

研究ノート

棒対水電極放電処理による植物栄養水の生成と 輪菊苗生長への適用

豊橋技術科学大学 林 尚弥、針谷 達
藤田 至、須田善行
滝川浩史

Preparation of Nutrient Water for Plants by Rod-to-Water Electrode Discharge Treatment and Its Application to Growth of Chrysanthemum Seeding

Naoya HAYASHI, Toru HARIGAI, Itaru FUJITA, Yoshiyuki SUDA, Hirofumi TAKIKAWA
Toyohashi University of Technology

Abstract

Chrysanthemums are conventionally grown using a soil cultivation method. However, cultivation conditions are often difficult to control. Recently, a hydroponic cultivation method, in which it is easy to control conditions, has attracted attention for the cultivation of chrysanthemums. For the growth of the plants it is necessary to provide nitrate ions as a source of nutrient. The nitrate ions can be generated in water by discharge between the water and the air. In this study, water with an increased nitrate ion concentration by rod-to-water discharge was given to chrysanthemums, and the growth of the chrysanthemums by hydroponic cultivation was observed. In water treatment by rod-to-water discharge, the pH of water decreased, and the nitrate ion concentration and conductivity increased with an increase of the discharge duration. After 15 days of cultivation of the chrysanthemums, the root lengths were measured. The root lengths of chrysanthemums given original tap water and water with HNO_3 were almost less than 4 mm, and half of the roots of the chrysanthemums given water treated by the discharge were more than 6 mm length.

Keywords: Chrysanthemum, Hydroponic cultivation, Discharge treatment, Nitrate ion, Root producing.

1. 緒言

日本の県別花き産出額第一位は愛知県である¹⁾。平成25年度における愛知県の花き産出額のうち、約35%を菊が占める¹⁾。特に愛知県田原市では輪菊の栽培が盛んである。

輪菊とは、一本の茎に一輪の花を咲かせる菊を指す。輪菊は挿し木の土壌栽培によって、その本数を増やす。挿し木とは、母株から茎を切り取って培地に植え、切断面から発根させて栽培する方法である。土からの養分や水分は根から吸収するため、茎から発根しない限り、輪菊は生長しない。そのため、発根過程における培地の管理が重要となる。土壌栽培は病原菌混入の可能性が高く、温度や栄養素といった土の状態が不安定になりやすい。輪菊は、つぼみの直径、茎の太さ、葉のつき方など、様々な要因で商品価値が決まるため、近年は培地の肥料濃度、pH、液温などの栽培条件

が制御しやすい水耕栽培が検討されている。

高価な真空装置を必要としない大気中プラズマ放電は、安価かつ容易なプラズマ放電処理方法として、幅広く利用されている²⁾。大気中プラズマ放電処理を行ったポリマー表面や水では、表面親水性や水中成分が変化する³⁻⁵⁾。水に対するプラズマ放電処理では、 O_3 、 H_2O_2 、OHラジカル生成による水中微生物の殺菌効果が報告されている⁶⁻⁹⁾。また、水中には硝酸イオンや亜硝酸イオンなども生成される⁷⁻¹⁰⁾。

植物の生長には、窒素の取り込みが必須であり、放電処理によって窒素化合物濃度が上昇した水を植物に与えることで、植物の生長が促進される^{11,12)}。これらの研究では、植物を栽培する土壌へ放電処理水を添加することで、放電処理水の効果を調査している。さらに、同様の放電処理水を用いたコマツナ水耕栽培においても、放電処理水の生

育促進効果が確認されている¹³⁾。

本研究では、輪菊の水耕栽培における放電処理水の有用性を評価するため、接地電極を水中に置いた棒対水電極放電を用いて処理した水を輪菊苗へ与え、輪菊の水耕栽培試験を行った。また、放電の様子を観察し、放電処理による水の変化を調べた。

2. 実験装置および実験方法

2.1 棒対水電極放電

実験装置の概略構成図を Fig. 1 に示す。高電圧電極には純タンクスチタン棒(ダイヘン、0830-016)を使用し、接地電極にはアルミニウムリボンを使用した。ビーカに精製水または水道水(200 mL)を入れ、水中に接地電極を配置した。放電処理前の高電圧側の棒電極先端から水面までの距離は 5 mm とし、印加設定電圧は 10 kV とした。また、ビーカ内の水は、回転速度 60 rpm としたマグネットスターラー(アズワン、CHS-180)により攪拌した。

