

温室における煙霧流の測定と解析

湯 伯敏^{a)}・毛利建太郎^{b)}・門田 充司・難波 和彦
 岩崎 正美^{c)}・邱 白晶^{d)}・梁 建^{a)}
 (環境生態学コース)

Measurement and Analysis of Fog Flow in Plastic Greenhouse

Tang Bomin^{a)}, Kentaro Mohri^{b)}, Mitsuji Monta,
 Kazuhiko Namba, Masami Iwasaki^{c)}, Qiu Bai-jing^{d)}
 and Liang Jian^{a)}
 (Course of Environmental Ecology)

This paper deals with measurement and analysis of fog flow in a greenhouse.

In this study we applied a gas-liquid two phase flow spray and a pesticide spray using new technology such as a non-heating fog carrier, in order to prevent disease and insects in agricultural operations.

Spray particle density was analyzed by a new method using an air sampler, and the behavior of fog particles in the space was studied.

The following results were obtained,

1. The spray particles were within a size of 15~30 μm and the behavior of these particles were clarified in this experiment.
2. The floating time after spray of particles, and the diffusing performance of spray particles in the greenhouse were clearly observed, tracked and recorded in this experiment.
3. Effective methods of pesticide application in greenhouse were discovered in this study.

Key words : non-heating fog machine, pesticide application, atomizing, sprayed particle size

はじめに

農薬を散布する場合、液体の農薬は微粒子にして散布する。そのとき散布する粒子の大きさによって種々分けられるが、50 μm 以下の粒径をもつものは煙霧粒子として分けられ、主として密閉空間内に浮遊させて防除効果を発揮させる。

常温煙霧機は発生させる霧粒が細かく煙霧粒子を散布する散布機で、軸流ファンにより空間内に粒子を拡散させ浮遊させて、空間内に散布粒子が充満するようにして防除効果を発揮させている。散布された粒子は空間内を浮遊し、その後ゆっくりと降下し、ある時間経過した後葉面に付着する。この方法は散布方法を確立することによって空間内で平均的かつ均一に散布でき、広く病虫害発生部位に薬剤を付着させることができるものであり、高い防除効果が期待できる。

さらに、濃度の高い液剤を散布することが可能で、水が豊富に得られない所では省水散布法として普及が期待できる散布方法でもある。また、粒子を風で拡散させて散布する方法を取ることで均一な散布ができ、温室などでは機械の操作が温室の外でも可能で、無人防除ができ

る。そのため農薬による中毒が避けられ安全な防除方法である。散布は人手によらず機械を運転する操作だけで行われ、散布作業強度も大幅に低減できる。エアコンプレッサなど機械の一部も密閉空間の外に設置する方法を取れば、薬物による機械の腐蝕も防止できる¹⁾。

中国において、この常温煙霧機による農薬散布の方法は施設農業の病虫害の予防と害虫駆除の分野における新しい技術であり、その技術開発には密閉空間における煙霧流の測定と解析手法が必要とされている。

本研究では煙霧による作業性能の解析及び常温煙霧機による散布技術の特徴と効果のある散布方法を提案し、

Received October 1, 2008

a) 中国農薬部南京農業機械化研究所

(Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, China)

b) 現在、名誉教授

(At present, professor Emeritus)

c) 鳥取大学

(Tottori University)

d) 中国江蘇大学

(Jiangsu University, China)

散布作業精度と防除効果を評価する方法を明らかにした。

これまで国内外の研究者は様々な方法で散布粒子のサンプルを収集し、噴霧流場の解析、粒子の付着特性などについて多くの研究を行ってきた²⁻⁸⁾。

米国カリフォルニア大学ではスペクトル解析法で温室内に散布された粒子のサイズと空気中の農薬密度を試験し、空気中に浮遊した散布農薬の粒子サイズと密度が時間によって変化することを明らかにした^{2,3)}。

岡山大学は温室栽培の農作物に対して病害の予防と害虫駆除を目的に、常温煙霧機を用いた静電散布の研究を行い、温室内の噴霧粒子の拡散性能を求めた。その方法は特殊な紙カードで散布粒子を採取し、一定時間経過後に粒子の痕跡を拡大してコンピュータに入力し、画像解析ソフトにより散布粒子の粒数、粒子の直径および単位面積における粒子の付着密度、被覆率などのパラメータを求めて散布粒子の拡散性能を明らかにした⁴⁾。

