

粒度分布操作方法の開発 (振動周波数掃引による液柱分裂の制御)

Development of Drop Size Distribution Control Technique (Liquid jet breakup control by vibration frequency sweeping)

寺島 幸士, 篠原 大輔, 中川 政善, 徳岡 直静
 (Koji TERASHIMA) (Daisuke SHINOHARA) (Masayoshi NAKAGAWA) (Naochika TOKUOKA)
 Brunel Univ.* 三井物産株式会社* トヨタ自動車株式会社* 慶應大学
 (Brunel Univ.) (MITSUI&Co.,Ltd.) (TOYOTA MOTOR CORPORATION) (KEIO Univ.)

In general, the commercial atomizer can not control the drop size distribution, which is one of the important parameter of spray characteristics, independently to the mean drop size. For this problem, we develop advanced spray characteristic control technique by using a vibratory mono-dispersed spray atomizer. Drop size distribution is controlled by the sweep range of frequency impressed on a vibratory atomizer. It is possible to obtain a spray with the target drop size and deviation of drop size distribution by the optimal selection of impressing frequency and its sweep range. The effect of sweep time of impressed signal on both mean drop size and drop size distribution is very small and it can be neglected. The spray generated by this technique has periodic change of its characteristics. However, it decays during flight process of spray. Moreover, it is possible to reduce periodicity of spray by fast sweeping.

Key Words: Drop Size Distribution, Spray Characteristic Control, Vibratory Atomization, Monodispersed Spray, Polydispersed Spray

1. 緒言

平均粒子径や粒度分布などの噴霧特性は、噴霧燃焼を始めとする噴霧に関係した現象に影響を及ぼし、それらの装置の性能を左右する。したがって、設計の際には、噴霧特性は厳密に考慮されるべき事柄である。しかし大抵の微粒化装置（噴射弁）によって得られる噴霧は大小様々な粒子により構成されており、平均粒子径と粒度分布を独立してコントロールすることはできない。このため噴霧を扱う研究では、噴霧粒子の大小を平均粒子径のみで評価する場合が多く、粒度分布の及ぼす影響について詳細かつ体系的な研究報告は存在しない。噴霧の粒度分布と平均粒子径を独立にコントロール可能な噴射弁を開発すれば、噴霧にかかわる広範囲な現象において、平均粒子径と粒度分布の影響を分離して考慮することが可能となり、現象を詳細に理解することが可能となる。

本研究の目的は、一般的な単一ピークを持つ噴霧の粒度分布の幅を平均粒子径と独立にコントロールすることが出来る微粒化技術の開発である。この目的のため、本研究では振動微粒化式噴射弁を用いた。液体にある周波数の振動を定常的に印加することで単分散噴霧を生成可能な本装置に、周波数を掃引した信号を印加することで、粒度分布のコントロールを目指した。

* 本研究は慶應義塾大学大学院在籍中に行われたものである。
 原稿受付：平成 16 年 2 月 20 日

2. 粒度分布操作法の基本原理

本研究で用いた噴射弁を図 1 に示す。本噴射弁は一般に単分散噴霧生成用に用いられる振動微粒化式噴射弁⁽¹⁾と同一の原理であり、噴射弁に取り付けられた電歪振動子を電気信号により振動させ、分裂を促進する機構となっている。また、噴霧粒子の再合体を防ぐため、液柱と同軸に空気（拡散空気）を噴出する。噴射弁から噴出する層流の液柱に強制的に振動を与えると、その振動に応じた波が液柱表面に形成される。この表面波が成長し、振幅が液柱径にまで拡大すると、液柱は分裂し噴霧粒子となる。表面波の成長速度は、表面波の周波数により異なり、成長速度が最大となる条件が存在する。この条件については過去に様々な研

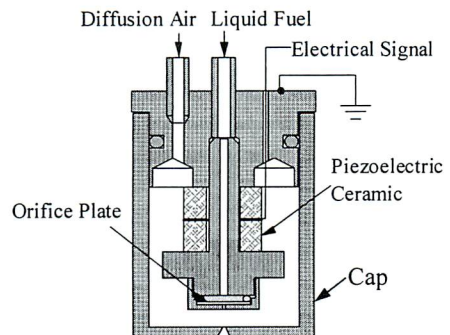


Fig.1 Schema of test atomizer

究が存在し, Rayleigh ら⁽²⁾の理論解析によると, 真空中における非粘性流体については, 成長速度が最大となる条件は以下の式で表される.

$$\lambda/D_j=4.51 \quad (1)$$

ただし λ は表面波の波長で, D_j は液柱径である. この波長ごとに液柱が分裂した場合, 生成粒子径は,

$$d=1.89D_j \quad (2)$$

となる. さらに粘性流体については Weber ら⁽³⁾が解析を行っている.

