

小特集

放電プラズマ・電磁界を応用した生物学・農学的研究

3. 電界・空気イオン・放電の植物影響

重 光 司

(電力中央研究所我孫子研究所)

Effects of Electric Fields, Air Ion and Corona Discharge on Plants

SHIGEMITSU Tsukasa

Abiko Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, Abiko 270-1194, Japan

(Received 17 March 1999)

Abstract

This paper briefly reviews the effects of electric fields, air ions, and corona discharge on plants. From the middle of the eighteenth century, electric fields and air ions have been applied to plants both in the field and under laboratory conditions. Although many studies have reported beneficial effects, the results have been inconsistent, and the electrical conditions leading to definite benefits cannot so far be predicted. High electric fields have been reported to damage plants by flowing the induced currents caused by corona discharge from the tips. Since the investigations have been continued, the results have been controversial and contradictory. There remains no firm theory governing electrophysiology in plants.

Keywords:

electric field, air ion, corona discharge, plant, biological effect

3.1 はじめに

1998年11月に打ち上げられたスペースシャトルのデイスカバリー号で、世界で初めて微小重力の宇宙空間で植物の根に電界をかけた時の成長を明らかにする実験が日本の宇宙飛行士によって行われた(宇宙開発事業団ホームページ, <http://www.nasda.go.jp/>参照)。地上では、植物の根の成長は重力の影響によって大きく左右されるが、微小重力下ではどのような成長をするかということを明らかにする実験で、結果として、電界に対して特定の方向に根が成長していくことがニュースとなって社会的な注目を浴びた。

さて、電気と植物に関する研究は古くから行われてきた。これらは、1) 植物体が電気刺激を受けた場合、電流の方向とは無関係に植物によって定まった運動をする

author's e-mail: t-shige@criepi.denken.or.jp

傾電性 (Electronasty), 2) 電気刺激に対して一定の方向に屈曲が起こる屈電性 (Electrotropism), 3) 植物の生育に及ぼす電気、空中電気の影響、などが取り上げられてきた。傾電性についてはオジギソウ、マイハギなどに刺激を与えた時の葉枕での膨圧変化に基づく葉の運動があげられる。屈電性には、エンバクの子葉鞘の先端5 mmで片側上下に10~30 μ Aの電流を1~2分間通すとその側に向かって屈曲が起こる例があげられる。植物の成長は光、水、温度、土壌などの環境因子に大きく影響を受けるが、これらの因子と植物との相互作用については多くの研究が見られる。電気が植物の生育に及ぼす影響についての研究は18世紀にさかのぼる。1746年にMainbrayがモモ科の低木に電流を流し、成長が促進し、開花が早まることを報告している。1748年にはフランス

の Nollet が帯電した電極上に植物を置き、発芽および成長が促進したと報告されている。1770年にはイタリアの Gardini が架空線下に植物を置き、荷電すると萎凋したが、架空線を取り去ると回復したことを報告した。フィンランドの Lemstrom は植物上に架空線を張り、架空線を (+)、大地を (-) として火花放電させ、地上 1 m で 10^{-7} – 10^{-8} A/m² の電流を加えると、オオムギが35%、ジャガイモが76%、ダイコン60%の増収があったこと、逆に架空線を (-)、大地を (+) にすると20%程度の減少があったことを報告した。この原因として、電流の方向により、土壤中での電気分解によるイオン吸収をあげている。

このように、18世紀の中頃から20世紀の初め頃にわたり、穀物および野菜を成長時に直流電界に曝し、収量の増加を意図した研究が行われた。我が国でも、1920年頃、電気栽培を目的とした様々な実験が行われ、適度な電界が植物の成長を促進させたとする報告がなされた[1]。これらは、自然界中の電気現象、特に、直流電界に着目して、植物の生育に及ぼす影響についての研究が行われた。同時に、交流電界 (50 Hz)、高周波電流 (130 kHz) の刺激を用いている。加電電極下においた植物では成長促進を、また自然の直流電界を金網で遮へいた状態では成長が抑えられることなどが明らかになった。

