

プラズマ栄養水の成分変化と切り花の日持ち性への影響

高橋 勝之心*, 川野 航平*, 椎葉 京介*, 下村 友人*,

坂東 隆宏^{*.1}, 針谷 達*, 山内 高広*, 滝川 浩史*,

井出 健太郎**, 日弁 勉**, 爪 光男**

(2021年8月20日受付; 2021年10月30日受理)

Component Change in Plasma Nutrient Water
and Its Effects on Longevity of Cut FlowersKatsunoshin TAKAHASHI*, Kouhei KAWANO*, Kyosuke SHIIBA*, Yuto SHIMOMURA*,
Takahiro BANDO^{*.1}, Toru HARIGAI*, Takahiro YAMAUCHI*, Hirofumi TAKIKAWA*,
Kentaro IDE**, Tsutomu HIBI** and Mitsuo TSUME**

(Received August 20, 2021; Accepted October 30, 2021)

Plasma nutrient water produced by discharge treatment of water has a plant growth-promoting effect. The use of plasma nutrient water in horticultural agriculture, such as the flower industry, does not always involve using the plasma nutrient water immediately after the discharge treatment of tap water. In this study, we investigated the changes in the components of discharge-treated water during and after the treatment process. In addition, as post-treatment, we administered the produced plasma nutrient water to cut flowers and investigated the effects on the longevity of the cut flowers. We employed the multi-spark discharge system to treat tap water. The gap between high-voltage electrodes and the water surface was 5 mm, and the discharge occurred in the atmosphere between the high-voltage electrodes and the water surface. We placed a ground electrode in the water. Immediately after the treatment process, the produced plasma longevity nutrient water contained NO_2^- , NO_3^- , and H_2O_2 . NO_2^- and H_2O_2 disappeared in the water, and the concentration of NO_3^- was maintained. The plasma nutrient water which was diluted with tap water 24 h after the process showed the same effect of improving the vase life of cut flowers as the commercial life-prolonging agent.

1. はじめに

切り花は、咲き始めや蕾の状態の花を茎や葉を含めて切り取ったものであり、贈答・観賞用途として広く流通している¹⁾。消費者アンケートの結果は、切り花購入の判断に、切り花の日持ち性を重視することを示しており、切り花の日持ち性向上は、切り花産業の需要拡大のために重要である²⁾。切り花の日持ち性は、雑菌の増殖や、栄養の過不足に左右される^{3,4)}。雑菌の増殖や栄養不足の対策として、生け水に後処理剤を加える方法がある⁵⁻⁹⁾。後処理剤は、

栄養や抗菌剤を含んだ薬剤であり、生け水に添加し切り花へ与えることで、切り花の日持ち日数が延びる。

大気圧放電は、安価かつ容易なプラズマ処理方法として、表面処理や污水处理などに利用されている¹⁰⁾。水へ放電処理することで、水中に植物の栄養素となる硝酸イオン (NO_3^-) を生成できる¹¹⁻¹³⁾。放電処理によって NO_3^- を含ませた水は、土壌栽培や溶液栽培において、植物の生長を促進させることが確認されている¹²⁻¹⁴⁾。我々は、スパーク放電プラズマによって処理した水を、プラズマ栄養水と呼び、このプラズマ栄養水を輪菊の苗に与えた。プラズマ栄養水を与えた輪菊苗の根の成長は早く、プラズマ栄養水に植物の成長促進効果があることを確認した¹⁵⁾。また、水の放電処理技術を農業に適用するため、大量の水を放電処理可能なマルチスパーク放電装置を開発した¹⁶⁾。マルチスパーク放電装置は、高電圧電源として、小型かつ安価なインバータネオントランスを用いている。高圧電極を9本使用し、ポンプを用いて水を循環させることで大量の水を放電処理可能にした。

プラズマ栄養水を花きなどの園芸農業へ適用する場合、必ずしも生成直後のプラズマ栄養水を用いるとは限

キーワード: プラズマ栄養水, マルチスパーク放電, 水処理

* 豊橋技術科学大学

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibirigaoka, Tempaku, Toyohashi, Aichi, Japan

** シンフォニアテクノロジー株式会社

(〒441-3195 愛知県豊橋市三弥町字元屋敷 150)

