

小特集

放電プラズマ・電磁界を応用した生物学・農学的研究

6. コロナ放電・高電界を応用した農薬散布システム

内 野 敏 剛

(九州大学農学部)

Agricultural Chemical Application System Using Corona Discharge and High Electric Fields

UCHINO Toshitaka

Faulty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

(Received 26 March 1999)

Abstract

Research on the electrostatic chemical application system has been carried out for the purpose of improving spray deposition and reducing spray drift. By means of corona discharge or electrostatic induction, particles of agricultural chemicals become electrostatically charged. Many electrostatic sprayers are developed and tested. The results suggested that these sprayers improved the spray deposition onto plants or plant models. Several electrostatic sprayers are currently utilized.

Keywords:

electrostatic sprayer, induction charging, direct charging, ionized field charging, corona electric discharge, agricultural chemical application, spray deposition

6.1 はじめに

我が国の農薬使用量は単位面積あたりでヨーロッパの6倍、アメリカの7倍といわれ[1]、作業者の被曝、環境の汚染などが危惧されて久しい。しかしながら、農薬による防除を行わない場合の病害虫による平均推定減収率は、水稻で35%、施設栽培キュウリにいたっては94%とされている[2]。若年労働力が減少した農村を省力化し、高い農業生産性を維持するためには、現状では農薬による防除は不可欠となっている。

農薬散布による上記の問題は散布薬剤の付着効率の不良、付着の不均一、透過偏流（ドリフト）に起因するが、動力噴霧器などの慣行法では薬剤は散布時の噴射圧や送風などの質量力・粘性力によって輸送され、植物体に付着するため、付着効率等を向上するには限界がある。このため、コロナ放電や高電界により散布薬剤を帯電し、

外部電界および帯電粒子の空間電荷効果や影像力により付着性を向上させる農薬散布法（以後、静電散布法と呼ぶ）が1940年代から研究され[3]、現在では一部実用化されている。

静電散布法は工業用塗装で広く用いられている静電塗装法と原理的には同一で、前述のように微粒化した薬剤（噴霧液滴あるいはダスト等）に電荷を付与し、クーロン力により付着効率を向上させ、ドリフトを軽減するとともに、帯電薬剤粒子が電気力線に沿った運動をするので、葉の裏面への回り込み付着が可能となり、付着の均一性も向上する。すなわち、静電散布法は農薬が植物へ到達した後の土壌への落下やドリフトによる環境汚染の減少に効果的であるばかりでなく、その高付着効率から農薬使用量を軽減でき経済的であるなど多くの効果が期待できる。しかしながら、高電圧を使用するので、機器

author's e-mail: toshiu@agr.kyushu-u.ac.jp

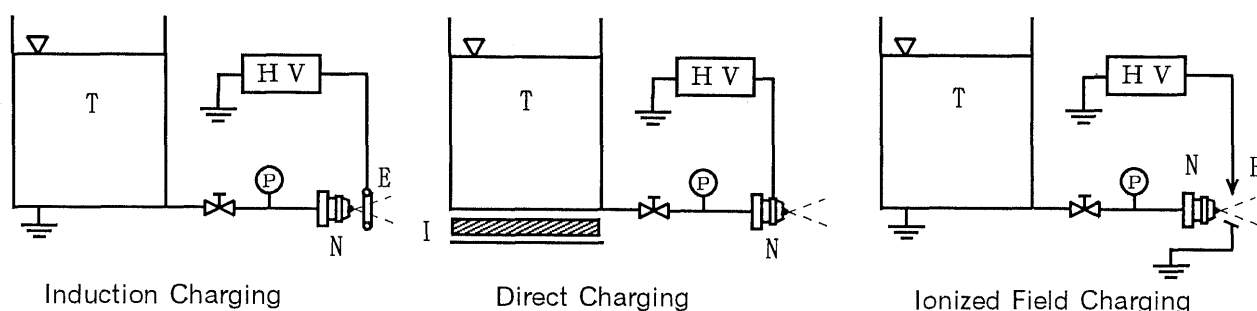


Fig. 1 Principles for charging sprays. T: Liquid tank, HV: High voltage power supply, P: Pump, E: Electrode, N: Nozzle, I: Insulator.