Figure 2 に放電実験における電圧印加のタイミングチャートを示す。5 分おきに電圧印加を一時停止し、温度センサー付き pH 電極(佐藤商事、PE-03K7)をプローブとした水質チェックカ(佐藤商事、17SD)により、水温と pH を計測した。水質チェックカの pH 電極を導電率プローブ(佐藤商事、CDPB-03)に取り換えて、導電率を計測した。また、硝酸イオン濃度は、硝酸イオンメータ(堀場製作所、B-74X)を用いて測定した。電圧印加停止から 1 分後に再印加し、積算電圧印加時間が 30 分になるまで印加-停止-測定-印加のプロセスを繰り返した。放電の様子はビデオカメラ(Victor、GZ-MG330-S)で撮影した。

放電にともなう電極の変化と放電の関係性を調べるために、棒電極には未使用と一度放電実験に使用したタンクスチタン電極、水電極には精製水と水道水を用いて放電を行った。

発光分光分析には、プラズマモニター(Micropack、PlasCalc-2000-UV/VIS/NIR)を用いた。放電からレンズまでの距離を 30 mm とし、レンズから光ファイバーを通してプラズマモニターへ

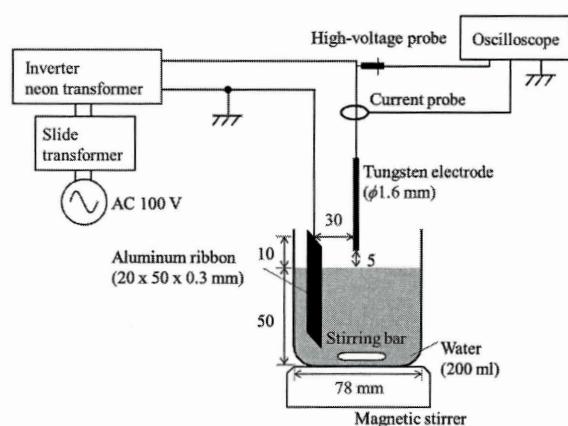


Fig. 1 Schematic diagram of discharge system.

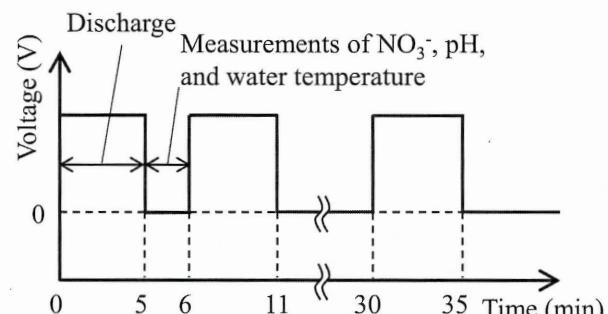


Fig. 2 Timing chart of voltage application.

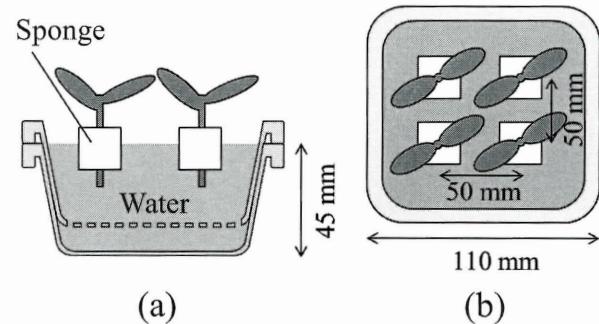


Fig. 3 (a) Cross-sectional and (b) top-view illustrations of experimental facilities for the growth of chrysanthemum seeding.

