

1 はじめに

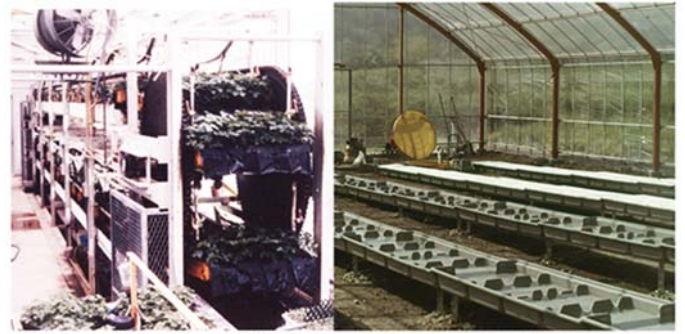
養液栽培は、終戦後、占領軍（米軍、進駐軍）が衛生的な野菜生産を目的に、東京都調布市と滋賀県大津市に導入した礫耕栽培にはじまる。この礫耕栽培をもとに、国、地方農業試験場、農家、メーカーで作り上げた技術が現在の養液栽培技術になっている。

大阪府には、1963[昭和 38]年にトマトとキュウリの礫耕栽培が誕生、1965[昭和 40]年には、堺市の百舌鳥礫耕園芸組合ができるなど急速に面積を伸ばしていく。やがて、養液栽培は、礫耕から水耕栽培へと方式が変化していくが、私が養液栽培に出会ったのはこの変換の時期で、能勢農場には、北摂地域の農業振興を目的に水耕栽培が導入された。

当時、養液栽培は、ウレタン培地や少量の細礫を培地にした水耕方式（培地を用いずに根を培養液に浸漬して栽培する）が中心で、所内には、各メーカーの開発した最新の水耕栽培システムをそろえた養液栽培研修施設があった。この中には、大阪府農林技術センターで開発した段流式水耕装置もあった。

段流式水耕装置は、培養液中の溶存酸素取り込み量の多い栽培システムで、セキスイ化学より市販されていた。所内には、この他、海外の装置化作物生産設備の視察から誕生した工業的作物生産装置も稼働しており、未来農業の展示場の様相を呈していた。

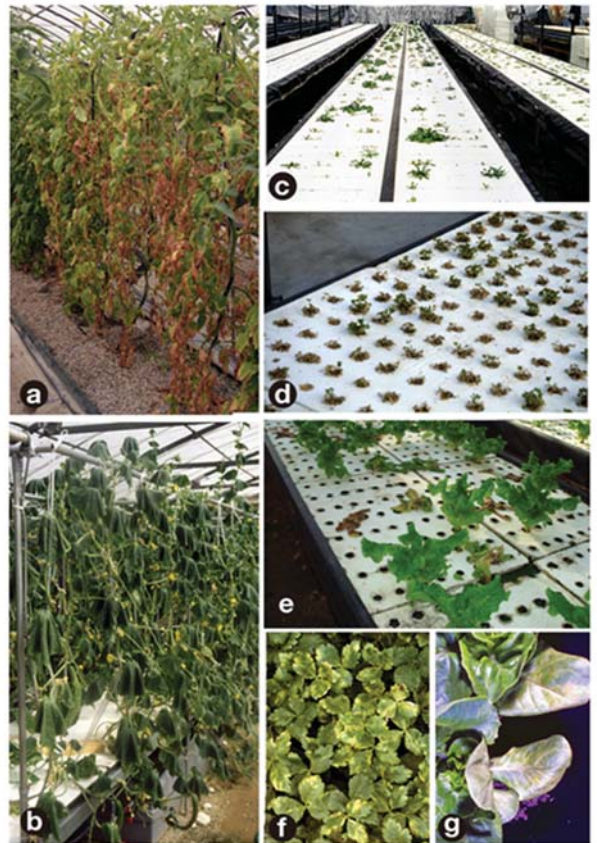
当時、所内では、栽培部や環境部で、培養液濃度管理、要素欠乏症、品種選定、整枝法、病害防除等の研究が行われていた。しかし、養液栽培は全国的に、面積増加がもう一つ伸びないという問題があり、原因として、栽培管理や病害の発生時の防除対策、設置コストによる問題があった。しかし、成功している農家では高収益が得られ、先進的な農業技術であることには変わりがなかった。



