農水食分野での高電圧・プラズマ利用*

High-Voltage and Plasma Applications for Agriculture, Fishery and Food Processing

高 木 浩 一**, ***
TAKAKI Koichi

高 橋 克 幸**, ***
TAKAHASHI Katsuyuki

Abstract High-voltage and plasma applications for agriculture, fishery and food processing are described in this paper. Repetitive operated compact pulsed power generators with a moderate peak power were developed for the applications in several stages of agriculture and food processing. Pulsed high-voltage produces intense high-electric field which can cause some biological effects such as stress response (stimulation) and electroporation. Types of pulsed power that also have biological effects are caused with gas and water discharges which include reactive species such as ROS and RNS. The repetitive pulse discharge was used for promoting growth of the vegetables and fruits. The growth rate of the vegetables and sugar content in the strawberry harvested after the cultivation increased by the plasma irradiation to the hydroponic solution. The leaf size of the plants increased with plasma treatment time. Number of colony forming units (CFU) of *R. solanacearum* in the liquid fertilizer decreased from 10^7 to 10^2 CFU/mL by the plasma treatment. Seedlings with the plasma treatment were relatively healthy; in contrast, all seedlings in the positive control wilted and died from infection of *R. solanacearum*. The yielding rate of Shiitake mushroom (*L. edodes*) was improved with the high-voltage stimulation in fruit-body formation phase. The AC high-voltage keeping freshness for a relatively longer period of agricultural. The electrostatic effects can contribute to remove airborne bacteria and fungi spore from the storage house and container. This removal contributed to reduce the infection risk with fungi and bacteria. These applications can contribute a food supply chain in the world.

Keywords: Pulsed power, Agriculture, Ethylene removal, Growth enhancement, Freshness

1. 緒 言

高電圧や放電プラズマは、古くから農業分野でも利用されている。1746年には Mainbray がモモ科の低木に電流を流し、成長の促進や、開花が早まることを報告している。1748年には Nellet が帯電した電極上に植物を置き、発芽や生育が早まることを報告している[1]。日本でも、1920年頃に電気栽培の試みがなされ、適度な電界で成長が促進されることが報告されている[2]。

近年、電気の農学への利用は多岐にわたっている。品種改良における電気泳動や細胞融合[3]、電気穿孔法による DNA の注入[4]、植物の発芽制御

[5]、担子菌(きのこ類)での子実体形成促進[6]、液肥や固定培地の雑菌不活性化[7]、農薬の静電散布[8]、長期保存[9]、有用成分の抽出[10]、などがあげられる。特に、成長促進のための植物の電気処理は、特許の分類番号が割り振られており(A01G 7/04 成長促進のための植物の電気または磁気処理; A 電気処理)、多くの特許情報が開示されている。ここでは、高電圧・プラズマの農水系応用として、水中放電による植物の生育促進、電気刺激によるキノコの収量改善、パルス電界を用いたブドウ表皮からのポリフェノール抽出について述べる。

* 2019.11.5 受付

** 岩手大学理工学部システム創成工学科 〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5
TEL: (019)621-6941 FAX: (019)621-6941 E-mail: takaki@iwate-u.ac.jp

*** 岩手大学次世代アグリノベーション研究センター 〒020-8550 岩手県盛岡市上田 3-18-8

2. 植物の生育促進および病原菌の不活性化

液肥や土壌などの培地にプラズマを照射することで、イオン (O_2^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- など) や化学的活性種 (OH 、 O 、 N 、 O_3 、 H_2O_2 など) が発生し、培地に入りこむ。これらの一部は、植物の生育を促進または抑制する働きがある。一例として、Fig. 1 に、コマツナの栽培のために循環させる水 (蒸留水) に、パルス電源を用いて、毎日 10 もしくは 20 分ほど水中プラズマを発生させ、コマツナの生育を比較したものを示す[11]。栽培期間は 28 日である。栽培は赤玉土壌で行い、肥料は鶏糞である。図より、水中プラズマで生育が促進されていることがわかる。28 日間の栽培後収穫の乾燥重量を比較した結果、比較区の 0.011 g に対して、10 および 20 分間のプラズマ照射で、それぞれ 0.044 および 0.076 g となる。これらは比較区の 3.9 および 6.6 倍の収量増加に相当する。放

Fig. 1 Photographs of *Brassica rapa* var. *perviridis* cultivated for 28 days at (a) w/o plasma and with (b) 10 min. or (c) 20 min. of irradiation per day.

