

低濃度多量農薬散布の静電散布装置に関する研究*

Study on an Electrostatic Pesticide Spraying System for
Low-Concentration, High-Volume Applications

山根 俊

Suguru Yamane

*筑波大学大学院 生命環境科学研究科 学位審査論文 2010 年（平成 22 年）

目次

第Ⅰ章	農薬散布の現状と取り上げる静電散布の概要	1
1	農薬散布の現状	1
2	静電散布の原理と概要	2
3	静電散布に関する既往の研究成果と現状	4
4	本研究の背景	5
5	本研究の目的	9
第Ⅱ章	低濃度多量散布における静電散布装置の帯電性能	10
1	序言	10
2	材料及び方法	10
3	結果及び考察	12
4	総合考察	16
第Ⅲ章	キャベツに対する付着性能と害虫防除効果	17
1	序言	17
2	室内試験	17
3	実証試験	22
4	総合考察	25
第Ⅳ章	温室メロン用静電散布ロボットの開発	26
1	序言	26

2	材料及び方法	27
3	結果及び考察	30
4	総合考察	33
第V章	総括	35
	引用文献	38
	Summary	42
	謝辞	44

第 I 章 農薬散布の現状と取り上げる静電散布の概要

1 農薬散布の現状

日本国内では、2007 年現在、年間 26.6 万トンの農薬が生産され、消費されている¹⁾。これらの農薬の大部分は、散布によって圃場に投下されている。

農薬散布の主な施用方法は、固形剤散布と液剤散布である。固形剤散布には、散粉法と散粒法がある。また液剤散布には、噴霧法、ミスト法、スプリングラ法、フォームスプレー法がある。そのほか特殊な散布方法として、施設栽培で利用される煙霧法や薫煙法等がある²⁾。

国内の主要作物であるイネの場合、粉剤や粒剤の固形剤散布が中心であったが、近年では育苗箱施用剤や、田面水に塊状の剤を投げ込むだけで使用できるジャンボ剤が普及している³⁾。

これに対し、水田稲作以外の作物栽培における農薬散布は、液剤散布が一般的である。液剤散布では、水和剤、水溶剤、乳剤等を水で適正な濃度に希釈して散布液を調製し、動力噴霧機（以下、動噴と記す）等の散布機を用いて散布する。

液剤散布は固形剤散布に比べ、様々な利点がある。液剤散布は希釈液を散布するため、薬害の問題が少ない。また、固形剤散布に比べ噴霧液滴に大きい運動エネルギーを与えることができ、散布ノズルの遠方まで液滴が容易に到達する。さらに、付着後の液滴は湿潤、拡散、浸透、圧展し、乾燥すれば固着する性質がある⁴⁾。これらの理由から、露地野菜栽培や果樹栽培、及び施設栽培の本圃における農薬散布は、殆どが液剤散布により行われている。

国内における液剤の面積当たり散布量を表 1-1 に示す。水稲では生育初期に 70～100 L/10a、生育後期に 140～180 L/10a を散布しており、畑作物や果樹に比べると少ない。畑作物は品種が多岐にわたり、作物群落形状も様々であることから、散布量は 100～300 L/10a と幅広い。果樹は樹高が高く、群落の葉相が密であるから、多量の薬液を散布する傾向があり、散布量は 300～800 L/10a と他作物より多い。

液剤散布では、散布量により 50 L/10a 以上を多量散布、0.6～50 L/10a を少量散布、0.6 L/10a 以下を微量散布の三つに分類する（表

表 1-1 国内における地上散布の慣行液剤散布量 (L/10a)

水稲	生育初期	70 ～ 100
水稲	生育後期	140 ～ 180
畑作物		100 ～ 300
果樹		300 ～ 800

農薬散布技術編集委員会 (1998)

表 1-2 液剤散布における散布量の分類

多量散布 (High Volume application)	50 ≧
少量散布 (LV: Low Volume application)	0.6 ～ 50
微量散布 (ULV: Ultra Low Volume application)	≧ 0.6

農薬散布技術編集委員会 (1998)

1-2)。先述の通り、国内の慣行液剤散布量は 70～800 L/10a であり、多量散布の範疇に分類される。

国内の慣行液剤散布における希釈倍率は 500～5000 倍である。この希釈倍率は、薬剤毎に農薬取締法により規定されており、規定以外の倍率で散布することは禁じられている。

液剤散布の場合、同じ有効成分量を投下する場合でも、散布量は希釈倍率により大きく変わる。500～5000 倍の希釈倍率で 50 L/10a 以上の多量散布を行う散布方式は、低濃度多量散布と呼ばれている。これに対し、欧米では希釈倍率 100 倍以下で、50 L/10a 以下の少量散布を行っており、濃厚少量散布と呼ばれている⁴⁾。

国内の液剤散布では、大正時代から動噴が広く用いられており、作目に関わらず殆ど全ての農家が使用している。一般的な動噴の例を図 1-1 に示す。動噴は原動機と加圧ポンプ、薬液ホース、薬液タンク、散布ノズルから構成される単純な構造である。また、ブームスプレーやロボットスプレーカなどの大形散布機にも、ほぼ同一構造のポンプと散布ノズルが搭載されている。低濃度多量散布の場合、ノズル散布圧

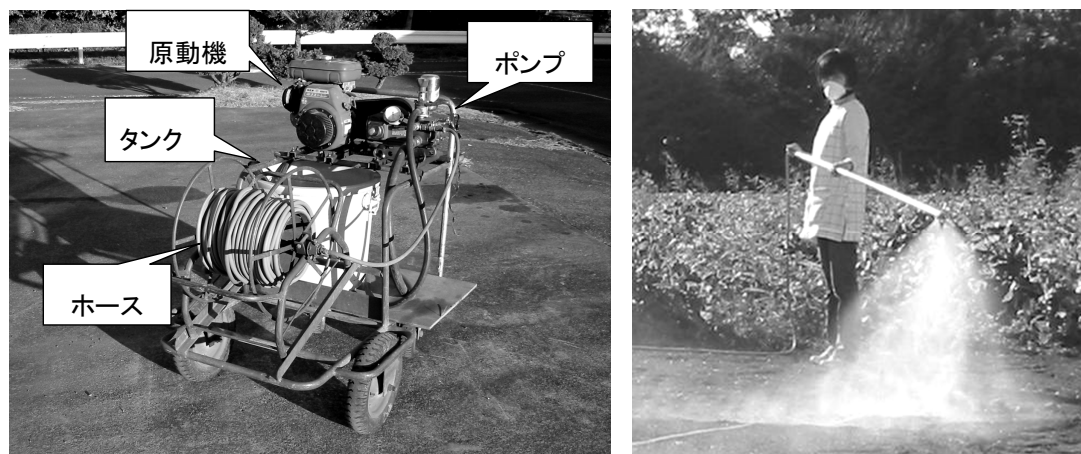


図 1-1 国内で一般的に使用されている動力噴霧機の例

左：動力噴霧機の外観と構成（原動機出力 2.2 kW）

右：散布ノズルからの噴霧状況

力は 0.7～2.5 MPa 程度で、ノズル流量は一個あたり 0.5～3.0 L/min である。ノズルの噴霧粒径は体積中位径で 100～200 μm 程度が標準的である²⁾。

動噴のノズルから散布された農薬液滴は、散布対象物の噴霧方向に対し正面にあたる部位には良く付着するが、噴霧方向に対し背面となる葉の裏側や、茎葉の込み入った部分は液滴が付着せず、作物群落内に均一かつ十分に付着させることは難しい。このため、人力でノズルを振り動かし付着を徹底するとともに、多量散布により付着の均一化を計っている。しかし、今井ら⁵⁾、及び Law⁶⁾の研究報告を総合すると、慣行の農薬散布では、薬液散布量に対する散布対象物への付着量の比率(以下、付着率と記す)は 30%程度と低く、散布量の 60～70%が付着せずに空中飛散あるいは地表面へ落下し無駄となっている。

近年では防除作業の効率化のため、ブームスプレーヤー等の大形散布機やロボットスプレーカー等の自動散布機が普及しているが、これらは噴霧方向が一定のため付着不十分な部位が発生しやすく、病害虫の残存を招く。このため付着率や均一性を高める散布技術の開発が望まれている。

2 静電散布の原理と概要

従来の散布方法では付着困難な作物体の葉裏などに対して、液滴を効率良く付着させる散布技術のひとつが、静電散布である。静電散布は

噴霧液滴に帯電することで発生する電荷の力(クーロン力)により、散布対象物に対して液滴を強制的に付着させる特徴がある。

液滴に静電気を帯電させる方法には、誘導帯電法、コロナ帯電法、直接帯電法の 3 種類が用いられている。農業分野における各帯電方法の得失を表 1-3 に示す。

表 1-3 農業分野における
各静電気帯電方式の得失

帯電方式	長所	短所	農業機械への 適合性
誘導帯電	帯電効率が 高い 構造簡易 機械的強度が 大	電極濡れ 小形	良好
コロナ帯電	構造簡易	帯電効率が 低い 比較的高電圧が 必要 植物体への放電、 損傷	困難
直接帯電	帯電効率が 高い 小形	装置の絶縁確保が 困難 構造複雑	困難

誘導帯電法は、ノズル近傍に設置した環状や筒状、もしくは平板状の誘導電極により液滴を帯電させる。低電圧で帯電効率が良く、機構が単純というメリットがある。

コロナ帯電法は、噴霧液滴の通過する空間に針状のコロナ放電電極を設置することで液滴を帯電させる。機構が単純であるが、他の帯電方式に比べて帯電効率が低い。十分な帯電を確保するためには電極に 15～60 kV 程度の高い電圧を印加する必要があるため、電極から散布対象物にアーク放電が発生し、植物体を傷つけることがある。また高電圧を電極に供給するため特殊な高耐電圧電線を使用しており、農作業における環境の厳しい屋外使用では、電線被覆の

損傷による漏電や感電が懸念される。

直接帯電法はノズル噴口に金属等の導体を用い、噴口に直接高電圧を印加して帯電させる。原理上、電極装置、ホース配管類、薬液タンクを含めた装置全てをアース電位から完全に絶縁しなければならない。したがって実用機レベルでの採用は非常に困難である。

誘導帯電法は構造簡易で帯電効率が良いことから、農業機械に良く適合した帯電方式であり、既存静電散布機の殆どは同方式を採用している。

誘導帯電法による液滴帯電の概要を図 1-2 に示す。誘導帯電では、ノズル噴口の噴霧通過位置近傍に、高電圧を印加した誘導電極を設置する。噴口から吐出された液体は、始め液柱もしくは液膜状を呈しているが、正の高電圧を印加した誘導電極により、液柱先端部に負の電荷が誘導される。液柱が進行すると先端は液滴に微粒化し液柱から分離するため⁷⁾、負の電荷を帯電した液滴が生成される。図 1-2 では正の誘導電極により負の帯電液滴が発生しているが、逆に電極を負とすれば正の帯電液滴が得られる。

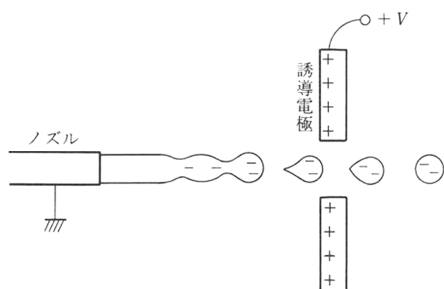


図 1-2 誘導帯電法による液滴の帯電

原図：静電気学会⁸⁾

電界中において帯電粒子に作用する静電気の力は、Lorentz の式によって説明される⁹⁾。

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (\text{式 1-1})$$

ここで、 $\mathbf{F}$ ：帯電粒子に働く静電気の力(N)

q ：物体の帯電量(C)

$\mathbf{E}$ ：電界 [V/m]

$\mathbf{v}$ ：速度 [m/s]

$\mathbf{B}$ ：磁界 [Wb/m²]

電界 $\mathbf{E}$ は、高電圧を印加した電極と散布対象物間に形成される電界である。帯電粒子が電界内で静止もしくはゆっくり移動している場合、磁界の影響は非常に小さく無視できる。このため、粒子に働く静電気の力は粒子の帯電量と電

界に支配され、

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (\text{式 1-2})$$

となる。よって粒子の帯電量が大きく、粒子のおかれた雰囲気電界が強いほど、静電気の作用する力は大となり、付着率の向上が期待できる。

静電気帯電用電極と散布対象物間に形成された電界による電気力線に従って飛翔する帯電液滴の模式図を図 1-3 に示す。ここでは帯電液滴に正の符号が記されているが、負の帯電でも液滴の挙動はほぼ同じであり、液滴の運動は帯電の極性ではなく帯電量に支配される。電気力線は対象物の裏側にも回り込むように発生するので、帯電液滴も裏側へ到達し付着する。

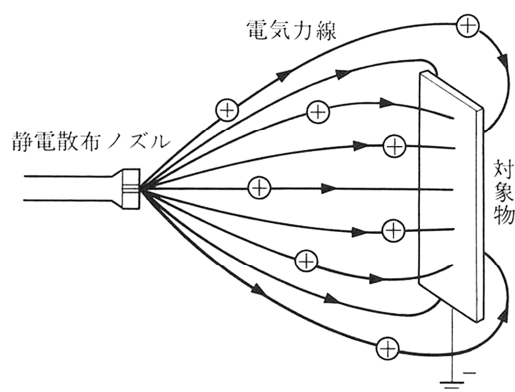


図 1-3 電極と散布対象物間に形成された電界による帯電液滴の運動

原図：梅津⁹⁾

式 1-2 から、理論上は液滴の帯電量が大きいほど静電気の効果が顕著になる。しかし、非常に大きい電荷を液滴に与えた場合、帯電による静電気の力が液滴の表面張力を上回ると、液滴は分裂してしまう。これを静電微粒化と言う。静電微粒化を起こさずに液滴が帯電できる最大の電荷 $q_{\max}$ を Rayleigh 限界と呼び、農薬水溶液の場合、大気中における $q_{\max}$ は次式で近似することができる¹⁰⁾。

$$q_{\max} = 1.65 \cdot 10^{-4} \cdot d^2 \quad (\text{式 1-3})$$

ここで、 d ：液滴の直径である。

過去に開発された農業用の静電散布装置における帯電液滴の電荷は、Rayleigh 限界の数%～10%以下にすぎない。それでも粒子径が数 100 μm 程度の液滴に帯電させた場合、 $\mathbf{E} = 30 \text{ kV/m}$ の電界下と仮定すると、液滴に作用する力 $\mathbf{F}$ は

重力の10～50倍に達する⁶⁾。したがって静電気の力は非常に大きく、従来付着困難であった水平面の下側などに対し、重力に逆らった上向きの運動により液滴を付着させることが可能となる。

実際の帯電噴霧液滴が飛翔する様子を図1-4に示す。ここでは噴霧パターンの上側に、図左側から木片を差し出して、帯電噴霧液滴が付着する様子を撮影した。通常、下向きに散布された場合の噴霧液滴の運動は、ノズル吐出時の運動エネルギーと重力に従い下方に落下運動する。しかし、帯電した噴霧液滴の散布では、電極と木片の間に形成された電気力線に沿って液滴が運動し、上向きの運動により木片の下面に付着する。なお、本図はコロナ帯電方式によるものであるが、誘導帯電や直接帯電でも液滴の運動は同様である。



図1-4 帯電液滴が木片の裏側(下面)へ回り込んで吸着する様子

(コロナ帯電、電極電圧-15 kV、中空円錐噴霧ノズル)

静電散布のもう一つの付着プロセスに、噴霧された帯電液滴の集合体(以下、噴霧雲と記す)が発生する空間電荷がある¹¹⁾。先述した静電散布装置の電極と散布対象物間に形成される電界は、電極から遠く離れた部位では弱くなってしまふ。しかし、電極から遠い部位であっても、帯電液滴がある程度密集して噴霧雲を形成した場合、噴霧雲自身が発生する空間電荷により散布対象物との間に電界を生じる。このため帯電液滴は散布対象物に向かい飛翔して、葉裏などに付着することができる。

空間電荷による帯電液滴付着の模式図を図1-5に示す。噴霧雲の空間電荷により形成された電界の等電位線(Lines of equi-potential)に対し、直交する破線で示されているのが電気力線に相当し、帯電液滴は電気力線に沿って運動

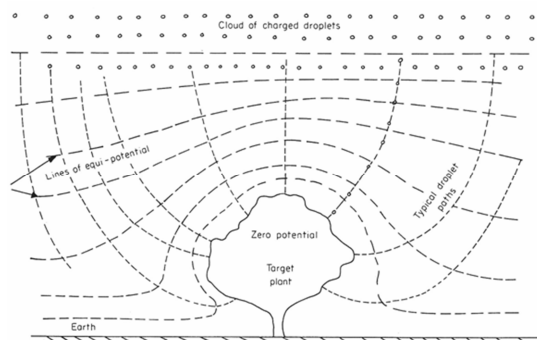


図1-5 帯電噴霧雲が形成する電界と液滴の運動

注) 風や重力の影響を無視した模式図である

原図: Spillman¹²⁾

して散布対象物に付着する。

3 静電散布に関する既往の研究成果と現状

静電散布の研究は非常に古く、霧状の液滴に静電気が帯電する自然現象は、19世紀後期に既に発見されていた¹³⁾。ここから液滴に帯電させて散布する試みが始まり、まず工業分野で1940年にHarold Ransburg(現ランズバーグ社)が、静電散布を利用して従来よりも70%付着量が向上する塗装装置を市販した。

農業分野において農薬散布の付着を改善するために静電気を利用する研究は、1940年代の粉剤の帯電散布から始められた^{14),15)}。その後、液剤農薬散布に関する研究が行われ、誘導帯電方式¹⁶⁾、コロナ帯電方式¹⁷⁾、直接帯電方式¹⁸⁾など各種静電散布方式の機構と基礎理論が明らかとなり、開発された装置の一部は市販化された。

これらの静電散布装置による付着率改善と防除性能の向上効果は、様々な研究により圃場レベルで実証されている。Gilesらは、イチゴに対する殺菌剤(Captan)の散布において、静電散布はわずか8 L/10aの散布量で、慣行の187 L/10a散布と同等の付着量が得られることを示した¹⁹⁾。その他の代表例としてKabashimaら²⁰⁾、Herzogら²¹⁾が病害虫防除薬剤散布で、またLawら²²⁾、Cooperら²³⁾、Saito²⁴⁾が微生物農薬散布で、さらにParham²⁵⁾が除草剤で様々な静電散布の実証試験を行った。これらの実験結果を総合すると、静電散布は慣行散布のおおむね半分の散布量で、同等の防除効果が得られることが明らかとなった。また、生物農薬散布の結果か

ら、静電気帯電が生物農薬の活性に関し悪影響を与えないことが解っており²⁴⁾、化学農薬に替わる代替農薬散布の手段としても静電散布は有用視されている。ただし、これらはいずれも散布量 50 L/10a 以下の濃厚少量散布の静電散布装置による実験結果である。

日本国内における静電散布装置開発は 1980 年代から本格化し、浅野²⁶⁾や松尾ら^{27),28)}、津賀ら^{29),30),31)}による基礎研究が行われ、1990 年代初頭に施設栽培用の静電式常温煙霧機³²⁾として市販化された。本機は施設内に定置して使用し、希釈倍率 100 倍以下、散布量 12 L/10a の濃厚少量散布で、噴霧粒径 10 μm の微粒子を気流で施設内に拡散させる。定置式のため機体を動かす必要が無く、散布作業の無人化を実現した。また作物の葉裏に対し、従来の常温煙霧機に比べ最大 1.8 倍の薬液を付着させることができた³³⁾。温室メロンにおけるワタアブラムシ及びミナミキイロアザミウマに対する防除効果は手散布より劣るものの、常温煙霧機より高かった^{34),35)}。またウドンコ病に対する防除効果は手散布同等で、常温煙霧より高かった³⁶⁾。

この静電式常温煙霧機はメロン、バラ、イチゴの施設栽培農家に数百台が普及し、無人散布の省力性と高い防除効果で好評を得た。しかし濃厚少量散布装置であるため、2002 年の農薬取締法改正施行に伴って、使用できる農薬の種類が大きく制限された。その後、使用可能な農薬の新規登録も進んでおらず、現在は普及を拡大することが不可能となった。このため省力で防除効果の高い散布装置を求める現場の強い要望が有るものの、販売は中止された状態である。

このような背景から、国内の慣行散布体系で使用できる低濃度多量散布の静電散布技術開発に対する要望が高まっていたが、既往の研究報告は少なく、松尾ら³⁷⁾の果樹園用静電散布スピードスプレーヤの研究事例や、東山ら³⁸⁾の室内基礎試験の事例程度であった。

そこで、著者らは付着の良い散布装置の開発を目的とし、1996 年より低濃度多量散布の静電散布技術開発を開始した。最初に、誘導帯電方式及びコロナ帯電方式の多量散布に対する適合性を実験室レベルで明らかにした³⁹⁾。