液柱表面において波長 λ が上記の式を満たす周波数は最大不安定周波数と呼ばれ, この周波数を液柱に印加した場合は単分散噴霧を最も効率よく生成することが可能となる. ただし, 十分に強い振動を印加した場合は, ある程度の範囲においては, 成長速度の速い周波数成分に打ち勝って液柱分裂が起きるため, 同一の液柱に対して, 単分散噴霧が生成できる周波数はある程度の幅を持ち, したがって粒子径も変化する. Schneider と Hendricks ら⁽⁴⁾は, 単分散噴霧が生成可能な範囲を以下のように実験的に求めた.

$$3.5D_j<\lambda<7D_j \quad (3)$$

この場合, 生成可能な粒子径は液柱径を用いて以下のとおりに表される.

$$1.74<d/D_j<2.19 \quad (4)$$

印加振動の周波数がこの範囲をはずれた場合は, 印加振動により液柱表面に形成された波が液柱の進行と共に成長せず, 噴出初期の微小な乱れ成分の成長による不規則な分裂が発生し, 結果, 生成される噴霧の粒子径は均一でなくなる.

本研究で提案する方法は, 基本的には単分散が生成可能な周波数を基準周波数とし, 基準周波数に対して任意の周波数範囲で印加する振動周波数を掃引することにより, 基準周波数やオリフィス径, 試料流量などにより制限を受けるものの, ある程度の範囲で任意の粒度分布を持つ噴霧を生成するものである. 本方法を

用いることで, 単一ピークを持つ噴霧の粒度分布の幅を平均粒子径と独立に制御する. さらに単分散生成が不可能な周波数域では粒度分布の広い噴霧が生成されるため, このような周波数を含めた振動を印加し, 粒度分布の制御範囲を拡大する.

3. 実験装置および方法

本研究の実験条件を表1に, また実験装置の概要を図2にそれぞれ示す. 本研究で用いた噴霧生成装置は振動式噴射弁およびスイープファンクションジェネレータからなり, 位相ドップラ式粒子測定装置(PDPA, TSI)を用いて生成された噴霧粒子を測定した. 平均粒子径(算術平均粒子径 D_{10})と, 粒子径の相対標準偏差を用いて生成された噴霧の特性を評価した. 液柱分裂の観察は, マイクロフラッシュとカメラを用いて透過光による瞬間写真撮影により行った. この際, 拡散空気の供給は停止し, 噴射弁の空気噴出口をはずして撮影した. スイープファンクションジェネレータが出力する掃引同期信号を分周および遅延し, マイクロフラッシュに供給することで, 掃引時間中の任意のタイミングでの撮影を行った.

試料流量は調整可能であるが, 本報告においては,

Table.1 Experimental conditions

Parameters	Specification
Atomizer & Liquid	
Sample liquid	Tap water
Sample flow rate	1.5g/min
Airflow rate	0 ~ 8.6×10 ⁻³ m ³ /min
Orifice size	66μm
Impressed Signal	
Amplitude	24Vp-p
Basic frequency	0.01Hz ~ 50kHz
Sweep width	0 ~ 60kHz
Sweep time	25 ~ 500ms