中国農業科学院植物保護所は麗春紅-G 水溶液で散布した後、蒸留水でキュウリの葉に付着した試薬を溶出してから、分光光度計を利用し水溶液中の麗春紅-G 含有量を解析し、同時に葉面積測定器を使ってキュウリ葉面積を測定し、葉面上の薬剤付着量を算出した。

中国農業大学は0.1% BSF 水溶液を散布した後、アルコール含有の蒸留水で葉面上の蛍光物を洗い落とし、蛍光検出器により葉面上の薬液付着量を測定した。

南京農業機械化研究所では、プラスチックフィルムを利用したカードで粒子をサンプリングしてから顕微鏡を使って散布粒数、単位面積当りの粒子の付着密度及び変動係数を測定した⁹⁾。また、江蘇大学と共同でエアサンブラと分光光度計を使って空気中における農薬密度を測定分析し、顕微鏡画像による解析法で散布粒子の付着と沈着状態を解析した¹⁰⁻¹²⁾。さらに、散布後の温室空間における煙霧粒子の質量密度及び散布粒子の落下、付着、沈着の法則について、試験結果から明らかにし、どの力学パラメータが散布作業に有効なのかを解析した。

供試した常温煙霧機

試験には有光工業株式会社製 LVH-15DX 型常温煙霧機を用いた。その構造の概略を Fig. 1 に示す。主な構造と機能は、エアコンプレッサで発生させた圧縮空気の圧力を利用した気液 2 相流の噴霧ノズルから液体を微粒化して噴霧するものである。ノズルは圧縮空気の力を利用したサイホンの原理で液剤を吸い上げる構造になっており、液体を微粒子に霧化できる。

供試常温煙霧機の圧縮空気の圧力は0.18~0.22MPa、空気の流量は150L/min で、噴霧量は清水で80mL/min、発生する煙霧粒の平均直径は20 μ mである。またその出力は1.5kW、薬液タンクの容量は10Lで、機械式ウイング回転攪拌で薬液タンク内を常時攪拌している。この常温煙霧機の適用できる温室面積は250~1000m²である。

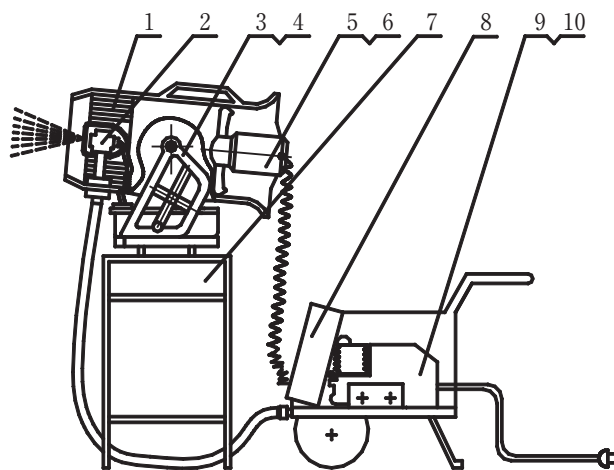


Fig. 1 Non-heating fog machine (LVH-15DX).

1: wind tunnel, 2: nozzle, 3: bracket, 4: pesticide tank, 5, 6: fan and motor, 7: stand, 8: controller, 9, 10: air compressor and motor.