次に、環状誘導帯電電極と動噴用一流体散布ノズルを組み合わせた多量散布用静電散布装置を開発し、粒子径 150 μm 、吐出量 2.1 L/min

の扇形噴霧ノズル噴霧液滴において、静電散布のキャベツ模擬作物体に対する被覆面積率が、無荷電散布に比べ有意に増加することを室内試験で明らかにした⁴⁰⁾。

これらの予備的試験で得られた知見は、農機メーカーの静電散布装置設計に活用され、2004 年に手持ち形散布機として、みのる産業株式会社より低濃度多量散布の静電散布装置が発売された⁴¹⁾。その後、株式会社共立、有光工業株式会社、株式会社麻場から同様の構造の手持ち形静電散布装置が発売されるに至った。

しかしながら、低濃度多量散布の静電散布装置における詳細な液滴の帯電特性や、圃場での作物体に対する付着性能、及び防除効果の評価について未だに詳細な研究が行われていない。また、市販機はいずれも手持ち形であり、大規模栽培に対応したブームスプレーヤ等の省力散布機に適用できる装置の開発や性能評価事例も無い。

4 本研究の背景

既往の欧米における静電散布技術開発は、ほぼ全てが濃厚少量散布を前提として開発されてきた。主な静電散布装置におけるノズル吐出量、液滴の比電荷を表 1-4 (次頁) に示す。国内で最初に実用化された小野³²⁾の装置を含め、全てが 0.08~0.25 L/min と極めて小さい吐出量のノズルを採用し、噴霧粒径 8~40 μm の微粒子を散布している。液滴の質量あたり帯電量 (単位: C/kg, 以下、比電荷と記す) は約 5 mC/kg である。

既往の静電散布に少量散布が用いられるのは、噴霧粒径、及び電極装置に対する濡れの防止という二点で、静電散布技術に非常に良く適合するためである。

まず噴霧粒径と静電散布の関連を述べる。静電散布では Lorentz の式 1-1 に従い、帯電した液滴の比電荷が高いほど液滴運動に対し静電気の力が支配的となり、付着率の向上が期待できる。静電気は粒子の表面に発生する力であり、粒子に高い比電荷を帯電させるためには、粒子の質量当たりの表面積を大きくすることが有効である。液滴表面積と帯電量の関係を式 1-4 に示す。

表 1-4 既存の主要な静電散布装置の諸元

開発者	Electrostatic Spraying Systems Inc.	Imperial Chemical Industries	Law (1978)	小野 (1995), 株式会社共立
商品名	BP	Electrodyne	—	静電式常温煙霧機
開発国	米国	英国	米国	日本
帯電方式	誘導帯電	誘導帯電	誘導帯電	誘導帯電
ノズル形式	二流体	静電微粒化	二流体	二流体
吐出量 (L/min)	0.25	0.24	0.08	0.08
粒子径 (VMD, μm)	20~40	42*	20	8~10
比電荷 (mC/Kg)	未公表	4.7	4.8	未公表

*: 推測値

ESS社カタログ, Law (1978)⁴⁵⁾, 松尾ら (1986)⁴²⁾, 小野 (1995)³²⁾

$$Q = A\rho_s \quad (\text{式 1-4})$$

ここで、

 Q : 電荷(液滴帯電量) A : 液滴表面積 ρ_s : 表面電荷密度

である。

液滴の単位質量あたりの表面積は、粒子径が小さくなるほど大きくなる。したがって、同じ表面電荷密度を与える帯電電極装置の場合、通過する液滴粒子径が微粒子ほど、高い比電荷を帯電させることができる。このため従来の静電散布研究では、粒子径 10~40 μm の均質な微粒子が得られるノズルや微粒化機構を採用しており、静電微粒化を用いた方式¹⁸⁾や、回転式アトマイザー^{43),44)}、あるいは二流体ノズル⁴⁵⁾等が用いられている。これらの微粒子が得られるノズルや微粒化機構は一般に吐出量が小さく、必然的に少量散布となる。

次に、電極の濡れと静電散布の関連を述べる。農業における作業環境での耐久性、機材の取り扱い性、コストを考慮すると、静電散布装置の帯電方式には、比較的構造が単純堅牢な誘導帯電が最も適する⁴⁵⁾。しかし誘導帯電を用いた静電散布装置では、電極付近に液滴が付着するとコロナ放電現象が発生し、帯電液滴と逆極性のイオンを生じて液滴の帯電が打ち消されてしまう問題がある⁴⁶⁾。電極の濡れを回避するためにはノズルの吐出量を小さくすることが有効であるため⁴⁷⁾、少量散布ノズルが使用されている。

これに対し、国内慣行散布で主流の低濃度多量散布ではノズル吐出量が大幅に多い。国内の

一般的なノズルと吐出量の例を表 1-5 に示す。吐出量は 0.5~1.5 L/min のノズルを単頭口もしくは多頭口装備し、0.8~50 L/min の散布を行う。散布圧は 1.0~2.5 MPa である。噴霧パターンは扇形と中空円錐が用いられる。これらのノズルの一般的な噴霧粒径は 100~200 μm であり、欧米に比べると吐出量は 2~20 倍、噴霧粒径も 2 倍以上大きい。

このような多量散布のノズルに適した静電気帯電用電極の構造や、液滴の帯電特性など基礎的なデータは殆ど未解明であり、欧米の静電散布技術をそのまま適用することはできない。また、仮に濃厚少量散布の静電散布装置を国内で使用する場合、希釈倍率が異なるため、農薬取締法に従って新たな農薬登録を取得する必要があり、濃厚少量散布装置の普及は困難である。静電散布は既に多くの研究で農薬削減、防除効果向上の有効性が実証されていることから、国内でも現状の農薬取締法下で使用できる、低濃度多量散布に適合した静電散布技術の研究開発が強く求められている。

表 1-5 国内の一般的な散布ノズルと吐出量

ノズルの種類	ノズル 散布 圧力 (MPa)	全体 吐出量 (L/min)	ノズル 1 頭口 吐出量 (L/min)	噴霧パターン
単頭ノズルA 人力噴霧機(殺虫・殺菌剤)用	1.0~1.5	0.8~1.0	0.8~1.0	中空円錐
単頭ノズルB 人力噴霧機(除草剤)用	1.0~1.5	1.1~1.4	1.1~1.4	扇形
塊状ノズル ノズル3 個	1.5~2.5	1.5~2.3	0.5~0.77	中空円錐
環状ノズル ノズル5 個, 到達距離4 m	1.5~2.5	2.5~3.2	0.5~0.64	中空円錐
スズランノズル ノズル7 個, 到達距離5 m	1.5~2.5	3.4~4.4	0.49~0.63	中空円錐
水平ノズル(片持ち式) ノズル9 個, 散布幅3 m	2	13	1.44	扇形
ブームノズルA ノズル26 個, 散布幅7.2 m	1.5	21	0.81	中空円錐
ブームノズルB ノズル52 個, 散布幅7~15 m	1.5	50	0.96	中空円錐

(日本植物防疫協会, 1998より一部抜粋)

上記の背景をもとに本研究を開始するにあたり、著者は以下に示す仮説を提案した。低濃度多量散布では、従来の濃厚少量散布の静電散布装置に比較し液滴の比電荷は低下することが予想される。この理由は、多量散布のノズルは噴霧粒径が 100~200 μm と大きく、液滴単位質量当たりの液滴表面積が小さいためである。静電力が粒子運動に対し支配的となる液滴粒子径は概略 135 μm 以下とされ⁴⁸⁾、多量散布ノズルの粒径の大きい液滴では、静電気による付着の改善効果が低下する懸念がある。

しかし多くのノズルにおいて、噴霧液滴の粒径分布は対数正規分布、もしくは χ^2 乗分布している⁷⁾。このためノズルの代表的な粒子径を表す体積中位径 (Volume Median Diameter, 以下 VMD と記す) よりも大幅に小さい粒子が、噴霧中に相当量含まれている。例えば、VMD が 240 μm の粗大粒子噴霧ノズルであっても、噴霧液滴全体の体積に対し 1/4~1/10 程度、100 μm 以下の微粒子を含有している⁴⁹⁾。本研究はこの点に着目し、多量かつ大粒子のノズル噴霧液滴に静電気を帯電させることが出来れば、噴霧粒径分布中の比較的微粒子の成分が、帯電により付着向上効果を発現する可能性があると予想した。

また、式 1-2 より、理論上は液滴の比電荷を

高めるほど散布対象物への付着率は向上するが、濃厚少量散布において、比電荷 1.5~4.5 mC/kg 程度の帯電粒子を実際の作物体へ散布した場合、噴霧雲の形成する空間電荷が高いと、噴霧雲から散布対象物に対しコロナ放電が発生し、液滴帯電を中和して付着が全く増加しなくなる現象が見られる^{50),51)}。特に、散布対象物に鋭利な突起などがある場合、この現象は顕著である。対策として液滴の帯電極性を短周期で逆転させコロナ放電を抑制する試みが行われたが、効果は認められていない⁵²⁾。つまり、一定以上高い電荷を液滴に帯電させても、場合によっては付着改善に効果が無い。逆に言えば、低濃度多量散布の静電散布により、低い電荷の液滴を多量に散布することで、空間電荷が抑制されコロナ放電の発生を防止しつつ、液滴の付着も良好に維持される可能性があると予想した。

低濃度多量散布は薬液の希釈倍率が高いため、散布のムラによる薬害の発生や作業者の農薬被曝の危険性が小さく、安全性の高い散布方式である。また、散布量が多いことにより、付着均一化が期待できる。このため防除作業負担面積が比較的小さい我が国では、今後も散布方式の主流と考えられ、低濃度多量散布で利用できる静電散布技術とその特性が明らかとなれば、その安全性を維持しつつ、より効率的な散布が実

現できると考えられる。

以上の仮説に基づいて、著者は多量散布液滴に帯電させることで付着向上が可能と判断し、低濃度多量散布で使用できる静電散布装置の開発研究に着手した。静電散布の適用対象とする栽培体系は、国内の露地野菜栽培と、施設栽培を選んだ。

国内の露地野菜栽培では、代表的作目のキャベツの場合、農薬散布回数と農薬散布量の削減が課題となっている。キャベツ年間生産量 20 万トンと全国 1 位⁵³⁾の産地である愛知県では、8 月から 12 月の秋冬取りで作期あたり 7 回と非常に多くの農薬散布を行っている⁵⁴⁾。栽培規模の大規模化が進行するに伴って、防除作業省力化機械として、ブームスプレーヤなどの大形散布機が普及しているが、これらの散布機はノズルが固定されており、動噴手散布のようにノズルを振り動かして作物体の葉裏や茎葉の込み入った部分に薬液を付着させることは難しい。したがって予防的防除の観点から、多量散布により付着均一を図るか、散布回数を多めにする傾向がある。

露地結球野菜栽培における農薬のコストを表 1-6 に示す。農薬費は経営コスト全体の 6.6～14%である。特にハクサイとキャベツの場合、包装荷造・運搬等料金を除いた本圃におけるコストでは、農薬費は農機・農用自動車費に次ぐ割合を占めている⁵⁵⁾。このため、農薬散布の薬液付着性能を向上することで、栽培期間内の散布回数を減少させる、あるいは防除効果を維持しつつ散布量を低減する散布技術が求められている。

露地畑作における大形散布機の付着性能を向上させる手段として、エアアシストなど噴霧到達性を向上させる方法や、散布の陰となる部分を解消させるためのノズル揺動機構など、さまざまな技術開発が行われてきたが、構造が複雑でコストが高い、あるいは効果不十分である等、決め手とはなっていない。

つぎに国内の施設栽培では、栽培の大規模化や、閉鎖・暑熱といった作業環境の厳しさにより、農薬散布作業は多大な労働負担を強いている。近年、建設コストと所要暖房エネルギーを 30%程度低減できる大規模施設として、一棟 20 a を超える大形温室の導入が進行している⁵⁶⁾。このような大形温室では、温室内を小区画に分

表 1-6 主要な露地結球野菜栽培における
10a あたり経営費（単位：千円）

	はくさい	キャベツ	レタス
経営費合計	185	177	244
雇用労賃	14	4	12
種苗費	8	12	13
肥料費	19	21	28
農業薬剤費	26	20	16
諸材料費	10	5	20
光熱動力費	8	9	12
農機具・農用自動車費	22	29	42
農用建物	6	6	13
賃借料及び料金	5	1	5
作業委託料	3	0	0
土地改良及び水利費	1	2	3
包装荷造・運搬等料金	51	49	48
その他経営費	12	19	32
経営費に占める 農業薬剤費の割合 (%)	14.1	11.3	6.6

出典：農業経営統計調査報告 平成 17 年産「品目別経営統計」（農林水産省統計部）

* 品目別データは、全国平均（年産）を使用した。

割し、各区画の生育ステージをずらして通年作付している。これにより恒常的な作付・収穫と、作業労働負担の平準化を行っている。

この栽培体系では病虫害発生区画だけを防除しても病虫害が他の区画に移動してしまうことが多く、防除徹底が困難という問題がある。さらに年間を通して温室内に異なる生育ステージの作物が常在しているため、燻蒸消毒や太陽熱消毒などの一斉防除を行うことが出来ない。このことから防除作業は非常に頻繁となり、かつ大面積を動力噴霧機で手散布するため非常に長時間を要している。例えば静岡県の主要な施設栽培品目である温室メロン大規模栽培の防除作業時間は、10 a あたり年間 130 時間以上に達する⁵⁷⁾。

施設栽培では散布作業者の農薬被曝も問題である。温室メロンにおける慣行の防除作業状況を図 1-6 に示す。草丈の高い群落の葉裏に対し均一に噴霧液滴を付着させるため、ノズルを上向きとして丁寧に振り動かしながら散布する。トマトやキュウリ、養液バラ栽培などでも同様の散布を行っている。このような散布では作業者に多量の農薬被曝が認められ、作業者の健康に対する影響が懸念されている^{58),59),60),61)}。被曝を最小限に抑えるため、暑熱環境下で防除着や防護マスクを装着して作業しており、作業環境は非常に厳しく労働負担が大きい。

現在までに大規模施設栽培における防除労力の



図 1-6 メロン温室内における慣行の動噴散布

軽減手段として、ノズル懸垂式防除装置や、自走式ロボットスプレーカ等の自動散布装置が開発されてきた。しかし手散布に比べて防除効果が不十分とされ、普及は進んでいない。密閉空間ゆえに病害虫発生が顕著になりやすい施設栽培において、手散布並みの付着性能を確保しつつ、散布作業の省力・無人化を実現できる施設栽培用自動散布装置の開発が、喫緊の課題となっている。

5 本研究の目的

本研究の目的は、農薬散布作業の省力化と、良好な付着性能を両立する低濃度多量散布の静電散布装置を開発し、その基礎的な帯電特性を明らかにする。さらに、露地野菜栽培及び施設栽培に適用した際の静電散布の付着特性、防除効果、及び農薬散布量削減の可能性を明らかにすることである。

以下に具体的な目的を示す。

- (1)低濃度多量散布の液滴に帯電させることが可能な静電散布装置を試作し、その電極電圧、ノズル吐出量、ノズル噴霧パターン等の物理条件が液滴の帯電量に及ぼす影響と、最適な帯電条件を明らかにする。
- (2)露地キャベツ栽培を対象に、開発した静電散布装置をブームスプレーヤ形散布機に搭載し、作物体に対する液滴付着特性を明らかにする。さらにキャベツ栽培圃場において、同装置の減量散布における防除効果を実証し、農薬散布量削減の可能性を評価する。
- (3)温室メロン栽培を対象に、静電散布装置を搭載した無人散布ロボットを開発し、作物体に対する付着特性を明らかにする。大形メロン温室において、同ロボットの防除効果と省力化効果を実証し、省力的防除機に対する静電散布の有効性を評価する。

第Ⅱ章 低濃度多量散布における静電散布装置の帯電性能

1 序 言

本章における研究の目的は、低濃度多量散布の液滴を帯電させ、付着率を改善し散布量やドリフトの低減効果が得られる静電散布装置として、動噴用一流体ノズルを用いた静電散布装置を試作し、その噴霧帯電特性を解明することである。具体的には、試作した静電散布装置における噴霧ノズルの種類、電極印加電圧、散布圧力、ノズル電極間のギャップ距離、散布距離等の物理的条件が噴霧の帯電に及ぼす影響を実験的に解明することで、低濃度多量散布の静電散布装置を実用化するための設計指針を得る。

2 材料及び方法

2-1 試作した静電散布装置と供試ノズル

試作した静電散布装置を図 2-1 に示す。装置は環状電極、電極支持体、ノズル及び同装着部で構成し、ノズル先端に環状電極を配置した。

導電性液体である農薬希釈液の噴霧液滴に対する帯電方式は、コロナ帯電と誘導帯電の二種類が実用的であるが、本研究では高湿度、塵埃環境に適応でき、かつ低電圧で効率良く帯電させることが可能な環状電極による誘導帯電を採用した。電極に正の高電圧を印加することで、

噴霧粒子に負の電荷を帯電させた。

環状電極は内径 38 mm×厚さ 4.5 mm の真鍮製で、噴霧の形状に沿うように内面をテーパ形状とした。テーパの角度は、ノズル噴霧角 90 度の噴霧形状に対して平行に設定した。高電圧印加時における電極からの放電や漏電を抑制するため、電極は電極支持体に埋め込み、噴霧に相対する内面部分を幅 7.5 mm で露出した。電極には耐圧 30 kV のシリコンゴム被覆高耐圧電線を接続し、電源装置から直流高電圧を印加した。

電極支持体の材質は、機械強度と電気絶縁性に優れる POM 樹脂(polyoxymethylene, 絶縁破壊強さ 15 kV/mm) を使用した。支持体の寸法は、内部に装着する供試ノズルの外形寸法と、ノズル噴霧パターンを基準に決定した。支持体内部の通電部分周囲には、絶縁体の厚さを 3 mm 以上確保した。電極及び同支持体に噴霧液滴が付着すると、付着した液滴からコロナ放電を生じて帯電を阻害するため⁴⁵⁾、支持体側面に開口部を設け、ノズル噴霧に伴って発生する空気流により周辺空気を電極周辺に導入して噴霧液滴の付着を防ぐことを企図した。開口部の面積は電極支持体側面積の約 60% とし、電極支持

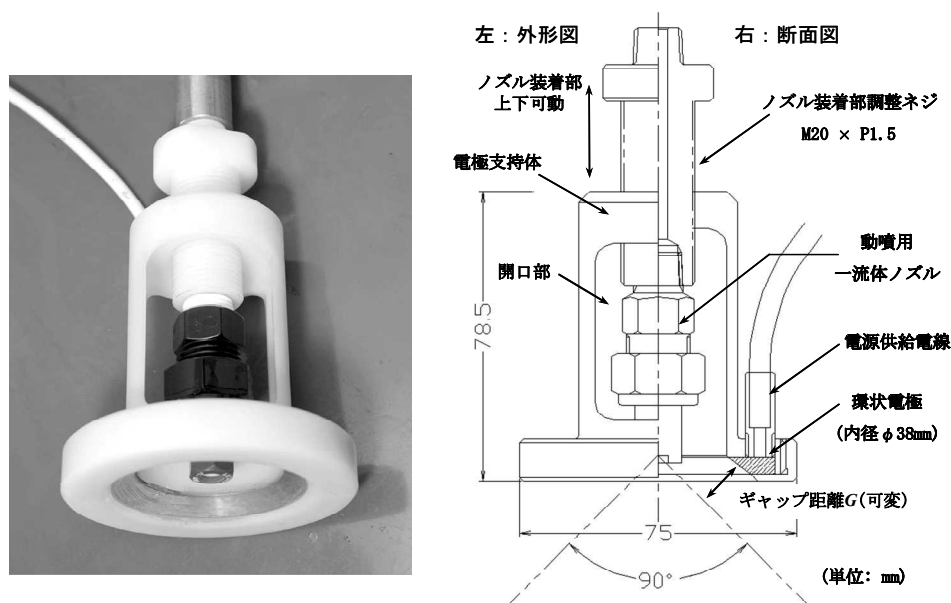


図 2-1 試作した静電散布装置

表 2-1 供試ノズルの諸元

形式番号	中空円錐噴霧ノズル				扇形噴霧ノズル			
	TXVK4	TXVK8	TXVK12	TXVK18	SU07100	KS10	CV1080	CV2180
吐出量(L/min)	0.56	1.1	1.7	2.6	0.46	1.1	0.99	2.1
粒子径(μm, VMD)	96.0	103	112	120	103	491	82.0	142
噴霧角(degree)	80°	←	←	←	100°	←	80°	←

注) 噴霧角, 粒子径, 吐出量は散布圧力1.5 Mpa での値
VMD : Volume Median Diameter (体積中位径)

体の表面積を極力小さくした。ノズル装着部と電極支持体は M20, ピッチ 1.5 mm のねじ山による接合とし, ノズルを噴霧同軸方向に移動することで, 噴霧と電極間のギャップ距離 G を自由に調整可能にした。