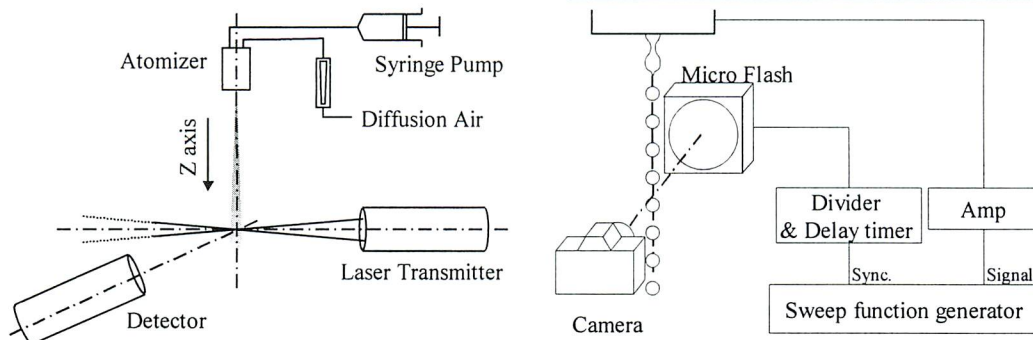


Fig.2 Experimental Setup

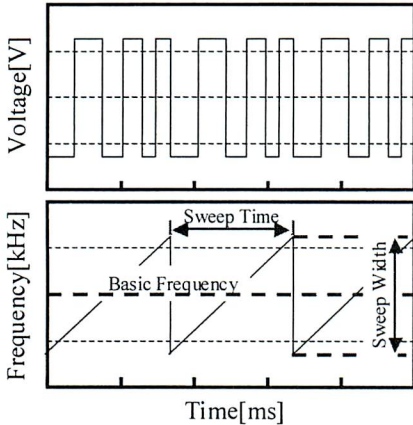


Fig.3 Schematic diagram of impressed signal

1.5g/min で一定とした。スイープファンクションジェネレータを用い、基準とする周波数(基準周波数[kHz])に対して掃引させた時の周波数の変化量を掃引幅[kHz]、1周期の変化に要する時間を掃引時間[ms]と定義し、それぞれを独立して任意に変化させ、生成された噴霧を位相ドップラ式粒子解析器により測定した(図3)。印加信号は矩形波で、噴霧の中心軸上を粒子径の測定点とした。また噴射量は受止法により測定した。さらに、このように生成された噴霧は原理的に、空間的な周期性を持つと考えられるため、周期性の残存性について検討した。

4. 結果および考察

4.1 一定周波数信号を印加した場合における生成噴霧の平均粒子径および粒度分布の変化

振動子に印加する信号の周波数を一定とし、周波数掃引を行わない場合に生成される噴霧の特性を求めた。図4は、周波数掃引を行わず、基準周波数を変化させた場合における噴射弁直下50mmでの平均粒子径および粒子径の標準偏差である。また同位置での、印加周波数に対する典型的な生成噴霧の粒度分布を拡散空気流量が $4.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ の場合について図5に示す。測定結果によれば分裂点付近における液柱径は約 $67 \mu\text{m}$ であった。したがって本実験条件における、Rayleighの理論による最大不安定周波数は23.5kHzで、またその際の生成粒子径は約 $127 \mu\text{m}$ となる。また、式(3)および式(4)に従うと15~30kHzの印加周波数において $147 \sim 117 \mu\text{m}$ の単分散噴霧が生成可能である。本実験においては矩形波を印加しているため、印加信号には様々な高周波成分が含まれている。このため単分散噴霧が生成可能な範囲はわずかに変化し理論値と異なるが、印加周波数が約10~25kHzの場合は、生成粒子径の相対標準偏差が小さく、卓越したピークを持つ単分散噴霧が観測された。この周波数範囲では、生成粒子径は液柱が印加周波数で均一に噴霧粒子に分裂したと仮定した計算値と一致し、周波数の増加と共に

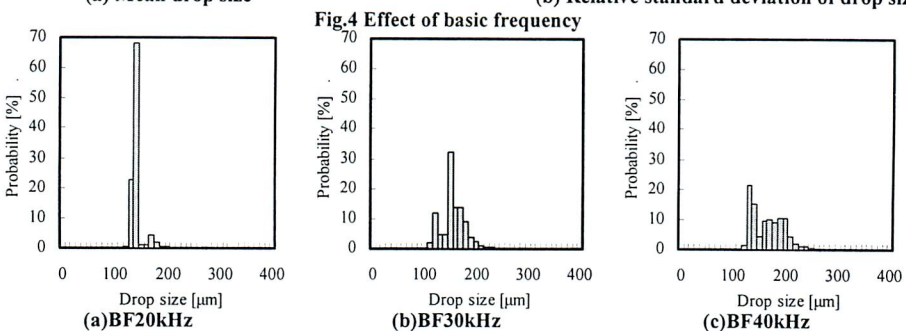
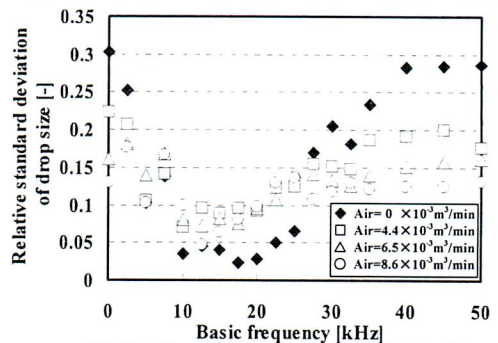
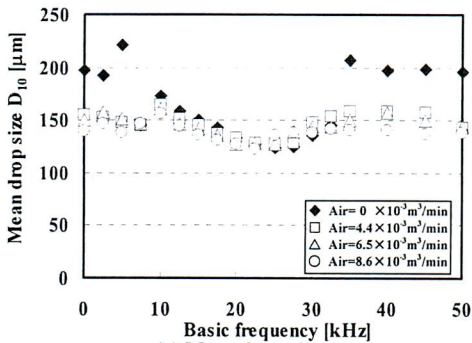