光を取り込んだ。

2.2 輪菊の水耕栽培試験

Fig. 3 に輪菊の栽培方法を示す。本研究に使用した輪菊“神馬”は、JA 愛知みなみより入手した。2 cm 角のスポンジをポット内に配し、スポンジの中心に輪菊の茎を差し込み、倒れないよう固定した。1 ポット当たり 4 本の輪菊を、正方形になるようにポット内に配置し、動かないようスポンジとポットをワイヤーで固定した。水質の計測お

より排水が容易になるように、ポットは2重にした。内側のポットの底に穴を開け、内側のポットを取り外した際に、外側のポットだけに水が残るようとした。

輪菊の栽培には、水道水（硝酸イオン濃度0 ppm、水温24°C、pH 7.1）、放電処理した水道水（50 ppm、24°C、4.7）、硝酸を添加した水道水（50 ppm、24°C、6.3）をそれぞれ用いた。栽培試験中は常に蛍光灯を点灯させ、24時間ごとに蒸発により減少した分の水を加えた。培地に植えてから15日間経過した輪菊の根の様子を観察し、栽培に用いた水の影響を調べた。

3. 結果および考察

3.1 放電の変化

Figure 4 にタンゲステン棒と精製水の間に生じた放電の様子を示す。Fig. 4(a) と Fig. 4(b) は、それぞれ放電開始直後と放電開始から40秒後の放電の様子である。放電開始直後は陽極から水面までのプラズマ柱の位置が安定しなかったが、約40秒後にはプラズマ柱の位置が一点に落ち着き、安定した放電となった。また、不安定な放電は、実験開始直後のみ発生し、電圧の再印加時には発生しなかった。実験開始前の水温は24°Cであり、放電による温度上昇は最大で10°C程度であった。

Figure 5(a) に放電前、Fig. 5(b) に30分放電後のタンゲステン電極先端の写真を示す。30分放電後の電極先端は、放電時の劣化と酸化により変色していた。

棒電極の変化および水の違いによる放電変化の有無を観察するため、未使用および使用済み棒電極それぞれに対し、精製水（放電前導電率0.3 μS、放電前pH 6.9）と水道水（113 μS、7.1）を水電極とした放電の様子を **Fig. 6** に示す。Fig. 4(a) と Fig. 6(a) は同条件である。棒電極の違いに関わらず、精製水を水電極とした場合は、不安定な放電となり（Fig. 6(a)、Fig. 6(c)）、水道水を用いた場合は放電開始直後から安定な放電となった（Fig. 6(b)、Fig. 6(d)）。放電開始直後の不安定な放電は、高電圧側の棒電極変化によるものではないことが分かった。

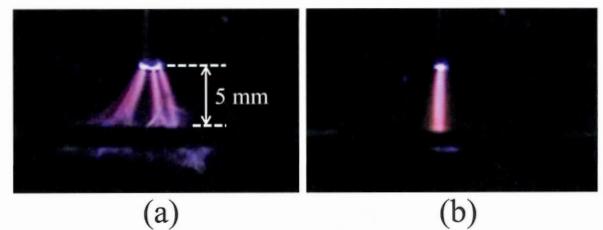


Fig. 4 Photographs of discharge between W electrode and purified water at (a) initial state and (b) stable state.

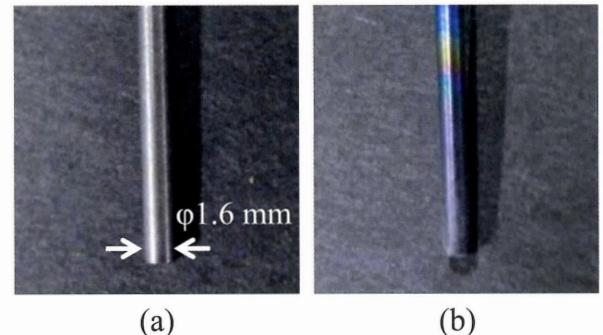


Fig. 5 Tips of tungsten electrode (a) before discharge and (b) after discharge for 30 min. (W: φ1.6 mm)

