

パルス電界が植物光合成に与える影響
Influence of Pulsed Electric Fields on Photosynthesis in Lettuce

王 斗艶
Douyan Wang

熊本大学 産業ナノマテリアル研究所
Institute of Industrial Nanomaterials, Kumamoto University

1. はじめに

超高圧や超高温、非熱平衡状態などの極限環境を瞬間的に発生可能なパルスパワーは、大電力や高エネルギー密度、短い過渡時間などの特徴を有する。パルスパワーは、これまでに核融合や加速器などの科学研究の基盤技術として発展してきたが、近年、産業利用に関する様々な研究が盛んに行われ、排ガス処理や殺菌、汚染水の浄化などを実現可能であることが明らかとなった。新しい科学や産業技術につながる可能性から、現在ではパルスパワーを生体へ作用させる分野に注目が集まり、その分野は「バイオエレクトロクス」と呼ばれ、がん治療や創傷治療、遺伝子・タンパク質導入など、これまでに薬剤リスクや人体への負担などの問題を抱えていた医療分野への応用を目指す研究が主に行われている。そのようななかで、植物に対する応用も新たに開拓され、植物種の発芽促進や休眠打破、生育制御を目指した研究がごく近年より実施されている。

植物の生長に対する電気エネルギーの影響に関する研究は、プルタルコス『食卓歓談集』において「きのこは雷が鳴ると生える」と言及される古代ギリシャにまで遡る。日本では、1927年に澁澤らが電気學會雑誌に寄せた論文で、網羅的な実験結果に基づく報告がなされている^[1]。近年、植物に対するパルス電界 (PEF) 印加パラメータの制御性を高めることにより、植物の生育制御 (促進または抑制)^[2]や光合成活性制御^[3]が可能であることが見出されている。

植物が光エネルギーを使って有機化合物を合成する全プロセスを光合成と呼び、光の吸収、エネルギー変換、電子伝達が関わる一連の複雑な反応 (明反応) と、明反応で生成したATPとNADPHを利用して、CO₂と水を炭水化物に変換するために酵素が触媒する様々な経路 (炭素反応) の2つからなる。明反応では、光エネルギー

を化学結合エネルギーに変換するための光合成電子伝達鎖で構成されており、その初期電荷分離を司る光化学系II (PSII) は、タンパク質からなる光合成複合体である^[4]。PSII はストレス条件に対して非常に敏感であるため、PSII の機能解析は植物におけるストレス影響の研究に非常に重要である^[5]。PSIIの反応中心に由来するクロロフィル a 蛍光は、通常、光が当たると素早く上昇し、その後ゆっくりと下降する (Kautsky 曲線) ことが知られている。そこで、パルス変調によるクロロフィル蛍光測定に基づき、光合成能力の評価が可能となる。また、技術の発展により、クロロフィル蛍光 (明反応) とガス交換 (炭素反応) の同時測定が実現し、光合成の外部ストレスへの反応を総合的に評価できるようになった。

研究では、低照度適応性があり植物工場に適した作物種であるレタス^[6]を対象とした。レタスの光合成については種々研究されているが、光源に関するものが主であり、PEFへの反応は少ない。そこで、レタスの地上部へ平行平板電極を用いて半値幅1 μ sのPEFを印加し、合計印加時間を統一した場合に、電界強度と周波数が光合成活性/不活性に対する影響を調査した。光合成パラメータは、植物光合成総合解析システム (LI-6800, LI-COR Biosciences) を用いて電子伝達速度 (ETR)、熱放散 (NPQ)、蒸散速度 (E)、光合成速度 (A) について測定した。その結果、図1のヒートマップに示すように、光合成の活性 ((1), (3))、不活性化 ((4)) または中程度の変化 ((2)) が、印加条件により制御できることがわかった。なお、図1中のNo.は、1枚のレタス葉に対して60秒毎に光合成有効光照射を行い光合成パラメータ取得 (時間推移) することから、光合成測定した回数を示し、また、ヒートマップの着色はコントロールサンプルを黒色とし、増加を黄色、減少を紫色とした。

2. 光合成活性

ETRとAが増加しNPQが減少する場合を光合成活性と定義し、それをもたらすPEF強度と周波数は0.1 kV/cmおよび1 ppsと、比較的弱い電気ストレスである。