の整備，使用法等の制約，使用薬剤の制限，貫通性・到達性の向上など改良すべき点も多い。

6.2 帯電法の分類

松尾は静電散布に用いる帯電法を原理的・構造的に誘導帯電法，直接帯電法，コロナ帯電法に分類した[4]。Fig. 1 にこれらの模式図を示す。

誘導帯電法は液剤の帯電に用いられる。ノズルから吐出される薬液は液圧や空気流によって液膜から液糸に発達する。この液糸の先端部（液滴生成帯）近傍に高電圧電極を置くと，電界により液糸の先端には電極と逆極性の電荷が誘導され，このまま液糸が液滴に分裂するので，噴霧された液剤は帯電液滴となる。誘導帯電法の長所は，①電極をノズル前方に設置するだけで従来の散布機を簡単に流用できる，②コロナ放電に比べ低電圧で薬液の帯電ができる，③散布機本体やタンクなどの水回りを接地でき安全性が高い，などである。一方で噴霧薬液が電極に付着し，電界によって円錐状に隆起した先端から逆方向のコロナ放電が生じて電極と同極性のイオンを発生すると，帯電液滴が中性化され効果を失うなどの問題点も持つ。Law らは Fig. 2 のように誘導電極を樹脂製のノズルキャップ内に埋め込み安全性を高めるとともに空気流でノズルの濡れを防止した[5]。このほか，電極の濡れ防止法として樹脂製のドームで誘導電極を覆うもの[6]や円錐電極に穿孔し霧化空気流による負圧で外部空気を取り入れるものなどが考案されている[7]。また，Marchant [8]，Gupta ら[9]は Fig. 3 に示すような，誘導電極を取り付けた回転円盤ノズルを作製して静電散布の実験を行った。このノズルは液滴が法線方向に勢いよく飛び出すため電極は濡れにくい，ノズル近辺に漂流する噴霧液滴の空間電荷により帯電性能が悪くなることがあるとされる。このほかの代表的な研究に Splinter [10]，Inculet ら[11]，松尾ら[12]の研究がある。

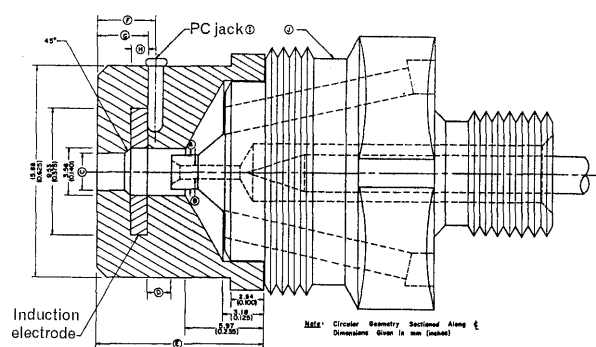


Fig. 2 Geometrical features of the embedded-electrode electrostatic induction spray-charging nozzle [5].

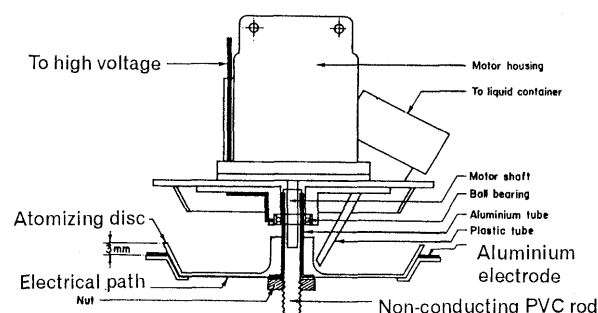


Fig. 3 Schematic diagram of the electrostatic induction charging spinning disc sprayer [9].

直接帯電法は原理的には誘導帯電と同一で静電誘導により液滴に電荷を与える。このため，誘導帯電法に分類している例もあるが，タンクを含む噴霧液系が高電圧となるので，タンクを絶縁する必要があり構造的に異なること，また，帯電液滴は電極と同極性となることなどのため，誘導帯電と区別される。この方法はコロナ放電法に比し，低電圧で帯電でき帯電効率もよいが，通常タンクが高電圧となるため危険防止策が必要となる。一部の直接帯電法にはタンクとノズル間の送液チューブをコイ

