

環境制御に適した噴霧器の構造検討

Examination of Spray Structure Suitable for Environmental Control

知能機械工学コース

ものづくり先端技術研究室

1245008 岡本 紘樹

1. 緒言

農作物をビニールハウスなどで栽培する施設園芸農業では、施設内の飽差制御に噴霧器が用いられる。飽差とは、ある温湿度の空気を飽和させるために必要な水蒸気量のこと、噴霧された液の気化により飽差を低下させる。ハウス栽培に適する飽差の基準値は $3\sim6\text{g/m}^3$ の範囲であるが、噴霧制御が行われない日中のハウスは、太陽の輻射熱等の影響により基準値を大幅に超えた値になる。このとき、植物は必要以上の水分の蒸散を防ぐため、気孔が閉じる傾向にある。一度、閉じた気孔は開くのに時間を要し、光合成に必要な CO_2 が取り込めないため、噴霧による飽差制御は重要となっている。しかし、噴霧の課題として液滴が植物に付着することによる濡れの発生がある。これによりカビや菌などの発生、拡大及び光合成の障害が生じてしまう。そのため、噴霧液滴を微粒化することで揮発性を高め、濡れを発生させない対策が必要である。これに対して、ドライフォグと呼ばれる平均粒子径が $16\mu\text{m}$ 以下の液滴は、植物に触れても素早く蒸発するため濡れの心配がなく、空気中で一様に拡散しやすいなどの効果を持ち合わせている。したがって、ドライフォグは噴霧による飽差制御において最適であるとされる⁽¹⁾。

ハウスでは施設内に張り巡らせたパイプから全域に噴霧し、制御する方法が主にとられている。しかし、この方法では既設ハウスに新たに導入することが難しく普及が進んでいない。そこで、本研究では指向性を持ち設置が容易な二流体噴霧器に着目した。二流体噴霧器は噴霧液を高速気流に混合させて微粒化を行う装置で、事業化されている装置にモーターフォグ（土佐農機、MF200AS 型）がある。ただし、噴霧液流量 4.7g/s で平均粒子径が $35\mu\text{m}$ とドライフォグの生成に至っていない。そこで、二流体の混合部にあたる噴霧液ノズルとオリフィスの構造による微粒化影響を実験的に検証し、ドライフォグが生成可能な構造を検討した。このとき、噴霧制御の安定性に関わる噴霧の粒度分布にも着目した。

また、近年は CO_2 制御を行うことで光合成活性を促し、作物の高品質化、収穫量増加がなされている。しかし、主に用いられている燃焼型 CO_2 発生装置は高温の CO_2 ガスにより、施設内の急激な温度上昇を招いてしまう。したがって、噴霧液に過溶解炭酸水を用いた飽差との統合制御を検討するため、過溶解させた CO_2 ガスが噴霧に与える影響を実験的に調査した。

2. 実験装置

実験装置を図1に示す。圧力容器内でコンプレッサーを用いて加圧された水及び、液化炭酸ガスポンプを用いて加圧生成された過溶解炭酸水を、噴霧器内部のブロウモータで圧縮した空気にて混合部で微粒化する装置となっている。噴霧液流量は水流量計（KEYENCE, FD-M シリーズ）、圧縮空気流量は空気流量計（オーバル, TF1050）でそれぞれ測定した。

また、噴霧液滴の粒径は粒度分布計（Malvern, STP5321）で測定し、ザウタ平均粒径で評価した。

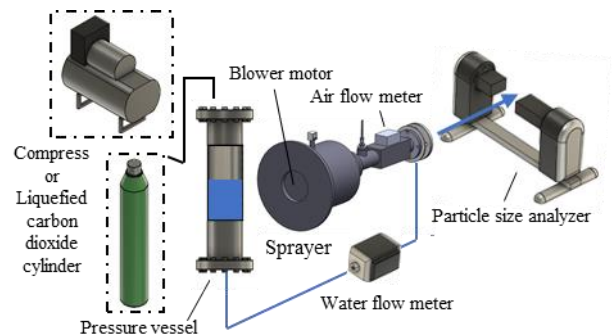


Fig.1 Experimental equipment

3. 噴霧液ノズルの構造検討

3.1 実験条件と方法

噴霧液が液滴になるまでの過程は、多様である⁽²⁾（図2）。したがって、高速気流と混合を行う噴霧液の状態が微粒化に最も効果的であるかを検証した。実験で用いた噴霧液ノズルを図3に示す。上

