



エアアシスト静電散布機の開発に関する研究

吉永, 慶太

(Degree)

博士 (農学)

(Date of Degree)

2017-03-07

(Date of Publication)

2018-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙第3326号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2003326>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

エアアシスト静電散布機の開発に関する研究

平成 29 年 1 月

吉永慶太

目次

第 I 章 国内における農薬散布の現状とエアアシスト静電散布の可能性	1
1. 農薬の歴史と現状	1
2. 国内の農業従事者数と高齢化の現状	4
3. 施設園芸内の防除作業の現状	5
4. エアアシスト静電散布の既往の研究	8
5. 研究の目的	11
第 II 章 エアアシスト静電散布における噴霧液滴の物理的特性	13
1. 序言	13
2. 材料および方法	13
1) 実験装置の試作	13
(1) 静電散布装置および供試ノズルの概要	13
(2) 風洞内における液滴の比電荷測定	15
2) 測定項目	20
(1) 静電散布装置の帯電特性	20
(2) エアアシストが風速分布に及ぼす影響	20
(3) エアアシストが落下量分布に及ぼす影響	20
(4) エアアシストが噴霧液滴の比電荷に及ぼす影響	21
(5) 風洞を利用したエアアシスト静電散布の付着性能試験	21
3. 結果および考察	26
1) 静電散布装置の帯電特性	26
2) エアアシストが風速分布に及ぼす影響	28
3) エアアシストが落下量分布に及ぼす影響	36
4) エアアシストが噴霧液滴の比電荷に及ぼす影響	39
(1) エアアシストおよび噴霧ノズル高さが噴霧液滴の比電荷に及ぼす影響	39
(2) エアアシスト, 粒子径が散布距離及び液滴の比電荷に及ぼす影響	44
(3) エアアシストと印加電圧が液滴の比電荷に及ぼす影響	49
5) 風洞を利用したエアアシスト静電散布の付着性能試験	52
4. 総合考察	54

第Ⅲ章 園芸施設用エアアシスト静電散布機の開発	55
1. 序言	55
2. エアアシスト方法の比較評価	55
1) 材料および方法	55
2) 結果および考察	57
3. エアアシスト静電散布機の開発	60
4. メロン栽培温室におけるエアアシスト静電散布の付着性能および防除試験	63
1) 材料および方法	63
2) 結果および考察	67
5. 実用型エアアシスト静電散布機の概要	71
6. 総合考察	75
第Ⅳ章 試験ハウス内における防除試験および現地実証試験	76
1. 序言	76
2. 材料および方法	77
3. 結果および考察	84
1) トマトを対象とした慣行散布量における防除試験	84
2) トマトを対象とした散布量削減時における防除試験	86
3) キュウリを対象とした防除試験	88
4) 現地実証試験	91
4. 総合考察	96
第Ⅴ章 総括	98
1. 国内における農薬散布の現状とエアアシスト静電散布の可能性	98
2. エアアシスト静電散布における噴霧液滴の物理的特性	100
3. 園芸施設用エアアシスト静電散布機の開発	101
4. 試験ハウス内における防除試験および現地実証試験	102
謝辞	104
引用文献	106

第 I 章 国内における農薬散布の現状とエアアシスト静電散布の可能性

1. 農薬の歴史と現状

農薬は作物の生育に有害な病原菌，害虫，雑草などを防除し，農産物の安定生産と高品質化に寄与し，農作業の軽労化・省力化のために重要な生産資材である。表 1-1 は農薬を使用しないで栽培した場合の病虫害による減収と出荷金額の減益を示す。

表 1-1 農薬を使用しないで栽培した場合の病虫害による減収と出荷金額の減益¹⁾

Table 1-1 Decline in yields and incomes by pests and diseases without chemicals

	減収率 (%)			減益率 (%)		
	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
水稲	100	0	27.5	100	5	34.0
小麦	56	18	35.7	93	18	66.0
大豆	49	7	30.4	63	7	33.8
リンゴ	100	90	97.0	100	98	98.9
キャベツ	100	30	63.4	100	30	63.7
ダイコン	76	4	23.7	80	21	37.1
キュウリ	88	4	60.7	86	4	59.5
トマト	93	14	39.1	92	13	40.0

農薬を使用しない場合，すべての品目において，甚大な被害となることがわかっており，特に野菜ではキャベツのような葉菜類やキュウリのような果菜類は被害が大きい。また収穫が長期にわたるトマトでも大きな減収になることが明らかにされている。このように農薬は，農作物を栽培し安定生産する上で必須の資材である。

日本での防除作業の歴史は，1670 年の江戸時代に鯨油を水田にまき，水稲のウンカ駆除に用いられたのが農薬の最初の利用とされている²⁾。その後，除虫菊を用いた殺

虫剤, ボルドー液を用いた殺菌剤など天然由来のものが利用されるようになった。1873年にオーストリアにおいて DDT が開発され, 1938 年にスイスにおいて殺虫効果が発見されて以降, 日本にも戦後 BHC やパラチオンなどと一緒に導入された。2014 年度(2013 年 10 月～2014 年 9 月) 現在において, 日本国内の農薬の生産額は 4063 億円, 出荷額は 3821 億円で前年比それぞれ 6.7 %および 2.8 %の増加であった。また, 農薬の生産量は 244,000 t, 出荷量は 237,000 t でそれぞれ前年比 2.1 および 0.1 %の増加であり, 生産量は 1980 年の 684,000 t をピークに減少傾向となっている³⁾。一方, 2014 年において登録されている農薬は殺虫剤 1092 件, 殺菌剤 914 件, 殺虫殺菌剤 509 件, 除草剤 1494 件, 農薬肥料 64 件, 殺鼠剤 28 件, 植物成長調節剤 92 件, 殺虫・殺菌植調剤 1 件, そのほか 145 件の合計 4339 件となっている³⁾。

一方で, 化学合成農薬の成分使用回数については, トマトで 46~68 回⁴⁾, キュウリで 40~76 回⁵⁾ と水稻の 17~19 回⁶⁾ に比べて極端に使用回数が多い(表 1-2)。さらに, 農業経営収支における農業薬剤費はトマトで 3.2 万円/10 a, キュウリでは 6.1 万円⁷⁾ となっており, 農薬使用量および薬剤費の削減が求められている。

表 1-2 栽培慣行基準における化学合成農薬の使用成分回数

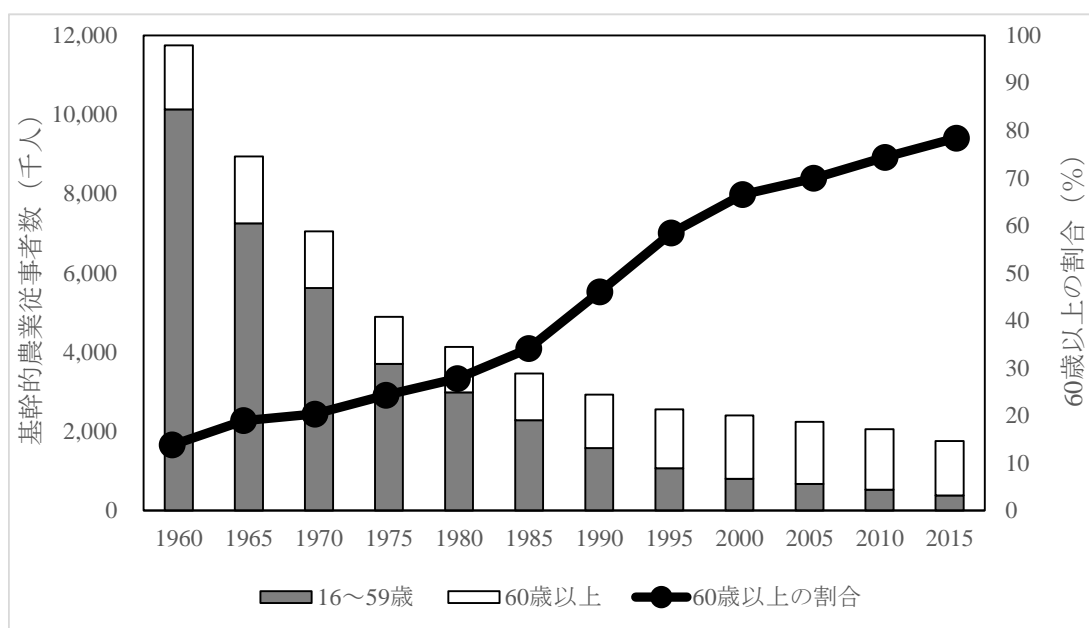
Table1-2 The number of the use of the agricultural chemicals under “the standards of the cultivation practices”

品目	作型	化学合成農薬の使用成分回数
熊本県産 トマト	促成	68
	夏秋雨よけ	46
	抑制加温	49
宮崎県産 キュウリ	抑制	44
	促成	50
	促成（つる下ろし）	76
	半促成	49
	半促成（つる下ろし）	58
	早熟	40
	露地普通	42
新潟県産 水稻		17～19

*各品目は収穫量 1 位の都道府県の栽培慣行基準。

2. 国内の農業従事者数と高齢化の現状

農林業センサス⁸⁾によれば、日本の農業就業人口のうち、自家農業または兼業を主に従事している基幹的農業従事者は農林水産省が統計を始めた1960年に1175万人から2015年で175万人と、右肩下がりになっている(図1-1)。



*1960~2015年農林業センサスを一部編集(1960年世界農林業センサス ~1985年農業センサス)

*農業就業人口のうち、普段の主な状態が「自家農業又は兼業に主として従事(仕事が主)」に該当した人。

図1-1 基幹的農業従事者数と60歳以上の割合の推移

Fig. 1-1 Changes in the number of farmers and their ratio of 60 years or older

近年、農業労働力の高齢化が叫ばれているが、1960年の60歳以上の基幹的農業従事者は162万人、2015年では137万人と数字の上では15%程度の減少にとどまっている。一方、59歳までの若年層の従事者については1,012万人から38万人と55年で

96.2 %もの労働力を失っている。この結果、基幹的農業従事者の平均年齢は 67 歳となっており、他産業の 40 歳前後⁹⁾と比較しても極端に高くなっていることから、一層の省力・軽労化および農作業の安全が求められている。

3. 施設園芸内の防除作業の現状

施設栽培における防除は、風雨などの要因の影響がないことから、噴霧された薬液が長時間施設内で浮遊する、農薬の施設外へのドリフトの心配が無く、さらにはフィルム等により直接日光が当たることがないため、紫外線による薬の分解速度が遅くなる等露地栽培とは大きく異なっている。一方、密閉された空間のため、灌水や防除作業、蒸発散や温度変化等により相対湿度が高くなりやすいため、病害虫が発生しやすく、また、いったん病害虫の被害を受けると施設全体へ短期間で蔓延してしまう危険性がある。そのため、現状では、予防的な意味も含めて農薬散布作業が頻繁に行われている。

近年では太陽光利用型植物工場の普及に代表されるように温室の大規模化、栽培の周年化が進んでおり、散布作業は長時間かつ長期間になる傾向が強く、作業者にとっては大きな労働負担となっている。さらに、施設栽培における防除作業は、散布作業者への農薬被曝の危険性が高く^{10), 11), 12)}、作物が成長して草丈が 1 m 以上になると農薬散布作業時に薬剤が飛散する高さが鼻孔程度になることから作業者の吸入量も多くなる¹³⁾。これを避けるために、真夏の暑熱環境下でレインコート、ゴーグル、マスク等を装着して散布作業を行わなければならないため、過酷な作業となっている¹⁴⁾。

このような背景の下、施設内における防除作業の負担軽減、安全性等の面から現在、施設園芸では無人防除技術が開発され、実用化されている。これらの無人防除技術は一般的な散布法である動力噴霧機による液剤散布法と施設園芸にのみ適応した拡散散布法に分けられる¹⁵⁾。拡散散布法はくん煙法、常温煙霧法などで微細な少量の薬剤粒子を拡散散布する方法である。

1) 液剤散布法

現在一般的に施設内防除は、手散布による液剤散布によるものであるがこれを無人で行えるようにした散布機である。主に防除ロボットと細霧散布装置が挙げられる。

(1) 防除ロボット

防除ロボットは畝間を自動的に往復走行する機械で、自動走行には畝法面の傾斜を利用した畝追従タイプ、ベッド間に敷設された温湯管などを利用して往復走行するタイプ、進行方向を光センサ等で検知し操舵するタイプ、誘導ケーブルを地面に埋設しケーブルに生じる磁界を検知しトレースしていくタイプ等がある。防除ロボットは噴管を垂直に立て、左右に複数個のノズルを装備し、バッテリーとホースリールを搭載したモータ駆動の走行台車で構成されており、既存の外部動力噴霧機とホースをつなぐことで、無人散布を行う事が可能であり、従来の薬剤のほとんどを利用することができる。防除ロボットは基本的に手散布と同様に畝間を走行するため、手散布に近い防除効果を期待できるが、一畝に二条作付けされた作物等では、畝間からの散布だけでは十分な付着が得られない場合もある。また、栽植密度の高いキクやバラなどの花き、Uターン仕立てされたトマト等栽植密度が高く、葉の繁茂度が高い作物でも付着が不

十分な場所が出るとされており，導入に当たっては栽植様式などを考慮する必要がある。

(2) 細霧散布装置

施設の天井などに配管したパイプに一定間隔でノズルを取り付け，外部動力噴霧機と連結し散布を行うもので，固定配管方式と配管移動方式のものがある。移動式のもの多数のノズルを取り付けた幅の広い水平な噴管（ブーム）が作物の頭上を移動していくものである。細霧散布装置は基本的に上部に取り付けたノズルからの落下した液滴による付着となるために作物が繁茂してくると内部への到達性が悪くなる，葉裏への付着が極端に少なくなる等の薬液の付着性能に大きな問題があり，さらに後付けできる施設に限られる等の課題がある。

2) 拡散散布法

拡散散布法はくん煙法，常温煙霧法などで微細な少量の薬剤粒子を拡散散布する方法である。施設内に基剤を設置して散布するので，作業者が危険にさらされることはない。ただし，前述のように植物工場を含む大規模栽培施設においては，周年栽培における作業労働負担の平準化，周年出荷等の点から施設内を小区角に分割し，各区画の生育ステージをずらして通年作付けしている場合がある。この様な場合，異なる生育ステージの作物が常在しているため拡散散布法が利用できない。また，通常一般の液剤散布に比べ葉裏への付着が少なく，登録農薬が液剤散布に比べ少ない等の課題がある。

(1) くん煙

くん煙剤を用い熱によって有効成分を空中に浮遊・拡散させ作物に付着させる方法である。くん煙法は水を利用しないことから液剤散布と異なり施設内の湿度が上昇することはない。また、薬剤の設置、機械の作動以外は施設内に入る必要も無い省力的で安全な防除方法である。

(2) 煙霧

常温煙霧法は、薬液をコンプレッサ等で作られる圧縮空気を利用して 0.1～5.0 μm 程度の粒子径に煙霧化し、送風拡散させ施設内に充満させて防除する散布法である。施設内では栽培作物の繁茂によって散布むらが起こる可能性がある。常温煙霧機は 2 流体ノズル、薬液タンク、攪拌機、送風機、エアコンプレッサ、エンジンまたはモータから構成されている。

以上のように、施設内に立ち入らずに作業を行う無人防除が普及しているが、繁茂した作物に対しては、手散布に比べ、群落内部への到達性が悪く、葉裏への農薬付着量が低下、散布ムラ等の問題が指摘されている¹⁵⁾。

4. エアアシスト静電散布の既往の研究

従来の散布方法では付着困難な葉裏への付着性能を向上させたのが静電散布である。静電散布は、噴霧液滴を帯電させることにより、クーロンの法則にしたがう電気的な力で散布対象物に液滴を付着させる技術であり、薬液の葉裏面などの液滴が付着しにくい場所にも電気力線に沿って、回り込むために、付着性能の向上が見込まれる散布技術である^{16), 17)}。その歴史は古く、1750 年ごろフランスの Abbe Nollet によって静

電反発力によって塗装を霧化し、静電吸引力を持って塗装する方法が発明されている¹⁸⁾。その後、1930年ごろアメリカの Harold P. Ransburg が電気集塵現象のスプレー塗装へ応用研究を開始した¹⁹⁾。日本で初めて静電塗装方式が考えられたのは1935年であったが本格的な静電塗装機が開発されたのは1950年ごろであったとされる²⁰⁾。農業分野における静電散布の研究は1944年に Wilson らが粉剤の静電散布から始まっている²¹⁾。Hampe, et al.は The Ionized Electric Field Method of Charging と呼ばれる方法で帯電用ノズルを通過する空気と粉剤粒子の混合物に直角に負電荷の空気イオンを駆動させて、空気イオンを粉剤粒子に突き当てると粉剤粒子に空気イオンが付着し粒子を負に帯電させることを報告している²²⁾。津賀らは、薬剤の帯電方式とその特性や外部電界方式の検討を行っている^{23), 24)}。その後、1966年には Law, et al.が液剤の静電散布において噴霧液滴径と帯電量の関係を調査し、面の葉裏への付着が慣行より優れたという報告を行っている²⁵⁾。

一方、静電散布はノズル近くの植物や先鋭部に良く付着する利点があるが、凹部には付着しにくい、作物群落内への貫通性や到達性に乏しい、電極が濡れると漏電を起こし、噴霧液滴への帯電ができなくなるといった問題が報告されている^{26), 27)}。

これらの問題を解決する手段の一つとしてノズル噴霧液滴に風の力を付与するエアアシスト技術（以下、エアアシスト）が開発されている。エアアシスト静電散布による作物への薬液付着性能に関して、McCool, W. C., et al.²⁸⁾は実験室内で、Almekinders, H. et al.²⁹⁾ や khdair, A. I. et al.³⁰⁾ は風洞内で、Western, N. M., et al.³¹⁾ は模擬作物を用いた研究報告がされている。作物を対象としたものとしては、Gupta, C.P. et al.³²⁾ は大豆

を対象に、Carlton, J.B. et al.³³⁾ や Sumner, H. R. et al.³⁴⁾ は綿を対象に、Derksen, R. C. et al.³⁵⁾ はポインセチアを対象にした研究が挙げられる。また、Abdelbagi, H. A. et al.³⁶⁾ はトマトを対象に微量散布における噴霧液滴の粒子径、エアアシストおよび静電散布の関係を調査している。しかし、これらはいずれも欧米で一般的に行われている農薬の希釈倍率が100倍以下で、散布量50 L/10 a以下の濃厚少量散布の事例であり、国内の慣行液剤散布である希釈倍率500～5000倍、散布量50 L/10 a以上の低濃度多量散布におけるエアアシスト静電散布と付着効果に関する報告例は少ない。また、高濃度少量散布については、薬剤認可の問題等から急速な普及は困難と考えられる³⁷⁾。低濃度多量散布による静電散布の関連研究として、山根ら^{38), 39), 40)}の帯電性能に関する研究や松尾ら³⁵⁾の静電式スピードスプレーヤにおける付着性能に関する研究等が報告されている。また、これらの報告においては、垂直下向き噴霧の場合の特性を解明したものが多し。施設内を想定した水平方向への噴霧に関する報告は、山根ら⁴⁰⁾の温室メロン用静電散布ロボット等があるが、エアアシストが噴霧液滴の物理的特性に及ぼす影響について解明した研究は、報告されていない。

一方、Giles, D. k. et al.⁴¹⁾はイチゴを対象とした静電散布によって散布量を慣行散布量187 L/10 aから8 L/10 aに削減しても同等の付着性能が得られることを示している。また、Kabashima, J. et al.⁴²⁾は、メロンのアブラムシを対象とした静電散布の防除効果において、慣行散布の1/40の散布量で同等以上の効果が得られ、3.7倍もの付着が得られることを報告しているように静電散布を行うことで、農薬付着や防除効果を維持したまま、散布量削減の可能性が示唆されている。

静電散布技術の実用性に関する研究として、津賀ら⁴³⁾は、キュウリ、温室メロン、ナスを栽培した温室において微粉剤、くん煙剤および水和剤を用いて定置型の静電散布機により、キュウリやナスの農薬付着および防除効果について検討している。山根ら³⁸⁾は、低濃度多量散布の静電散布ロボットを開発し、温室メロンの作物群落内における農薬付着が群落手前に比べて劣ることを確認している。

5. 研究の目的

国内の施設内の慣行散布である低濃度多量散布において、無人の静電散布装置では作物群落の内外で農薬付着に差が生じるという問題点がある。これに対して、静電散布にエアアシストを付加することにより、帯電した噴霧液滴を風によって対象物まで運び、作物群落内への到達性を向上させ、群落手前と群落内の付着ムラを軽減することにより解決できると考える。さらに、この技術を用いることで、散布量自体の削減も期待できる。

そこで、散布回数の多い施設内における防除作業において、農薬散布作業の軽労化・省力化、農薬被曝を回避しつつ、かつ、慣行手散布並みの良好な付着性能、防除効果を両立するエアアシスト静電散布技術を開発することを本研究の目的とする。さらに、得られた知見から、生産現場での実用化を見据えたエアアシスト静電散布機を開発し、施設内の栽培現場において、実際の散布を行い、散布液滴の付着性能および防除効果、さらに散布量削減の可能性を検討する。具体的な目的を以下に示す。

- 1) 開放型の風洞内において静電散布装置を試作し、作物群落内へ液滴の到達性および

付着性能の向上を目的として、エアアシストが低濃度多量散布の静電散布における噴霧液滴の帯電および到達距離に及ぼす影響について明らかにする。

2) 1) の結果を設計指標とし、実際の栽培現場での実用化を見据えたエアアシスト静電散布機を開発し、その性能を調査する。

3) 開発したエアアシスト静電散布機を供試し、メロン、キュウリ、トマトを対象として試験栽培温室にて散布薬液の付着性能、防除効果をエアアシストの有無、静電の有無、慣行手散布と比較し、その性能を明らかにする。さらに、キュウリおよびトマトを対象とした試験については農薬散布量削減の可能性を評価する。また、開発したエアアシスト静電散布機を供試し、実際の大規模トマト菜園および土耕キュウリ栽培の栽培現場での現地実証試験を行い、付着性能、取り扱い性等、実用化に向けた課題の整理を行う。

第Ⅱ章 エアアシスト静電散布における噴霧液滴の物理的特性

1. 序言

本章では、多量散布ノズルの周囲に環状電極を配置することで、噴霧液滴に誘導帯電させる静電散布ノズルを用い、水平方向への低濃度多量散布に適応可能な静電散布装置を製作し、エアアシストの有無や散布条件が液滴に与える影響を物理的特性の観点から検討した。具体的には、噴霧ノズルの種類、電極印加電圧、噴霧ノズル高さおよびエアアシスト風速等の物理的条件が、噴霧液滴の帯電や到達距離に及ぼす影響について明らかにした。

2. 材料および方法

1) 実験装置の試作

(1) 静電散布装置および供試ノズルの概要

本研究で供試した静電散布装置³⁶⁾(図 2-1)は、高湿度、塵埃環境に対応でき、かつ低電圧で効率よく帯電させることができる環状電極を用い、誘導帯電方式を採用した。静電散布装置は電極支持体 (polyoxymethylene 樹脂, 外径 75.0 mm×全長 78.5 mm, 絶縁破壊の強さ 15 kV/mm), 環状電極 (内径 38 mm×厚さ 4.5 mm, 真鍮製), ノズルおよび同装着部, 動力噴霧機 (MS413, 丸山製作所製) およびタンクで構成され, 環状電極はノズルからの噴霧形状に沿うようにノズルの周辺に配置した。



図 2-1 供試静電散布装置³³⁾

Fig. 2-1 Overview of the electrostatic sprayer

誘導帯電は液滴分裂部位に高い電界を与えて帯電させる原理であるが、中空円錐噴霧ノズルにおける噴霧液滴は、環状電極に対して均一に接近していることから扇型噴霧よりも高い比電荷が得られる³³⁾ため、本実験では、中空円錐噴霧ノズルを採用し、農薬散布等に広く用いられている噴霧液滴粒子径（以下、粒子径）38～205 μm の TXVK1, TXVK4, TXVK12, TXVK18（スプレーイングシステムズ社）の4種類を選定した（表 2-1）。供試ノズルの吐出量は水道水を噴霧圧力 1.5 MPa で1分間メスシリンダ内に噴霧し、その量を測定して算出した。水平方向へ噴霧された粒子径の測定は、レーザ回折粒度分布測定装置（LDSA-1400A、東日コンピュータアプリケーションズ株式会社製）を用いた。焦点距離 600 mm、レーザ発光部と受光部の距離は 2000 mm、

バックグラウンド取り込み時間 2 秒とし，試験区当たり 10 回連続測定を行い，粒子径（VMD : Volume Median Diameter（体積中位径））はその平均値とした。レーザー発光部，受光部および噴霧ノズル高さは 800 mm となるように設置した。

表 2-1 供試ノズルの諸元

Table 2-1 Characteristics of experimented nozzles

供試ノズル型式	TXVK1	TXVK4	TXVK12	TXVK18
噴霧量 (L/min)	0.13	0.55	1.70	2.60
粒子径 (μm , VMD*)	38	60	165	205
噴霧角 ($^{\circ}$)	80			
散布圧力(MPa)	1.5			

*VMD : Volume Median Diameter（体積中位径）

(2) 風洞内における液滴の比電荷測定

供試した静電散布装置における噴霧液滴の帯電量および静電散布に対するエアアシスト効果を評価するために，風洞内における噴霧液滴の比電荷（CMR: Charge to Mass Ratio, 以下，液滴比電荷）測定が可能な実験装置を作成した。風洞の断面は 2000×2000 mm で片方の端面に 1 辺が 15 mm の正六角形の整流格子および異物混入防止の目合 1 mm の金網を（図 2-2），別の端面に軸流ファンを 4 台設けている。軸流ファンの回転数はインバータにより制御することでノズル周辺の風速（以下，エアアシスト風速）を可変できる構造である。施設内における静電散布ロボットを想定し，自律運転可能な送風量をノズル数および風洞面積から推定して，エアアシスト風速は 1~3 m/s とし，その測定にはピラム型微風速計（OZ-29，測定範囲 0.2~15 m/s，起動風速 0.1 m/s，測定精度 ± 0.3 m/s（6 m/s 以下），サンプリング周波数 1 Hz，大田計器製作所製）を用い測

