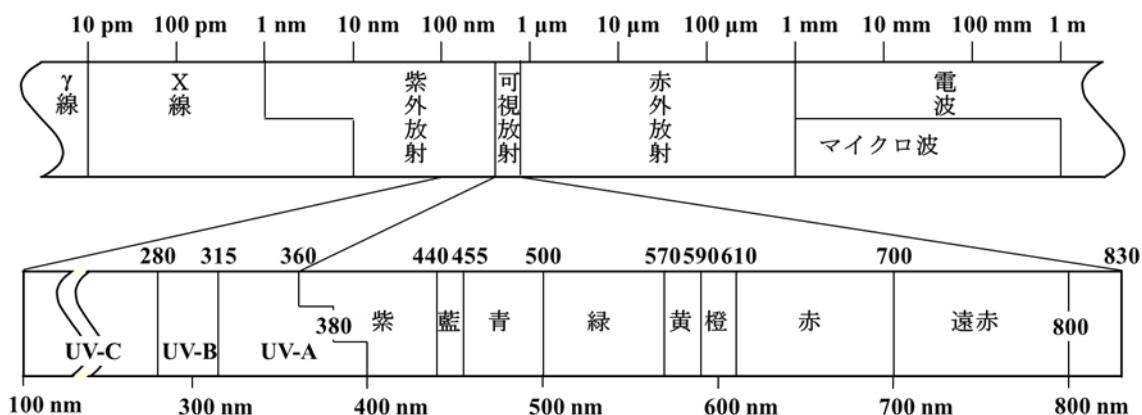


図1 波長による電磁波および可視放射の分類

(富士原 (2013) 冷凍 88(1025): 23–28)

LED への電力供給を短い時間間隔でオン・オフすることで、その時間間隔に応じた点滅光を照射することができる。一般に、1 秒程度以下の短い周期で点滅を繰り返す光をパルス光と呼んでいる。このパルス光照射については、不思議な誤解がとくに国内で蔓延している。パルス光照射を行うと、照射光点滅中の平均の光の強さが連続光と同じであっても、連続光照射よりも光合成速度を大きくすることができるという誤解である。そうはならないことを明示して

いる圧倒的多数の論文・著書の存在は無視され続けている。例えば、Rabinowitch (1956) (*Photosynthesis and Related Processes*. New York, Interscience Publishers) は、照射光点滅中の平均の光の強さが連続光と同じなら、連続光照射に比較してパルス光照射で光合成速度が大きくなることはないことを、単純な思考実験で明快に説明している。

## 2. 研究用 LED 光源システム

自然環境下での植物栽培や植物を利用した有用物質生産の効率を高めるための研究、さらにはそのための基礎となる植物の環境応答を調べる研究では、自然環境下で観察されうるレベルの環境要素（例えば気温、相対湿度、CO<sub>2</sub>濃度など）の影響を調べる必要がある。ところが、光についての環境要素の一つである分光分布についてだけは、これまで自由に制御できる光源システムが存在しなかったため、分光分布の影響を詳細に調べる実験を行うことができなかつた。とくに、自然環境下における環境要素の時間変化の影響を調べようとしたときに、その他の環境要素については比較的容易にその時間変化を再現可能であるのに対して、分光分布については不可能であった。つまり、地表面における太陽光（自然光）の分光分布の時間変化（時間変動）に対する植物あるいは生物の応答を、ある程度以上の精度で調べる実験を行うことを可能とする光源システムがなかったのである。

そこで、植物への照射光の分光分布を自由に制御できる光源システムの開発に挑んできた。2021年には、直徑 30 mm の被照射面積に対して、380~940 nm の波長範囲について地表面で観測される太陽光の分光分布を高精度で再現可能で、しかもその時間変化をも高い自由度で再現できる画期的な光源システムが完成した (Fujiwara et al. (2022). *Journal of Agricultural Meteorology* 78(3): 101–112)。LED 人工太陽光光源システムである。

この LED 人工太陽光光源システムを用いれば、高度な分光分布制御を高い自由度で実現できる一方、その操作方法の習得にはやや時間を要する。そこで、植物学、生物学、農学系の研究者が容易に取り扱える光源システムとして、光源システムのピーク波長 LED の種類を減らし、高度な機能を割愛した 6 波長帯光混合照射用 LED 光源システムも開発している。

