

パルスパワーによる植物・水産物の革新的機能性制御 とその学理深化

Novel function control of plant and marine products
by pulsed power and its scientifically deepening

課題番号：19H05611

高木 浩一（TAKAKI Koichi）

岩手大学・理工学部・教授



研究の概要（4行以内）

本研究では、パルスパワー技術をベースとして高精度時空間制御された高電場・プラズマ反応場を創出し、植物・水産物の革新的機能制御の実現と作用機序を礎とした学術深化を行う。時間領域としてナノ秒での反応場制御を利用して、生体を構成する水、たんぱく質、組織、生体そのものまで統括的に扱い、植物の活性制御、鮮度保持・食品機能性制御の機構解明を進める。

研究分野：電力工学関連

キーワード：パルスパワー、プラズマ、植物、食品、機能性

1. 研究開始当初の背景

近年、高電圧・静電気現象を、植物の発芽制御、生長促進、培地の生長阻害菌不活性化、キノコなどの子実体形成の促進、農産物・水産物の鮮度保持、タンパク質の立体構造の変化にもとづく食品機能性や発酵・酵素活性制御などへ利用する研究が広がっている。これまで多くの研究成果が報告されているが、その大半は実験事実に基づく報告や、装置開発に関するもので、高電圧・静電気現象の植物生理への影響の説明が可能なモデルはない。

2. 研究の目的

電場やプラズマが植物生理に与える効果を明らかにする手法として、1) 植物に対するストレス分類と数値化、2) ストレスレスポンスとしてシグナル伝達ルートの解明などが上げられる。これらの実現には、電場やプラズマ作用場によるストレスと、植物の発芽や生育、結実など各フェーズでの反応、また生鮮食品保存では、膜タンパク等の立体構造変化、菌活性変化、エチレンなど植物ホルモン感受の把握が必要となる。本研究目的は、電場・プラズマ作用場の高精度時空間制御が可能なパルスパワー電源・プラズマ装置を開発し、農業・食品保存に加えて、水産業や食の機能性に対象を拡張して、作用機序およびそれらの骨格をなすモデル構築になる。

3. 研究の方法

研究目的の実現のため、3つの項目について研究を進める。項目1；電界・プラズマ作用

場の創出およびその時空間制御では、SiCスイッチングデバイスなどを用いた、本研究に適したパルスパワー電源、またその生体負荷とのインピーダンス整合を実現し、ナノ秒、マイクロスケールの高精度に時空間制御された反応場を創生する（図1）。項目2；電界・プラズマによる植物の活性制御とその機序解明では、パルス電場やプラズマ照射後の種子や植物体のレドックス変移やエピジェネティクス、遺伝子発現の解析などを通して活性化の機序を明らかにする。項目3；電界・プラズマによる農水産物の鮮度保持・食品機能性制御とその機序解明では、液状食品内や空中浮遊菌に対する殺菌・静菌効果、植物ホルモン作用物質の発生抑制と分解を中心に、鮮度保持効果とその機構解明を進める。魚介類に対して、酵素や発酵微生物、膜タンパクなどの立体構造の変化、それらに伴う機能性変化を中心に、作用機序の解明を進める。

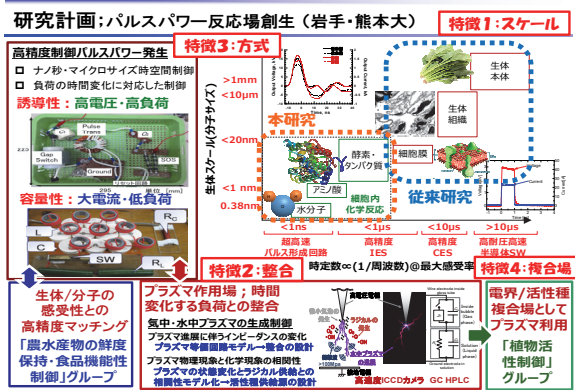


図1 実施項目1の全体図と対応する生体スケール

4. これまでの成果

項目①；電界・プラズマ作用場の時空間制御では、本研究に適した作用場創出を可能とする、SiC-MOSFET 素子 (13 kV耐圧) を用いた、操作性に優れた小型パルスパワー電源を開発した。出力電圧は数 kV~数十 kV、パルス幅は数十 ns である。気相の場合はプラズマ進展速度が約 1 mm/ns なので 100 ns 以下が非熱平衡 (低温) プラズマの生成条件となる。液相での進展速度は約 30 cm/ μ s と遅く、プラズマ反応場制御には、 μ 秒オーダーのパルスが必要になる。このため想定する反応場に合わせた電源設計を行い、開発した電源は設計通りの性能が出るよう対象場のプラズマリアクタを用いて評価を行っている。生体負荷を想定して、高インピーダンス整合性が高い誘導性エネルギー蓄積方式 (IES) を用いた。また約 55 kV、約 5 ns の電源で 1 気圧の空気中のストリーマ計測では、約 6 mm/ns と一般のストリーマより速い速度で進展し、電子のエネルギーも一般的なストリーマに比べて高いなど、加えて一般的なプラズマ反応場よりエネルギーが高い反応場が実現できている。