Fig.5 Alteration of drop size distribution by basic frequency

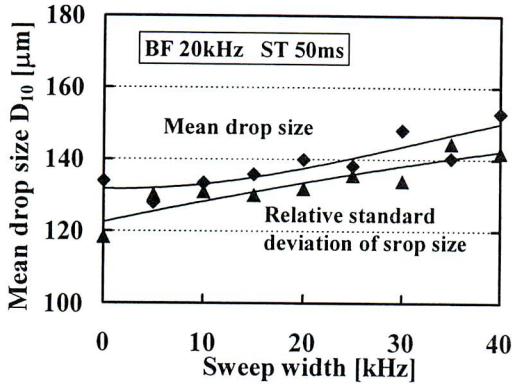


Fig.6 Effect of sweep width

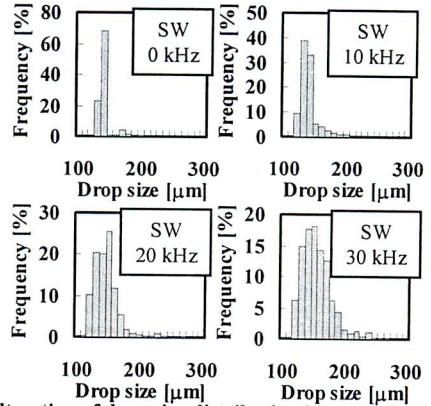


Fig.7 Alteration of drop size distribution by sweep width

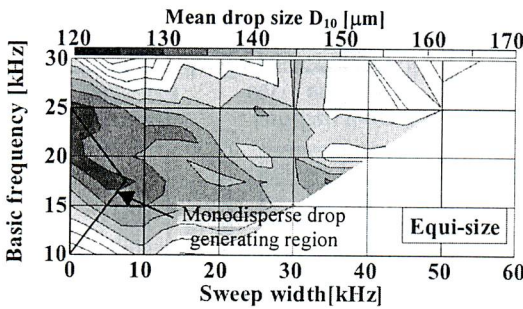


Fig.8 Contour map of mean drop size

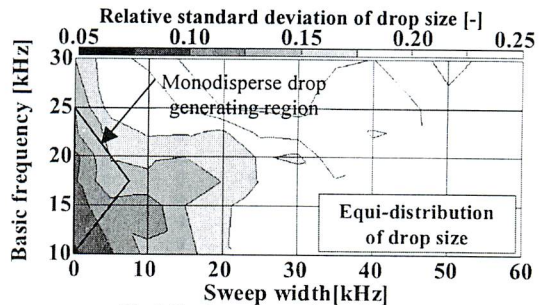


Fig.9 Contour map of relative standard deviation of drop size

に粒子径は低下した。したがってこの周波数範囲では単分散噴霧が生成されていると考えられる。よってこの周波数範囲を単分散生成領域と定義する。

印加周波数が単分散生成領域をはずれた場合、平均粒子径は増加し、複数のピークを持つ粒度分布となる。印加周波数が最大不安定周波数をはずれているため、印加した振動が分裂に与える影響が低く、結果的に液柱および気流中に自然に存在する微小な乱れ成分が成長して分裂にいたると考えられる。複数のピークのうち、粒子径が一番小さなものは、その粒子径から、液柱に存在する微小な乱れのうち最大不安定周波数成分の乱れが成長し液柱分裂に至った場合に生成された噴霧粒子のものであると考えられる。

4.2 掃引幅による生成噴霧の平均粒子径および粒度分布の変化

基準周波数を 20kHz、掃引時間を 50ms とし、掃引幅を変化させた場合の噴射弁直下 50mm における平均粒子径および粒子径の標準偏差の変化を図 6 に示す。またその際の粒度分布を図 7 に示す。基準周波数を一定に保ち掃引幅を増加した場合、生成される噴霧の粒度分布は徐々に広がる。またこの際、掃引幅の中に単分散生成領域をはずれる周波数が含まれていても

単一のピークを保つことが可能である。これは、各瞬間には一定周波数を印加した場合と同様に複数のピークを持つが、その位置は印加周波数により変化するため、周波数掃引により各瞬間に形成される様々な粒度分布が平均化されて、単一のピークとなったものと考えられる。ただし基準周波数が一定の下では掃引幅により粒度分布と共に平均粒子径も変化し、平均粒子径と粒度分布の独立制御を行うことは出来ない。両者を同時に制御するためには、振動子に印加する信号周波数の掃引幅と共に基準周波数を調整する必要がある。図 8 と図 9 は、それぞれ基準周波数および周波数の掃引幅による平均粒子径の変化と粒子径の相対標準偏差の変化を示したものである。例えば図 8 において、平均粒子径が等しくなるよう基準周波数および掃引幅を選択することで、噴霧の粒度分布を平均粒子径が一定の下に制御することが可能である。また図 9 において噴霧粒子径の相対標準偏差が一定となるよう基準周波数および掃引幅を選択することで、粒度分布を一定の下、平均粒子径を制御することが可能となる。図中の実線で囲まれた三角形の領域は、掃引信号の周波数が単分散生成領域内となる範囲である。掃引信号の周波数が単分散生成領域内とした場合、基準周波数および掃引幅の変化による平均粒子径と粒子径の相