# 光を操り 食糧難に立ち向かえ！

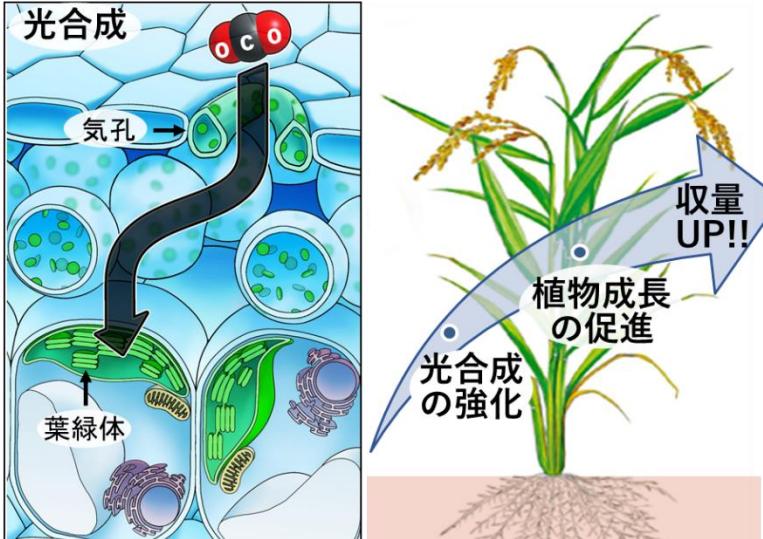
生態調和農学機構 准教授 矢守 航

## 1. 光合成の仕組みを解いて食糧難に立ち向かう

地球レベルの急激な人口増加と環境の変化は、深刻な食糧不足を招きつつあり、いかに作物の収量を増加させるかは、植物科学研究の社会貢献において重要な課題である。私たちは、近未来において穀物・作物を安定的に供給できるようにしたいと考えている。光合成は、光エネルギーを生命が利用できる形に変換し、それを利用して二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) を炭水化物へと固定する反応であり、植物の成長や収量を決定づける要因である。私たちは、様々な植物を実験材料に、光合成の環境応答メカニズムを包括的に解明するべく研究を行っている。それらの基盤研究の成果に基づいて、様々な環境における光合成能力や植物生産性の向上を目指すなど、応用的研究にも着手している。また、植物の環境応答の理解から、植物工場において効率の良い作物栽培技術の開発を目的とした研究も行っている。これらの研究は、作物の安定的な供給や食糧不足の解消だけではなく、大気  $\text{CO}_2$  濃度上昇抑制にも貢献できると期待できるので、社会的にも植物科学的にも重要な課題の一つである。本講演では、(1) 光合成や植物の生産性の向上に向けた取り組みと、(2) 植物工場における新規照明システムの開発について紹介する。

## 2. 光合成や植物の生産性の向上に向けた取り組み

作物の環境応答の仕組みを解明し、その科学的知見をもとに、作物の生産性向上を目指して研究を行っている。野外では、雲の動きや上部に存在する葉の動きによって葉の受ける光強度は大きく変動する。このような“変動する光環境”に対する植物の光合成応答の強化に成功した研究例は極めて少ない。私たちの研究成果によって、光合成に必要な  $\text{CO}_2$  の取り込みを制御する“気孔”を光環境に応じてすばやく開かせることで、野外の光環境を模した変動光環境において光合成および植物成長を促進することに成功した。