供試したノズル 8 種類を表 2-1 に示す。ノズルの選択に当たっては, 国内における一般的なブームスプレーヤのノズル取付ピッチと単位面積投下量, 作業速度を考慮し, ノズル吐出量 0.5 ~ 2.6 L/min の範囲から選定した。噴霧パターンは, 農業分野で主に使用される中空円錐噴霧と扇形噴霧を採用した。中空円錐噴霧ノズルには, 噴霧粒径分布, 噴霧角度, 内部構造がほぼ同一で, 吐出量が異なる 4 種類を供試した。一方扇形噴霧ノズルには, 吐出量や粒子径に特徴的な性質を持つ 4 種類を供試した。

ノズル形式 CV1080 と CV2180 はブームスプレーヤ向けの殺虫剤用ノズルで, 同一構造であるが噴霧粒径と吐出量が大きく異なる。形式 SU07100 は 25~50 L/10a の少量散布用で, 供試ノズルの中で最も吐出量が少ない。形式 KS10 はドリフトレスノズルであり, 飛散を防ぐために特異的に噴霧粒径が大きく, 噴霧粒子

中に空気を混入する構造である。

なお供試ノズルの吐出量は, 水を設定圧で 60 秒間メスシリンダー内に散布し, 噴霧量を測定して算出した。ノズルの噴霧粒径はレーザ光散乱方式粒度分布測定装置 (Malvern Instruments, Master sizer S) で測定した。

2-2 実験装置

試作した静電散布装置における噴霧液滴の帯電量と, 帯電電極から発生する放電や漏電の状況を測定するため, 噴霧液滴の比電荷 (CMR: Charge to Mass Ratio) と, 装置各部の電流を測定する実験装置を試作した (図 2-2)。

静電散布装置の電極に印加する電源は, 直流高圧安定化電源装置 (最大出力電圧 30 kV, 定格 250 μA, 電圧変動率 0.05%) を使用し, 電極印加電圧 V_p は電源装置の出力モニタ端子を利用して測定した。

噴霧液滴の比電荷は, 次式により算出した²⁸⁾。

$$qs = Is \cdot t / M \quad (\text{式 2-1})$$

ここで, qs : 比電荷 [mC/kg]

Is : 噴霧電流 [μA]

t : 噴霧時間 [s]

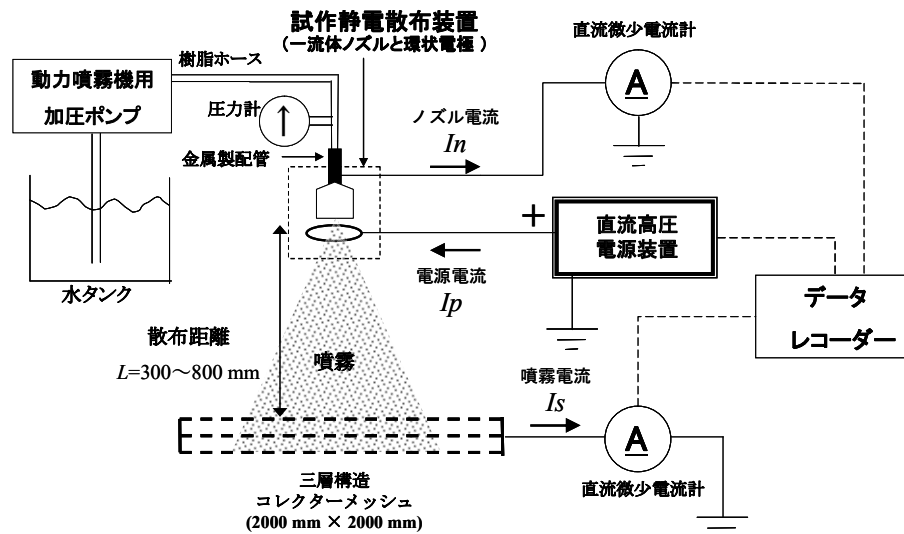


図 2-2 実験装置と測定系

M : 噴霧時間 t 内のコレクタによる
捕捉液滴の全質量 [kg]

である。捕捉液滴全質量はノズルの吐出量から算出した。噴霧電流 I_s の測定は、松尾ら²⁸⁾、Marchant ら⁴⁷⁾、及び Carroz ら⁶²⁾の方法を参考に、帯電した噴霧液滴を金属製コレクタメッシュで捕集し、コレクタからアース間に流れる電流を直流微小電流計（横河電機 2011-31、精度 1.0 級）で計測する方法を採用した。コレクタメッシュは大きさ 2000×2000 mm のアルミニウム A1010 製エキスパンドメタルを用いた。噴霧の流れに対して抵抗にならず、かつ噴霧をロス無く捕集できるように、上から目合 6×12 mm、4×8 mm、3×4 mm 各 1 枚のメッシュを 15 mm 間隔で 3 層に積層した（図 2-3）。

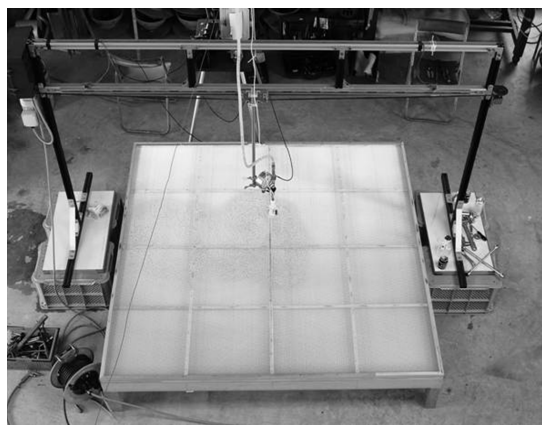


図 2-3 コレクタメッシュ（上面図）

本実験装置において、帯電装置各部の電流は、電流連続の法則から次式が成立する²⁸⁾。

$$I_s = I_p - I_n - I_l \quad (\text{式 2-2})$$

I_p : 電源電流

I_n : ノズル電流

I_l : 測定系を経由せず電極等から空中に放電する電流

電源電流 I_p は電源装置の出力モニタ端子を利用して測定した。ノズル電流 I_n は、電極支持体基部の金属製配管内を通過する液体からアースに対して流れる電流を直流微小電流計（横河電機 2011-31）で測定した。 I_s 、 I_p 、 I_n 、 V_p の時系列変化はデータレコーダ（日置電機メモリハイコーダ 8842、同アナログユニット 8936 使用）により測定した。

なお噴霧液体の加圧装置は動噴用ポンプを用いた。散布圧力は動噴ポンプの調圧弁で調整し、

ノズル直近に設置したプルドン管式圧力計指示値に基づき設定した。噴霧液体の流路は樹脂ホースで構成し、動噴用ポンプ及び水タンクもグラウンドに対して電氣的に絶縁した。

2-3 測定項目

試作した静電散布装置のノズルの種類、電極印加電圧、環状電極と噴霧液滴間のギャップ距離、散布圧力、ならびに散布距離が、噴霧液滴の帯電に与える影響を調査した。実験条件を表 2-2 に示す。

表 2-2 実験条件

変化要因	水準
噴霧ノズル	8種類(詳細表2-1)
電極印加電圧 V_p (kV)	0 ~ +10
散布圧力 (MPa)	1.0 ~ 2.0
ノズル～電極間 ギャップ距離 G (mm)	-1.6, 0, 1.6, 3.2, 4.8
散布距離 L	300 ~ 800 mmの100mm毎

環状電極と噴霧液滴間のギャップ距離 G （図 2-1 を参照）は、ギャップ距離が最小のときを $G=0$ mm とし、ノズル装着部の接合ネジを調整してノズルを噴霧同軸方向に移動させることで G を 1.6 mm ステップで変化させ、その際の比電荷 q_s を測定した。ノズル噴口とコレクタメッシュの距離を散布距離 L とし、実際のブームプレーヤによる散布作業を想定して、 L の範囲は 300~800 mm とした。

以上、全ての実験において噴霧には水道水を用いた。また電極や電極支持体が完全に乾いた状態と、噴霧粒子が付着して濡れた状態では帯電状態が変化するので、設定条件において最低 180 s 以上連続して噴霧を行い、装置の濡れが安定した状態で測定を行った。

3 結果及び考察

3-1 電極印加電圧及びノズル吐出量と噴霧液滴の比電荷

散布圧力 1.5 MPa において、電極印加電圧 V_p を 0~+10 kV で変化させた際の、噴霧パターン別の比電荷 q_s を図 2-4 に示す。このとき噴霧と電極間のギャップ距離 G は 0 mm に調整した。

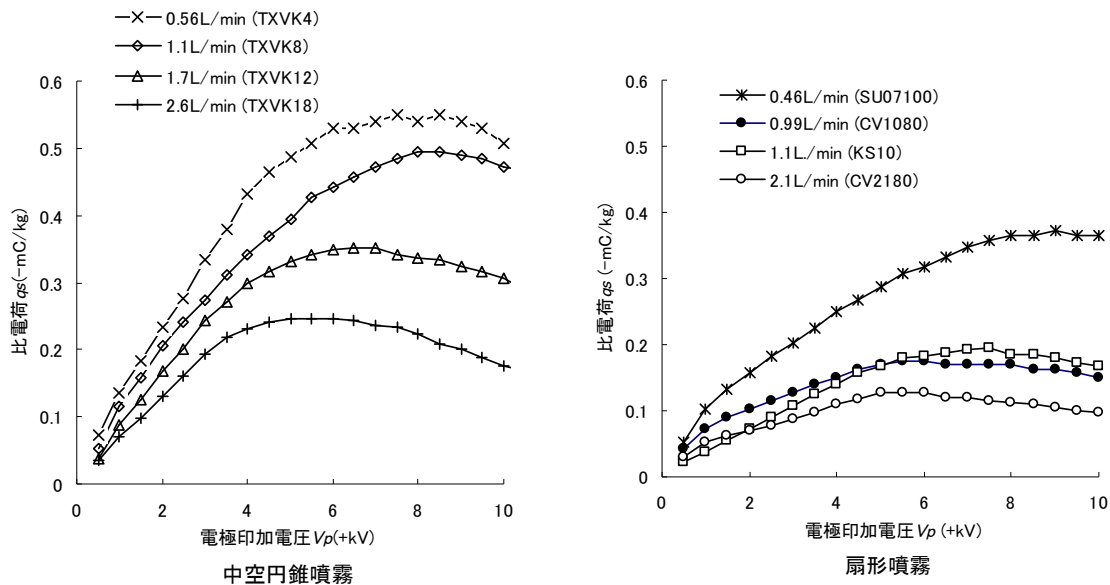


図 2-4 電極印加電圧と比電荷の関係 (散布圧力 1.5 MPa)

中空円錐噴霧の V_p に対する q_s の特性は、 V_p の上昇とともに直線的に増加した後、+4~7 kV 以上では増加が鈍化し、さらに V_p を上げると q_s は減少した。また吐出量が少ないノズルほど q_s の最大値は高かった。吐出量 0.56 L/min のノズルでは +7.5 kV まで q_s は増加し -0.55 mC/kg の最大値を示した。これに対し吐出量 4.8 倍 (2.6 L/min) のノズルでは V_p 上昇に対する q_s 増加の傾きは小さく、+5 kV 以上では殆ど増加しなくなった。 q_s 最大値は +6 kV で -0.24 mC/kg となり、0.56 L/min の場合と比較して 42%にとどまった。

一方、扇形噴霧の V_p に対する q_s の特性は中空円錐噴霧と同様で、 V_p 上昇に伴い q_s は増加した後、+5~7 kV で増加は鈍化し、さらに V_p を上げると q_s は減少した。また吐出量の少ないノズルほど q_s の最大値は高かった。

扇形噴霧ノズルで吐出量がほぼ同一の CV1080 と KS10 を比較すると、噴霧粒径は前者が 82.0 μm に対して後者は 491 μm と 6 倍であるが、 V_p に対する q_s の特性は同傾向を示した。同一吐出量において液滴の表面積が大きく異なる場合、比電荷に差異が発生すると予想されるが、本結果では差が無かった。

中空円錐噴霧と扇形噴霧の q_s を比較すると、吐出量の類似したノズルでは、 V_p に対する q_s の値は常に中空円錐噴霧が高かった。誘導帯電は噴霧の液滴分裂部位に高い電界を与えて帯電

させる原理であり、電極が液滴分裂部位に近接するほど、液滴に高い電荷を帯電させることができる⁶³⁾。中空円錐噴霧の液滴分裂部位は環状電極に対して均一に接近しているため、高い比電荷が得られたと考えられた。これに対し扇形噴霧の場合、本装置の環状電極は真円形状であるため、扇形噴霧パターン両端部だけが環状電極に近接し、噴霧中央部は電極から離れてしまうため比電荷が低いと考えられた。扇形噴霧では粒子径が比電荷に影響を与えなかった現象も、同様の理由によると考えられた。

V_p を +4 kV に固定し、散布圧力を 1.0, 1.5, 2.0 MPa に設定した際の吐出量と噴霧電流 I_s 及び比電荷 q_s の比較を表 2-3 に示す。

表 2-3 散布圧力別の吐出量と噴霧電流
および比電荷の比較 (電極印加電圧 +4 kV)

測定項目	散布圧力 (MPa)		
	1.0	1.5	2.0
吐出量 (L/min)	1.4	1.7	2
噴霧電流 I_s (μA)	-7.1	-7.9	-8.1
比電荷 q_s (mC/kg)	-0.31	-0.28	-0.25

ノズル：中空円錐噴霧 TXVK12 (1.7 L/min at 1.5 MPa)

ノズルは中空円錐噴霧の TXVK12 を用いた。散布圧力が高くなるに従い噴霧電流 I_s は増加したが、圧力上昇による吐出量の増加が I_s の増加を上回ったため、 q_s は減少した。散布圧力 1.0 MPa 時点に対し、2.0 MPa の q_s は 20% 低

かった。圧力上昇に伴い qs が減少する現象は、吐出量の異なるノズルでも同様に発生した。Carroz ら⁶²⁾は吐出量 0.6 L/min 以下の中空円錐噴霧ノズル数種類を試験し、散布圧力を上昇させると比電荷が低下する傾向を報告したが、本結果から、さらに吐出量の多い 2.6 L/min のノズルに至っても同傾向が認められた。

3-2 帯電装置から発生する漏電や放電の状況

慣行の動噴散布用ノズルと同等の吐出量 1.7 L/min を有するノズル TXVK12 において、電極印加電圧 V_p を 0V から +10 kV まで 0.5 kV ステップで変化した際の電源電流 I_p 、噴霧電流 I_s 、ノズル電流 I_n の測定結果を図 2-5 に示す。

I_p は $V_p \leq +2.5$ kV では数 μA と微少だった

るから、 I_p は電極からの空中放電 I_l が少なければ、非常に微小な値となる。図 2-5 に示した実測結果では、 $V_p \leq +2.5$ kV における I_p は非常に小さく、漏電や放電の少ない良好な誘導帯電状態を維持していると考えられた。

しかし $V_p > +4$ kV では I_p が I_s と無関係に大幅に増加し、 I_n も I_p に平行して増加したことから、液滴が付着して濡れた状態の環状電極及び同支持体表面で、 I_p が電極から支持体表面(沿面)をフラッシュオーバーし、電極支持体の取付基部にある金属製配管へ漏電して I_n を増加させたものと考えられた。したがって、噴霧液滴の比電荷 qs を高めるために V_p を上昇させた場合、+4 kV までは qs の決定因子である I_s が V_p と共に増加するが、 $V_p > +4$ kV では I_s の増加は小さく、一方で漏電により I_p は大幅に増加するため、電源電力が無駄になると考えられた。

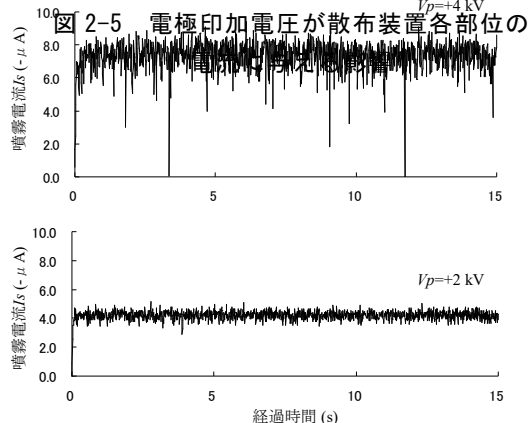
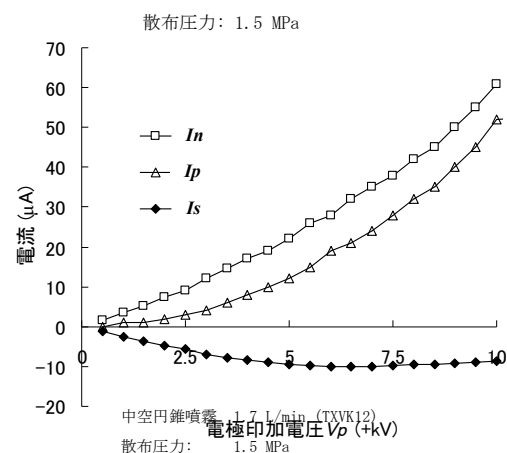


図 2-6 電極印加電圧 $V_p = +2$ kV 及び +4 kV における噴霧電流 I_s の波形

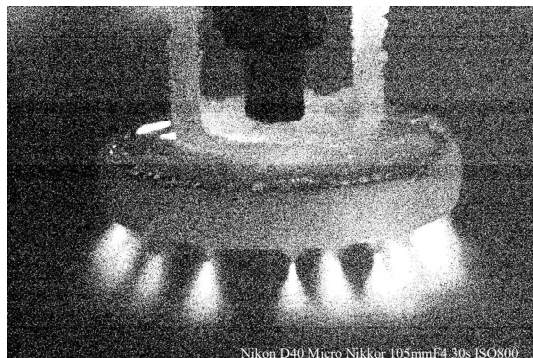
つぎに $V_p = +2$ kV、+4 kV における噴霧電流 I_s の波形を図 2-6 に示す。 $V_p = +2$ kV に比較して +4 kV の I_s は不安定であり、瞬間的にゼロ

が、 $V_p > +2.5$ kV では徐々に増加し、 $V_p > +4$ kV では傾きを強めながら大幅に増加した。

I_s は $V_p \leq +4$ kV では V_p 上昇に伴って増加した。その後増加の傾きは小さくなり、+6 kV でほぼ一定となったが、+7 kV 以上では一定からわずかに減少した。

I_n は $V_p \leq +2.0$ kV では I_s の絶対値とほぼ等しい値を示したが、 $V_p > +2.5$ kV では I_s を上回り、特に $V_p > +4$ kV では I_s に関係無く I_p と平行して増加した。

電極から漏電や放電が殆ど生じない理想的な誘導帯電装置を仮定すると、ノズル電流 I_n の絶対値は、噴霧液滴の電荷によって運ばれる電流 I_s と等しくなる。また本装置は誘導帯電であ



ノズル 中空円錐噴霧1.7 L/min (TXVK12)

散布圧力: 1.5 MPa, 露光時間: 30 s

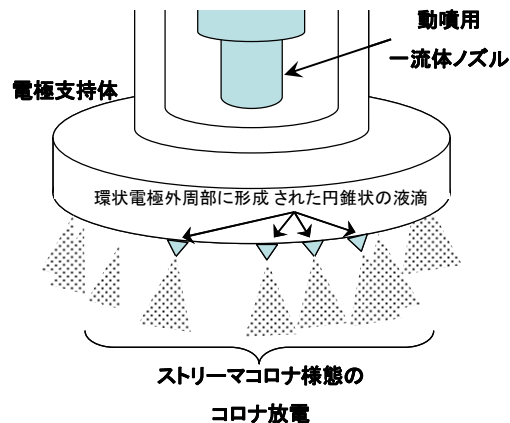


図 2-7 電極から発生したコロナ放電現象(電極印加電圧+9 kV)

付近まで低下する現象も頻発した。Isが瞬間的にゼロとなる現象は、噴口近辺に連続した流体として存在するアース電位の液膜部分に対し、環状電極内面から火花放電が発生し、電極と噴霧液滴間の静電界が一時的に崩壊したためと考えられた。

$V_p=+9$ kVにおいて電極近辺に発生したコロナ放電現象の画像を図 2-7 に示す。環状電極下面に付着した噴霧液滴が円錐形状に尖り、尖頭部からストリーマコロナ様態⁸⁾のコロナ放電が顕著に発生していることが確認できた。また、電極内周の最小径部分からノズル噴口の液膜部に対して断続的に火花放電が発生していることが観察された。コロナ放電は暗黒中で目視でも観測することができ、 $V_p=+5$ kV 付近から明確に発生が見られた。誘導帯電の場合、電極からのコロナ放電は、帯電した液滴に対して逆極性のイオンを発生するため、液滴の帯電が打ち消されることが知られており⁴⁵⁾、図 2-5 において $V_p \geq +6$ kV で Is が増加しなくなった原因は、コロナ放電による誘導帯電の阻害と考えられた。