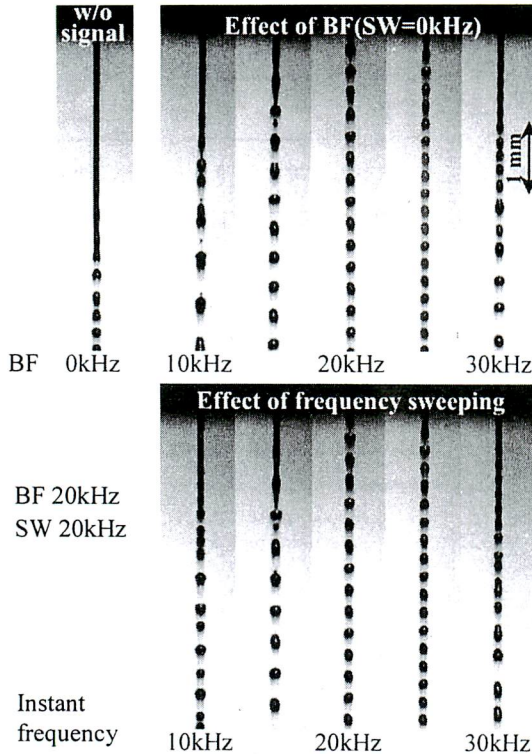


Fig.10 Liquid jet breakup (Without diffusion air)

対標準偏差の変化は比較的単純で、基準周波数の増加により平均粒子径は低下し、また掃引幅の増加により粒子径の相対標準偏差が増加する。ただしその変化範囲は狭い。一方、印加周波数を単分散生成領域外まで拡大すると、生成可能な平均粒子径および粒子径の相対標準偏差が拡大するが、基準周波数および掃引幅によるそれらの変化は複雑となる。これは単分散生成領域外の周波数の波は成長しにくいいため、印加信号が矩形波であることや、噴射弁自体が持つ複数の共振周波数などが影響し、実際に液柱に印加される振動の周波数成分のわずかな変化により液柱の分裂状態が変化するためであると考えられる。

4.3 周波数掃引された信号印加による液柱分裂の観察

図 10 に、基準周波数を 20kHz、掃引幅を 20kHz とした場合（下段）および、掃引を行わず、一定周波数のみの信号を印加した場合（上段）の液柱分裂の状態を示す。いずれの場合も拡散空気は供給していない。上段の周波数は印加した一定の周波数であり、下段の周波数は、掃引信号の、液柱分裂を撮影した瞬間における周波数である。周波数掃引を行った際の各瞬間の分裂状態は、対応する掃引を行わない場合の分裂状態

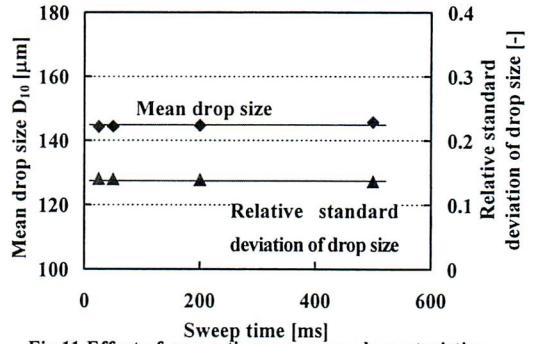


Fig.11 Effect of sweep time on spray characteristics

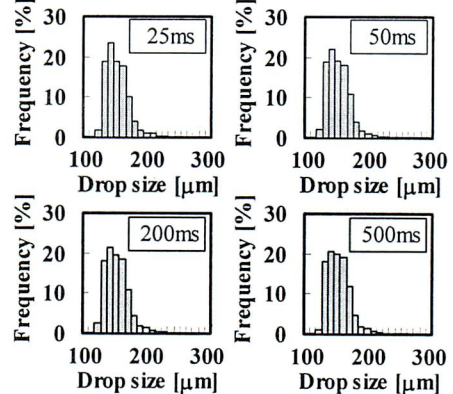


Fig.12 Drop size distributions (Effect of sweep time)

とほぼ一致する。このことより、本研究で提案する周波数掃引による粒度分布制御においては、準定常液柱分裂が起きていると考えられる。このことは、本手法で生成した噴霧の粒度分布は、予め測定しておいた、一定周波数を印加した場合に生成される噴霧特性を、掃引幅に従い重ね合わせることで容易に予測できることを意味している。

4.4 掃引時間の影響

掃引時間による噴霧特性の変化を測定した。図 11 は、掃引時間を変化させた場合の平均粒子径および粒子径の相対標準偏差の変化を示し、また図 12 は各掃引時間における粒度分布を示す。測定は噴射弁直下 25mm において行った。掃引時間が短くなった場合、平均粒子径はわずかに小さくなり、一方、粒子径の相対標準偏差はわずかに大きくなるが、その変化は掃引幅による変化に比べ非常に小さい。ただし本論分では噴射弁の個体差により測定結果が大きくばらついたためデータとして示さなかったが、さらに掃引時間を短くした場合は、生成される粒度分布は様々に大きく変化し、たいていの場合は複数の鋭いピークを持つ形状となった。

