

卒業論文要旨

微粒化解析による二流体噴霧構造の検討

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1210147 福田 宗顕

1. 緒言

施設園芸農業において環境のコントロールが生産量を左右する。このため、噴霧器を用いた温度、湿度に加え、 CO_2 濃度の制御も近年行われ始めている。環境を制御するにあたり、既存のシステムでは「一流体噴霧器」と「燃烧型 CO_2 発生装置」が主に用いられている。しかし、一流体噴霧器では、装置単体での噴霧量が少なく指向性も得られないため、噴霧設備が複雑かつ大規模になる。また、噴霧された液滴が植物に付着することによる濡れが発生する。これによりカビの発生や光合成の障害が生じる。さらに、燃烧型 CO_2 発生装置では、高温ガスの供給による施設内温度の急上昇を招くため、噴霧器による制御負担が増加してしまう。このことから、温度、湿度、 CO_2 濃度を同時に制御でき、揮発性の高いドライミストを生成可能な噴霧装置の研究開発が求められている。

本研究の目的は、噴霧液を効率よく微粒化するための広域二流体噴霧構造の検討である。二流体噴霧は気流と噴霧液のエネルギー交換により微粒化を促す装置であるため、空気の流れが重要な因子である。しかし、実験のみでは評価が難しいため、本研究では視覚的かつ解析的に空気の流れを調べることとして、数値計算を行い、求めた結果の妥当性を得るため、実験的な評価も行った。なお、岡本⁽¹⁾の先行研究では、噴霧液に炭酸水を用いることで溶解した CO_2 を圧力解放した際に発生する膨張エネルギーによって、噴霧部での微粒化効率が促進された。しかし、ノズル上流部にバルブを用いたことで急激な圧力損失により気泡が発生してしまい、炭酸水による微粒化の効果を十分に適用できなかった。そのため、先行研究⁽¹⁾の成果であった炭酸水噴霧に関してもバルブを用いず、ノズル形状を変更し、炭酸水の有効性を改めて調べた。

2. 二流体噴霧構造

実験装置のフローを図1に示す。噴霧に使用した液は水と炭酸水であり、炭酸水は液化炭酸ガスボンベの内圧を利用することで生成した。噴霧液はそれぞれエアーコンプレッサーと液化炭酸ガスボンベからの圧力を動力とし、噴霧器に供給される。そして、ブロアモーターにより圧縮された空気と噴霧液を吐出部で混合させ微粒化する構造となっている。また、圧力容器と噴霧器の間に水流量計、噴霧器内部に空気流量計を設けた。

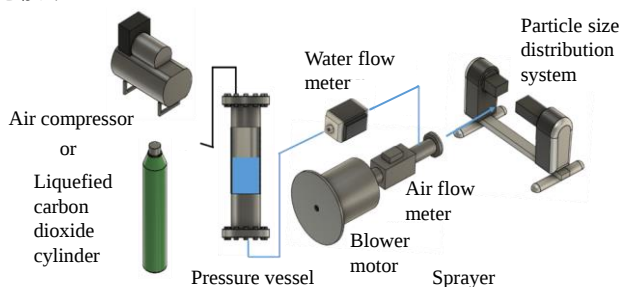


Fig.1 Experimental equipment

3. 数値計算

3.1 数値計算方法

本数値計算では有限体積法を基本とした流体解析コード「ANSYS FLUENT」を用いて、水噴霧での数値計算を行った。計算モデルは DPM モデル(Discrete Phase Model)を使用した。DPM モデルは主に噴流、噴霧に用いられ、粒子の挙動を解析する方法である。流体相はオイラー的に、分散相はラグランジュ的に計算を行う。これにより、粒子を一つ一つ追跡することができる。

流体相である空気の支配方程式は 3 次元の圧縮性ナビエーストックス方程式を用いた。また、乱流の影響を考慮するため、乱流モデルの $k-\omega$ SST モデルを使用した。一方、分散相である液滴の挙動を表す支配方程式はラグランジュ的に表現した。

