

論文

新しい2パルスホログラフィ法による 静電霧化粒子の速度分布測定

緒方 純俊*, 石川宗晴**, 村上昭年**, 篠原 久***
(1980年11月25日受理)

Velocity Distribution Measurement of Electrostatically Sprayed Droplets by Improved Two Pulse Holography Technique

S. OGATA,* M. ISHIKAWA,** T. MURAKAMI** and H. SHINOHARA***
(Received November 25, 1980)

The velocity distributions of droplets produced electrostatically were measured by a new holographic technique. In this case, a pair of holograms at desired time interval was recorded in two different films and analyzed in a two dimensional situation. The result shows that the average velocities measured just above the grounded plate are in agreement with the calculated terminal velocities. This fact indicates that the present technique would be useful to atomization studies.

1. はじめに

さきにわれわれの1人が開発した^{1,2)}, 波長の異なる2台のパルス色素レーザを用いるインラインホログラフィ法は液体微粒化の素過程の観測ならびに空間的に分布した微粒子の粒径分布および粒子の速度分布の観測にきわめて有用であることが確かめられている。本ホログラフィ法では微粒化過程の観測のみならず, 空間における粒子の数密度, 粒径分布といった情報が一度に得られる。また2台のパルス色素レーザを適当な時間間隔で発振させ, それぞれ2枚のホログラムとして記録すれば, 粒子の3次元速度分布を測定することも可能である。さらにホログラフィ法では粒子の鮮明な画像が得られるから, 従来の写真撮影法に比べてより微細な粒子の運動を解析することができる。

静電霧化によって得られる数十ないし数百μmの粒子は電界中では一般に電気流体力学的運動をするので, これまで粒子の挙動を正確に把握することが困難であつ

た。

ここでは静電霧化粒子の3次元速度分布を解析する基礎として, まず噴霧の中心面における粒子の速度を測定した。したがってデータの解析は2次元近似となっている。

2. 実験装置と実験方法

2.1 光学系と測定法

図1に測定装置の概略を示す。カメラと観測対象である噴霧の位置関係は, 噴霧がインライン・フラウン・ホーファ・ホログラム^{*1}として記録されるように設定されている。用いた2台のレーザはいずれもキセノンフラッシュランプ励起の有機色素パルスレーザで, 最大出力エネルギーは250 mJ, パルス幅0.4 μs, おののの波長は590 nmと632 nmである。粒子像の撮影には低感度, 高解像力(1,500本/mm以上)のフィルム(Agfa 10E 75およびKodak SO 253)を用いた。粒子の好ましいフラウン・ホーファのホログラムを得るために, 粒子から記録フィルムまでの距離yは次の範囲になければならない。

$$d_p^2/\lambda \ll y < 50(d_p^2/\lambda) \quad (1)$$

左辺はフラウン・ホーファの条件, 右辺は良好な再生像が得られる条件を示す。(1)式の関係からわかるように, 小さな粒子のホログラムを記録するにはyを小さく

^{*1} 入射光をそのまま参照光として, 粒子によるフラウン・ホーファ回折光を干渉させて記録する方法。

*, ** 九州大学工学部(812 福岡市東区箱崎6-10-1)

Faculty of Engineering, Kyushu University, 10-1, Hakozaki 6-chome, Higashi-ku, Fukuoka, 812 Japan

* 化学機械工学科 Department of Chemical Engineering, ** 応用理学科 Department of Applied Physics

*** 福岡大学工学部化学工学科(814 福岡市西区七隈11)

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Fukuoka University, 11, Nanakuma, Nishi-ku, Fukuoka, 814 Japan