Sinfonia Technology Co., Ltd., 150 Motoyashiki, Mitsuya, Toyohashi, Aichi, Japan

¹ harigai.toru.un@tut.jp

DOI : <https://doi.org/10.34342/iesj.2022.46.2.80>

らない。本研究では、マルチスパーク放電装置を用いて放電処理した水の放電処理中、放電処理後の成分変化を調べた。また、プラズマ栄養水を、後処理剤として切り花に与え、露芯や花卉の垂れ、茎や葉の変色などの切り花の日持ち性におよぼす影響を調べた。

2. 実験方法

2.1 プラズマ栄養水の生成と成分の経時観察

プラズマ栄養水生成装置の概略構成図を Fig.1 に示す。高压電極と水没電極には、PtRh 線を用いた。高压電極の先端は水面から 3 mm 離れた。インバータネオントランス（愛知電機、AN-10、10 kV）を用いて昇圧し、高压電極と水面の間で放電させた。水没電極は接地し、高压電極から 70 mm 離して浸水した。水には水道水を使用し、水量は 2 L と 6 L の 2 条件で行った。プラズマ栄養水の生成では、9 本の高压電極を同時に 1.5 秒間放電させ、放電終了から次の放電開始まで 4.5 秒のインターバルを設けた。9 本同時に放電を行っているが、水面の揺れはわずかであり、放電位置は水面上で 1 mm 程度の変動も観測されなかった。放電処理時間は 6 時間とした。放電開始と同時にポンプを起動させ、水を循環させた。ポンプは放電処理終了後に停止させた。

プラズマ栄養水の成分分析を、放電処理中と放電処理後 120 時間後まで行った。一定時間ごとにタンクから水を約 20 mL 採取した。採取した水の補充は行っていない。水温と pH、導電率は、温度センサー付き pH 電極（佐藤商事、PE-11）と導電率プローブ（佐藤商事、CDPB-03）を用いて測定した。亜硝酸イオン（ NO_2^- ）濃度および NO_3^- 濃度の測定には、それぞれ亜硝酸イオンメータ（HANNA、HI 708）と硝酸イオンメータ（HORIBA、LAQUAtwin- NO_3 -11）を用いた。過酸化水素（ H_2O_2 ）濃度はデジタルパケットテスト（共立理化学研究所、DPM2-、WAK-H2O2 および WAK-H2O2(c)）を用いて測定した。

なお、亜硝酸イオンメータを利用する際の推奨 pH は 4 から 7 である。一方で、本実験においては pH が 3 程

度と低い値を取り得る。亜硝酸イオンメータは 3 以下の低い pH において、測定濃度が若干低く検出される。

2.2 切り花の日持ち観察

切り花へプラズマ栄養水を与え、切り花の日持ち性を観察した。切り花には、バラの一種であるアバランチェを用いた。切り花は、長さを 500 mm に切り揃え、直径 60 mm、高さ 170 mm のガラス瓶に生けた。水量は 300 mL とした。切り花の日持ち観察中、切り戻しは行わなかった。バラ 3 本を 1 試験区とし、周辺環境は、気温 25 °C、湿度 40~60%RH を維持した。また、LED（光合成光量子束密度 $10 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ）を用いて、12 時間日長とした。

切り花の日持ち判定は、花普及センターの切り花の日持ち評価レファレンスマニュアル¹⁷⁾に基づいて評価した。日持ち評価レファレンスマニュアルは、切り花の観賞価値期間を判定する基準を示している。各切り花に対して、花卉の萎れ、ベントネック、開花など 8 項目を判定基準 A、B、C、D で評価した。C 判定が 2 項目以上、または、D 判定が 1 項目以上になった切り花に対して、観賞価値を失ったと判断し、観察開始から観賞価値を失うまでの日数を日持ち日数とした。