昭和 48～49 年中核研究、大都市近郊地域における軟弱野菜の高度装置化栽培技術の確立で設置された工業的作物生産装置（左）。農林技術センターで開発された、段流水耕装置（右）。段流水耕装置は、栽培槽に堰があり、水流に段差ができ、溶存酸素の取り込みが多くなる装置で、当時としては、果菜類栽培に適した装置とされた。

2 養液栽培と病原菌

大阪府内の養液栽培では、キュウリの疫病、トマトの青枯病、ミツバの根腐病等の病害発生が問題であり、被害診断が能勢農場へ持ち込まれた。



養液栽培で発生する病害
a: トマト萎凋病、b: キュウリ根腐病、c: シュンギク根腐病、
d: ミツバ根腐病、e: ミツバ根腐病、f: ミツバ根腐病、g: ミツバ根腐病

養液栽培施設で発生した根部障害を調査すると、病原菌が 2～3 種類の特定の菌類に起因することがわかった。当時、京都府立大学でも養液病害の研究が行われており、ミツバでは、*Pythium* 属菌の一種で *P.sp.group F*（有性器官を作らない種）が病原菌であること、また、トマトやキュウリについては、疫病菌（*Phytophthora* 属菌）による被害は少なく、ほとんどが *Pythium aphanidermatum* という種に限定され



能勢農場の水耕栽培：昭和 48 年より水耕栽培の試験を始めたが、昭和 49 年には、研究所の開発した段流水耕装置も設置され、本格的な研究が始まった。
a: 段流水耕装置によるメロンの栽培、b: トマトの品種比較試験、c: イチゴ、一寸ソラマメ等の作物適用性試験等各種の試験が実施された。d: 農場の冬期、12 月以降は、氷点下気温が続き、積雪がある。

ることもわかった。後に、バラなどの花き類については、岐阜県農業試験場、岐阜大学の研究で *Pythium helicoides* による被害が報告され、養液栽培の病害の多くが、ストラメノパイル (*Stramenopiles*: 鞭型と羽毛型の2本の長さの異なる鞭毛をもつ遊走子を形成する藻類の仲間) と呼ばれる生物群に属する病原菌、*Pythium* 属菌による被害であることがわかってきた。この傾向は、海外でも同様で、*Paphenidermatum* と *P.sp.group F* による被害が大半を占めると報告されている。

3 病害防除対策

養液栽培では、作物体への薬剤散布は可能であるが、培養液中に農薬を混入はできないことから、農薬を使わない防除技術の開発が求められた。農作物や施設栽培の病害と取り組む中、養液栽培の病害、生産物の衛生管理の研究に組むことになった。

(1) 浸透圧、pH、培養液温度

Pythium 属菌は淡水、汽水域の生物 (のりの赤腐病の病原菌も同属) で、高い浸透圧の溶液中では、増殖器官 (遊走子) が形成できず、被害が抑制される。ミツバは、育苗時に培養液濃度を低くして栽培し (1/4 単位: 標準の 1/4 濃度)、収穫時で標準濃度にするのが原則であるが、培養液濃度を高く (2 倍以上 EC:4.5mS) とすることで被害発生が抑制できる。これは、高濃度培養液は浸透圧が高く、病原菌の遊走子形成が抑制されることに起因する。遊走子形成は、蒸留水より、カルシウムイオン等の希薄な溶液中で良好になるが、濃度が高いと高浸透圧により遊走子形成が抑制される。水耕培養液の主成分は硝酸カルシウムであり、培養液濃度を上げるとカルシウム濃度が上昇し遊走子形成が阻害される結果となる。また、培養液の pH を低くする (pH 5.5 以下の酸性にする) ことでも形成が阻害されることもわかった。しかし、培養液濃度を上げることは作物の生育上問題があり、対策として十分ではなかった。