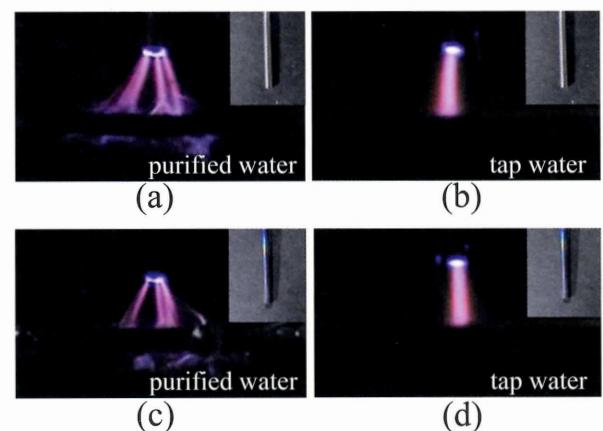
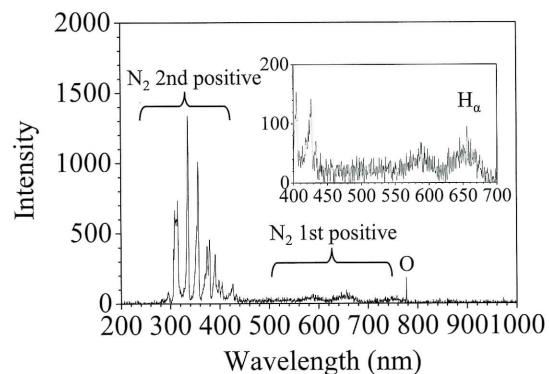
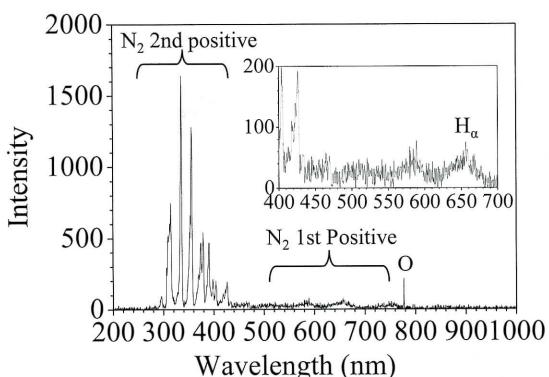


Fig. 6 Photographs of discharge between W electrode and water at discharge initiation. (a) Unused electrode – purified water. (b) Unused electrode – tap water. (c) Used electrode – purified water. (d) Used electrode – tap water.

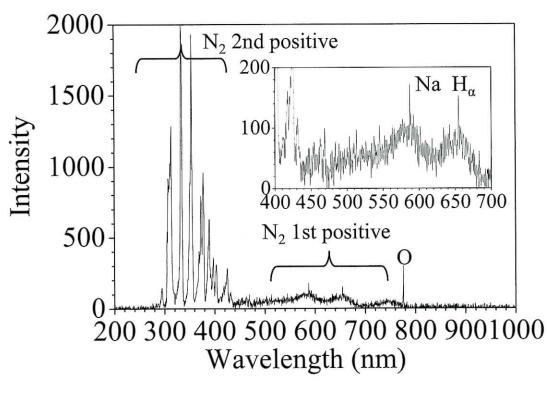
Figure 7 に、精製水と水道水を用いた放電の発光分光分析結果を示す。Fig. 7(a) と Fig. 7(b) は、精製水を用いた放電に対する発光スペクトルであり、それぞれ放電開始直後（不安定）および40秒後（安定）の放電である。Fig. 7(c) は、水道水に対する放電の発光スペクトルである。いずれのスペクトルにおいても、N₂ 1st positive、N₂ 2nd positive、H_a、O の発光ピークが見られた。また、水道水を用いた放電のみ、Na の発光ピークが現れた。



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Optical emission spectroscopy analysis of the discharge between W rod and water. (a) Discharge at the initial state for purified water. (b) Discharge at the stable state for purified water. (c) Discharge for tap water.

3.2 放電による水の変化

Figure 8, Figure 9, Figure 10 に、積算電圧印加時間に対する精製水及び水道水の pH、硝酸イオン濃度、導電率変化を示す。実験を 5 回行い、プロットは平均値、エラーバーは最大値及び最小値を示す。放電時間の増加に伴い、精製水と水道水のいずれも、pH は減少し、硝酸イオン濃度および導

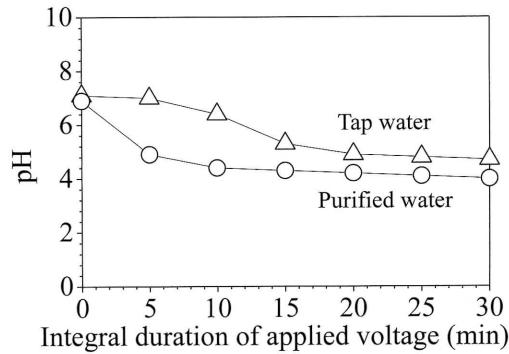


Fig. 8 Changes of pH in tap water and purified water.