2.2.1 成分の異なるプラズマ栄養水

成分濃度の異なるプラズマ栄養水を切り花へ与え、放電処理によって生成される水中成分が、切り花へ与える影響を調べた。植物に対して、成長促進効果や品質保持効果があるとされる NO_3^- 濃度は、100 mg/L 前後である^{13-15, 18)}ことから、プラズマ栄養水の NO_3^- 濃度が 100 mg/L となるよう調整した。2 L の水道水に対して、1 時間放電処理した水をプラズマ栄養水 A とし、2 L の水道水に対して、6 時間放電処理し、放電処理終了後 24 時間経過した処理水を、さらに水道水で希釈した水をプラズマ栄養水 B とした。希釈の割合は、15 倍とした。試験開始前のバラを水道水に生け、1 日経過した後、生け水を、用意した 2 種類のプラズマ栄養水に入れ替え、日持ち性観察を開始した。観察中は 2 日おきに同組成の溶液 300 mL を用意し、水の入替えを行った。

2.2.2 プラズマ栄養水の日持ち性向上効果

切り花に対して、水道水と市販延命剤、プラズマ栄養水をそれぞれ与えることで、プラズマ栄養水による切り花の日持ち性向上効果を評価した。プラズマ栄養水には、2.2.1 の試験で用いたプラズマ栄養水 B を用いた。市販延命剤には、美咲（OAT アグリオ）を用い、水道水で 50 倍希釈し切り花へ与えた。同じ条件において 3 回の観察試験を行った。3 回の試験の開始日は、それぞれ 2019 年の 6 月 12 日、6 月 25 日、7 月 26 日とした。試験開始前のバラを水道水に生け、1 日経過した後、生け水をプ

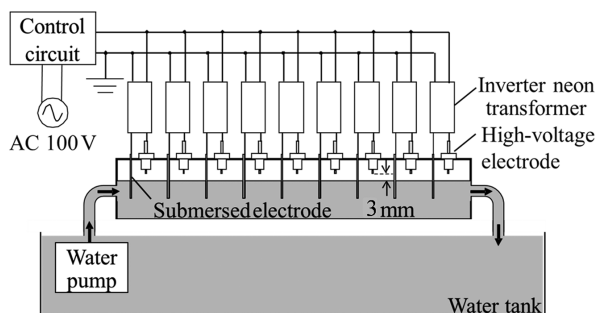


図 1 マルチスパーク放電装置の概略図
Fig.1 Schematic diagram of multi-spark discharge system.

ラズマ栄養水、水道水、市販延命剤に入れ替え、日持ち性観察を開始した。観察中は2日おきに同組成の溶液 300 mL を用意し、水の入れ替えを行った。

3. 結果と考察

3.1 プラズマ栄養水の生成と成分の経時観察

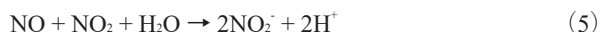
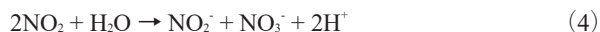
マルチスパーク放電処理装置を用いて生成したプラズマ栄養水の放電処理中および放電処理後の成分変化を Fig.2 に示す。水量は 2 L と 6 L とした。プラズマ栄養水は、同条件にて3回生成し、その平均値をプロットで示した。エラーバーは、標準偏差である。放電した際に高圧電極金属には電流が流れ、ジュール熱により電極金属が発熱する。水量 2 L の水温は、放電処理前の約 20℃ から約 30℃ まで上昇した。電極金属の発熱、放電そのものの熱、水に流れる電流によるジュール熱などによって水温が上昇したと考えられる。また、導電率は、放電処理前に 0.1 mS 程度であったのに対して、3.0 mS まで増加した。pH は、放電処理前におよそ 7.0 であったが、放電処理後は 2 L の条件では pH は 2.4 まで減少した。NO₃⁻ 濃度は放電処理前に 10 mg/L、NO₂⁻ 濃度は放電処理前に 0 mg/L であったが、放電処理後は NO₃⁻ 濃度は 1200 mg/L、NO₂⁻ 濃度は 80 mg/L まで増加した。大気中で放電を起こすと (1), (2) 式の反応から、大気中の窒素 (N₂) および酸素 (O₂) から一酸化窒素 (NO) が生じる。¹⁹⁾