空間における農薬密度

(1) 温室内における農薬密度の測定法

試験に使用した温室は単梁鋼管構造で、長辺が42m、短辺が6m、高さ2.3mのかまぼこ型で、その面積は252m²である。試験用には擬似農薬として食品添加物を清水に混ぜて散布用水溶液とし、濃度を100g/Lとして散布した。

温室内空間の空気を採取するためにDQ-1B型エアサンブラを使用し、散布時の煙霧粒子混合空気をサンプリングした。サンプリングした空気はグレーティング分光光度計を用いて擬似農薬の濃度を測定した。この濃度から空間中における煙霧粒子の質量密度を推定し、これを空気中における農薬密度として分析を行った¹³⁻¹⁵⁾。

エアサンブラで採取した試料について農薬密度を推定するとき、分光光度計においてどの波長が有効であるかを確かめるために、短波長から順次一定幅の波長をもつ単色光を試料に照射し、試料の各波長における吸光度を測定した。

分光光度計は紫外領域から測定できるものを使用した。それによりどの波長が本実験に適しているかを知ることができる吸収曲線が得られた。吸収曲線中の吸収ピーク波長のうち、農薬密度変化をもっともよく表したのは628.5nmであったため、空中における農薬密度を求めるために628.5nmの波長を使うことにした。

一方、濃度の異なる黒色色素溶液を作り、グレーティング分光光度計にセットして各濃度 C (μ g/mL) ごとの光線透過率 T (%) を測定すると、Fig. 2 に示した標準曲線が得られ、 C と T の関係は式(1)のようになった (波長は628.5nm)。

$$T = 98.346e^{-0.0337C} \quad (1)$$

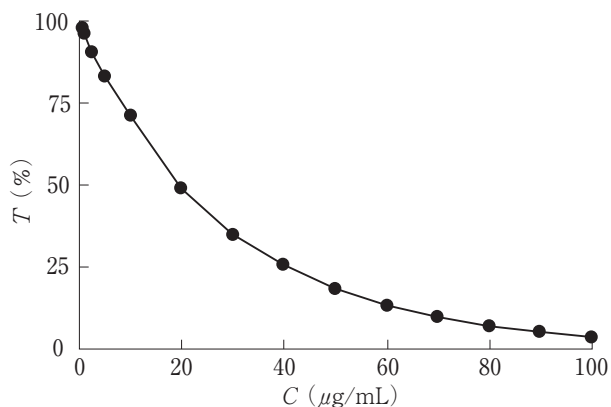


Fig. 2 Relation between pesticide density and permeation rate of ray.

温室における農薬密度がどのように変化するかを確認するために、7台のエアサンプラを用意して、一定間隔で温室の中心軸線上を長辺方向に配置した。サンプラは毎分5mLの空気をサンプリングできた。5分間の噴霧を終了してから後部にある軸流ファンで3分間送風して空間内に浮遊する煙霧粒を拡散させ、軸流ファンを停止後1分間放置して煙霧が安定してからサンプリングを開始した。7台のサンプラがそれぞれの位置で同時にサンプリングを行い、同様の実験を2回繰り返してその平均値を求めて農薬密度とした。

散布後に温室内の農薬密度が時間の経過と共にどのように変化するかを確認する試験も行った。この場合もエアサンプラで空間内の空気をサンプリングし、5分間の噴霧後1分間隔のサンプリング時間で空気のサンプリングを行い、2回試験を繰り返しその平均値を農薬密度とした。

試験に際して試験中の気温、気圧など気象条件が定められた条件と異なる場合は、煙霧による散布を推奨する協会の規定に従って修正した¹³⁾。噴霧量は基準の状態(4.5mL/m²)に換算し⁹⁾、散布溶液における擬似農薬の含有量も基準の状態(100g/L)に換算した。また、農薬密度が時間の経過により変化することを確認する試験の場合に、エアサンプラを温室の中心線上に配置したため、センタから外れたラインにおける空間での農薬密度は、センタにおける密度に換算した。

(2) 散布後の時間経過と農薬密度の変化

温室内空間の農薬密度 Kt は時間の経過に従って変化する。14分間の噴霧時間で1.12Lを散布したとき、散布後の経過時間と温室内空間における煙霧の濃度変化をFig. 3に示す。