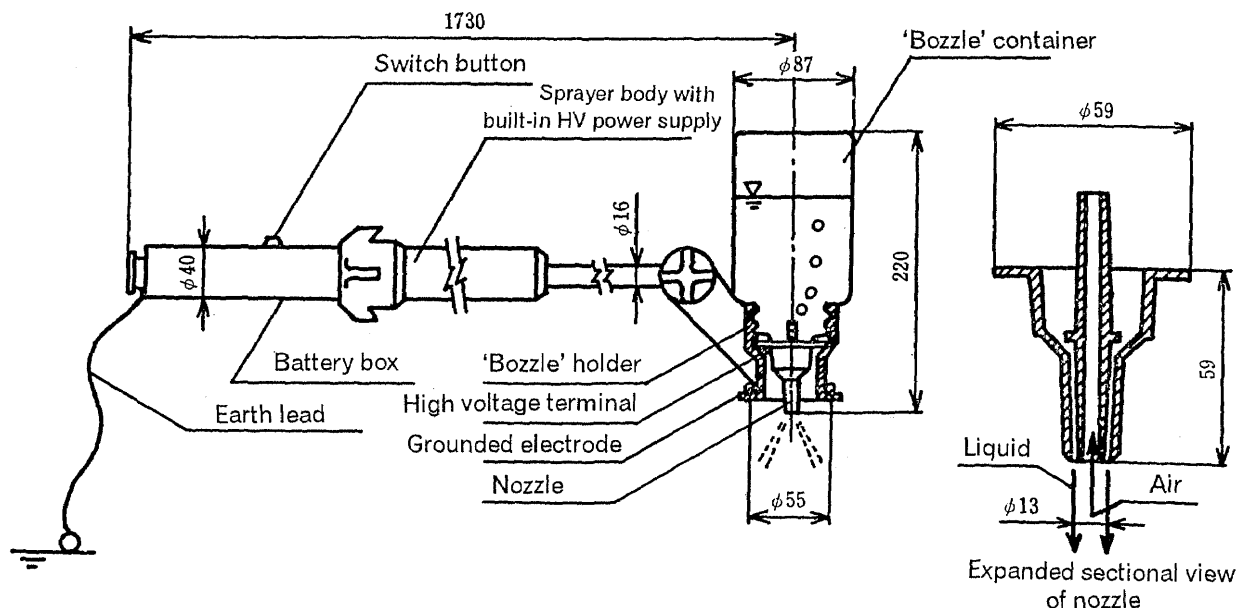


Fig. 4 Electrodyn sprayer [15].

ル状に長くすることで液体の抵抗を大きくし、タンクの電圧を低くしているものもある[13]。直接帯電法の代表的な例として英国 ICI 社のエレクトロダインがある。Fig. 4 は携帯式的のものであるが、トラクタのブームにボズルを多数装着したものもある[14]。エレクトロダインは他の静電散布機と異なり機械的な微粒化機構を持たず、電界の力のみで液体を微粒化する静電霧化方式をとっている。携帯式的ものは 6 V (電池 4 本) を -21.5 kV に昇圧して導電性樹脂のノズルに印加する。油性の噴霧液はノズルの隙間を通り、 0.042 ml/s (20°C) の微量が重力によって流出する間に、ノズルとそれを取り巻く環状の接地電極および地表との間の電界により帯電し、電氣的に霧化される[15]。通常の液圧ノズルや 2 流体ノズルを用いた直接帯電法の研究は比較的少なく[16]、回転円盤形の研究には松尾ら[17]、Moser ら[18]のものがある。

コロナ帯電法は機械的に微粒化した液滴、粉粒体の帯電に用いられ、これら微粒子をコロナ放電によって生じたイオン中を通過させることで帯電させる方法である。すなわち、針対平板電極等の不平等電界中でコロナ放電を発生させ、この中を約 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上の微粒子が通過する際にイオンの射突により、針電極と同極性に帯電する。コロナ帯電法の長所は、①薬剤の比誘電率の影響が少なく、多くの薬剤を利用できる、②タンクは接地でき安全である、③電極の濡れが問題にならないこと、などがある。

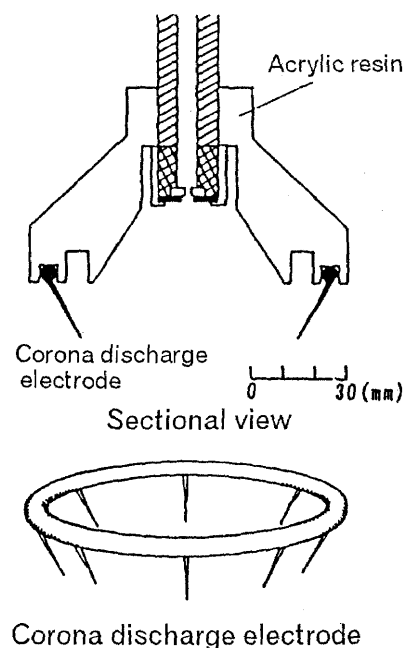


Fig. 5 Schematic diagram of the ionized field charging hydraulic nozzle [19].