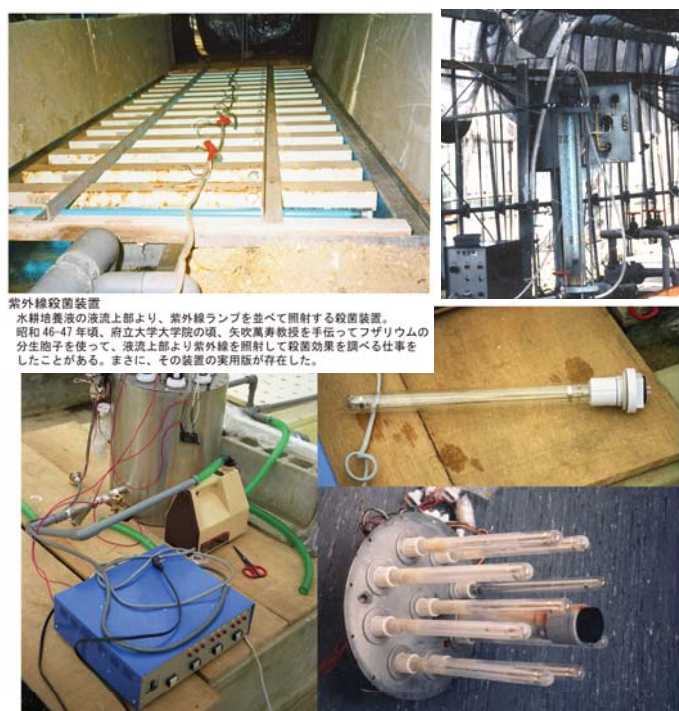
もう一つ、病害発生を抑制する要因として、培養液温度がある。夏期高温時期に発生する根腐病の多くは、培養液温度が 24°C 以下になると被害が減少し、20°C 以下ではほとんど発生しないことが、わかった。培養液を冷却するにはチラーが効果的であったが、当時は高価で導入は難しかった。最近では、チラーの価格も下がり、効率も良くなったので、培養液冷却に使われ、低温管理により被害が抑制できるようになった。また、

植物工場では、培養液温が 18~20°C で管理されており、根腐病の発生はほとんど問題ではなくなった。しかし、新たに、低温環境下で培養液伝染性する手強い病原菌 (*Olpidium* 属菌) の被害が発生し問題となっている。

(2) 紫外線

農薬を使わないで培養液中の病原菌を殺菌する方法としては、紫外線、オゾン殺菌がある。

培養液中に紫外線を照射することで水中の微生物を殺菌できることは知られていた。当時、紫外線ランプを水中に入れるのは難しく、培養液上に紫外線ランプをならべて照射する方法が考案された。ランプを水中に入れるには、防水した石英管中にランプを入れて水中照射するが、大阪府内のメーカー、セン特殊光源 (株) の UZON という、紫外線照射により水中の気泡の酸素をオゾンに変換する殺菌装置の試験をすることになった。



紫外線殺菌装置
水耕培養液の液流上部より、紫外線ランプを並べて照射する殺菌装置。昭和46~47年頃、前立大学大学院の頃、矢吹風寿教授を手伝ってフザリウムの分生胞子を使って、液流上部より紫外線を照射して殺菌効果を調べる仕事をしたことがある。まさに、その装置の実用版が存在した。

左: 流水殺菌灯を使った紫外線殺菌装置、右上: 流水殺菌灯、右下: 殺菌装置内の紫外線ランプおよび攪拌ポンプの配置

所内の水耕装置に病原菌を接種し、装置を接続したところ、培養液中の病原菌を殺菌し、ハウレンソウの根腐病 (*Papahnidermatum*) の防除が可能であることがわかった。やがて、水中に直接紫外線ランプをつけることのできる流水殺菌灯が開発され、松下電器産業 (株) (現 パナソニック (株)) 照明研究所の森田 政明氏や洞口 公俊氏と水中の紫外線強度を測定し、ステンレス容器内に設置するランプの最適本数を調査して、培養液殺菌装置を開発した。紫外線殺菌は、メ

メンテナンスが十分であれば簡便で効果的な処理法であり、養液栽培において殺菌に利用された。

現在、光源は蛍光管から LED へと置き換わっており、LED を用いて害虫の行動を制御する光源も実用化されている。病害防除では UVB ランプによる抵抗性誘導が実用化されているが、近日中にも、紫外線殺菌や UVB（紫外線 B 波）ランプも LED に置き換わって登場すると思われる。

(3) オゾンの農業利用

オゾンガスにより、ウイルス（1976[昭和 51]年）、細菌、糸状菌（1978[昭和 53]年）が殺菌できるという報告はあるが、濃度や防除効果についてはほとんど何も知られていなかった。

