

高電圧・プラズマ技術の農業・食品分野への応用

*Agricultural and Food Processing Applications
of High-Voltage and Plasma Technologies*

高木 浩一 (岩手大学)

Koichi TAKAKI (Iwate University)

e-mail: takaki@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

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きた。すでに 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、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など報告されている[2]。

近年、電気の農学への利用は多岐にわたっている。例として、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[5,6]，担子菌（きのこ類）での子実体形成促進[7-15]，液肥や固定培地の雑菌不活性化[16-19]，消毒液や農薬の静電散布[20]，長期保存[21-26]，有用成分の抽出[27-30]，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。

本記事では、高電圧の農業・食品応用として、電気刺激によるキノコの収量改善や種子の発芽制御や、電界やプラズマを用いた植物の生育促進、果実等からの有用成分抽出、食品の鮮度保持などについて述べる。

2. 電気刺激でのキノコ収量の改善

「カミナリが鳴るとキノコが生える」といった言い伝えや報告は、古くはギリシャ時代の文献の中に記載されるなど、世界中で枚挙にいとまがない[31]。パルス電圧を加えた場合の変化の一例として、図 1 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、

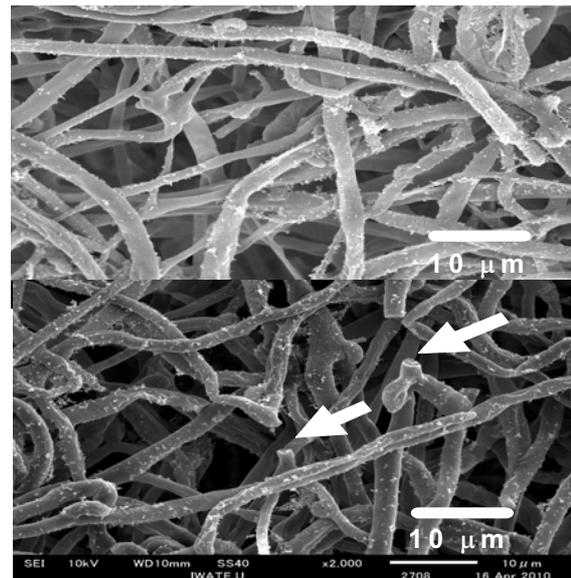


図 1 電圧印加前後の菌糸の電子顕微鏡写真
(上：電圧印加なし，下：あり)

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[12]。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（ヒドロロホビン）を、ポリマーゼ連鎖反応（PCR）を用いた解析などで確認できる[14]。

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。図 2 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[14]。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。図 3 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、50kV×50 回印加とした。



図2 電気刺激の有無によるシイタケ生育の比較 (上：電圧印加なし，下：あり)