さらに、(3)式より、NO は O₂ と反応し、二酸化窒素 (NO₂) を生成する¹⁹⁾

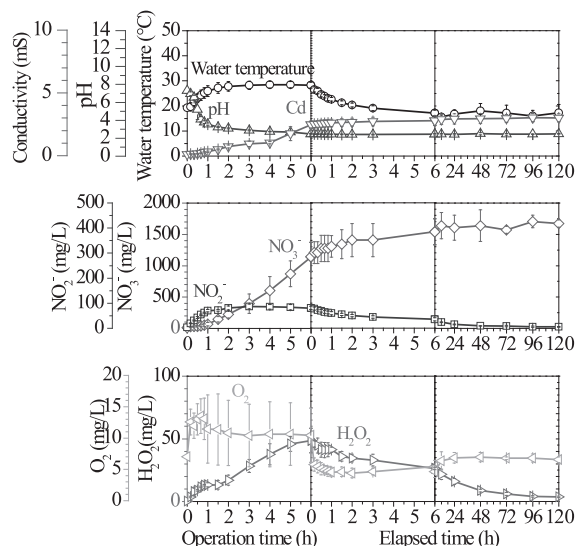


(1)から(3)式で発生した窒素酸化物は、(4)、(5)式のように、水と反応することで NO₃⁻、NO₂⁻ となる。^{20, 21)}

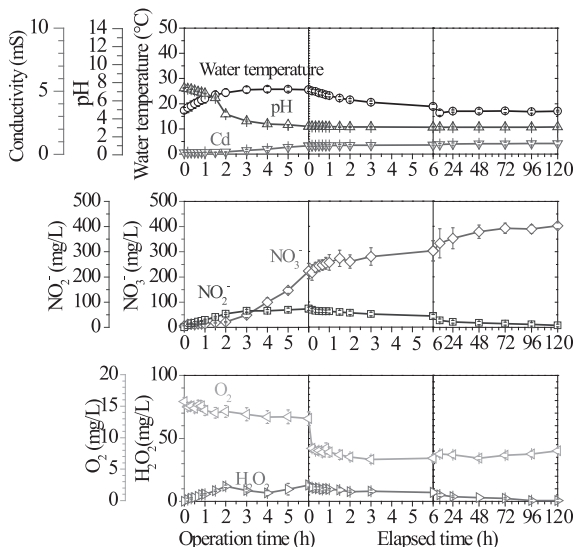


放電処理を行うことで、水中の NO₃⁻ 濃度や NO₂⁻ 濃度が増加した。放電処理中において、(1)から(5)式の反応により、NO₃⁻ や NO₂⁻ が生成されたためと考えられる。また、水中に NO₃⁻ や NO₂⁻ が生成されたため、導電率が増加したと考えられる。硝酸 (HNO₃) や亜硝酸 (HNO₂) は酸性である。NO₃⁻ 濃度や NO₂⁻ 濃度が増加したため、pH も低下したと考えられる。

Fig.2 (a)に見られるように、放電処理中の NO₂⁻ 濃度は、1時間の水処理後、同条件にて放電処理を続けているにも関わらず、濃度上昇が低下した。一方で、NO₃⁻ 濃度は、処理時間1時間以降、濃度上昇量が増加した。HNO₂ は、溶液の pH が 4.6 を下回ると、以下(6)式で示される自己酸



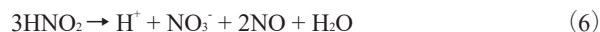
(a) 2 L



(b) 6 L

図2 プラズマ栄養水中の各濃度変化
Fig.2 Changes of each concentrations in water.

化還元反応により NO₃⁻ に変化することが知られている。²²⁾



処理水量が 2 L の場合、放電処理開始から 1 時間後に pH が 4.6 を下回った。したがって、(6)式が進行し、水中の NO₂⁻ が NO₃⁻ に変化したため、NO₃⁻ 濃度の上昇量が増し、NO₂⁻ 濃度の増加が緩やかになったと考えられる。

溶存 O₂ 濃度は放電処理開始直後に急激に増加している。この増加は放電処理なしでポンプを起動した際にも観測されているため、水が循環し O₂ が溶け込んだことに起因すると考えられる。放電処理前 2 L のとき約 10 mg/L から 15 mg/L であったが、6 時間放電処理後には、約 6.0 mg/L まで減少している。この溶存 O₂ 濃度の低下は、ポンプを停止させたことにより O₂ の溶解込みが減