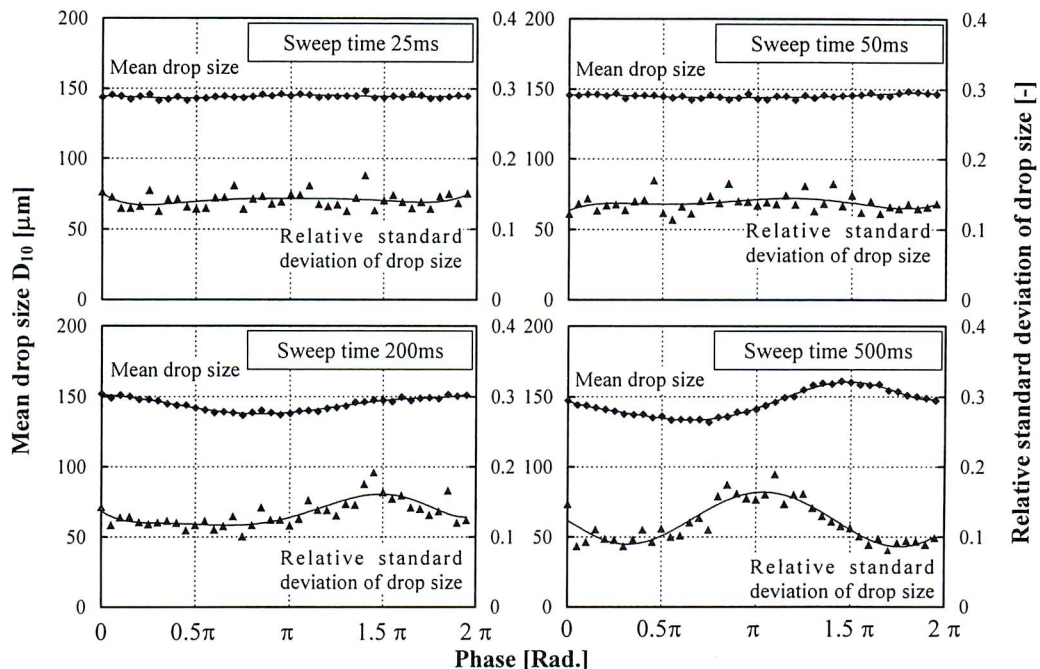


Fig.13 Periodicity of spray characteristics

4.5 周波数掃引により生成した噴霧の時間的な噴霧特性の変化

本方法は印加する振動の周波数を掃引させることにより瞬間ごとに異なる粒度分布をもつ噴霧を生成するため、生成した噴霧の特性に周期的な変動が発生すると考えられる。そこで図 11 および図 12 で示した生成噴霧について、印加信号の掃引時間を基準として掃引時間内の各位相における平均粒子径および粒子径の相対標準偏差を求めた。図 13 は、その結果である。またこの生成噴霧の測定位置を 25mm から 50mm および 75mm に変化させ、周期性がどのように低減するか測定した結果を図 14 に示す。この際、周期性の強度は掃引時間内の各位相における平均粒子径の標準偏差を用いて示した。生成された噴霧には明らかに掃引時間に依存した周期性が存在しているが、掃引時間が短く、飛行距離が長くなると、周期性はほとんど見られなくなる。これは、図 15 に示す、噴射弁直下 25mm、75mm および 200mm における噴霧粒子径と飛行速度の関係より、周囲空気との運動量の交換により噴射方向の噴霧の混合が進み、その度合いが粒子径により異なることで周期性が低減したためと考えられる。掃引時間が短い場合には、噴霧の周期性の周期が短いために、わずかな混合で周期性が低減するため、噴射弁近傍から周期性が低いものと考えられる。掃引時間が長い場合も、さらに飛行距離が長くなれば、混