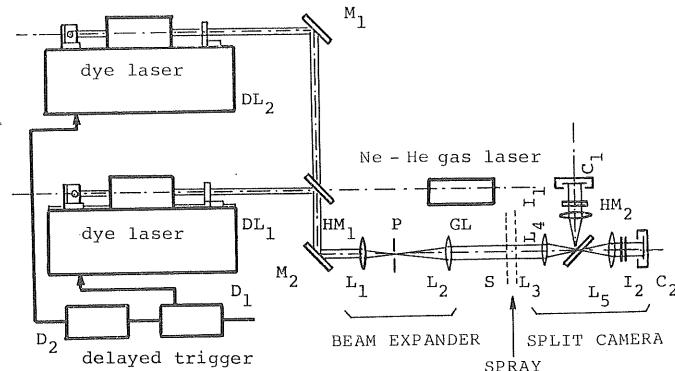


図 1 粒子速度を測定するための 2 ビーム・ホログラフィ装置

Fig. 1 Two beam holography apparatus for the measurement of droplet velocity.

する、すなわちフィルムを噴霧の中におかなくてはならなくなるので、レンズ L_3 , L_4 (L_5)で変換して撮影する方法をとった。このときレンズ L_3 を通った光線はレンズ L_4 (L_5)で屈折し、噴霧の像を L_4 (L_5)の後方の焦点の位置(カメラ C_1 , C_2 のフィルム面に相当)に結像するようしている。

レーザ DL_1 , DL_2 から発した波長の異なる二つの光線をミラー M_1 , M_2 およびハーフミラー HM_1 によって同一光軸を通して観測部 S に入射させ、噴霧に関する情報をもった二つのレーザパルスをハーフミラー HM_2 と 2 枚の干渉フィルタ I_1 , I_2 とで選択的に 2 枚のフィルムに記録させる。これらの光学系の調整は Ne-He レーザ GL を用いて行なった。2 台のレーザの発振間隔は遅延回路 D_1 , D_2 によって調節した。

速度分布は 2 枚の写真を重ね焼きして粒子の移動距離を読み取り、これを撮影の時間間隔で除して求めた。

2.2 試料および電極

試料液として導電率 $1.3 \times 10^{-4} \text{ S/m}$ の蒸留水を用いた。噴霧電極であるノズルは内径 0.42 mm, 外径 0.69 mm のステンレス製注射針で、先端は軸に直角に切られている。接地電極は真鍮円盤で、ノズル下方 82 mm に設置した。電源として直流電圧を用い、ノズルを正極に保った。印加電圧は一様な噴霧が得られやすい 15 kV および 17.5 kV とした³⁾。液流量は一定 $8 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$ に保った。

2.3 撮影方法

図 2 に噴霧の撮影視野(丸で囲まれた部分)とサンプリング面(四角の部分)を示す。撮影はまず軸方向(z 方向)に 20 mm ずつ撮影視野を移動させて行ない、つぎに接地板直上を半径方向(r 方向)に 10 mm ずつ移動させた。

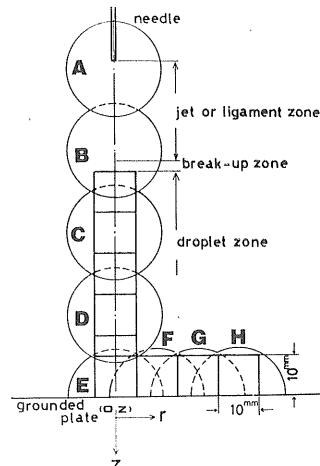


図 2 垂直および半径方向に沿う観測および測定視野の位置

Fig. 2 Locations of visual field for observation and measurement along the vertical and the radial directions.

2.4 サンプリング方法

撮影視野はほぼ直径 20 mm の円型である。噴霧の中心に焦点を合わせて撮影された 2 枚の対応するフィルムを重ね焼きして 2 次元平面上の粒子の変位を求める。つぎに図 2 に示された、一辺が 10 mm の正方形のサンプリング面を描き、この面中に含まれる読み取り可能^{*2}なす

^{*2} ここでの測定は 2 次元近似となっているので、焦点から著しくはずれている粒子(図 3 における大きな干渉縞の粒子)の運動を対応づけることは不可能である。しかしホログラムは本来 3 次元の情報をもっているので、解像さえうまくいけば全部の粒子の移動距離を読み取ることができる。