農林技術センターでのオゾン殺菌の研究は、1991～1992[平成 3～4]年のオーシエン지니어リング(株)との受託研究が最初である。高濃度のガス状オゾンをエジェクターにより培養液中に溶解して 1～3 ppm のオゾン水を調整し、オゾン水で培養液を殺菌する方法を調査した。このとき初めて、オゾンが培養液中の肥料成分を強力に酸化する事例を見た(マンガン、鉄、カルシウムを酸化する)。いくつかの問題が発生したが、混合装置等を改良し、培養液と経路別にして環流する装置を作成し、キュウリ根腐病の防除試験に成功、養液栽培で防除に使えることを実証した。



養液栽培のオゾン水循環による殺菌効果を調べた試験装置
左上：オゾン水調整装置、左下：オゾン発生装置、右：キュウリの栽培状況

現在、養液栽培では、培養液中の病原菌殺菌に、オゾンガスを曝気するのが一般的で、大東市の野村電子工業(株)のマイクロブラーによるオゾンガス曝気装置が、養液栽培施設で利用されている。オゾン水を養液栽培装置に循環する方式も、殺菌効果や施設全体

の消毒には優れているが、栽培装置の構成が複雑になる。



オゾン水散布と病害防除効果

3-5ppmのオゾン水を動力噴霧器で散布することによって、うどんこ病等の病害防除にも効果のあることを確認した。
a: オゾン水の散布ノズルの開発、
b: キュウリうどんこ病への散布効果（無処理区：発病がある）、
c: オゾン水散布区（発病がない）

オゾン利用の研究は、この後、(株)神戸製鋼所と 6 年間にわたり国の公募事業の中で実施した。養液栽培への導入方法、オゾン水散布による病害防除、オゾン水による発芽促進、生育促進効果など、農業分野への利用を目的にした試験研究を実施し、酸素系殺菌剤が農業分野に利用できることを明らかにしてきた。

この他、オゾン水については、1994～1996[平成 6～8]年度「オゾンの有効利用技術の開発」で大阪府立公衆衛生研究所、産業開発研究所との共同研究（大阪府予算）があり、(株)IHI から提供を受けた高濃度オゾン水生成装置を用いて、ガス殺菌、オゾン水殺菌、オゾン脱臭、オゾン氷について、生鮮野菜の殺菌法、畜産分野における脱臭効果、病虫害防除分野への利用研究が 3 年間実施された。

(4) 無機系抗菌剤

培養液を殺菌する資材で安全性の高いものを検索する過程で、無機系の抗菌剤の利用を検討した。当時、養液栽培の病害防除に銅イオンが利用されたが、キュウリ疫病に 1.0～1.5ppm の濃度で防除効果がある（長江春季ら）ものの、1.5ppm 以上で薬害発生があり、処理量が難しいとされた。銀については、STS（チオ硫酸銀）の利用が検討されたが、20ppm の濃度が必要で、毒性が問題となるといわれた。

所内で銀イオンの殺菌効果を検討したところ、イオン化した銀では 20ppb で *Pythium* 属菌の遊走子を殺菌できることがわかり、培養液中に添加して使うことができると考えられた。(株)サトーセンは大阪府内のメッキメーカーで、銀被覆繊維布の農業利用について相談があった。布は、表面が難溶性の酸化銀で被覆さ

れており、水に浸漬すると微量の銀イオンを生じた。塩類溶液中では銀濃度が増加して薬害をおこすことから、溶出を防ぐ対策を検討して誕生したのが「オクトクロス」である。



オクトクロスと防除効果
 キュウリ根腐病菌を接種した水耕装置にオクトクロス (c) を入れて培養した結果。a: オクトクロス区では、発病葉ないが、b: 無処理区では発病し、生育も悪い



銀担持繊維 (ポリプロピレン繊維) を用いた抗菌フィルター
 金井重要工業 (株) 製の抗菌フィルター、バクテクリンAg、銀担持ポリプロピレン繊維を糸巻きフィルターにしたもの。60ミクロンの孔隙があり、目詰まりが少ないフィルター。
 銀による抗菌作用で高い殺菌効果が得られる (銀溶出がない)