以上より、電極印加電圧+4 kV 以上では電極からの漏電により電源電力の損失が増加することと、火花放電による液滴帯電の不安定化、コロナ放電による帯電阻害が発生することから、本静電散布装置の電極印加電圧の上限は+4 kV 程度であると考えられた。

3-3 環状電極と噴霧液滴間のギャップ距離が液滴比電荷に及ぼす影響

散布圧力 1.5 MPa, $V_p=+4$ kV の際に、環状

電極と噴霧液滴間のギャップ距離 G が液滴比電荷 qs に及ぼす影響を図 2-8 に示す。

中空円錐噴霧では、 $G=0$ mm で最も高い qs が得られ、 G が 1.6 mm 大きくなると qs は 13 ~ 18% 減少し、 $G=4.8$ mm の qs は $G=0$ mm に対して 40% 減少した。環状電極が噴霧と接触する $G=-1.6$ mm の場合、 qs は著しく減少した。これは、環状電極内周の全周にわたり噴霧液滴が多量に付着する状態となってしまう、電極とノズル噴口液膜部分が短絡し、静電界が維持されなくなるためと考えられた。

扇形噴霧でも G の拡大に伴って qs は減少し、 $G=0$ mm に比較して 4.8 mm の qs は 56% 減少した。しかし噴霧と電極が接触してしまう

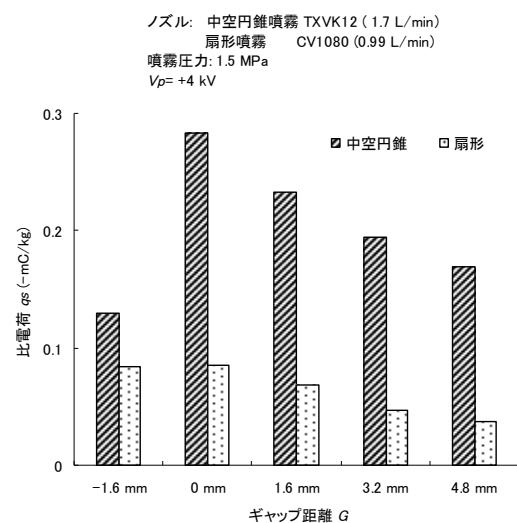


図 2-8 電極～噴霧液滴間のギャップ距離と比電荷

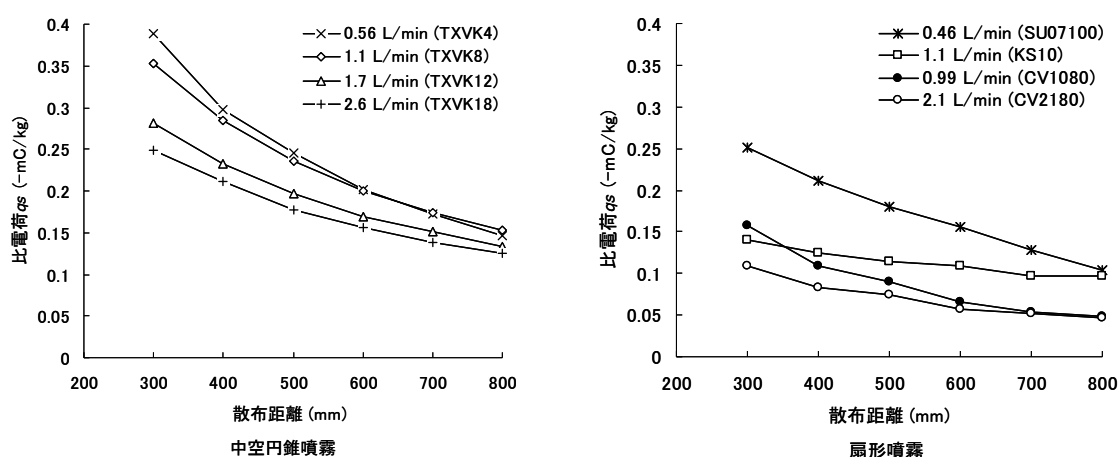


図 2-9 散布距離と比電荷の関係
(電極印加電圧+4 kV, 散布圧力 1.5 MPa)

$G=1.6$ mm としても、中空円錐噴霧とは異なり qs の減少は殆ど無かった。扇形噴霧では、噴霧と環状電極の接触部分が噴霧パターン両端の二点のみであるため、中空円錐に比較して比電荷の減少が小さいものと考えられた。

環状電極と噴霧液滴間のギャップ距離が液滴の比電荷に及ぼす影響は、 V_p を +7 kV 以下の範囲で変化させても、+4 kV の場合と同様であった。

3-4 散布距離と液滴比電荷の関係

散布距離 L と、液滴比電荷 qs の関係を図 2-9 に示す。

中空円錐噴霧における qs の変化傾向を見ると、 $L=300$ mm では吐出量の少ないノズルほど qs が高かった。しかし吐出量の少ないノズルは L の増大に伴い急激に qs が減衰したのに対し、吐出量の多いノズルでは減衰が緩やかであったため、 $L=800$ mm の地点に達すると吐出量による qs の差は非常に小さくなった。

扇形噴霧でも全体的に散布距離の増大に伴い qs は減衰した。しかし噴霧粒子径が $491\ \mu\text{m}$ と非常に大きいノズル形式 KS10 は、 qs が殆ど減衰しなかった。

散布距離増大に伴う比電荷の減衰は、帯電粒子の電荷が、ノズル噴口から距離を経るに従って空気中にコロナ放電するためと考えられた。また、噴霧粒径が大きい粒子は液滴表面の曲率が小さいため液滴からのコロナ放電は少なく、距離に伴う比電荷の減衰が小さいものと考えられた。

4 総合考察

試作した静電散布装置において、液滴に高い比電荷を帯電させるための物理条件は以下の通りと考えられた。液滴の比電荷を高めつつ、電極からの放電や漏電の少ない実用的な電極印加電圧の上限は +4 kV 付近である。高い比電荷を得るためのノズルの噴霧パターンは扇形噴霧よりも中空円錐が適し、また吐出量は少ないと有利である。電極と噴霧液滴間のギャップ距離は小さいほど比電荷が高く、電極と噴霧液滴が接触せず、かつ最小の距離にする必要がある。

現在国内で広く使用されている動噴用ノズルの吐出量は $1.0\sim 2.0$ L/min 程度であるが、本試作装置の場合、当該吐出量の中空円錐噴霧ノズルにおいて電極印加電圧 +4 kV、散布圧力 1.5 MPa、散布距離 300 mm の条件では $-0.30\sim -0.45$ mC/kg の比電荷が得られた。

比電荷の絶対値で $0.4\sim 0.6$ mC/kg の電荷を持つ液滴を噴霧した場合、散布標的（人工物）の単位面積あたり付着量は、帯電していない液滴に比べ 5 割以上増加する²⁸⁾。また、塗装分野の研究例であるが、通常散布の塗着効率（付着塗料乾燥重量/散布塗料乾燥重量 $\times 100$ ）が 25% に対し、比電荷 0.5 mC/kg の静電散布では倍の 50% となる⁶⁴⁾。したがって、実際の植物体への付着量については調査の必要があるものの、本装置で得られる液滴の比電荷によって慣行散布と比較して付着率を改善できると考えられた。

本装置では電極支持体に電気絶縁性と機械強度に優れたポリアセタール樹脂を用いたが、テフロン樹脂のような撥水性の絶縁素材を使用することで、液滴の付着防止と一層の漏電抑制を達成できる可能性がある。また、電極支持体表面に凹凸やひだ形状を設け、電極支持体沿面の絶縁距離を拡大し、漏電に対するリスクを軽減することも考えられる。これら電極支持体材質と形状については、引き続き研究の必要がある。

第Ⅲ章 キャベツに対する付着性能と害虫防除効果

1 序 言

露地結球野菜の主要品目であるキャベツの栽培では、暖地の主産地である愛知県の8月から12月の秋冬取りで1作期あたり7回と非常に多くの農薬散布を行っている⁵⁴⁾。キャベツは結球部の葉が複雑に入り組んでいるうえに、結球を取り囲む外葉が水平方向に大きく展開しているため、ブームスプレーヤ等で単純に上方から散布しても、結球部周辺や外葉の裏面に対して噴霧液滴を均一に到達させることは困難で、散布量が少ないと付着のムラを生じやすい。また表面にワックスが存在するため液滴が付着し難く、結球部周辺や外葉の裏面は病害虫の生息場所になっていることから、これらの部位に対する付着ムラは防除効果を低下させる。現状の農薬散布では付着ムラを回避するために200 L/10a程度の散布を行っており、環境問題と農薬経費削減の両面から、慣行よりも少ない散布量で作物体の各部に均一に噴霧液滴を付着させ、高い防除効果を得ることが可能な散布装置の開発が望まれている。

そこで、本章における研究の目的は、前章で開発した低濃度多量散布の静電散布装置における、キャベツに対する付着特性と防除効果を、慣行散布と比較して明らかにすることとした。

はじめに室内試験により、多量散布の静電散布における噴霧粒径と模擬作物体に対する付着特性について調査した。さらに、キャベツ栽培では経営規模の大形化に伴ってブームスプレーヤによる散布作業が一般的になっていることから、同静電散布装置を多頭口のブームスプレーヤ型防除機に組み入れ、露地キャベツ栽培圃場で慣行の防除に比べて面積あたりの散布量を削減することを目的とした実証試験を行い、その防除効果を明らかにした。

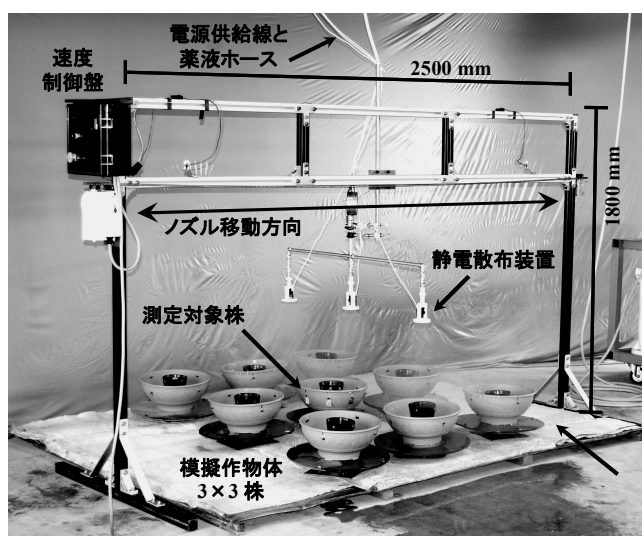
2 室内試験

2-1 試験目的

付着特性に大きな影響を与える噴霧粒径分布に対して、静電気帯電が及ぼす影響を明らかにする。またキャベツに対する静電散布の被覆面積率と付着状況を、自然風の影響が無い室内で調査し、静電気を帯電させずに散布した場合（以下、無荷電散布と記す）と比較評価して、静電散布の付着特性を明らかにすることを目的とした。

2-2 試験方法

本実験には、前章で開発した静電散布装置⁶⁵⁾（図2-1参照）を供試した。この装置は吐出量0.5



ノズル移動速度: 0 ~ 3.0 m/s
動力噴霧機出力: 0.75 kW

図 3-1 室内散布試験装置

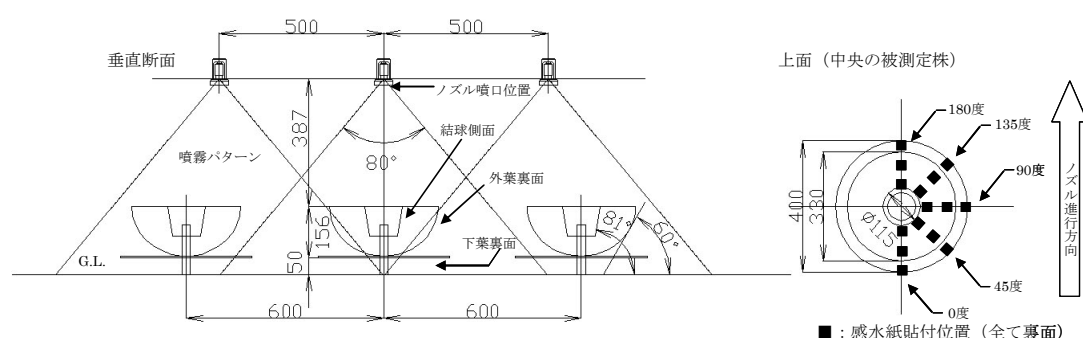


図 3-2 キャベツ模擬作物体と感水紙貼付位置 (単位: mm)

L/min の中空円錐噴霧ノズルの噴霧液滴に対し、比電荷に換算して -0.31 mC/kg の静電気を帯電させる。

2-2-1 噴霧粒径分布測定

噴霧粒径分布はレーザ回折粒径分析装置 (LDSA-1400) により測定した。噴霧液体は水道水を用いた。粒径の測定条件は散布圧力 1.5 MPa の下向き散布で行い、噴口中心から鉛直下向き 390 mm の位置で計測した。レーザ発光部と受光部の距離は 2000 mm とし、ノズル噴霧パターンの外側からパターン中央を測定レーザが貫通するように配置した。粒径は 3 回連続測定の平均値とした。

2-2-2 液滴付着特性の測定

圃場におけるブームスプレーヤの散布状態に近い状態を再現するため、ノズルを任意の速度で移動させながら散布する室内実験装置を試作し、キャベツの形状を単純化した模型 (以下、模擬作物体とする) に対する液滴付着特性を測定した。実験装置を図 3-1 (前頁) に示す。

キャベツ模擬作物体と感水紙貼付位置を図 3-2 に示す。静電散布装置はピッチ 500 mm で 3 個装着した。噴霧パターンが地表面で隣接ノズルと 100% オーバーラップするように、散布高さ (地表面からノズル噴口まで) を 593 mm に設定した。

模擬作物体の形状と寸法は、キャベツの結球開始時期における形状を参考に、結球部と外葉部及び下葉部をもつ構造とし、結球部をコップ状、外葉部は球を半割にしたボール状、下葉部を円盤状に設定した。散布対象物の接地抵抗や静電容量は、帯電した液滴の付着特性に殆ど影響を与えないため^{66), 67)}、模擬作物体の結球部と外葉部の材質はポリオレフィン樹脂とし、下葉部には木材を使用した。模擬作物体 9 株を、露

地キャベツ栽培様式に従って、株間 45 cm 条間 60 cm で 3 条に配置し、中央の 1 株に感水紙 (Novartis 製 Water sensitive paper, $38 \times 26 \text{ mm}$) を貼付した。感水紙の貼付部位は、模擬作物体の結球側面、外葉裏面、下葉裏面の三部位とした。各部位における感水紙の貼付位置は、散布ノズルの移動方向と正対する位置を 0 度とし、作物体中心を軸に 45 度毎に 180 度までの 5 箇所、3 部位合計で 15 箇所に貼付した。なお外葉や下葉の表面 (上面) は常に噴霧液で完全に被覆される状態であったため、調査を省略した。ノズルと模擬作物体の位置関係は、静電散布装置の中央のノズルが被測定模擬作物体の中心上を通過するように配置した。圃場において地表面の土壤に液滴が吸収される状態を再現するため、実験系の地表面には厚さ 3 mm の水耕栽培用不織布を敷設した。

各処理区の散布条件を表 3-1 に示す。単位面積当たりの散布量は、慣行ブームスプレーヤ散布に準じた 200 L/10a と、ノズルの移動速度を増速することにより単位面積あたり散布量を減量した 140 L/10a の 2 水準とした。測定回数は、1 処理に付き 5 回実施した。農薬の希釈液は、電気抵抗や誘電率等の電氣的な性質が薬剤の種類により異なるが、それらは静電気の帯電に対して大きな影響を与えないため⁶²⁾、散布液体には物理性が標準的な液体として水道水を用いた。

表 3-1 室内試験の処理区設定

処理区名	静電散布		無荷電散布	
	E200	E140	N200	N140
散布量 (L/10a)	200	140	200	140
液滴比電荷 (mC/kg)	-0.28	-0.28	0.00	0.00
散布圧力 (MPa)	1.5	1.5	1.5	1.5
散布速度 (m/s)	0.28	0.41	0.28	0.41

感水紙に付着した液滴の被覆面積率測定は、スキャナと画像処理ソフトウェア (Adobe Photo shop 7.0) を用いた。液滴付着により発色した感水紙を、フラットベッドスキャナ (解像度 600 dpi) でパーソナルコンピュータに 24 bit のビットマップカラー画像として取り込み、8 bit グレースケール化した後、白黒 2 階調化を行った。

2 階調化の閾値は、付着度指標による肉眼判定で付着度 5 となるサンプルにおいて、発色部位と 2 階調化画像の黒色部位が、目視ではほぼ同一となる閾値 80 に固定した。2 階調化処理により、輝度 0~80 未満を黒 (輝度 0)、80 以上 255 以下を白 (輝度 255) に分離した。その後、黒色のピクセル数をカウントして被覆面積率 (%) を算出した。被覆面積率の算出式を式 3-1 に示す。

$$C = Pb / Pa \cdot 100 \quad (\text{式 3-1})$$

ここで、 C : 被覆面積率 [%]

Pa : サンプル領域の全ピクセル数

Pb : 黒色ピクセル数

付着の均一性を評価するため、感水紙上の発色部位 (以下、付着斑とする) の個数、及び個々の付着斑の面積を画像解析ソフトウェア (Image-J, ver. 1.36b) により解析した。画像解析の元画像は、被覆面積率測定の際に作成した感水紙の二階調化画像を使用した。

2-3 結果及び考察

2-3-1 静電散布の噴霧粒径分布

静電散布と無荷電散布における噴霧粒径分布を図 3-3 に示す。噴霧粒径は 3~300 μm の範囲に広く分布しており、静電気を帯電させても噴霧粒径分布には殆ど影響しなかった。また噴霧の体積中位径 (VMD) は静電散布と無荷電

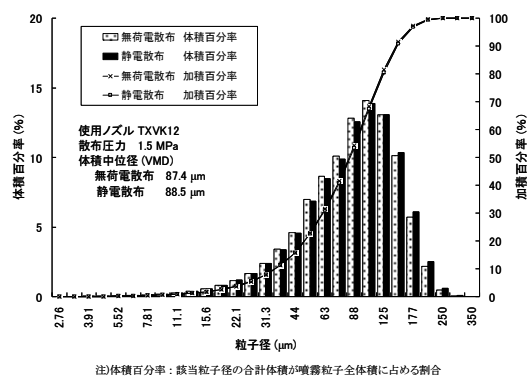


図 3-3 静電散布と無荷電散布における噴霧粒径分布

散布に有意差がなく約 90 μm であった。

Marchant らによれば、噴霧液滴に対して、その表面張力を上回る高い電荷が帯電すると、静電霧化により液滴が分裂して噴霧粒径が小さくなる⁴⁷⁾。しかし Marchant らの装置で液滴に与えられる比電荷が +1.3 mC/kg であるのに対して、本静電散布装置は -0.28 mC/kg と絶対値で 2 割程度の比電荷しか持たないため、液滴に対する静電霧化の発生は軽微であり、噴霧粒径分布に影響しなかったものと考えられた。

2-3-2 キャベツ模擬作物体に対する液滴付着特性

散布量 200 L/10a 及び 140 L/10a における、キャベツ模擬作物体への静電散布と無荷電散布の部位別被覆面積率を表 3-2 に示す。静電、無荷電ともに外葉裏面の被覆面積率が高い傾向が認められた。結球側面と外葉裏面では 30.5~92.0% の被覆面積率が得られたが、下葉裏面の被覆面積率は 1.2% 以下と著しく低く、静電散布と無荷電散布の間に有意差は無かった。同一散布量で比較した場合、結球側面及び外葉裏面における静電散布の被覆面積率は、無荷電散布

表 3-2 キャベツ模擬作物体における部位別の被覆面積率 (%)

処理区	結球側面		外葉裏面		下葉裏面	
	被覆面積率	CV	被覆面積率	CV	被覆面積率	CV
E200	67.4 a	46.4	92.0 a	14.2	0.9	164.8
N200	46.3 b	73.5	70.7 b	34.8	1.2	155.3
E140	50.4 b	35.2	72.6 a b	30.8	0.9	119.6
N140	30.5 c	71.2	59.6 b	42.9	1.0	111.1

注) 同列異符号間に優位差有り, $p < 0.01$, Tukey's method

CV: 変動係数 (%)

より有意に高かった。一方、無荷電散布の変動係数(CV)は静電散布に比較すると約1.4~2.5倍も大きく、付着状態が大きくばらついていることを示した。静電散布の200 L/10a (E200)は結球側面、外葉裏面ともに全処理区で最も高い被覆面積率を示し、無荷電散布の200 L/10a (N200)に比べて21.1%高かった。また、静電散布の140 L/10a (E140)は無荷電散布の140 L/10a (N140)に比べ結球側面で19.9%高く、外葉裏面は同等であった。E140はN200と同等の被覆面積率を示し、変動係数はE140が小さかった。

