

論文内容の要旨

氏名	清水邦彦
学位の種類	博士(農学)
学位記番号	農第126号
学位授与の日付	平成20年9月15日
学位授与の要件	学位規程第4条第1項該当
学位論文題目	Basic study of electrostatics-based methods for protecting hydroponic tomatoes from airborne and rhizosphere pathogens (静電気技術を用いた養液栽培トマトの地上部および根部病害の物理的防除に関する基礎的研究)
論文審査委員(主査)	教授 豊田 秀吉
(副主査)	教授 宇都宮 直樹
(副主査)	教授 松田 克礼

施設栽培におけるうどんこ病の発生は病原菌分生胞子が外部から侵入することによって起きている。一旦、施設内に侵入した病原菌はその子孫となる分生胞子を風媒させ、空中を飛散して感染範囲を拡大する。うどんこ病菌の分生胞子は菌糸から直立した分生子柄で生産される。成熟した分生胞子は難脱可能な状態になると分生子柄から空中に放出される。放出される分生胞子の総数は、ひとつの分生子柄が生産する胞子数と菌叢内に存在する分生子柄数の積となり、1つの菌叢から約10万個の分生胞子が飛散する。また、その飛散数は施設内の温度や湿度など栽培環境の影響を受け、飛散頻度は循環される空気の流れに左右される。我が国における施設園芸規模は50,000haに達し、低コスト、高収益で安全性の高い農産物の生産が求められている。トマトの施設栽培では、害虫の侵入防止を目的に防虫ネットを開口部に設置する手段がとられる。防虫ネットの設置は、コナジラミやスリップス等難防除害虫の侵入防止に高い効果を示すが、その反面通気性が低下し、夏期高温時には施設内の温度上昇と多湿を招き、病害の多発と高温障害による生育不良や品質低下をもたらす。特に、うどんこ病菌の分生胞子はその大きさが10μm以下であり、通気性を保持する防虫ネットでその侵入を防止することは不可能である。トマトの病害はうどんこ病などの地上病害だけでなく、根部における土壌病害も発生する。土壌病害に対しては、有効な治療薬が開発されておらず、予防的な土壌殺菌が中心であった。しかしながら、モントリオール議定書により従来から使用されてきた土壌殺菌剤「臭化メチル」の使用が禁止され、臭化メチルに代わる有効な殺菌剤・殺菌方法の開発を待っているのが現状である。そのような背景も加わり、トマトの施設栽培は土壌から養液栽培へと移行している。現在、国内におけるトマト栽培のおよそ70%が養液栽培である。しかしながら、トマトの養液栽培においても土壌病害である青枯病や萎凋病は発生する。一旦発生すると、その被害は土壌での栽培より激しく、短期間で養液を媒体として施設内トマトに蔓延する。根部病害に対する治療薬が開発されていないことから、これらの病害に対しても外部からの侵入を防止することが唯一の病害防除手段となっている。動物や植物だけでなく、菌類や細菌を含むすべての生物は電氣的に導体の性質を示す。導体特性の1つとして静電誘導による表面の分極現象が挙げられる。空中で絶縁状態にある分生胞子に静電気帯電した絶縁体(マイナス帯電)を近づけると胞子の表面に逆電荷(プラス帯電)が誘起される。プラスに表面帯電した胞子とマイナス帯電した絶縁体の間には電氣的引力が発生し、空中に浮遊する分生胞子は逆の電荷をもつ絶縁体に吸着される。この物理現象を利用することにより、静電気を利用した空中浮遊胞子の捕獲による植物病害防除が可能となる。静電気は電氣的な引力を発生するだけでなく、その周辺空間に静電場を形成する。静電場に対極電位(接地されたアース)が存在するとその空間の空気は電離してプラズマ状態となる。空気がプラズマ状態に

なると電離した酸素分子が結合しオゾンが生成される。オゾンには殺菌作用があり、飲料水やスイミングプールなど水中に暴露処理することによる水の滅菌に利用されている。オゾンの殺菌作用は強い酸化力に基づいている。しかしながら、水中に暴露されたオゾンの酸化能力は比較的短く、自然状態では数分程度ですべて酸素に戻る。すなわち、環境に優しい安全な殺菌方法であると言える。この方法を養液栽培に適用すれば、栽培過程で水中に侵入した青枯病菌やフザリウム病菌を殺菌することが可能になる。本実験では静電気の引力を用いたトマトうどんこ病菌侵入防止技術の開発とプラズマによるオゾンを用いたトマト青枯病菌およびトマト萎凋病菌の殺菌技術の開発を実施した。