短所としては誘導帯電に比べ印加電圧が高いことがあげられる。代表的研究例としては Splinter [10]、Ganzelmeier ら[16]、松尾ら[17]、Moser ら[18]、および Fig. 5 にノズルを示す東山ら[19]の研究がある。

6.3 帯電特性

誘導帯電により液滴を帯電させるためには液滴ができるまでの時間 t_f と電荷の緩和時間 τ との間に $t_f > \tau$ の関係が成立する必要がある。緩和時間 τ は液体の導電率 κ と誘電率 ϵ により $\tau = \epsilon/\kappa$ と表され、散布される液体の電気的性質に依存する。 t_f は液系の長さを L 、液の流速を v としたとき $t_f = L/v$ とされている[5]。なお、農薬の電気的性質の調査事例は著者らの報告がある[20]。静電散布で付着効率や葉裏面への付着などの効果を高めるためには、液滴への帯電量を高めるか電界強度を大きくしてやればよい。液滴の帯電量の限界 $q_{\max}$ はレイリー限界として知られ、次式で示される。

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

ここに、 ϵ_0 ：空気の誘電率、 γ ：噴霧液の表面張力、 r ：液滴の半径。すなわち、帯電量が増加してレイリー限界に達すると、電気的反発力が表面張力に打ち勝ち、液滴はさらに小さな液滴へと分裂する。静電散布機の帯電性能を比較するときは、表面電荷密度が同じでも液滴の帯電量は液滴の大きさによって異なるため、比電荷 q_s が用いられる。

$$q_s = q/m = I_c/(Q_L\rho) \quad (2)$$

ここに、 q ：液滴の帯電量、 m ：液滴の質量、 I_c ：コレクタ電流、 Q_L ：噴霧液流量、 ρ ：液密度。松尾らは Fig. 6 に示すような装置を用いて I_c を測定し、(2)式により比電荷 q_s を算出した[12]。その結果、 q_s は Fig. 7 に示すように、Splinter [10]と同様、印加電圧 V の増加に伴い増加するが、電極に付着した液からのコロナ放電の開始に伴い減少した。比電荷は Splinter が 18 kV で 1.92 mC/kg であるのに対し、松尾は -7.8 kV で 3.2 mC/kg の高い値を得ている。また、Law [5]は Fig. 2 の電極を用い、 $V = 2$ kV、 $Q_L = 73$ ml/min のとき $q_s = 4.8$ mC/kg、松尾ら[15]はエレクトロダインを用い、 $V = -25$ kV、 $Q_L = 3.6 \times 10^{-2}$ ml/s のとき $q_s = 4.73$ mC/kg を得、それぞれレイリー限界の 3 %、11.5 %であることを見出した。誘導帯電法の帯電量に影響を与えるコロナ開始電圧 V_0 は Peek により次の経験式が得られている[5]。

$$V_0 = [30r_j\delta + 9(r_j\delta)^{1/2}] \log(r_c/r_j) \quad (3)$$

ここに、 r_j ：噴流半径、 r_c ：誘導電極半径、 δ ：相対空気密度。松尾ら[12]は空気霧化式（2流体式）ノズルを用い、電極位置や霧化空気圧を変えて比電荷を測定した。