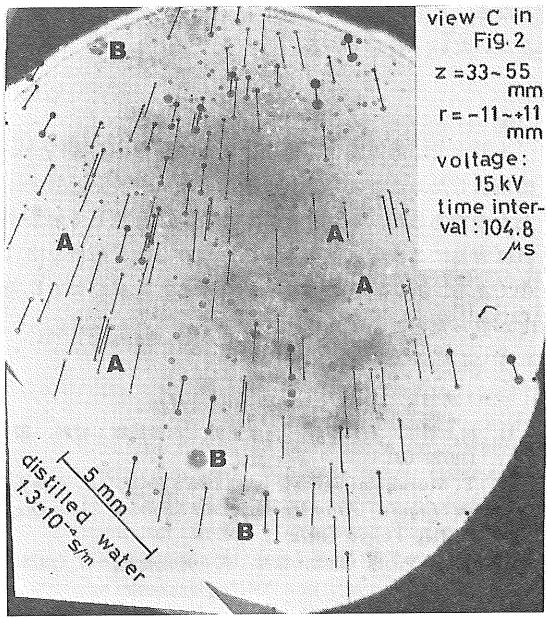


図 3 霧化粒子の速度ベクトルを示す重ね焼き写真

Fig. 3 Superimposed picture indicating velocity vectors of sprayed droplets.

べての粒子の変位から速度分布および平均速度を求めた^{*3}。ここでは、これらの値を面の中心 (o, z) における値とみなすことにする。

3. 実験結果と考察

撮影時間のわずかに異なる 2 枚のフィルムを濃淡をつけて重ね焼きすると粒子の対応がつけやすく、その間に移動した粒子の距離がわかる。その一例を図 3 に示す。図にみられる干渉縞 A はフィルム変換面と粒子の位置が一致しないためのフラン・ホーファ回析パターンで、必ずしも真の粒径と一致しない。また極端に大きな干渉縞 B はカメラのレンズに付着した液滴によるものである。

図 4 に z 方向における粒子の速度分布の変化を示す。ここで分布の山は粒子の速度 v_z の頻度分布を示す。図 3 にみられるように、小さい粒子ほど大きな速度を有するので、大なる v_z は小さな粒子のものである。上図および下図の比較から印加電圧が v_z におよぼす影響を読み取ることができる。最大（または最小）速度に着目して上、下図を比較すると、粒子は電界の強い領域 (z が小さいところ) で加速された後、空気の抵抗によって減速される ($z \rightarrow L$) ようである。

^{*3} 噴霧の撮影面（焦点の合わされた面）とレーザ光線とが直角になるようにして撮影を行なっているので、垂直方向の速度成分 v_z のみが正しく読み取られる。

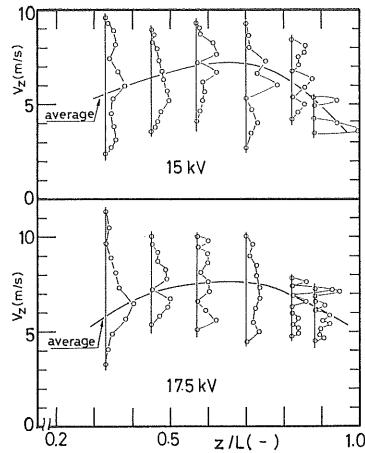


図 4 垂直方向に沿っての霧化粒子の速度分布

Fig. 4 Velocity distributions of sprayed droplets along the vertical direction (upper: 15 kV, lower: 17.5 kV).

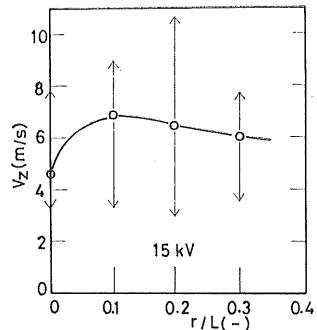


図 5 半径方向に沿っての霧化粒子の速度分布

Fig. 5 Velocity distributions of sprayed droplets along the radial direction.