噴霧器の吐出部概要および数値計算の領域を図2に示す。噴霧器の吐出部(左図)に空気流量を制限するためのオリフィスが設置されている。実験には、田原⁽²⁾の先行研究の結果から微粒化が最も促進された内径 15mm、厚み 10mm のオリフィスを用いた。噴霧液ノズルに関しては、外径 10mm、内径 1mm のノズルを用いた。数値計算の領域(右図)は先行研究⁽¹⁾⁽²⁾での実験条件を参考にし、吐出方向(Z 軸方向)300mm、半径方向 250mm の円筒形とした。また、原点はノズル吐出口の中心であり、座標軸は図2に示す通りである。メッシュの設定として、吐出部近傍を細かくし、吐出方向および半径方向に向かうほど段階的に粗くすることで、計算コストを削減した。メッシュの総数は約 110,000 とした。

数値計算の境界条件は測定データを参考にし、設定した(表 1)。

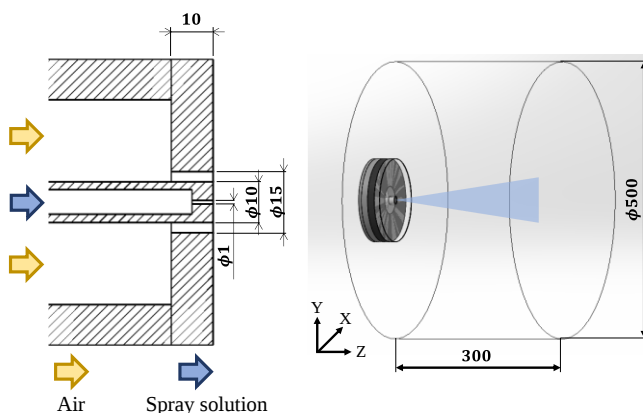


Fig.2 Overview of the spouting part and calculation domain of the sprayer

Table 1 Boundary conditions

Air mass flow rate inlet[g/s]	23.83
Water mass flow rate inlet[g/s]	8.14~17.1
Pressure outlet[hPa]	1013.25
Velocity of external air[m/s]	1
Air temperature[K]	293.15
Water temperature[K]	283.15

3.2 数値計算結果と考察

YZ断面での空気速度ベクトルを図3に示し、YZ断面での粒子速度ベクトルを図4に示す。なお、粒子に着目するため、分裂後の粒子のみを表示した。空気および粒子において、吐出部近傍では環状流の一部が逆流し、吐出方向に対する渦を形成した。また、粒子は吐出後にノズル壁面に沿って半径方向に移動し、空気吐出部において剥がれる流動を示した。渦の大きさとしては、10~20mm程度である。これは、ハイスピードカメラを用いて撮影した液滴の挙動(図5)と概ね一致した。

つまり、液滴の挙動は気体の流動状態に依存するといえ、指向性の阻害要因である渦を抑制させる必要がある。

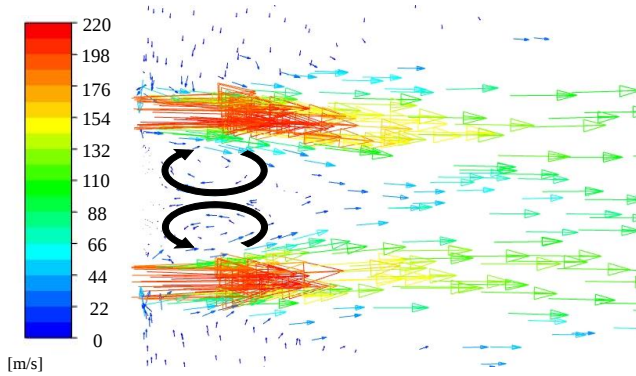


Fig.3 Vector of air velocity

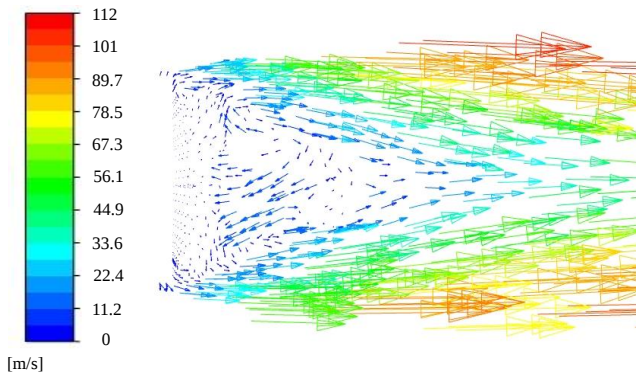


Fig.4 Vector of droplet velocity



Fig.5 Spray images

続いて、実験との比較を行うため、実験と同様に吐出部から300mmの箇所でザウター平均粒子径を求め比較した。粒度分布計で測定したザウター平均粒子径と数値計算結果を図6に示す。