定した。噴霧流体の加圧装置は動力噴霧機用ポンプの調圧弁でノズル直近に設置した圧力トランスデューサ（KH17-323，長野計器製）およびデジタル圧力計（GC70-20A，長野計器製）の値から調節し，散布圧力は 1.5 MPa とした。電極へ印加する電源は，直流高圧安定化電源装置（HAR-50R0.6，最大出力 50 kV，出力電力 30 W，出力電流 600 μ A，電圧変動率 0.005 %，松定プレシジョン社製）を用い，電極印加電圧は直流高電圧安定化電源装置の出力モニタから測定した。

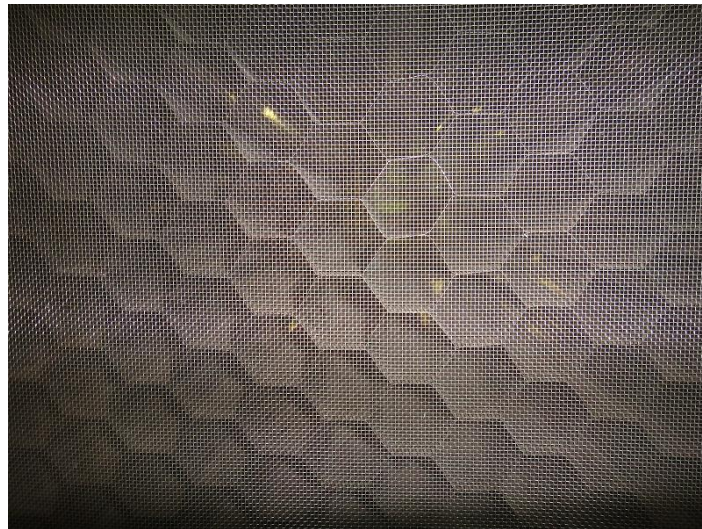


図 2-2 風洞片端面における整流格子

Fig. 2-2 Honeycomb filters at the one side of the wind tunnel

液滴の比電荷は (1) の算出式⁴⁰⁾ から求めた。

$$qs = Is \times \frac{t}{M} \quad (1)$$

qs : 比電荷 (C/g), Is : 噴霧電流 (A), t : 噴霧時間 (s), M : t 時間における捕捉液滴質量 (g)

t/M はノズルの吐出量 (L/min) から算定した。

噴霧電流 Is は、松尾ら⁴⁴⁾ および山根ら³⁸⁾ が用いた方法を参考に、帯電した液滴をアルミニウム製コレクタメッシュ (1800×1800 mm のアルミニウム A1110, エキスパンドメタル 3 層, 下から目合 3×4.6 mm, 4×8 mm, 7×14 mm) で捕集し (図 2-3, 図 2-4, (a)), コレクタからアース間の電流を直流微小電流計 (2010-31, 精度 1.0 級, 横河電機) で計測した。コレクタメッシュは施設内におけるトマトやメロン等のつる性作物の誘引仕立てを想定し, 対象作物に到達したと考えられる到達液滴を捕集することを目的として噴霧方向に対して垂直面に設置した。到達せずに落下してしまったと想定される落下液滴は, 床面に設置したコレクタメッシュにより捕集し, それぞれの液滴を捕集後, 液滴到達電流, 液滴落下電流として計測し, (1) 式より到達比電荷, 落下比電荷を求めた。また, ノズルと垂直面に設置したコレクタメッシュとの距離を散布距離とし, 任意に調節できる構造とした。水平噴霧時のノズル吐出量における落下液滴量の分布 (以下, 落下量分布) は, ノズルから散布方向へ 100 mm の位置から連続して 5 つ設置した噴霧液回収箱 (2000 mm×300 mm) により落下液滴を回収して測定

を行った（図 2-4, (b)）。

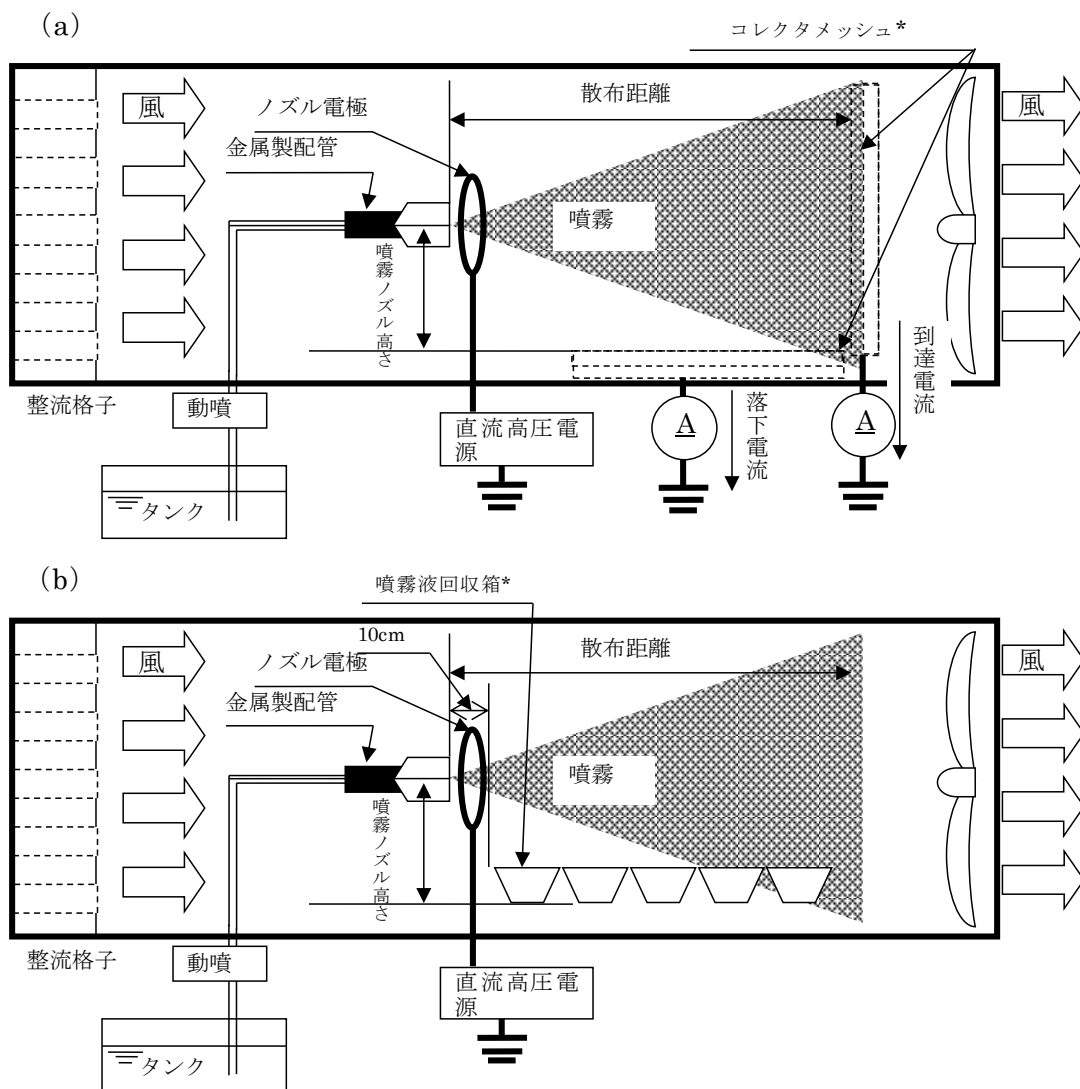
噴霧流体の流路は樹脂ホースで構成し，動力噴霧機，水タンクも電氣的に絶縁した。

散布試験は水道水を用いた。



図 2-3 散布試験の様子

Fig. 2-3 Spray test in the wind tunnel



*帯電量計測の場合はコレクタメッシュ（上図），落下量分布測定の場合は噴霧液回収箱（下図）を設置

図 2-4 風洞を用いた実験装置

Fig. 2-4 Schematic diagram of experimental apparatus using the wind tunnel

2) 測定項目

水平噴霧を行った際のノズルの噴霧方向における風速分布（以下、風速分布）、帯電等の物理的状況を把握するために、噴霧液滴の流速、落下量分布、帯電量についてエアアシスト風速、噴霧ノズル高さ、電極印加電圧、散布距離等を変え測定を行った。

(1) 静電散布装置の帯電特性

供試する静電散布装置の帯電特性を明らかにするために、各ノズルの散布距離 30 cm における液滴比電荷を調査し、その特性を明らかにした。エアアシスト風速 0 m/s とし、供試ノズルは表 2-1 に示す 4 種類を用いた。

(2) エアアシストが風速分布に及ぼす影響

エアアシストによる噴霧液滴の挙動を明らかにするため、風速分布および散布距離、電極印可電圧、エアアシスト風速 0 および 3 m/s ごとの粒子径を調査した。供試ノズルには TXVK4 を用い、散布距離を施設栽培におけるノズルと作物間距離と想定し、10～100 cm（10 cm 毎）の範囲とし、電極印加電圧を 0（無電荷）または+4 kV とし、水平噴霧を行った。

(3) エアアシストが落下量分布に及ぼす影響

エアアシストによる噴霧液滴の到達性を把握するために、電極印加電圧、散布距離およびエアアシスト風速と噴霧液滴の落下量分布との関係を調査した。供試ノズルには TXVK4 を用い、電極印加電圧を 0（無電荷）および+4 kV とした。また、本研究は、施設内における誘引仕立ての作物を想定しており、散布機は水平噴霧を行うことから、噴霧された液滴はいずれ落下する。噴霧ノズル高さによって散布液滴の到達距離が変

化すると推察されることから、噴霧ノズル高さを地上面から 30 cm, 50 cm および 100 cm の 3 水準設け試験を行った。

(4) エアアシストが噴霧液滴の比電荷に及ぼす影響

供試ノズルの種類や電極印可電圧によって、エアアシストを行うことによる噴霧液滴の散布距離や液滴比電荷についても大きく変化することが予想される。そこで、静電散布装置の噴霧ノズル高さ、ノズルの種類（粒子径）、電極印加電圧、散布距離およびエアアシスト風速（0, 1, 3 m/s）が噴霧液滴の到達および落下比電荷に与える影響について調査した。供試ノズルは表 1 に示す 4 種類を用いた。電極印加電圧については、+4~+7 kV 程度で液滴の帯電が頭打ちになるという報告³³⁾から 0~+10 kV(0.5 kV 毎)とし、散布距離は 10~100 cm（10 cm 毎）の範囲とした。

(5) 風洞を利用したエアアシスト静電散布の付着性能試験

エアアシスト風速が作物の付着性能に及ぼす影響について評価することを目的として、風洞内に、施設内の無人防除ロボットを想定した付着性能試験用散布装置を製作した（図 2-5）。付着性能試験用散布装置は静電散布ノズル、ベルトコンベアから構成される。静電ノズルには TXVK4 を採用し印加電圧は+4 kV とし散布した。ベルトコンベア（NKE（株）、CSK50）は、施設内においての走行散布を再現するため、供試ノズルが作物列に沿って作動するように設置し、風洞内において走行散布を実現した。一般的な施設メロン栽培で散布されている 300 L/10 a となるようにベルトコンベアの移動速度は、0.12 m/s とし、ノズル高さは地上高 1130 mm で噴霧した。なお、エアアシスト風速 3 m/s を超えるとメロンの葉柄が折れる等損傷が散見されたため、本試験

においては、風速は 0, 1, 2 m/s とした。供試材料は、深さ 20 cm の 8 号鉢にて栽培されたメロン（アールスフェボリット夏系、播種後 50 日目、平均草丈 130 cm、平均葉数 27 枚、平均葉面積 226 cm²、株間 30 cm）とし、図 2-5, 2-6 のように 5 株を風洞内に設置した。

付着性能の評価は、液滴の付着によって黄色から青色に変色する感水紙（syngenta, water sensitive paper, 52×76 mm）を用い、噴霧後の液滴により変色した青色面積の割合を求め、被覆面積率（以下、被覆面積率）として評価した（図 2-7）。付着性能試験は図 2-6 の位置に示すように噴霧時に散布機側に伸びている葉を手前、散布機の反対方向に伸びている葉を奥として、噴霧方向に対して葉の裏面に感水紙を設置し、噴霧後に液滴の被覆面積率（(2) 式）を用いて評価した。

$$Af = \frac{Nm}{Nt} \times 100 \quad (2)$$

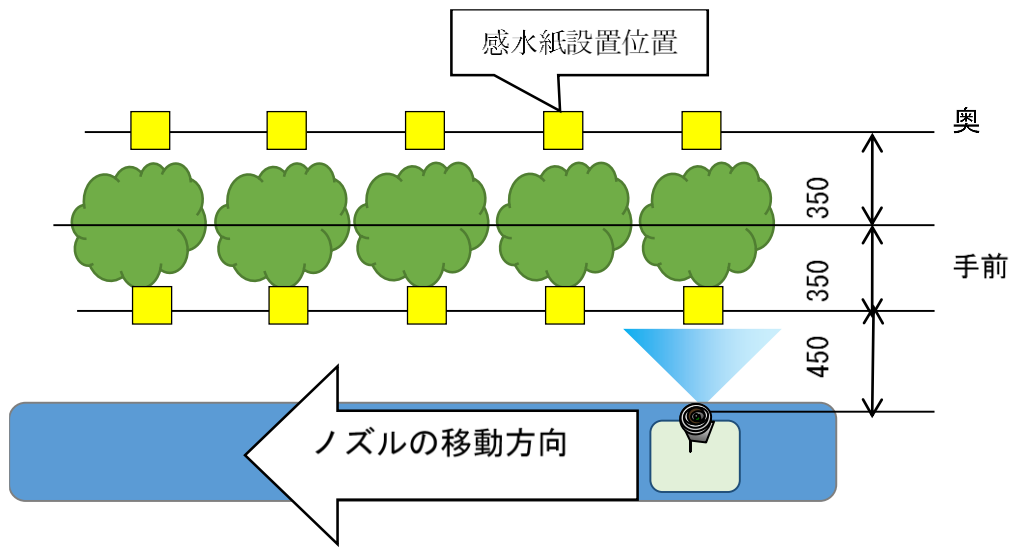
Af : 被覆面積率 (%), Nm : 葉液付着斑の画素数, Nt : 測定対象領域の画素数

感水紙に付着した液滴の被覆面積率の計測にはイメージスキャナ（富士ゼロックス（株）、DocuCentre-3 C4400）と画像処理ソフトウェア⁴⁵⁾を用いた。

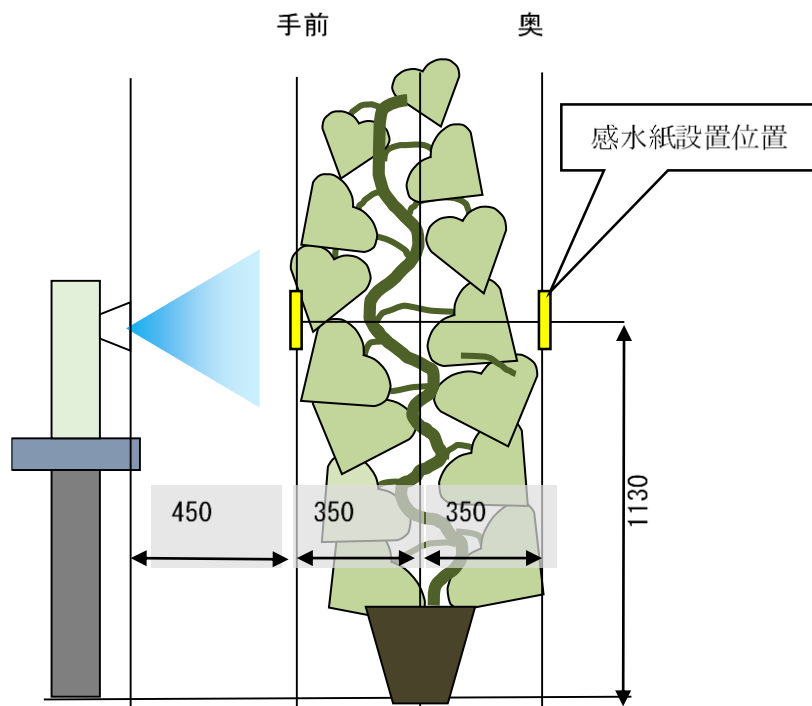


図 2-5 風洞内における付着性能試験用散布装置

Fig. 2-5 Deposition performance test system in the wind tunnel



(a) 平面図



(b) 側面図

図 2-6 散布方法と感水紙設置位置

Fig. 2-6 Spraying method and attachment positions of water sensitive paper

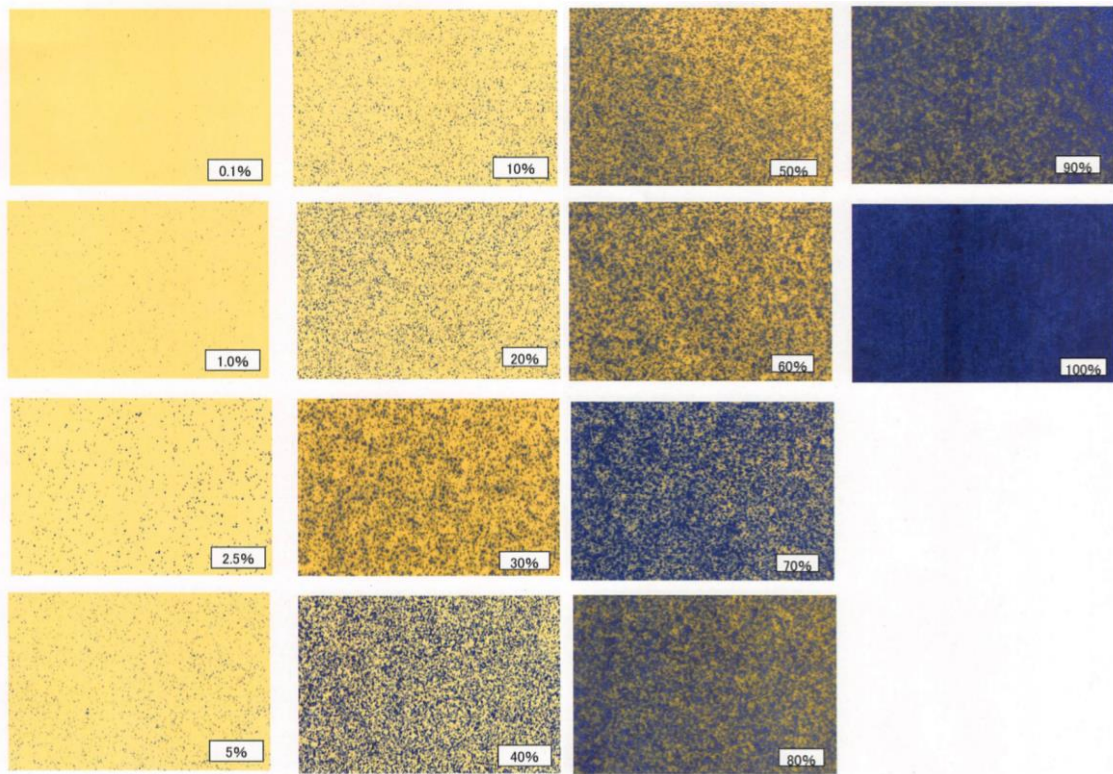


図 2-7 感水紙の被覆面積率

Fig. 2-7 Coverage rate of the water sensitive paper

3. 結果および考察

1) 静電散布装置の帯電特性

帯電液滴が蒸発すると液滴表面の電荷はある限界に達するまで液滴表面にとどまり、その結果液滴の表面電荷密度が高まり、ついには電気的な反発力が表面張力による凝集力を超え液滴が分裂する^{46), 47)}。その液滴の帯電量の限界 q_{max} は、Rayleigh 限界と呼ばれ、(3) 式が示すように粒子径によって決定される。

$$q_{max} = 8\pi (\epsilon_0 \gamma)^{1/2} r^{3/2} \quad (3)$$

ϵ_0 : 空気の誘電率 (F/m), γ : 噴霧液の表面張力 (N/m), r : 粒子径 (m)

噴霧量 M における単位時間あたりの限界帯電量 Q_{max} は (4) 式によって表される。

$$Q_{max} = A q_{max} \quad (4)$$

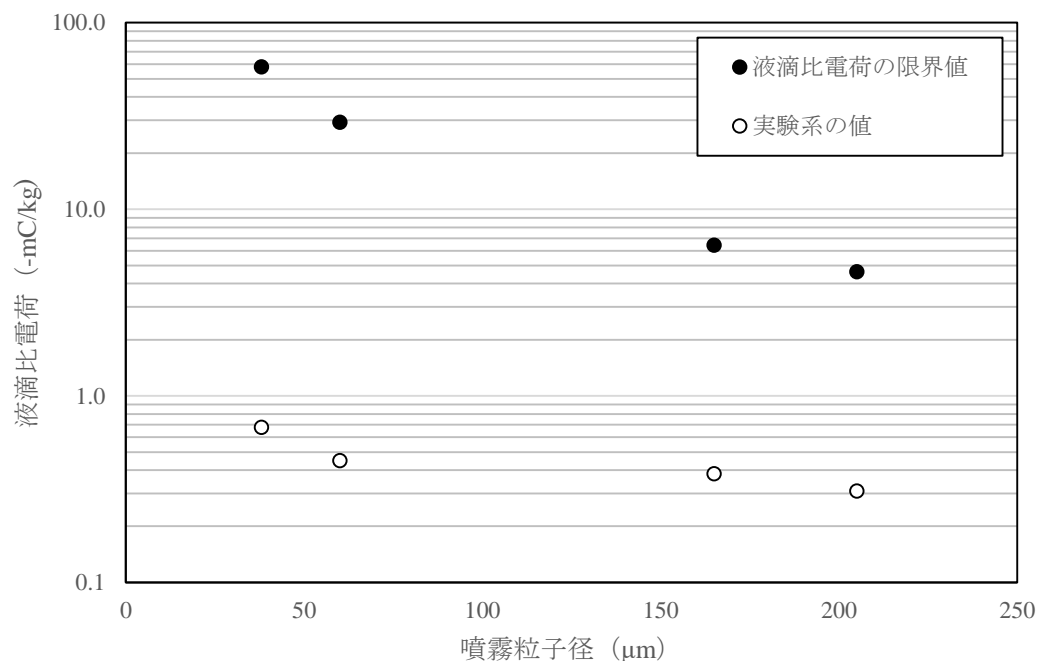
A : 単位時間当たり噴霧された液滴の粒子数, q_{max} : 液滴の帯電量の限界

ある単位時間における噴霧量 M の粒子径 r の液滴の粒数数 A は、

$$A = M / \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) q_{max} \quad (5)$$

M : 単位時間あたりに噴霧された液滴の体積 (m^3)

と近似できる。ここで、20℃の空気の誘電率を 8.854×10^{-12} F/m、水の表面張力である 72.75 mN/m を噴霧液の表面張力として (3) 式に当てはめると図 2-8 のようになり、同じ噴霧量であるならば、粒子径の小さい方が液滴比電荷は大きくなる。



*実験系の値は散布距離 20 cm，電極印可電圧+4 kV における表 4 に示す 4 ノズルを供試した

図 2-8 粒子径と理論最大液滴比電荷の計算結果

Fig. 2-8 Calculated results of relationships between droplet diameter and theoretical maximum charge to mass ratio

散布距離 20 cm，電極印可電圧+4 kV，噴霧圧力 1.5 MPa における粒子径 38 μm の TXVK1，粒子径 60 μm のノズル TXVK4，粒子径 165 μm の TXVK12，粒子径 205 μm の TXVK18 の比電荷はそれぞれ -0.68，-0.45，-0.38，-0.31 mC/kg となった。Rayleigh 限界の式から算定した理論最大液滴比電荷と比べて 1.2～6.7% となり LAW¹⁷⁾，松尾ら⁴⁸⁾

の数値と比べても妥当なものであった。しかしながら、粒子径の小さなノズルほど理論最大液滴比電荷との差が大きなものとなった。その理由の一つとして、粒子径の小さな液滴は電極に付着しやすく、漏電や付着した液滴からのコロナ放電が発生したためと推察される。本試験で供試した静電散布装置は電気絶縁性に優れた樹脂を用いているが、撥水性の高い素材や、電極に風をあてる、加熱することなどを組み合わせること、電極の乾燥状態を維持することで液滴の付着抑制と漏電抑制が期待できる。これら静電噴口の効率よく帯電させる機構や漏電対策については、残された研究課題の一つである。