図 5 に接地極直上の v_z の変化を示す。ここでは v_z のサンプリング個数が 10~20 個と少なかったので、分布図とせず、上・下限のみを矢印で示した。接地極板上では噴霧の中心 ($r=0$) の速度は小さいようである^{*4}。

いま接地極板直上では粒子は平衡速度に達し、かつここではイオン風の影響が無視できると仮定すると、次式が成立つ。

$$qE_z + mg = 1.25\pi(\rho_f\mu_f)^{1/2}(v_z d_p)^{3/2} \quad (2)$$

左辺は電気力と重力の和、右辺は空気の抵抗力を示す。ここで m は粒子 1 個の質量 (kg), q は粒子の電荷 (C), E_z は z 方向の電界成分 (V/m), g は重力加速度 (m/

^{*4} 電界力のほかに、粒子の運動に影響をおよぼす因子としてコロナ風および噴霧による随伴気流（粒子が移動するときに空気の粘性によって惹起される）が考えられる。極板上の点 ($r=0$) はこれらの気流の発生点となるために、この部分の粒子速度が小さくなると推測される。

s^2), ρ_f , μ_f はそれぞれ空気の密度 (kg/m^3) と粘度 (Pa·s), d_p は粒子の直径 (m) を表わす。

したがって

$$v_z|_{\text{terminal}} = \left[\frac{\rho_1 d_p^{3/2} \{(q/m) E_z + g\}}{7.5 (\mu_f \rho_f)^{1/2}} \right]^{2/3} \quad (3)$$

また q/m ⁴⁾ および E_z ⁵⁾ を次式で表わす。

$$q/m = 6(2\varepsilon_0 \gamma)^{1/2} / \rho_1 d_p^{3/2} \quad (4)$$

$$E_z = \frac{2V_0}{L \ln(8L/D_N)} \quad (5)$$

ここで、 ε_0 は真空誘電率 (F/m), γ は液の表面張力 (Pa·m), ρ_1 は液の密度 (kg/m^3), V_0 は印加電圧 (V), L は電極間隔 (m), D_N はノズル直径 (m) を表わす。
(4), (5)式を(3)式に適用し、さらに $d_p = 100 \mu m$ ^{*6}, $D_N = 6.9 \times 10^{-4} m$, $L = 8.2 \times 10^{-2} m$, ρ_1 , γ および ρ_f , μ_f としてそれぞれ 20°C における水および空気の物性値を用い $v_z|_{\text{terminal}}$ を計算すると

$$v_z|_{\text{terminal}} = \begin{cases} 5.6 \text{ m/s} & (15 \text{ kV}) \\ 6.2 \text{ m/s} & (17.5 \text{ kV}) \end{cases}$$

*5 本法で得られたメディアン径は約 $70 \mu m$ 、一方同一実験条件において液浸法で得られたメディアン径は $150 \mu m$ だったので、ここでは $d_p \sim 100 \mu m$ とした。

となる。これらの値は図4で $z/L \rightarrow 1$ としたときの v_z とだいたい一致している。

4. おわりに

本測定では静電霧化粒子の速度を噴霧の中心面について解析した。ここで得られた速度分布は2次元近似されたものであるが、ホログラムを空間的に分割して解像すれば容易に3次元に拡張しうる。現在3次元解析を検討中である。近い将来に成果を紹介することができる見通しが立ったところである。

参考文献

- 1) 村上昭年, 石川宗晴, 白水正男, 白銀辰雄: 材料, 27 (1978) 681
- 2) T. Murakami and M. Ishikawa: Proc. 1st. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, p. 317, Tokyo (1978)
- 3) 緒方純俊, 原 康博, 篠原 久: 応用物理, 47 (1978) 522
- 4) S. Ogata and H. Shinohara: Jpn. J. Appl. Phys., 16 (1977) 651
- 5) A.R. Jones and K.C. Thong: J. Phys. D: Appl. Phys., 4 (1971) 1159