1. トマトの低段密植栽培システム

近畿大学農学部植物感染制御工学研究室におけるトマトの栽培は低段密植栽培である。低段密植栽培とは、株間を8~10cmとしてトマトを定植し、第一花房の果実のみを成熟させて収穫する方法である。第一花房の上位2節までを残し、茎頂を含む上位葉をすべて切除するため、低段栽培となる。また、第一花房の果実のみを収穫するため、栽培期間は短縮される。栽培期間の短縮は、病虫害の発生を回避することにつながり、病害が大規模に発生する前に収穫を終了できる利点がある。一方、苗を密植して育てるため、多くの苗が必要となる。また、栽培期間が短いことから多くの苗の供給が必須となる。通常、この栽培方法は大きく2つの栽培系に分けられる。ひとつは苗の育成過程であり、もうひとつは収穫過程である。苗生産過程で感染した病原菌は、収穫初期段階で繁殖し、栽培施設内に拡大する。収穫過程で病害の発生を抑制するためには、苗生産過程における管理が重要となる。そこで本実験では、苗生産段階における病害防除システムを開発することとした。

2. 誘電分極体を利用したトマトうどんこ病の物理的防除

誘電分極体はその周辺に静電場を形成し、その電場に入り込んだ浮遊物を捕捉することができる。この原理をうどんこ病防除に応用するため、帯電銅線をアクリルシリンダー(絶縁体)で被覆した誘電分極体シリンダーを作製し、それらを平行に配列して静電場スクリーンを構築した。このスクリーンを養液栽培中のトマトの育苗栽培に適用し、うどんこ病菌 *Oidium neolycopersici* の防除効果を検討した。すなわち、接種源としてうどんこ病菌に感染したトマト苗をスクリーン防護水耕区の周辺部に置き、大型ファンにより施設内の空気を循環させて1ヶ月間の苗栽培を実施した。その結果、育苗ハウス内のほとんどのトマト苗がうどんこ病菌の感染を受けたのに対し、スクリーンで防護したトマト苗はすべて感染をまぬがれ、苗生産過程における本法の有効性が確認された。

3. オゾンを利用したトマト青枯病および根腐萎凋病の物理的防除

静電場スクリーンを利用すれば、トマトうどんこ病菌分生子を捕捉することが可能であり、育苗場面でのトマトを保護できることが明らかとなった。本実験では、誘電分極シリンダーを改良し、オゾン発生能を与えた。すなわち、帯電銅線をアクリルシリンダー(絶縁体)で被覆した誘電分極シリンダーの片方に銅リングを取り付け、リングと内部銅線先端の間でプラズマ状態が発生する部位を設けた。この改良型の誘電分極シリンダーを使用すれば、空中の胞子を捕捉するだけでなく、発生させたオゾンで養液栽培系に適用して病原菌の侵入阻止にも利用できる。まず、トマト幼苗育成中の水耕液に微小気泡にしたオゾンを連続的に加え、その後、青枯病菌や根腐萎凋病菌小型分生子の懸濁液を加えて、侵入病原菌に対する抑制効果を検討した。その結果、オゾン無処理区では多数のトマト苗に萎凋症状が発生したが、処理区では試験期間を通じてトマト苗の健全な生育が観察された。すなわち、本スクリーンを用いれば水耕栽培トマトの根圏および地上部において、病原体の侵入・感染を事前に防ぐことができると考えられる。新型トマトうどんこ病は、1986年にオランダ、ブルガリアで発生が報告され、その後も感染範囲を拡げ、1997年までには、ほぼヨーロッパ全土に拡大した。北米では1994年にカナダのケベック州で報告され、1996年にはアメリカ合衆国へと範囲を拡大した。日本においても本菌の発生が確認され、1998年には、近畿大学実験圃場(奈良県)でも大発生した。このうどんこ病菌は、調査したすべての栽培トマト品種(150品種)に感染し、特にトマトの子葉、幼苗にも激しく感染することから薬剤散布による防除を余儀なくされている。現在、新型トマトうどんこ病はストロビルリン系やEBI系の化学薬剤を処理すれば防除できる。しかしながら、化学的防除だけに頼る過度な薬剤散布は耐性菌の出現を危惧させる。根部病害である青枯病菌およびフザリウム病菌に対して、有効な治療薬は無く、すべてが殺菌による予防薬である。しかしながら、現在のところ、養液栽培の溶液中に処理可能な登録薬剤はない。その様な状況から、溶液の管理には多大な労力と経費が費やされている。オゾンは処理後速やかに酸素に変換されることから使用に制限はない。唯一の制限は植物に及ぼす影響であるが、溶存酸素が増加することから逆に根の生育が旺盛になる報告もある。本実験で開発したシステムは地上病害と根部病害を同時に抑制できる手法であり、また、システムがユニット形式で構築されることからスケールアップはユニット数を増やせば対応できる。今後は他の病原菌に対する効果などを検討し、より適用範囲の広いものに改良したい。