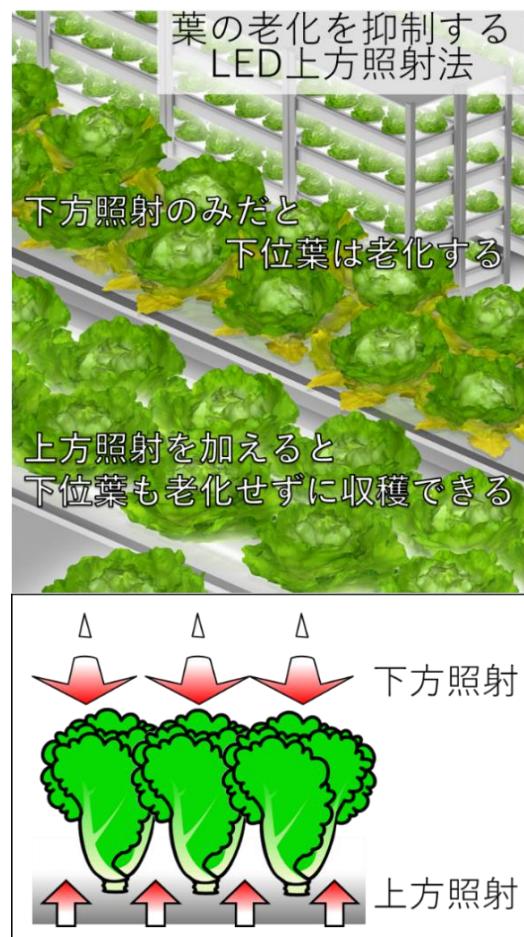
The diagram consists of two parts. On the left, a cross-section of a plant leaf shows a气孔 (stoma) opening to allow CO<sub>2</sub> molecules to enter the leaf, which then moves through the mesophyll cells to reach the chloroplasts where photosynthesis occurs. On the right, a whole plant is shown with a large blue arrow pointing upwards labeled "収量 UP!!" (Yield Up!). Below the plant, another blue arrow points upwards labeled "植物成長の促進" (Promotion of plant growth). A third blue arrow points upwards from the base of the plant labeled "光合成の強化" (Enhancement of photosynthesis).

また、光合成は植物の生産性を決定する最も重要な代謝であるが、高温ストレスの影響を受けやすいという弱点がある。高温に対する光合成応答機構は複雑なことから改良の鍵となるターゲットは未だ明らかにされておらず、高温耐性作物の開発は遅れている。近未来に懸念され

る地球温暖化による食糧危機を乗り越えるためにも、高温耐性作物の開発は必須である。我々の研究成果によって、光合成反応に高温耐性を付与することによって、地球温暖化に適応した生産性の高いイネを作り出すことに成功した。今後、光合成の調節機構の解明を通じて、地球レベルの大気 CO<sub>2</sub> の削減や食料増産のために必須な光合成効率の改善や光合成生産向上のための技術基盤をつくりたいと考えている。

### 3. 植物工場における新規照明システムの開発

植物工場では、光や温度、湿度、CO<sub>2</sub>濃度、肥料濃度など、生育に必要な環境を自動制御することができるため、高品質のまま収穫量を増大することが可能である。LED 等を用いる人工型植物工場では、高密度でリーフレタス等などの葉菜類を栽培するため、葉が複雑に幾重にも重なってしまう。その結果、植物体の下位葉まで光が届かず、下位葉の老化が進行し、作物の生産性が低下してしまう。また、葉菜類を出荷する際に、これらの老化葉は取り除かなくてはならず、そのための作業時間と労力が余分に必要となる。そこで、我々は、光合成を駆動する“光”的照射法に着目した。光の不足によって下位葉の老化が促進するのであれば、下位葉に光が届くような栽培システムを構築すればよいのではないかと考えた。我々は、植物体の下側から上方向に向けての光照射（上方照射）によって、下位葉の老化を防ぐのみならず、下位葉の光合成促進をもたらすことで、植物成長を大きく促進することを見出した。今後、できる限り資源とエネルギーを抑えて、最大の収量を得るシステムを確立していきたいと考えている。



# 光から“石油”を作る植物プランクトン

水圈生物科学専攻 准教授 岡田 茂

## 1. 微細藻類（植物プランクトン）とはどんな生物か

微細藻類と言うと、「水中に住み」、「体が小さく」、「根も葉も無い単純な体の」、「原始的」な植物と考えている方が多いかと思う。しかし、藻類とは一次共生により葉緑体を獲得した、狭い意味での植物だけではなく、それらを取り込んで葉緑体として用いることで、光合成を行う様になった生物も含んでおり、進化的に非常に多様性に富んでいる。この進化的な多様性に伴い、藻類は生態や生化学的な性質も多様性に富み、有用物質を生産する物が知られており、中にはバイオ燃料資源として期待されている物もある。