項目②；植物生理活性制御では、カリキンを由来芽発進を想定して、カリキン由来遺伝子の酸素プラズマ照射などに伴う増加の様子や、カリキン類が生成される機序はラジカルが種皮の酸化を引き起こし、テルペノイド系の植物ホルモンが産生された結果、生じた可能性が強いことなど、種皮の FTIR 解析などがから情報を得ている。このほか、地上系に対するパルス電界による光合成促進では、電界による光合成活性は、ETR、A、Eが増加することから、ストロマ反応でルビスコ (RubisCO；リブローズ-1,5-ビスリン酸カルボキシラーゼ) 活性などによる CO₂ の取り込み速度の上昇、化学エネルギー生成上昇によること、光合成不活性化はチラコイド反応で脱エポキシ化に伴う熱放散が機序となる。

項目③；農水産物の鮮度保持・食品機能性制御では、パルス電界により酵素活性が変化すること、また活性変化は印加電界強度 (投入エネルギー) に依存すること、たんぱく質の三次構造の変化と酵素活性は相関があることなどを明らかにした。水の核形成 (氷結) について、交流電場は核形成の頻度因子へ主に作用すること、微小ではあるが自由 (ギブス) エネルギーにも作用することなどを明らかにした。水産物の生鮮状態での保存時での電界印加で、呼吸速度や心拍数など生理 (酵素) 活性へ作用することも明らかにした。

5. 今後の計画

項目①；電界・プラズマ作用場の時空間制御では、生体負荷の時間応答性やインピーダンス変化を踏まえ、本研究実施に適した電圧波形およびプラズマパラメータとなるように、電源の回路パラメータなどの再評価を行い、

その結果をもとに改良する。また複数の電源やプラズマを統合的に制御して時空間制御性を高める。項目②；植物生理活性制御では、発芽ではカリキン類由来の発芽促進を含めて遺伝子発現などの解析を進め、シグナル伝達など、電界・プラズマ刺激起点のレスポンス経路を調べる。光合成促進についても、明順応および暗順応の植物を用いて、異なる電界パラメータによる評価などを進める。地下茎は土・養液での化学反応、またその生成物が根から吸収されて起こる植物生理を中心に機序解明を進める。項目③；農水産物の鮮度保持・食品機能性制御では、殺菌へ至る機序解明やたんぱく質の構造変化、水分子の氷核形成に対する電場の影響を中心に研究を進める。特に、タンパク質の二次構造の変化や、ATP 分解酵素 (ATPase) の活性を中心に、付随して生じる pH 変化、鮮度指標としての K 値などを中心に進める。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. T. Ohshima, K. Takahashi, K. Takaki, et al., "Mechanism of pulsed electric field enzyme activity change and pulsed discharge permeabilization of agricultural products", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **60**, 2021. (in press)
2. K. Takaki, K. Takahashi, D. Hamanaka, R. Yoshida, T. Uchino, "Function of plasma and electrostatics for keeping quality of agricultural produce in post-harvest stage", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **60**, 010501(13pp), 2020.12.
3. K. Takaki, N. Hayashi, D. Wang, T. Ohshima, "High-voltage technologies for agriculture and food processing", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **52**, 473001(42pp), 2019.9.
4. K. Takaki, "Pulsed Power Applications for Agriculture and Food Processing", 4th Asia Pacific Conference on Plasma Physics, PL-15, oral (plenary), online, 2020.10.28.
5. 津本浩平 (監修), 高木浩一他 130 名, "膜タンパク質工学ハンドブック", NTS 出版, 2020.4.
6. 阿部一博 (監修), 高木浩一他 53 名, "青果物の鮮度評価・保持技術", NTS 出版, 2019.12.
7. 堀越智 (監修), 高木浩一他 29 名, "パルスパワーの基礎と産業応用", NTS 出版, 2019.8.
8. T. Tanino, T. Ohshima, et al., "Inactivation of *Bacillus subtilis* spores on the surface of small spheres using low-pressure dielectric barrier discharge", *Food Control*, **109**, 106890(6pp), 2020.3.
9. D. Wang, T. Namihira, "Nanosecond pulsed streamer discharges: II. Physics, discharge characterization and plasma processing", *Plasma Sources Sci. Technol.*, **29**, 023001, 2020.2.
10. N. Tonmitr, A. Yonesu, N. Hayashi, "Surface Sterilization using LF-Microwave Hybrid Plasma", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **60**, SAAE01, 2020.

7. ホームページ等

<https://pplab.eec.iwate-u.ac.jp/>