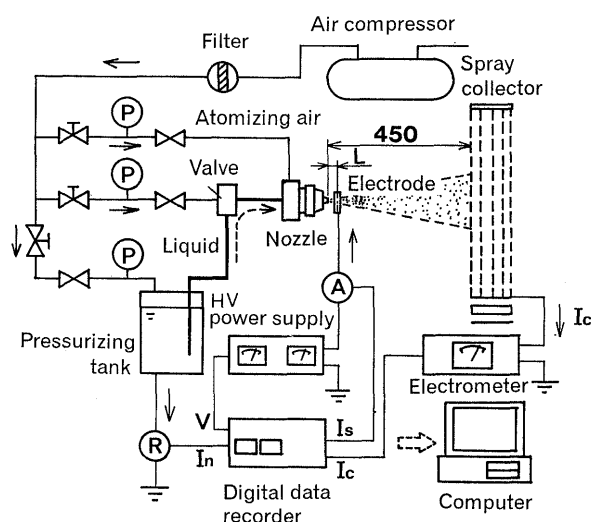


Fig. 6 Schematic diagram of the experimental apparatus for measuring charge to mass ratio.

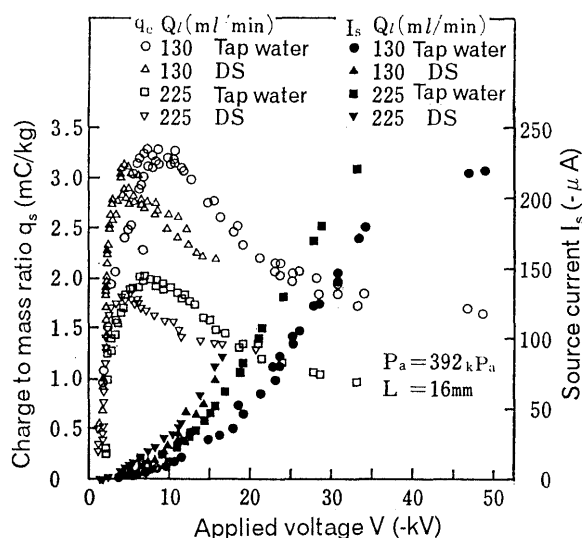


Fig. 7 Relationships between applied voltage and charge to mass ratio or power supply current at various liquid flow rates [12].

電極の位置は液滴生成帯付近が比電荷が大きくなり、また、霧化空気圧を高めると電極が濡れにくくコロナ放電が発生しにくいため、比電荷は大きくなることを明らかにした (Fig. 8)。

6.4 付着特性

6.4.1 植物モデルへの付着

松尾らはエレクトロダインを用い各種植物モデルをターゲットとして静電散布を行い、動力噴霧器による慣

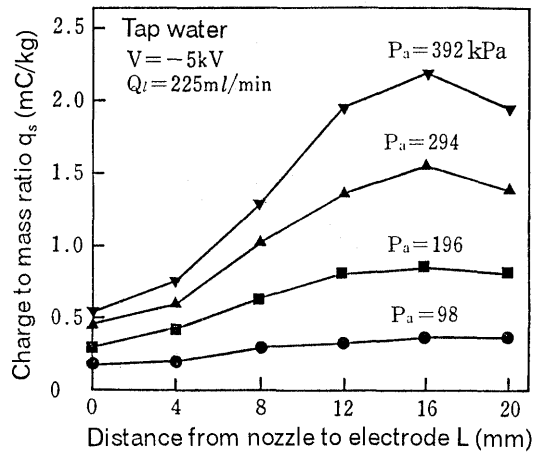


Fig. 8 Relationship between distance from nozzle to electrode and charge to mass ratio [12].

行法と比較した。噴霧量に対する付着量の割合である付着効率は群状ターゲットで91.6%，単体ターゲットで15.5%となり，それぞれ動力噴霧器の1.9倍，2.3倍となった[15]。また，帯電液滴がターゲット周辺への集中性と裏面への回り込み性に優れ，ノズルとターゲット間距離が一定でもターゲットの地上高が高い方が付着効率が高いことなど，帯電液滴の基本的な付着特性を明らかにした[21]。Inculetらは水圧ノズル（1流体ノズル）を付けたブームスプレーヤーのブーム内に空気を通し，電極を空気噴出口に配置して電極の濡れを防止した静電散布機を開発した。これを用いてアルミホイルを貼った銅板に噴霧し，従来の無帯電噴霧に比し40%以上の被覆率の向上を得ている[11]。Ganzelmeierらは水平に置いた円筒状ターゲットに直接帯電法で散布を行い，相対湿度の増加により，付着密度（単位面積あたり付着量）が減少することを示した[16]。松尾らは5層の格子状ターゲットを用いて，コロナ帯電式2流体ノズル(RG)と直接帯電式回転円盤ノズル(MB)の付着特性を調査した。RGでは噴霧時の前方への慣性力が大きいので，電圧印加の有無にかかわらず貫通性がよく，5層目の前面に付着した。-55 kVを印加すると前面の付着密度は増加し，さらに無印加時になかった裏面への付着がみられた。MBは無印加時には1層目前面にわずかに付着するだけであるが，-55 kVを印加すると1層目は広範囲に付着し，付着密度も増加し，裏面の付着密度は全面とほぼ同量であった。しかしながら，MBは貫通性が悪く3層目以後はほとんど付着がみられなかった[22]。Danteらは誘導帯電式回転円盤ノズルで植物モデルに静電散布を行い，Table 1の結果を得た[23]。