農薬登録をとりたいたのことで、農林技術センターにおいて、作物残留分析、廃液、作物残渣等への銀残留量等を調査して対応した。(株)サトーセンの趙志宏氏 (後に早稲田大学で学位を取り、Harvard Universityの医学部の准教授に) が分析し、同社の江口晴一郎氏が銀分析を指導した。本邦では、銀を農薬に登録した記録はなく、農林水産省の農薬検査所 (現 FAMIC) 突破は大変難関で、同社の伊藤克彦氏とともに対応に当たった。9年間かけて農薬登録 (2002[平成 14]年: 金属銀剤) ができた。オクトクロスは、現在、三島光産 (株) より販売されており、現在も使用され、17年間農薬登録を保持している。これ以降、銀が農薬 (金属銀水和剤) として登録されるようになった。



無機系抗菌剤による病害防除効果
 左上: キュウリは面上の銀ゼオライト粒子 (走査電子顕微鏡)
 右上: 銀ゼオライトスラリーと粉体 (シナネンゼオミック)
 左下: 無処理区のキュウリ (病斑が見られる)
 右下: 銀ゼオライト撒布区 (20%スラリー<2%Ag>の500倍液) 7日間隔3回撒布区

銀については、銀蒸着繊維による抗菌フィルターや抗菌マットを金井重要工業(株)と開発してきた。また、(株)シナネンゼオミックとは、銀ゼオライトによるうどんこ病、根こぶ病防除効果を調査し、東亜合成(株)、大塚化学(株)などからも銀資材を供してもらい病害防除への利用を検討した。

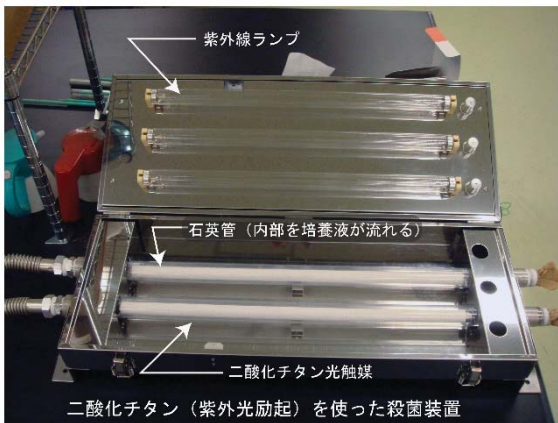
(5) 光触媒

二酸化チタンによる光触媒について、養液栽培では神奈川県がいち早くこれにとり組んでいた。所内でも二酸化チタンの農業利用の研究がいくつかあり、(株)MORESCO社の光触媒を使った松村石油(株)より、二酸化チタンを使った光触媒殺菌装置の培養液殺菌効果を見てほしいとの受託研究があった。紫外線励起の二酸化チタン触媒で、処理すると防除効果や防藻効果が得られた。静岡、愛知の試験場でも実施され病害効果が確認された。

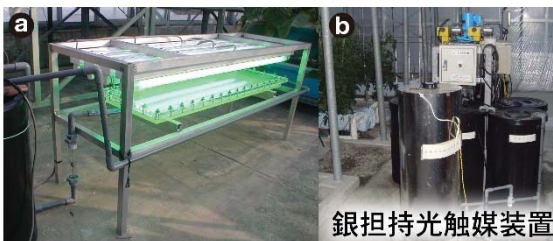
光触媒については、徳島大学の高麗寛紀先生をはじめ徳島県、ジェイイーシー(株)、阿波製紙(株)とともに、可視光による銀担持光触媒の培養液殺菌装置に関する試験で、農林水産省の「先端技術を活用した農林水産研究高度化事業」に参画し、完成した装置について徳島県の現地農家で実証試験した。

光触媒、オゾン、紫外線による殺菌は、それぞれ特徴があるが、大規模な栽培施設では設備投資とランニングコストがかかる。最近では、これらをすべてとり

入れた、ピュアキレイザー（東洋バルブ(株)）のような機材もある。



二酸化チタン光触媒による殺菌装置
光触媒を紫外線で励起して活性酸素を生成して微生物を殺菌する



銀担持光触媒装置による培養液殺菌
a: 可視光線で励起する銀光触媒 (藻の発生を抑制するために緑色光を用いている。試験用の平板式の装置で培養液の流れる槽内に銀光触媒があり、上面から緑色光を照射する。b: 銀光触媒をステンレス円筒容器に格納した実用化装置 (徳島県の養液栽培農家で実用化試験が実施された。)