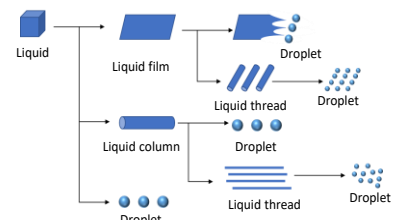


Fig.2 Agglomeration process

から順に噴霧液の吐出形状が液柱状、液膜状、液滴状のノズルである。液柱ノズルは流量を他のノズルと同様にするため、水流量計の下流側にバルブを設けた。液柱、液膜ノズルの外径は 10mm である。また、オリフィスは内径 15mm 、厚み 10mm を用いた。液滴ノズルは先端の外径が 11mm かつテーパ状に広がるため、高速気流の空気流量が他のノズルに近い内径 15.5mm 、厚み 4mm のオリフィスを用いた。

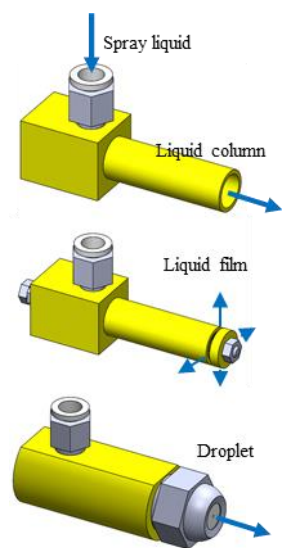


Fig.3 Nozzle

実験は空気と CO_2 ガスの両加圧下で行った。初めにブロウモータの電源を入れ、空気流量が安定した後、送液を開始した。容器内圧力を 0.5MPa から 0.1MPa 間隔で低下させていき、それぞれの圧力下で噴霧、測定を行った。

3.2 実験結果と考察

実験では、空気流量が約 23.5g/s で安定した。噴霧液流量とザウタ平均粒径の関係を図 4 に示す。噴霧液の吐出形状を液柱状から液滴状にすることで、約 24%の微粒化がなされた。液膜ノズルは他のノズルの間の性能を示したが、流量が 5.5g/s 未満では液柱ノズルがより微小な液滴を生成していた。

ノズルの流量が近い場合で比較した粒度分布を図 5 に示す。液柱、液膜、液滴ノズルはそれぞれ、流量が 4.5g/s、4.4g/s、4.8g/s の場合である。液滴ノズルは粒度分布が最も均一化されていたが、液柱、液膜ノズルでは、500 μ m 以上の大粒子が生成された。さらに、流量低下に伴い、この大粒子の頻度が増加する傾向にあった（図 6、7）。これに対し、液滴ノズルは流量 3.9g/s のみで大粒子が生成されていた（図 8）。低流量になるほど全てのノズルで大粒子の頻度が増加する傾向にあることから、微粒化を促すためには高速気流に適切な噴霧液流量を混合させる必要があることが明らかになった。ただし、噴霧液を液滴状に吐出することで、高速気流と作用する表面積が増加し、流量 4.8~7.3g/s で大粒子の生成を抑制する効果があった。