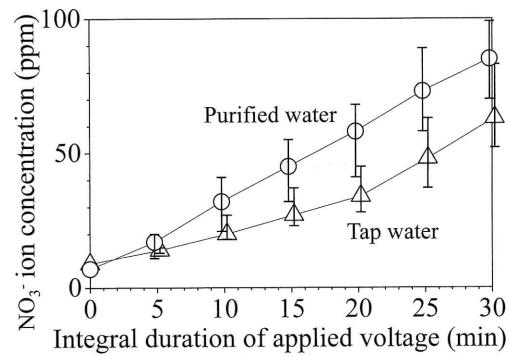


Fig. 9 Changes of NO_3^- ion concentrations in tap water and purified water.

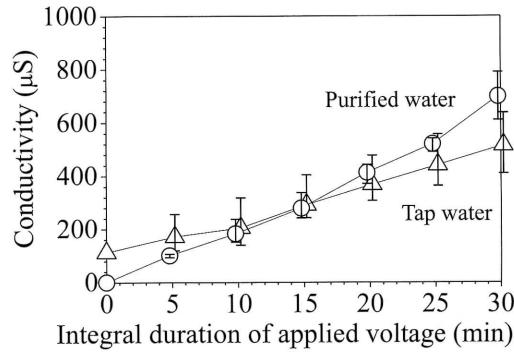
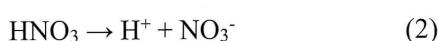
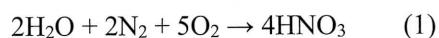


Fig. 10 Changes of conductivities in tap water and purified water.

電率は増加した。放電時間に対する精製水と水道水の硝酸イオン濃度では、わずかに水道水の方が低い傾向を示した。また、放電開始前は、水道水の方が高い導電率を示したが、30 分放電後では、精製水の方が高い導電率となった。

放電によって空気中の窒素(N_2)と酸素(O_2)、および水(H_2O)が、式(1)、(2)のように反応して硝酸イオン(NO_3^-)が生成されたと考えられる。



硝酸イオンの生成により、水中のイオンが増加したため、導電率が増加した。また、硝酸は酸性であるため、硝酸イオン濃度の増加に伴って、pHが減少したと考えられる。

水道水には不純物が含まれているため、放電開始前は精製水より高い導電率を示したと考えられる。しかし、30分放電後は、精製水の導電率の方が高くなかった。水に対する放電では、硝酸以外に、亜硝酸(HNO_2)、過酸化水素(H_2O_2)、オゾン(O_3)が生成される⁸⁾。本実験においても、放電により亜硝酸イオン(NO_2^-)や過酸化水素イオン(HO_2^-)が生成された可能性がある。水道水の場合、水道水に含まれる次亜塩素酸ナトリウム等の不純物と、放電により生成された過酸化水素が式(3)のように反応したと考えられる¹⁴⁾。



式(3)の反応により、水道水中のイオン濃度増加が抑制され、精製水ほど導電率が増加しなかったと考えられる。

放電処理に対して精製水と水道水では、水道水の方がわずかに低い硝酸イオン生成効率を示した。しかし、精製水および水道水ともに放電処理によって硝酸イオン濃度が上昇したことから、水耕栽培に用いる放電処理水は、入手が容易な水道水で十分であると考えられる。

3.3 輪菊の発根

15日間水耕栽培を行った輪菊の茎先端の様子をFig. 11に示す。水耕栽培を行ったすべての輪菊から発根が確認できた。Figure 12に根の長さあたりの平均本数を培地ごとにまとめた。エラーバー

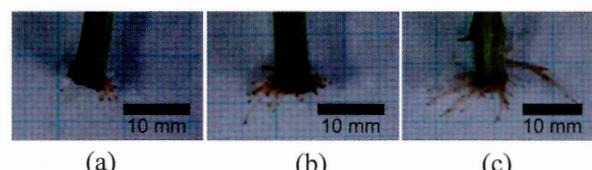


Fig. 11 Photographs of chrysanthemum root grown for 15 days in water had NO_3^- ion concentration of (a) 0 ppm, (b) 50 ppm with HNO_3 , and (c) 50 ppm treated by discharge.