Fig. 2 Nitrogen concentration in chlorophyll of leaf for w/o plasma, 10 min. and 20 min. irradiations per day.

電で水中に発生する硝酸イオンは、10 および 20 分間の照射に対して 0.65 および 1.6 ppm であった。

Fig. 2 に、コマツナを 28 日間栽培した後の葉の葉緑素の窒素濃度を、葉緑素の色素計を用いて SPAD (Soil and Plant Analyzer Development) 値として評価したものを示す。葉に含まれる窒素量は、プラズマ照射により増加する様子が確認できる。硝酸イオンは、一般に窒素系肥料として、植物の根より吸収される。吸収された窒素イオンは葉まで移動して葉緑素の働きを強め、その結果、光合成が活発になり、生育が促進される。

Fig. 3 に、硝酸イオンを放電で発生する量と等量の濃度で水に混ぜ込み、プラズマを印加したものと同様に栽培したときの成長の様子を示す。プラズマにより生成される硝酸イオンと等量の硝酸を与えることで、生長が、プラズマ照射時とほぼ等しくなる。このことより、プラズマで生成された硝酸イオンが生長促進に寄与したことがわかる。

プラズマを植物が成長する培地に照射することで、植物の成長を阻害する菌や微生物の不活性化も可能となる。一例として Fig. 4 に、青枯れ病菌の有無によるトマト幼苗の成長の様子、また青枯れ病菌の培地にプラズマ処理した場合の成長の様子を示す[12]。プラズマ照射により、青枯れ病菌が不活性化され、トマト幼苗の成長が改善されることがわかる。このようにプラズマ照射により、植物の病気に対するリスクを軽減できる。

Fig. 3 Comparison of leaf growth at w/o plasma, 30 min. plasma irradiation and adding 7 ppm HNO₃ as fertilizer into the circulated water.

Fig. 4 Photographs of the seedlings of experimental sections of control. (-) Negative control; (+) positive control; and discharge plasma treatment on the initial, sixth, and 12th day.

3. 担子菌の子実体形成；キノコ生産性向上

きのこの増産に高電圧を用いる技術開発も、1980年代より研究開発が進められてきた[13]。Fig. 5に、電圧印加前後の、きのこ菌糸の変化の様子を示す。菌糸に電界が加わると、菌糸の内部が負電位を持つためクーロン力や、誘電分極等による力がかかる。このため、菌糸が動き、その一部は木の繊維との間のせん断応力等により、断裂など損傷を受ける（矢印部）。これらはキノコへの刺激として働き、膜状菌糸やキノコ原基の形成などを引き起こす。このメカニズムについては、菌糸が分泌する疎水性たんぱく質（ハイドロホビン）の、ポリメラーゼ連鎖反応（PCR）を用いた解析などで確認できる[14]。

Fig. 5 Typical scanning electron microscope (SEM) images of *L. edodes* hypha without (left) and with (right) electrical stimulation.

Fig. 6 Typical photograph of the cultured *L. edodes* with (bottom) and without (top) electrical stimulation.

Fig. 7 Total weight of cultured *L. edodes* for various electrical stimulation conditions. The total yields are 167, 322, 319, 243, 317 g for control, 50 kV-1 time, 100 kV-1 time, 125 kV-1 time, 50 kV-50 times, respectively.

キノコ菌糸が十分に成長したホダ木や菌床（おが粉を固めたもの）にパルス電圧を印加することで、上記のメカニズムで子実体（キノコのかさ）形成を促進できる。Fig. 6に、シイタケのホダ木にパルス高電圧を加え、子実体形成の違いを観察した結果を示す。写真より、電気刺激を施したホダ木に、数多くのシイタケが確認できる。Fig. 7に、ホダ木一本当たりのシイタケの収穫量の比較を示す。ホダ木は長さ 90 cm であり、ホダ木の木口面に釘を約 7 cm 打ち込み、一方をパルス電源の出力に接続して、一方を接地した。パルス電圧の印加条件は、電圧印加なし（図中 control と表示）、50、90、125 kV×1 回、50 kV×50 回印加とした。縦軸は各条件におけるホダ木一本あたりの収穫量を表し、4 シーズン分の収量の合計である。全体をみると 50 kV×50 回印加条件において最も

収穫量が多く、印加なしの条件の約 1.9 倍となる。電圧印加の条件中では 125 kV で収穫量が最も少なく、電気刺激に適した電圧の大きさがあることがわかる。ナメコ、クリタケ、タモギダケ、マンネンタケ、はたけシメジなど、いろんなキノコで効果がみられること[15]、浸水刺激など別の刺激との組み合わせで、さらに大きな効果が得られることなども、明らかになっている[13]。