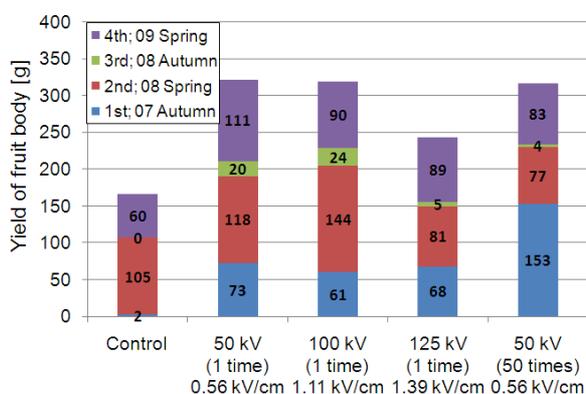


図3 印加電圧条件によるシイタケ収量変化

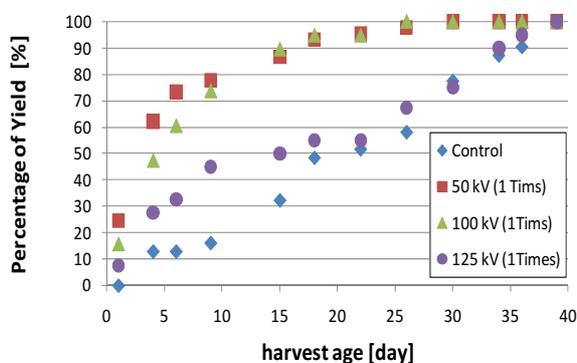
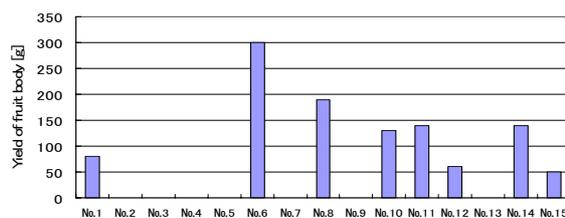


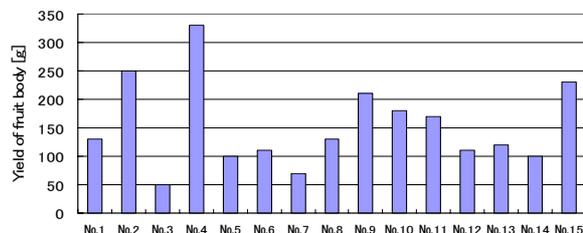
図4 印加電圧条件による総収量の時間変化

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倍の収穫となる。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。

図4に、4シーズン目の子実体収穫の時間変化を示す。0日は収穫開始日を示す。縦軸は、図3に示す4シーズン目の総収量を100%として、各



(a) 50 kV X 1 time



(b) 50 kV X 50 times

図5 各ホダ木の収量の刺激回数による比較

日数における収量の総収量に対する割合になる。4シーズン目の総収量は、印加なし、50, 100, 125 kVの条件でホダ木1本当たり60, 111, 90, 89gである。図より、50 kVおよび100 kVの電圧を印加したホダ木は、電圧を印加しないものより早い時期で多くの割合を収穫できていることがわかる。15日目の収穫は、controlで50%に対して50 kV印加では86%となっている。

図5に、50 kVを1回印加と50回印加かけた場合の、15本のそれぞれのホダ木より収穫されたシイタケの重量を示す。印加なしの場合、15本のホダ木のなかで、子実体は1本のみ収穫となったが、1回の印加で8本から収穫でき、50回の印加ですべてのホダ木から収穫できるようになる。そのほか、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[13]、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。

3. 高電圧による発芽制御

電磁界と植物の発芽・成長との関係は、古くから調べられており、書籍などで紹介されている[32]。電気刺激に対する植物の反応は、1) 電流の方向と無関係に植物固有の運動をする傾電性、2) 電流に対して一定方向に屈曲が起こる屈電性や、3) 電界や荷電粒子により発芽時期や生育速度が変わるなどがある[1]。一例として、図6に、水を含ませた脱脂綿上のカイワレ大根(アブラナ科)種子に、

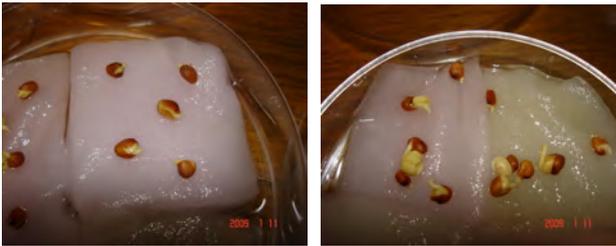


図6 電気刺激の有無によるカイワレ大根の発芽の比較（左：電圧印加なし，右：あり）

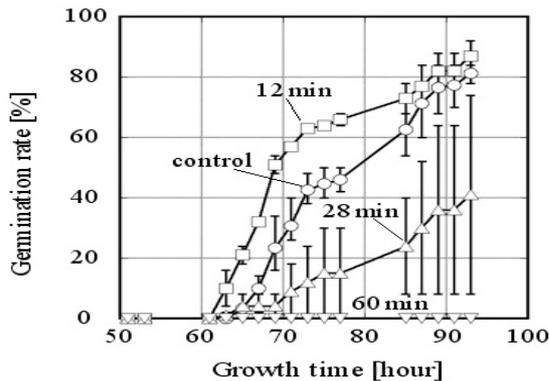


図7 パルス放電処理時間を変化させたときの栽培時間と発芽率の関係[33]