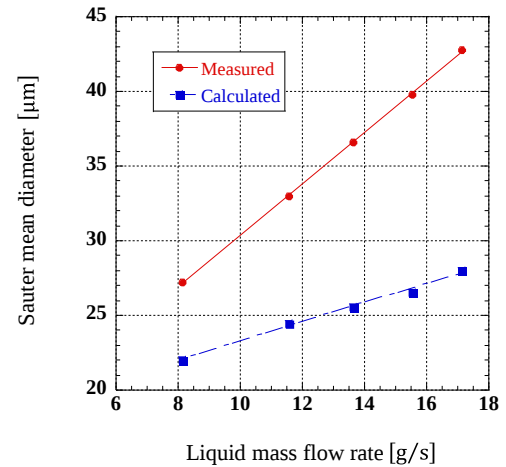


Fig.6 Particle diameter of measured and calculated

数値計算の結果は、実験結果と同様に水の質量流量に対してザウター平均粒子径が線形的に増大した。しかし、ザウター平均粒子径は実験と数値計算で誤差があった。そして、水の質量流量が増加するほど、その誤差は増大した。これは凝集による影響といえる。噴霧では水の質量流量が増加するほど、吐出後の大気圧空間に液滴は多数存在し、液滴同士の衝突する確率は増大する。つまり、水の質量流量が増加するほど、凝集が発生しやすい状態になったといえる。

そのため、本研究で用いたノズル形状に対して適用可能な凝集を考慮した補正式を検討した。導出は、図6に示した実験結果と数値計算結果の各プロットの差に対して線形近似を行い導出した。 A は補正パラメータ[μm]、 w は水の質量流量[g/s]として、補正式を以下の式(1)に示す。

$$A = 1.08092w - 3.682 \quad (1)$$

式(1)が補正式として使用できるか検討するため、再び同条件において数値計算を行い、式(1)を用いて補正を行った(図7)。補正後の数値計算の結果は実験結果と概ね一致したため、導出した補正式は適用可能といえる。

したがって、実験と同様に、水の質量流量に対してザウター平均粒子径が線形的に増大する特徴が得られ、補正式を適用することで数値計算の凝集を考慮した。今後は、補正式がノズル形状を変更したときに適用できるか検討する。

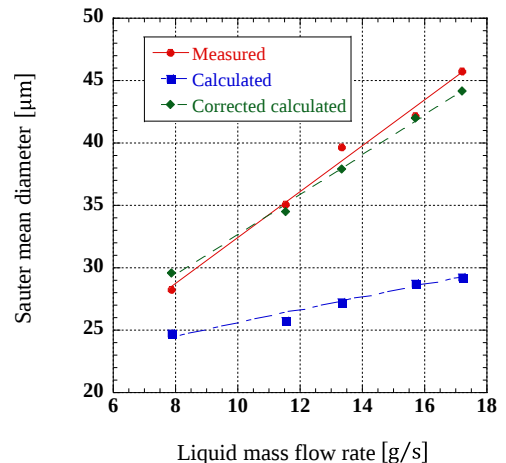


Fig.7 Particle diameter of measured and corrected calculated

4. 過溶解炭酸水の微粒化特性

4.1 実験方法

実験条件を表2に示す。水噴霧および炭酸水噴霧において、容器内圧力を0.1MPaから0.5MPaの範囲として0.1MPa間隔に変化させ、それぞれ噴霧した。粒子径については、ザウター平均粒子径を粒度分布計にて測定した。各実験を3回行い水噴霧および炭酸水噴霧それぞれの場合において、ザウター平均粒子径を計15回測定した。

Table2 Experimental conditions

Pressurized gas	Air, CO ₂
Pressure in the container [MPa]	0.1~0.5
Liquid mass flow rate[g/s]	7.60~17.3
Air mass flow rate[g/s]	24.1