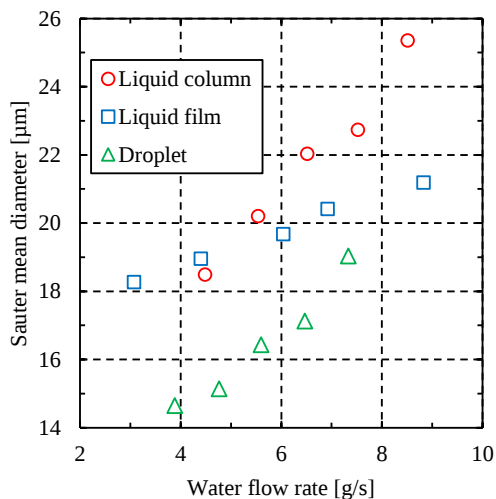


Fig.4 Effect of liquid spray shape

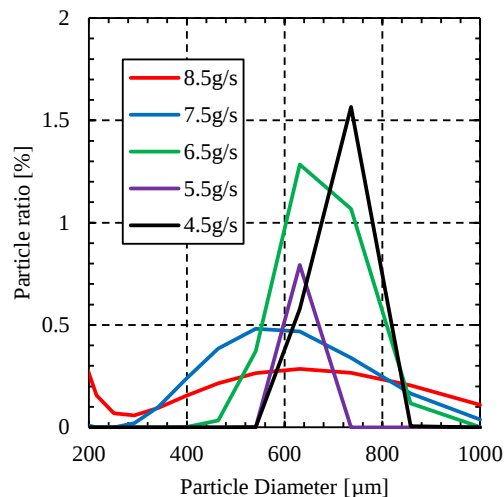


Fig.6 Liquid column nozzle

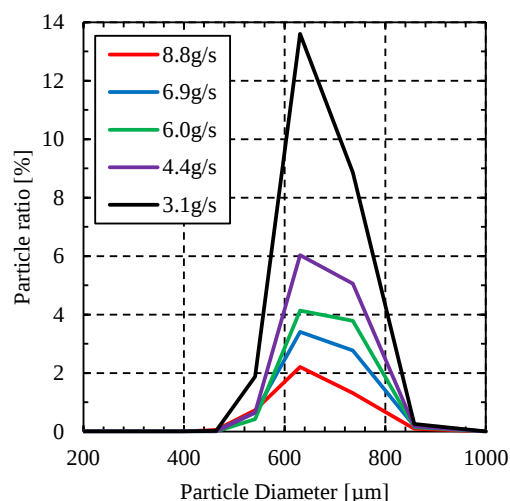


Fig.7 Liquid film

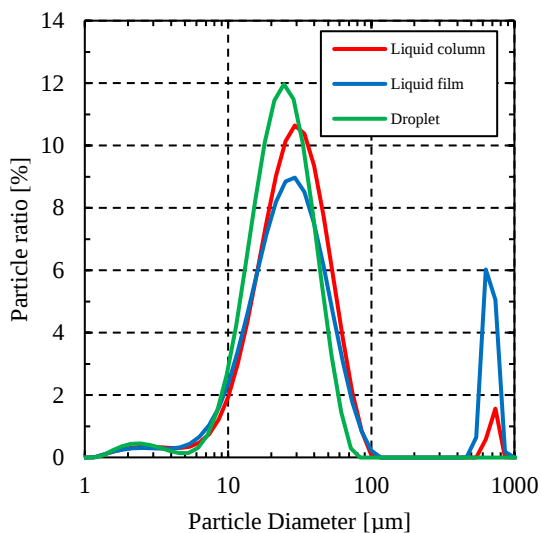


Fig.5 Particle size distribution

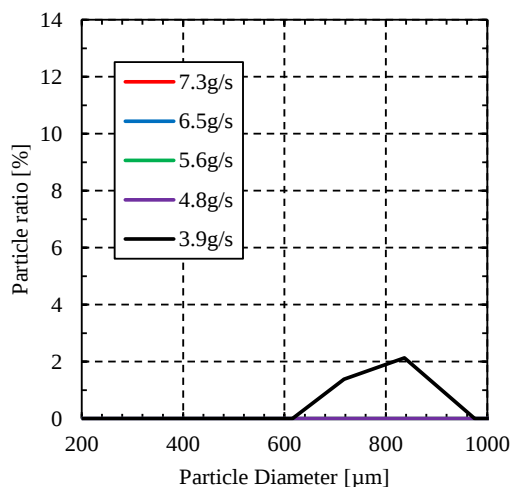


Fig.8 Droplet

次に、噴霧液の違いによる影響を図 9, 10 に示す。なお、液膜ノズルは液柱ノズルと同様の傾向であったため省略した。液柱ノズルでは高压の過溶解炭酸水を用いることで噴霧液滴が微粒化した。過溶解された CO_2 ガスは大気解放された際、噴霧液中で気泡として発生する。発生した気泡により周辺の噴霧液流れは安定性を損ない、高速気流の影響が強く作用した結果、微粒化が促されたものと考えられる。そのため、実験では圧力を低下させるほど過溶解炭酸水の効果が減少し、粒径が水噴霧に近づいた。これに対し、液滴ノズルは全容器内圧力で粒径が拡大した。噴霧液が過溶解炭酸水の場合、液滴ノズルは液滴と気泡が混在した吐出であると言える。ただし、液滴ノズルの吐出口は小さいため、気泡が液滴の円滑な吐出を阻害し、大きな液滴が一度に吐出すると思われる。したがって、水噴霧よりも大きな液滴の吐出であるため、測定した粒径が拡大した。また、過溶解炭酸水による粒度分布への影響は全てのノズルで確認できなかった。一例として、容器内圧力 0.5MPa の液柱ノズルの粒度分布を図 11 に示す。