空中電気は、雷や嵐の悪天候の時だけでなく、静穏な晴天時でも常に存在しているから、地球上のすべての生物は、その誕生以来、十数億年にわたって地球電界や空気イオンの影響を受けつづけてきたことになる。空中電気の生物効果に最初に気づいたのは Turin 大学の Beccaria 神父 (1775) で、自然は明らかに空中電気を植物の生育に大規模に活用しているようだ、と言った。しかし、19世紀の終わり頃、Thomson ならびに Elster と Geitel の空気イオンの発見により、電界の効果を考える際には、空気イオンの作用も考慮する必要があることが指摘され、電界と空気イオンに関する生物への影響に関する研究が活発に行われるようになった[2]。

本稿では、電界・空気イオンなどの電気現象の植物の生育への効果を、コロナ放電現象など高電界中で植物体に観察される現象を交えながら紹介する。

3.2 電界と空気イオン

3.2.1 電界

環境中には、人工的な発生源と自然界に由来する様々な電界が存在する。地表面と電離層間で地球は大きなコンデンサをなしている。その周波数は直流成分から

1,000 MHz 帯に及ぶ交流成分が存在している。地表面の電界は、湿度、温度、風、霧などの気象条件と大気中のイオン濃度に大きく依存する。大気と地表面間で、電界は晴天時の約 0.1 kV/m、雷雲時の電界は主に数 10 C の電荷を持つ雷雲によるもので、地表面では約 30 kV/m に達する。また 1~15 Hz 前後の周波数帯の電磁現象は生物に影響を及ぼしていることが知られている。人為的に電界を発生させるには、平行平板電極を原則として使用しているが、温度、湿度などの空気質の変化に大きく依存することから、実験室で直流電界を作るには、環境条件を正確に把握しておく必要がある。また、直流電界を考える場合、空気中のイオンの作用を考える必要がある。例えば、直流送電線近傍ではイオン流によって物体が帯電する現象および大地に向かってイオン電流が流れる現象が見られる。このようなイオンの現象と植物との関係について検討された例は少ない。この現象は温度・湿度などに影響され、屋外では気象条件に強く支配される。

3.2.2 空気イオン

空気イオンは、大気を構成する窒素、酸素などの気体分子や、水滴、ばいじんなどの微粒子が電子を獲得したり、損失したりすることで発生する。自然界では、多くの場合、次のような原因で正、負イオンが対になって発生している。1) ラジウム、トリウムなどの地中放射性物質から放射される放射線や、大地から大気中に逃げたラドンなどの放射性ガスによる空気の電離。2) 雷などの、大気中の放電による空気の電離。3) 太陽からの紫外線による空気の電離 (光電効果)。4) 宇宙から飛来する宇宙線による空気の電離。5) 雨滴、滝などの水滴の分裂や、砂、じんあい、雪、ひょうなどが強風によって衝突、分裂することによる水滴、じんあいの帯電 (レナード効果、または滝効果)。6) 乾燥空気の急速な流れによる空気分子、水蒸気分子、じんあいなどの帯電 (フェーン、サンタアナ、シャラーフなど)。空気イオンに関係する量として、空間電荷密度、イオン密度およびイオン移動度があり、これらを正確に測定しなければならない。また実験室で空気イオンを人工的に発生させるには、ラジオアイソトープを用いる方法、コロナ放電による方法などがあるが、放電によってイオンを発生させる際には、オゾンや窒素酸化物の副産物の抑制を検討しなければならない。

3.3 電界の影響

3.3.1 植物体でのコロナ放電現象

コロナ放電は、たとえば、針-平板電極系に高電圧を

印加すると不平等電界が形成され、電界が局部的に絶縁破壊電界強度を超えた場合に生じる現象である。植物が高電界中に曝された場合には、植物体からコロナ放電が生じることが推察される。この放電現象が連続的に、常時発生しているとすると植物体に損傷を与えることが考えられる。そのため、我々は、植物体からのコロナ放電現象はいかなるものかを観察するため、50 Hz、50 kV/m までの電界を発生する電極を製作し、様々な植物のコロナ放電現象を観察した。本装置を用いて撮影した結果の例を Fig. 1 に示す。Fig. 1 に、暗黒中でプラスチック製のポットに植えたチューリップ、アロエに高電圧を印加した時の植物先端部からのコロナ放電の発生状態を示す。発生状態は、光電子増倍管を内蔵した暗視カメラ（フィルム ASA400、ナック社製）による写真撮影で確認した。Fig. 1 は、チューリップおよびアロエ、それぞれ 40 kV/m と 50 kV/m の電界中でコロナ放電発生状況を示す。我々が検討した範囲では、前者のコロナ発生しきい値は 31 kV/m、後者は 26 kV/m である。この違いは、両植物の形状の違いに由来するものである。Fig. 1 からわかるように植物の先端部が針のような鋭い葉先からコロナ放電の発生が集中している。上記植物以外にも、形状の異なるサイネリア、シクラメン、シャコバサボテン、サクラソウ等の観賞用植物を用いて、同様な実験を行ったが、それぞれの形状に依存して、コロナ放電発生しきい値がわずかに異なっている。このような放電