4.2 実験結果

噴霧液の違いによるザウター平均粒子径と噴霧液流量の関係を図8に示す。

水噴霧および炭酸水噴霧において、それぞれ15回測定したプロットに対して線形近似を行った。近似線において炭酸水噴霧は水噴霧とほぼ同様の結果が得られ、炭酸水による微粒化の効果は得られなかった。つまり、バルブを使用しない代わりに噴霧液吐出部を縮小した結果、炭酸水の微粒化効果が減少したといえる。

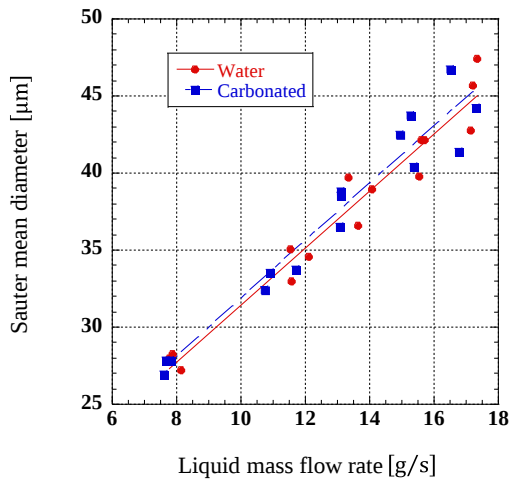


Fig.8 Particle diameter of water spray and carbonated spray

4.3 考察

炭酸水による微粒化の効果は得られなかった。これはノズル吐出部を縮小したことによる噴孔ウェーバー数 W_e [-]⁽³⁾の低下が原因といえる。噴孔ウェーバー数とは液体の分裂を評価するパラメータであり、気流の慣性力と液体の表面張力との比を表す。噴孔ウェーバー数を以下の式(2)に示す。なお、 ρ_g は気相密度[kg/m³]、 u_g は気相の速度[m/s]、 u_l は液相の速度[m/s]、 D はノズル噴孔直径[m]、 σ は液相の表面張力[mN/m]である。

$$W_e = \frac{\rho_g |u_g - u_l|^2 D}{\sigma} \quad (2)$$

噴孔ウェーバー数が大きければ微粒化は促進され、小さければ分裂せずに直進される。本研究では、ノズル噴孔を先行

研究⁽⁴⁾で使用した噴孔8mmのノズルから噴孔1mmのノズルへと変更したため、式(2)より液相の速度が増加した。そのため、ノズル噴孔直径 D および相対速度 $|u_g - u_l|$ は減少し、噴孔ウェーバー数は減少した。したがって、慣性力よりも表面張力による分裂を妨げる力が相対的に大きくなり、炭酸水による膨張エネルギーが抑えられたといえる。

つまり噴孔ウェーバー数を大きくすれば、液滴は分裂しやすくなり、さらに炭酸水による膨張エネルギーを有効化できるといえる。したがって、液滴を微粒化するには、噴孔ウェーバー数を考慮した構造を検討する必要がある。

5. 結言

本研究では、数値計算および実験的な評価を同時に行い、噴霧構造の検討を行った。その結果、吐出部近傍での渦の発生や炭酸水の膨張エネルギーの抑制等の課題が明らかになった。本研究では単一のノズル構造のみを用いて、微粒化を考察したが、今後は噴孔ウェーバー数にも着目し、複数のノズル構造に対して検討、比較していかなければならない。

構造を検討するにあたり、渦の発生を抑えつつ、噴孔ウェーバー数を大きくするために相対速度についても考慮する必要がある。そのため、オリフィスの形状については、空気吐出部の縮小やテーパ構造に変更することが考えられる。一方、ノズル形状については、液相速度を減少させるために、ノズル噴孔の拡大や吐出方向の変更が必要である。

文献

- (1) 岡本紘樹, 炭酸水を利用した微粒化噴霧構造の検討, 高知工科大学, システム工学群, 知能機械工学専攻, 2019
- (2) 田原嶺宏, 内外混合二流体噴霧の微粒化特性および噴霧特性, 修士論文, 高知工科大学院, 知能機械システム工学コース, 2015
- (3) 橋口和明, 内部混合型二流体噴射弁による重質燃料の微粒化と燃焼に関する研究, 博士論文, 広島大学, 2019, p.27.