数秒程度放電印加による刺激を行い、1日放置した後の発芽の様子を、刺激なしのものと比較したものを示す。電気刺激により、発芽が早まっている様子が写真からもわかる。図7に、シロイヌナズナ（アブラナ科）種子に対するパルス放電印加による発芽率の変化を示す[33]。電極間隔を2mmとして5kVで充電したケーブルで放電を生成し、空気雰囲気中の湿潤状態で12、28、60分処理したときの栽培時間と発芽率の関係になる。ここでcontrolは放電処理をしていない未処理の種子を示している。75時間の結果を見ると、controlに比べて放電時間12分の発芽率は高く、放電時間28分の発芽率は低くなっている。また、放電時間60分では種子が発芽することはなかった。このことから、植物種子に放電を適度な時間曝露すれば発芽は促進され、放電を過度な時間曝露すれば発芽は抑制されることがわかる。これらの効果は、グラジオラスなど、多くの種類での報告がある[34]。メカニズムについては、雰囲気ガスを変えると効果に大きな開きが出ることから、放電で生じた硝酸イオン（NO₂⁻、NO₃⁻）などが発芽を促進すると考えられている[1, 32, 35]。

4. プラズマを用いた成長促進・減肥効果

植物の成長促進への高電圧・パルスパワーの利用は、大気環境への高電圧印加、土壌や液肥などの培地への高電圧印加に分けられる。高電圧の作用として、培地や大気環境中の病原菌や成長阻害菌の不活性化や、植物そのものに作用して成長速度を変えるものがある。成長阻害菌や植物に作用するものも、電界や電流、高電圧によって生じたイオン（O₂⁻、NO₂⁻、NO₃⁻など）や化学的活性な粒子（OH、O、N、O₃、H₂O₂など）などがある[1]。

植物が伸びている環境に高電圧を印加すると、植物の先端などにコロナ放電が発生し、電流が流れる。これらは電流の大きさによって、植物の成長に異なる影響を与える。一般に、10μA以上では植物体および葉の破壊が起こる。10nA～1μAでは、イオンによる乾燥等の影響で、葉の障害や生育の抑制などの負の効果が表れる。10⁻¹⁵A～1nAでは、成長促進や青果物の収量増加などの正の効果が表れ、10⁻¹⁶A以下では効果は表れない[35]。日本でも、澁澤らによって1920年頃、トウモロコシ、ソバ、えんどう、小麦、ごぼう、大豆、ネギ、大根などに、21kVの交流電圧を、植物の先端から25cm離して、1日4時間程度印加して、1～8割程度の増収を報告している[2]。電気栽培に関する様々な試みがなされ、適度な電界で成長が促進されることなどが報告されている。白らは、トマトの成長点付近に、+18kVの直流高電圧を印加し、イオン濃度を14×10⁶cm⁻³とすることで、比較区の収量49kgに対して、139.4kgと、285%の増収となることを報告している[36]。

液肥や土壌などの培地にプラズマを印加することで、イオン（O₂⁻、NO₂⁻、NO₃⁻など）や化学的活性種（OH、O、N、O₃、H₂O₂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を有する。一例として、コマツナの栽培で散布する水（蒸留水）にパルス高電圧で、毎日30分ほど放電を発生させ、コマツナの生育を比較したものを、図8に示す。栽培期間は、45日になる。栽培はポットでの赤玉土壌で、肥料は鶏糞である。図より、水中放電により、生育が促進されていることがわかる。乾燥重量の比較では、比較区の0.146gに対して、0.934gと6.4倍の収量増加になっている。放電で水中に発生するイオンは、NO₂⁻で0.68ppm、NO₃⁻で7.17ppmであった。



図8 液中放電の有無によるコマツナの生育の比較 (左：比較区，中央：バブリングのみ，右：バブリング+放電)