静電散布の被覆面積率は、下葉裏面を除いて無荷電散布を上回り、帯電による付着の改善が得られた。またE140とN200の被覆面積率に差が無かったことから、静電散布は無荷電散布より散布量を減じても、同等の付着特性を得られる可能性が示唆された。下葉裏面では全ての処理区で殆ど付着せず、静電散布でも付着は増加しなかったが、これは下葉裏面の位置が帯電用電極から離れており、液滴の比電荷が減少したことと⁶⁵⁾、実験装置の床面に敷設した不織布により、地表面からの噴霧の跳ね返りによる二次付着が発生しなかったためと考えられた。

次に、散布量140 L/10aにおける被覆面積率を、感水紙の貼付位置がノズル進行方向と為す角度別に分析した結果を図3-4、3-5に示す。

結球側面における静電散布の被覆面積率(図3-4)は、全ての貼付位置において無荷電散布より高かった。特に、ノズル進行方向に対して真

横となる90度での静電散布の被覆面積率は、無荷電散布の約5倍となる32.5%が得られた。

外葉裏面における静電散布の被覆面積率(図3-5)は、無荷電散布を上回るか同等の傾向であり統計的有意差は無く、結球側面に比べると静電散布と無荷電散布の被覆面積率の差は小さかった。外葉裏面の45度、90度における被覆面積率は静電気の有無に関係無く75%以上を示し、他の位置に比べて高かった。以上の感水紙貼付位置と被覆面積率の測定結果は、散布量200 L/10aの条件でも同様の傾向であった。

結球側面90度は、噴霧に曝露される時間が短く、地面となす角度も99度とほぼ垂直に近いので、噴霧は結球上部で遮蔽され、噴霧液滴が直接降りかかることが無かった。このため漂流粒子や他部位に衝突した粒子の飛沫しか到達しないが、静電散布では粒子が帯電しているため作物体へ吸着するように運動し、無荷電散布よりも大幅に付着が良好になったと考えられた。外葉裏面の45度及び90度は噴霧パターンが重複する位置にあるため、荷電の有無に関係なく被覆面積率が高くなったものと推測された。

静電散布と無荷電散布の被覆面積率に最も差が顕著であった結球側面90度に貼付した感水紙の二階調化画像を図3-6に示す。静電散布のE140では、大きな付着斑の間を埋めるように、多数の小さな付着斑が観察され、均一な付着であった。一方、無荷電散布のN140は小さな付着斑があまり見られず、付着斑の分布は粗くまばらで、被覆面積率もE140より低かった。

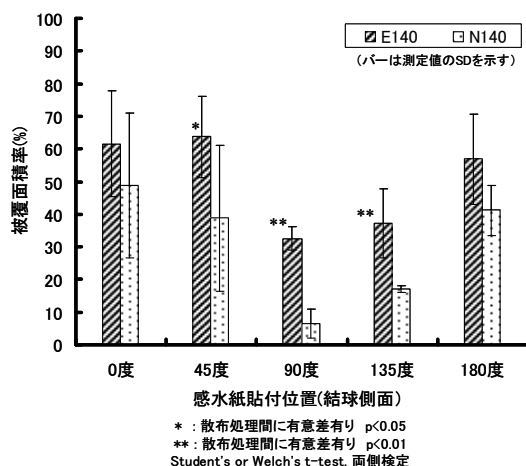


図3-4 キャベツ模擬作物体の結球側面における被覆面積率

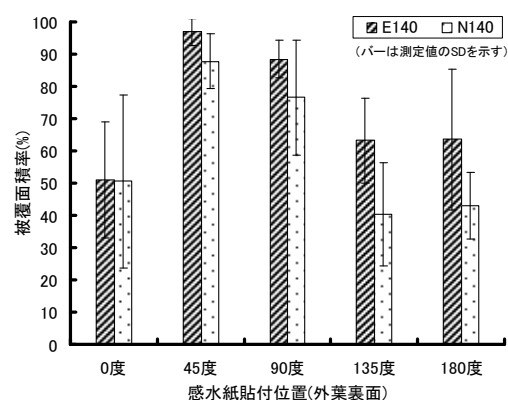


図3-5 キャベツ模擬作物体の外葉裏面における被覆面積率

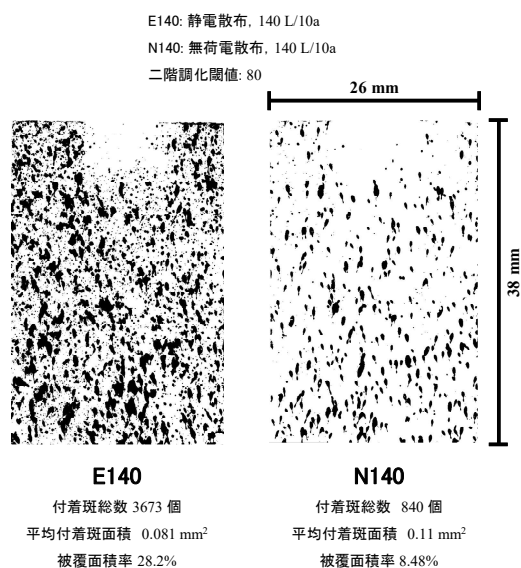


図 3-6 結球部側面 90 度に貼付した
感水紙上の付着斑分布

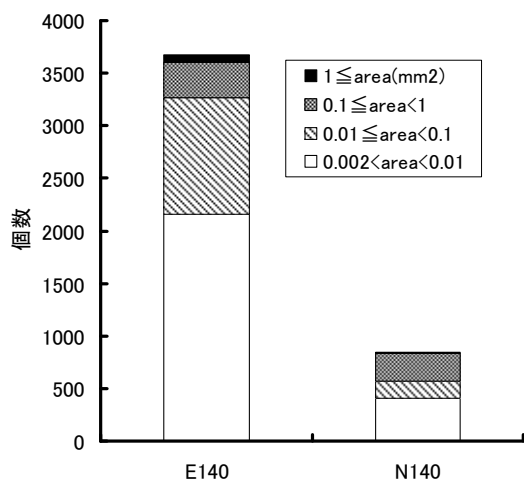


図 3-7 結球部側面 90 度に貼付した
感水紙における付着斑の面積別個数

E140: 静電散布 140 L/10a

N140: 無荷電散布 140 L/10a

図 3-6 の付着斑を, 面積別に分類して計数した結果を図 3-7 に示す. E140 は 0.1 mm^2 未満の付着斑が N140 に比較して著しく多く, 付着斑の 50% 以上が 0.01 mm^2 以下の微細なものであった. $0.1 \sim 1 \text{ mm}^2$ の付着斑の数は, 静電散布と無荷電散布で大きな差が無かった. 静電散布では付着斑同士が重なって, 1 mm^2 を超える大きな付着斑も観察された.

感水紙付着斑の画像解析結果から, 静電散布による付着改善は噴霧中に含まれている微粒子の付着増加が寄与していた. E140 で増加していた 0.01 mm^2 未満の付着斑は, 付着前の液滴粒径に換算⁶⁸⁾すると直径 $70 \mu\text{m}$ 以下となり, 噴霧の体積中位径よりも小さかった. 通常, どのようなノズルでも噴霧中には体積中位径より小さな微粒子液滴が多数含まれているが, これらの微粒子の運動には, 粒径が小さくなるほど散布対象物の沿面を迂回するように発生する気流の影響が大きくなるため¹²⁾, 対象物近傍まで粒子が到達しても付着しにくい. 本実験においても, 模擬作物体の半球状をした外葉の影響で, 結球部側面周辺に微粒子液滴が霧状に充満している状態が観察されたが, 無荷電散布では被覆面積率が 50% を超えることは無かった. 特に 90 度位置には殆ど付着せず, 霧状の微粒子は付着にあまり寄与しなかった. 一方, 静電散布は液滴が帯電しているため, 沿面を迂回する気流が発生しても, クーロン力によって微粒子が作物体に付着することができ, 無荷電散布よりも被覆面積率が高まったと考えられた.

3 実証試験

3-1 試験目的

開発した静電散布装置をブームスプレーヤ型防除機に組み入れ、露地キャベツ栽培における防除効果を慣行散布装置と比較実証し、その優位性を明らかにすることを目的とした。

3-2 試験方法

供試したブームスプレーヤ型静電散布機の外観を図 3-8 に、機体の諸元と実験条件を表 3-3 に示す。市販ブームスプレーヤ（形式 RV3）のノズル部分を静電散布装置に交換し、帯電用の電源供給線と直流高圧電源装置、及び 100 V 交流発電機を装備した。



図 3-8 露地キャベツ防除実証試験の供試機外観

項目	処理区	
	静電散布	慣行散布
諸元		
形式番号	RV3	JKA17D
出力 (kW)	7	12.5
ブーム全幅 (mm)	9000	10000
ノズルピッチ (mm)	500	300
ノズル形式番号	TXVK12	NND-6
噴霧パターン	中空円錐	扇形
噴霧粒径 (μm,VMD)	112※	55※
ノズル吐出量 (L/min)	1.7	1.0
静電散布装置	誘導帯電	無し
実験条件		
電極印加電圧 (kV)	+4.0	0
液滴比電荷 (mC/kg)	-0.31	0.00
散布量 (L/10a)	140	200
散布圧力 (MPa)	1.0	1.3
走行速度 (m/s)	0.29	0.27
散布高さ (mm)	593	593

注)吐出量と噴霧粒径は1.5 MPaにおける値

散布高さは地表面から噴口までの距離を示す

※:メーカ公表値

静岡県農林技術研究所内圃場にて、2007 年 4 月の春作キャベツ定植から 2007 年 12 月の秋作

キャベツ収穫まで、作期を通じて全ての農薬散布を試作機で静電散布した。同時に比較対象として市販の速度連動散布量制御付ブームスプレーヤ（形式 JKA17D）を用い、慣行散布とした。静電散布の有効性を明らかにするため、静電散布の単位面積あたり散布量は慣行散布比 30% 減の 140 L/10a とした。静電散布と慣行散布は作業速度をほぼ同一に揃えた。散布時には展着剤（商品名：グラミン S）を加用した。ノズル噴口から地表面までの距離は、室内試験と同様に 593 mm とした。

散布対象作物のキャベツ耕種概要を表 3-4 に示す。単条畝上げ栽培とし、施肥管理は静岡県農林技術研究所慣行に準じた。試験区は静電散布、慣行散布、無散布の 3 区を設けた。薬剤の希釈倍率は静岡県病害虫防除基準に従い、散布時期は害虫の発生に応じて散布した。散布作業は風速 2 m/s 以下の早朝時間帯を選んで行った。

表 3-4 キャベツ耕種概要

作期	品種	定植日	試験規模 (m ²) (1処理区)	調査株数 (1反復)	反復数
春作	南宝	4月9日	29	20	なし
夏作	南宝	6月13日	98	20	2
秋作	彩里	9月19日	123	20	3

注)栽植密度: 条間60 cm×株間45 cm

表 3-3 露地キャベツ防除実証試験の
供試機諸元と実験条件

害虫防除効果の評価方法は、散布の前日、3 日後及び 7 日後に、反復あたり 20 株の害虫頭数を調査した。各反復において処理前の害虫生息頭数が異なることや、無処理区でも頭数が自然変動する影響を補正するため、調査した害虫頭数を元に補正密度指数⁶⁹⁾を算出した。以下に算出式を示す。

$$Di = (Na/Nb) \cdot (Tb/Ta) \cdot 100 \quad (\text{式 3-2})$$

ここで、 Di : 補正密度指数

Na : 無処理区散布前害虫頭数

Nb : 無処理区散布後害虫頭数

Ta : 処理区散布前害虫頭数

Tb : 処理区散布後害虫頭数

生育期間を通して静電散布した場合のキャベツの品質と収量を評価するため、秋作の収穫時に、収穫物の被害度⁷⁰⁾、可販率、収量を算出した。以下に被害度の算出式を示す。

$$I=100 \cdot (3 \cdot A + 2 \cdot B + 1 \cdot C) / 3 \cdot N \quad (\text{式 3-3})$$

ここで、

I : 被害度 [%]

A : 被害程度多（結球部まで食害が多い）の株数

B : 被害程度中（外葉の食害は多いが結球部の食害は無い）の株数

C : 被害程度少（外葉がわずかに食害されている）の株数

N : 調査株数

また、“被害程度多”以外の株が調査株に占める割合を可販率 (%)とした。

3-3 結果及び考察

栽培期間中のキャベツに病害は発生しなかったため、殺菌剤の散布は行わなかった。各試験区とも薬害は認められなかった。

表 3-5 散布処理前後の害虫の発生状況
(10 a あたり頭数)

2007年春作					
害虫名	区名	クロルフェナピル 水和剤 2000倍 5/15散布		スピノサド 水和剤 2500倍 6/17散布	
		3日後	7日後	3日後	7日後
コナガ	静電散布	22.9	16.6	6.1	25.1
	慣行散布	27.8	15.4	18.5	36.7
2007年夏作					
害虫名	区名	トルフェンビラド 乳剤 1000倍 6/28散布		スピノサド 水和剤 2500倍 8/7散布	
		3日後	7日後	3日後	7日後
コナガ	静電散布	3.0	4.5	27.1	37.5
	慣行散布	1.1	2.4	31.0	35.7
タマナギン ウワバ	静電散布	—	—	23.8	20.8
	慣行散布	—	—	31.7	18.5
アブラムシ	静電散布	14.7	26.9	—	—
	慣行散布	8.6	24.7	—	—
2007年秋作					
害虫名	区名	アイザワイ系統BT 水和剤 1000倍 10/12散布		スピノサド 水和剤 2500倍 11/16散布	
		3日後	7日後	3日後	7日後
モンシロチョウ	静電散布	25.1	23.6	8.4	5.2
	慣行散布	35.8	20.3	6.8	3.6

注)全ての散布において、静電散布は140 L/10a、慣行散布は200 L/10a

静電散布区及び慣行散布区において、散布前日における害虫の発生数に著しい差はなかった。春作及び夏作ではコナガ (*Plutella xylostella*) の発生が見られ、特に春作の5月は株あたり3~5頭程度と多数発生した。夏作の中期から後期ではタマナギンウワバ (*Autographa nigrisigna*) の発生が見られた。秋作は気温が低下して害虫発生種類は減少し、モンシロチョウ (*Pieris rapae*) の発生だけが顕著であった。アブラムシの発生は夏作を除いて少なかった。農薬散布処理7日後の頭数は、コナガに対する5/15の散布を除いて、静電散布、慣行散布ともに株あたり1匹以下に抑えられた。

次に農薬散布処理後の害虫の補正密度指数(以下 Di とする)を表3-6(次頁)に示す。害虫の種類や散布薬剤にかかわらず、散布3日後の Di は処理間に一定の傾向が無かったが、散布7日後の静電散布と慣行散布における Di の差は認められなかった。本実験では、害虫の防除効果に対する静電散布の影響は明らかで無かった。

各試験区における散布処理前後の害虫頭数を表3-5に示す。

表 3-6 散布後の害虫補正密度指数

2007年春作								
害虫名	区名	クロルフェナピル 水和剤 2000倍 5/15散布			スピノサド 水和剤 2500倍 6/17散布			
		前日	3日後	7日後	前日	3日後	7日後	
コナガ	静電散布	52.0	36.0	22.3	35.3	0.7	1.7	
	慣行散布	43.7	36.7	17.3	29.0	1.7	2.0	
	無処理	31.3	94.7	81.0	92.3	28.7	17.3	
2007年夏作								
害虫名	区名	トルフェンビラト 乳剤 1000倍 6/28散布			スピノサド 水和剤 2500倍 8/7散布			
		前日	3日後	7日後	前日	3日後	7日後	
コナガ	静電散布	8.3	0.8	1.0	4.0	0.8	0.8	
	慣行散布	7.8	0.3	0.5	7.0	1.5	1.3	
	無処理	5.0	15.3	13.5	6.5	4.5	3.3	
タマナギン ウバ	静電散布	—	—	—	3.0	1.0	0.8	
	慣行散布	—	—	—	2.3	1.0	0.5	
	無処理	—	—	—	2.5	3.5	3.0	
アブラムシ	静電散布	116.8	12.8	6.0	—	—	—	
	慣行散布	90.0	5.8	4.3	—	—	—	
	無処理	99.5	73.8	19.0	—	—	—	
2007年秋作								
害虫名	区名	アゼライ系統BT 水和剤 1000倍 10/12散布			スピノサド 水和剤 2500倍 11/16散布			
		前日	3日後	7日後	前日	3日後	7日後	
アオムシ	静電散布	5.8	1.8	2.5	12.2	1.0	0.7	
	慣行散布	6.3	2.8	2.3	17.5	1.2	0.7	
	無処理	7.3	9.2	13.3	28.3	27.7	29.7	

注)全ての散布において、静電散布は140 L/10a、慣行散布は200 L/10a

秋作のキャベツの収量と品質調査結果を表 3-7 に示す。収量は全ての試験区で約 1600 g/個となり、無散布区も含めて差が無かったが、無散布では被害度 93.3、可販率 16.7%で、殆ど商品にならない状態であった。静電散布と慣行散布は被害度が同等で、いずれも可販率は 95%に達し、虫害による被害は少なく抑えられた。

このことから静電散布は単位面積あたり散布量が慣行より 30%少ない条件において、防除効

果は実用レベルにあった。なお室内試験の結果では、静電散布を行ってもキャベツ模擬作物体の下葉裏面に対して防除に有効な付着が得られなかったが、キャベツは収穫時に下葉を畑に捨てるため虫害痕などは問題にならず、実証試験の結果でも収穫物の収量及び品質に影響しなかった。

表 3-7 収穫時のキャベツ収量と品質 (2007 年秋作)

試験区	球重 (g)	被害度指数	可販率 (%)
静電散布	1565	31.7	95.0
慣行散布	1566	32.2	96.7
無防除	1604	93.3	16.7

・各区60株調査、外葉2枚を残して収穫、2007年12月19日実施

・被害度判定基準;

多:結球部まで食害が多い、中:外葉の食害は多いが結球部は食害されていない、

少:外葉がわずかに食害されている、無:食害なし

・被害度指数=(多の株数×3+中の株数×2+少の株数)/3×調査株数

・可販率(%)=被害度無、少、中の株数合計/調査株数×100

・静電散布140 L/10a、慣行散布200 L/10a

4 総合考察

畑作用ブームスプレーヤに搭載した低濃度多量散布の静電散布装置は、室内試験においてキャベツ結球側面及び外葉裏面の被覆面積率を無荷電散布より有意に増加させ、慣行比 30%減量散布で、慣行同等の被覆面積率が得られた。また、圃場における害虫補正密度指数の結果から、静電散布は 30%減量散布において、慣行散布と防除効果に差が無かった。このことから多量散布の静電散布装置は付着の増加が認められ、防除効果を維持しつつ、慣行比 30%減量散布を実現する可能性が示唆された。

本静電散布装置では噴霧の微粒化が発生せず、粒子径分布は無荷電散布と同じであったため、自然風の影響などで作物体近傍から噴霧が逸脱した場合、無荷電散布と同様のドリフト特性を示すと考えられる。したがって本静電散布装置を使用する際は、通常のブームスプレーヤでの作業時と同様に、ブームを必要最低限の高さに抑え、風の少ない時に散布する等、ドリフトを防止する対策を行う必要がある。

繁茂した植物群落に対して、遠心微粒化装置や二流体ノズルで高度に微粒化（VMD10～40 μm ）した静電散布を行うと、帯電電極に近い草冠部や葉の先端部に付着が集中する問題が指摘されている^{51),71)}。しかし本実験結果では電極に近い結球部位や、感水紙のエッジ部分に付着が集中することは無かった。本装置の噴霧液滴がそれらの実験に比べて大きく重いため、噴霧液滴の運動に対する帯電の影響が微粒子の静電散布ほど顕著では無いことと、散布対象物のキャベツは茎葉の繁茂が作物体上部に集中していないため、付着の集中は発生せずに均一な被覆面積率が得られたものと考えられた。

キャベツ模擬作物体における付着斑粒径分布計測結果から、本静電散布装置の帯電による付着の増加には、ノズル粒径分布中の 70 μm 以下の微粒子成分が寄与していた。現在、国内の低濃度多量散布では、漂流飛散（ドリフト）の一層の低減を企図した体積中位径 300 μm 程度の粗大粒子を散布するノズルが開発され、一部で普及が始まっている。粗大粒子ノズルでは付着度の均一性、及び葉裏付着の低下が懸念される。しかし、それら粗大粒子ノズルにおいても 100 μm 以下の微粒子が、散布粒子体積全体の 1/2～1/10 程度含まれていることから⁴⁹⁾、本研究で開発した多量散布の静電散布装置と粗大粒子散布ノズルを組み合わせることにより、粒径分布中に含まれる微粒子の葉裏に対する付着を向上させる効果が期待できると考えられる。静電散布を用いた粗大粒子散布による飛散低減と付着性能確保の両立について、今後検討する価値が有ろう。