農薬密度は時間 t (min) が経つにつれて式(2)に示すように指数関数的に減少した。

$$Kt = 13161t^{-2.0862} \quad (2)$$

散布粒子の中には粒径の大きいものもあり、散布後時

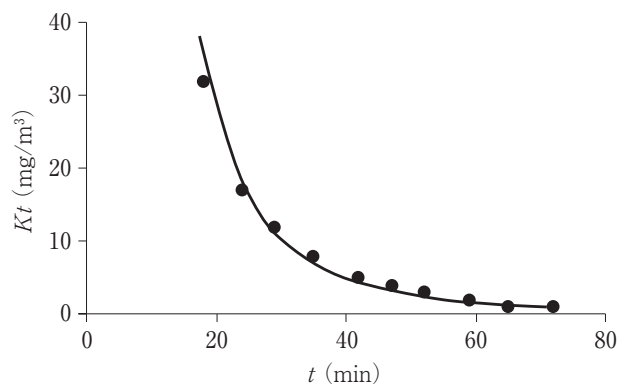


Fig. 3 Relation between pesticide density and time elapsed after spray.

間が経過すると微粒子同士が結合して大きい粒子に成長することも考えられ、粒径が大きくなると浮遊できず順次落下して葉面上や地上に付着していくと思われる。そのために(2)式で示されるような変化が生じたと考えられる。

(3) 温室の長辺方向における農薬密度

温室内の農薬密度 Kx が温室の長辺方向に沿ってどのように変化するかを調べた。15分間の散布時間で1.15Lの散布を行い、散布が完了してから6.5分経過したときの Kx を測定した。その変化の様子をFig. 4に示す。

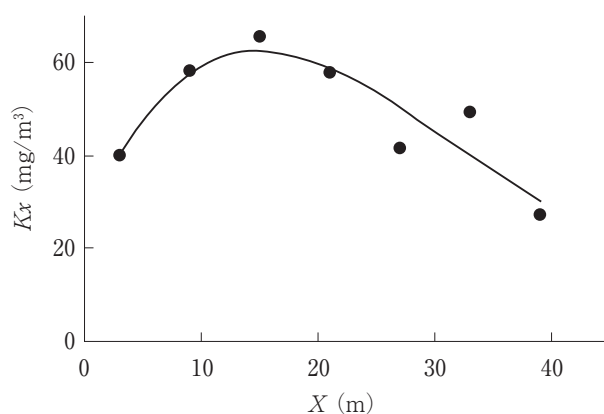


Fig. 4 Pesticide density for length of greenhouse.

X (m) を温室の一方の妻面からの距離とするととき、その変化は(3)式で示される。

$$Kx = 0.0026x^3 - 0.2338x^2 + 5.2853x + 26.87 \quad (3)$$

グリーンハウス断面積は10.79m²であり、温室空間全部における農薬の平均密度 $\overline{Kx}$ は式(4)で求められる。

$$\overline{Kx} = \frac{1}{42} \int_0^{42} Kx dx \quad (\text{mg/m}^3) \quad (4)$$

散布が終わってから6.5分後に、農薬の平均密度を求めると $\overline{Kx} = 48.52 \text{ mg/m}^3$ であった。温室空間全体における

農薬密度の平均密度中心のX座標は、これを式(3)の左辺に代入し求めると $X = 28.07\text{m}$ となった。

(4) 攪拌風量による拡散

電源周波数を調整して軸流ファンの回転数を変化させ、散布粒子を拡散させる攪拌風量を変化させた。攪拌風量を変化させたとき、温室内空間における農薬密度 Kx が温室の長辺方向に沿ってどう変化するかを Fig. 5 に示す。このとき電源周波数が30, 40及び50Hzのとしたときの、軸流ファンの風量はそれぞれ25.7, 34.1及び42.3 m^3/min であった。

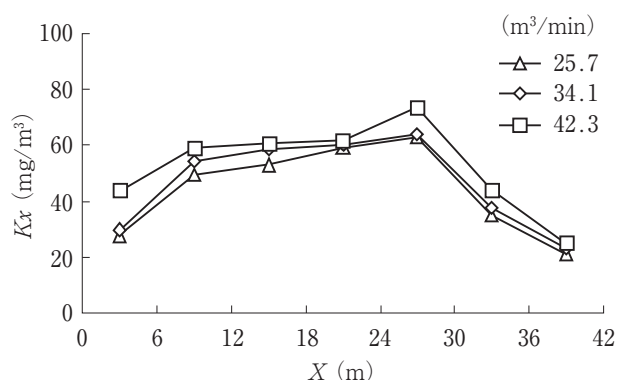


Fig. 5 Pesticide density for flow rate of diffusing air and length of greenhouse.