Table 1 t-value of t-test on root length of chrysanthemum.

Compared samples	t-value
0 ppm tap water,	
50 ppm with HNO_3 ($df = 130$)	3.09
0 ppm tap water,	
50 ppm treated by discharge ($df = 136$)	7.87
50 ppm with HNO_3 ,	
50 ppm treated by discharge ($df = 152$)	10.73

($p < 0.05$)

は1本の輪菊より得られた根本数の最大値および最小値を示す。水道水および硝酸を添加した水を用いた輪菊の根の長さは、ほとんどが4 mm以下であり、最大でも12 mmであったが、放電処理した水道水では発根した根の半分が6 mm以上、最大で16 mmまで生長していた。また、輪菊1本あたりの根の平均合計本数は、水道水では15本、硝酸を添加した水道水では19本、放電処理した水道水では20本であった。

t検定による有意差評価の結果、発根数における有意差は見られなかった一方で、根の長さにおいては培地による有意差が見られた(Table 1)。硝酸イオン濃度が同じ水道水でも、放電処理した水道水を与えた輪菊の方が、根が長くなった。

植物の生長には窒素化合物の取り込みが必須

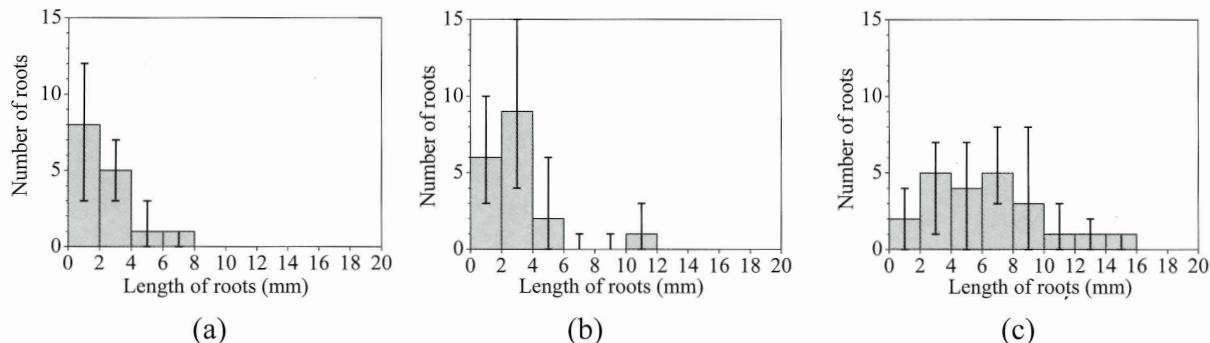


Fig. 12 Average number of chrysanthemum roots grown for 15 days in water had an NO_3^- ion concentration of (a) 0 ppm, (b) 50 ppm with HNO_3 , and (c) 50 ppm treated by discharge for the root lengths.

である。硝酸イオンを付与した水道水を与えることで輪菊の根生長が促進されたのは、輪菊が水中の硝酸イオンを吸収し生長した結果であると考えられる。また、放電処理によって硝酸イオンのほかに亜硝酸イオンが生成され、放電処理水を与えた輪菊の根の生長に寄与したと考えられる。

4.まとめ

本研究では、棒対水電極放電による水処理、および水耕栽培輪菊の根の生長に対する放電処理水の効果を調査した。主な結果を以下に記す。

- (1) 棒対水電極放電による水処理では、放電時間が長くなるとともに、精製水および水道水のpHは減少し、硝酸イオン濃度と導電率は増加した。水成分の変化は、放電により空気中の酸素、窒素、および水が反応したためであると考えられる。
- (2) 輪菊の根生長は、硝酸添加水または放電処理水を用いることで促進された。また、硝酸イオン濃度が同じ水道水でも、放電処理した水道水を与えた輪菊の方が、根が長くなった。水中から硝酸イオンを吸収することで輪菊の生長が促進され、放電処理水では硝酸イオンに加え、ほかの窒素化合物が含まれることで、より生長を促進したと考えられる。