## 2. “石油”を作る *Botryococcus braunii* とはどんな生物か

バイオ燃料資源として期待されている一般的な植物プランクトンは、脂肪酸から成る油を生産する。これに対し、群体性微細緑藻 *Botryococcus braunii*（以下、*B. braunii* と略）は、石油の主成分でもある炭化水素（炭素原子と水素原子からのみ成る油）を大量に生産し、しかも個々の細胞を繋ぎ止めている細胞外マトリクス部分に分泌する点で、非常に変わっている（図1）。本藻種には生産する炭化水素が異なる三品種があり、直鎖状のアルカジエンおよびアルカトリエンを生産するものをA品種、分岐状のボツリオコッセンおよびメチルスクアレンを生産するものをB品種、炭素数40のリコパジエンを生産するものをL品種と呼んでいる（図2）。これらの炭化水素は細胞外に分泌された後、再び細胞内に戻されて藻体自身に利用されることはなく、その生物学的な役割は謎のままである。また、炭化水素というエネルギー的に「高価」な化合物を生産しているためか、*B. braunii* は他の植物プランクトンより増殖が遅く、効率的な大量培養を行う事が難しい。

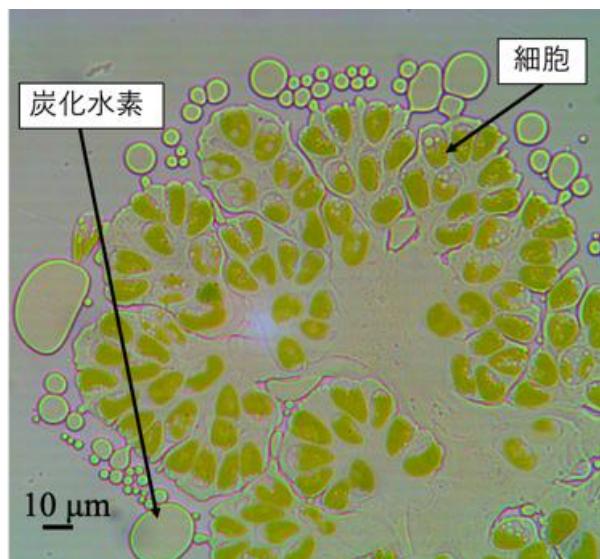


図1.  
炭化水素を生産・分泌する *Botryococcus braunii*

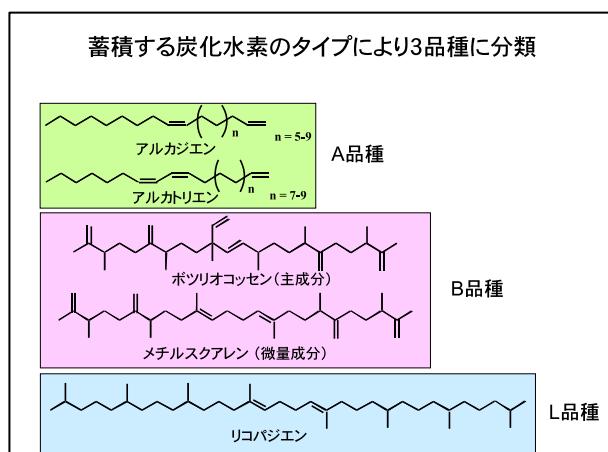


図2.  
*Botryococcus braunii* が生産する炭化水素

### 3. *B. braunii*はどうやって“石油”を作るのか

*B. braunii*による炭化水素生産のしくみを明らかにするため、バイオ燃料源として特に有望なボツリオコッセンという炭化水素が、どの様な酵素により作られるかが調べられた。ボツリオコッセンは、生体膜の構成成分であるステロールの原料として、真核生物全般が作っているスクアレンと形が良く似ている。スクアレンができる際には、まず、ファルネシルニリン酸という化合物が2つ縮合してプレスクアレンニリン酸という化合物になり、それがさらにスクアレンに変換される。この二段階の反応は、スクアレン合成酵素というタンパク質により行われる。ボツリオコッセンを作る酵素は、スクアレン合成酵素と似ているであろうという仮説の下、研究を進めたところ、*B. braunii*のB品種には、スクアレン合成酵素と良く似たタンパク質（スクアレン合成酵素様タンパク質）が3種類も存在し、それらの内の2つが協奏的に反応を行い、ボツリオコッセンを作ることが明らかになった（図3）。