風量が多くなると全体的に農薬密度は高くなり、温室空間内に広く拡散した。これは拡散のための空気が遠くまで届くようになったためであり、さらに温室内における農薬密度の均一性が高められる結果になった。

軸流ファンの機能は主に風量を変化させることであるが、もう一つの機能は霧化を促進させて散布粒子を微細粒子化させることである。軸流ファンの回転数を高くすることで風量を増大させ、霧化効果を高めて細い粒子を増加させて煙霧粒子化を促す。また、粒子径が小さくなると空間の浮遊時間が長くなり、農薬密度を高めて防除効果を上げることが考えられる。

(5) 噴霧量と粒子の浮遊時間

供試機を空気圧力0.19~0.2MPaで運転し、散布時間を14分とし、ノズルを調節して噴霧量をそれぞれ770, 910, 1060, 1127mLと変化した試験を行った。散布後の温室内空間における農薬密度 Kt と散布後の経過時間との関係を Fig. 6 に示す。散布後の経過時間が長くなるにつれて農薬密度 Kt は指数関数的に低減した。

散布を開始から温室の空間において農薬密度中心における農薬密度が $1\text{mg}/\text{m}^3$ に低減するまでの経過時間を散布粒子の浮遊時間 T_{BD} としたとき、散布粒子の浮遊時間は噴霧量に依存すると考えられる。その関係を Fig. 7 に示す。噴霧量が毎分770, 910, 1060, 1127mLのとき、浮遊時間はそれぞれ43.5, 47.6, 70.3と82分間となった。

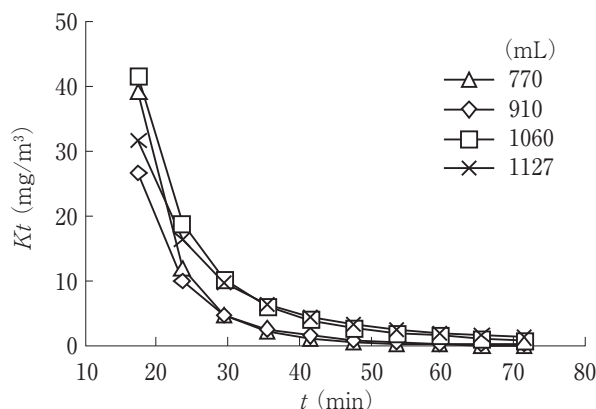


Fig. 6 Pesticide density for rate of spray and time elapsed after spray.

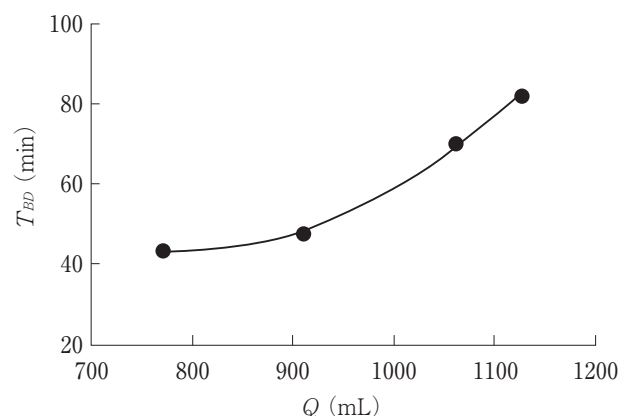


Fig. 7 Relation between particle air float time and rate of spray.

噴霧量が多いと散布粒子そのものの総数も多くなるので、散布粒子が空間に浮遊する時間も長くなる。その結果、農薬密度 Kt も大きくなり、期待される防除効果も増大した。

葉面上と植物体下部において捕捉した散布粒子

食品添加物である黒い色素の水溶液（濃度100 g/L）を使って農薬を模擬して散布試験を行った。今回は作物が存在する状態を想定し、地上から0.8mの場所に粒子サンプリング用カードを置いて作物の葉（上部とする）を模擬し、地面から0.4mの場所を植物体下部として（下部とする）同じくサンプリングカードを置き、上下2点で供試機により散布された粒子の拡散状態を調べた。サンプリングカードは粒子の痕跡を残すように塗装したカード状のものである。サンプリング後は痕跡を3眼ズーム立体顕微鏡とデジタルカメラにより捕捉した煙霧粒子の痕跡画像をデジタル化してコンピュータに入力した。その装置を Fig. 8 に、捕捉した粒子の様子を Fig. 9 に示す。



Fig. 8 Measuring apparatus for particle size.