第IV章 温室メロン用静電散布ロボットの開発

1 序 言

静岡県における温室メロン ‘*Cucumis melo* L. var. *reticulatus* Naud’ (以下、メロンと記す) は、2006 年現在、栽培面積 355 ha、生産額 116 億円と県内農産物総出荷額の 4.7% を占める重要な特産物である。

本県のメロンは 1 棟 1.5 a 程度のスリークォータ型ガラス温室で栽培されるのが特徴であったが、近年では建設コストと所要暖房エネルギーの低減に有利な、一棟 20～30 a 規模の大形温室導入が進行している⁵⁶⁾。大形メロン温室の例を図 4-1 に示す。

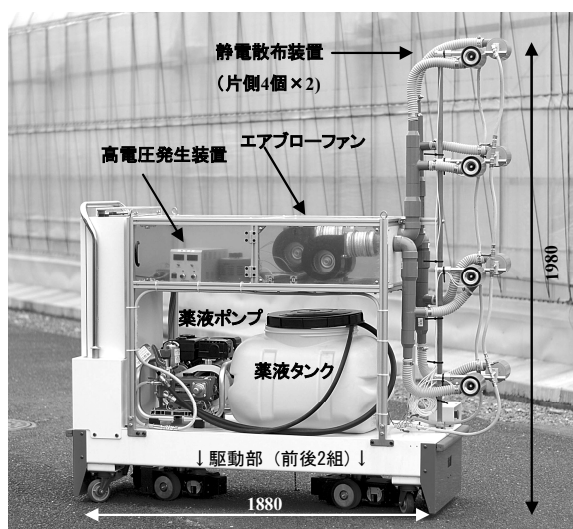
一方、静岡県の現地調査結果 (2007) によると、大形温室におけるメロンの防除作業時間は年間 130 時間/10a 程度に達している⁵⁷⁾。施設栽培では、慣行の動力噴霧機による手散布の場合、作業者の農薬被曝が多く^{60),61)}、閉鎖・暑熱といった作業環境の厳しさも相俟って、大形温室における防除作業の改善は喫緊の課題であり、作業の無人化が実現できる自動防除機の開発が強く求められている。

従来、このような大規模施設栽培における防除労力の軽減手段として、ノズル懸垂式防除装置や、自走式ロボットスプレーカ等の自動散布装置が開発されてきた。しかし、運転するための設備が複雑で、コードやホース類を機体移動

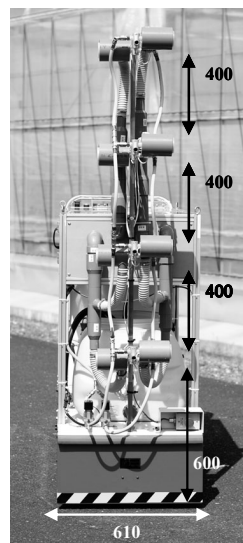


図 4-1 大形メロン温室の外観と内部の例
(30 a 規模、掛川市沖ノ須、幅 48 m × 奥行 60 m)

に付随して人力で動かす必要があり、作業性に問題がある。また、ノズルの噴霧方向は固定されており、手散布のようにノズルを振り動かしながら散布することはできず、作物体の葉裏など噴霧の影となる部分に液滴を付着させることが困難である。このため手散布に比べて防除効



側面



前面



(unit: mm)

後面

図 4-2 試作した温室メロン用静電散布ロボットの外観 (単位: mm)

表 4-1 静電散布ロボットの諸元

機体外寸・質量	機体最大寸法 (DWH)	1880 × 610 × 1980 mm
	機体質量 (空車)	315 kg
静電散布装置	帯電方式	環状電極・誘導帯電方式
	帯電用高電圧発生装置	直流高圧安定化電源 HCZE-30PN
	ノズル頭口数	8頭口 (片側4頭口 × 2)
	ノズルピッチ	400 mm
	ノズル噴板型式	TXVK4
	ノズル噴霧パターン	中空円錐噴霧
	噴霧方向	水平横向き
	吐出量 (1.5 MPa, 1ノズル)	0.56 L/min
	散布圧力 (最大)	1.5 MPa
	噴霧粒径 (VMD)	96 μm
エアブロー装置	電極印加電圧	+ 4 kV
	液滴比電荷	-0.45 mC/kg
	ファン型式	SW-120Y
	ファン駆動電動機	280 W (AC100 V, 60 Hz, 2.9 A)
	電源 (静電散布装置電源を兼ねる)	DC24 V (12 V 35 Ah × 2直列)
葉液ポンプ・タンク	最大風量	17 m ³ /s
	外筒出口風速	4.2 m/s
	型式	HPE1730E
	駆動エンジン	3.0 kW, 4サイクルガソリン
無人走行台車	吸い込み水量	13.5 L/min
	タンク容量	180 L
	型式	SAV10B-RLMC
無人走行台車	最大積載量	400 kg
	誘導方式	磁気テープ, 非接触
	走行駆動電動機	DCブラシレスモータ 100 W × 4
	走行電源	DC24 V (12 V 35 Ah × 2直列)
	走行速度	0~0.6 m/s範囲内で100段階可変
	最大登坂角	1°
	路面段差	10 mm以内
	連続走行時間	8 時間 (積載50%, 0.25 m/s)
	設定経路プログラム数	100経路
	最大動作ステップ	256ステップ/経路
	防水規格	IP54準拠 (防塵, 耐飛沫)

果が不十分とされ、静岡県内のメロン栽培農家への普及は進んでいない。

そこで本章では、作業の大幅な省力化を実現しつつ、作物体に対する良好な付着性を確保する技術として、低濃度多量散布の静電散布装置を搭載したメロン用静電散布ロボットを開発した。ここでは、開発機の概要、メロン群落に対する付着特性、害虫に対する防除効果、及び作業能率と作業精度を明らかにし、大規模温室メロン栽培における無人防除の実用化に資する基礎データを得た。

2 材料及び方法

2-1 試作した温室メロン用静電散布ロボット

静電散布ロボットは、静電散布装置、エアブロー装置、薬液ポンプ、薬液タンク、及び無人走行台車から構成される (図 4-2, 表 4-1)。全長 1880 mm, 全幅 610 mm, 全高 1980 mm,

機体質量は 315 kg である。全幅はメロン農家温室の畝間通路幅 750~950 mm に進入できる寸法とした。薬液タンクや電源は全て無人走行台車上に装備しており、電源コードや薬液ホース類を機体移動に付随して人力で動かす必要は無い。

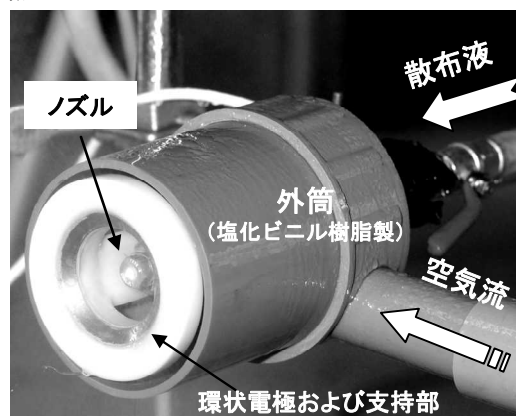


図 4-3 エアブロー機構を装備した静電散布装置

静電散布装置は、動力噴霧機用の中空円錐噴霧ノズルに環状誘導帯電電極を組み合わせた構造である（図 2-1 参照）^{65),72)}。帯電電極への液滴付着による漏電やコロナ放電の発生⁴⁶⁾を防ぐため、電極外側を塩化ビニル樹脂製の外筒で覆い、筒内に送風するエアブロー機構を付加した（図 4-3, 前頁）。エアブロー機構は外筒内部に旋回気流を発生させ、外筒先端と環状電極支持部の隙間から気流を排出する。この静電散布装置を、垂直の支持柱に 400 mm 間隔で片側 4 個、両側合計 8 個装備した。噴霧方向は機体進行方向に対して水平横向きとした。

本静電散布装置の帯電性能は、電極電圧+4.0 kV、散布圧力 1.5 MPa、ノズルあたりの吐出量 0.56 L/min において液滴比電荷は-0.45 mC/kg である。帯電用電源装置は最大定格 30 kV、7.5 W の直流高圧安定化電源を用い、電極印加電圧 +4.0 kV、電極電流上限 250 μ A に設定した。

エアブロー用送風ファンは 2 台装備し、各々 AC100 V、2.9 A (60 Hz)、出力 280 W の誘導電動機で駆動される。風量は最大 17 m³/min である。電動機電源は、DC24 V 蓄電池から DC-AC インバータで供給した。

薬液ポンプは 3.0 kW ガソリンエンジン駆動の動力噴霧機用ポンプを用いた。加圧された薬液は機体進行方向の左右各々の経路に分岐し、電磁締切弁を経由した後、各ノズルに分配される。電磁締切弁は走行制御盤からの指令によって、自動的に左右ノズルの散布開始・停止を行う。ノズルは各々手動のボールバルブを装備し、植物体形状に合わせて散布ノズル数を手動設定できる。薬液タンクは最大 180 L の樹脂製角形タンクを搭載した。

無人走行台車は工場用無人搬送台車（愛知機械テクノシステム社製 SAV10B-RLMC）を改良したもので、各部の防水対策は IP54 (IEC60529, 防塵防滴) に準拠した。駆動電動機は直流ブラシレスモータを用い、駆動電源は DC24 V 蓄電池を用いた。走行誘導方式は、圃場床面に貼付した幅 50 mm、厚さ 1.0 mm の N 極磁気テープを、機体下部の非接触磁気センサで検出し追従走行する。左右分岐、正逆転、噴霧開始・停止などのアクションは、S 極磁気マーク（50×125 mm）を誘導磁気テープ近傍に設置し、マーク検出時に既定アクションを実行するプログラムを走行制御盤内のメモリーに作

成した。走行速度は 0～600 mm/s の範囲内で任意に（6 mm/s ステップ）定速走行する。本機は散布圧力が一定であるため、単位面積あたりの散布量は走行速度で設定した。

2-2 試験方法

2-2-1 付着性能

開発機のメロン群落に対する液滴付着特性を明らかにするため、群落内の各部位に感水紙（Novartis 製 Water sensitive paper）を設置し、その付着度指数（生研センター作成の標準付着度指標に準拠）を判定して付着特性を評価した。付着度指数は、感水紙表面に液斑が全く無い状態を 0、感水紙の全面が液滴に被覆され垂れ落ちが生じる状態を 10 とした 11 段階の付着度指標に従って、3 名の測定者で目視判別し、その平均値で評価した。

供試メロン温室は、静岡県農林技術研究所内のフェンロ型温室を用いた。温室の寸法は床面寸法 18×18 m、軒高 3.5 m、棟高 4.0 m で、3 区画に分割された温室内の 1 区画（6×18 m、栽培畝 4 畝）を使用した。通路はコンクリート舗装であった。

付着特性試験の散布条件を表 4-2 に示す。散

表 4-2 付着性能試験条件

項目		水準
散布条件	散布量 (L/10a)	100, 200, 300
	走行速度 (mm/s)	247, 124, 82
	散布方法	静電散布, 無荷電散布
	散布圧力 (MPa)	1.5
	電極印加電圧 (kV)	+4 (静電), 0 (無荷電)
	散布作業幅 (m)	3
感水紙設置位置	散布距離 (mm)	310, 610, 910
	高さ (mm)	900, 1200, 1500

布処理は、液滴に帯電させて散布する静電散布（以下、静電散布と記す）、及び開発機の電極電源を切って散布する無荷電散布（以下、無荷電散布と記す）の二処理を設定し、エアブロー機構の送風機は静電散布、無荷電散布共に作動させた。単位面積あたりの散布量は、我が国の農薬施用方法において標準的な 200 L/10a を基準に、100 L, 200 L, 300 L/10a の 3 水準とした。

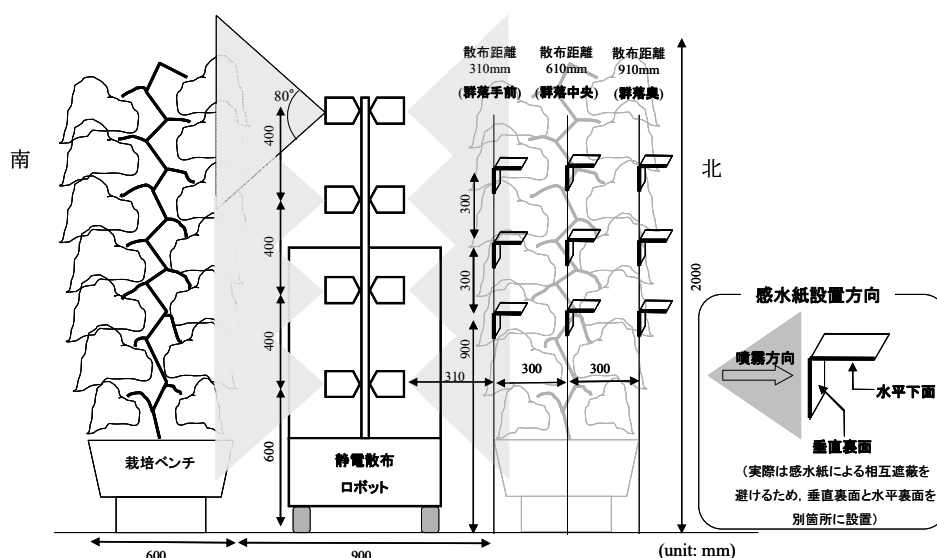


図4-4 付着試験実施時におけるメロン群落の寸法形状と感水紙設置位置（単位：mm）

供試作物体の試験時（定植後45日）における寸法形状と感水紙の設置位置を図4-4に示す。栽培様式は静岡県農林技術研究所慣行に従った。感水紙の設置位置は、ノズル噴口からの散布距離310mm（群落手前）、同610mm（群落中央）、同910mm（群落奥）の各位置にグラスファイバ製支柱を設置し、支柱の地上高900,1200,1500mmの三箇所へ、縦38mm×横52mmの感水紙を金属クリップで装着した。

感水紙の面方向は、メロン害虫の殆どが葉の裏面に生息することから、地面に垂直かつノズル噴霧軸方向に正対する平面の裏側（以下、垂直裏面と記す）、及び地面と平行な平面の下側（以下、水平下面と記す）の二方向に感水面を設定した。これらの感水紙は栽培ベンチ上に長手方向2m間隔で4反復設置した。

2-2-2 防除効果

開発機を用いて、病害虫を接種したメロン株に対する防除試験を行い、慣行手散布と比較評価した。

防除対象は、栽培現地で最も大きな問題となっている難防除害虫のミナミキイロアザミウマ '*Thrips palmi* Karny'（以下、アザミウマと記す）とした。供試圃場は、付着性能試験と同じフェンロ型温室を用いた。供試作物はアザミウマを寄生させたポット植のメロンを用い、図4-4と同様に栽培ベンチ上へ株間35cmで設置した。供試作物の状態は草高550mm、本葉の展開枚数10枚で、通常栽培の移植後15日経

過程度に相当した。

防除試験の散布条件を表4-3に示す。草高が小さかったため、ロボットのノズルは一部を閉塞して下位の4ノズル（片側2ノズル）のみ散布を行い、散布量を125 L/10a相当とした。散布薬剤はエマメクチン安息香酸塩20%溶液（商品名：アフーム）1000倍希釈液を用いた。散布処理は、開発機による静電散布、同無荷電散布、手散布の三処理を設け、一処理に10株を供試した。開発機による散布は、通路片側から一回走行散布した。比較対照の手散布は手動蓄圧式の肩掛散布機（HS-401）を用い、全ての葉裏に均一に付着させるよう丁寧に散布した。

表4-3 防除試験条件

試験区	静電散布，無荷電散布， 手散布
メロン草高 (mm)	550
メロン葉齢	本葉10枚
散布ノズル数*	4
散布圧力 (MPa)*	1.5
走行速度 (mm/s)*	98
散布距離 (mm)*	610
散布量 (L/10a)	125
散布薬剤	エマメクチン安息香酸塩 1000倍溶液

*：手散布を除く

防除効果の判定方法は、散布前と散布後のアザミウマ幼虫頭数を目視計数した。さらに、無処理でも頭数が自然変動する影響を補正するため、調査した害虫頭数を元に補正密度指数⁶⁹⁾

を式 3-2 により算出した。

2-2-3 作業能率と精度

開発機の作業能率と精度を明らかにするため、大規模温室メロン農家において、作業中の帯電状況、作業速度、走行性能を調査した。

供試圃場は、農家圃場（静岡県磐田市向笠）の大規模フェンロ型メロン温室を用いた。温室の全床面積は約 20 a で、6 区画に分割されており、1 区画寸法は 10.4×35.0 m であった。通路部分は全てコンクリートで平滑に舗装されていた。この 1 区画（栽培面積約 3.3 a）を用い、開発機の走行誘導用磁気テープ、及び動作指示用磁気マーカーを設置した。

走行経路は、主通路から分岐し畝間に進入後、前進（400 mm/s）で畝末端まで回送走行し、進行方向逆転と同時に設定散布速度で後退しながら散布作業を行う。その後、主通路で散布遮断し、スイッチバックして次の畝間に入る。

帯電状況は、散布作業時における帯電用電極の電極電圧と電極電流の経時変化を、直流高圧電源の出力モニタ端子からデータログ（日置電機 8842）に記録し評価した。散布液体は、電解質が主成分で水溶液の導電性が高いエマメクチン安息香酸塩 20% 溶液 1000 倍希釈液（商品名：アフーム）を用いた。

また、静岡県温室農業協同組合の協力を得て、大形温室導入メロン農家 11 軒を集めて静電散布ロボットの運転状況を公開し、作業性等に関して農家意見の聴取を行った。

3 結果及び考察

3-1 メロン群落に対する付着性能

試験時（2009 年 3 月 4 日、定植後 45 日経過）のメロン群落高さは地上高 2000 mm、葉数 23 ± 2 枚で、一株あたりの葉面積は、約 10500 ~ 11500 cm² であった。葉の多くは通路側へ展開し、葉面は水平～下向きの角度を呈した。

3-1-1 群落内の高さ及び散布距離と付着度指数の関係

開発機における、付着度指数とメロン群落内の高さの関係を図 4-5 に示す。ここでは散布距離 310 mm のデータを図示した。

垂直裏面に対する付着は（図 4-5 左）、静電散布の場合、全ての高さにおいて付着度指数 8.8 以上、標準偏差が平均値 ± 0.5 以内と良好な付着を示し、無荷電散布の 4.3 ~ 5.1 に対し明らかに高かった。また静電散布、無荷電散布ともに高さによる付着度指数の差は無かった。

水平下面に対する付着は（図 4-5 右）、垂直裏面の場合と同様に、静電散布は全ての高さで 8.0 以上を示し無荷電散布より明らかに高かった。無荷電散布は高い位置ほど付着度指数が低く、高さ 1500 mm では 1.3 と殆ど付着しなかった。これらの高さで付着度指数の関係は、散布距離 610 mm 及び 910 mm でも同様であった。

以上から、開発機による静電散布は、垂直裏面、水平下面ともに群落内の高さの違いが付着度指数に影響せず、無荷電散布より常に高い付着度指数が得られた。静電散布では電荷により液滴に上向きの力が作用し、群落内の高位置の水平下面にも良好に付着したと考えられた。

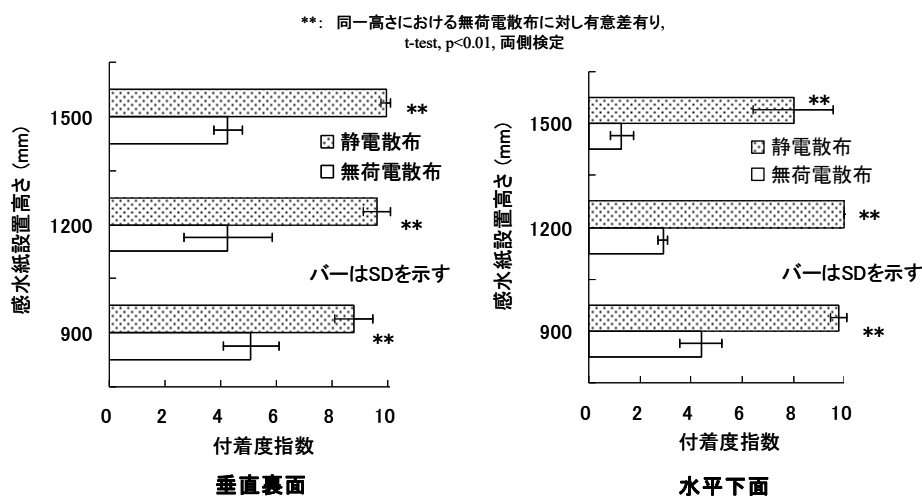
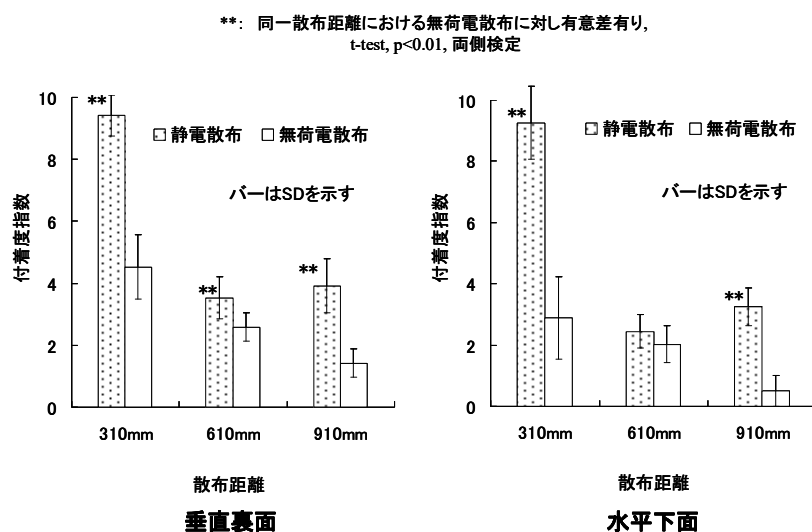