Table 1 Relative increase in deposition efficiency with electrostatic charging using 2.5 kV electrode voltage [23].

Disc Speed (rpm)	Flow Rate (ml/min)	Deposition Efficiency		
		Uncharged	Charged	Charged/Uncharged
3000	25	40	75	1.9
	50	32	64	2.0
	75	33	55	1.7
3500	25	42	76	1.8
	50	38	64	1.7
	75	39	62	1.6
4000	25	53	94	1.8
	50	45	86	1.9
	75	42	79	1.9

6.4.2 作物への付着

Lawらは実際の殺虫剤を用い，圃場のブロッコリーへ誘導帯電法(1.2 kV)で静電散布を行い，慣行法と比べ1/2～1/3の濃度の殺虫剤を慣行法の1/8散布することで同等かそれ以上の防除効果が得られることを示した[24]。松尾らは鉢植えのナス，トマト，キュウリにエレクトロダインで散布実験を行い，植物モデルと同様，地上高が高いほど付着密度が多く，生育後期のキュウリ(草丈120 cm程度)では90 cm以下の高さの葉ではほとんど付着がみられないことを見出した[25]。Lawらは草丈15～20 cmのオオムギと雑草として2葉が展開した3 cmのダイコンを人工の畝に植えて，送風と-30 kVの外部電界を伴った誘導帯電式静電散布装置で実験を行った(Fig. 9)。電圧無印加に比し，0.8 kV以下の電圧を印加するとオオムギの葉の先端部で5.5倍，基部で2.5倍，ダイコンで1.5倍の付着増となるが，先端と基部の付着むらが大きくなった。また，オオムギおよびダイコンを植えた土壌表面への薬剤の付着は0.85倍，0.88倍と減少するものの，オオムギ先端部より土壌表面の付着密度の方が若干大きかった[26]。GuptaらはFig. 3に示す誘導帯電式回転円盤ノズルを用い，圃場のイネ，ダイズ，トウモロコシに3 kVで静電散布を行い，無印加時の回転円盤ノズルおよび慣行法の水圧ノズルと比較した。草丈がそれぞれ80，75 cmと低いイネとダイズでは，前者が水圧ノズルの3.5～4.9倍，無印加の1.6倍，後者が水圧ノズルの1.1～1.9倍，無印加の1.1～2.4倍の付着増となった。しかしながら，草丈が170～190 cmと高いトウモロコシでは噴霧方向の問題から静電散布の付着密度は他の2方法と比し，有意な差は得られなかった[9]。

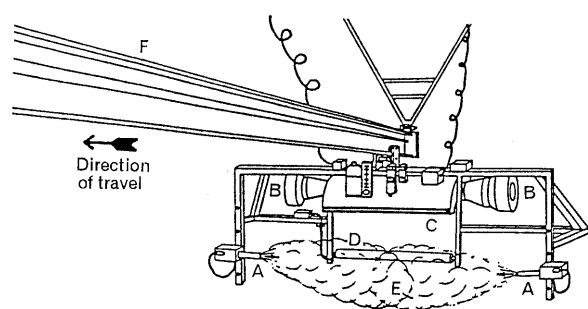


Fig. 9 Experimental apparatus for applying onto cereal crop targets sprays with specified levels of droplet charge, external driving field, and air-entrainment velocity. A: Spray charging nozzle, B: Blowers, C: Air entrainment nozzle, D: Applied field electrode, E: Charged spray cloud, F: Carriage track [26].