4. 静電集塵による防カビおよび鮮度保持

農産施設の空間内は塵埃が多く、空中浮遊菌（細菌・真菌）濃度は高いことが知られている。浮遊細菌や浮遊真菌は、農産物に付着することで腐敗や、保存過程や流通過程での交差汚染を促進させる。したがって、農産施設内の空気洗浄は農産物の微生物制御でたいへん重要で、農産施設に限らず農産物や食品を保存する空間の空中浮遊菌の捕集は、農産物や食品のカビなどによる腐食を防ぎ、鮮度を維持することにつながる[16]。

Fig. 8 に、線対円筒（内径：36.0 mm）の同軸電極構造において、中心の線電極への印加電圧を変化させた際の集じん効率を示す[17]。印加電圧 0 kV のとき、リアクタ中央の放電電極に多数の粉碎粒の付着し、接地電極（円筒電極）にほとんど粉碎粒が付着しなかった。放電電極への付着は、衝突および Van der Waals force による付着や、サンプルの摩擦帯電による付着と考えられ、その結果として 0 kV での集じん効率が 23.4% になったと考えられる。一方、電圧を印加すると放電電極への付着がなくなり、荷電されてクーロン力を受けた粉碎粒が接地電極に付着した。以上より、

Fig. 8 Total Physical collection efficiency of ESP under the various applied voltages. The error bars represent standard deviations ($n=3$).

Fig. 9 Typical photographs of 10-days storage strawberries without (left) and with (right) AC voltage.

空中浮遊物質の静電捕集および流入空気の清浄化が可能となった。なお図中実線はサンプルの粒子の誘電率と粒径を、Deutsch の式に代入して粒子荷電量を算出し、部分粒子捕集率から集じん効率を計算した値である[17]。計算値は実験値をよく表現していることが分かる。計算より集じん効率は粒子径および粒子付近の電界に大きく影響されることが示され、これは電気集じん装置のスケールアップに資する知見となる。

Fig. 9 に、いちごの保存状態を交流電場の有無で比較した結果を示す。保存温度は、電場なしは 5℃、ありは 9℃である。実験では、交流 50 Hz、10 kV 出力のトランスを組んでいる市販品の保存庫（氷感庫；（株）フィールテクノロジー）を用いた。図より、電場なしのいちごは、5 日後よりカビが発生し、10 日後はかなりカビが広がっている。交流電場ありでは、カビの発生は確認できない。静電気の防食効果が確認できる。

5. 交流電場を用いた水産物の鮮度維持

生鮮食品の長期保存・鮮度維持技術は、特に水産業のフード・サプライチェーンで重要となる。水産物の鮮度維持には、冷凍もしくはチルド（冷蔵）保存が用いられる。チルド保存では食品の栄養素の低下が起こる、冷凍に比べて長期保存には不向きなどの欠点を有する。冷凍は長期保存が可能で、栄養素が比較的保持できる。しかし、冷凍時の氷晶による組織破壊が進行し、解凍時に分離溶出する液汁（ドリップ）などで品質の劣化が引き起こされる。温度制御や磁場利用で過冷却を実現する Cells Alive System (CAS) 冷凍など、解凍後のドリップが少なく、食感も損なわれない冷

Fig. 10 Typical photographs of 3-days storage sea urchin with (left) and without (right) AC voltage.

Fig. 11 Protein release from storage sea urchin as a function of storage period with (+) and without (-) AC voltage.

凍・解凍技術もあるが、装置が高価、ランニングコストが高い等の欠点を有する。交流電場を鮮度維持に活用する技術は、装置が安価で、消費電力も小さく、低ランニングコストとなる。ここでは、交流電場を用いた鮮度保持効果について事例を用いて紹介する。

Fig. 10 に、ウニのチルド保存時における電場の有無により比較した結果を示す[18]。保存温度は電場の有無にかかわらず -2°C であり、塩分濃度を3%にしたものを、保存水として用いている。写真では色などの変化はわかりにくいものの、電場を印加しなかったものには、腐食が進んだ時に細胞膜の透過性が高まることにより生じるドリップの流出が見られる。官能評価を行ったところ、電場印加時のものは、平均して0.5ポイントほど高い結果となった。ウニの細胞膜からの漏えいタンパク（ドリップ）量を、電場の有無で比較したものをFig. 11に示す[19]。漏えいタンパク量は、SDS-PAGEを用いた電気泳動計測により測定した。図より、電場を印加することで、保存1日目以降の漏えいタンパク量が減少している様子が

Fig. 12 Gel electrophoresis profiles. The red rectangle indicates the range of proteins with molecular weight less than 70000. The green rectangle indicates bands caused by the decomposition of proteins. Here the experimental conditions of samples are described using the notation [output voltage during freezing/output voltage during defrosting].