少したことが一因であると考えられる。

H_2O_2 濃度は放電処理前 0 mg/L であったが、6時間放電処理後には、約 50 mg/L まで増加した。水を放電処理することで、(7)、(8)式のように、発生した OH ラジカルが水中の OH や水分子などと反応することで H_2O_2 が生成される。下記の式における M は第三体である。²⁴⁾



(7)、(8)式のように、放電によって発生した OH ラジカルが水中の OH や水分子などと反応し、 H_2O_2 が生成されたと考えられる。

放電処理後のプラズマ栄養水の成分変化では、水温、 NO_2^- 濃度、 O_2 濃度、 H_2O_2 濃度が、放電処理前の値近くまで戻ったのに対し、pH、導電率は、放電処理直後の値をほぼ維持した。また、 NO_3^- 濃度は、わずかに上昇する傾向が見られた。 NO_2^- は、水中の O_2 、 H_2O_2 と以下の反応をすることが知られている^{12, 23, 25-27)}。



(9)および(10)式の反応が進行することにより、放電処理後に NO_2^- 濃度、 O_2 濃度、 H_2O_2 濃度が減少し NO_3^- 濃度が増加したと考えられる。

Fig.2(b)に示すように、水量 6 L の放電処理においても、水量 2 L の放電処理と同様の成分変化傾向が見られた。しかし、6時間放電処理後の NO_3^- 濃度は、水量 2 L において 1200 mg/L であるのに対し、水量 6 L では、250 mg/L であった。処理水量の少ない水量 2 L において、水中の NO_3^- 生成速度が速い要因として、pH の急激な低下が考えられる。水量 2 L では、放電処理開始からおよそ 1 時間後に、pH が 4.6 を下回った。そのため、水量 2 L では放電処理開始から 1 時間後に、 HNO_2 の自己酸化還元反応が始まったと考えられる。一方で、水量 6 L では放電処理開始から約 2 時間後に pH は 4.6 を下回った。水量 6 L では放電処理開始から 2 時間後に、 HNO_2 の自己酸化還元反応が始まったと考えられる。処理水が少ないほど pH の低下が早かった。また、 HNO_2 の自己酸化還元反応も早く始まったため、 NO_3^- 生成量も増加したと考えられる。

3.2 切り花の日持ち観察

3.2.1 成分の異なるプラズマ栄養水

成分濃度の異なるプラズマ栄養水が切り花へ与える影響を調べた。2 L の水道水に対して、1時間放電処理した水をプラズマ栄養水 A とし、2 L の水道水に対して、6時間放電処理し、放電処理終了後 24 時間経過した処理水を、さらに水道水で希釈した水をプラズマ栄養水 B とし、切り花へ与えた。切り花へ与えたプラズマ栄養水

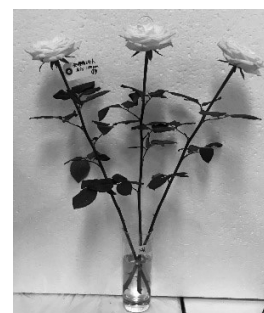
表 1 プラズマ栄養水中の成分

Table 1 Components of plasma nutrient water.

Components	Plasma nutrient water	
	A	B
NO_3^- (mg/L)	96	100
NO_2^- (mg/L)	56	0.67
pH	3.21	3.19
H_2O_2 (mg/L)	10	0.7
O_2 (mg/L)	5.1	8.01



(a) Plasma-nutrient-water A



(b) Plasma-nutrient-water B

図 3 プラズマ栄養水を与えたバラの 7 日目の様子

Fig.3 Photographs of 7th days of roses supplied with plasma nutrient water.



(a) Plasma nutrient water A



(b) Plasma nutrient water B

図 4 プラズマ栄養水を与えたバラの茎の 7 日目の様子

Fig.4 Photographs of 7th days of rose stems supplied with plasma nutrient water.



(a) Plasma nutrient water A



(b) Plasma nutrient water B

図 5 プラズマ栄養水を与えたバラの 14 日目の様子

Fig.5 Photographs of 14th days of roses supplied with plasma nutrient water.