6.5 ハウス内の静電散布

ガラス温室やプラスチックハウスなどの園芸施設内は高温多湿となるため、病害虫が発生しやすく、防除の必要性が高いが、密閉空間で作業環境が著しく悪いので、無人防除が可能な微粉少量散布法、くん煙法、常温煙霧法が開発されている。しかしながら、これらは微粒化した薬剤をハウス内に充満させ、自然落下により作物に付着させる方式であるため、葉裏面への付着が悪いという欠点を持つ。津賀ら[27]はこれらに対する静電散布機を開発し、ハウス内での散布実験を行った。粉剤用 (Fig. 10) と燻煙用の静電散布機は中心に高電圧線、周囲に接地金属円筒を配した同軸円筒状のコロナ帯電法、常温煙霧機用は誘導帯電法でとられている。津賀らはこれらの静電散布機に加えて、高圧電線を作物の畝に配し、作物と電線間に電界（外部電界）を作ることにより、帯電粒子の付着性の向上をはかった。フローダスト剤、くん煙剤、水和剤ともに高圧電線の配置により付着の向上がみられ、キュウリ葉裏のワタアブラムシの防除効果が向上したとしている[28]。著者らは常温煙霧機により、ハウス内に噴霧した後、垂直につり下げた線状の高圧電極からのコロナ放電と電界により付着性の向上を試み、電極の形状やハウス内相対湿度等と付着密度との関係を詳細に検討した[29]。また、松尾らはつり下げ式の電極をハウス内で走行させ付着密度や裏面付着の向上を得た。さらに、電極に併設した小型軸流送風機や煙霧機のコンプレッサの補助送風等で場所による付着の不均一性を改善した[30]。

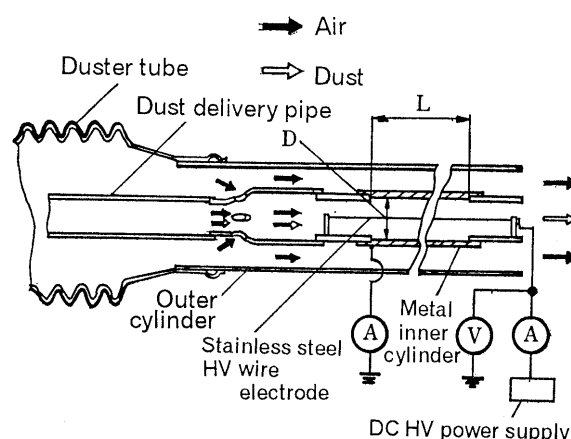


Fig. 10 Schematic view of coaxial cylindrical electrode for charging dust [27].

6.6 静電散布の問題点

静電散布の問題点は、①ノズル近辺や地上高の高い作物頂部への付着が増大する付着むら、②茂み内部への貫通性の欠如、③人身や植物への保全、④使用農薬の制限、などがある。①、②については送風[31]や帯電液滴に駆動力を与える外部電界[26]の併用などの対処法が実施されている。③は埋め込み式の電極や覆いを付けるなど高電圧部をできるだけ露出しない、電極の位置などを適切にし、印加電圧を低くする、さらに、リミタやトリップ回路などを設けて短絡時の事故防止に備えるなどの対策が必要である。④については農薬の種類は非常に多く、それぞれ電気的性質が異なり、帯電性能も異なる。液剤の性質と帯電性は Moser ら[32]や Splinter [10]によって検討されている。上に紹介した研究例では、微量散布のエレクトロダインを除いて、噴霧量は1ノズルあたり25~250 ml/min 程度である。静電散布は比電荷を大にしてクーロン力の効果を上げるため噴霧量を減じており、多量散布では効果が得がたい。これに対し、国内の慣行防除での薬液の希釈倍率は作業者の安全性を考慮して1,000~2,000倍とされており、散布量は1,000~4,000 l/haにも及ぶ多量散布である。散布幅を0.75 m、散布速度を2.5 km/hとして静電散布の散布量を計算すると約8~80 l/haで、慣行法より非常に少ないことになる。静電散布に適した濃厚少量散布は国内の現状ではハウス内の無人防除のためのみに許可されており、静電散布の普及はこの点からも困難な状況にある。