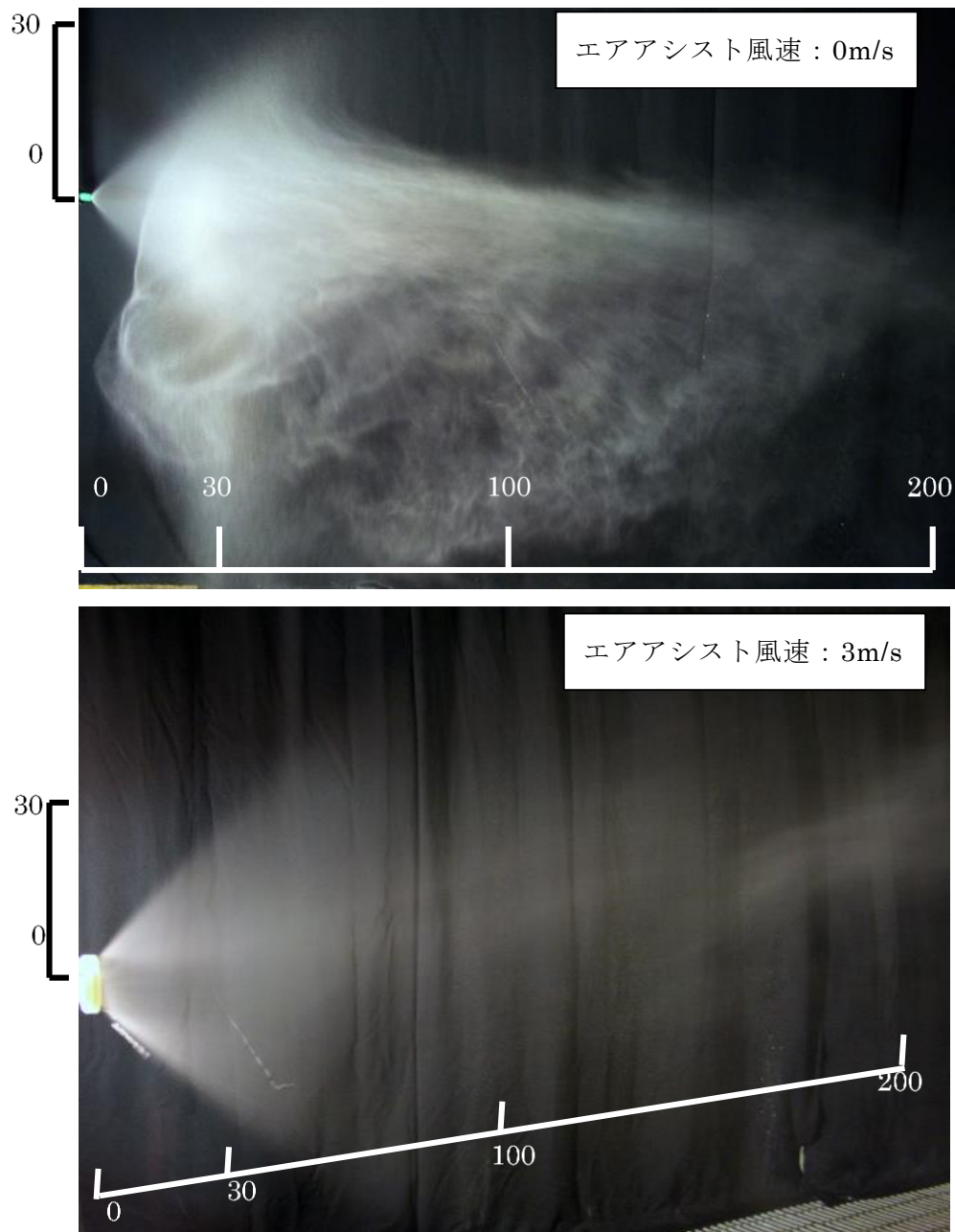
2) エアアシストが風速分布に及ぼす影響

電極印加電圧 0 kV におけるエアアシスト風速 0 および 3 m/s 時の供試ノズルの水平噴霧のスプレーパターンおよびノズル噴霧方向における風速分布を図 2-9 および表 2-2 に示す。エアアシスト風速 0 m/s の条件下では、中空円錐の形状を維持できる散布距離は約 30 cm 程度であった。ノズル付近の測定位置①における風速は 3.5 m/s 程度であるのに対し、円錐の上部端点である測定位置⑦における風速は 0.1 m/s となった。安井ら⁵⁰⁾の噴霧液滴の挙動解析においても、粒子の水平速度は噴霧後すぐに低下し、その後の運動は自由落下になったことから、本試験条件においても、散布距離 30 cm 以上では噴霧液滴が同様の挙動を示したものと考えられる。ただし、中空円錐噴霧ノズルの水平噴霧では、中空円錐の中心部分に大きな流速を持った渦流の形成が確認され、散布距離 100 cm の測定位置⑨においても 2 m/s 以上の風速が維持された。この渦流に

巻き込まれた噴霧液滴は、500 cm 程度まで運ばれることが確認された。

一方、エアアシスト風速 3 m/s の場合、エアアシスト風速 0 m/s に比べて、風速は一樣となった。これは、噴霧液滴が空気抵抗により受ける物理エネルギーに比べて、エアアシストによって得られるエネルギーが大きかったことに起因すると考える。

なお、電極印加電圧+4 kV としても、風速分布に影響しなかった。本試験で供試したノズルの場合、エアアシストによって得られるエネルギーは、帯電することによって得られるエネルギーに比べて十分に大きいことから、電極に電圧を印加しても風速分布には影響しなかったものと考えられた。



*1 供試ノズル：TXVK4，噴霧圧力：1.5MPa，電極印加電圧：0kV

*2 図中のスケールの単位は cm

*3 上図は噴霧方向に対して真横から，下図は噴霧ノズル後方から撮影

図 2-9 水平噴霧時のスプレーパターン

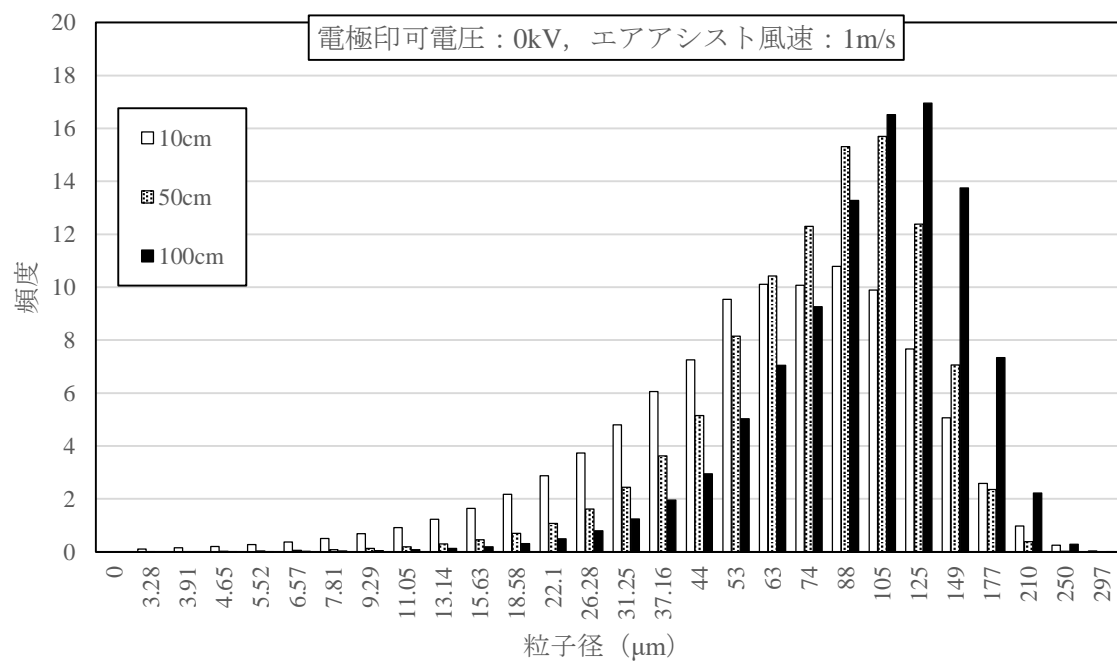
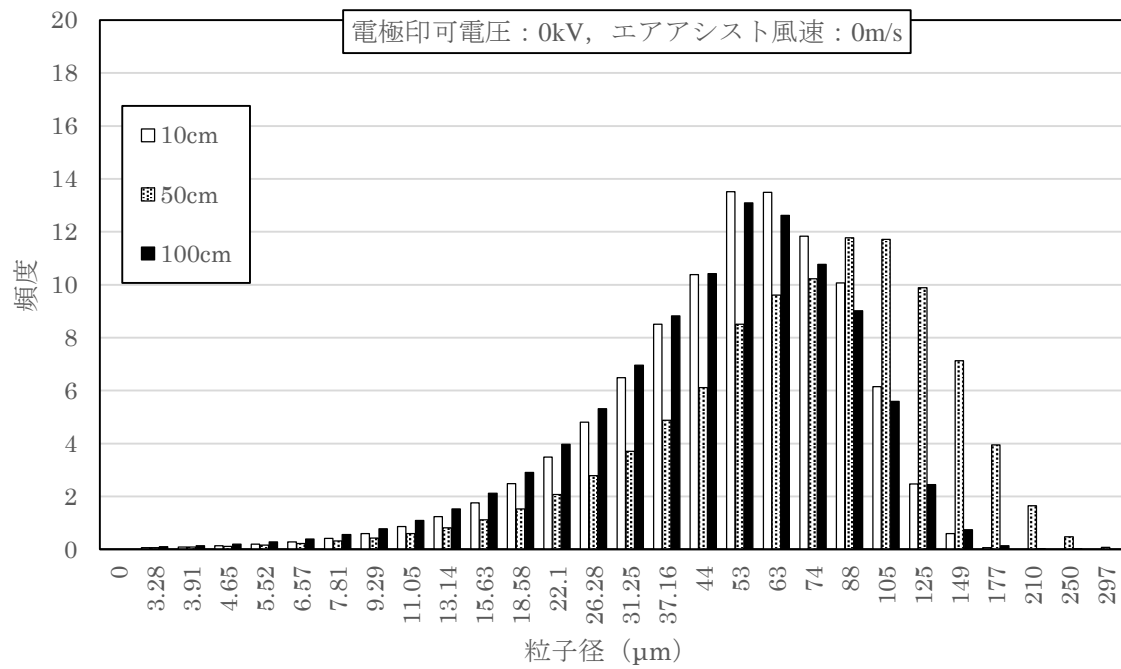
Fig. 2-9 The spray pattern under level spraying condition

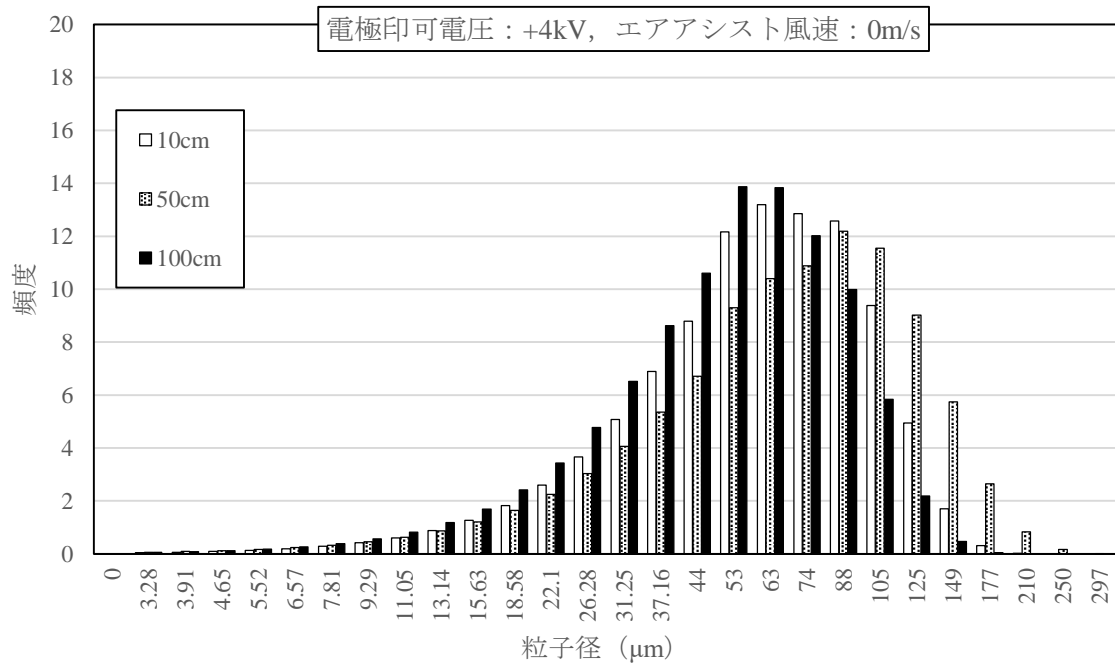
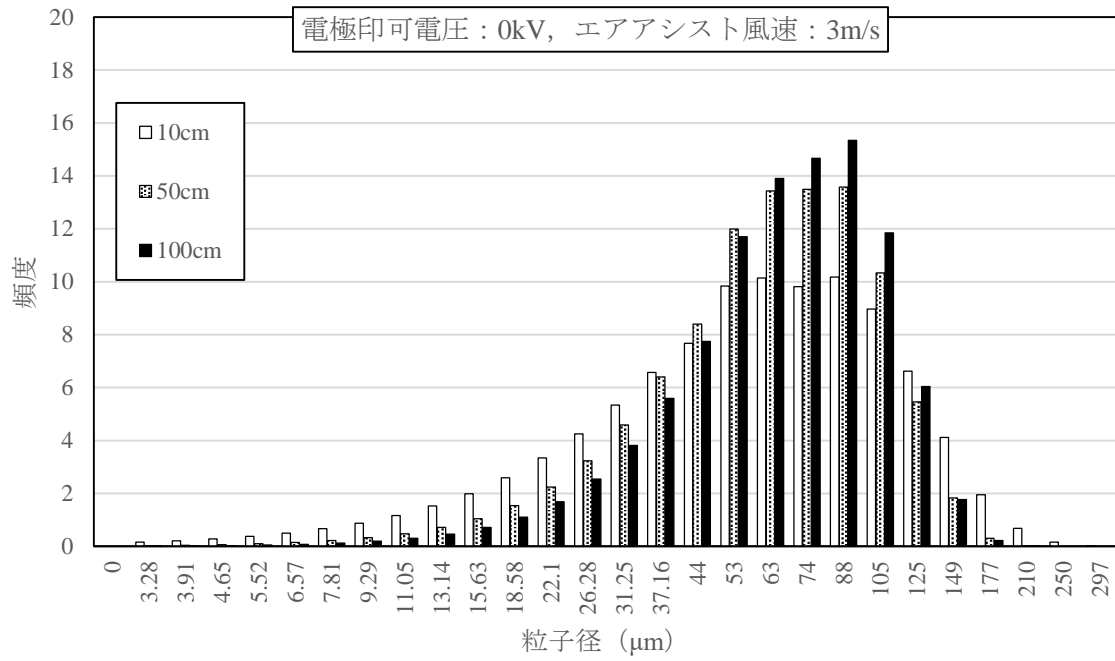
表 2-2 水平噴霧時の風速分布

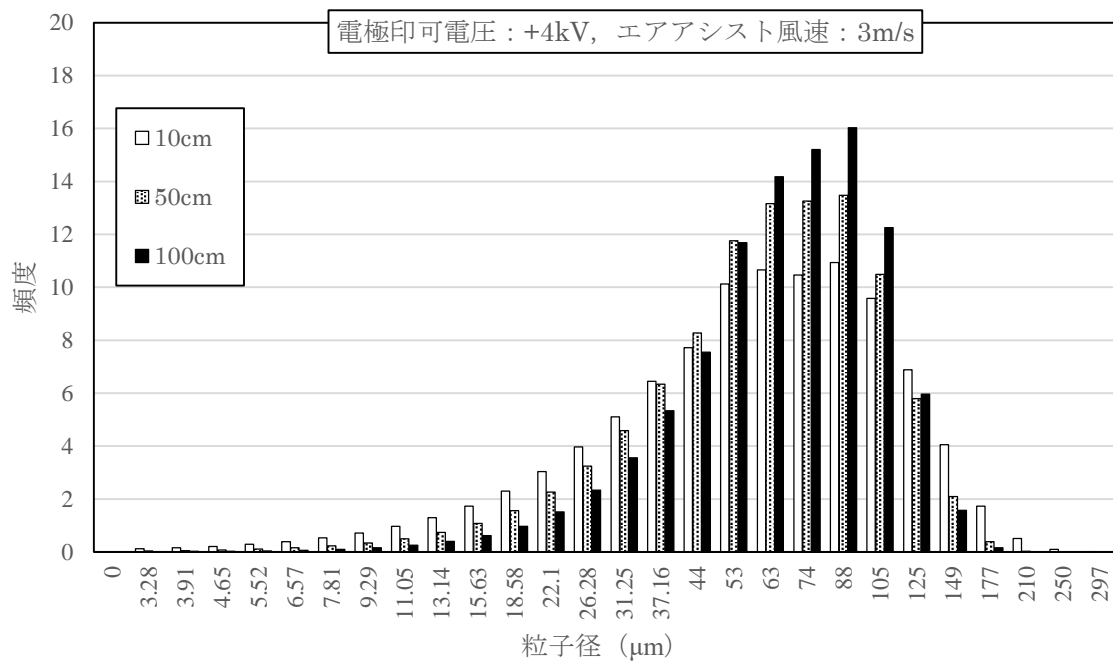
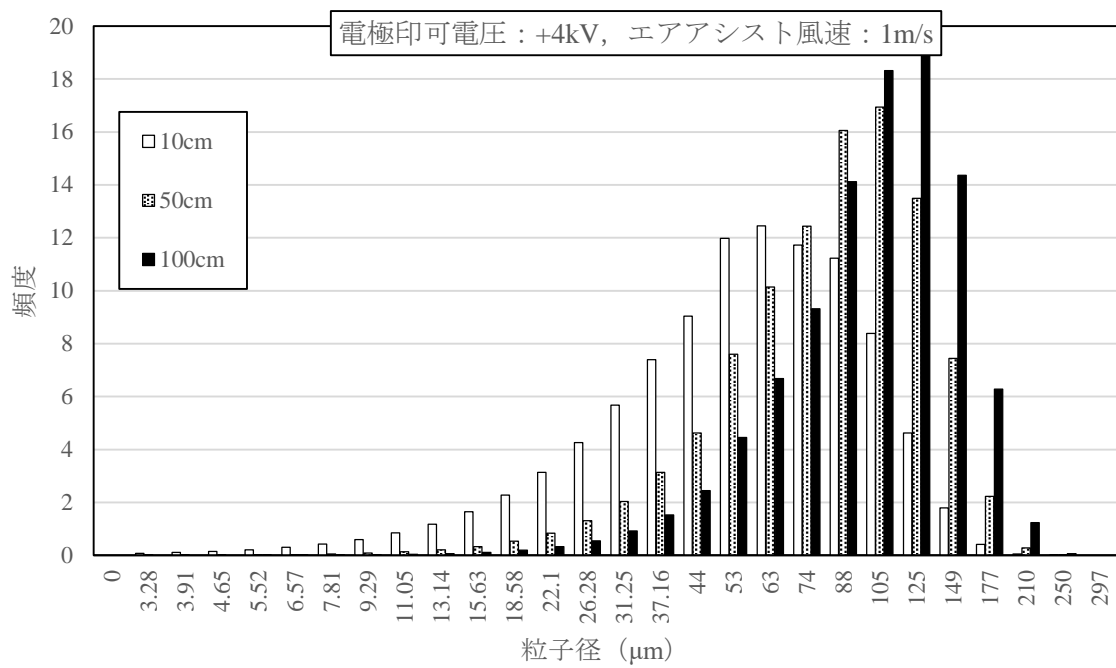
Table 2-2 Wind speed distribution under level spraying condition

測定位置	ノズルから相対位置 (cm)		ノズル噴霧方向における風速	
	水平方向	垂直方向	エアアシスト風速	
			0m/s	3m/s
①	0	0	3.5	5.2
②	10	0	3.6	5.1
③	20	0	3.6	5.1
④	30	0	3.7	5.1
⑤	10	8	2.5	2.8
⑥	20	16	0.3	2.7
⑦	30	24	0.1	2.9
⑧	50	0	3.6	4.3
⑨	100	0	2.1	4.1
⑩	150	0	1.3	4.0
⑪	200	0	1.1	4.0

水平噴霧時における電極印可電圧，エアアシスト風速および散布距離が粒子径に及ぼす影響を図 2-10 に示す。供試した TXVK4 の体積中位径は $60\ \mu\text{m}$ であるが，電極印可電圧 $0\ \text{kV}$ ，エアアシストが $0\ \text{m/s}$ の場合，散布距離 $10\ \text{cm}$ および $100\ \text{cm}$ においては $53\sim 63\ \mu\text{m}$ の粒子径が最も出現が多かったものの，散布距離 $50\ \text{cm}$ においては $88\sim 105\ \mu\text{m}$ が最も出現した。電極印可電圧 $0\ \text{kV}$ ，エアアシストが $1\ \text{m/s}$ の場合，散布距離 $10\ \text{cm}$ においては $63\ \mu\text{m}$ において最も出現し，散布距離 50 および $100\ \text{cm}$ においては $105\sim 125\ \mu\text{m}$ が最も出現した。エアアシスト風速 $3\ \text{m}$ の場合，散布距離 $10\ \text{cm}$ においては $63\ \mu\text{m}$ において最も出現し，散布距離 50 および $100\ \text{cm}$ においては $88\ \mu\text{m}$ が最も出現した。この傾向は電極印可電圧を $+4\ \text{kV}$ とした際も同様であった。エアアシストがある場合，散布距離 $10\ \text{cm}$ においては，ほぼカタログスペック値となったものの，散布距離の増加によって粒子径は大きくなる傾向がみられた。これは，エアアシスト風速 $0\ \text{m/s}$ 時において落下していた比較的大きな液滴が，エアアシストを行うことで到達距離を伸ばしたことに起因すると推察する。エアアシスト風速が $0\ \text{m/s}$ の場合，散布距離 $100\ \text{cm}$ において最も出現した粒子径がほぼカタログスペックとなり，散布距離 $50\ \text{cm}$ おいて粒子径が大きくなる傾向を見せた。その原因として，散布距離 $50\ \text{cm}$ までに $63\ \mu\text{m}$ 以下の液滴は，落下，蒸発および実験系外へドリフトしてしまうことでヒストグラムは右寄りとなったが，散布距離 $10\ \text{cm}$ までに $105\ \mu\text{m}$ 以上の液滴についても重力による落下してしまったため，結果としてカタログスペックである粒子径 $60\ \mu\text{m}$ 程度に戻ったと推察されるが，詳細な検討は今後の課題である。







*凡例は距離を表す

図 2-10 水平噴霧時における電極印可電圧，エアアシスト風速および散布距離が粒子径に及ぼす影響

Fig. 2-10 Effect of air-assisted wind velocity, operating voltage, spray distance on droplet size distribution

3) エアアシストが落下量分布に及ぼす影響

エアアシスト風速，印加電圧，噴霧ノズル高さが落下量分布に及ぼす影響を図 2-11 に示す。エアアシスト風速 0 m/s，電極印加電圧+4 kV の条件下では，ノズルからの距離が短いサンプリング位置側に多く噴霧液滴が落下する傾向が見られた。これは，電界の強さは環状電極との距離によって決まること ((6) 式)，また，磁界の影響が無視できる状況下においては Lorentz の式 ((7) 式) により液滴に働く静電気の力は液滴の帯電量と電界によって支配されることから，帯電した噴霧液滴は，静電気の力によってノズルに近い地面に多く落下する傾向となったと考える。

$$E = \frac{V}{d} \quad (6)$$

$$F = qE \quad (7)$$

E : 電界の強さ (V/m)， V : 電位差 (V)， d : 距離 (m)， F : 帯電した液滴に働く静電気の力 (N)， q : 液滴の帯電量 (C)

ノズル噴霧ノズル高さが高い試験区については，上記の理由に加え，落下距離が伸びたことによる蒸発量の増大等の理由から落下量が少なくなる傾向が見られた。

これに対し，エアアシスト風速 3 m/s における落下量割合は，無電荷，噴霧ノズル高さ 30 cm においても 10 %程度，100 cm においてはほぼ 0 %であった。また，同条件で電極印加電圧を+4 kV とした場合は，噴霧ノズル高さ 30 cm において 20 %程度，100 cm において 0 %となった。本試験条件においては，特に噴霧ノズル高さ 30

cm の区において電極と距離が短かった地面との間に形成された電界が最も強いものであったために、静電気の力によって落下量が多くなった。しかし施設内における防除では、電極との距離が短いのは対象作物であるために、帯電した液滴は落下せずに対象作物に付着するものと考えられる。

以上のことから、エアアシストを用いることにより落下量割合は大幅に削減され、到達距離が増大していると考えられた。

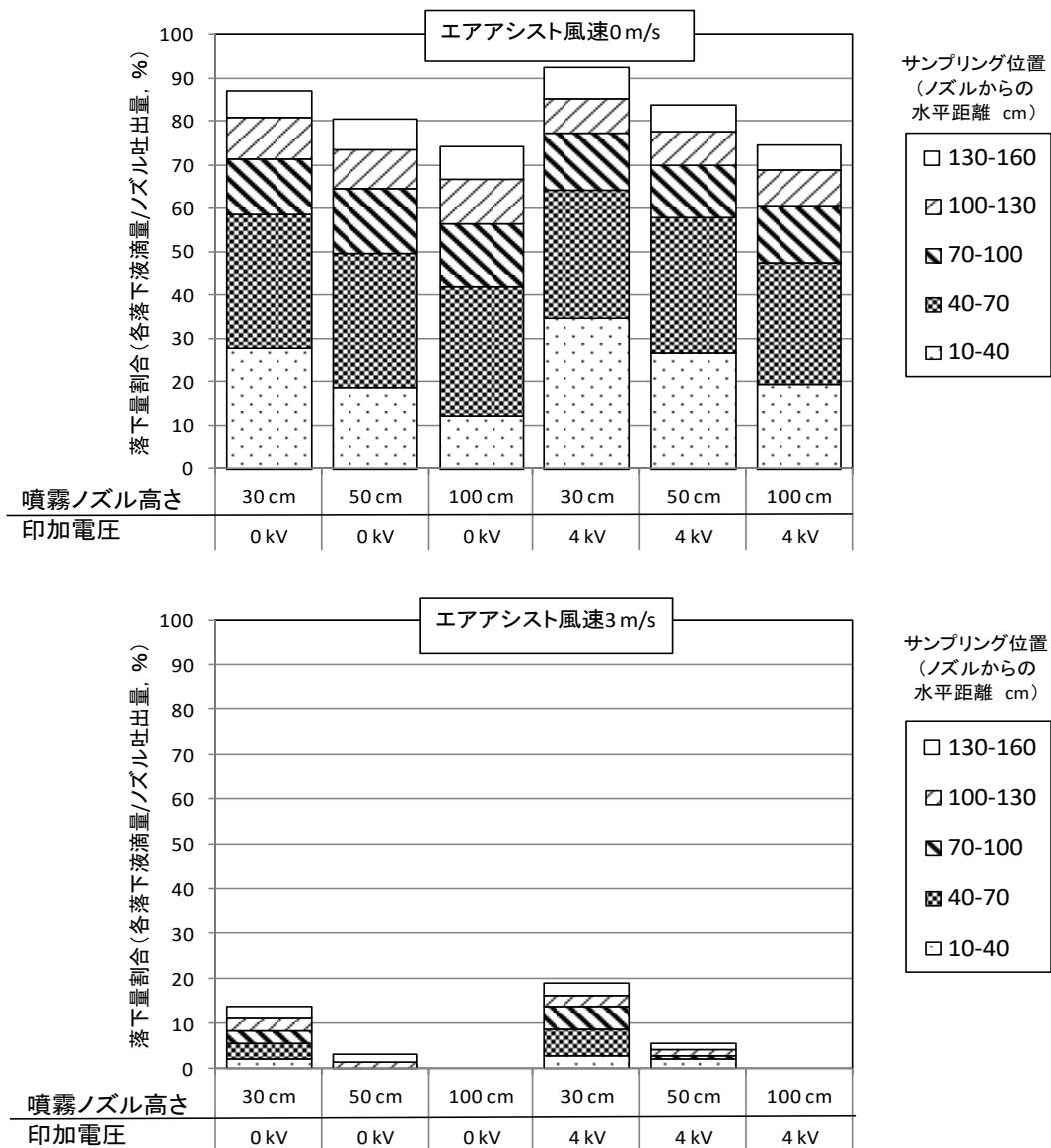


図 2-11 エアアシスト風速，印加電圧，噴霧ノズル高さが落下量分布に及ぼす影響
 Fig. 2-11 Effect of air-assisted wind velocity, operating voltage, nozzle height on distribution of falling droplet