Fig. 13 Ratio by weight of the drip eluted from purple sea urchins relative to their edible part. Here the experimental conditions of the samples are described using the notation [output voltage during freezing/output voltage during defrosting].

わかる。

漏えいタンパク質の消化（分解）に対する電場の影響を調べるために、凍結・解凍過程における小分子量タンパクの占める割合を調べた。Fig. 12に、SDS-PAGE後のゲルの泳動像を示す[19]。“100”は電場印加を示し、“/”の前後は、それぞれ凍結前および解凍時の電場の有無を示す。図より、凍結時に交流電場を印加しなかったグループのドリップ中に含まれるタンパク質は、分子量15万付

近の分子の量が減少し、分子量7万以下の分子が増加している。このことはタンパク質分子の小分子化すなわち消化（分解）が起こっていることを示す。Fig. 13 に、分子量7万以下のたんぱく質の割合を示す[19]。凍結時の電場印加により、分子量約7万以下のタンパク質の出現は、印加しなかった場合の1/2以下に減少した。凍結前の電場印加により、タンパク質消化は抑制されることがわかる。交流電場で細胞膜のタンパク質の二次構造の変化が生じていることが明らかにされている[20]。この二次構造の変化は、消化酵素を入れた際に生じる分解速度へも影響を与えることが

Fig. 14 Increase rate of polyphenol release from grape skin as a function of voltage pulse width at two different voltage amplitudes.

Fig. 15 Optical microscopic images of reaction inside the grape skin cell at various applied voltage pulse widths.

わかっており、この結果、鮮度が失われる速度が変化するものと考えられている。

6. パルス電界によるポリフェノール抽出

高電圧は食品加工における有効成分抽出制御にも利用される[21]。一例として、ワイン醸造過程を模擬してブドウ表皮にパルス電界をかけた場合のポリフェノール抽出量の変化を Fig. 14 に示す。印加電圧は 10, 20 kV であり、電極間隔は 1cm、ブドウ品種は山梨県産の巨峰である[22]。総投入エネルギーを 5 kJ 一定として、パルス幅を変化させた。パルスの繰り返しは 20 pps (pulses per second) としている。いずれの印加電圧においても、ポリフェノールの抽出量は増加しており、同じエネルギーの場合、パルス幅を増加させることで抽出量を増やせることがわかる。Fig. 15 に、各パルス幅におけるブドウ表皮の細胞内写真を示す。電圧印加で細胞内のポリフェノールを含む色素が外へ流出し、その割合はパルス幅の増加に対して増えていることが確認できる。メカニズムは電気穿孔が主となる。

7. 結 言

本稿では高電圧・プラズマを活用した農水食分野への利用として、植物の生育を取り巻く環境制御による生育改善、また得られた農産物や水産物の鮮度保持について解説した。各応用とも、近年の半導体素子技術の進歩から電源もコンパクトになり、適用事例も増えている。これらは、これまでの課題に対するブレークスルーへつながるポテンシャルを有しており、フード・サプライチェーンへの貢献が期待できる。

謝 辞

本稿で紹介した研究成果は、多くの共同研究者のご協力のもとに行われたもので、ここに厚く御礼申し上げます。本研究の一部は科研費（基盤研究(S)：19H05611）の支援を受け行われた。

参考文献

- [1] Shigemitsu, T., Effects of Electric Fields, Air Ion and Corona Discharge on Plants, J. Plasma and Fusion Research, Vol. 75(6), 659-665 (1999).
- [2] Shibusawa, M. and Shiba, K., Effect of Electric Discharges on the Rate of Growth of Plants, The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 47, 1259-1300 (1927).