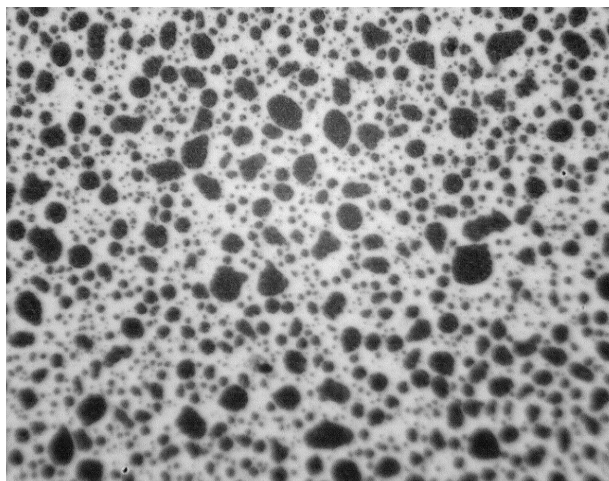


Fig. 9 Spray particles on sampling card.

コンピュータに入力した画像に対して専用画像解析プログラムを使って、コンピュータ上で粒子の数、痕跡から散布粒子の粒径相当直径（粒径とする）、単位面積あたりの粒子付着と沈着密度からカバー率の計算を行い、散布した粒子の平面拡散状態を調べた。

温室は先と同様にプラスチックかまぼこ型温室（42m × 6 m × 2.3m）を供試し、Fig. 10に示すような位置にサンプリングカードを上向きに設置した。

試験散布時の気温は35℃、相対湿度が88%、エアコンプレッサの空気圧力を0.19Mpaに調節して試験を行った。

(1) 温室長辺方向の散布粒子の粒径

散布した粒子の痕跡から粒子の相当直径である粒径 $\phi_D(\mu\text{m})$ を求め、温室長辺方向（X）に温室中心線上の粒径分布をFig. 11に示す。温室内全体についての粒子の粒径平均値と標準偏差及び変動係数をTable 1に示す。

計測された散布粒子は50 μm 以下の微細粒子であり、標

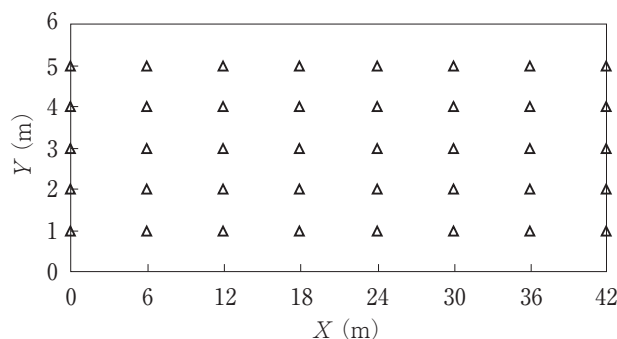


Fig. 10 Sampling location of particles in greenhouse.

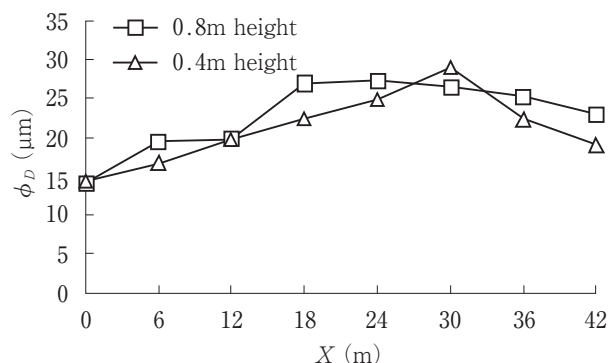


Fig. 11 Average particle size distribution for length of greenhouse.