(6) 亜リン酸肥料

ロープーラン社の開発したホセチルアルミニウム (商品名アリエッティ) は、浸透移行性に優れたべと病、疫病の防除薬剤である。この薬剤の成分である亜リン酸を三共(株) (現 ホクサン(株)) が肥料登録した。亜リン酸は、この農薬であるホセチルアルミニウムの代わりとして、オーストラリアの森林病害防除に使われ、防除効果のあることが報告されている資材である。

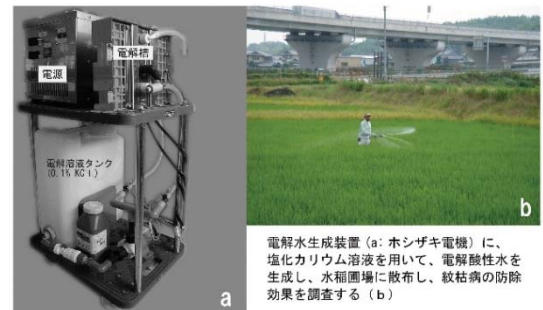


亜リン酸による *Pythium* 根腐病の防除効果
亜リン酸カリウムを用いた肥料で肥料登録されている資材。10,000倍で培養液に添加するのが基本であるが、5000倍、3000倍と濃度が高くなると生育抑制する。a: 無処理 (萎凋している)、b: 標準の10,000希釈 (生育も良好)、c: 5000倍 (やや生育が抑制)、d: 市販されている亜リン酸肥料

三共(株)より入手した亜リン酸資材について調べたところ、あらかじめ培養液に添加することで、*Pythium* 属菌によるトマト根腐病の発生を軽減できることがわかり、本邦で最初に植物病理学会へ報告した。現在、亜リン酸は肥料として使われており、ブロッコリーのべと病の抑制など、卵菌目病害の被害軽減に使用され、養液栽培においても培養液に添加することで *Pythium* 属菌による根腐病の被害発生を抑えることに貢献している。

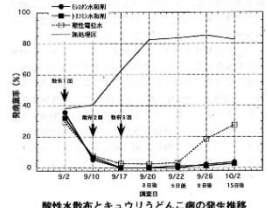
(7) 酸性電解水

酸性電解水の農業利用は、パナソニック(株)の受託試験で提供されたアマノ(株)製の強酸性電解水生成装置 (スーパーオキシードラボ) で始めた。



散布液	調査圃数	発病圃数	発病率 (%)	防除率 (%)
対照液 (清水)	120	4	3.3	95
強酸性電解水 (100倍希釈)	87	7	10.4	81
強酸性電解水 (500倍希釈)	115	2	1.7	97
無病圃数	82	24	24.4	

散布液	調査圃数	発病圃数	発病率 (%)	防除率 (%)
対照液 (清水)	102	16	15.6	59.5
強酸性電解水 (100倍希釈)	112	6	5.4	66.0
強酸性電解水 (500倍希釈)	87	3	3.4	91.2
無病圃数	91	32	32.5	



酸性電解水を農作物に散布して病害を防除する効果については、うどんこ病、灰色かび病で実証試験をし、2014年、特定農薬として承認された。研究所では、うどんこ病、灰色かび病、はじめ、ミガ立枯病まで、酸性電解水の効果データを提供した。

pH2.7 の強酸性水を希釈してキュウリやナスのうどんこ病に散布し、防除効果を検討した。ナスでは近傍に散布すると葉に障害が発生するが、うどんこ病については農薬に劣らない防除効果があることもわかった (1999[平成 11]年)。酸性電解水を生成するとアルカリイオン水が生じるが、その利用について大阪府立大学の阿部 一博先生の協力を得て水田へ散布し、水稻の生育について実証試験をした。これがきっかけで、病害防除、生鮮野菜の微生物汚染除去を含めて、酸性電解水と長く付き合うことになる。

電解水による養液栽培の病害防除についても、日本施設園芸協会の「次世代型野菜生産技術事業」で3年間の予算をもらい、松下精工(株) (現 パナソニックエコシステムズ(株)) と弱酸性電解水による培養液殺菌装置を開発した。塩素系殺菌剤の養液栽培への利用はかなり難しいが、培養液中のクロラミン生成を抑制することで利用できることがわかった。この事業では、