論文審査結果の要旨

申請者は、我が国における施設園芸規模は 50,000ha に達し、低コスト、高収益で安全性の高い農産物の生産が求められていることに着目している。トマトの施設栽培では害虫の侵入防止を目的に防虫ネットを開口部に設置する手段がとられる。防虫ネットの設置は、コナジラミやスリップス等難防除害虫の侵入防止に高い効果を示すが、その反面通気性が低下し、夏期高温時には施設内の温度上昇と多湿を招き、病害の多発と高温障害による生育不良や品質低下をもたらす、と考えている。特に、うどんこ病菌の分生胞子はその大きさが $10\mu\text{m}$ 以下であり、通気性を保持する防虫ネットでその侵入を防止することは不可能である、と推察している。トマトの病害はうどんこ病などの地上病害だけでなく、根部における土壌病害も発生する。土壌病害に対しては、有効な治療薬が開発されておらず、予防的な土壌殺菌剤が中心である。しかしながら、モントリオール醸定書により従来から使用されてきた土壌殺菌剤「臭化メチル」の使用が禁止され、臭化メチルに代わる有効な殺菌剤・殺菌方法の開発を待っているのが現状である。そのような背景も加わり、トマトの施設栽培は土壌から養液栽培へと移行している。現在、国内におけるトマト栽培のおよそ 70% が養液栽培である。しかしながら、トマトの養液栽培においても土壌病害である青枯病や萎凋病は発生する。一旦発生すると、その被害は土壌での栽培より激しく、短期間で養液を媒体として施設内トマトに蔓延する。根部病害に対する治療薬が開発されていないことから、これらの病害に対しても外部からの侵入を防止することが唯一の病害防除手段となっている。そこで申請者は、動物や植物だけでなく、菌類や細菌を含むすべての生物は電気的に導体の性質を示すことに目を向けている。導体特性の 1 つとして静電誘導による表面の分極現象が挙げられる。空中で絶縁状態にある分生胞子が静電気帯電した絶縁体（マイナス帯電）を近づけると胞子の表面に逆電荷（プラス帯電）が誘起される。プラスに表面帯電した胞子とマイナス帯電した絶縁体の間には電氣的引力が発生し、空中に浮遊する分生胞子は逆の電荷をもつ絶縁体に吸着される。申請者は、この物理現象を利用することにより、静電気を利用した空中浮遊胞子の捕獲による植物病害防除が可能となる、と考えている。

申請者は、農学分野に以下に示す新しい概念を提供しようとしている。静電気は電氣的な引力を発生するだけでなく、その周辺空間に静電場を形成する。静電場に対極電位（接地されたアース）が存在するとその空間の空気は電離してプラズマ状態となる。空気がプラズマ状態になると電離した酸素分子が結合しオゾンが生成される。オゾンには殺菌作用があり、飲料水やスイミングプールなど水中に暴露処理することによる水の滅菌に利用されている。このオゾンの殺菌作用は強い酸化力に基づいている。しかしながら、申請者は、水中に暴露されたオゾンの酸化能力は比較的短く、自然状態では数分程度ですべて酸素に戻る。すなわち、環境に優しい安全な殺菌方法である、と考えている。この方法を養液栽培に適用すれば、栽培過程で水中に侵入した青枯病菌やフザリウム病菌を殺菌することが可能になると判断している。