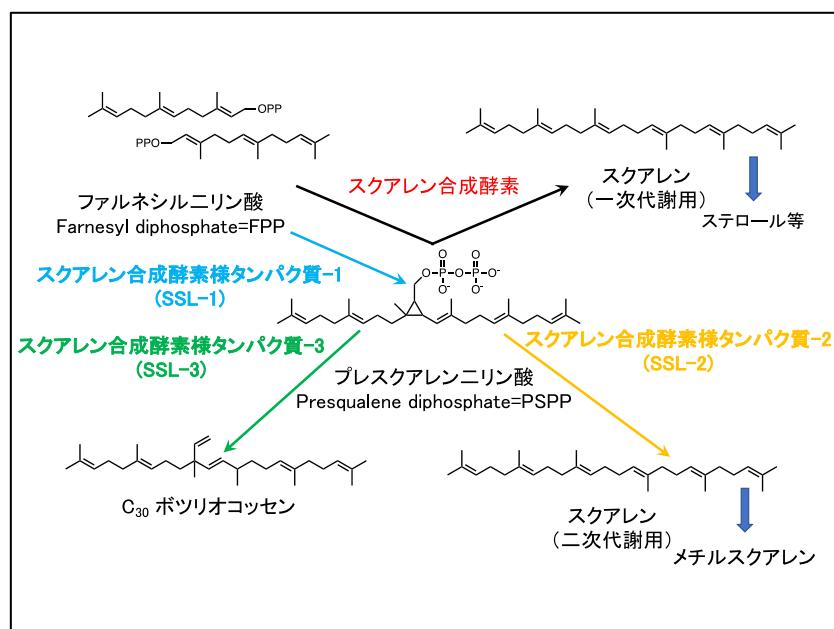


図3. *B. braunii*のB品種が炭化水素（ボツリオコッセン）を作るしくみ

### 4. 植物プランクトンによる“石油”生産を実現するには何が必要か？

炭化水素を生産する酵素の遺伝子が判明したことから、それを他の生物に導入したり、*B. braunii*自身で活発に働かせることで、より効率良い炭化水素の生産が期待できる。また、*B. braunii*が炭化水素を細胞外に分泌するしくみが明らかになれば、牛からの搾乳の様に、藻体を殺さずに炭化水素だけを連続的に回収することが可能になり、より元手のかからない炭化水素生産が可能になるかもしれない。その他にも、有用な植物プランクトンを人類が手に入れるためには、その生物自身の性質を明らかにする地道な研究を続ける事が必要だと考えている。

## 講演者プロフィール

ふじわら かずひろ  
**富士原 和宏**

**生物・環境工学専攻 生物環境工学研究室**

植物の生育制御のための光・ガス・水環境の調節法の開発を目的とした研究を行っています。近年は、植物栽培・貯蔵のための LED 光照射法に関する研究や、植物の光に対する応答を研究するための LED 人工太陽光光源システムなどの研究用特殊 LED 光源システムの開発を中心に進めています。

やもり わたる  
**矢守 航**

**生態調和農学機構**

作物の環境応答の仕組みを解明し、その科学的知見をもとに、作物の生産性向上を目指して研究を行っています。特に、光合成をベースに物質生产能力の強化に関する研究を展開しています。また、作物の環境応答の理解から、植物工場において効率の良い作物栽培技術の開発を目的とした研究も行っています。

おかだ しげる  
**岡田 茂**

**水圏生物科学専攻 水圏天然物化学研究室**

微細藻類には有用な化合物を作る種類が多くいます。中でも光エネルギーと二酸化炭素から「インスタント」石油とも言える油を沢山作る *Botryococcus braunii* という緑藻は魅力的です。この微細藻の不思議さに取り憑かれ、バイオ燃料等として有効利用するための研究を楽しんでいます。