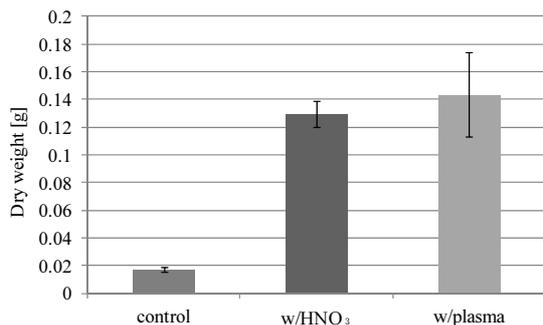


図9 液中放電の有無および硝酸添加によるコマツナの乾燥重量の比較 (左：比較区，中央：硝酸添加，右：放電)

図9は、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、収量を乾燥重量で比較したものである。等量の硝酸を混ぜ込むことで成長がおおよそ等しくなっていることから、プラズマで生成された硝酸イオンが成長促進の理由となっていることがわかる。プラズマを印加することで、水中の一般生菌数も、対数値で5.72 CFU/mLから、1.85 CFU/mLと大きく減少した。これは植物の病気のリスクを軽減することにつながる。

5. 高電圧による鮮度保持や成分抽出

青果物や食品を長時間放置すると、腐敗細菌、真菌、酵母など微生物によって、有機物が分解される、腐敗が起こる。このため、青果物や食品の鮮度を長時間にわたり保つためには、腐敗菌の不活性化および殺菌が必要になる。一般的な保存法に、冷蔵・冷凍保存や、凍結乾燥(レトルト処理)、煮沸殺菌、薬剤殺菌、燻製・発酵処理などがある。高電圧を用いた腐敗菌の不活性化や殺菌の場合、一般には、パルス高電界により、腐食菌の細胞膜に穴をあける(電気穿孔法)などを利用する。例えば、果汁など液状食品では、数十 kV/cm の電界

を、パルス幅は数十～数百 μ s のパルス幅で、数 kHz の繰り返し周波数で印加することで、一般生菌数は減少する[37]。これらは、加熱など他の手法との併用で、格段に殺菌効果が高まることなども報告されている(ハードル効果)[38]。

食品加工時のみではなく、一般生鮮食品の冷蔵保存時でも、交流電場による鮮度保持技術が用いられている。図10は、いちごの保存状態を交流電場の有無で比較したものになる。保存温度は、電場なしを5°Cで、電場有りを9°Cと、電場なしより温度としては不利な状況での試験とした。実験には、あらかじめ交流50Hz、10kV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)を用いている。図より、電場なしのいちごは、5日後よりカビが発生し、写真のように10日後だと、かなりカビが広がっている。比較して、交流電場ありの保存のいちごでは、カビの発生は確認できない。詳しいメカニズムは、まだ明らかにされていないが、電界分布の計算や、イオン計測、寒天培地を用いた計測などで、メカニズムの解明が進められている。

パルス電圧は、食品加工時の果汁抽出効率の改善や、抽出時の成分制御にも利用される[27-30, 39, 40]。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図11に示す。印加電圧は10, 20kV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[30]。総投入エネルギーを5kJ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