本研究により、棒対水電極放電により処理した水道水が、輪菊の水耕栽培における根の生長に対して促進効果を持つことが明らかになった。

謝辞

本研究の一部は、愛知県田原市の支援を受けて行われた。

References

- 1) Aichi Prefecture, Zu de miru Aichi no engeinougyou, *Aichi Prefecture*, 2015, available at:<http://www.pref.aichi.jp/engei/zudemiru/2015/2015.pdf>, accessed 10 Dec. 2015
- 2) C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, P. Leprince, Atmospheric pressure plasmas: A review, *Spectr chim. Acta B.*, Vol. **61**, (No.1), 2006, pp.2–30
- 3) Y. Uchida, S. Okuda, N. Hayashi, T. Harigai, Y. Suda, H. Takikawa, H. Tanoue, I. Yamamoto, H. Shiki, Development of gliding-Arc plasma-jet with a bent nozzle for pre-treatment of inkjet printing in roll-to-roll processing, *Vacuum*, 2015, (submitted)
- 4) Y. Uchida, Y. Suda, H. Takikawa, H. Tanoue, I. Yamamoto, Influence of exit aperture size of gliding arc on pre-treatment of polymer film prior to ink jet printing, *Journal of IAPS*, Vol. **22**, (No.1), 2014, pp.29–36
- 5) E.N. Tamungang, S. Laminsi, P. Ghogomu, D. Njopwouo, J.L. Brisset, Pollution control of surface waters by coupling gliding discharge treatment with incorporated oyster shell powder, *Chemical Engineering Journal*, Vol. **173**, 2011, pp.303–308
- 6) R. Ma, G. Wang, Y. Tian, K. Wang, J. Zhang, J. Fang, Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. **300**, 2015, pp.643–651
- 7) H.S. Kim, D.H. Lee, A. Fridman, Y.I. Cho, Residual effects and energy cost of gliding arc discharge treatment on the inactivation of Escherichia coli in water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. **77**, 2014, pp.1075–1083
- 8) J. Julák, V. Scholtz, S. Kotúčová, O. Janoušková, The persistent microbicidal effect in water exposed to the corona discharge, *Physica Medica*, Vol. **28**, 2012, pp.230–239
- 9) E. Dolezalova, P. Lukes, Membrane damage and active but nonculturable state in liquid cultures of Escherichia coli treated with an atmospheric pressure plasma jet, *Bioelectrochemistry*, Vol. **103**, 2015, pp.7–14
- 10) W. Bian, X. Song, J. Shi, X. Yin, Nitrogen fixed into HNO₃ by pulsed high voltage discharge, *Journal of Electrostatics*, Vol. **70**, 2012, pp.317–326
- 11) D.P. Park, K. Davis, S. Gilani, C.A. Alonso, D. Dobrynin, G. Friedman, A. Fridman, A. Rabinovich, G. Fridman, Reactive nitrogen species produced in water by non-equilibrium plasma increase plant growth rate and nutritional yield, *Current Applied Physics*, Vol. **13**, 2013, pp.19–29
- 12) J. Takahara, S. Watanabe, K. Takaki, N. Satta, O. Yamada, T. Fujio, Y. Sasaki, Improvement of growth rate of *brassica rapa* var. *perviridis* by discharge inside bubble in water, *IEEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, Vol. **133**, (No.4), 2013, pp.211–216 (in Japanese)
- 13) K. Takano, J. Takahara, K. Takaki, N. Satta, K. Takahashi, T. Fujio, Improvement of growth rate of *brassica rapa* var. *perviridis* by discharge inside bubble under water in hydroponic cultivation, *IEEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, Vol. **135**, (No.8), 2014, pp.467–472 (in Japanese)
- 14) G.R. Agladze, G.S. Tsurtsimia, B.I. Jung, J.S. Kim, G. Gorelishvili, comparative study of hydrogen peroxide electro-generation on gas-diffusion electrodes in undivided and membrane cells, *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. **37**, 2007, pp.375–383