状態が長期にわたり連続的に生じた場合には、どのような現象が見られるかが次いでの問題となる。

McKee らは 60 Hz、50 kV/m までの電界が発生できる装置を用いて、コロナ放電により植物体に発生する損傷を明らかにした。まず、彼らは我々と同様に、高電界中でコロナ放電現象を確認し、葉先が鋭く、突出した形の植物では 25 kV/m で損傷が見られ、肉厚で丸みをおびた植物では 50 kV/m で損傷を受け、その部位でコロナ放電が見られ、次第に枯損することが明らかにされた[3]。その後、植物の損傷発生と電界強度との関係が 85 種類の植物によって行われた実験結果により求められた[4]。対象とした植物は、トウモロコシ、オオムギ、コムギなどの経済性のある栽培植物、キャベツ、カリフラワー、ベゴニア、マツなど、葉、花、種子など特徴のあるもの、サボテン、スマレなど自生地の特殊な植物などである。組織の形状と損傷の関係に加え、コロナ放電の発生電界しきい値と損傷発生電界しきい値はほぼ同じであることを示した。我々が写した葉先からのコロナ放電の発生結果と同様に、損傷やコロナ放電の発生は葉の形状・形態に関係し、鋭く針状の葉先でははっきりと損傷は生じ、丸く、肉厚な植物では 50 kV/m でも損傷は認められなかった。植物は 90% 前後の水分を含むため、植物を電氣的に導体と捉え、植物体を地面から上方に向かって突き出た電極として扱い、コロナ発生電界しきい値を針（植物）対平板電極での絶縁破壊メカニズムとして実験結果を定量的に扱った。損傷発生電界、すなわち、コロナ開始電界 E_{bd} として、Peek の式を用いて、以下の式を導き出した。

$$E_{bd} = E_{bdu} [1 + (0.54 \times \gamma^{-1/2})] \cdot \sigma \quad (1)$$

ここで、 E_{bdu} は絶縁破壊電界強度で、 γ は植物先端の半径、 σ は電界による増強因子である。 σ は植物先端の半径と高さによって変化する。タマネギ、トウモロコシ、ケンタッキーブルーグラス、スコッチパインの先端の形状を求め、実験結果と(1)式による電界しきい値とにより一致を見いだしている。

直流電界においても同様に葉先の損傷についての実験がいくつかなされている。その例として、オオムギの葉を高電界に曝すと、40 kV/m では損傷が生じないが、400 kV/m では瞬時に起き、800 kV/m 以上では、コロナ電流、オゾン、正イオンが形成されること、損傷は葉先から 1 mm 以内の部位に認められることが報告されている[5]。本実験では、大地に対して +15 kV の電圧を大きさ 0.25 × 0.75 m の編目状電極に印加し、オオムギ苗

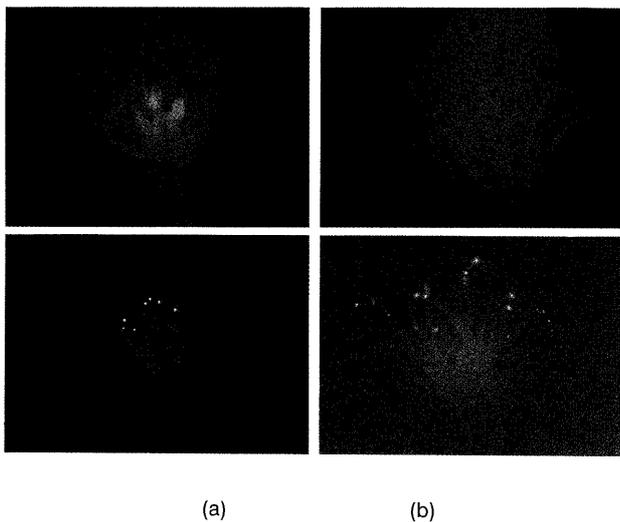


Fig. 1 Pictures of glow corona discharge on the terminal leaves (a) of tulip exposed to 50 kV/m and (b) of aloe exposed to 40 kV/m. The upper pictures are controls (unexposed).