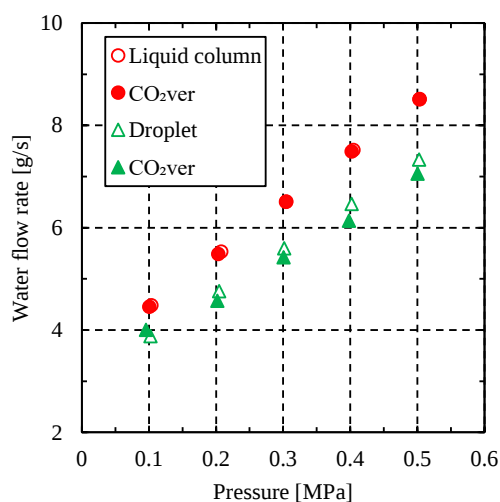


Fig.9 Effect of perdisolved carbonated water

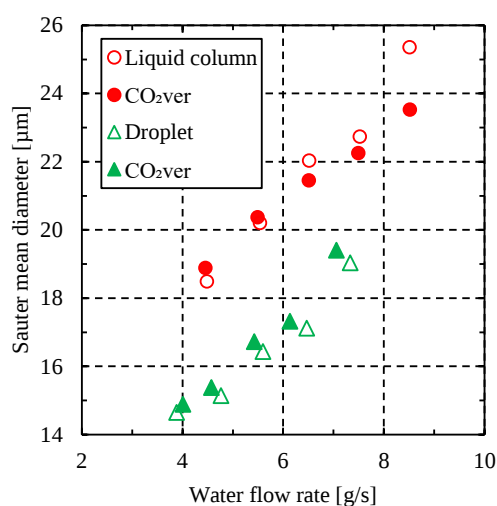


Fig.10 Effect of perdisolved carbonated water

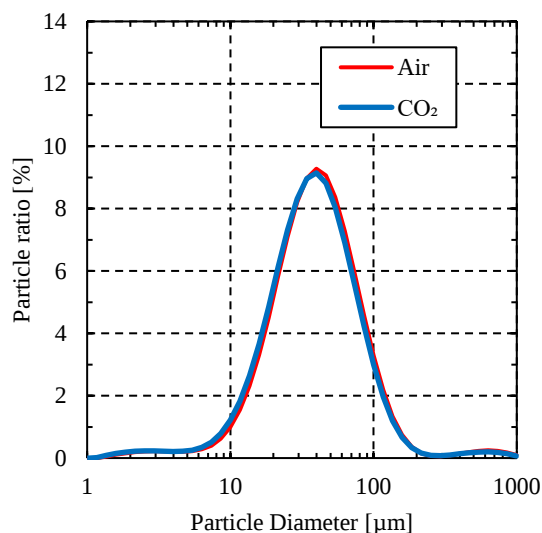


Fig.11 Particle size distribution

4. オリフィスの構造検討

4.1 実験条件と方法

本研究で用いた二流体噴霧器の特徴として、大気開放下で気液を混合させるため、吐出口の円周付近では高速気流が軸中心から遠ざかる流れとなり、噴霧液に作用しない。ただし、高速気流はオリフィスの径やテーパ角度によって流れの調整が可能である。そこで、微粒化を促進させるオリフィス構造を水噴霧実験から調べた。実験に用いたオリフィスを図 12、実験条件を表 1 に示す。実験 1 はテーパ角度 $D_x=60\sim150^\circ$ の 4 パターン、実験 2 はオリフィス径 $D=15.0\sim17.0\text{mm}$ の 5 パターンでの実験を行った。噴霧液ノズルは前項で最も微粒化が促された液滴ノズルを用いた。その他の条件、方法については前項と同様である。

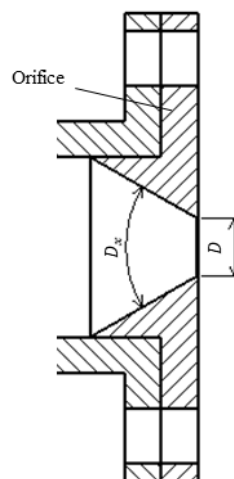


Fig.12 Orifice

Table.1 Experimental conditions

	Experiment1	Experiment2
Orifice diameter $D[\text{mm}]$	15	15.0, 15.5, 16.0, 16.5, 17.0
Taper angle $D_x[^\circ]$	60, 90, 120, 150	60
Air flow rate $[\text{g/s}]$	15.6	16.9~22.8
Pressure $[\text{MPa}]$	0.1~0.5	
Water flow rate $[\text{g/s}]$	3.8~7.5	3.8~7.7

4.2 実験結果と考察

オリフィス形状とザウタ平均粒径の関係を図 13, 14 に示す。内径 16.0mm, テーパー角度 60° のオリフィスで最も微粒化が促進され, 全流量でドライフォグが生成された。