4) エアアシストが噴霧液滴の比電荷に及ぼす影響

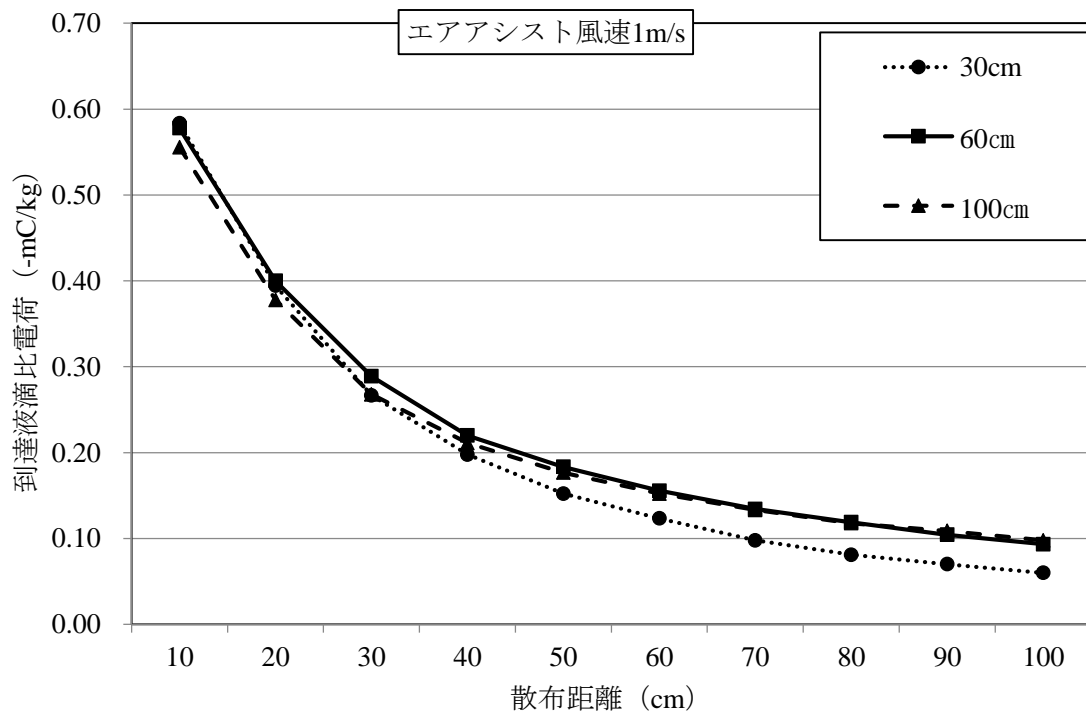
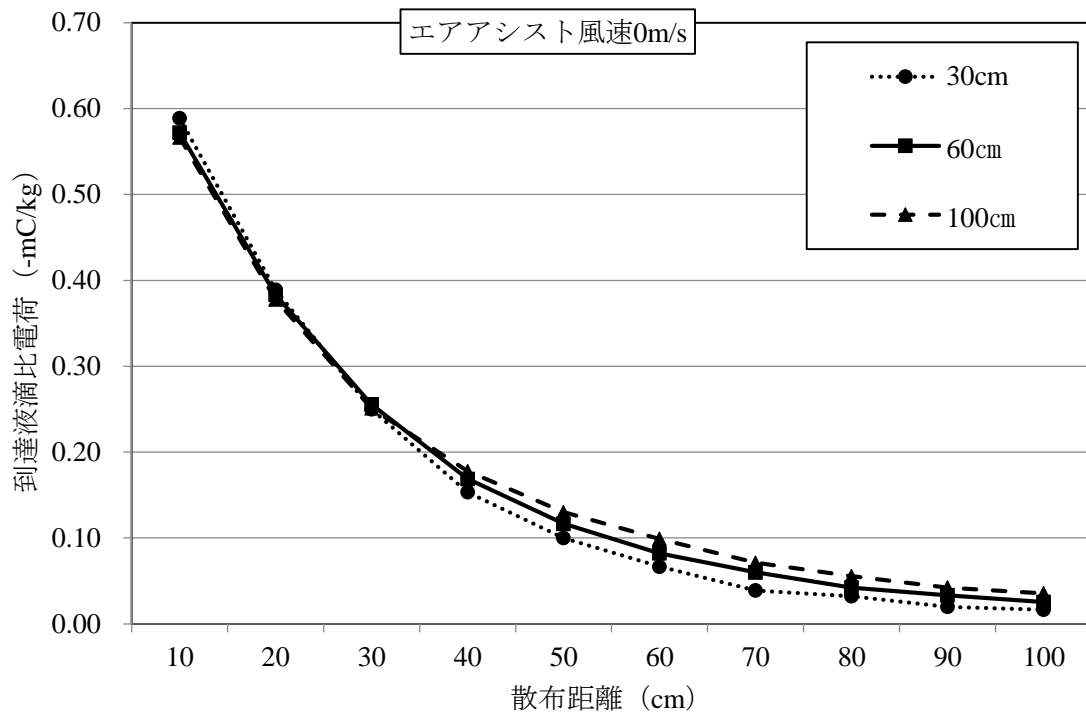
(1) エアアシストおよび噴霧ノズル高さが噴霧液滴の比電荷に及ぼす影響

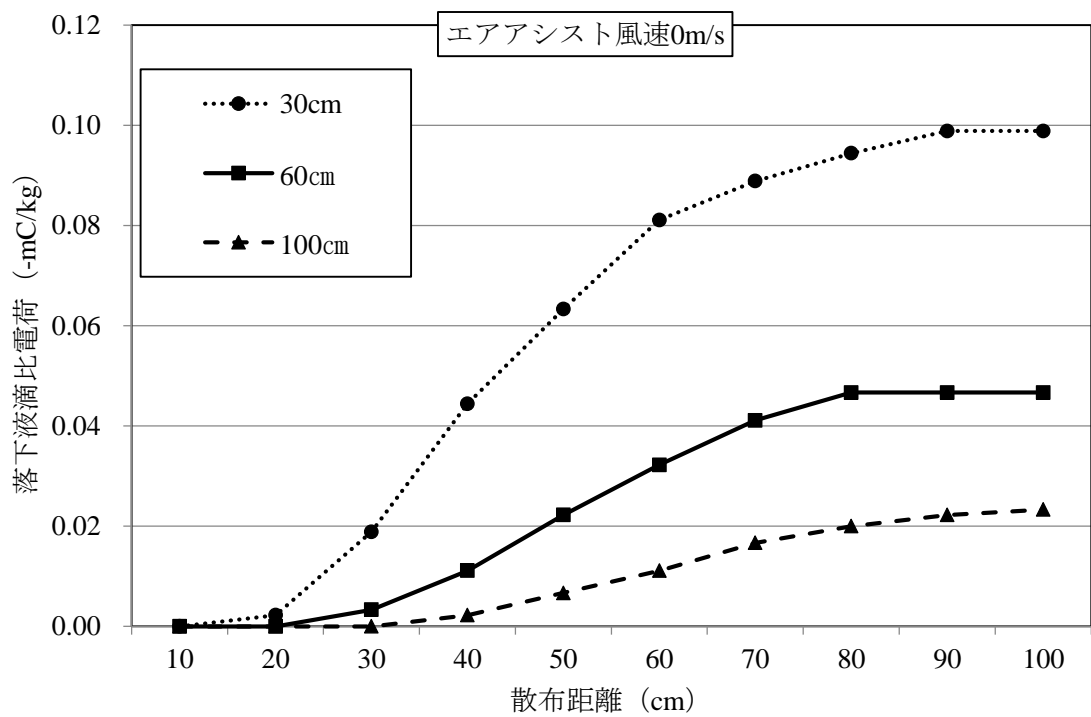
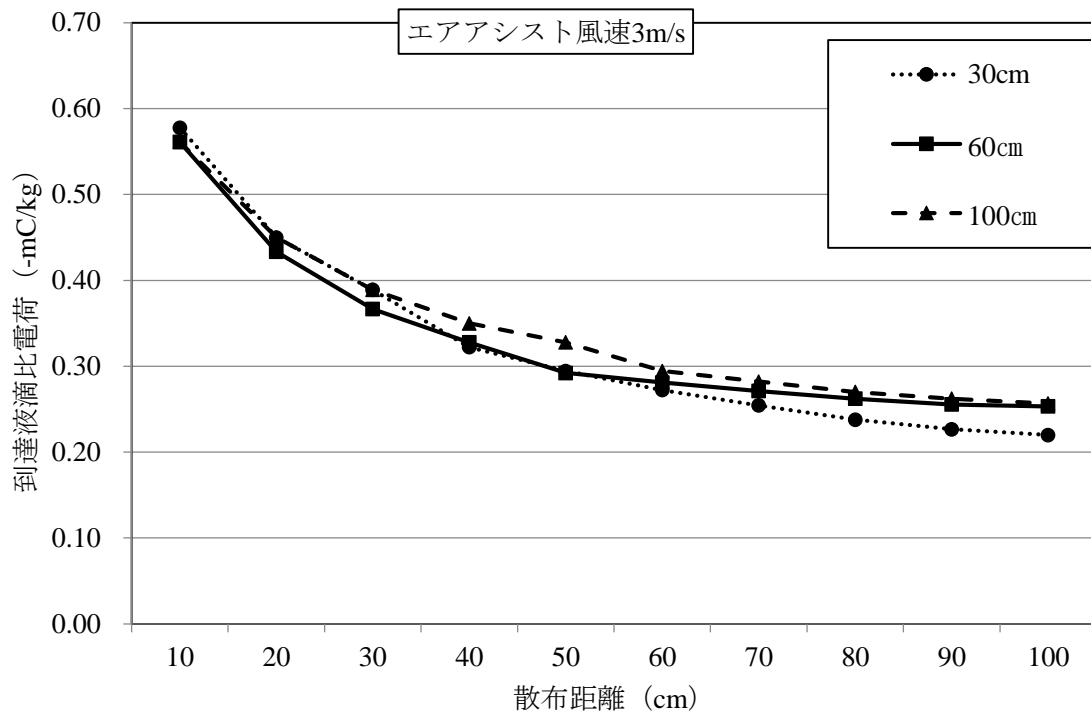
供試ノズル TXVK4, 電極印加電圧+4 kV における噴霧ノズル高さ, 散布距離, エアアシスト風速が到達および落下比電荷に及ぼす影響を図 2-12 に示す。

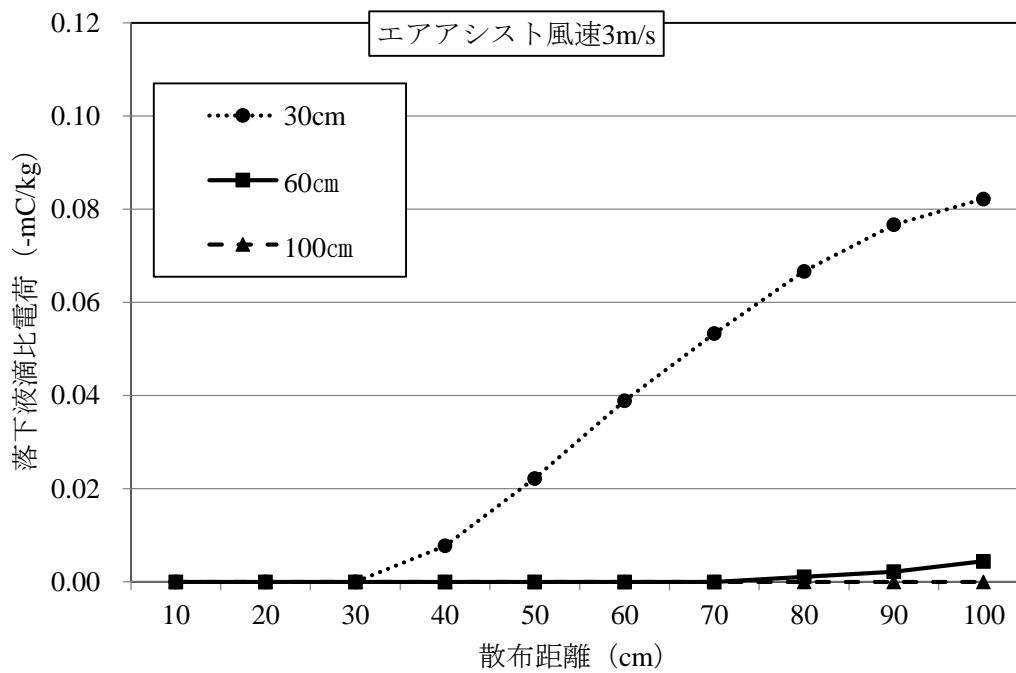
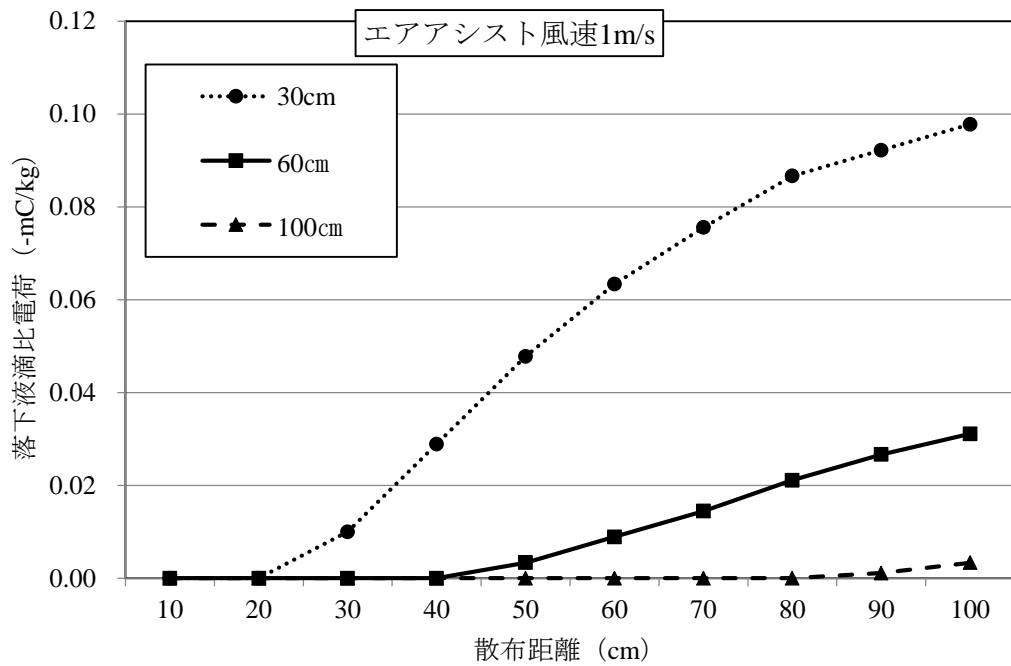
エアアシスト風速 0 m/s, 散布距離が 100 cm において, 噴霧ノズル高さが 30 cm の到達比電荷は-0.02 mC/kg, 噴霧ノズル高さ 100 cm の到達比電荷は-0.04 mC/kg となった。これに対して, エアアシスト風速 3 m/s の場合, 散布距離 100 cm において, 噴霧ノズル高さが 30 cm の到達比電荷は-0.22 mC/kg, 噴霧ノズル高さ 100 cm の到達比電荷は-0.26 mC/kg と 6.5~11 倍になった。到達する液滴比電荷は噴霧ノズル高さによって大きな差はなかった。本研究では, 風洞内という整流環境下での理想的なエアアシストを行ったため, 風洞内の断面方向における風速分布は比較的均一であったと推察され, 噴霧ノズル高さの違いによる差が小さなものになったと考える。

一方, エアアシスト風速 0 m/s, 散布距離が 100 cm において, 噴霧ノズル高さが 30 cm の落下比電荷は-0.1 mC/kg, 噴霧ノズル高さ 100 cm の落下比電荷は-0.02 mC/kg となった。これに対して, エアアシスト風速 3 m/s の場合, 散布距離 100 cm において, 噴霧ノズル高さが 30 cm の落下比電荷は-0.08 mC/kg, 噴霧ノズル高さ 100 cm の落下比電荷は 0 mC/kg となった。噴霧ノズル高さ 30 cm における落下比電荷は, エアアシスト風速が大きくなるにつれ, 減少する傾向にあるものの他区と比べて大きな水準で推移した。散布高さ 60 cm における落下比電荷は, エアアシスト風速 3 m/s で, 散布高さ 100 cm ではエアアシスト風速 1 m/s においてもほぼなくなった。本試験条件にお

いては、エアアシスト風速 0 m/s において落下していた液滴が、エアアシストを行うことにより散布距離が伸びたことに起因すると考える。







*凡例は噴霧ノズル高さを表す

図 2-12 噴霧ノズル高さ，散布距離，エアアシスト風速が到達および落下比電荷に及ぼす影響

Fig. 2-12 Effect of nozzle height, spray distance, air-assisted wind velocity on charge to mass ratio

(2) エアアシスト，粒子径が散布距離及び液滴の比電荷に及ぼす影響

各供試ノズルにおけるエアアシスト風速，散布距離と到達比電荷の関係を図 2-13 に示す。粒子径 38 μm の TXVK1 では，エアアシスト風速 0 m/s の場合，ノズル噴霧直後，つまり散布距離 10 cm における到達比電荷は -0.77 mC/kg であったが，散布距離 100 cm における到達比電荷は，-0.06 mC/kg と大幅に低下した。すなわち，散布距離 10 cm と 100 cm の空間で液滴が持つ帯電量の 90 %以上を失ったこととなる。これは，山根ら³⁶⁾の報告にもあるとおり，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る。

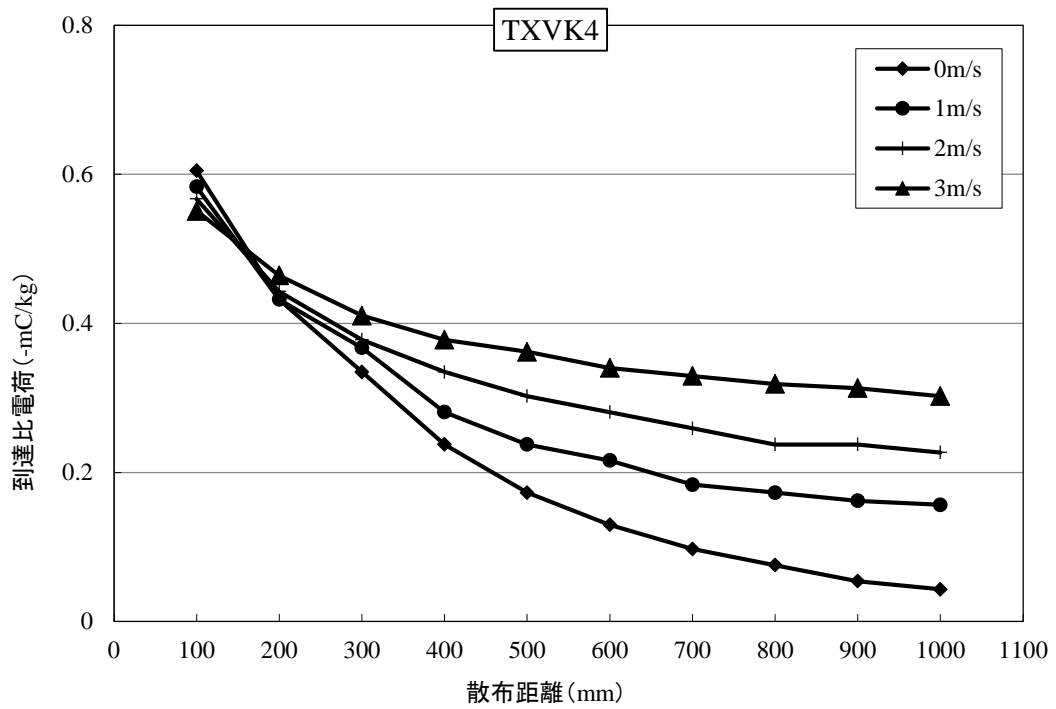
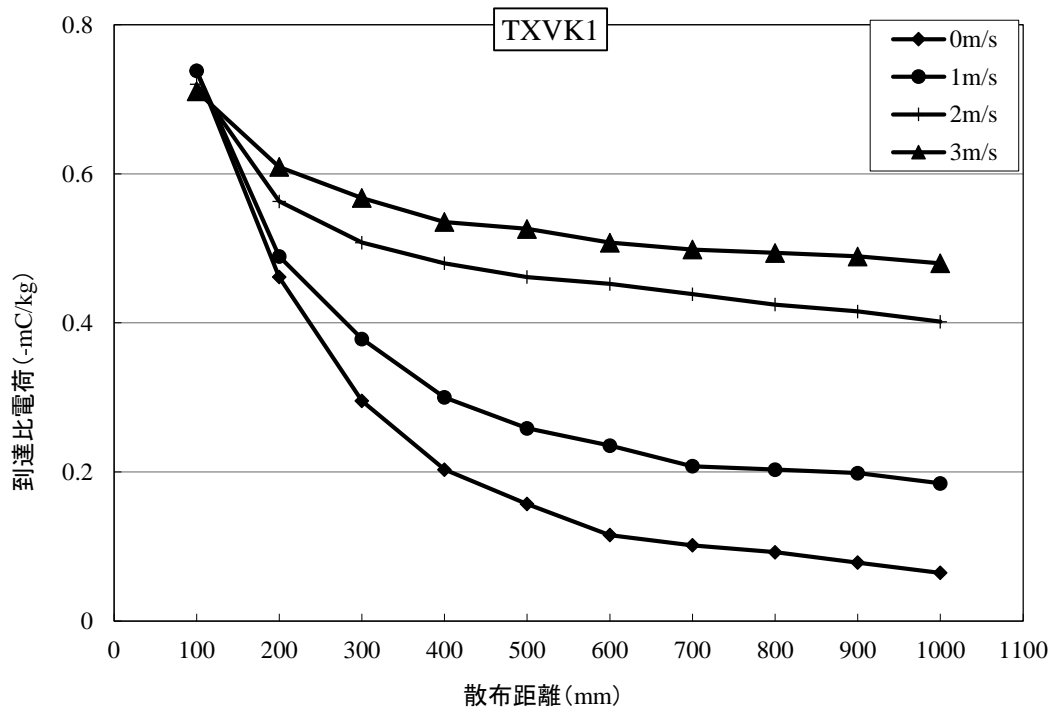
これに対し，エアアシスト風速 3 m/s の場合，散布距離 100 cm における到達比電荷は -0.50 mC/kg となった。散布距離 10 cm と 100 cm の空間で液滴が失った帯電量は 34 %程度となり，エアアシスト風速 0 m/s と比して約 8.3 倍の比電荷を有した。エアアシストを行うことにより，液滴が放電によって電荷を失う前にコレクタメッシュに到達したこと，液滴の到達量が増加したことに起因すると考える。

一方，粒子径が 60 (TXVK4)，165 (TXVK12)，205 μm (TXVK18) のノズルでは，散布距離 10 cm における到達比電荷はエアアシストの有無にかかわらず -0.3 ~ -0.5 mC/kg であったが，散布距離 100 cm における到達比電荷は，エアアシスト風速 0 m/s で 0 ~ -0.05 mC/kg，エアアシスト風速 3 m/s で -0.15 ~ -0.23 mC/kg となった。粒子径の大きなノズルでもノズル TXVK1 と同様に散布距離の増大とともに到達比電荷は減少したものの，エアアシストを行うことによって液滴の放電を抑制する効果は小さくな

った。

これは、液滴の蒸発（消失）時間に大きく影響を受けたと推察する。一般に、液滴の消失時間は粒子径と乾湿球温度差（相対湿度）に影響される⁵¹⁾（図 2-14）。例えば気温 20°C、相対湿度 80 %の条件下では粒子径 50 μm の液滴は約 14 秒で消失するが 100 μm および 200 μm の液滴の場合それぞれ、57 および 227 秒となる。一方気温 30°C、相対湿度 50 %の乾燥下では、50 μm の液滴は約 4 秒で消失し、100 μm および 200 μm の液滴においてもそれぞれ 16 および 65 秒と短時間となる。

そのため、エアアシストを行わない場合、比較的粒子径の小さな液滴は、噴霧ノズルと対象物の空間中での液滴の蒸発や放電により、液滴比電荷を失いやすくなる。エアアシストを行うことにより粒子の蒸発は促進されるが、本試験を行った際の実験装置内の相対湿度は 90 %以上と高かったこと、エアアシストを行うことにより、付着対象物への到達時間が短縮されたことから、噴霧液滴が電荷を失う前にコレクタメッシュに到達したと推察する。一方、粒子径の大きな液滴は、相対的に液滴比電荷を失いにくいため、エアアシストの効果が小さくなったものと推察する。