合が進む可能性もあるが、噴霧流と同軸に噴射されている拡散空気がすでに弱まっているため、その進み具合は緩やかになっていると考えられる。

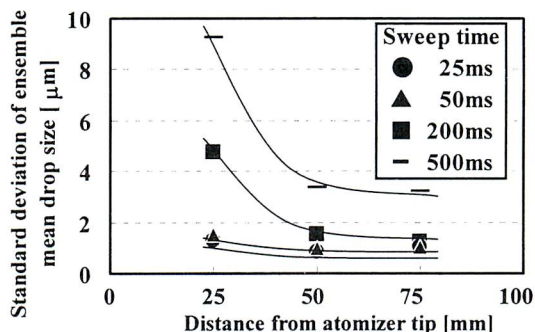


Fig.14 Decay of periodicity during flight process of drops

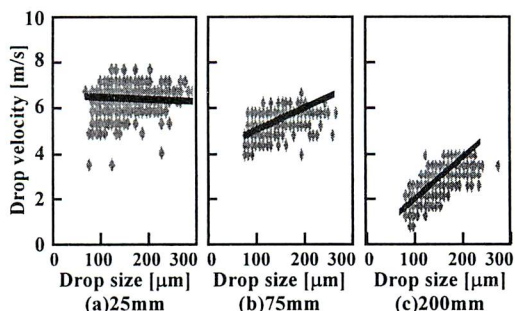


Fig.15 Correlation between drop size and velocity

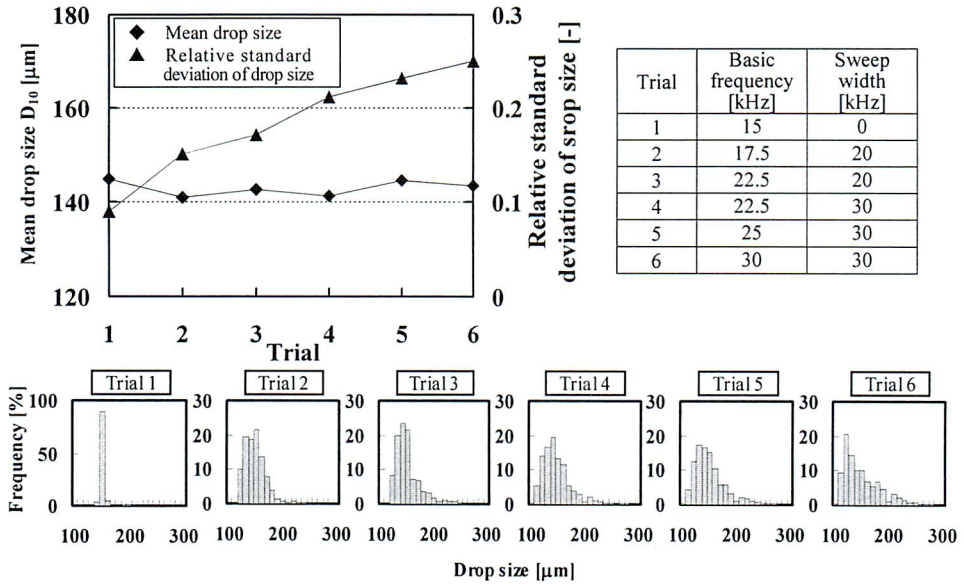


Fig.16 Result of drop size distribution control

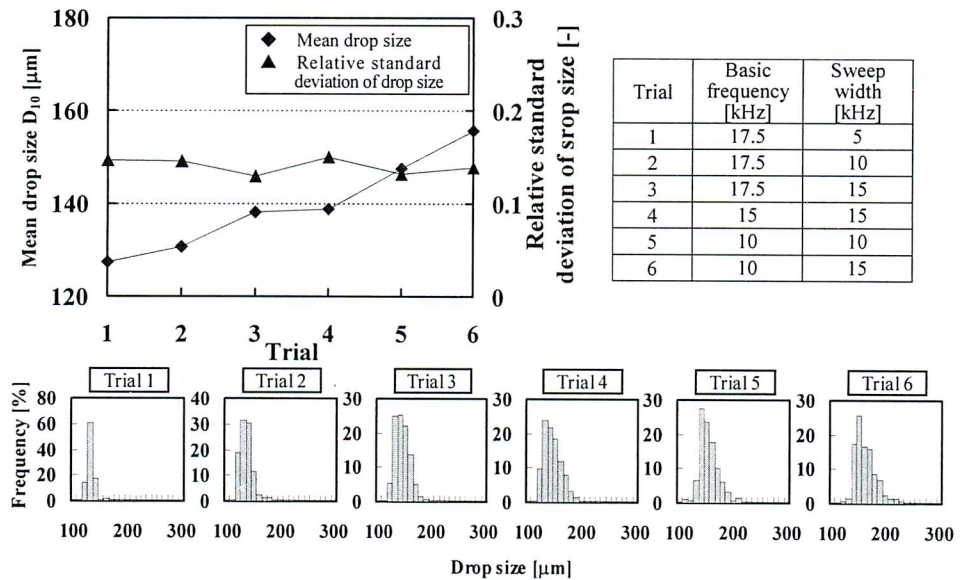


Fig.17 Result of drop size control

4.5 生成噴霧の平均粒子径および粒度分布の独立制御例

基準周波数および掃引幅による平均粒子径および粒度分布の標準偏差の変化を図 16 および図 17 に示す。平均粒子径が一定となるよう、図 8 に示した平均粒子径の等高線に沿って基準周波数および掃引幅を定めることで、平均粒子径が一定の下、標準偏差を変化させることが可能である。本実験条件においては図 16 に示すとおり平均粒子径が約 140 μ m において粒子径の相対標準