ETRが増加する原因としては、電子伝達系やPSII、電子伝達物質であるプラストキノンが活性化され、葉緑体内のチラコイド膜に存在する酸化還元物質の反応を促進した可能性が示唆される。また、NPQが減少したことにより、熱放散が抑制され、照射された光エネルギーが効率よく電子伝達のエネルギーとして使用された可能性が高い。したがって、PEFによって電子伝達が効率よく行われ、化学エネルギーであるATPやNADPHの生成が上昇した可能性が示唆される。次に、Aの活性要因としては、葉緑体外部からのCO₂の取り込み上昇、ルビスコ（炭素反応においてCO₂の入り口となるCO₂固定段階で働く酵素タンパク質）の活性化によるCO₂取り込み上昇、ETR上昇による化学エネルギー生成上昇など複数の可能性が考えられる。

3. 光合成不活性

ETRとAが減少しNPQが増加する場合を光合成活性と定義し、それをもたらすPEF強度と周波数は1.0 kV/cmおよび1000 ppsと、強い電気ストレスである。

NPQは放熱の変動を示すパラメータであり、放熱が大きくなると光吸収は減少する。炭素反応における炭素固定には、化学エネルギーが必要である。逆に、カルビンサイクルへのCO₂供給が遅れると炭素固定が行われず、炭素反応の活動が停止してしまう。このとき、PSIIに到達する光エネルギーを制御しないと、未使用の電子と化学エネルギーが発生し、炭素反応以外で利用される。その結果、酸素分子が活性酸素に変化し、葉緑体内の膜脂質や酵素にダメージを与える。これを防ぐための仕組みが放熱である。光エネルギー吸収後のNPQの変化は、PSIIへエネルギーが伝達されるカロテノイドのキサントフィルサイクルなどを介した熱放散により、PSIIへのエネルギー伝達効率に影響を与えると考えられている。PEF印加によりNPQが増加したことから、PEFがカロテノイドのpH値に影響し、脱エポキシ化酵素の活性を促し、エネルギーが熱放散に多く分配され、NPQの上昇に伴い電子伝達へのエネルギー分配が減少した可能性が考えられる。その結果、ATPやNADPHの生成が行えず、Aの減少に影響した可能性がある

と考えられる。

4. 最後に

植物は、それほど遠くない将来に長期有人宇宙旅行を可能にする制御生態ライフサポートシステム (CELSS) に不可欠と考えられる。地球とは大きく異なる宇宙空間の環境で、限られた面積で大量の植物を急速に栽培するには、密閉された栽培空間が必要であり^[7]、成長が容易で可食部に優れた栄養を提供するレタスは、CELSSでの栽培の候補と見なされている^[8]。PEFによるレタスの生育や光合成制御が宇宙での人間活動に役立つ日の到来を目指して、研究を深めていきたい。

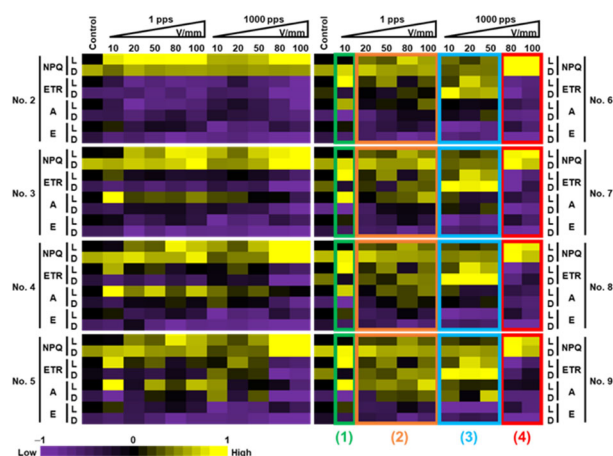


図1 パルス電界処理レタスの光合成パラメータに関するヒートマップ^[3]

Heatmaps of photosynthetic parameters for lettuce leaves treated with PEF. The heatmaps were drawn using the average values of 15 samples for the control and 5 samples for each PEF-treated group. For each measurement time point (No.) and photosynthetic parameter (NPQ, ETR, A, E), the maximum absolute value of the difference between the control samples and PEF treated samples was set to 1. L: light-acclimated PEF samples; D: dark-acclimated PEF samples.^[3]

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費19H05611の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 澁澤元治他, *電気学会雑誌*, **47**(473) (1927) 1259-1300.
- [2] T. Sonoda et al., *IEEE Transactions on Plasma Science*, **42**(10) (2014) 3202-3208.
- [3] D. Wang et al., *Agronomy*, **12**(2) (2022) 482.
- [4] B. B. Buchanan 他, *植物の生化学・分子生物学*, 学会出版センター (2005).
- [5] A. Stirbet et al., *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* **104** (2011) 236-257.
- [6] M.O.K. Azad et al., *Agronomy*, **10**(2) (2020) 28.
- [7] Y. Kitaya, *BSJ-Rev.* **11** (2020) 90-105.
- [8] C. Zeidler et al., *Open Agric.* **2** (2017) 116-132.