本申請は、静電気の引力を用いたトマトうどんこ病菌侵入防止技術の開発とプラズマによるオゾンを用いたトマト青枯病菌およびトマト萎凋病菌の殺菌技術の開発を実施したものである。誘電分極体はその周辺に静電場を形成し、その電場に入り込んだ浮遊物を捕捉することができる。この原理をうどんこ病防除に応用するため、帯電銅線をアクリルシリンダー（絶縁体）で被覆した誘電分極体シリンダーを製作し、それらを平行に配列して静電場スクリーンを構築している。このスクリーンを養液栽培中のトマトの育苗栽培に適用し、うどんこ病菌 *Didym neolycopersici* の防除効果を検討した。すなわち、

接種源としてうどんこ病菌に感染したトマト苗をスクリーン防護水耕区の周辺部に置き、大型ファンにより施設内の空気を循環させて 1 ヶ月間の苗栽培を実施した。その結果、育苗ハウス内のほとんどのトマト苗がうどんこ病菌の感染を受けたのに対し、スクリーンで防護したトマト苗はすべて感染をまぬがれ、苗生産過程における本法の有効性が確認している。

以上の成果は、植物病理学の世界的権威である Phytopathology に掲載された。

静電場スクリーンを利用すれば、トマトうどんこ病菌分生子を捕捉することが可能であり、育苗場面でトマトを保護できることが明らかとした。本申請では、誘電分極シリンダーを改良し、オゾン発生能を与えている。すなわち、帯電銅線をアクリルシリンダー（絶縁体）で被覆した誘電分極シリンダーの片方端に銅リングを取り付け、リングと内部銅線先端の間でプラズマ状態が発生する部位を設けている。この改良型の誘電分極シリンダーを使用すれば、空中の胞子を捕捉するだけでなく、発生させたオゾンに養液栽培系に適用して病原菌の侵入阻止にも利用できる。まず、トマト幼苗育成中の水耕液に微小気泡にしたオゾン連続的に加え、その後、青枯病菌や根腐萎凋病菌小型分生胞子の懸濁液を加えて、侵入病原菌に対する抑制効果を検討している。その結果、オゾン無処理区では多数のトマト苗に萎凋症状が発生したが、処理区では試験期間を通じてトマト苗の健全な生育が観察されている。すなわち、本スクリーンを用いれば水耕栽培トマトの根部および地上部において、病原菌の侵入・感染を事前に防ぐことができると考えている。新型トマトうどんこ病は、1986 年にオランダ、ブルガリアで発生が報告され、その後感染範囲を拡げ、1997 年までには、ほぼヨーロッパ全土に拡大している。北米では 1994 年にカナダのケベック州で報告され、1996 年にはアメリカ合衆国へと範囲を拡大した。日本においても本菌の発生が確認され、1998 年から近畿大学実験圃場（奈良県）でも大発生している。このうどんこ病菌は、調査したすべての栽培トマト品種（150 品種）に感染し、特にトマトの子葉、幼苗にも激しく感染することから薬剤散布による防除を余儀なくされている。現在、新型トマトうどんこ病はストロビルリン系や EBI 系の化学薬剤を処理すれば防除できる。しかしながら、化学的防除だけに頼る過度な薬剤散布は耐性菌の出現を危惧させる。根部病害である青枯病菌およびフザリウム病菌に対して、有効な治療薬は無く、すべてが殺菌による予防薬である。しかしながら、現在のところ、養液栽培の溶液中に処理可能な登録薬剤はない。その様な状況から、溶液の管理には多大な労力と経費が費やされている。オゾンは処理後速やかに酸素に変換されることから使用に制限はない。唯一の制限は植物に及ぼす影響であるが溶存酸素が増加することから逆に根の生育が旺盛になる報告もある。本申請で開発したシステムは、地上病害と根部病害を同時に抑制できる手法であり、また、システムがユニット形式で構築されることからスケールアップはユニット数を増やせば対応できる。以上のことから、申請者は他の病原菌に対する効果などを検討し、より適用範囲の広いものに改良したいと考えている。

以上の研究成果は、植物病理学の世界的権威である Plant Pathology に掲載された。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。なお、審査にあたっては、論文に関する専攻内審査および公聴会など所定の手続きを経たうえ、平成 20 年 7 月 15 日、農学研究科教授会において、論文の価値ならびに博士の学位を授与される学力が十分であると認められた。