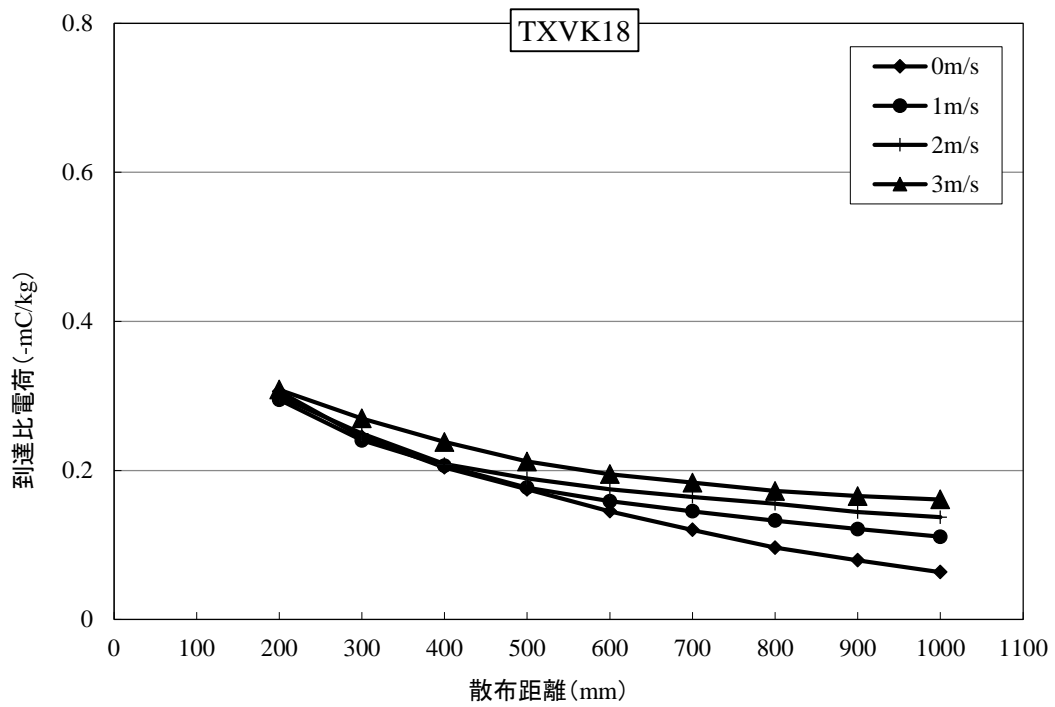
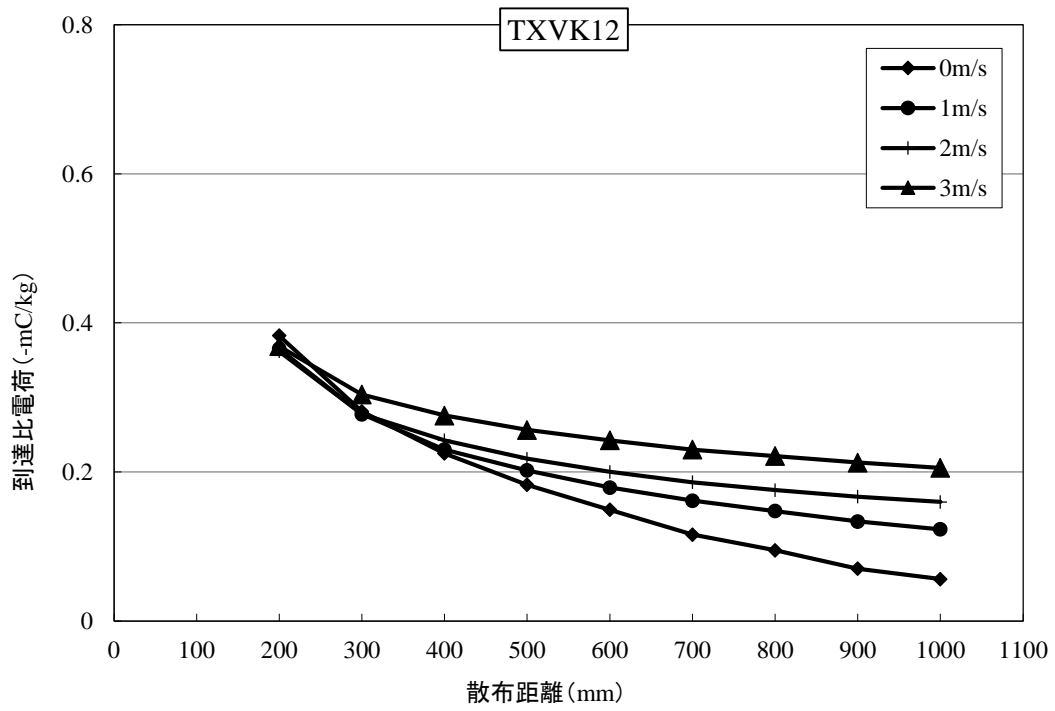


図 2-13 粒子径，エアアシスト風速および散布距離が液滴比電荷に及ぼす影響

Fig. 2-13 Effect of VMD, air-assisted wind velocity and spray distance on charge to mass ratio

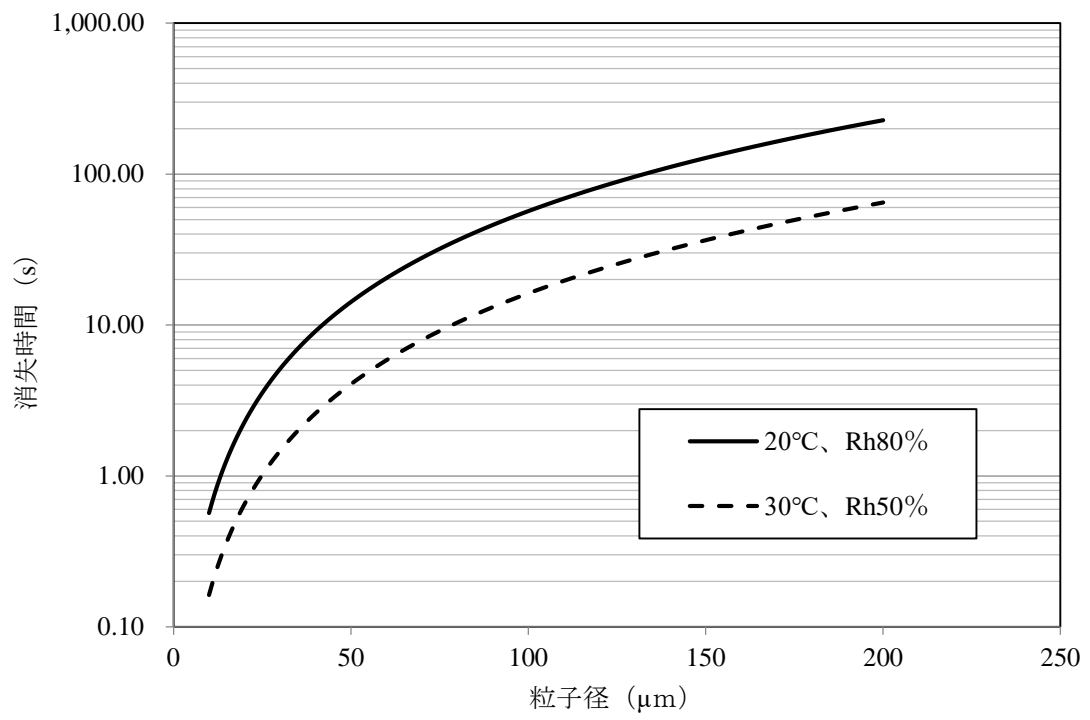


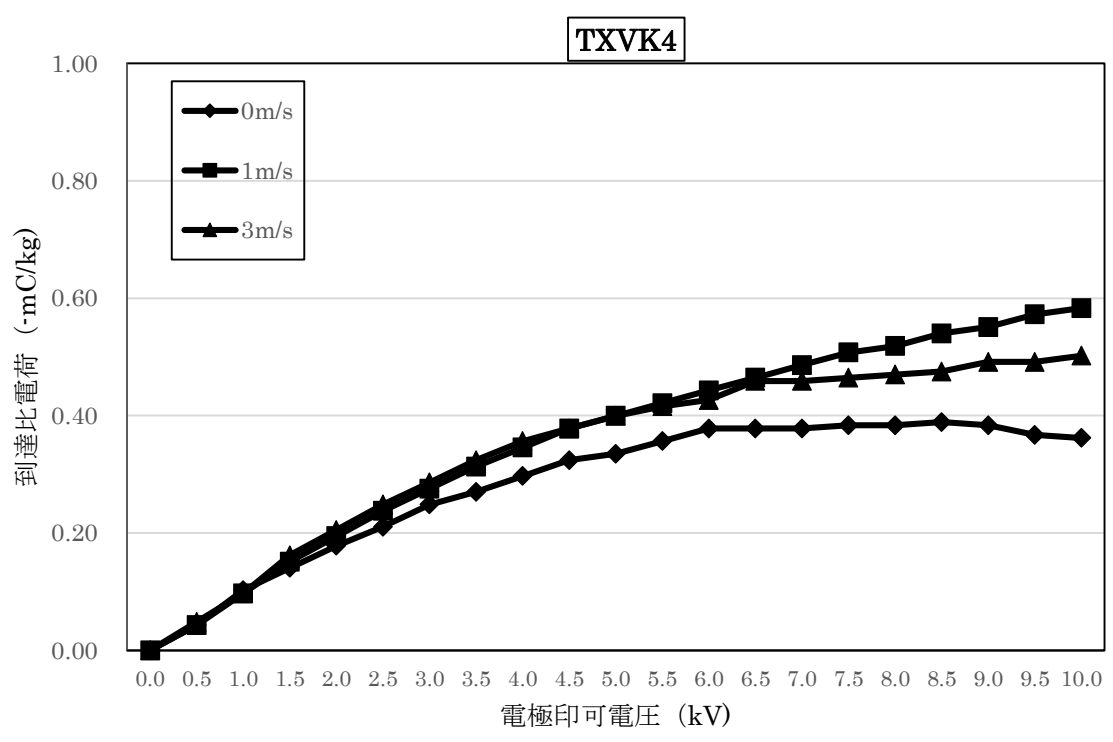
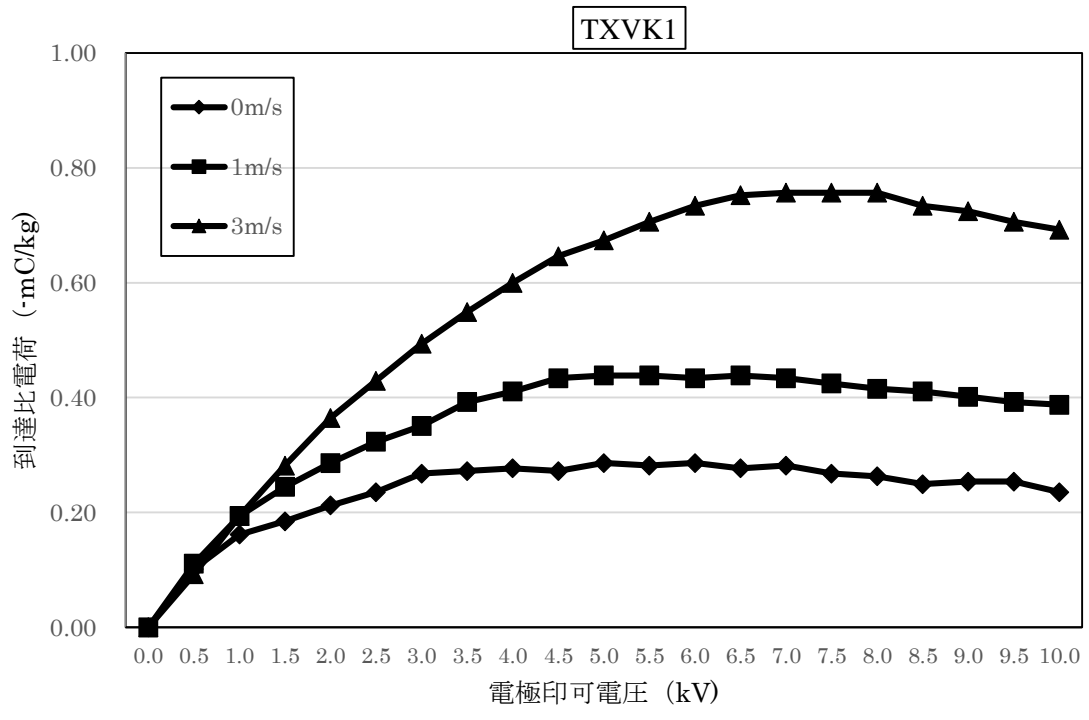
図 2-14 静止空気中における液滴の消失時間⁵¹⁾

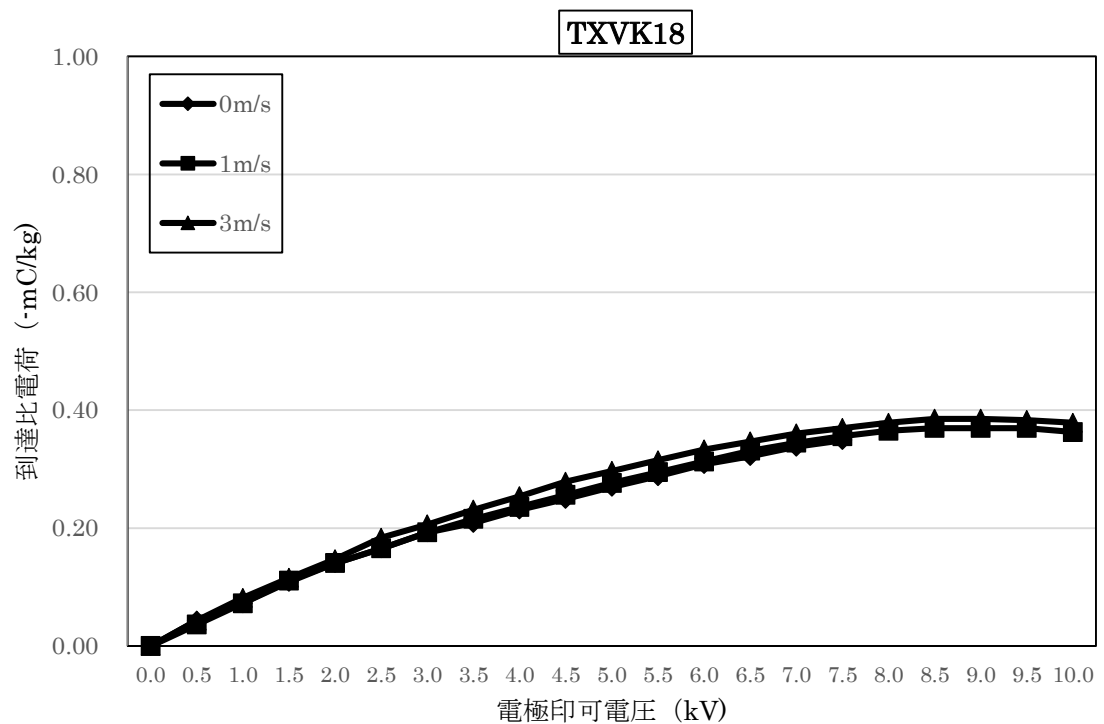
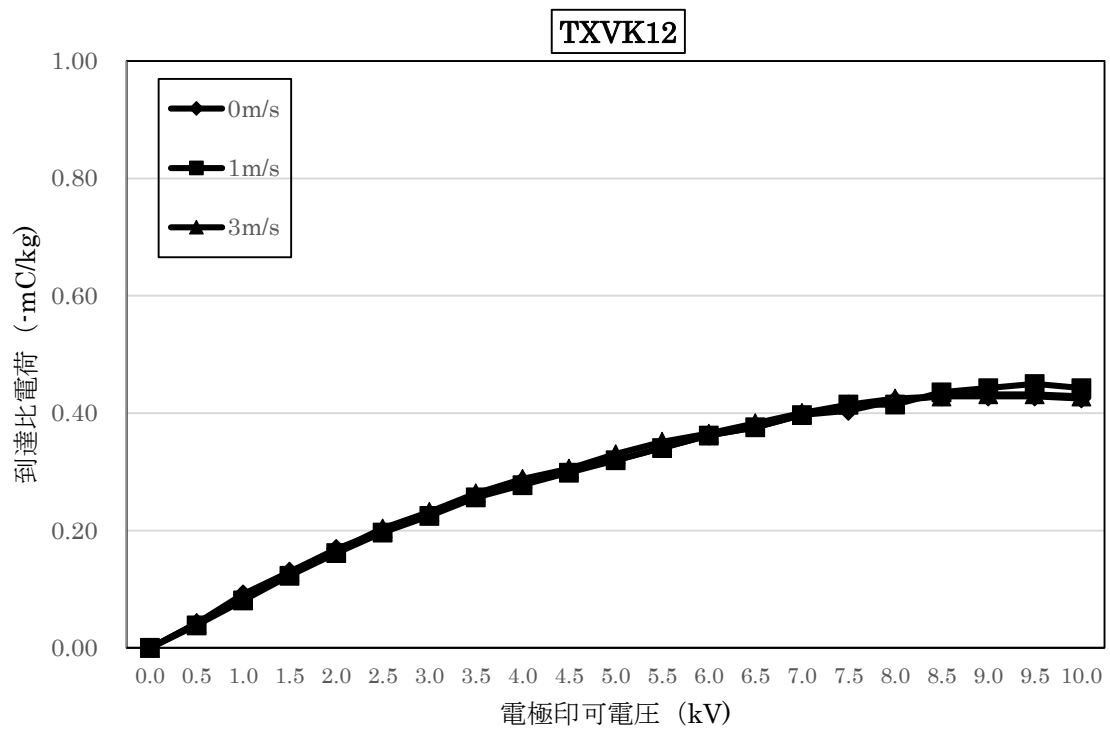
Fig. 2-14 Lifetime of water droplets at different temperatures and humidity

(3) エアアシストと印加電圧が液滴の比電荷に及ぼす影響

各供試ノズルにおける電極印加電圧，エアアシスト風速と到達比電荷の関係を図 2-15 に示す。粒子径が 38 μm の TXVK1 の場合，エアアシスト風速 3 m/s で到達比電荷は電極印加電圧 6 kV 程度まで直線的に増加しその後増加が鈍化し，さらに電極印加電圧を上げると減少に転じた。0 m/s の場合では到達比電荷は電極印加電圧 3 kV まで緩やかに上昇し，その後頭打ちになった。粒子径が 60 μm の TXVK4 の場合，エアアシスト風速 3 m/s で到達比電荷は電極印加電圧 8 kV 程度まで直線的に増加しその後増加が鈍化し，0 m/s の場合では到達比電荷は電極印加電圧 6 kV までの範囲内では緩やかに上昇し，その後頭打ちになった。これは Splinter⁵²⁾ や内野⁵³⁾ の報告と同様に液滴比電荷は電極印可電圧の増加に伴い増加するが，電極に付着した液滴からのコロナ放電が発生したことにより減少に転じたと推察される。

比較的粒子径が大きい TXVK12 および TXVK18 の場合，送風による到達比電荷に変化は見られなかった。粒子径の小さなノズルを用いる場合には，エアアシストを行うことにより無風の場合と比べて高い電極印加電圧を与えることができ，到達比電荷を大きくすることが可能であった。静電散布では，帯電した液滴粒子の持つ比電荷が高いほど付着率が良くなる⁴²⁾ ことから，静電散布におけるエアアシストの有効性が示唆された。



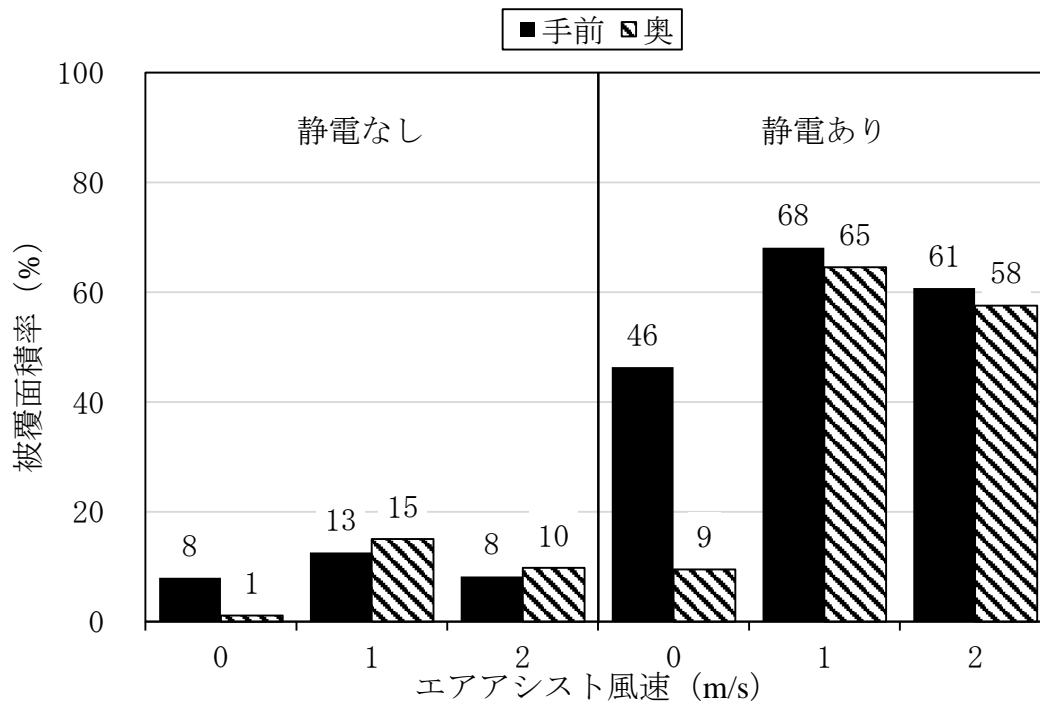


* 噴霧圧力 : 1.5 MPa, 散布距離 30 cm

図 2-15 電極印加電圧, エアアシスト風速, 粒子径が到達液滴比電荷に及ぼす影響
 Fig. 2-15 Effect of the operating voltage, wind velocity, droplet diameter on charge to mass ratio (Nozzle operating pressure: 1.5 MPa, spray distance: 30 cm)

5) 風洞を利用したエアアシスト静電散布の付着性能試験

風洞を利用した付着性能試験結果を図 2-16 に示す。電極印加電圧が 0 V の場合、被覆面積率はエアアシストの有無，強弱に係わらず 1~15 %と低かった。一方，印加電圧+4 kV では，手前の被覆面積率が 46 %まで大きく向上したが，奥の被覆面積率は 9 と改善は見られなかった。これは，松尾ら²⁶⁾の報告にあるように，静電散布では植物群落内への農薬の貫通性，到達性が悪いといった特徴に起因すると推察する。一方，エアアシスト風速 1 m/s 下での静電散布では，奥側の被覆面積率は 65 %とエアアシストがない場合と比べて約 7 倍と大幅に向上し，エアアシストの効果を確認した。しかし，風速 2 m/s では 58 %と被覆面積率が 7 ポイント劣る結果となった。これは，帯電した液滴に働く静電気の力よりも，液滴に作用する風の力の方が大きくなってしまったために作物群落を貫通し，そのまま風下に流されてしまう液滴が増大したと推察される。そのため，本試験で供試したメロンの栽培条件下でのエアアシストを行った静電散布は，風速 1 m/s で付着性能の向上が最も大きくなる結果であり，今後様々な作物条件においてエアアシスト静電散布を行い，最適なエアアシスト風速の検討をする必要があると考える。



*1 感水紙の位置は図 2-6 に示す。

*2 静電ありは印加電圧 4 kV

図 2-16 風洞を利用した付着性能試験結果

Fig. 2-16 Result of deposition characteristics test in wind tunnel

4. 総合考察

供試した静電散布装置において、エアアシストを行うことで噴霧液滴の帯電および到達距離に及ぼす影響を調査し以下の特性を明らかにした。

誘導帯電方式の静電散布で用いられる中空円錐の噴霧ノズルは、水平方向に噴霧すると多くの液滴が落下することでスプレーパターンが崩れるが噴霧方向にエアアシストを行うことで、円錐状の形状を維持できた。エアアシストを行うことで粒子径の小さなノズルを供試した場合、エアアシストを行わない場合と比べて、失う帯電量は大幅に抑制できることが明らかとなった。エアアシストを行うことで、無風の場合と比べて高い電極印加電圧を与えることができ、到達比電荷を大きくすることが可能であった。エアアシストを行うことで、対象作物の奥側の葉への付着は大幅に向上されるが、最適な風量は条件によって異なる可能性がある。

本研究は、風洞内で行われた基礎的な研究結果であり、実際に想定している施設内での散布条件とは大きく異なると考えられる。実際の散布作業では、送風方法や対象作物の品種、生育ステージ、仕立て方等で帯電した液滴の挙動は複雑なものと予想される。本章では、エアアシストを行うことによりノズル近接付近に多くの液滴が付着してしまうという静電散布の欠点を解消できるという仮説の下、他の要因を除外した風と帯電の関係について明らかにした。次章では施設内における無人散布を想定したエアアシスト静電散布装置を開発しその性能を検討する。

第Ⅲ章 園芸施設用エアアシスト静電散布機の開発

1. 序言

前章ではエアアシスト静電散布時における噴霧液滴の物理的特性を明らかにするため、風洞内の環境下で様々な要因が液滴比電荷に及ぼす影響について検討した。本章では、この結果をもとに、実際の園芸施設を想定した無人静電散布機におけるエアアシスト方法を検討し、得られた知見からエアアシスト静電散布機を開発する。開発したエアアシスト静電散布機を供試し、静岡県の温室メロン隔離ベッド栽培におけるウドンコを対象とした防除試験を行い、その性能を明らかにした。さらに開発したエアアシスト静電散布機の問題点を整理し、実用化を目指した改良を施した。

2. エアアシスト方法の比較評価

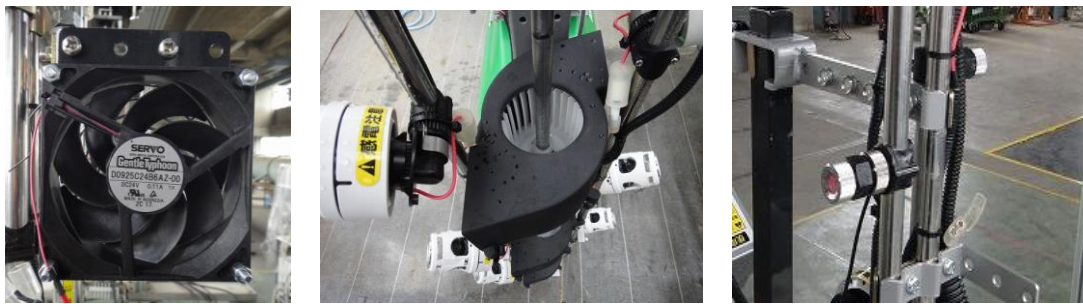
1) 材料および方法

実際の施設内の無人散布機を想定した場合、風洞内における整流は理想的であり、その創出は不可能である。そこで、施設内での実用的なエアアシスト方法および取り付け位置について検討した。