図10 交流電場の有無によるいちごの保存状態の差異

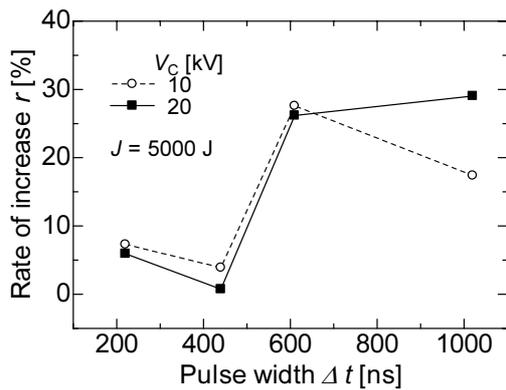


図 11 パルス幅とブドウ表皮からのポリフェノール抽出量の増加率との関係

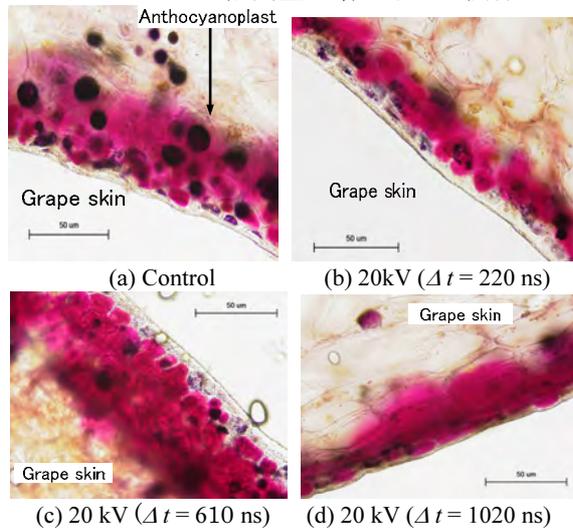


図 12 印加電圧のパルス幅とブドウ表皮細胞の状態変化の様子

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。図 12 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[30]。

6. おわりに

農業・食品加工分野への高電圧放電の利用として、植物の発芽・成長への直接刺激による制御、植物の生育を取り巻く環境制御による生育改善、また得られた農作物の食品加工の観点からまとめた。各応用とも、多くの研究報告がなされており、また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。データは蓄積されているが、バイオメカニズムに対する

パルス電界の関わりについては、不明な点が多い。今後、分野を超えた連携により、メカニズムの解明が望まれる。

参考文献

- [1] 重光司, 電界・空気イオン・放電の植物影響, プラズマ・核融合学会誌, **75-6** (1999) 659.
- [2] 澁澤元治他, 植物の生長に対する電気の影響に関する研究, **47** (1927) 1259.
- [3] Zimmermann, U, Electric Field-Mediated Fusion and Related Electrical Phenomena, *Biochimica et Biophysica Acta*, **64** (1982) 227.
- [4] 静電気学会編, 静電気学会ハンドブック, オーム社 (1998)
- [5] Wang, G. et al., The effect of high-voltage electrostatic field (HVEF) on aged rice (*Oryza sativa* L.) seeds vigor and lipid peroxidation of seedlings, *J. Electrostatics*, **67** (2009) 759.
- [6] Eing, C. et al., Effects of nanosecond pulsed electric field exposure on *arabidopsis thaliana*, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **16-5** (2009) 1322.
- [7] 金子周平他, シイタケほだ木の電気刺激に関する研究, 福岡県林業試験場時報, **335** (1987)
- [8] 實淵喜康他, シイタケ栽培技術の改良に関する研究 (電気刺激のキノコ栽培への応用, 九州電力総合研究所研究報告, **87004** (1987)
- [9] 出井利長他, 電気等の刺激によるシイタケ子実体の発生, 宇都宮大学農学部演習林報告, **24** (1988) 23.
- [10] 塚本俊介他, きのこと栽培へのパルス高電圧の利用, **79-1** (2003) 39.
- [11] Ohga, S. et al., Utilization of Pulsed Power to Stimulate Fructification of Edible Mushrooms, *Mushroom Sci.*, **16** (2004) 343.
- [12] Ohga, S., Iida, S., Effect of Electric Impulse on *Sporocarp* Eormation of *Ectomycorrhizal* Fungus *Laccaria Laccata* in Japanese Red Pine Plantation, *J. For. Res.*, **6** (2001) 37.
- [13] Takaki, K. et al., Effect of Pulsed High-Voltage Stimulation on *Pholiota Nameko* Mushroom Yield, *Acta Physica Polonica A*, **115-6** (2009) 1062.
- [14] Takaki, K. et al., Effects of Pulse Voltage Stimulation on Fruit Body Formation in *Lentimula*