- [3] Zimmermann, U., Electric Field-Mediated Fusion and Related Electrical Phenomena, *Biochemica et Biophysica Acta*, Vol. 64, 227-277 (1982).
- [4] Institute of Electrostatics Japan ed., *Handbook of Electrostatics*, Ohmsha Ltd, Tokyo (1998).
- [5] Eing, C. J., Bonnet, S., Pacher, M., Puchta, H. and Frey, W., Effects of Nanosecond Pulsed Electric Field Exposure on *Arabidopsis thaliana*, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 16, 1322-1328 (2009).
- [6] El-Esawi, M. A. (Ed.), Takaki, K., Takahashi, K. and Sakamoto, Y., *Plant and Mushroom Development*, Intech Open Ltd. (2018).
- [7] Takahashi, K., Saito, Y., Oikawa, R., Okumura, T., Takaki, K. and Fujio, T., Development of Automatically Controlled Corona Plasma System for Inactivation of Pathogen in Hydroponic Cultivation Medium of Tomato, *J. Electrostatics*, Vol. 91, 61-69 (2018).
- [8] Law, S. E., *Agricultural Electrostatic Spray Application: a Review of Significant Research and Development during the 20th Century*, *J. Electrostatics*, Vol. 25, 25-42 (2001).
- [9] Takaki, K., *Electrostatic-Discharge in Air for Keeping Freshness of Agricultural Products*, *J. Institute of Electrostatics Japan*, Vol. 41, 264-269 (2017).
- [10] Min, S., Evrendilek, G. A. and Zhanget, H. Q., Pulsed Electric Fields: Processing System, Microbial and Enzyme Inhibition, and Shelf Life Extension of Foods, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 35, 59-73 (2007).
- [11] Takaki, K., Takahata, J., Watanabe, S., Satta, N., Yamada, O., Fujio, T. and Sasaki, Y., Improvements in Plant Growth Rate Using Underwater Discharge, *J. Phys. Conf. Series*, Vol. 418, 012140 (7pp) (2013).
- [12] Okumura, T., Saito, Y., Takano, K., Takahashi, K., Takaki, K., Satta, N. and Fujio, T., Inactivation of Bacteria Using Discharge Plasma under Liquid Fertilizer in a Hydroponic Culture System, *Plasma Medicine*, Vol. 6, 247-254 (2017).
- [13] Takaki, K., Takahashi, K. and Sakamoto, Y., Chap. 7; High-Voltage Methods for Mushroom Fruit-Body Developments, In *Plant and Mushroom Development* (ed: Mohamed A. El-Esawi), IntechOpen Limited, 95-113 (2018).
- [14] Takaki, K., Yoshida, K., Saito, T., Kusaka, T., Yamaguchi, R., Takahashi, K. and Sakamoto, Y., Effect of Electrical Stimulation on Fruit Body Formation in Cultivating Mushrooms, *Microorganisms*, Vol. 2, 58-72 (2014).
- [15] Takaki, K., Yamazaki, N., Mukaigawa, S., Fujiwara, T., Kofujita, H., Takahashi, K., Narimatsu, M. and Nagane, K., Effect of Pulsed High-voltage Stimulation on *Pholiota nameko* Mushroom Yield, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 115, 1062-1065 (2009).
- [16] Tsushida, T., Japan ed., *Food and Degradation*, Korinbook Ltd, Tokyo (2003).
- [17] Koide, S., Nakagawa, A., Omoe, K., Takaki, K. and Uchino, T., Physical and Microbial Collection Efficiencies of an Electrostatic Precipitator for Abating Airborne Particulates in Postharvest Agricultural Processing, *J. Electrostatics*, Vol. 71, 734-738 (2013).
- [18] Sato, T., Ohashi, T., Kawano, S. and Shirakashi R., *Advanced Physical Stimulation and Biological Response*, Yokendo Co., Tokyo (2017).
- [19] Ito, T., Kawamura, T., Nakagawa, A., Yamazaki, S., Syuto, B. and Takaki, K., Preservation of Fresh Food Using AC Electric Field, *J. Adv. Oxid. Technol.*, Vol. 17, 249-253 (2014).
- [20] Okumura, T., Yamada, K., Yaegashi, T., Takahashi, K., Syuto, B. and Takaki, K., External AC Electric Field-Induced Conformational Change in Bovine Serum Albumin, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 45, 489-494 (2017).
- [21] López, N., Puértolas, E., Condón, S., Álvarez, I. and Raso, J., Effects of Pulsed Electric Fields on the Extraction of Phenolic Compounds during the Fermentation of Must of Tempranillo Grapes, *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, Vol. 9, 477-482 (2008).
- [22] Hatayama, H., Koide, S., Takahashi, K., Kawamura, Y. and Takaki, K., Effects of Nanosecond Pulsed Electric Fields on Agricultural Product, *J. Jpn. Society of Agricultural Machinery and Food Engineers*, Vol. 73, 135-141 (2011).