エアアシスト方法として、軸流ファン方式、遠心ファン方式、圧縮エア方式のそれぞれ異なった特徴を持つ3方式を考案し比較した(図3-1, 表3-1)。軸流ファン方式は、比較的簡易な方法で大きな風量を得られるが静圧が低いため抵抗があると極度に風量が減少する特徴を持つ。遠心ファンは、風量は軸流ファンと比べて少ないが静圧が高い特徴を持つ。圧縮エア方式は、試験栽培温室の外にエアコンプレッサを設置し、

得られた圧縮エアを吐出するノズルを利用する。エア吐出部が小さく静電ノズルを搭載する噴頭部の形状が最も簡易化できる特徴を持つ。考案したエアアシスト方法の風速分布特性を調査するために、エア吐出面から送風方向に 300～1200 mm, エア吐出口中心から上下 200 mm まで 100 mm 間隔で風速を計測した。

また, 考案した 3 方式を無人散布機に実用的な機械を想定し, 機械の重量バランス, 取り回し性, メンテナンスのしやすさ等を評価した。評価結果から実際のメロン栽培ハウスを想定したエアアシスト静電散布機の仕様を検討した。



(a) 軸流ファン方式

(b) 遠心ファン方式

(c) 圧縮エア方式

図 3-1 エアアシスト方法

Fig. 3-1 Method of air-assist

表 3-1 各エアアシスト方法の諸元

Table 3-1 Main specifications of method of air-assist

	軸流ファン 方式	遠心ファン 方式	圧縮エア 方式
電源	DC24V	DC24V	—
種類	軸流ファン (□92×25mm)	遠心ファン (径Φ80mm, 高さ 60mm)	0.8mm カニ目ノズル
回転速度 (rpm)	3750	2700	—
風量 (m ³ /min)	1.7	4.5	0.01 (0.3MPa 時)
質量 (kg)	19	20	2

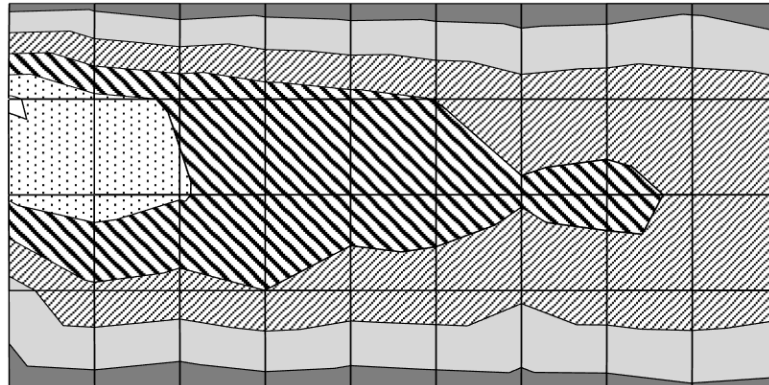
2) 結果および考察

風洞内で得られた結果から、メロン栽培施設において一般的に用いられているベッド間約 1.0~1.2 m を想定し、エア吐出口から 1.0 m の位置において風速 1.0 m/s 程度を維持できることを評価基準とした。その結果、いずれのエアアシスト方法についてもエア吐出口から 1.0 m の位置において風速 1.0 m/s を維持できたものの、圧縮エア吐出ノズルは他の方法と比べ指向性の高いエアアシスト方法であることがわかった（図 3-2）。一方、エアアシスト方法の違いによる質量の増加は、圧縮エア方式の場合は 2.0 kg 程度であったが、軸流ファンおよび遠心ファン方式の場合は 20 kg ほどとなり、散布機の質量バランスや取り回しに影響がでた。また、軸流ファンおよび遠心ファン方式は、噴頭部に設置した際に進行方向および噴霧方向に対して各ファン設置部分の寸法が大きくなり、噴霧中に作物への接触や畝移りの際に施設へ接触が生じる可能性が生じた。さらに、軸流ファンおよび遠心ファンは構造上、風の向きを調節することが困難であった一方、圧縮エア吐出ノズルは、散布ノズルと同様に仰俯角に対して簡易に調節することが可能であった。これらの結果から施設栽培のための無人散布機を想定した場合、軽量で噴頭部に設置しても寸法が大きくならない圧縮エア方式が有効であると判断された。

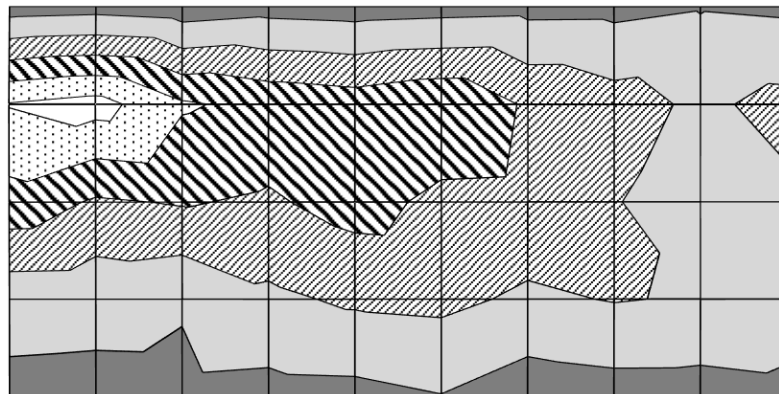
次に圧縮エア吐出ノズルの取り付け位置を検討した。前章での結果の通り、スプレーパターンが中空円錐型のノズルを用い、水平方向への噴霧を行った場合、中空円錐の中心部分に大きな流速を持った渦流の形成があることから、中心付近の液滴にエアアシストを行わなくても液滴は到達力を有しているが、円錐端部においては、自由落

下や空気抵抗による巻き戻りが確認されている⁴⁸⁾。このため、中空円錐の端部にあたる、噴口と噴口の間接に圧縮エア吐出ノズルを設置した結果、ノズル中心部の渦流から外れた液滴に効果的にエアアシストを行うことを確認した。

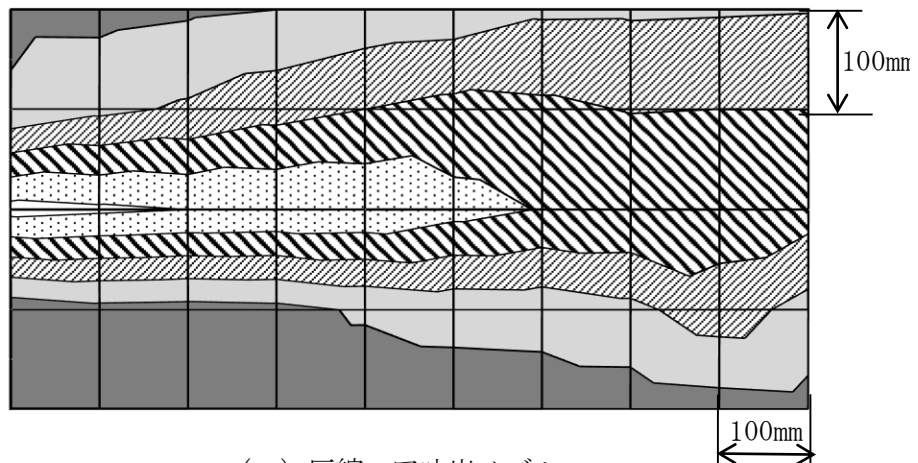
■ 0.0-0.5 □ 0.5-1.0 ▨ 1.0-1.5 ▩ 1.5-2.0 □ 2.0-2.5 □ 2.5-3.0 (m/s)



(a) 軸流ファン



(b) 遠心ファン



(c) 圧縮エア吐出ノズル

*図の左端はエア吐出面から 300mm

図 3-2 風速分布試験結果

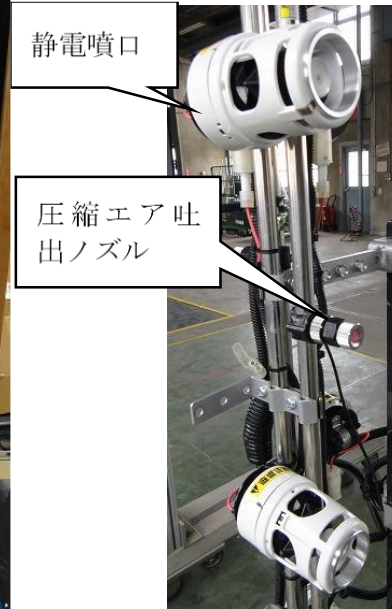
Fig. 3-2 Result of wind velocity distribution test

3. エアアシスト静電散布機の開発

これまでの結果を基に、実際のメロン栽培温室における無人防除を想定し、エアアシスト静電散布機を開発した（以下、開発機）。開発機は、図 3-3 および表 3-2 のように自動走行台車（(株)やまびこ, ASC-105）、静電噴口（みのる産業（株）、FSR-302）、および圧縮エア吐出ノズルから構成される。自動走行台車は、全長 130 cm、全幅 45 cm、質量 80 kg であり、バッテリー（24 V）駆動により畝間を畝に追従しながら 0.2～0.8 m/s の作業速度で自走する。往路、復路とも畝間を自動散布し、散布が終われば作業者が枕地で手動操作により次の畝間に移動させる。静電噴口部は、噴霧粒子に静電気を付加する機構を有した静電噴口を片側 5 頭口ずつ支柱に装備しており、自動走行台車に搭載して、機体両側から作物に向けて薬液を散布する。エアアシスト部における圧縮エア吐出ノズルの位置は、静電噴口と静電噴口の間片側 4、計 8 個設置した。エアコンプレッサ（(株)マキタ, AC7001）は試験栽培温室の外に設置し、ホース（(株)十川ゴム、高圧ライトスプレーホース、内径 8.5 mm）にて圧縮エア吐出ノズルと接続した。



(a) 全体図



(b) 静電噴口およびエア吐出ノズルの拡大図

*静電噴口間および圧縮エア吐出ノズル間の距離は 30cm

図 3-3 試作したエアアシスト静電散布機

Fig. 3-3 Prototype of air-assisted electrostatic sprayer

表 3-2 開発機の諸元

Table 3-2 Prototype specifications

	全長×全幅(mm)	1200×450
走行部	搭載バッテリー	鉛蓄電池 12 V×27 Ah×2
	走行速度往復(m/s)	0.2～0.8
	電極の種類	環状電極
	印加電圧(k V)	6.0
噴頭部	噴頭数	10
	噴霧ノズルの種類	中空円錐（オリフィス径 0.7 mm, コア穴数 2） 0.75L/min（2.0MPa 時）
	質量(kg)	100
	適応動力噴霧器	使用圧力 5.0 MPa 以下のもの
	中間ホース	使用圧力 5.0 MPa の耐性があるもの

4. メロン栽培温室におけるエアアシスト静電散布の付着性能および防除試験

1) 材料および方法

開発機の性能を評価するため、静岡県農林技術研究所のメロン隔離ベッド栽培ハウス（204 m²）においてメロンを対象に防除試験を行い、静電の有無、エアアシストの有無の条件下で、各々の付着性能および防除効果を調査した。試験区は、表 3-3 に示すように、散布を行わない無処理区、機械区 1（静電なし、エアアシストなし）、機械区 2（静電あり、エアアシストなし）、機械区 3（静電あり、エアアシストあり）、対照区として環状噴口 3 頭口（（株）永田製作所、丸三頭口）を用いた手散布区を設けた。機械区 1～3 は散布量 300 L/10 a となるように吐出圧力 2.0 MPa、噴霧流量 3.75 L/min、開発機移動速度 0.2 m/s で後進散布を行い、手散布区についても同量の散布量になるように 1 株あたりの散布時間を調節した。機械区 3 におけるエアアシストは圧縮エア吐出ノズル 1 個当たり 10 L/min になるように調節した。本ハウスでは、2 つの栽培ベッドを密着して配列しており、1 つの栽培ベッドに対して片側からのみの散布を行う。メロン栽培のベッド幅は 56.5 cm、ベッド中心間の距離は 150 cm、供試作物には温室メロン（品種：アールスフェボリット冬系 F1、播種：平成 25 年 4 月 22 日、定植：5 月 15 日、株間：36 cm、平均草丈：180 cm、平均葉数：24 枚）を用いた。付着性能試験は第 II 章と同様に評価した。防除試験は、対象病害をうどん粉病とし、モレスタン水和剤（キノキサリン系水和剤、3000 倍希釈）を 300 L/10 a で片側散布した。

防除は、平成 25 年 6 月 27 日、7 月 4 日、7 月 11 日と 7 日ごとに 3 回行い、7 月 18 日に 1 区 80 葉 4 反復（1 区 80 葉の内訳：8～10 株、各株あたり 7～10 葉、計 80 葉）、

開発機から見て群落の手前，群落の奥各 10 葉の病害発生を調査し，防除効果を評価した。防除効果は，社団法人日本植物防疫協会の方法に準拠し⁵⁴⁾，病原発生程度の発現数を調査して，(8) ～ (10) 式を用いて発病葉率，発病度および防除価を算定した。

表 3-3 メロン栽培温室における付着性能および防除試験における試験区の条件
Table 3-3 Conditions for treatments in the deposition performance and control effectiveness test in the melon culture greenhouse

	静電	エアアシスト
無処理区	—	—
手散布区	なし	なし
機械区 1	なし	なし
機械区 2	あり	なし
機械区 3	あり	あり

病原発生程度の発現数は、発病程度基準指数（図 3-4）を用いて病原の発生程度を識別し、カウントした。



0:病斑を認めない



1:病斑面積率が葉面積の5%未満



2:病斑面積率が葉面積の5~25%



3:病斑面積率が葉面積の25~50%



4:病斑面積率が葉面積の50%以上

図 3-4 うどん粉病の発病程度基準指数

Fig. 3-4 Disease severity index for powdery mildew

発病葉率は、発生程度に関わらず、発病が認められた葉の割合で、(8)式により算出した。

$$Rd = \frac{Nd}{NI} \times 100 \quad (8)$$

Rd : 発病葉率 (%), Nd : 発病葉数, NI : 調査葉数

発病度は、発病程度基準指数に従って各葉を発病程度別に目視によって分類し、それぞれ係数を与えて平均化したもので、(9)式にて算出した。

$$Sd = \frac{\sum_{i=0}^4 (Sni \times Nsi)}{NI \times 4} \times 100 \quad (9)$$

Sd : 発病度, Sn : 発病程度基準指数, Ns : 発病程度基準指数別葉数, NI : 調査葉数

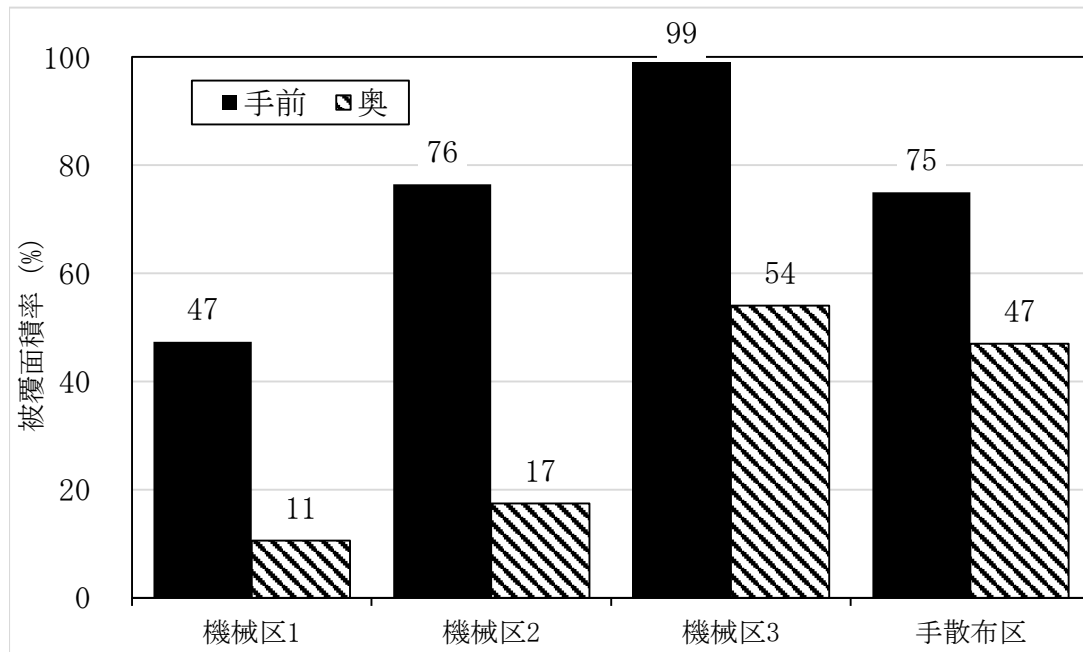
防除価は、無散布区における発病度を 100 とした場合の処理区の効果を示す指数で、(10)式にて算出した。

$$Cr = 100 - \frac{Dt}{Dn} \times 100 \quad (10)$$

Cr : 防除価, Dt : 試験区の発病度, Dn : 無散布区の発病度

2) 結果および考察

温室メロン栽培における付着性能試験の結果を図 3-5 に示す。手散布区の被覆面積率が群落手前で 75 %，群落奥で 47 %であったのに対し，エアアシストおよび静電のない試験区の被覆面積率は群落手前で 47 %，群落奥で 11 %となり付着性能が劣った。これは，手散布では通常ノズルを上下に振りながら群落奥にも液滴が届くように散布を行ったのに対し，静電，エアアシストがともにない試験区では，群落奥にはほとんど液滴が到達しなかったと推察される。静電あり，エアアシストなしの試験区では，群落手前の被覆面積率が 76 %に向上したものの，奥は 17 %と低い水準のままであった。これに対し，静電，エアアシストがともにある試験区においては，群落手前の被覆面積率が 99 %，奥でも 54 %と手散布よりも高くなった。これは前章の風洞試験と同様の傾向を示していることから，実際のメロン栽培ハウスにおける防除の現場においても静電散布にエアアシストを行うことによって付着性能は向上することが明らかとなった。



- *1 噴霧時の感水紙設置位置は散布機側の葉を手前，その反対側の葉を奥とした。
- *2 機械区1：エアアシストなし・静電なし，機械区2：エアアシストなし・静電あり，機械区3：エアアシストあり・静電あり，手散布区：エアアシストなし・静電なし。
- *3 手散布は，静岡県農林技術研究所の熟練作業者によって実施した。

図 3-5 付着性能試験結果

Fig. 3-5 Result of deposition performance test

群落手前および奥におけるうどん粉病の病害発生程度の発現数，発病葉率，発病度および防除価を表 3-4 に示す。群落手前に関しては機械区 1～3 について手散布区と同等の発病葉率，発病度および防除価を得た。これは上記付着試験で示したように，群落手前には薬液が十分に付着したことに起因する。一方，群落奥の発病程度基準指数が 3 以上の発現数は，無処理区で 28 サンプルとなったが，エアアシストを行った静電散布（機械区 3）では 2 サンプルとなり手散布区と同程度に発病が押さえられていることがわかった。これに対しエアアシストを行わない機械区 1 および 2 における発病程度基準指数 3 以上の発現数は，それぞれ 7 および 5 サンプルとエアアシストを行った場合と比べて重篤化する傾向が見られた。発病葉率についてもエアアシストを行わない機械区 1 および 2 の発病葉率はそれぞれ 69 および 65 % となり，エアアシストを行った機械区 3 の 45 % や手散布区の 53 % と比べ 1.2～1.5 倍と悪化した。防除価について，エアアシストを行わなかった機械区 1 および 2 はそれぞれ 41 および 45 であつたのに対し，静電散布にエアアシストを行った機械区 3 は 66 と約 1.5 倍に向上した。これは，前章で明らかにした通り，エアアシストを行うことにより薬液が液滴比電荷を維持したまま群落内部まで到達することによって，付着性能および防除効果が手散布と同等かそれ以上の効果が得られたと考えられる。

表 3-4 防除試験結果

Table 3-4 Result of pest control test

群落手前

試験区	発病程度基準指数の発現数					発病葉率 (%)	発病 度	防除 価
	0	1	2	3	4			
無処理区	17	25	13	16	7	76a	41	-
機械区 1	58	19	2	1	0	28b	8	80
機械区 2	62	18	0	0	0	23b	6	86
機械区 3	66	13	1	0	0	18b	5	88
手散布区	61	18	1	1	0	23b	6	84

群落奥

試験区	発病程度基準指数の発現数					発病葉率 (%)	発病 度	防除 価
	0	1	2	3	4			
無処理区	17	17	18	20	8	78a	45	-
機械区 1	25	33	16	5	2	69a	27	41
機械区 2	28	30	17	4	1	65ac	25	45
機械区 3	44	25	10	2	0	45b	15	66
手散布区	38	30	10	3	1	53bc	18	60

5. 実用型エアアシスト静電散布機の概要

開発機の機器構成について、本研究ではエアアシスト方法に、圧縮エア方式を採用した。これは、風洞内のような理想的なエアアシスト環境を栽培現場で再現するのは困難であり、技術的に制作可能な装置構成を考慮した結果であるが、現状、圧縮エアを作成するコンプレッサを自動走行台車とは別に施設外に設置している。このため、開発機による散布作業は、薬液散布用のホースに加え、エアアシスト用のホースを引きずりながら走行しており、エアアシストがない場合と比べてホースのとり回しが煩雑になっている等、作業性が悪化している。そこで、本項では、このような問題点を解決するため、本研究では、施設外設置型のエアコンプレッサの代わりにエアポンプを走行台車に搭載することで取り回しを簡易化し、実用性の向上を目指したエアアシスト静電散布機（以下、実用機）を製作した。

実用機は、自動走行台車部（(株)やまびこ、ASC-105）、静電噴口部（みのる産業(株)、FSR-302）、およびエアアシスト部から構成される（図 3-6、表 3-5）。

自動走行台車部は 2 輪駆動の 4 輪車で、モータ、ギアボックス、バッテリー、ホースリール、エアポンプおよびコントローラを搭載する。スタートボタンを押下することで、作物列の間（畝間または栽培ベッド間）を自動で前進散布し、作物列の端まで到達すると、あらかじめ設置してある金属板を自動走行台車の磁気センサが感知し、自動で後進に切り替わり、ホースを巻き取りながら散布する。自動走行台車の簡素化、低価格化を図るため、操舵機能は有していない。したがって、次の作物列間への移動は作業者が人力で行う必要がある。

静電噴口部は、噴霧ノズル付近に設置された環状電極に 6 kV を印加して噴霧粒子に静電気を付加する機能を有した静電噴口を 300 mm 間隔で片側 5 頭口、計 10 頭口ずつ装備する。ハイワイヤ栽培等、草丈の高い作物に対応するために静電噴口ではない慣行の噴口を適宜追加できる構造となっている。同部の設置位置は自動走行台車前部で、機体両側から作物に向けて薬液の散布が可能である。

エアアシスト部は、自動走行台車に搭載したエアポンプによって生成される圧縮空気が、エアアシストノズルから吐出することで、静電噴口から噴霧された薬液の作物群落内への到達力をアシストする構造とした。搭載したエアポンプ((株)安永ポンプ, LP-120H) は機体の取り回しを考慮し、外部設置のエアコンプレッサに比べ小型(体積比 7%)・軽量(質量比 34%)であるものの、圧力が低く(圧力比 25%)圧縮エア吐出ノズルから十分な風量を供給することが困難であった。そこで、周囲の空気を巻き込みながら噴射する流量増幅ノズル(スプレーイングシステムス, YB1/4TME-PP1.5)を採用することで、吐出エア吐出口から 1m の位置において風速 1 m/s を確保することを確認した。また、エアポンプは交流仕様のため、DC/AC コンバータを併せて搭載した。エアアシストノズルの設置位置は、静電噴口間の中間点とし、ノズル中心部の渦流から外れた液滴に効果的にエアアシストを行うことができることから、最下部の静電噴口から 150 mm 下から上方へ 300 mm 間隔で片側 5 個、計 10 個のエアアシストノズルを設置した。



図 3-6 実用機の外観

Fig. 3-6 Overview of the air-assisted electrostatic sprayer

表 3-5 実用型エアアシスト静電散布機（実用機）の仕様

Table 3-5 Main specifications of practical prototype of air-assisted electrostatic sprayer

自動走行	全長×全幅(mm)	1300×450	
台車部	搭載バッテリー	鉛蓄電池×2 24 V×36 Ah	
	電極の種類	環状電極	
	印加電圧(kV)	6.0	
噴口部	噴口数	10～16	
	噴霧ノズルの種類	中空円錐 (オリフィス径 0.7 mm, コア穴数 1～2)	
	エアアシスト方式	圧縮空気	
エアアシ	エアアシストノズル	流量増幅ノズル	
スト部		定格風量 (L/min)	120
	エアコンプレッサ	定格圧力 (kPa)	20
		消費電力 (W)	130
	質量(kg)	125	
	適応動力噴霧器	使用圧力 5.0 MPa 以下のもの	
	中間ホース	使用圧力 5.0 MPa の耐性があるもの	

6. 総合考察

本実験で利用した静岡県の栽培ハウスでは面積利用効率を向上させるために、2つの栽培ベンチを密着して配列していることから、1つの栽培ベンチに対して片側からのみの散布を行っている。そのため、エアアシストのない散布では、散布機から遠い奥側の葉へは薬液の到達力が低下し、感水紙を用いた付着性能試験は、被覆面積率が11~17と手散布区の47と比較して低下した。一方、エアアシスト静電を行うことによって薬液の群落内部への到達力は向上し、特に奥側の葉は大きく改善され、被覆面積率54と慣行手散布と同等以上の結果を得た。Giles, D. k. et al.⁴¹⁾ はイチゴを対象として静電散布による散布量の削減効果を報告しているが、開発機についても投下エネルギーや環境負荷低減の観点からも、散布量削減の可能性を探索する余地が残されている。

次章では、メロン以外の作物、たとえば施設園芸で広く栽培されているトマト等のナス科作物への開発機の適応性を評価、温湯管等のレールを利用した走行や土耕栽培での走行の評価や防除効果等を現地実証試験によって明らかにする。