6.7 実用機

市販されている静電散布機には前述のICI社のエレクトロダインのほかに、カナダ Marwald 社の E±SPRAY,

米国 Electrostatic Spraying System (ESS) 社の各種静電散布機, 国内では(株)共立の常温煙霧機 (KLV901) がある. E±SPRAY は果樹用のスピードスプレーヤーで, 高速空気流で液剤を微粒化するノズルを大型のスプレーヘッドで覆い, ノズル近傍のスプレーヘッド内部に誘導電極を埋め込んでいる. スプレーヘッドは送風機につながり, 噴霧液を樹木へ運搬する空気流の通路となっている. 同社の Kinkelder スプレーを所有するユーザは静電散布改造キットを購入して取り付ければ, 安価に静電散布を行うこともできる. ESS 社は静電誘導式のノズルを, 小規模農家用の小型機から大規模ハウス用, さらに大規模圃場用のブームスプレーヤーに取り付けた製品を販売している.

参考文献

- [1] 正田慶夫: 農作業研究 **52**, 32 (1984).
- [2] 石井康雄: 今月の農業 **27**, 29 (1983).
- [3] H.F. Wilson and R.J. Jane, J. Econo. Ento. (1944).
- [4] 松尾昌樹: 農業機械学会シンポジウム資料 (1987) p.78.
- [5] S.E. Law, Tr. ASAE **21**, 1096 (1978).
- [6] I. Marshall, Power Farming **63**, 36 (1984).
- [7] 松尾昌樹, 盛 茁, 内野敏剛: 農業機械学会誌 **52** (6), 61 (1990).
- [8] J.A. Marchant, Tr. ASAE **28**, 386 (1985).
- [9] C.P. Gupta, G. Singh, M. Muhaemin and E.T. Dante, Tr. AEAE **35**, 1753 (1992).
- [10] W.E. Splinter, Tr. ASAE **11**, 491 (1968).
- [11] I.I. Inculet, G.S.P. Castle and R.S. Vermey, Tr. IEEE, IAS84:37A 1058, (1984).
- [12] 松尾昌樹, 内野敏剛, 飯本光雄: 農業機械学会誌 **49**, 459 (1987).
- [13] J.A. Marchant and R. Green, J. Agric. Engng. Res. **27**, 309 (1982).
- [14] R.A. Coffee, Outlook on Agr. **10**, 350 (1981).
- [15] 松尾昌樹, 内野敏剛, 飯本光雄: 農業機械学会誌 **48**, 25 (1986).
- [16] V.H. Ganzelmeier and E. Moser, Grundle. Landtechnik Bd. **30**, 122 (1980).
- [17] 松尾昌樹, 内野敏剛, 飯本光雄: 農業機械学会誌 **49**, 55 (1987).
- [18] E. Moser, K. Schmidt and D. Hussain, Landtechnik **38**, 155 (1983).
- [19] 東山禎夫, 浅野和俊: 静電気学会講演論文集 (1989) p.371.
- [20] 内野敏剛, 松尾昌樹, 飯本光雄: 農業機械学会誌 **48**, 253 (1986).
- [21] 松尾昌樹, 飯本光雄, 内野敏剛: 農業機械学会誌 **48**, 161 (1986).
- [22] 松尾昌樹, 内野敏剛, 飯本光雄: 農業機械学会誌 **49**, 169 (1987).
- [23] E.T. Dante and C.P. Gupta, Tr. ASAE **34**, 1927 (1991).
- [24] S.E. Law and H.A. Mills, J. Amer. Soc. Hort. Sci. **105**, 774 (1980).
- [25] 松尾昌樹, 飯本光雄, 内野敏剛: 農業機械学会誌 **48**, 295 (1986).
- [26] S.E. Law, J.A. Marchant and A.G. Bailey, IEEE Tr. on Industry Applications IA-**21**, 685 (1985).
- [27] 津賀幸之介, 市来秀之, 梶山道雄: 農業機械学会誌 **50** (1), 61 (1988).
- [28] 津賀幸之介, 市来秀之, 梶山道雄: 農業機械学会誌 **50** (3), 77 (1988).
- [29] 内野敏剛, 松尾昌樹: 農業機械学会誌 **51** (4), 33 (1989).
- [30] 松尾昌樹, 内野敏剛: 農業機械学会誌 **51** (5), 47 (1989).
- [31] C.M. William and J.T. Walker, Tr. ASAE **30**, 624 (1987).
- [32] E. Moser and K. Schmidt, Grundle. Landtechnik **33**, 56 (1983).