A とプラズマ栄養水 B の成分を表 1 に示す。プラズマ栄養水 A と B では、 NO_2^- 濃度と H_2O_2 濃度が大きく異なる。

Fig.3 にプラズマ栄養水を与え経過観察したバラの7日目の様子を示す。Fig.3 (a) はプラズマ栄養水 A, Fig.3 (b) はプラズマ栄養水 B を与えたバラの様子である。プラズマ栄養水 A を与えたバラの開花はあまり進まず、蕾から半開の状態であった。また、外側の花弁は張りが弱く、大きく垂れ下がっていた。一方、プラズマ栄養水 B を与えたバラの開花は進んでおり、花は全開の状態であった。また、プラズマ栄養水 A を与えた場合と比べて、外側の花弁の張りは強く、花弁の垂れ下がりには小さかった。

Fig.4 は、Fig.3 に示したバラの茎先端の様子である。プラズマ栄養水 A を与えたバラの茎先端は、試験前の緑色から茶色に変色した。プラズマ栄養水 B を与えたバラの茎先端は、試験前の緑色から変色は見られなかった。

Fig.5 にプラズマ栄養水を与えたバラの14日目の様子を示す。プラズマ栄養水 A を与えたバラの花弁は全体的に垂れ下がり、花首は大きく傾いた状態であった。一方、プラズマ栄養水 B を与えたバラは、14日目においても花弁の張りが強く、花弁の垂れ下がりには小さいままであった。

プラズマ栄養水 A に比べて、プラズマ栄養水 B を与えたバラの方が、明らかに良い日持ち性を示した。NO₂⁻と H₂O₂ を含むプラズマ栄養水 A を与えたバラの茎が変色していたことから、NO₂⁻と H₂O₂ のどちらか、または両方が茎の変色に寄与したと考えられる。茎の変色は、導管の損傷につながると考えられ、NO₂⁻もしくは H₂O₂ が何らかのメカニズムで導管の損傷をまねき、その結果水揚げ力が低下し日持ち日数が減少した可能性がある。

なお、プラズマ栄養水 A とプラズマ栄養水 B では O₂ 濃度が異なるが、著者が調査した限りでは O₂ 濃度とバラの日持ち性を検証した研究は報告されておらず、日持ち性への影響は不明である。O₂ 濃度によるバラの日持ち性への影響は今後の検討課題である。

3.2.2 プラズマ栄養水の日持ち性向上効果

水道水、市販延命剤、プラズマ栄養水 B を用いた日持ち試験の結果を Fig.6 に示す。図中のプロットは、各バラの日持ち日数を示し、棒グラフはその平均日持ち日数である。水道水を用いた場合の日持ち日数は3~5日程度であった。市販延命剤とプラズマ栄養水 B を用いた場合では、6~7日程度の日持ち日数を示し、水道水よりも長い日持ち日数を得られた。プラズマ栄養水 B は、市販の延命剤と同程度の日持ち性向上効果を示した。市販の延命剤には糖が含まれており、植物の栄養として、切り花の日持ち性向上に寄与する⁷⁾。プラズマ栄養水 B では、NO₃⁻ が植物の栄養となることで、市販延命剤と同程度の日持ち性向上効果が得られたと考えられる。

以上に加えて、水道水、延命剤、プラズマ栄養水、硝酸

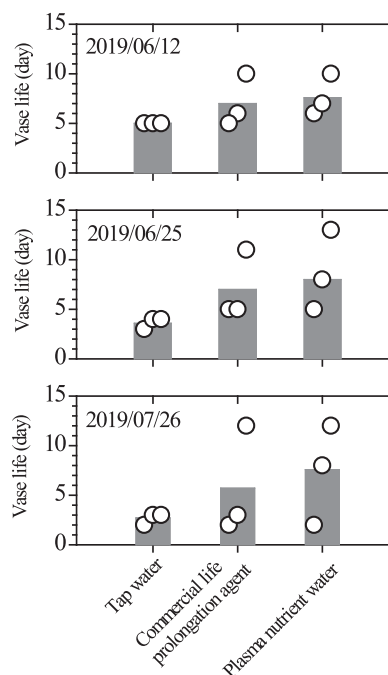


図6 異なる水を与えたバラの日持ち日数
Fig.6 Vase life of roses supplied with different water.