の上部に斜めに電極を固定して、種々な電界強度が印加できるようにしている。インゲンの葉を高電界に曝露した結果、葉の縁によってコロナ放電が生じ、より深い緑色になることが報告されている[6]。植物上端に固定した電極を(-)にし、コロナ電流を $2\mu\text{A}$ に保つように電圧を加えた場合には何ら効果はないが、 $50\mu\text{A}$ では葉の変色が急速に生じ、45分以内で萎え始める。これらの現象をコロナ放電による葉先からの水分蒸発による焼損であるとしている。同様な結果は、ハツカダイコン、サラダナを用いた実験でも得られている[7]。

Murrは、直流電界中での植物の反応とコロナ電流との関係を調べ、植物体に流れる電流の範囲により、植物へ与える効果を分類した[8]。植物体あたりに流れる電流が 10^{-5}A 以上では植物体および葉の破壊が生じる、 $10^{-8}\sim 10^{-6}\text{A}$ で葉の障害、乾物量が減少するなどの負の作用、 $10^{-15}\sim 10^{-9}\text{A}$ では、成長促進、乾物量増加の正の作用、 10^{-16}A 以下では何ら効果はない。この結果を踏まえ、“Lethal Electrotropism”という概念が提唱されている。これからわかることは、電流を指標として成長への刺激効果ならびに破壊が見られる損傷効果を整理することができることである。

高電界中では、植物先端からコロナ放電ならびに植物体に電流が流れる。これに伴い、水分の蒸発が促進され、葉先が焼損する現象が観察される。その程度は、植物体の形状に大きく依存し、損傷発生しきい値も大きく変化する。

3.3.2 形状・形態に対する影響

高電界中での植物体に生じる電気現象として、コロナ放電ならびに植物体に電流が流れ、焼損が生じる現象がある。その例として、樹木を対象として我々が行った実験の一例を示す。実験に用いた高電界発生装置はFig. 2に示すように直径8mの環状多導体であり、地上3mの高さに電極を碍子で固定している。電極と大地間では、50 Hzで最大300 kVの電圧が印加でき、 100 kV/m の平等電界が得られる。実験対象は鉢植えした5~10年生のマツ、スギで2m以下の自然枯木である。本装置内に供試木を入れて、高電圧を加え、焼損現象を確認した。枯木の焼損はすべてで観察され、降雨・雪などにより十分に含水・湿潤した状態から、天候が回復し、急速に乾燥が始まり、樹皮から幹の心部まで乾燥する過程時に見られる。樹種による焼損の違いは葉枝の誘導電流の流れ方によって決まる。また焼損部分は炭素化され、外樹皮には部分放電した形成が観察された。Fig. 2に樹木の曝露状態および焼損・炭化状態を示す。スギなどでは幹か