Table 1 Spray particle size in greenhouse

	at 0.8m height	at 0.4m height
Average particle diameter (μm)	21.94	21.27
Standard deviation (μm)	5.823	5.243
Coefficient of variation	0.265	0.247

準偏差、変動係数も小さく粒径はほぼ均一なものであり煙霧粒と判断できた。したがって、供試常温煙霧機の性能通りの煙霧粒子が温室内に散布されたことがうかがえた。

温室の長辺方向をみると、手前は粒径が小さく、遠く離れるほど粒径は大きくなった。これは粒径が小さいほど浮遊性が高く、遠くなるほど粒径が大きく質量のあるものが飛ばされて遠くまで届いた結果と考えられた。

(2) 散布粒子によるカバー率

散布粒子が作物の葉上と植物体下部においてどれだけ付着したかを知るために、葉面で散布粒子が付着してカバーした面積と単位面積との比率をカバー率 $FG(\%)$ として表した。カバー率が温室長辺方向（X）にどのように変化するかを求めた結果をFig. 12に示す。また、そのカバー率の平均値、標準偏差、変動係数をTable 2に

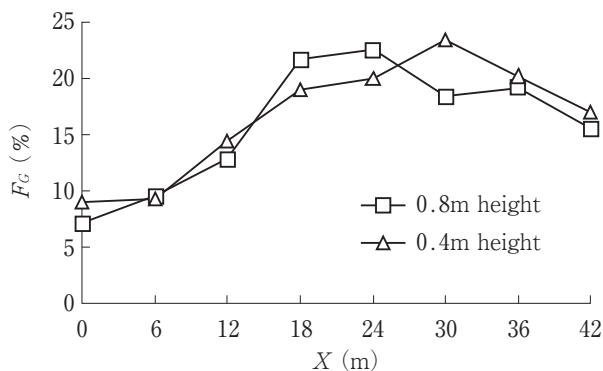


Fig. 12 Coverage rate of spray for length of greenhouse.

Table 2 Coverage rate of spray particles

	at 0.8m height	at 0.4m height
Average (%)	15.30	16.14
Standard deviation	6.347	6.142
Coefficient of variation	0.415	0.381

示す。

カバー率は上部や下部でほぼ同じとなり、植物体全体に散布粒子が行きわたり均一にカバーする状態であると推測できた。また、温室長辺方向にもほぼ均一に煙霧粒子が拡散しているが、大きい粒子があったため、カバー率も遠く離れるほど大きくなった。

結 言

温室内は自然風などの影響が少なく常温の状態では煙霧を温室内に充填させることにより高い防除効果が期待できる。そこで、気液二相流の霧化技術を応用し、常温煙霧の粒子をキャリアとして農薬を温室内に充填させることは、施設農業における病虫害の予防と治療作業分野に対する新技術である。

実際に温室内の煙霧流の拡散状態を把握することは防除を行う上で必要なことであり、ここでは食品添加物を擬似農薬として、それを溶かした水溶液を噴霧し、温室空気エアサンプルで採取して農薬密度を分光光度計で測定する方法を提案して、空気中の薬物濃度を推定した。

まず、プラスチック製かまぼこ型温室の密封空間内で模擬農薬を用いて常温煙霧噴霧機による散布試験を行い、農薬が空間内にどのように分布しているか、農薬密度を求めて明らかにした。

つぎに、温室の長辺方向に対し農薬密度の変化を求め、さらに時間と共に農薬密度が変化することを式で表した。散布した粒子はその粒径から煙霧粒であることがわかり、そのため温室内では浮遊状態を作り出した。散布

粒子は空間中にあるときと落下して葉及び植物体に付着したときそれぞれに防除効果を発揮することが考えられたので、空間内の農薬密度と粒子の浮遊、落下について明らかにした。さらに、散布粒子が作物の葉面上と地面近くの2箇所でのどのように付着しているか、その付着状態をサンプリング用カードの痕跡を測定することによって、植物体全体に粒子が到達するかどうかを明らかにした。温室内に散布された状況の特徴を説明するパラメータとして散布粒子の粒径平均値と標準偏差、変動係数を求めた結果からも常温煙霧機から噴霧された粒子が煙霧であることを確かめ、温室での粒子の付着、カバー率を求めて拡散状態を明らかにした。