添加水 (100 ppm) を比較した日持ち試験を行った²⁸⁾。結果は、プラズマ栄養水は硝酸添加水より1,2日程度の日持ち性が向上することがわかった。プラズマ栄養水は、NO₃⁻のほかに日持ち性に有効な成分があることが示唆される。

4. まとめ

マルチスパーク放電装置を用いて水道水を放電処理し、プラズマ栄養水を生成した。放電処理中および放電処理後のプラズマ栄養水の成分変化を調べた。また、プラズマ栄養水をバラに与え、切り花の日持ち性におよぼす影響を調べた。

放電処理によって、水中のNO₃⁻濃度やNO₂⁻濃度、H₂O₂濃度が増加した。放電処理中にNO₂⁻濃度の上昇は鈍化し、対照的にNO₃⁻濃度は上昇した。放電処理後の水中成分では、水温、NO₂⁻濃度、溶存O₂濃度、H₂O₂濃度が、放電処理前の値近くまで戻った。一方で、pH、導電率は、放電処理直後の値をほぼ維持した。また、NO₃⁻濃度は、わずかに上昇する傾向が見られた。放電処理水量によって、放電処理による水中のNO₃⁻生成量が異なった。放電処理水量6 Lに対して、放電処理水量の少ない2 Lのほうが、高いNO₃⁻生成量となった。

NO₃⁻濃度を100 mg/Lとし、NO₂⁻およびH₂O₂を含んだプラズマ栄養水 A と、NO₂⁻およびH₂O₂をほぼ含まないプラズマ栄養水 B をそれぞれ、バラの生け水として与えた。プラズマ栄養水 A を与えたバラの茎は変色し、プラズマ栄養水 B を与えたバラに比べて、日持ち日数

が短くなった。

プラズマ栄養水 B の切り花日持ち性向上効果を、バラを対象とし、水道水および市販延命剤と比較した。プラズマ栄養水を与えたバラの日持ち日数は、水道水より長く、市販延命剤と同程度であった。

以上のように、水道水の放電処理により生成したプラズマ栄養水は、生成直後には、 NO_2^- と NO_3^- 、 H_2O_2 を含有した水であった。生成後は、 NO_2^- と H_2O_2 を消失し、 NO_3^- を含有した水となった。また、プラズマ栄養水は、市販延命剤と同程度の切り花日持ち性向上効果を示した。