偏差が 0.09~0.25 の範囲で粒度分布が操作可能であった。また図 9 に示した相対標準偏差の等高線に沿って基準周波数および掃引幅を定めることで、図 17 に示すとおり、粒子径の相対標準偏差を約 0.15 に保ちつつ、平均粒子径を 127~156 μ m の範囲で操作可能であった。さらに生成粒子径を低下させるため、オリフィスを交換した場合においても、本操作法の原理に影響する要因が無いため、粒度分布が制御可能であると考えられる。

5. 結言

振動噴射弁を用いて、印加信号の周波数を掃引することにより粒子径の標準偏差を平均粒子径と共に操作する方法を開発した。また印加信号の周期性の噴霧への残存性についての解析を行い、以下の結論を得た。

- (1) 振動式単分散噴射弁に周波数掃引した信号を印加することで、生成噴霧の粒度分布を単一のピークのまま、その幅を変化させることが可能である。
- (2) 印加信号の基準周波数および掃引幅をパラメータとすることで、基準周波数やオリフィス径、試料流量などにより制限を受けるものの、ある程度の範囲で生成噴霧の平均粒子径および粒度分布を任意に設定できる。
- (3) 本研究で示した粒度分布操作法は、準定常的な液柱分裂が観察された。したがって、生成される噴霧の粒度分布は、周波数掃引を行わず一定の信号を与えつけた場合の噴霧特性を、掃引幅を元に重ね合わせることで予測することが出来る。
- (4) 印加信号の掃引時間により、生成噴霧の平均粒子径はわずかに小さくなり、一方粒度分布はわずかに広がるが、その影響は掃引幅による変化に比べ小さく、無視することが出来る。
- (5) 印加信号の周波数を掃引することで、生成噴霧には掃引時間に合わせた周期性が発生するが、噴霧の飛行過程で減衰する。また掃引時間を短くすることで低減される。

本実験条件においては、印加信号の周波数掃引を行うことによって平均粒子径が約 140 μ m において、粒子径の相対標準偏差が 0.09~0.25 の範囲で粒度分布の標準偏差が操作可能であった。また粒子径の相対標準偏差を約 0.15 に保ちつつ、平均粒子径を 127~156 μ m の範囲で操作可能であった。

参考文献

- (1) Berglund, R. and Liu, B., Generation of Monodisperse Aerosol Standards, Environmental Science & Technology, Vol.7, No.2, pp.147-153, 1973
- (2) Rayleigh, Lord J.W.S., On the Instability of Jets, Proc. London Math. Soc., 10, pp4-13, 1878
- (3) Weber, C., Disintegration of Liquid Jets, Z. Angew. Math Mech., Vol.11, No.2, pp136-159, 1931
- (4) Schnieder, J.M. and Hendricks, C.D., Source of Uniform-Sized Liquid Droplets, Rev. Sci. Instrum., 35(10), pp1349-1350, 1964



寺島 幸士

Visiting research scholar at Brunel Univ.

連絡先: 慶應義塾大学理工学部

機械工学科 徳岡研究室

〒223-8522

神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

TEL: 045-563-1141 ext.42068

Email: koji_terashima@1996.jukuin.keio.ac.jp

略歴: 2004年3月 慶應義塾大学大学院理工学

研究科博士課程修了

(本研究は慶應義塾大学大学院在籍中に行われた物である。)



篠原 大輔

三井物産株式会社

〒100-0004

東京都千代田区大手町1丁目2番1号

TEL: 03-3285-6623

FAX: 03-3285-9165

Email: daisukeshinohara@2001.jukuin.keio.ac.jp

略歴: 2003年3月 慶應義塾大学大学院理工学

研究科修士課程修了

(本研究は慶應義塾大学大学院在籍中に行われた物である。)



中川 政善

トヨタ自動車株式会社

連絡先: 慶應義塾大学理工学部

機械工学科 徳岡研究室

〒223-8522

神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

TEL: 045-563-1141 Ext.42068

Email: masamasa@2002.jukuin.keio.ac.jp

略歴: 2004年3月 慶應義塾大学大学院理工学

研究科修士課程修了

(本研究は慶應義塾大学大学院在籍中に行われた物である。)



徳岡 直静

慶應義塾大学理工学部

機械工学科 助教授

〒223-8522

神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

TEL: 045-563-1141 Ext.42068

Email: tokuoka@mech.keio.ac.jp

略歴: 1971年3月 慶應義塾大学大学院

工学研究科博士課程修了

主に燃料供給系や微粒子の挙動ならびに設計・製図の研究・教育に従事