図 4-5 メロン群落内における高さ別の付着度指数



次に、付着度指数と散布距離の関係を図 4-6 に示す。ここでは各散布距離における全ての高さの付着度指数を平均してプロットした。

垂直裏面の付着度指数と散布距離の関係は(図 4-6 左)、散布距離 310 mm で付着度指数が最も高く、610 mm 及び 910 mm では低かった。静電散布は散布距離 310 mm の群落手前で付着度指数 9.4 と著しく高く、同 610 mm は急激に低下して 3.4 となったが、910 mm は 3.9 を示し、610 mm と付着度指数に差がなかった。一方、無荷電散布は散布距離の増大に伴って付着度指数が低下し、310 mm では付着度指数 4.5 を示したが、610 mm で 2.6 に低下し、910 mm は 1.4 と僅かな付着であった。静電散布は全ての散布距離で無荷電散布の付着度指数を上回り、特に 310 mm と 910 mm では無荷電の 2

倍以上と大幅に優れた。水平下面の付着度指数と散布距離の関係(図 4-6 右)も、垂直裏面の場合と同一傾向を示した。

この結果から、開発機の静電散布による付着度指数と散布距離の関係は、散布距離の短いノズル近傍の群落手前で高い傾向を示し、散布距離が長くなる群落中央及び群落奥では付着度指数 4 以下に低下したが、静電気帯電の効果により無荷電散布と比べて常に付着度指数は高かった。

3-1-2 散布量と付着性能の関係

静電散布ロボットにおいて、散布量を 100～300 L/10a の範囲で変化させた際のメロン群落に対する付着性能を図 4-7 に示す。

垂直裏面に対する付着度指数と散布量の関係は、静電散布の場合、群落手前及び群落奥にお

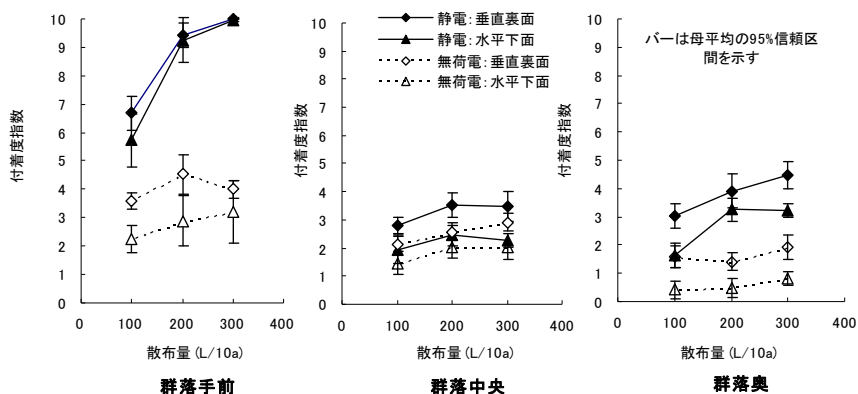


表 4-4 温室メロンに寄生したミナミキイロアザミウマに対する
静電散布ロボットの防除効果

散布方式	散布前日		3日後			6日後		
	頭数	SD	頭数	SD	補正密度指数	頭数	SD	補正密度指数
手散布	43.2	15.8	1.5 a	1.2	4.3	1.1 a	1.1	3.4
静電散布	45.3	16.6	3.5 a	2.3	9.5	3.6 a	3.0	10.7
無荷電散布	43.7	15.1	8.1 b	5.8	22.9	10.0 b	6.7	30.8
無処理	44.1	13.5	35.7	18.8	100.0	32.8	23.5	100.0
有意差	n.s.		*			**		

注) 頭数はメロン一株の本葉3枚に寄生していた幼虫頭数

*: 同列異符号間に有意差有り, $p<0.05$, Tukey's method, 両側検定

**: 同列異符号間に有意差有り, $p<0.01$, Tukey's method, 両側検定

いて散布量を増加すると付着度指数は高まった。特に群落手前の付着度指数は、100 L の 6.6 に対し 200 L は 9.0 と感水紙表面の大部分を液滴が被覆し、さらに 300 L では 10.0 と感水紙の全面が被覆された状態になった。これに対し群落中央では、静電散布の付着度指数は散布量を増加させても 3 前後で変化しなかったが、同一散布量の無荷電散布より有意に高かった。無荷電散布では、全ての測定位置において、散布量の増加に対し付着度指数の有意な変化が生じなかった。

水平下面に対する付着度指数と噴霧量の関係は、静電散布では群落手前及び群落奥は垂直裏面と同傾向であったが、群落中央では散布量を増加しても付着度指数は増加せず、無荷電と差が無かった。

3-2 防除効果

防除効果の結果を表 4-4 に示す。散布前のメロン株に寄生したミナミキイロアザミウマ幼虫頭数は、本葉 3 枚あたり 45 頭前後と各処理間で差が無く、葉裏へ高密度に生息している様子が観察された。

農薬散布処理を行ったところ、静電散布の生存頭数は 3 日後、6 日後ともに手散布と有意な差が無く、4 頭程度と低く抑えられた。一方、無荷電散布は生存頭数、補正密度指数ともに静電散布や手散布より大幅に劣り、6 日後には頭数の増加傾向が認められた。この結果から、開発機による静電散布は、ミナミキイロアザミウマに対し手散布なみの優れた害虫防除効果を示した。

3-3 作業能率と精度

3-3-1 静電散布装置の液滴帯電状況

開発機の農薬散布時における電極電流及び電極電圧の経時変化を図 4-8 に示す。

散布開始後 1 分以内で、エアブロー機構外筒

実験条件: 吐出圧 1.5 MPa, 電極電圧 +4.0 kV,
液滴比電荷 -0.45 mC/kg, 測定間隔 100 ms
散布液: エマメクチン安息香酸塩 1% 乳剤 1000 倍溶液
測定ノズル数: 1 個

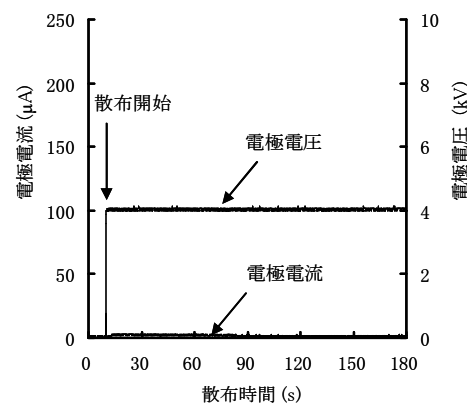


図 4-8 静電散布装置の電極電流と
電極電圧の経時変化

の外側全面が液滴で覆われ湿潤な状態になったが、電極電圧は +4.0 kV に保たれ、電極電流は 5 μA 以下の低い値であった。また、帯電電極表面では付着した液滴同士が結合して或程度の大きさに成長すると、空気流によって吹き飛ばされる様子が観察され、電極支持部周辺及び外筒内部は乾燥した絶縁抵抗の高い状態を維持していた。この結果から、試作したエアブロー機構により漏電を防止し、導電性液滴の散布時においても安定的な帯電状態を維持できることが確認できた。なお、送風がノズルの噴霧パターンに与える影響はなかった。

3-3-2 走行性能

実験は 2009 年 7 月 8 日に測定を行い、その後も供試圃場の農家によって繰り返し作業を行

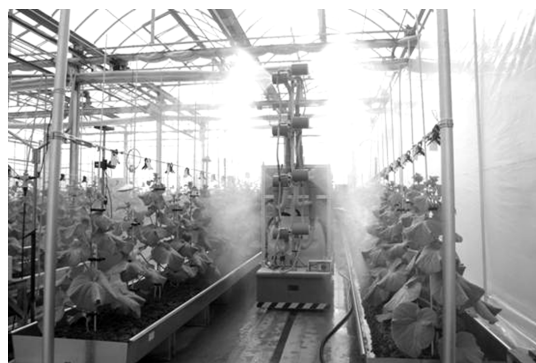


図 4-9 メロン防除ロボットの作業状況（左：旋回中，右：畝間作業中）

ったが、天候、通路の乾湿等に関係なく、誘導経路逸脱やマーカ検知不良、障害物接触などの走行異常は発生しなかった。ロボットの散布作業状況を図 4-9 に示す。

散布中の走行速度は、散布開始時の満載状態（150 L）と、散布終了時（残液約 5 L）において速度差 1.2% であり、速度制御精度は良好であった。噴霧開始・停止などのアクションに誤動作や動作欠落が発生することはなかった。

3-3-3 作業能率

散布量 450 L/10a における開発機の作業能率測定結果を表 4-5 に示す。

周辺作業者の安全性及び畝進入時の走行精度

試験条件	散布量 (L/10a)	450
	散布作業速度 (m/s)	0.09
	作業幅 (m)	2.6
	理論作業量 (a/h)	8.4
	作業面積 (a)	3.3
測定結果	全作業時間 (h)	0.87
	散布作業時間 (h)	0.48
	旋回・移動時間 (h)	0.25
	薬液準備時間 (h)	0.08
	片づけ、洗浄時間 (h)	0.06
	圃場作業量 (a/h)	3.8
	圃場作業効率 (%)	45

測定日：2009年7月8日

確保のため、旋回速度と移動速度を各々 0.09 m/s、0.40 m/s に設定した。散布量 450 L/10a、散布作業速度 0.09 m/s において温室一区画 (3.3 a) の作業時間は 0.87 h であり、圃場作業

量は 3.8 a/h を示した。圃場作業効率は 45% であった。

本機を使用する農家からは、走行性能が非常に安定していること、電源コードや散布ホースの取り回しを気にする必要が無いことから、安心して無人作業が任せられる、あるいは、本機の散布中に別の作業を進められるといった高い評価が得られた。また、意見聴取した大規模温室メロン農家からは、圃場作業量が低くても、無人で散布ができれば良いという好評価が多く聞かれた。

4 総合考察

表 4-5 静電散布ロボットの作業能率

開発機の温室メロンに対する付着性能は、特に群落手前で無荷電散布よりも非常に高く、防除効果も生育中期の植物体に対しては手散布に近い良好な性能を示した。

メロン大規模温室の慣行の動噴による散布作業時間は年間 130 時間/10a であるが⁵⁷⁾、動噴散布作業の圃場作業効率は通常 50% 程度であることから⁷³⁾、準備や片づけを除いた散布作業時間は年間 65 時間/10a と推計される。したがって 30 a 規模の温室農家の場合、年間 195 時間程度を要している慣行散布作業時間を、開発機によって無人化できると考えられる。

これらの結果から、静電散布ロボットにおける付着性能向上、防除効果、及び省力化に対する有効性が実証された。

静電散布ロボットの群落中央及び群落奥における付着は無荷電散布を上回るものの、付着度指数は 4 以下にとどまった。群落奥における高い防除効果を得るには、条の反対側の通路から再度散布する作業手順が必要と考えられる。現

状の大形メロン温室では、面積利用効率向上のために、作業通路間に2畝の栽培ベンチを密着して配列する事例が見られる。ロボット導入にあたっては、各畝に作業通路を確保し、1本の畝に両側から散布する作業行程をとることで、良好な付着が期待できる。

低濃度多量散布の静電散布において、群落中央や群落奥の付着を改善する方法として、外部電界方式³⁰⁾の併用が考えられる。群落中央や群落奥は静電散布装置ノズルからの散布距離が遠いため液滴比電荷は減少しており、帯電電極と被散布物間に形成される電界も弱い。この部位に、高電圧の被覆電線を張る等の方法で外部電界を形成しておけば、弱い電荷の液滴であっても強電界中におくことで大きなクーロン力を発生し、付着増加が期待できると考えられる。

また、静電散布にエアアシストを併用すると、噴霧の貫通性が高まり群落内部への付着が向上することが知られている^{44),74)}。開発機のエアブロー機構の送風量を増加することにより、ノズル軸方向のエアアシスト効果を発生させ、噴霧液滴に大きい運動エネルギーを与えれば、群落奥により多くの帯電液滴が到達して付着を改善できると考えられ、今後の課題である。

第V章 総 括

本研究の目的は、低濃度多量散布の静電散布技術を開発することである。この目的を達成するため、始めに国内農薬散布作業における現状と問題点を明らかにし、既往の濃厚少量散布の静電散布技術に関する研究成果を分析した。それに基づき、国内の低濃度多量散布に適合する静電散布技術の開発を研究課題に取り上げ、同分野における現在の研究状況を示した。

つぎに、低濃度多量散布の静電散布装置の試作を行い、その構造と多量散布液滴に対する帯電特性を明らかにした。

続いて同装置を搭載したブームスプレーヤを開発し、室内実験によるキャベツ模擬作物体への付着性能と、露地キャベツ圃場における防除効果の実証試験により、静電散布による露地結球野菜栽培の農薬散布量減量化の可能性を示した。

さらに、同装置を搭載した温室メロン用静電散布ロボットを開発し、メロン群落への付着特性及び防除効果を明らかにすることで、施設栽培の無人散布装置に対する静電散布の有効性を示した。

本研究で得られたこれらの知見は、静電散布装置の実用化に貢献すると共に、各農業機械メーカーの静電散布装置開発における基本的な設計指針となっている。

以下、本研究の内容を総括して述べる。

1 農薬散布の現状と取り上げる静電散布の概要

(1) 国内の畑作、果樹園、施設栽培における農薬散布は液剤散布が一般的であり、農薬を 500～5000 倍に希釈し、70～800 L/10a 散布する低濃度多量散布が行われている。液剤散布の手段には動力噴霧機（動噴）が広く使用されている。しかし動噴散布は付着率が 30%程度と低く、農薬の無駄を減らし効率良く付着させる散布技術の開発が望まれている。

(2) 付着性能を改善し、農薬散布量削減及び防除作業の省力化が可能な散布技術のひとつが静電散布である。海外を中心とした既往の研究成果から、濃厚少量散布の静電散布装置に関しては付着改善による散布量削減の効果実証と市販

機の開発が完了しているが、国内の慣行である低濃度多量散布に適合する静電散布装置の開発は端緒についたところであり、その基本的帯電特性や圃場の作物に対する実際の付着特性、防除効果などの研究は未着手である。

(3) 本研究は、国内の低濃度多量散布で使用できる静電散布技術の開発を目的とし、研究対象に露地野菜栽培と施設栽培を取り上げる。露地野菜栽培では農薬散布回数、散布量ともに多いため、付着の良い散布技術の開発により、現在の防除効果を維持しつつ農薬散布量を削減することが望まれている。また施設栽培では、栽培の大規模化と厳しい作業環境のため散布作業の労働負担が非常に大きく、省力的で付着性能の良い自動散布装置の実用化が求められている。

(4) 本研究を開始するにあたり、次の仮説を提案した。低濃度多量散布のノズルは噴霧粒径が 100～200 μm と大きく、帯電させても液滴の比電荷は小さいと予想され、濃厚少量散布に比較して帯電による付着改善効果が得にくい懸念がある。しかし、粒子径の大きいノズルでも噴霧液滴中には一定割合で微粒子が含まれており、帯電させることによりこれら微粒子の付着が増加する可能性がある。また、比電荷の低い液滴でも、多量散布することで実用的な付着改善や防除効果の向上が期待できると考えられる。低濃度多量散布の静電散布技術が確立できれば、国内の慣行多量散布体系で使用できる散布量削減技術や、防除作業省力化機械の設計開発に貢献すると考えられる。

2 低濃度多量散布における静電散布装置の帯電性能

低濃度多量散布で使用できる付着効率の良い静電散布装置の開発を目的として、吐出量 0.56～2.6 L/min の動力噴霧機用一流体ノズル散布液滴に静電気を帯電させることが可能な、環状電極・誘導帯電方式の静電散布装置を試作し、装置の電極やノズルの物理的条件が噴霧液滴の帯電特性（比電荷）に及ぼす影響を明らかにした。

(1) 開発装置の比電荷と電極印加電圧の関係は、ノズルにより異なるが概略+4 kV まで、電

圧上昇に対応して比電荷は増加した。+4 kV 以上では電極濡れに起因する漏電、及び電極に付着した液滴によるコロナ放電や火花放電が発生し帯電を阻害するため、比電荷は+6~8.5 kV で最大値を示した後に減少した。したがって、開発装置は多量散布液滴に対して、+4 kV まで電極印加電圧に対応した比電荷が得られた。

(2) ノズル吐出量、散布圧力及び電極印加電圧が同一の条件では、扇形噴霧に対して中空円錐噴霧の比電荷が常に高かった。この原因は、真円形状である環状電極に対し、中空円錐噴霧では噴霧パターンの液滴分裂部位が均一に近接するためと考えられる。

(3) 同一噴霧パターンのノズルでは、吐出量が少ないものほど比電荷は高かった。また、同一ノズルで散布圧力上昇により吐出量を増加させると、比電荷は減少した。ノズル吐出量と比電荷の関係は 0.6 L/min 以下の少量散布ノズルでは既に解明されていたが、本研究により 0.6~2.6 L/min の各種多量散布ノズルにおいても、少量散布ノズルと同一傾向を示すことを明らかにした。

(4) 電極と噴霧液滴間のギャップ距離は、噴霧が電極に触れない状態で最小としたとき最も比電荷が高かった。ギャップ距離が 1.6 mm 拡大する毎に、液滴の比電荷は 13~18% 低下した。

(5) 噴口からの散布距離 300~800 mm の範囲では、距離の拡大とともに比電荷が減少した。噴口から近距離ほど減少率が大きく、遠距離での減少率は小さい。この傾向は吐出量の小さいノズルほど顕著であった。

(6) 試作した帯電装置に吐出量 0.56~2.6 L/min の動噴用中空円錐噴霧ノズルを使用した場合、電極印加電圧+4 kV、散布圧力 1.5 MPa、散布距離 300 mm の条件では -0.20~-0.45 mC/kg の比電荷が得られた。

3 キャベツに対する付着性能と害虫防除効果

露地野菜作において、付着効率が良く農薬散布量を削減できる農薬散布装置の開発を目標とし、開発した低濃度多量散布の静電散布装置をブームスプレーヤ型防除機に組み入れ、キャベツに対する噴霧付着特性を、模擬作物体を用いた室内試験にて明らかにした。また慣行よりも単位面積あたり散布量を 30% 減量した条件で、

キャベツ圃場にて作期を通した長期の防除実証試験を行い、静電散布の散布量減量化に対する実用性を評価した。

(1) 開発した低濃度多量散布の静電散布装置における噴霧粒径分布及び体積中位径は、無荷電散布と殆ど同一であり、帯電が噴霧粒子径に与える影響は無かった。したがって、静電散布でドリフトが増加する恐れは無く、同程度の噴霧粒径を持つ慣行ノズル散布とドリフト防止に関する取扱性は変わらないと考えられた。

(2) キャベツ模擬作物体に対する静電散布の被覆面積率は、同一散布量で比較した場合、無荷電散布と比較して結球側面及び外葉裏面で有意に高かった。特に結球側面でその差は顕著であった。噴霧量 140 L/10a における結球側面の被覆面積率は、無荷電散布の 30.5% に対し、静電散布では 50.4% に増加した。また静電散布の被覆面積率の変動係数は無荷電散布よりも小さく、作物体の部位によるばらつきの少ない均一な付着を示した。

(3) 静電散布の散布量 140 L/10a におけるキャベツ模擬作物体への被覆面積率は、無荷電散布の 200 L/10a と同等であった。

(4) 静電散布では感水紙上における 0.1 mm² 以下の付着斑が、無荷電散布よりも大幅に増加したが、この現象は、ノズルの体積中位径よりも小さな粒子径 70 µm 以下の微粒子成分の付着増加に起因することを明らかにした。

(5) 露地キャベツ圃場での長期にわたる防除実証試験の結果、鱗翅目を主とする結球部食害害虫の補正密度指数は、慣行比 30% 減量の静電散布と慣行散布で差が認められなかった。静電散布による収穫物の収量、品質は慣行散布と同等であった。このことから、静電散布による 30% 減量散布の実現可能性が示唆された。

4 温室メロン用静電散布ロボットの開発

重労働かつ多大な作業時間を要している大規模メロン温室の防除作業を省力化し、かつ良好な付着特性が得られる防除機として、開発した多量散布の静電散布装置を搭載する静電散布ロボットを試作した。同機のメロン群落に対する付着性能、防除効果、作業精度及び作業能率を明らかにした。