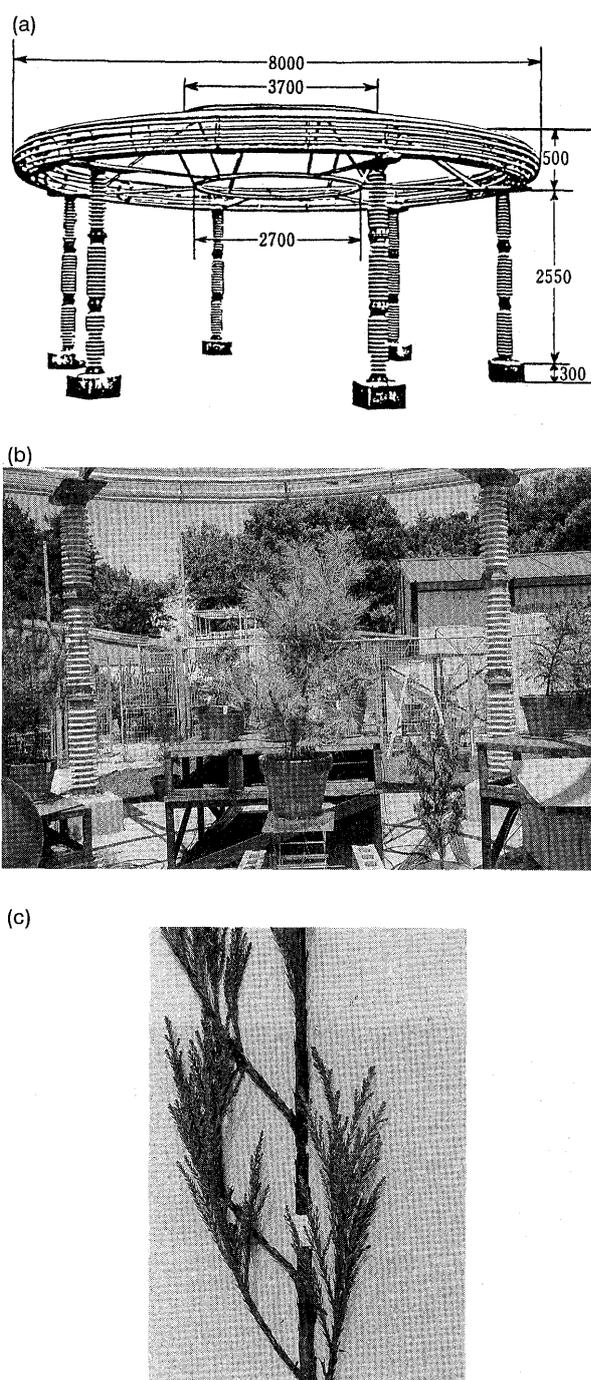


Fig. 2 The side view of our developed exposure facility (a), the view of tree, sugi during exposure (b) and the damage part from burning along stem (c).

ら交互に枝が出ているため、枝の元において焼損する機会が多く、マツでは幹の1ヶ所から数本の枝が出ているため、幹の元で焼損する機会が多く見られる。

このような現象が生じる原因は以下のように考えられる。湿潤した枯木が自然乾燥する場合、樹皮の表面から

乾いていくため、高電界中では誘導電流は乾燥が進むにつれ、内部に収束して流れる。乾燥後、局部的に含水率が少なくなる箇所ができ、その部位の電気抵抗が増加する。その箇所では誘導電流によってジュール熱が発生し、温度上昇するため、ますます乾燥が進み電気抵抗が高くなりジュール熱は増大する、含水率がゼロに近づくと部分放電が発生する。この状態では、枯木は高温で熱分解され、炭素化が内部から表面に向かって進展し、最終的に焼損が生じる。このような現象は空間電位が100 kV以上で見られことが指摘される。

3.3.3 生育に対する影響

高電界中ではコロナ放電による焼損現象が見られるが、低電界中での生育への影響を調べた研究がいくつか報告されている[9-11]。MillerらはSanguine計画の一環として、ソラマメの根に75 Hz, 0.1 kV/mの交流電界を加え、根の成長、組織の細胞分裂、染色体異常などを調べた。曝露期間は1, 24時間および6日であるが、影響は見られていなかった。しかし、60 Hz, 0.07~0.43 kV/mの電界に7日間曝露し、成長を観察した。その結果は、0.43 kV/mでは顕著な抑制効果が見られ、0.14 kV/mでは成長抑制は見られていない。Murrは、60 Hz, 10~80 kV/mの電界中でインゲンの発芽・成長に及ぼす影響を調べ、発芽に影響のないことを報告した。しかし、成長に対しては、電界曝露による抑制を見いだしている。10~50 kV/mで葉の成長は促進されるが、50 kV/m以上では成長が抑えられている。葉の組織が電界によって蒸発し、損傷が大きくなり障害となるが、適当な電界に曝すと成長の促進が可能であることを指摘している。

200 kV試験線下でハツカダイコン、サツマイモを栽培し、成育への影響を確認した実験がなされた[12]。電界強度としては、10~20 kV/mであり、収穫時の植物の草丈、地下部、地上部の重量、大きさ、葉数などを調査し、直流電界の促進効果を報告している。特に直流(-)区では生体重が対照区に比べ、約3倍以上になっており、促進効果が顕著であった。成長促進や形態形成には炭水化物やオーキシン、サイトカイニンなどの植物ホルモンが関与していると考えられる。炭水化物は、光合成により葉で生成され、根に転流されることから地上部と地下部の成長バランスが関係する。