関東天然瓦斯開発(株)と千葉大学によりヨウ素化合物の培養液殺菌についても検討されており、塩素同様に防除効果の得られることも確認された。

その後、酸性電解水については、ホシザキ電機(株)(現 ホシザキ(株))と各種農作物に対する防除効果試験を実施し、(一社)日本電解水協会、ホシザキ電機(株)の努力もあって、2014[平成 26]年に特定農薬の認定を得た。

(8) 静電場スクリーン

トマトのハウス栽培でコナジラミによる黄化葉巻病の発生が問題となった。ハウスには0.4mm目あいの寒冷紗を張って栽培することが通例となったが、通気性が確保できず、高温障害の問題があった。通気性を保持し、害虫の侵入を防止する対策が求められた。

近畿大学では、豊田 秀吉先生が、静電気によるうどんこ病の胞子を捕捉する研究をしており、この静電気を使って、病原菌、害虫を捕捉する研究がはじまった。



静電場スクリーンとハウスへの設置

- a: 大阪府立環境農林技術センターに設置された静電場スクリーン
- b: 滋賀県農業振興センターに設置された静電場スクリーン
- c: 近畿大学で最初に作られた静電場スクリーンの模型装置
- d: 静電場スクリーンの電極部分に捕足された昆虫

静電場スクリーンについては、高電圧を扱う上に、構造が複雑で、近畿大学の松田 克礼先生やスタッフ、学生さんの協力が不可欠であった。電力供給部分については、パナソニックエコシステムズ(株)の納村氏の協力があり、2017[平成 29]年4月に当研究所に実用規模装置が設置され運用が開始された。静電場スクリーンハウスについては、うどんこ病、すすかび病、コナジラミの侵入を阻止することが確認され、通気性も高いことが確認された。現在、滋賀県農業技術振興センターに実用規模装置が稼働している。滋賀県の装置については、(株)園田製作所をはじめ、大阪府内の中小企業グループが担当して作り上げた。

静電気による飛動生物体捕捉技術は、空間に強力な電場を形成し、飛動生物に電場による静電誘導で電荷

を発生させ、吸着捕捉するシステムで、集塵機の捕捉法とは異なる。静電場スクリーンは、農作物病害虫に止まらず、花粉、衛生害虫、貯穀害虫、ウイルスや細菌等の微生物まで捕捉できることが確認されており、食品関係、医薬衛生分野にまで利用することが可能である。静電気を誘導する基本特許を近畿大学、カゴメ、当研究所で保持しており、静電場スクリーン研究会を通して利用分野を探查している。今後、研究会に参画している企業により新しい利用分野への機材開発が期待できる。

4 これからの研究

養液栽培の病害防除に関する技術開発は、農家、メーカーの研究者・技術者、共同研究機関のスタッフはもちろんのこと、大阪府の農の普及課や当研究所の防除グループなどの職員を含む、各関係機関の連携と協力があってできあがったと考えている。

研究所は、農林水産業、食品加工、環境分野に関するきわめて広い分野を対象に研究をしている。私は、植物の病気を主に研究してきたが、農作物の病害診断や防除を対象とする場合、物質に対する知識のみならず、生命化学の分析手法、さらに、最近ではAI(人工知能)の知識も必要である。養液栽培の病害虫防除では、多数の研究者、技術者の知恵を借りてやってきた。

今後、ますます新しい技術開発が求められることから、時代を担う世代の皆さんには、専門外のことも含めて開発に挑んでほしい。知恵を結集することで、新技術開発は必ずできると信じている。

養液栽培の病害虫防除研究をするにあたっては、京都府立大学の宮田 善雄先生、大阪府立大学植物病理の東條 元昭先生、岐阜県農業試験場の渡辺 秀樹氏に、試験方法についてのご指導や菌核分譲をいただいた。また、養液栽培に関しては、大阪府立大学の池田 英男先生や、京都府立大学の寺林 敏先生をはじめ、日本養液栽培研究会および大阪府養液栽培研究会の皆様より貴重な情報やご指導をいただいた。

銀に関する研究では、(株)サトーセンの皆様や、三菱製紙(株)の椿井 靖雄氏より貴重な生物毒性の文献やご指導をいただいたことに感謝したい。

そして、仕事がなかなかうまくいかなかった時に、京都大学の上山 昭則先生(故人)、津田 盛也先生(故人)には、たびたび励ましていただいたことが忘れられない思い出である。

(筆・草刈 眞一)