前項の結果と比較するとテーパーが微粒化を促す傾向がみられた。本実験ではテーパー角度 60° が最も微粒化を促進させる傾向にあったが, 噴霧液流量 6.1~7.5g/s の場合, 60° 以下でより微粒化を促すと考えられる。これに対し, 噴霧液流量 3.8g/s の場合, テーパー角度 90° で最も微粒化が促進されていた。つまり, 噴霧液の流量変化によって, 最適なテーパー角度も変化することが明らかになった。

また, 前項の内径 15.5mm のオリフィスと本実験で最も微粒化が促進された内径 16.0mm, テーパー角度 60° のオリフィスの容器内圧力 0.1MPa での粒度分布を比較する(図 15)。適切な内径及びテーパー角度のオリフィスを用いることで, 大粒子の生成を抑制し, モード径の頻度が高まった。

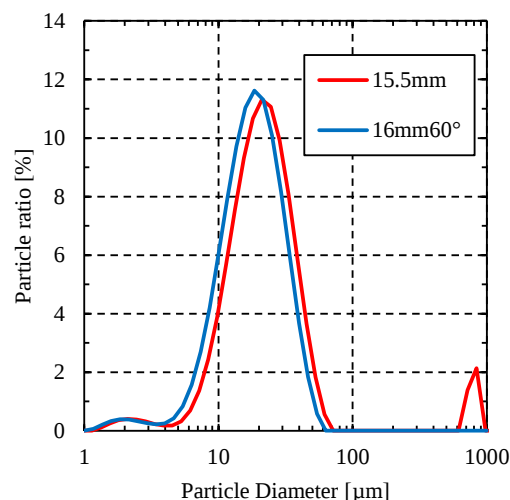


Fig.15 Particle size distribution

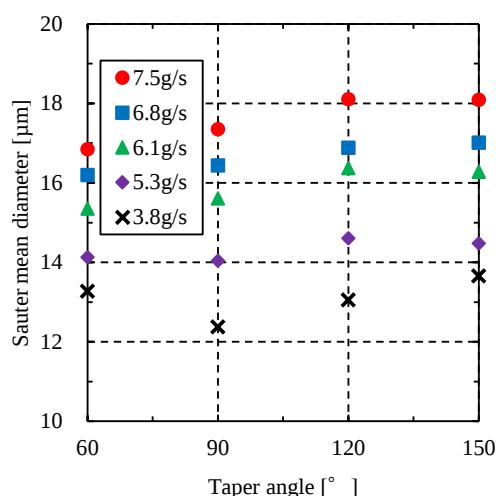


Fig.13 Experiment 1

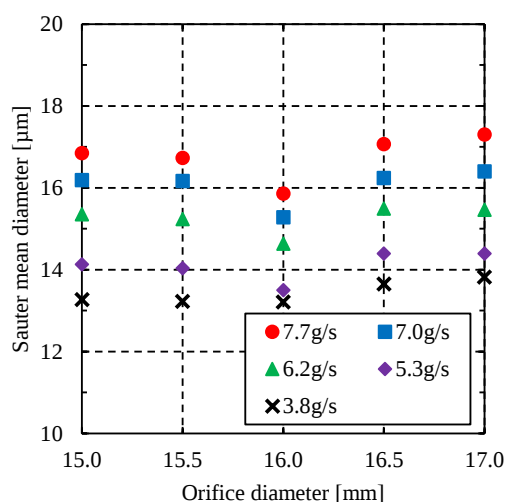


Fig.14 Experiment 2

5. 結言

微小で粒度分布の均一な噴霧を生成するためには, 液滴状に吐出した噴霧液を最適なオリフィス径及びテーパー角度といったオリフィス形状で生成した高速気流と混合させることが重要となる。しかし, 過溶解炭酸水を噴霧する上では, 大気解放時に発生する気泡が液滴吐出を妨げ, 粒径を拡大させるため, CO₂制御は他の方法を検討する必要がある。本研究で用いた液滴ノズルでは, 内径 16.0mm, テーパー角度 60° のオリフィスを用いることで, 本研究で使用したブロワモータで, 噴霧液流量 3.8~7.7g/s の範囲でドライフォグが生成可能となった。ただし, 噴霧器の性能が飽差制御に対し有効であるかを明らかにするためには, 実地試験を行い, データを積み重ねる必要がある。

参考文献

- (1) 日本冷凍空調学会
<https://www.jsrae.or.jp/annai/yougo/149.html> (最終閲覧日: 2022 年 1 月 7 日)
- (2) 日本液体微粒化学会, アトマイゼーション・テクノロジー, p.4, 森北出版, 2001