(1) 開発機は、工業用の無人走行台車に、低濃度多量散布の静電散布装置とポンプ及び薬液タ

ンクを搭載した構造で、走行路上の磁気テープにより自動走行し、散布作業を無人で行う。電源コードや薬液ホース類などの付帯装置は一切無く、開発機単体で無人作業する。20 a 規模温室における走行試験の結果、走行速度制御の精度は薬液タンク満載時と空車時の差が $\pm 1.2\%$ 以内と高精度で、走行誘導も経路逸脱等は一切発生しなかった。

(2) メロン群落に対する開発機の散布距離と付着度指数の関係は、近距離で非常に高い傾向を示した。散布距離 310 mm において、垂直裏面及び水平下面ともに付着度指数 8.0 以上と高かった。散布距離 610 mm と同 910 mm では 2.4 ~ 3.9 に低下するが、同一散布距離における無荷電散布よりも有意に付着度指数は高かった。静電散布では、群落内の高さによる付着度指数の差は無く、均一な付着が得られた。

(3) 静電散布では散布量を 100 L ~ 300 L/10a の範囲で増加させると、群落手前及び群落奥の付着度指数は有意に高まった。群落中央では付着度指数の増加傾向は見られるものの、散布量間に有意な差は無かった。

(4) 開発機の防除効果は、本葉 10 枚展開程度の生育中期のメロン作物体に寄生したミナミキイロアザミウマに対し、手散布と同等の高い殺虫効果を示した。

(5) 開発機の圃場作業量は散布量 450 L/10a において 3.8 a/h であり、圃場作業効率は 45% であった。試験運転で開発機を導入した農家にヒアリングを行ったところ、安定的に無人散布作業ができること、ホースやコード等を走行に伴い処理する必要がないことに関して高い評価が得られた。

以上の一連の研究を通して、従来未着手であった低濃度多量散布用の静電散布装置を試作し、帯電特性を定量的に明らかにすると共に、液滴に高い比電荷を与えるための設計指針を示した。また露地野菜栽培を対象とした付着試験により、被覆面積率増加と均一化の向上を明らかにし、害虫防除効果の評価により、静電散布による農薬散布量減量化の可能性が示唆された。さらに施設栽培用の静電散布ロボットを試作し、付着度向上と均一化、手散布並みの防除効果、及び作業の省力化が実証され、無人散布機に対し静電散布の適合性が高いことを示した。これらのことから、低濃度多量散布の静電散布の実用的な有効性を明らかにした。

5 今後の課題

本研究では、露地結球野菜栽培、及び温室メロン栽培に対する低濃度多量散布の静電散布の付着特性を明らかにした。この結果は同様の群落構造を持つ作物栽培に対しても適用できるものと考えられる。しかし群落の立体構造が大幅に異なる水稻や、棚栽培の果樹などに対する静電散布の付着特性解明については今後の課題である。また、ダイズのように群落草冠部が密に繁茂する作物では、草冠部を機械的に開口して散布する方式や、エアアシストなどの併用について研究する必要がある。

引用文献

- 1) 農林水産省消費・安全局農産安全管理課植物防疫課(2008): 農薬要覧. 日本植物防疫協会.
- 2) 農薬散布技術編集委員会編(1998): 農薬散布技術. 日本植物防疫協会.
- 3) 辻孝三(2006): 農薬製剤はやわかり. 化学工業日報社, 33-39.
- 4) 日本農薬学会(1990): 農薬の散布と付着. 日本植物防疫協会.
- 5) 今井正信・武長孝(1959): 静電散布機に関する試験. 関東東山農試研究成績, 317-326.
- 6) Law, S. E. (2001): Agricultural electrostatic spray application: A review of significant research and development during the 20th century. *Journal of Electrostatics*, 51-52, 25-42.
- 7) 日本液体微粒化学会編(2001): アトマイゼーションテクノロジー. 森北出版, 29-46.
- 8) 静電気学会編(1998): 新版静電気ハンドブック. オーム社.
- 9) 梅津勇(2000): 静電農薬散布と微粒子の動力学現象. 微粒化, 9(27), 15-20.
- 10) Peter Catsle, G. S., Inculet, I. I., (1983): Space charge effects in orchard spraying. *IEEE Transactions of Industrial Applications*, 1A-19(3), 476-480.
- 11) Bowen, H. D., Splinter, W. E., Carleton, W. M. (1964): Theoretical implications of electrical fields on deposition of charged particles. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 7(1), 75-82.
- 12) Spillman, J. J. (1984): Spray impaction, retention, and adhesion: an Introduction to basic characteristics. *Pesticide Science*, 15, 97-106.
- 13) Lenard, P. (1892): Über die electricität der wasserfalle. *Annalen der Physik*, 3(46), 584-636.
- 14) Wilson, H. F., Janes R. J., Campau, E. J. (1944): Electrostatic charge effects produced by insecticidal dusts. *Journal of Economic Entomology*, 37(5), 650-655.
- 15) Moore, A. D. (1973): *Electrostatics and Its Applications*. Johan Wiley & Sons, New York.
- 16) Law, S. E., Bowen, H. D. (1966): Charging liquid spray by electrostatic induction. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 9(4), 501-506.
- 17) Bowen, H. D., Hebblethwaite, P., Carleton, W. M. (1952): Application of electrical fields on deposition of charged particles. *Agricultural Engineering*, 33(6), 347-350.
- 18) Coffee, R. A. (1981): Electrodynamic crop spraying. *Outlook for Agriculture*, 10(7), 350-356.
- 19) Giles, D. K., Blewett, T. C. (1991): Effects of conventional and reduced-volume, charged-spray application techniques on dislodgeable foliar residue of Captan on strawberries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39, 1646-1651.
- 20) Kabashima, J., Giles, D. K., Parrella, M. P. (1995): Electrostatic sprayers improve pesticide efficacy in green houses. *California Agriculture*, 49(4), 31-35.
- 21) Herzog, G. A., Lambert, W. R., Law, S. E., Seigler, W. E., Giles, D. K. (1983): Evaluation of an electrostatic spray application system for control of insect pests in cotton. *Journal of Economic Entomology*, 76(3), 637-640.
- 22) Law, S. E., Mills, H. A. (1980): Electrostatic application of low-volume microbial insecticide spray onto broccoli plants. *Journal of the American Society for Horticulture Science*, 105(6), 774-777.
- 23) Cooper, S. C., Law, S. E., All, J. N., Oetting, R. O. (1992): Air-assisted Electrostatic Sprays for Applications of Environmentally-safe Pesticides. *American Society of Agricultural Engineers Paper No. 92-1571*, St. Joseph, Michigan.
- 24) Saito, T. (2005): Preliminary experiments to control the silverleaf whitefly with electrostatic spraying of a mycoinsecticide. *Applied Entomology and Zoology*, 40(2), 289-292.
- 25) Parham, M. R. (1982): Weed control in arable crops with Electrodyne© sprayer. *Proceedings of the British Crop Protection Conference-Weeds*, vol. 3, 1017-1023.
- 26) 浅野和俊(1984): 静電農薬散布の現状. 静電気学会誌, 8(3), 182-191.
- 27) 松尾昌樹・内野敏剛・飯本光雄(1987a): コ

- ロナ帯電式2流体ノズル及び直接帯電式回転円盤ノズルによる静電散布特性(第1報). 農業機械学会誌, 49(1,2), 55-61.
- 28) 松尾昌樹・内野敏剛・飯本光雄(1987b): 外部環状電極を用いた誘導帯電式2流体ノズルの静電散布特性. 農業機械学会誌, 49(5), 459-466.
- 29) 津賀幸之介・市来秀之・梶山道雄(1988a): 施設栽培における静電散布法の研究(第1報): 薬剤の帯電方式とその特性. 農業機械学会誌, 50(1), 61-68.
- 30) 津賀幸之介・市来秀之・梶山道雄(1988b): 施設栽培における静電散布法の研究(第2報): 外部電界方式の特性と帯電付着の特徴. 農業機械学会誌, 50(2), 27-35.
- 31) 津賀幸之介・市来秀之・梶山道雄(1988c): 施設栽培における静電散布法の研究(第3報): ハウス内における付着分布と防除効果. 農業機械学会誌, 50(3), 77-84.
- 32) 小野盾男(1995): 施設内無人防除に関する研究(第3報) 静電散布機の開発, 静岡県農業試験場研究報告, 40, 39-49.
- 33) 住田明子・浜口隆文・八木下徹哉・小野盾男・市川健・藤田俊和・高橋義行(2001): 静電付加式常温煙霧法の特徴. 植物防疫, 55(10), 482-486.
- 34) 和田豊・林明子・古野秀和・生江洋一・柑本俊樹・高橋義行(1997): 静電式常温煙霧機による施設野菜のワタアブラムシの防除. 関東東山病虫害研究会年報, 44, 235-238.
- 35) 小澤朗人・太田光昭・小林久俊・高橋浅夫(2001): 施設メロンのミナミキイロアザミウマ (*Thrips palmi* Karny) に対する静電散布法の防除効果. 関東東山病虫害研究会報, 48, 129-131.
- 36) 市川健・小野盾男・内山道春・杉浦秀治(1998): 静電散布によるメロンうどんこ病の防除効果. 静岡県農業試験場研究報告, 43.
- 37) 松尾昌樹・内野敏剛(1991): 静電式スปีドスプレーの研究. 千葉大学園芸学部学術報告, 44, 99-104.
- 38) 東山禎夫・賈振武・浅野和俊(1996): エアレスノズルから噴出する液滴の誘導帯電と接地円板近傍での液滴のふるまい. 静電気学会誌, 20(3), 163-170.
- 39) 小野盾男・山根俊(1998): 静電気を利用した安全・省力薬剤散布装置の開発. 静岡県農業試験場平成10年度完了試験成績報告書.
- 40) 山根俊・湯木正一(2005): 農業用一流体ノズルを用いた静電散布装置の開発. 第14回微粒化シンポジウム講演論文集, 165-168.
- 41) 田淵敏彰(2004): 静電噴口(eジェッター)の開発. 農業機械学会誌, 66(6), 21-22.
- 42) 松尾昌樹・内野敏剛・飯本光雄(1986): エレクトロダインの静電散布特性について(第1報). 農業機械学会誌, 48(1), 25-31.
- 43) Moser, E., Schmidt, K. (1983): Elektrostatik im chemischen pflanzenschutz ergebnisse mit feldspiritzgeräten. Landt, 38(3), 100-102.
- 44) Gupta, C.P., Duc, T. X. (1996): Deposition studies of a hand-held air-assisted electrostatic sprayer. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 39(5), 1633-1639.
- 45) Law, S. E. (1978): Embedded electrode electrostatic induction spray charging nozzle: Theoretical and engineering design. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 11(3), 491-495.
- 46) Splinter, W. E. (1965): Development of an air curtain nozzle for electrostatically charging sprays and dusts. American Society of Agricultural Engineers Paper No.65-644, St Joseph, Michigan.
- 47) Marchant, J. A., Green, R. (1982): An electrostatic charging system for hydraulic spray nozzles. Journal of Agricultural Engineering Research, 27, 309-319.
- 48) 松尾昌樹(1984): 精密防除その理論と実際. 農業機械学会, 17-28.
- 49) 宮原佳彦(2006): ブームスプレーヤー用ドリフト低減型ノズルの開発. ブレインテクニュース, 116, 39-43.
- 50) Law, S. E., Lane, M. D. (1982): Electrostatic deposition of pesticide sprays onto ionizing targets: Charge and mass transfer analysis. IEEE Transactions on Industry Applications, IA-18(6), 673-679.
- 51) Law, S. E., Marchant, J. A., Bailey, A. G. (1985):

- Charged-spray deposition characteristics within cereal crops. IEEE Transactions on Industry Applications, IA-21(4), 685-693.
- 52) Cooper, S. C., Law, S.E. (1987) : Bipolar spray charging for leaf-tip corona reduction by space-charge control. IEEE Transactions on Industry Applications, IA-23(2), 217-223.
- 53) 農林水産省大臣官房統計部(2009) : 農林水産統計:平成 20 年産秋冬野菜, 指定野菜に準ずる野菜等の作付面積、収穫量及び出荷量. 農林水産省.
- 54) 今中勲(1997) : 病虫害防除暦総覧. 化学工業日報社.
- 55) 農林水産省大臣官房統計部(2005) : 農業経営統計調査報告. 農林水産省.
- 56) 大須賀隆司(2004) : フェンロー型温室導入の手引き. 静岡県農業試験場.
- 57) 静岡県産業部(2007) : 静岡県農業技術原単位. 静岡県産業部.
- 58) 米村純一・長岡真一・山田き乃枝・日浅治枝子(1972) : 農作業災害防止に関する研究:第 8 報 ビニルハウスにおける農薬の人体付着について. 農作業研究, 16, 42-45.
- 59) 小木曾正敏・田辺仁志(1981) : 防除作業と従事者への農薬付着. 植物防疫, 35(4), 165-169.
- 60) 疋田慶夫・垂井不二男(1986) : 施設栽培従事者の農薬暴露について:キュウリ栽培の場合. 農作業研究, 21(3), 40-53.
- 61) Nuyttens, D., Windey, S., Sonck, B. (2004) : Comparison of operator exposure for five different greenhouse spraying applications. Journal of Agricultural Safety and Health, 10(3), 187-195.
- 62) Carroz, J. W., Keller, P. N. (1978) : Electrostatic induction parameters to attain maximum spray charge. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 21, 63-69.
- 63) Nasr, G. G., Yule, A. J., Bending, L. (2002) : Industrial Sprays and Atomization: Design, Analysis and Applications. Springer-Verlag, Great Britain.
- 64) 舘一幸・山田勝則・奥田匠昭・鈴木正一(1986) : 回転霧化静電塗装に関する研究(第 II 報) 塗着効率に及ぼす塗粒径と比電荷の影響. 色材, 59(5), 265-271.
- 65) 山根俊・宮崎昌宏(2008) : 低濃度多量散布における静電散布装置の帯電性能. 農業機械学会誌, 70(4), 115-122.
- 66) Law, S. E., Cooper, S. C. (1989) : Target grounding requirements for electrostatic deposition of pesticide sprays. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 32(4), 1169-1172.
- 67) Lane, M. D., Law, S. E. (1982) : Transient charge transfer in living plants undergoing electrostatic spraying. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 25(5), 1148-1153, 1159.
- 68) Novartis (2000) : Water-sensitive Paper for Monitoring Spray Distribution. 5th edition. Novartis, Basel, Switzerland.
- 69) 諫山真二・小川正臣・笠松紀美(2004) : 兵庫県神戸市岩岡におけるコナガ (*Plutella xylostella* L.) の各種薬剤に対する感受性の変遷. 日本応用動物昆虫学会誌, 48, 337-343.
- 70) 三澤土志郎・佐藤一至・米沢悟・新山徳光(2008) : フルベンジアミド水和剤を用いたキャベツのコナガ (*Plutella xylostella* L.) に対する防除体系の検討. 北日本病虫研報, 59, 149-152.
- 71) 浅野和俊(1986) : 静電散布. 植物防疫, 40(3), 114-119.
- 72) 山根俊・宮崎昌宏・大村和宏(2010) : 低濃度多量散布の静電散布装置に関する研究:キャベツに対する付着特性と害虫防除効果. 農業機械学会誌, 72(1), 54-62.
- 73) 小中俊雄(1997) : 生物生産システム工学. 新農林社, 149.
- 74) McCool, W.C., Walker, J. T. (1987) : Air-assist system for an electrodynamic sprayer. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 30(3), 624-629.

Summary

The objective of this research was to develop an electrostatic pesticide spraying system for low-concentration, high-volume applications in order to deposit much pesticide with little effort for the chemical control of pests. We made a prototype of the electrostatic spraying equipment for low-concentration, high-volume application and investigated its charging mechanism and performance. Next, we made a boom-type field sprayer and a greenhouse spraying robot using the electrostatic spraying equipment, and tested the practicality and effectiveness of these prototype machines for pest control in laboratory and actual field tests.

1. Charging performance of an electrostatic pesticide spraying system for low-concentration and high-volume applications

We designed a system which had an outer annular induction charging electrode around a high flow-rate hydraulic nozzle and investigated its charging characteristics. When the voltage applied to the electrode was gradually increased up to +4 kV, the charge to mass ratio (CMR) of spray droplets increased without discharge or electric leakage from the electrode. On the other hand, the CMR decreased when the applied voltage exceeded +6 to 8.5 kV. The CMR with hollow-cone nozzles was constantly higher than that of flat-fan nozzles. When the gap between the spray cone and the electrode was widened by 1.6 mm, the CMR decreased by 13 to 18%. The CMR obtained by this system was -0.20 to -0.45 mC/kg at +4 kV with the high flow-rate hollow-cone nozzle of 0.56 to 2.6 L/min.

2. Deposition properties and effect on pest control in cabbages

An electrostatic boom-type field sprayer was developed to apply large volumes of a pesticide at low concentrations, and the adherence properties and pest-control effect of the pesticide on cabbages were investigated. In a laboratory experiment using image analysis and water-sensitive paper placed on an artificial cabbage crop, the electrostatic spraying method showed increased adherence of fine-grain droplets smaller than 70 μ m. The coverage rate on the side of cabbage heads when using the electrostatic method at the application rate of 140 L/10a was equal to that of a non-electrostatic spraying method at 200 L/10a. Moreover, the electrostatic method showed a smaller coefficient of variation in the coverage rate, and pesticide deposition was also more uniform. In a field experiment, the electrostatic method at 140 L/10a produced no significant difference in the density of insect pests on cabbages compared to the conventional method at 200 L/10a. The quality and yield of cabbage crops

were the same for the two spraying methods, suggesting the potential of the electrostatic spraying for reducing the application of pesticides on vegetable fields.

3. Development of an electrostatic spraying robot for melon green houses

A spraying robot for greenhouse melons with low-concentration, high-volume electrostatic spraying nozzles was developed and tested. At the spraying rate of 100 to 300 L/10a, the deposition indexes of electrostatic spraying in front of and behind the melons were significant higher than those of non-electrostatic spraying. The deposition indexes of electrostatic spraying were uniform regardless of the height of the melons. In the field test, there was no significant difference in the effect of controlling the insect pest ‘Thrips palmi karny’ between the robot spraying and the conventional manual spraying method. The effective field capacity of the robot was 3.8 a/h.

4. Conclusion

These results clarified quantitatively the characteristics of the electrostatic pesticide spraying system for low-concentration, high-volume applications. In addition, the vegetable field test indicated that this system could reduce the rate of pesticide application. Moreover, the greenhouse test using the electrostatic spraying robot showed that the system improved the spray deposition and work efficacy.

These findings will help manufacturers to design electrostatic spraying equipment that deposits much pesticide with little effort for the chemical control of pests.

謝 辞

本論文の取りまとめにあたり、当初より懇切なる御指導を頂き、公私にわたり研究推進に御協力下さいました筑波大学大学院 生命環境科学研究科 先端農業技術科学 宮崎昌宏教授（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 生物系特定産業技術研究支援センター）に心より深く感謝致します。

筑波大学大学院 生命環境科学研究科 生物資源科学専攻長 瀧川具弘教授、筑波大学大学院 生命環境科学研究科 先端農業技術科学 平藤雅之教授（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター）、筑波大学大学院 生命環境科学研究科 先端農業技術科学 乙部和紀准教授（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター）には貴重な御助言と御校閲を賜りました。謹んで感謝の意を表します。

本研究の当初より御助言御指導を頂いた元静岡県農業試験場 小野盾男氏に深く感謝の意を表します。

本研究で用いた試作機の製作設計と実験機材の調達にあたっては、元株式会社共立 宮下進博士（故人）、弘中佳昭氏、中村駿介氏、株式会社やまびこ農業機械本部開発部 湯木正一博士に多大な御指導と御援助を頂きました。皆様に感謝致します。

本研究は、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 野菜茶業研究所 本多健一郎チーム長、武田光能博士、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 生物系特定産業技術研究支援センター 宮原佳彦博士、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター 齋藤秀文研究員の御指導、御協力をいただきました。ここに謝意を申し上げます。

本研究の実験調査は、静岡県農林技術研究所 大須賀隆司研究員、青野守研究員、大村和宏研究員、済木千恵子研究員、白鳥幸広技能長、鈴木礼三技能長、大橋みどり氏、山中啓子氏、山岸映栄氏の献身的な御協力により行われました。また現地試験に際しては、静岡県温室農業協同組合の皆様、ならびに温室メロン農家の鈴木恵祐氏と御家族に多大な御助言と御協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究は、独立行政法人農業・食品産業技術研究機構の交付金プロジェクト研究「消費者に信頼される生産体制を支える精密畑作農業技術の開発」、および静岡県産業部のプロジェクト研究「未来農業を志向した高級メロン超低コスト生産システムの開発」の一環として取り組んだものです。記して関係各位に謝意を表します。