第IV章 試験ハウス内における防除試験および現地実証試験

1. 序言

トマトおよびキュウリの施設栽培は、いずれも誘引仕立てを行っていることが多く、無人防除を考えると共通する点もあるが、大きく異なる点の一つとして葉の形状があげられる。トマトの葉は羽状複葉で、長さ 15 cm～45 cm になり、軟毛が密生しており、小葉は長さ 5～7 cm になる。一方、キュウリの葉は手のひら状に浅く切れ込み、長い柄がある互生単葉で、全体に棘状の毛が密生しており、大きさは 20～30 cm になる。Smith, D. B., et al.⁵⁵⁾ は、葉の形態の違いによる散布時における液滴の葉への付着の影響を調べ、液滴の大きさが付着に関与していることを報告している。松尾ら⁴⁸⁾ は、トマトやキュウリ等を供試して葉の形状や大きさなどが静電散布の付着特性に及ぼす影響を検討し、静電散布の特性を把握したものの、本研究で提案するエアアシスト静電散布に関する研究事例は見当たらない。

また、液剤散布においては、一般的に農薬を均一に付着するのが好ましいとされている¹⁵⁾ が、その防除効果については、即効性や残効性等の効果、薬剤の種類、対象作物等によって最適な農薬付着量があるといわれている。例えばキクを対象としたハダニの防除試験では、付着度 2 以上で死虫率において防除効果を認めた報告^{56), 57)} (國本ら, 1997; 國本ら, 1998) や、モモ灰星病およびカンザワハダニにおいては、付着度 4 以上で十分な防除効果を認めた報告⁵⁸⁾ (藤田ら, 2009) などがある。また、リンゴわい化栽培園における農薬飛散低減条件でのスピードスプレーヤ散布による病害虫防除では薬液付着が劣っているにもかかわらず防除効果が高いといった現状も確認

されている⁵⁹⁾ (櫛田ら, 2006)。これは, 試験薬剤に浸透移行性のものがあつたためと考えられており, 一概に薬液付着の性能を用いて防除効果を判断することはできない。

そこで, トマトおよびキュウリ栽培の試験ハウス内における防除作業において, 慣行の手散布および実用機を供試した際の薬液の付着性能を調査するとともに, 実際にウドンコ病を発生させ, どの程度病気を抑えられたか, その防除効果を評価した。さらに, その結果を踏まえて実際の栽培現場にて実用機の実用性を評価した。なお, 付着性能の評価は第II章に, 防除効果の評価は第III章に準拠して行った。

2. 材料および方法

1) トマトを対象とした慣行散布量時の防除試験

トマトを対象とした慣行散布量におけるエアアシスト静電散布の性能を評価するために, 埼玉県農業技術研究センター内のトマト栽培温室 (81 m²×4 棟, 2000 株/10 a) において垂直仕立てのトマト (品種: CF 桃太郎はるか, 播種日 2013 年 8 月 26 日, 定植日 10 月 11 日, 株間 30 cm, 条間 150 cm, 草丈 230~250 cm) を供試し, 防除試験を行った。

感水紙は, トマト群落の中心部で最も葉が繁茂している地際から 1.0~1.2m の場所に地面に対して垂直に設置し, 栽培ベッド両側から実用機による自動散布後に回収し, 付着性能を評価した。

ウドンコ病を対象として 11 月 18, 26 日および 12 月 2, 9 日にカリグリーン (800

倍希釈)を散布し、12月16日に各区について10株を調査対象とし、十分に展開した葉を各調査株10葉ずつサンプリングし、発病程度を調査し、防除効果を評価した。

試験区は、実用機を用いた機械区1(静電なし、エアアシストなし)、機械区2(静電あり、エアアシストなし)、機械区3(静電あり、エアアシストあり)および対照区として環状噴口7頭口を用いた手散布区を設けた。機械区1~3は、コア穴数2を用い散布量200L/10aとなるように吐出圧力2.0MPa、ノズル1個あたりの噴霧流量0.75L/min、実用機の移動速度0.37m/sで栽培ベッドの両側から後進散布を行った。手散布区については散布量が200L/10aになるように1株あたりの散布時間を調節した。

2) トマトを対象とした散布量削減時の防除試験

トマトを対象とし、散布量を削減した場合のエアアシスト静電散布の性能を評価するため、1)と同じ温室においてUターン仕立てのトマト(品種:アニモTY-10、播種日2014年4月21日、定植日6月2日、定植日10月11日、株間30cm、条間150cm、草丈230~250cm)を供試し防除試験を行った。ウドンコ病を対象として10月24日および11月2日にカリグリーン(800倍希釈)を散布し、11月10日に付着性能および防除効果を評価した。

散布試験は、散布量を慣行散布量200L/10aの80%(160L/10a)、60%(120L/10a)およびエアアシストの有無を組み合わせた機械区1(静電あり、エアアシストなし、散布量160L/10a)、機械区2(静電あり、エアアシストなし、散布量120L/10a)、機械区3(静電あり、エアアシストあり、散布量160L/10a)、機械区4(静電あり、エア

アシストあり，散布量 120 L/10 a) を設け，さらに 1) と同じ手散布区を設け，160 L/10 a) になるように調節した。

なお，機械区の散布量の削減には，実用機の移動速度を 1) の 1.25 倍の 0.46 m/s とし，コア穴数 1（噴霧量：0.55 L/min）および 2（同：0.75 L/min）の 2 水準を組み合わせで調節し，栽培ベッドの両側から後進散布を行った。

3) キュウリを対象とした防除試験

キュウリを対象とし，散布量を削減した場合のエアアシスト静電散布の性能を評価するため，宮崎大学農学部附属フィールド科学教育研究センター内 C ハウス (200 m²) においてキュウリ（品種：グリーンラックス，播種日：2014 年 9 月 5 日，定植日：9 月 29 日，株間 80 cm，条間 60 cm，畝幅 190 cm，2 条千鳥植え，平均草丈 180 cm）を供試し，防除試験を行った。ウドンコ病を対象とし，2014 年 10 月 21 日，10 月 28 日，11 月 18 日に表 4-1 に示す薬剤を散布し，10 月 28 日から 7 日ごとに 5 回，発病調査を行い，防除効果を評価した。また，11 月 18 日にキュウリ群落内の地際から約 1.2 m の場所に垂直方向に感水紙を設置し薬液の付着性能を評価した。発病調査対象となる葉は調査対象株の散布前面および同株の後面 5 枚の計 10 枚とし，1 試験区あたり 10 株の 2 反復とした。なお，本栽培条件は 2 条千鳥植えであることから，後面の葉はほぼ畝の中心部であり，散布時における付着低下が懸念される部位である。

試験区は，2) と同様にエアアシストの有無および散布量 2 水準を組み合わせた機械区 1（静電あり，エアアシストなし，散布量 240 L/10 a），機械区 2（静電あり，エア

アシストなし，散布量 180 L/10 a)，機械区 3（静電あり，エアアシストあり，散布量 240 L/10 a)，機械区 4（静電あり，エアアシストあり，散布量 180 L/10 a) を設け，対照区としてすずらん 7 頭口を用い，散布量を 180 L/10 a に調節した手散布区を設けた。実用機の移動速度 0.25 m/s，吐出圧力 2.0 MPa，ノズルのコア数 1 および 2 の 2 水準を組み合わせて調節し，栽培畝の両側から後進散布を行った。

表 4-1 キュウリを対象とした防除試験の薬剤の種類と希釈倍率

Table 4-1 Type and dilution magnification of the pest control test for cucumbers

日付	薬剤の種類と希釈倍率
10/21	アフエットフロアブル 2000 倍
	アフアーム乳剤 2000 倍
10/28	フルピカフロアブル 2000 倍
	ベストガード水和剤 1000 倍
11/18	ルビゲン水和剤 10000 倍
	ダコニール 1000 1000 倍

4) 現地実証試験

実用機を用いた際の防除効果，作業時間，走行安定性を調査し，その実用性を評価するために，トマト大規模栽培温室 3 箇所を，キュウリ土耕栽培温室 1 箇所を実証試験の試験地として選定し，2015 年に表 4-2 に示す内容の試験を行った。トマト大規模栽培温室は，いずれもフェンロータイプの温室で，栽培ベッド間にレールが設置されており，実用機はレール用の鉄車輪を装備することで無人走行する。ハイワイヤ栽培に対応するために噴口を最大で 8 頭口増設した。土耕キュウリ栽培は，大屋根型 3 連棟の温室で，畝追従方式で無人走行する。

本試験は，栽培現場での試験となるため，実際に病気を発生させた調査は不可能である。そのため，発病葉数および防除価の評価は行わず，薬液の付着性能のみを評価した。

A 菜園では，1) の慣行散布量における薬液の付着性能を検証した。エアアシストおよび静電のない慣行機械（(株)やまびこ，ASC-105)，エアアシスト静電散布を行う実用機を供試し，散布量を A 菜園での慣行散布量である 300 L/10 a (40 L/列) に設定し往復散布を行った。

B および C 菜園では，2) の散布量削減時における薬液の付着性能を検証した。B 菜園では，エアアシストおよび静電のない慣行機械（(株)やまびこ，ASC-106) を供試して散布量 50 L/10 a (6 L/列) に，エアアシスト静電散布を行う実用機の散布量は，散布量削減の効果を期待し，さらに少量の 17 L/10 a (2 L/列) に設定し往復散布を行った。なお，B 菜園では，摘葉作業後の切断面への部分的な散布を目的としているた

め平均的なトマト防除の散布量としては少量となっている。また，C 菜園では，実用機を用いて片道散布（後進散布，150 L/10 a（10 L/列））および往復散布（300 L/10 a（21 L/列））の区を設け，散布量削減の効果を検証した。

D 農園では，3) のキュウリを対象とした薬液の付着性能を検証した。慣行の両側 14 頭口のカート式の手散布および実用機を用いて，散布量を D 農園での慣行散布量である 300 L/10 a（20 L/列）に設定し片道散布（後進散布）を行った。

また，実用機を用いた際の作業時間削減の効果を評価するために，C 菜園において，散布作業時の前進時間，後進時間，取り回し時間を計測し，実用機および慣行手散布作業と比較した。

実用機はエアポンプを搭載しているため，慣行機に比べて消費電力が大きくなると考えられる。そこで，A 菜園において散布作業中の慣行機および実用機のバッテリー電圧の経時変化を調査した。さらに C 菜園において，午前中いっぱいの散布を想定し，3 時間半の連続散布を行うことにより搭載バッテリーが実用に耐えうるか検証した。

また，実際の栽培現場における無人走行の安定性を評価するために散布時における走行状態をビデオ撮影し，走行時におけるロール方向の角度を調査した。

表 4-2 現地実証試験条件

Table 4-2 Condition of the field test

試験地	A 菜園	B 菜園	C 菜園	D 農園
品種	トマト (中玉系)	トマト (ミニ系)	トマト (大玉系)	キュウリ
栽培方式	ヤシ殻養液栽培	ロックウール 養液栽培	ヤシ殻養液栽培	土耕
面積 (ha)	8.0	3.0	1.5	0.3
栽植密度	128 株/ベッド	226 株/ベッド	176 株/ベッド	90 株/畝
誘引高さ (m)	4.1 (栽培ベッド の地際から 3.3)	3.0 (栽培ベッド の地際から 2.65)	3.2 (栽培ベッド の地際から 2.6)	1.8
ベッド長 さ (m)	64	56	44	43
ベッド間 (m)	1.6	1.6	1.6	1.7
株間 (m)	0.50	0.25	0.25	0.90
慣行散布 方法	機械散布	機械散布	機械散布, 手散 布	カート式手散 布
定植日	4/10	8/24	9/10	6/10
試験日	10/2	10/6	11/20	7/17, 7/29, 8/5
試験項目	付着性能, バッ テリ電圧	付着性能	付着性能, 作業 時間, 連続運転	付着性能
噴口数	18	16	12	10

*試験は 2015 年に行った。

3. 結果および考察

1) トマトを対象とした慣行散布量における防除試験

散布 7 日後のトマトのウドンコ病に対する防除試験結果を表 4-3 に示す。被覆面積率はエアアシストを行わなかった静電散布の機械区 2 が 74 % と最も悪くなった。これは、松尾²⁶⁾ (1984) や Almekinders ら²⁷⁾ (1992) が報告しているように、感水紙設置位置が、最も繁茂している群落中心部であったために、静電散布における噴霧液滴の作物群落内への貫通性や到達性に乏しかったことに起因すると推察された。しかし、発病葉数は、手散布区を含むすべての機械区において 3.4~6.9 % と低い水準を維持した。また、防除価は、エアアシストおよび静電がない機械区 1 で 91.5 と手散布区の 92.3 より低くなったが、静電がある機械区 2 および 3 において、それぞれ 93.0, 95.8 と手散布より高くなったものの、すべての試験区間で 90 以上となり、エアアシスト静電散布による大幅な効果の向上は見られなかった。本試験条件である 200 L/10 a で散布した場合、最も被覆面積率の低かった機械区 2 の 74 % 程度でも十分な防除価を得られ、必要以上の散布量であった可能性があると推察する。

表 4-3 トマトを対象とした慣行散布量における防除試験結果

Table 4-3 Result of pests control test for tomato cultivation under a conventional spray volume

	静電	エアアシ スト	被覆面積率 (%)	発病葉率 (%)	防除価
手散布区	なし	なし	—	6.3 ^{ab}	92.3
機械区 1	なし	なし	96 ^a	6.9 ^a	91.5
機械区 2	あり	なし	74 ^b	5.6 ^{ab}	93.0
機械区 3	あり	あり	100 ^a	3.4 ^b	95.8

* 手散布区の被覆面積率は欠測。被覆面積率の異なる英字間は菜園ごとに5%水準で有意差があることを示す。

2) トマトを対象とした散布量削減時における防除試験

トマトを対象とした散布量削減時における防除試験結果を表 4-4 に示す。散布量を 20 %削減した 160 L/10 a の試験区では、被覆面積率はエアアシストを行った機械区 3 では 98 %となり、エアアシストを行わなかった手散布区および機械区 1 と比べて大きくなり、エアアシストによる薬液の付着性能の向上が確認された。これは、1) と同様に静電散布にエアアシスト技術を加えることで噴霧液滴の作物群落内への到達性が向上したことに起因すると推察される。発病葉率も同様に手散布区で 27.2 %、エアアシストを行わなかった機械区 1 で 20.5 %となったのに対し、エアアシストを行った機械区 3 では 9.5 %となり、大きく抑制された。また、防除価についても手散布区が 82.4、機械区 1 が 86.9 であったのに対し、機械区 3 では 95.8 と最も高くなった。条件が異なる別の実験ではあるが、1) の機械区 3 と比較すると、散布量を 20 %削減した場合においても、エアアシスト静電散布を行うことで、防除効果を落とすことなく散布量を低減できる可能性が示唆された。

一方で、散布量を 40 %削減した 120 L/10 a の試験区では、エアアシストを行わなかった機械区 2 については発病葉率が 33.0 %、防除価が 75.2 と最も悪化した。エアアシストを行った機械区 4 について発病葉率は 25.0 %と機械区 2 よりも抑えられたものの双方とも手散布並みとなった。本条件において、散布量 20 %削減区においてエアアシストの効果が顕著であったが、40 %削減区ではその差は小さくなったことから、様々な栽培条件に合わせたエアアシスト静電散布の最適な散布量を検討する必要があると考える。

表 4-4 トマトを対象とした散布量削減時における防除試験結果

Table 4-4 Result of pests control test under the spray volume reduction in tomato cultivation

	静電	エアアシスト	散布量 (L/10a)	被覆面積率 (%)	発病葉率 (%)	防除価
手散布区	なし	なし	160	58 ^a	27.2 ^{ac}	82.4
機械区 1	あり	なし	160	67 ^a	20.5 ^a	86.9
機械区 2	あり	なし	120	69 ^{ac}	33.0 ^c	75.2
機械区 3	あり	あり	160	98 ^b	9.5 ^b	95.8
機械区 4	あり	あり	120	86 ^{bc}	25.0 ^{ab}	81.6

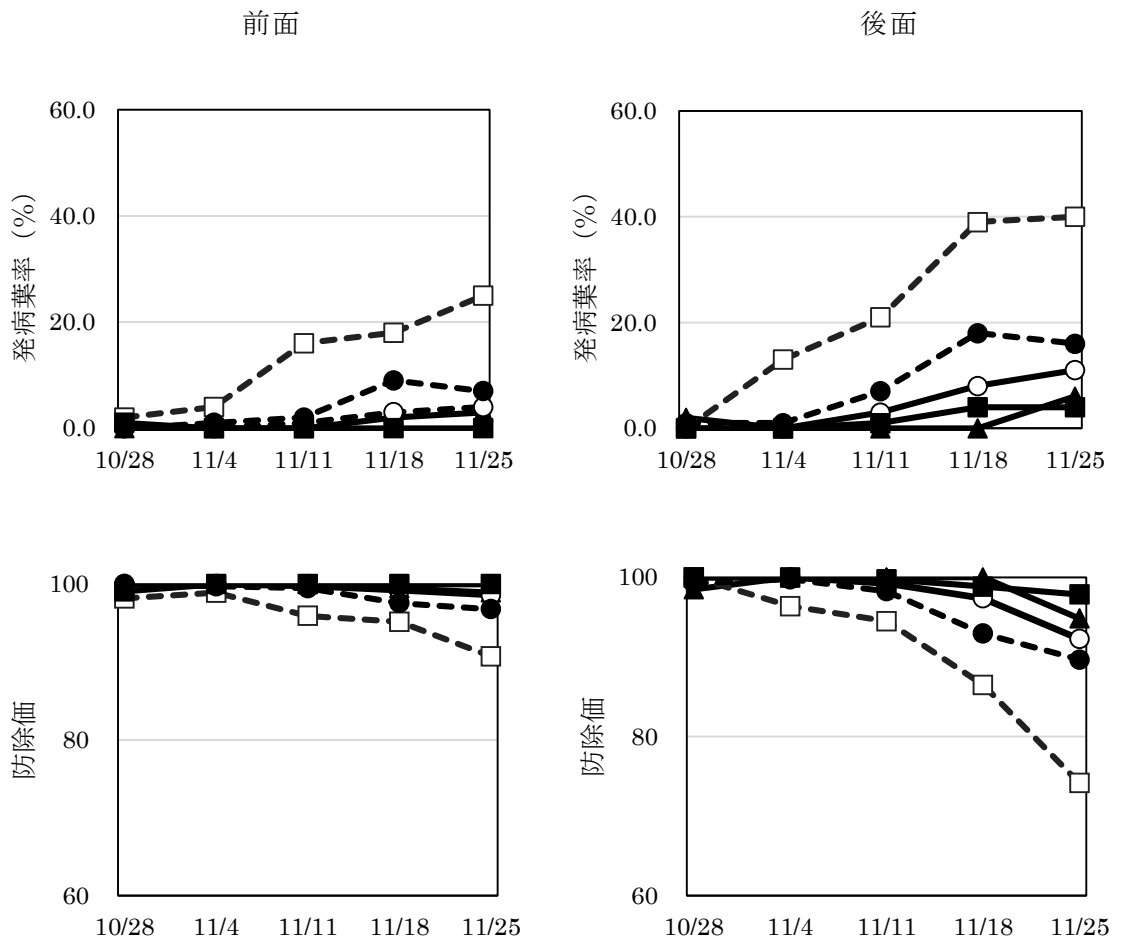
* 被覆面積率の異なる英字間は 5%水準で有意差があることを示す。

3) キュウリを対象とした防除試験

キュウリを対象とした付着試験の結果、被覆面積率は散布量 240 L/10 a で行った手散布区で 55 %、エアアシストを行わなかった機械区 1 で 43 %、エアアシストを行った機械区 3 で 60 %となった。また、散布量 180 L/10 a でエアアシストを行わなかった機械区 2 で 42 %、エアアシストを行った機械区 4 で 60 %となった。本試験条件では 1) や 2) の結果と異なり、散布量の削減による被覆面積率への影響は確認されなかった。これは、葉の形状や葉面積指数等の影響が寄与していると推察されるが、詳細な検証を行うことが今後の課題である。一方、エアアシストを行うことにより被覆面積率が約 1.4 倍向上することがわかった。この結果についてはトマト同様に群落内部への噴霧液滴の到達性が向上したことに起因すると推察された。

それぞれの試験区の発病葉率および防除価の推移を図 4-1 に示す。後面の発病葉率は、240 L/10 a の試験区では、手散布区において 0~6 %、エアアシストを行わなかった機械区 1 において 0~11 %、エアアシストを行った機械区 3 で 0~4 %と試験期間を通して低水準で推移した。一方、最終調査日である 11 月 25 日において、散布量 180 L/10 a の試験区では、エアアシストを行わなかった機械区 2 で 40 %と最も高く、エアアシストを行った機械区 4 と比べて 2.5 倍の発病葉率となり、散布量を削減した方がエアアシストの効果が顕著となった。後面の防除価は、240 L/10 a の試験区では、手散布区において 100~95、エアアシストを行わなかった機械区 1 において 100~92、エアアシストを行った機械区 3 で 100~98 となった。一方、最終調査日である 11 月 25 日において、散布量 180 L/10 a の試験区では、エアアシストを行わなかった機械区 2 で

74 となり，エアアシストを行った機械区 4 の 90 と比べ約 18%悪化した。本条件において，キュウリ群落内部となる後面の防除価は，散布量 240 L/10 a ではエアアシストの有無による差は見られなかったものの，散布量を削減し 180 L/10 a にした場合においては顕著な差が見られたことから，散布量をさらに削減してもエアアシスト静電散布を行うことにより高い防除効果を維持できる可能性があると考ええる。



凡例	試験区	静電	エアアシスト	散布量 (L/10a)
▲	手散布区	なし	なし	240
○	機械区 1	あり	なし	240
□	機械区 2	あり	なし	180
■	機械区 3	あり	あり	240
●	機械区 4	あり	あり	180

図 4-1 キュウリを対象とした防除試験結果

Fig. 4-1 Result of pests control of cucumber cultivation

4) 現地実証試験

福島県，千葉県，広島県のトマトハイワイヤ栽培，千葉県のキュウリ土耕栽培での現地実証試験における実際の散布量および薬液の付着性能試験結果を表 4-5 に示す。

実際の散布量は，菜園によってレールの幅や角度が厳密には一定になっておらず，また自動走行台車のバッテリーの電圧の状況などにより走行速度に変化が生じ，設定に比べて最大で 26%の変動があり，結果としていずれも慣行機の散布量が多い状況での試験となった。栽培ベッド間に温湯管等をレールとして使用するために安定した走行が可能なトマトハイワイヤ栽培においては，散布量が同程度（A 菜園）であれば，実用機の薬液の被覆面積率は，慣行手散布の 2.6 倍優れた。実用機の散布量を約 34%まで削減した場合（B 菜園）でも 44~46%と同程度の薬液の被覆面積率であった。さらに，慣行機による散布では薬液の被覆面積率は 2~4%とほとんど付着していなかった場所においても，実用機では散布量が半分となる片道散布を行っても 51%の薬液の被覆面積率を有した（C 菜園）。このことから，実際のトマト栽培現場における実用機を用いた防除でも，付着性能を向上させ，かつ散布量削減の可能性が示唆されたと考える。

表 4-5 実証試験における付着性能試験結果

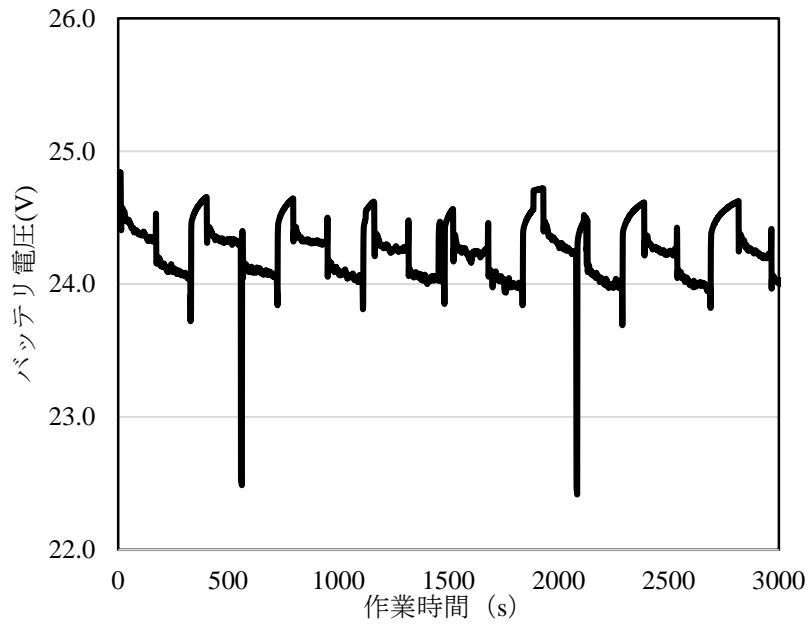
Table 4-5 Result of adhesion characteristics test

		トマトハイワイヤ栽培				土耕キュウリ
		A 菜園	B 菜園	C 菜園		栽培
				往復散布	片道散布	D 農園
慣行	散布量 (L/列)	40	6	25	14	—
機	被覆面積率 (%)	32 ^a	44 ^a	4 ^a	2 ^a	—
実用	散布量 (L/列)	35	2	21	10	16
機	被覆面積率 (%)	100 ^b	46 ^a	69 ^b	51 ^c	26 ^a
手散	散布量 (L/列)	-	-	-	-	22
布	被覆面積率 (%)	-	-	-	-	54 ^b

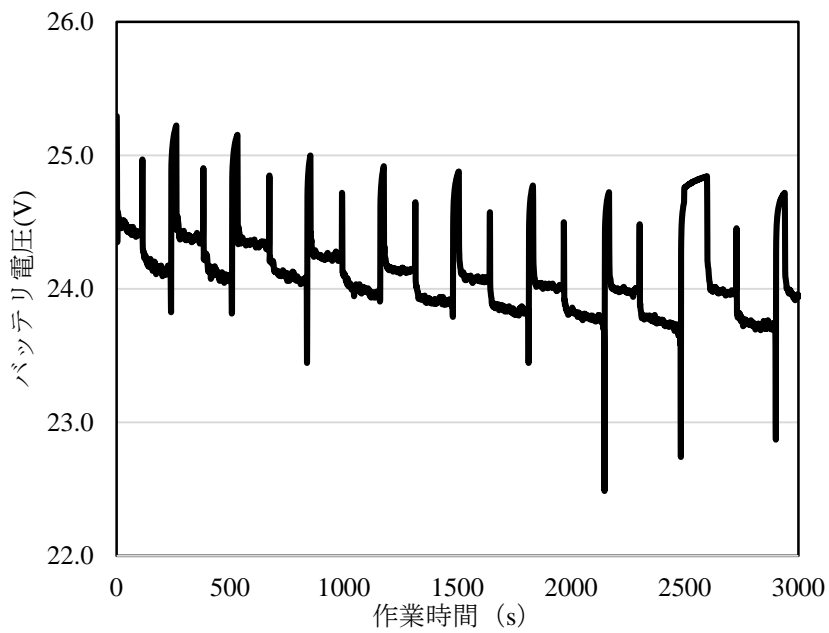
* 土耕キュウリ栽培の手散布区は手押しカート。被覆面積率の異なる英字間は菜園ごとに 5%水準で有意差があることを示す。