トウモロコシの幼根の成長に対する電気刺激効果を調べた結果が報告されている[13]。幼根に±(5~40)Vの電圧を3時間印加し、成長状態を観察した。根の頂端を正電圧にすると、5 Vでも成長速度が抑制され、電圧を上

昇させるとさらに抑制する。一方、極性を逆にすると、効果は見られない。電圧を上昇させると、抑制が大きくなる。これらの結果に対して、植物ホルモン分泌が電圧によって影響を受けるものによるとしている。すでに、植物の成長点における電位変動と極性変化とオーキシンをはじめとするホルモン濃度変化や移動などとの関連性が調べられている。

3.4 空気イオン・放電の影響

大気中の浮遊帯電粒子を空気イオンと呼んでおり、多くは空気中や水蒸気中の分子に正または負の電荷が付着したものである。大気中の汚染状態によって空気イオン密度は影響を受け、粒子の径により、小・中・大イオンと分類される。小イオンは清浄な大気中で、500~600個/cc、大気汚染地区では100個/cc程度といわれている。

直流電界の効果を考える場合、カルフォルニア大学のKruegerらが指摘しているように空気イオンの効果も考慮する必要がある。そのため、彼らは1950年代から1980年代にかけて、空気イオンの植物への影響研究を積極的に進めた[2,14]。空気イオンによる研究では、次のような結果が報告されている。① 5.9×10^3 個/ccの正イオン、 5×10^3 個/ccの負イオンにオートムギを発芽時より曝露し、草丈、生体重、乾物重など成長に対する効果を調べ、発芽に対しては効果がないが、乾物重でイオン処理区で増加し、負イオン処理区では成長が大きく、全体としてイオン効果が見られる報告。②通常、鉄を含まない培養液で育てたオオムギの苗は鉄クロロシスを生じる。正負イオンに曝露させるとクロロシスの発現が早まり、大量のチトクロムCの出現を伴う。鉄を含まない培地で、空気イオン曝露下で成育させるとクロロシスは生ぜず、イオンによる成長増加とチトクロムCの増加が見られる報告。③ O_2^+ 、 O_2^- 、 CO_2^+ 、 CO_2^- を発生させ、オオムギをグロースチャンバ内で正負イオンが 1.8×10^4 個/ccである雰囲気中で生育させた。この状態で成長への効果を観察し、 O_2^+ 、 O_2^- 処理群では成長が大きく、促進作用があり、 CO_2^+ 、 CO_2^- 処理群ではクロロシスが見られ、成長の抑制作用がある。 O_2^+ 、 O_2^- での促進効果はチトクロム生成、Fe代謝などを刺激することを示している報告。④オオムギ(幼根)を正イオン、 1.1×10^5 個/ccと負イオン 0.9×10^5 個/ccに15日間曝露し、真性褐斑障害に対する抵抗性と草丈、生体重、乾物重を調査し、正イオンは発病を3日間遅延させ、負イオンでは発症は認められず、草丈、乾物重がわずかに増加する傾向が見られる報告。⑤平均草丈65 mmのインゲンの苗をイオン電流で

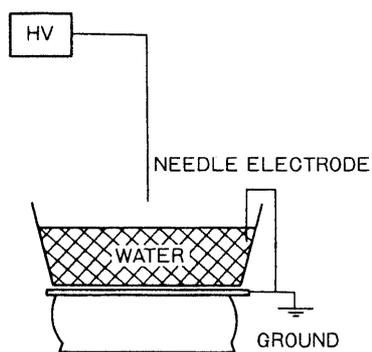


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus: (HV) high voltage power supply.

7~20 pA の負イオン, 6 kV の交・直流電界にグリーンハウス内で曝露し, 生体重, 開花率, 開花時, 収穫期などを調査し, 収穫が2週間短縮し, 生体重, 草丈がそれぞれ61%, 85%増加し, 開花時の短縮, 開花率の向上が見られた. 結果として空気イオンの増収効果を示した報告. ⑥トマトを負イオン $6\sim 20 \times 10^3$ 個/cc に曝露し, グリーンハウス内で水耕栽培し, 成長, 品質, 経済性などを調べ, 864本を負イオンに曝露し, 576本を低負イオン環境下で栽培し, 収穫が処理区で早く, 果実形成が促進され, 成分の改善に効果が見られ, 実規模での栽培実験としてコスト面でも優れている報告.