謝辞

本研究の一部は、JA 愛知みなみの支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) 農林水産省：花きの現状について (2019), https://www.maff.go.jp/j/seisan/kaki/flower/pdf/1912_meguzi_all.pdf, (2019-12)
- 2) 農林水産省：花きをめぐる情勢 (2011) <http://www.maff.go.jp/j/seisan/kaki/flower/pdf/meg231.pdf>, (2019-12-10).
- 3) 米倉基裕, 堀田真紀子, 長嶋 圭, 池内 都, 山口徳之：バラ切り花における収穫から一次水揚げまでの時間, 切り前, 一次水揚げ水及び輸送水が日持ち性に及ぼす影響. 愛知県農総試研報, **49** (2017) 23
- 4) 外岡 慎, 本間義之, 貫井秀樹, 市村一雄：ガーベラ切り花日持ち品種間差における生け水中の細菌の関与. 園学研, **18** (2019) 167
- 5) 名田和義, 川口敏弘, 橘 昌司：バラ切り花の花持ちに及ぼす生け水へのポリアミン添加の効果. 園学研, **3** (2004) 101
- 6) 高橋志津, 鈴木勝治, 市村一雄：糖質と抗菌剤の後処理によるダリア切り花の品質保持期間延長. 園学研, **15** (2016) 87
- 7) 水口 聡, 市村一雄, 久松 完, 腰岡政二：スクロース処理が蕾切りカーネーションの切り花品質および糖質濃度に及ぼす影響. 園学研, **6** (2007) 591
- 8) 深井誠一, 上原廣大：キングジョウ切り花の品質保持に対するカルシウム処理の効果. 園学研, **5** (2006) 465
- 9) 渡邊祐輔, 宮島利功, 野水利和, 中野 優, 市村一雄：チューリップ切り花における糖質処理が品質保持に及ぼす影響. 園学研, **12** (2013) 201
- 10) C. Tendero and C. Tixier and P. Tristant and J. Desmaison and P. Leprince: Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta.*, **61** (2006) 2
- 11) W. Bian, X. Song, J. Shi, and X. Yin: Nitrogen fixed into HNO_3 by pulsed high voltage discharge. *Journal of Electrostatics.*, **70** (2012) 317
- 12) J. Takahata and S. Watanabe and K. Takaki and N. Satta and O. Yamada and T. Fujio and Y. Sasaki: Improvement of Growth rate of *Brassica rapa* var. *perviridis* by discharge inside bubble in water. *IEEJ.*, **133** (2012) 211
- 13) D.P. Park and K. Davis and S. Gilani and C. Alonzo and D. Dobrynin and G. Friedman and A. Fridman and A. Rabinovich and G. Fridman: Reactive nitrogen species produced in water by non-equilibrium plasma increase plant growth rate and nutritional yield. *Current Applied Physics.*, **13** (2013) S19
- 14) F. Judee and S. Simon and C. Bailly and T. Dufour: Plasma-activation of tap water using DBD for agronomy applications: Identification and quantification of long lifetime chemical species and production/consumption mechanisms. *Water Research.*, **133** (2018) 47
- 15) 林 尚弥, 針谷 達, 藤田 至, 須田善行, 滝川浩史：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. プラズマ応用科学, **24** (2016) 35
- 16) T. Nakaso and T. Harigai and S. A. Kusumawan and T. Shimomura and T. Tanimoto and Y. Suda and H. Takikawa: Multi-Spark Discharge System for Preparation of Nutritious Water. *J. AIP Conference Proceedings.*, **1929** (2018) 20016-1
- 17) 日本花普及センター：切り花の品質保持マニュアル / 日本花普及センター監修, 流通システム研究センター (2006)
- 18) パナソニック IP マネジメント(株)：切花類保存装置, 切花類保存液, 切花類保存用の固体物及び切花類保存方法. 特開 2016-214207 (2016)
- 19) A. Fridman: Plasma Chemistry, p. 356, Cambridge University Press, Cambridge (2014)
- 20) 林 良茂, 川西琢也, 清水宣明, 藤原保彦, 中根 隆：窒素酸化物 - 水溶液系の反応機構 - 吸収速度に及ぼす pH の影響 -. 大気環境学会誌, **31** (1996) 75
- 21) Y. Lee and S. E. Schwartz: Evaluation of the Rate of Uptake of Nitrogen Dioxide by Atmospheric and Surface Liquid Water. *Journal of Geophysical Research.*, **86** (1981) 11971
- 22) 澁川卓実, 大平勇一, 島津昌光, 小幡英二：亜硝酸分解反応におよぼす pH の影響. 化学工学論文集, **35** (2009) 613
- 23) D. X. Liu and Z. C. Liu and C. Chen and A. J. Yang and D. Li and M. Z. Rong and H. L. Chen and M. G. Kong: Aqueous reactive species induced by a surface air discharge: Heterogeneous mass transfer and liquid chemistry pathways. *Scientific Reports.*, **6** (2016) 23737
- 24) 金澤誠司, 平尾迪彦, 赤峰修一, 市来龍大, 大久保利一：水面上放電で生成された OH ラジカルの LIF 法による検出. 静電気学会誌, **34** (2010) 14
- 25) 江口 彌, 谷垣昌敬, 武藤邦夫, 土屋博嗣, 後藤英司, 佐藤俊樹：酸性水溶液中における亜硝酸の自己分解. 化学工学論文集, **15** (1989) 1102
- 26) C. H. Wu and E. D. Morris and H. Niki: The Reaction of Nitrogen Dioxide with Ozone. *Journal of Physical Chemistry.*, **77** (1973) 2507
- 27) P Lukes et al.: Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: evidence for the formation of peroxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H_2O_2 and HNO_2 . *Plasma Sources Science and Technology*, **23** (2014) 015019
- 28) 下村友人：成分モニタを内蔵したプラズマ栄養水製造装置の開発と同水の切り花への適用, (2020) 修士学位論文