C 菜園におけるトマトハイワイヤ栽培の防除作業において、取り回し作業を含めた 1 列当たりの作業時間は、3 分 40 秒となり、15 分 34 秒の慣行手散布に比べ、作業時間で約 1/4 となり、省力的な作業に寄与できることが確認された。

A 菜園で行った散布作業中のバッテリー電圧の経時変化を図 4-2 に示す。慣行機の電源電圧は、開始時 24.7 V、7 列散布後 24.6 V とほぼ同等となった。一方、実用機においては、開始時 25.3 V、7 列散布後には 24.8 V と 0.5 V の電圧が降下した。また、散布時における電圧降下は慣行機で 0.2 V 程度であったのに対し、実用機は 0.7~0.8 V 程度降下した。これは、エアポンプを搭載することにより消費電力が約 130 W 増加したことに起因すると推察される。ただし、C 菜園で行った 65 列（3 時間 40 分、総走行距離約 5.9 km）の連続散布試験では、実用機においても電圧降下による不具合は発生せず、安定した散布作業を確認した。



(a) 慣行機



(b) 実用機

図 4-2 散布作業中のバッテリー電圧の経時変化

Fig. 4-2 Change in the voltage of battery in spraying operation

一方、土耕キュウリ栽培では、一般に畝間の走行路が軟弱状態である。灌水や農薬散布により路面が濡れることでさらに軟弱となり、実用機が走行するたびに車輪により轍をつくり、レール上を走行するような安定した走行は不可能であった。ロール方向の最大角度を調査したところ、レール上の走行状態ではほぼ0°であったのに対し、本試験で走行した土耕の路面上では、最大で13.5°となり、安定した走行は不可能であった。この結果、薬液の付着性能が手散布に比べ劣り、さらに、取扱性、耐久性等にも課題が残った。このような条件へ実用機を導入する場合、走行が安定し回行などが円滑に行われるように、走行路、畝、枕路等を検討する必要がある。

4. 総合考察

本章では、トマトおよびキュウリ栽培の試験ハウス内における防除作業において、慣行の手散布および実用機を供試した際の薬液の付着性能、実際にウドンコ病を発生させ、どの程度病気を抑えられたか、その防除効果を評価し、その結果を踏まえて実際の栽培現場にて実用機の実用性を検討した。その結果、トマト、キュウリともに慣行散布と比べて実用機のエアアシスト静電散布は被覆面積率、発病葉数、防除価に優れ、さらに、散布量削減の可能性を見出した。状況によって異なると推察するが、Lawは散布薬液の60~70%は無駄になっていると報告している⁶⁰⁾。エアアシスト静電散布を行うことによって無駄になっていた薬液が本来の目的の場所に付着するようになったため、散布量を削減しても防除効果が維持できたと考察する。

一方、施設内を自動走行する技術を有した無人搬送車(Automatic Guided Vehicle, 以下AGV)の研究はこれまでさまざまな形で行われてきており⁶¹⁾、主に工場や倉庫などにおいて導入されてきている。これらは主に誘導線、磁気テープ、マーカまたは反射ミラーなどの走行ガイドにより誘導されているが、最近では電子地図上で自己位置を推定しながら設定経路を自律走行するタイプも実用化されている⁶²⁾。また、近年、GPSによる位置情報やカメラによる画像処理技術の向上により比較的安価に直線走行をアシストする装置も開発されている⁶³⁾。農用施設内におけるこれらの技術の利用に関する研究は、反射板と反射赤外光を感知しながら自己位置検出する無人作業者の誘導方式の検討⁶⁴⁾、⁶⁵⁾、床面が舗装されている温室メロンにおいてAGVを利用した無人散布機の開発⁴⁰⁾などが報告されている。しかしながら、AGVの導入および維持に

はコストがかかること、温室内では GPS の利用は困難であること、薬剤散布によりカメラレンズへの薬液付着により画像処理精度が低下することが予想される。

また、土耕栽培における路面は、農薬散布や灌水により水分を多く含み軟弱であること、その状態で車両が走行することにより、さらに凸凹が多くなることが確認され、良好な操作性が得られない。車両にこれらの欠点をカバーする装置を付加することは技術的には可能であると考えられるが、現時点では車両の重量およびコスト増を考慮すると、定植前に機械適応性の高い走行路、畝および枕地を検討するほうが現実的であると思われる。

第V章 総括

本研究の目的は、散布回数の多い施設内における防除作業において、農薬散布作業の軽労化・省力化、および農薬被曝を回避しつつ、かつ、慣行手散布並みの良好な付着性能を両立するエアアシスト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にまず国内農薬散布作業における現状を明らかにし、既往の静電散布技術に関する研究成果を分析した。

次に、作物群落内へ液滴の到達性および付着性能の向上を目的として、風洞内においてエアアシストが低濃度多量散布の静電散布における噴霧液滴の帯電および到達距離に及ぼす影響について明らかにし、メロンへの付着性能について検討した。

続いて、得られた知見から、生産現場での実用化を見据えたエアアシスト静電散布機を開発し、試験施設内のメロン栽培において、付着性能と防除試験を行うことにより、エアアシスト静電散布の効果を確認するとともに、実用機としての問題点を整理し、改良を行った。

さらに、改良したエアアシスト静電散布機を供試し、トマトおよびキュウリにおける付着性能、防除効果を検討し、エアアシスト静電散布による農薬散布量低減の可能性を示した。

以下、本研究の内容を総括する。

1. 国内における農薬散布の現状とエアアシスト静電散布の可能性

1) 農薬の利用は、作物生産にとって不可欠であり、使用しなかった場合の被害は甚大となる。特に野菜では被害が大きく、収穫が長期にわたるトマトなどでは顕著であ

る。そのため、野菜では、水田稲作と比べて2~4倍程度使用回数が多く、農薬使用量と薬剤費の削減が求められている。

2) 日本の農業就業人口のうち、自家農業または兼業に主に従事している基幹的農業従事者は1960年に1175万人から2015年で175万人と、右肩下がりになっている。農業労働力の高齢化が叫ばれているが、1960年の60歳以上の基幹的農業従事者は1621千人、2015年では1374千人と数字の上では15%程度の減少にとどまっている。一方、59歳までの若年層の従事者については10129千人から380千人と55年で96.3%もの労働力を失っている。この結果、基幹的農業従事者の平均年齢は67歳となっており、他産業の40歳前後と比較しても極端に高くなっており、一層の省力・軽労化および農作業の安全が求められている。

3) 施設栽培における防除は、密閉された空間なので、病害虫が発生しやすく、また、いったん病害虫の被害を受けると施設全体へ短期間で蔓延してしまう危険性がある。そのため、現状では、予防的な意味も含めて農薬散布作業が頻繁に行われており、作業者にとっては大きな負担となっている。そのため、施設内に立ち入らずに作業を行う無人防除が普及しているが、繁茂した作物に対しては、手散布に比べ、群落内部への到達性が悪く、葉裏への農薬付着量が低下する等の問題が指摘されている。

4) 従来の散布方法では付着困難な葉裏への付着性能を向上させたのが静電散布である。静電散布はノズル近くの植物や先鋭部に良く付着する利点があるが、凹部には付着しにくい、作物群落内への貫通性や到達性に乏しい、電極が濡れると漏電を起し、噴霧液滴への帯電ができなくなる。

5) 本研究では、国内の施設内の慣行散布である低濃度多量散布において、無人の静電散布装置では作物群落の内外で農薬付着に差が生じるという問題点を、静電散布にエアアシストを行うことにより、作物群落内への到達性を向上させ、群落手前と群落内の付着ムラを削減できるという仮説を提案した。この技術を用いることで、散布量削減も期待でき、散布回数の多い施設内における防除作業において、農薬散布作業の軽労化・省力化、農薬被曝を回避しつつ、かつ、慣行手散布並みの良好な付着性能を両立するエアアシスト静電散布技術を開発する。

2. エアアシスト静電散布における噴霧液滴の物理的特性

供試した静電散布装置に吐出量 0.13~2.6L/min の動噴用中空円錐噴霧ノズルを使用し、散布圧力 1.5 MPa で水平噴霧した場合、以下の項目が明らかとなった。

- 1) 噴霧液滴が中空円錐の形状を保ったのは、エアアシスト風速 0 m/s の場合、30cm 程度であり、それ以上の散布距離では、液滴は落下したと考えられる。一方、同条件下でエアアシストを行った場合、エアアシスト風速 0 m/s に比べて、風速分布は一様となった。また、電極に電圧を印加しても、風速分布に影響しなかった。
- 2) 供試ノズル TXVK4 では、噴霧ノズルの高さ 100cm、エアアシスト風速 0 m/s での水平方向噴霧において、散布距離 100cm までの液滴の落下量割合は 60%以上となり、多くの液滴は対象物に到達せずに落下していることが明らかとなった。一方エアアシストを行った場合、同落下量割合は 1%未満となり、多くの液滴が落下することなく対象物に到達したことが明らかとなった。
- 3) 粒子径 38 μm のノズル TXVK1 では、エアアシスト風速 0 m/s の場合、散布距離

100cm の空間中で液滴が持つ帯電量の 90%以上を失うことが明らかとなった。エアアシスト風速 3 m/s の場合、失う帯電量は 20%程度となり、エアアシストによる比電荷減少抑制の効果を認めた。一方、比較的粒子径が大きなノズル TXVK12 および TXVK18 では、TXVK1 と同様に散布距離の増大とともに到達比電荷は減少したものの、エアアシストによる比電荷減少抑制の効果は小さくなった。

4) 粒子径 38 μm の TXVK1 では、エアアシスト風速 0 m/s の場合、印加電圧約 3kV で最大の比電荷を示すが、エアアシスト風速 3 m/s の場合、印加電圧 6kV で最大の比電荷を示した。これに対し、粒子径 165, 200 μm の TXVK12 および TXVK18 では、エアアシストによる到達比電荷に変化は見られず、印加電圧 8.5kV 程度まで直線的に増加しその後頭打ちとなった。粒子径の小さなノズルを用いる場合には、エアアシストを行うことにより無風の場合と比べて高い電極印加電圧を与えることができ、到達比電荷を大きくすることが可能であった。

5) 風洞内におけるメロンを対象とした付着試験の結果、エアアシストを行うことで感水紙の被覆面積率は最大で約 7 倍に向上した。

3. 園芸施設用エアアシスト静電散布機の開発

群落内外の散布ムラ解消を狙い、エアアシスト静電散布機を開発し、ハウス内防除における付着効果、防除試験を行い以下の結果を得た。

1) 軸流ファン、遠心ファンおよび圧縮エアを用いたエアアシスト方法を比較した結果、各方式とも送風性能に問題はなかったものの、実際の栽培施設での防除を想定した際、重量バランス、取扱い性から圧縮エア方式が最も優れた。また、中空円錐ノズル

を用いた静電散布の場合、ノズル中心部の渦流から外れた液滴に効果的にエアアシストを行うことができた。

2) 1) の知見からエアアシスト静電散布機を開発した。開発機は、自動走行台車、静電噴口、および圧縮エア吐出ノズルから構成される。圧縮エアは試験栽培温室の外にエアコンプレッサを設置し、ホースにて圧縮エア吐出ノズルと接続した。

3) 実際のハウスメロン栽培での無人防除を想定し、開発機を供試して防除試験を行った結果、付着試験において静電散布、エアアシストとも行わなかった試験区の被覆面積率が 11 であったのに対し、双方とも行った試験区は 54 と約 5 倍に向上した。また、防除価についても、静電散布、エアアシストを行わなかった試験区は 41 であったのに対し、静電散布にエアアシストを組み合わせた試験区は 66 まで約 1.5 倍に向上し、エアアシストの効果を確認した。

4) 改良したエアアシスト静電散布機は、自動走行台車部、静電噴口部およびエアアシスト部の 3 つ技術を組み合わせた構成となっている。自動走行台車に搭載したエアポンプからの圧縮空気が、静電噴口部に設置してあるエアアシストノズルから吐出することで、静電噴口から噴霧された薬液の作物群落内への到達力をアシスト可能な構造とした。

4. 試験ハウス内における防除試験および現地実証試験

開発したエアアシスト静電散布機の実用性を向上させるための改良を施し、散布量削減の可能性を検討するため、トマトおよびキュウリの試験温室内での性能試験および現地実証試験を行い、実用性を評価し、以下の結果を得た。

- 1) トマトのウドンコ病を対象として、エアアシスト静電散布が防除効果に及ぼす影響を調査した結果、散布量 200 L/10 a では、手散布を含めたすべての試験区において防除価 90 以上となり、エアアシスト静電散布の効果が確認できなかった。一方、散布量を 20%削減 (160 L/10 a) した試験区では、エアアシスト静電散布を行った試験区の防除価は 95.3 と最も高くなり、さらに発病葉率を抑制する効果を確認した。
- 2) キュウリのウドンコ病を対象とした防除試験の結果、エアアシストを行った試験区で、発病葉率が低く、防除価が高くなった。また、エアアシストを行わなかった場合、散布量を 25%削減した試験区では防除価は 74 まで低減したが、エアアシストを行う事で 90 に維持され、エアアシスト静電散布を行うことで防除効果を維持しつつ、散布量削減の見通しを得た。
- 3) 栽培ベッド間に設置されている温湯管をレールとして利用し、安定した走行が可能なトマトハイワイヤ栽培における現地実証試験を行った結果、実用機の薬液の付着性能は慣行機や手散布よりも優れ、さらに散布量を削減できる見通しを得た。また、実用機は慣行手散布に比べ、作業時間で約 1/4 となり、省力的な作業に寄与できることが確認された。
- 4) 土耕キュウリ栽培のように走行路面が軟弱で均平でない条件では、実用機の走行が安定しなかった。その結果、薬液の付着性能が慣行手散布に比べ劣り、エアアシスト静電散布の効果が得られなかった。このような条件へ実用機を導入する場合、走行が安定し回行などが円滑に行われるように、走行路、畝、枕路等を検討する必要がある。

謝辞

本論文を取りまとめるにあたり、懇切なるご指導を頂きました神戸大学農学部 食料環境システム学科 生産環境工学コース 生物生産機械工学教育研究分野の川村恒夫教授に心より深く感謝いたします。

神戸大学農学部 食料環境システム学科 生産環境工学コース 生物生産機械工学教育研究分野 庄司浩一准教授，神戸大学農学部 食料環境システム学科 生産環境工学コース 農産食品プロセス工学教育研究分野 豊田浄彦教授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いただいた農業技術革新工学研究センター総合機械化研究領域 宮崎昌宏領域長，小林研企画部長，中山夏希研究員，グエン テイ タン ロアン特別研究員に深く感謝の意を表します。

防除試験では，静岡県農林技術研究所の山根俊上席研究員，今原淳吾上席研究員，埼玉県農業技術研究センターの塚澤和憲専門研究員，中畝誠研究員，宮崎大学農学部植物生産環境科学科 槐島芳徳准教授，日吉健二助教，宮崎大学 産学・地域連携センター 小林太一准教授，実証試験では，千葉県農林総合研究センターの大木浩主席研究員，福島，千葉，広島県のトマト菜園およびキュウリ農園の関係各位に御協力いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

神戸大学 自然科学系先端融合研究環 窪田陽介特命助教には研究当初から，調査，防除試験，取りまとめ全般におきまして多大なる御指導御協力を賜りました。ここに

謝意を申し上げます。

本研究は 2012～2015 年度まで農業機械等緊急開発事業において，農業技術革新工学研究センター，みのる産業株式会社，株式会社やまびこが共同研究として実施したものです。記して関係各位に心よりお礼申し上げます。

引用文献

- 1) 日本植物防疫協会, 1993. 農薬を使用しないで栽培した場合の病害虫の被害に関する調査報告.
- 2) 北村恭朗, 2014. 現代社会における農薬の役割およびその開発に関する現状について. 農薬調査研究報告 (6) , 53-63, 2014.
- 3) 日本植物防疫協会, 2015, 農薬要覧
- 4) 熊本県農林水産部 農業技術課, 2015. 「特別栽培農産物に係る表示ガイドライン」等における熊本県慣行レベル.

http://www.pref.kumamoto.jp/common/UploadFileOutput.ashx?c_id=3&id=1208&sub_id=3&flid=53456

Accessed June. 9, 2016.
- 5) 宮崎県農政水産部農業経営支援課, 2013. 宮崎県農作物栽培慣行基準.

<http://www.pref.miyazaki.lg.jp/nogyokeieishien/shigoto/nogyo/index-04.html>

Accessed June. 9, 2016.
- 6) 新潟県農林水産部農産園芸課, 2014. 新潟県における節減対象農薬使用回数および化学肥料使用量の地域慣行栽培基準および県認証基準.

http://www.niigata-ninshou.jp/nousan/image/kijyun_kome_daizu.pdf

Accessed June. 9, 2016.
- 7) 農林水産省大臣官房統計部, 2007. 園芸用施設および農業用廃プラスチックに関する調査. <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001051847>

Accessed June. 9, 2016.

- 8) 農林水産省大臣官房統計部, 2016. 2015年世界農林業センサスの結果の概要.

http://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/2015/pdf/census_15k_20160427.pdf

Accessed June. 9, 2016.

- 9) 厚生労働省大臣官房統計情報部, 2016. 平成27年賃金構造基本統計調査の概要

- 10) 西山邦隆, 1974. 農薬の危害防止に関する研究 第2報ビニールハウスにおける農薬散布時の人体への附着量について. 日本農村医学会雑誌, 23 (1), 8-14.

- 11) 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. 農作業研究, 21 (3), 40-53.

- 12) 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.

- 13) 西山邦隆, 1974. 農薬の危害防止に関する研究 第1報ビニールハウスにおける農薬散布時の気中濃度と散布農薬が生体に及ぼす急性的影響について. 日本農村医学会雑誌, 23 (1), 1-7.

- 14) 米村純一, 長岡進一, 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 ビニー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.

- 15) 日本植物防疫協会, 1990. 農薬の散布と付着.

- 16) Coffee, R.A., 1981. Electrodynamic crop spraying. Outlook for Agriculture, 10 (7),

350-356.

- 17) Law, S. E., 1978. Embedded electrode electrostatic-induction spray-charging nozzle. Transactions. ASAE 21, 1096-1104.
- 18) 渡辺保, 1962. 静電塗装のはなし. 金属表面技術現場パンフレット, Vol.9 (5), 21-23.
- 19) 山辺秀敏, 2000. 静電塗装. 色材, 73 (10), 512-516.
- 20) 大沼清利, 2010. 塗装技術発展の系統化調査. 技術の系統化調査報告第15集.
- 21) 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.
- 22) 田辺一, 1953. 静電荷の撒粉への応用. 農機学会誌, 14 (3,4), 80-81
- 23) 津賀幸之助, 市来秀之, 梶山道雄, 1988. 施設園芸における静電散布法の研究—薬剤の帯電方法とその特性—. 農業機械学会誌, 50 (1), 61-68.
- 24) 津賀幸之助, 市来秀之, 梶山道雄, 1988. 施設園芸における静電散布法の研究—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.
- 25) Law. S. E., Bowen H. D., 1966. Charging liquid spray by electrostatic induction. Transactions of the ASAE, 9 (4), 501-506.
- 26) 松尾昌樹, 1984. 静電散布について. 農機学会シンポジウム 精密防除, 17-27.
- 27) Almekinders, H., Ozkan, H.E., Reichard, D.L., Carpenter, T.G., Brazee, R.D., 1992. Spray deposit patterns of an electrostatic atomizer. ASAE, 35 (5), 1361-1367.
- 28) McCool, W. C., Walker, J. T., 1987. Air-assist system for an electrodynamic sprayer.

Transactions of the ASAE, 30 (3) , 624-629.

- 29) Almekinders, H., Ozkan, H.E., Reichard, D.L., Carpenter, T.G., Brazee, R.D., 1993. Deposition efficiency of air-assisted, charged sprays in a wind tunnel. ASAE, 36 (2) , 321-325.
- 30) Khdair, A. I., Carpenter, T. G., Reichard, D. L., 1994. Effects of air jets on deposition of charged spray in plant canopies. Transactions of the ASAE, 37 (5) , 1423-1429.
- 31) Western, N. M., Hislop, E. C., Dalton, W. J., 1994. Experimental air-assisted electrohydrodynamic spraying. Crop protection, 13 (3) , 179-188.
- 32) Gupta, C.P., Duc, T.X., 1996. Deposition studies of a hand-held air-assisted electrostatic sprayer. ASAE, 39 (5), 1633-1639.
- 33) Carlton, J.B., Bouse, L.F., Kirk, I.W., 1995. Electrostatic charging of aerial spray over cotton. ASAE, 38 (6) , 1641-1645.
- 34) Sumner, H.R., Herzog, G.A., Sumner, P.E., Bader, M., and Mullinix, B.G., 2smi000. Chemical application Equipment for improved Deposition in Cotton. The Journal of Cotton science, 4, 19-27.
- 35) Derksen, R.C., Sanderson, J.P., 1996. Volume, speed and distribution technique effects on poinsettia foliar deposits. ASAE, 39 (1), 5-9 .
- 36) Abdelbagi, H.A., and Adams, A.J., 1987. Influence of droplet size, air-assistance and electrostatic charge upon the distribution of ultra-low-volume sprays on tomatoes. Crop Protection, Vol.6, 226-233.

- 37) 松尾昌樹, 内野敏剛, 1991. 静電式スピードスプレーヤの研究. 千葉大園学報, 44, 99-104.
- 38) 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.
- 39) 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
- 40) 山根俊, 宮崎昌宏, 斉藤秀文, 大村和宏, 青野守, 大須賀隆司, 2010. 低濃度多量散布の静電散布装置に関する研究—温室メロン用静電散布ロボットの開発—. 農業機械学会誌, 72 (6), 70-76.
- 41) 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 (9) , 1646-1651.
- 42) Kabashima, J., Giles, D. K., Parrella, M. P., 1995. Electrostatic sprayers improve pesticide efficacy in greenhouse. *California Agriculture*, 49 (4) , 31-35.
- 43) 津賀幸之介, 市来秀之, 梶山道雄, 1988. 施設園芸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.
- 44) 松尾昌樹, 内野敏剛, 飯本光雄, 1987. 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.

- 45) 窪田陽介, 臼井善彦, 林和信, 水上智道, 宮原佳彦, 大里大, 中野和弘,
2010. 感水紙の薬液付着液斑被覆面積率を簡易かつ高精度に測定する画像処理ソフトウェアの開発. 農業情報研究, 19 (2), 16-21.
- 46) Marchant, J. A., Green, R.1982. An electrostatic charging system for hydraulic spray nozzles. Journal of Agricultural engineering research, 27, 309-319.
- 47) 中島耀二, 2003. エアロゾルを用いた微粒子の静電捕集. エアロゾル研究, 18 (2), 92-97.
- 48) 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.
- 49) 吉永慶太, 山根俊, 宮崎昌宏, 中山夏希, 窪田陽介, 小林研, 2014. エアアシスト静電散布における噴霧液滴の物理的特性に関する研究. 農業食料工学会誌 76 (3), 261-270.
- 50) 安井さおり, 山中俊夫, 相良和伸, 甲谷寿史, 桃井良尚, 2011. 空気中に噴霧された水粒子の挙動解析に関する基礎的研究. 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 173-176.
- 51) Matthews, G.A., 1982. Pesticide Application Methods. 3rd Edition ,87.
- 52) Splinter, W. E., 1968. Electrostatic Charging of Agricultural Sprays. Transactions. ASAE, 11, 491-495.
- 53) 内野敏剛. 1999. コロナ放電・高電界を応用した農薬散布システム. プラズマ・核融合学会誌, 75 (6), 678-684.

- 54) 日本植物防疫協会, 2001. 新農薬実用化試験実施の手引き－薬効薬害圃場試験編－.
- 55) Smith, D. B., Askew, S. D., Morris, W. H., Shaw, D. R., Boyette, M., 2000. Droplet size and leaf morphology effects on pesticide spray deposition. *ASAE*, 43 (2), 255-259.
- 56) 國本佳範, 井上雅央, 1997. 感水紙の農薬付着指標と殺虫効果の関係について. *日本応用動物昆虫学会誌*. 41 (1), 51-54.
- 57) 國本佳範, 西野精二, 大辻純一, 印田清秀, 1998. キク栽培現場での薬液の付着程度がハダニ防除効果に及ぼす影響. *日本応用動物昆虫学会誌*. 41 (3), 135-140.
- 58) 藤田剛輝, 三瓶尚子, 穴澤拓未, 尾形正, 菅野英二, 志村浩雄, 2009. 薬液付着程度とモモ灰星病およびカンザワハダニに対する防除効果の関係. *農研機構成果情報*.
- 59) 櫛田俊明, 木村佳子, 雪田金助, 2006. リンゴわい化栽培園における農薬飛散低減条件でのスピードスプレー散布による病害虫防除. *北日本病虫研報*, 57, 91-95
- 60) 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.
- 61) 津村敏弘, 1987. 無人搬送車とその制御. *計測と制御*, 26 (7), 43-48.
- 62) 青木邦彦, 古野英昭, 永岡淳, 古川光治, 2012. 自律走行型無人搬送車「インテリジェントキャリー」. *日立評論*, 12月号, 56-57.

- 63) 埜圭二, 山下貴史, 三菱農機株式会社, 2014. 高精度直線作業アシスト装置の開発. 生研センター研究報告会, 1-6.
- 64) 山下淳, 佐藤員暢, 疋田光伯, 1990. 施設園芸用無人作業車の誘導方式の検討. 農業機械学会誌, 52 (supplement) 273-274.
- 65) 山下淳, 佐藤員暢, 疋田光伯, 井本武, 安部武美, 1991. 施設園芸用無人運搬車の試作とその実用性能. 農業機械学会誌, 53 (5), 75-84.