空気はその成分の約80%は窒素であり, その酸化物である NO は水に溶けにくい, NO₂ は水に溶けやすい. そのため, 地殻中では硝酸塩の形で分布し, タンパク質の形で動植物に存在している. 空気中ではコロナ放電状態で, 窒素, 酸素が十分なエネルギーを得た場合, イオン化し対極に向かうことは十分考えられる. 古くから, 高電圧下での現象の一つに植物の生育に関する報告が数多くなされている. 植物の生育にとっては, 空気中の窒素の取り込みが重要である. この観点から, コロナ

放電に伴う高電圧に曝された蒸留水のアンモニア, 亜硝酸, 硝酸態窒素の各イオン濃度変化を調べた[15].

実験は, Fig. 3 に示すように下部電極として 500 cc のビーカーを用い, 水面上 0.05 m の箇所に針電極を固定し, ビーカーに 300 cc の蒸留水 (伝導度は μS 程度) を加え, 最大 20 kV の電圧を針状電極に加えた. 接地は 1 M Ω の抵抗を介して行った. 電圧印加時の負荷電流を測定し, 電圧印加時間は約22時間で変化させた. 対照は蒸留水を室温で放置したものである. アンモニア, 亜硝酸, 硝酸態窒素の分析は電界に曝した蒸留水を 200 cc のビーカーにとり, 2日以内に行った. 実験時の大気中の窒素酸化物の濃度測定は行っていない. 室内の温湿度を制御せず, 自然のままとした. さらに, 各イオンの分析は Stickland に従い, 比色法で行った[16]. その分析結果を Table 1 に示す. 放電処理した結果, 蒸留水に含まれる植物の生育にとって重要な硝酸態窒素, アンモニア態窒素の取り込みがそれぞれ増加していることがわかる. これは対照と比べて, 放電によって生じた窒素イオンが直接液中に取り込まれることを意味している. 取り込み以外に, コロナ放電に伴う水分の挙動として, 蒸発の促進が見られ, 放電電流 10~20 μA で 2~3 倍に達する. この蒸発促進に対しては, コロナ風が起因していると思われる.

一方, コロナ放電処理による種子の発芽促進効果に関する報告がいくつかなされている[17,18]. 熊野の実験結果は, レタスの種子を用い, コロナ放電により種子の発芽が促進することを示し, そのメカニズムに検討を加えている. その結果は, 1) 乾燥空気下で種子にコロナ放電処理を施すと発芽率が上昇すること. 2) 酸素のみ, 窒素のみの放電雰囲気下で処理した種子の発芽率には変化はないが, 酸素と窒素の共存下では発芽促進が見られた. 我々の結果と同様に, 3) 水に対して, コロナ放電

Table 1 The effect of corona discharge on the concentration of NH₄-N, NO₂-N and NO₃-N in distilled water.

(unit : $\mu\text{M}/\text{l}$)

Condition	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N	Exposed time (Hr)
(-) Voltage - 5 μA	21.7	4.6	5.9	32.3	22.5
- 10 μA	57.2	5.5	5.4	68.1	22.0
(+) Voltage + 5 μA	29.9	2.8	2.9	35.5	22.5
+ 10 μA	28.3	8.7	12.7	49.7	22.0
Control	4.6	0.2	0.5	5.3	—

を施すことで、水中に硝酸、亜硝酸、アンモニウムイオンが取り込まれた。4) コロナ放電処理種子の水抽出成分には硝酸イオンが含まれる。5) コロナ放電により生成した硝酸イオンが、種子の内部に吸収されることで発芽が促されることがわかった。一方、白らは実用化をめざして、同様にコロナ放電により、キュウリ、ナス、トウモロコシ等の種子の発芽促進、成長への効果、増収効果を報告している[18]。種子の処理は、直流電界は100～500 kV/m、空気イオン濃度が約 10^5 個/ccの複合条件下で行っている。処理時間は3秒から2時間である。