密封空間における農薬煙霧流の分布、移動、落下、付着などの煙霧粒子の動きを空間全体について把握することにより、構造の違いがある温室に対しても最適な噴霧条件と噴霧性能、防除効果を評価する方法を考えることができるので、本研究は常温煙霧機による散布作業の基礎を作ったと考えられた。

今後、農薬の空間分布を農薬密度で表し、霧粒の付着状態を噴霧作業の幾何学パラメータ（散布予定の空間の3次元座標、大きさなどと噴霧角度、方向など）、力学パラメータ（噴霧量、噴霧速度、気液2相流の霧化条件、拡散させる風量、風速、風向など）、気象条件（気温、湿度など）などとの関連性を明らかにし、農薬密度が温室の高さ、長辺及び短辺方向に沿ってどう変化するか、その規則性、噴霧中の霧粒の落下、薬物の空間分布及び農薬密度と霧粒付着状態の関連性などについて、さらに深く試験、研究をする必要がある。

付 記

本研究は岡山大学および鳥取大学が日本における煙霧機による防除のこれまでの成果を提供し、中国では中国国家自然科学基金からの助成（30571240）と中国江蘇大学江蘇省現代農業装備と技術重点実験室開放資金からの助成（NZ200610）を受けて、中国農業部南京農業機械化研究所を中心に研究が行われたものである。ここに記して関係各位に謝意を表する。

引用文献

- 1) 湯伯敏, 吳萍, 楊喜明等: 常温煙霧防疫技術 [J]. 中華衛生杀虫药械, **10**, 333-334 (2004)
- 2) Derksen, R. C. and C. Jiang: Automated Detection of Fluorescent Spray Deposits with a Computer Vision System. J. ASAE., **38**, 1647-1653 (1995)
- 3) Franz, E.: Spray Coverage Analysis Using a Hand-held Scanner. J. ASAE., **36**, 1271-1278 (1993)
- 4) 高雄, 毛利建太郎ほか: 静電気が常温煙霧機の微粒化性能と拡散性能に及ぼす影響. 農業生産技術管理学会誌, 2002. 9 (別冊), 45-46 (2002)
- 5) 袁会珠, 齊淑華, 楊代斌: 不同噴頭对保护地黃瓜噴霧农药有效沉积率比較. 植物保护, **25**, 22-24 (1999)

- 6) 吴建民, 赵武云, 樊英生: 弥雾机雾滴分布试验研究. 农业机械学报, **32**, 42-45 (2001)
- 7) 傅泽田, 祁力钧: 风洞实验室喷雾飘移试验. 农业工程学报, **15**, 109-112 (1999)
- 8) 何雄奎, 曾爱军, 何娟: 果园喷雾机风速对雾滴的沉积分布影响研究. 农业工程学报, **18**, 75-77 (2002)
- 9) 汤伯敏, 梁建, 杨德水等: 塑料温室内的雾滴沉积分布研究. 农业机械学报, **35**, 72-75 (2004)
- 10) 史春建, 邱白晶, 汤伯敏等: 基于高速图像的雾滴尺寸分布统计与运动分析. 农业机械学报, **37**, 63-66 (2006)
- 11) 邱白晶, 吴昊, 汤伯敏等: 密闭空间药雾浓度测量的试验方法研究. 农业工程学报, **23**, 18-23 (2007)
- 12) 邱白晶, 沙俊炎, 汤伯敏等: 密闭空间雾滴沉积状态参数的显微图像解析. 农业机械学报, **39**, 55-58 (2008)
- 13) 吴邦灿, 费龙: 现代环境监测技术, pp.118-134, 中国环境科学出版社, 北京 (1999)
- 14) 鹿政理: 环境保护设备选用手册, pp.473, 化学工业出版社, 北京 (2003)
- 15) 崔九思: 室内空气污染监测方法, pp.174, 化学工业出版社, 北京 (2002)