- Edodes* Cultivation, Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol., **4-2** (2010) 109.
- [15] 工藤行蔵他, *Lentinus edodes* に与える交流定電圧の作用, 静電気学会誌, **23-4** (1999) 186.
- [16] 高木浩一, パルスパワー・プラズマの農業・食品分野への応用, 電学論 A, **130-10** (2010) 963.
- [17] 大嶋孝之他, 高電圧パルス処理による水中および土壌中の線虫不活性化, 静電気学会誌, **30-5** (2006) 236.
- [18] 水上幸治他, 養液栽培における植物有害菌の大気圧コロナ放電処理, 電学論 A, **126-7** (2006) 688.
- [19] Ebihara, K. et al., Development of agricultural soil sterilization using ozone generated by high frequency dielectric barrier discharge, J. Adv. Oxid. Technol., **9-2** (2006) 170.
- [20] Law, S.E., Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during the 20th century, J. Electrostatics, **25** (2001) 25.
- [21] 植村邦彦, 交流電界処理による食品の殺菌とその効果, 静電気学会誌, **31-2** (2007) 57.
- [22] Liang, Z. et al., Inactivation of spoilage microorganisms in apple cider using continuous flow pulsed electric field, LWT, **39** (2006) 350.
- [23] Min, S. et al., Pulsed electric fields: processing system, microbial and enzyme inhibition, and shelf life extension of foods, IEEE Trans. Plasma Sci., **35-1** (2007) 59.
- [24] 笹川秋彦, 食品工業, 光琳 (2007)
- [25] Mosqueda-Melgar, J. et al., Non-thermal pasteurization of fruit juices by combining high-intensity pulsed electric fields with natural antimicrobials, Innovative Food Sci. Eng. Technol., **9** (2008) 328.
- [26] Heinz, V. et al., Impact of temperature on lethality and energy efficiency of apple juice pasteurization by pulsed electric field treatment, Innovative Food Sci. Eng. Technol., **4** (2003) 167.
- [27] Praporscic, I. et al., Pulsed electric field enhanced expression and juice quality of white grapes, Separation and Purification Technol., **52** (2007) 520.
- [28] Corrales, M. et al., Extraction of anthocyanins from grape by-products assisted by ultrasonic, high hydrostatic pressure or pulsed electric field: A comparison, Innovative Food Sci. Emerging Technol., **9** (2008) 85.
- [29] Lopez, N. et al., Effects of pulsed electric fields on the extraction of phenolic compounds during the fermentation of must of Tempranillo grapes, Innovative Food Sci. Emerging Technol., **9** (2008) 477.
- [30] 畑山仁他, ナノ秒パルス高電界が農産物に与える効果—高電界印加後のブドウ表皮の細胞形態と漏出ポリフェノール総量—, 農業機械学会誌, **73-2** (2011) 135.
- [31] 特産情報きのこ年鑑編集部, きのこ年鑑〈2010年度版〉, プランツワールド (2010)
- [32] 岩本睦夫編著, 生物・環境産業のための非熱プロセス辞典, サイエンスフォーラム (1997)
- [33] 神子沢隆志他, 極性反転パルス放電の高速繰り返し曝露による植物種子の不活性化, 電気学会パルスパワー研究会資料, PPT-09-31, (2009) 53.
- [34] 高木浩一他, パルスパワー技術の農業・食品分野への応用, 電学論 A, **129-7** (2009) 439.
- [35] Murr, L.E., Plant Growth Response in an Electrokinetic Field, Nature, **207** (1969) 1177.
- [36] 白希堯他, 静電界・イオンによる農作物の成長促進効果に関する実験, 静電気学会誌, **8-5** (1984) 339.
- [37] Min, S. et al., Pulsed electric fields: processing system, microbial and enzyme inhibition, and shelf life extension of foods, IEEE Trans. Plasma Sci., **35-1** (2007) 59.
- [38] 清水潮, 食品微生物 I 基礎編; 食品微生物の科学, 幸書房 (2005)
- [39] Sack, M. et al., Electric measurement of the electroporation efficiency of mash from wine grapes, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., **16-5** (2009) 1329.
- [40] 斎藤司他, パルス電界を利用した大豆食品生産における加工時間短縮化の研究, 電学論 A, **129-3** (2009) 155.