3.5 おわりに

植物に対する電界・空気イオンの効果に関する研究は古くから多くの研究者によって実施されてきたが、その結果はきわめて幅広くばらついており、一致点を見つけて、明確な結論を導き出すことは難しい[19]。しかし、逆に、電界・空気イオンなどの電気刺激が植物にまったく影響を与えないということは考えにくいことである。このような観点から、データ全体を眺め、全般的な傾向を求めると以下のようなことがいえる。1) 強い電界は植物の葉や茎の先端にコロナ放電を発生させ、成長を阻害させ、焼損をもたらす場合が見られるが、2) 空気イオンは植物を成長促進、収量増加に有効と考えられる。3) 適当な強さの直流電界は、イオンの効果を強め、植物の成長促進に有効と推測される(大気中には、必ず空気イオンが存在するから、直流電界単独の実験は難しく、実際は、直流電界と空気イオンの重畳と考えられる)。

多くの実験が行われているが、データがばらついたり、相互に矛盾したりして明確な結論が得られない理由は以下のような点が考えられる。1) 対象植物の個体のばらつき(個体差、実験に使用する前の取り扱いの相違)、2) 栽培条件の相違(土耕、水耕、れき耕などの栽培条件、肥料条件の違い)、3) 環境条件の違い(圃場か施設内か、ガラス室かビニールハウスかなどの相違)、4) 電気的条件的の違い(電界・空気イオンの曝露方法、電界強度、イオン濃度、曝露時間、曝露量の測定方法などの相違、空気イオンの実験では、対象物近傍の金属物体(対象物周辺の電界分布に影響する))、5) 湿度、風速、空気中のじんあい量などに影響されやすい。6) 植物影響の評価方法の相違。これらの条件の違いを少なくした共通的な実験手法を開発し、感度の高い影響評価を行うことで、

電気刺激の応用開発に役立つことが期待される。

宇宙空間の閉鎖環境中での植物栽培の基礎データを得るために電界による成長制御実験がデイスカバリー号で試みられた。植物の成長制御や貯蔵性の向上などに電気刺激を利用することで、微小なエネルギーで大きな効果をもたらす可能性がある。電気刺激の活用は今後の展開が期待される研究分野である。

参考文献

- [1] 渋谷元治, 柴田桂太: 電気学会誌 **47**, 1259 (1927).
- [2] 重光 司, 中村 宏: 電力中央研究所調査資料, U91906 (1991).
- [3] G.W. McKee, D.P. Knievel, D.T. Poznaniak and J.W. Bankoske, IEEE PAS **97**, 1177 (1978).
- [4] J.G. Johnson, D.T. Poznaniak and G.W. McKee, Biological Effects of Extremely Technical Information Center, US-DOE, (1978) p.172
- [5] C.H. Bachman and M. Reichmanis, Int. J. Biometeor. **17**, 243 (1973).
- [6] F.X. Hart and R.S. Schottenfeld, Int. J. Biometeor. **23**, 63 (1979).
- [7] 重光 司: 電力中央研究所研究報告 U88035 (1988).
- [8] L.E. Murr, Nature **5002**, 1177 (1969).
- [9] M.W. Miller, M.M. Reddy, G.R. Yettewich and C.E. Kaufman, Environmental and Experimental Botany **16**, 83 (1976).
- [10] M.W. Miller, E.L. Carstensen, G.E. Kaufman and D. Robertson, Low Frequency Electromagnetic Fields, Technical Information Center, US-DOE, (1978) p.109.
- [11] L.E. Murr, Int. J. Biometeor. **10**, 135 (1966).
- [12] 菅沼浩敏, 中山元司, 重光 司, 荻野明雄: 電力中央研究所研究報告 483014 (1984).
- [13] M.F. Desrosiers and R.S. Bandurski, Plant. Physiol. **87**, 874 (1988).
- [14] J.M. Charry and R.I. Kavet, *Air ions: physical and biological aspects* (CRC Press, 1987) p.185.
- [15] 重光 司: 電力中央研究所研究報告 486011 (1986).
- [16] J.D. Stickland and T.R. Parsons, *A Practical Handbook of Newwater Analysis*, 2nd ed, Fisheries Research Board of Canada Bull **167**, 310 (1972).
- [17] 熊野英史: 東京工業大学修士論文 (1994).
- [18] 白 希堯, 陳 作礼, 馬 文田, 姜 兆仁, 刘 慎言: 静電気学会誌 **8**, 339 (1984).
- [19] 松尾昌樹編著: 文献・特許にみる微小エネルギーの農業・食品分野への応用技術(流通システム研究センター, インフォメディア・シリーズ 14, 1993).