

加振法による液滴の均一化に関する実験的研究

一 宮 浩 市*
望 月 康 徳*

(昭和58年8月31日受理)

An Experimental Study of Uniform Atomization by Vibration Excitation Method

by Koichi ICHIMIYA* and Yasunori MOCHIZUKI*

Abstract

The production of uniform atomization by vibration excitation is considered in the present study. Experiments were carried out by changing the frequency of vibration excitation, the jet diameter and the jet velocity. The optimum frequency has been noted to obtain the uniform size droplets up to this time. However, it is concluded that the domain of uniform atomization is determined by the relation between the kinetic energy of jet and the vibration acceleration.

1. 緒 言

均一な液滴を得ることは、噴霧燃焼の燃料の微粒化、液滴の過冷却などに必要であり、工業的に重要なものが多い。従来、均一な液滴を得る方法としては、液滴を落下させる針に平行に流した空気を用いる方法¹⁾、回転翼を用いて液体を振りまわし滴下させる方法²⁾、リードチップにより液滴を分散させる方法³⁾、液体に高電圧を加え静電場内に置き微粒化特性が変化することを利用する方法⁴⁾などがあり、各種用途に応じて試みられている。さらに、液滴の大きさ、数が比較的容易に制御でき、液体の種類に関係なく適用できる振動を用いる方法もある。振動を利用した研究としては横方向に加振し、噴流を崩壊させる方法⁵⁾、縦方向に加振した方法⁶⁾、両方向の振動に対する微粒化について検討した研究⁷⁾などがある。しかしながらこれらは液体噴流崩壊の最適振動数に関する検討が主となっており、均一な液滴を得る領域の決定にはいたっていないように思われる。

したがって本研究では、ノズルを振動させる方法を用い、噴流径、水流量を変化させ、ノズルに振動を加えた時の微粒化の状態、均一な液滴径が得られる領域

に関しては従来の最適振動数に注目したのとは異なり、噴流のエネルギーに注目し、より一般的に利用できる整理を試みた。

主な記号の説明

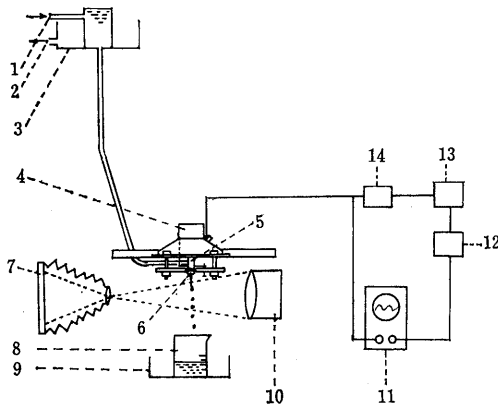
D : 液滴の径
 d_j : 噴流径
 d_n : ノズルの内径
 H : ノズルの先端からオーバーフロータンクまでの距離
 N : 振動数
 Q : 液体の体積流量
 U_i : 噴流の平均速度
 λ : 液滴の間隔 (波長)
 M : 単位時間当たりの噴流の質量
 A : 正弦波信号の振幅

2. 実験装置および方法

図-1に実験装置の概略を示す。試料液体としては水道水を用いた。水は水源からオーバーフロータンク③に供給され、ここから管により試験部に導かれ、貯水器⑤、ノズル⑥を経てピーカー⑧に滴下する。途中、ノズル⑥に加振機により振動が加えられる。

実際の流量は、目盛付ピーカー内にノズルの噴出口から滴下した量とそれに要した時間を測定して求め

* 機械工学科, Department of Mechanical Engineering



- (1) water (in)
- (2) water (out)
- (3) overflow tank
- (4) speaker (vibrator)
- (5) reservoir
- (6) nozzle
- (7) camera
- (8) beaker
- (9) vessel
- (10) stroboscope
- (11) oscilloscope
- (12) amplifier
- (13) amplifier
- (14) amplifier

図-1 実験装置の概要

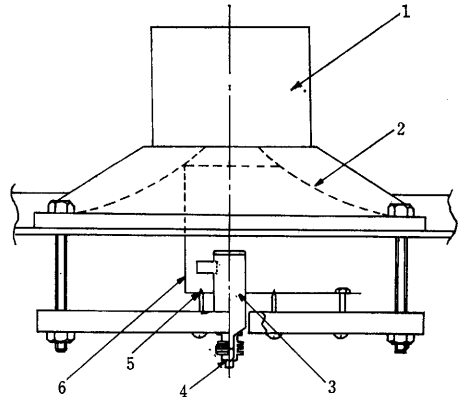
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

た。ノズルには皮下注射針を用い、その先端は荒さを除くために注意深くオイル・ストーンで研磨し、ノズル口は滴下の方向と垂直にした。噴流径はノズル出口から 3 mm 下の噴流の拡大写真像によって決定した。水滴の滴下状態はストロボスコープ⑩とカメラ⑦を用いて観察した。得られた液滴の間隔と径はプロジェクターを用い、拡大写真像によって測定した。発振器⑪によって発生させた所定の振動数の正弦波信号をアンプ⑬により増幅し、ブラウン管オシロスコープによってモニターした後スピーカー④を振動させた。この加振部は図-2 に示すようにスピーカー部の振動を厚さ 0.25 mm の黄銅板を介してノズルに伝達する構造になっている。

実験はまず、流量を設定するためオーバーフロータンクのヘッドの位置をセットする。次にノズルの内径

表-1 実験条件
Tabel 1 Experimental conditions

Head	H cm	35	65	90	105	
Inner Diameter of Nozzle	d_n mm	0.27	0.43	0.47	0.85	
Frequency	N Hz	0	60	70	80	90
		100	200	300	400	500
		600	700	800	900	1000
		1100	1200	1300	1400	1500
		1600	1700	1800	1900	2000



- (1) speaker
- (2) cone paper (reverberation)
- (3) reservoir
- (4) nozzle
- (5) fulcrum
- (6) thin plate

図-2 加振部の詳細

Fig. 2 Detail drawing of vibration exciter

を設定した後、オーバーフロータンクから水を流して、規定の量が流れているかどうか検討する。その後、振動を加えない場合の、ノズルからの噴流の状態をストロボスコープとカメラを用いて観察、撮影した。さらに約25種類の定められた振動数の正弦波信号をスピーカーにより加振した。同時にストロボスコープとカメラにより噴流の状態およびブラウン管オシロスコープに映った信号波形の観察、撮影を行った。以上設定した種々の噴流径と流量に対し、振動数を変化させて、水滴の均一化状態を観察した。噴流状態は撮影したフィルムをプロジェクターによって拡大し、噴流径 d_j 、水滴径 D 、水滴間隔 λ を測定することにより判断した。噴流径 d_j はノズルの出口から 3 mm 下の噴流の径を測定したものである。水滴の径 D mm とその個数についてはノズルの出口から 8 cm の距離におけるものを測定し、水滴径 D は大小の2種類に分けて別々に測定した。平均噴流速度 U_j (m/s) は実験から測定された流量 Q (m³/s) と噴流径 d_j (m) とによって次式で得られる。

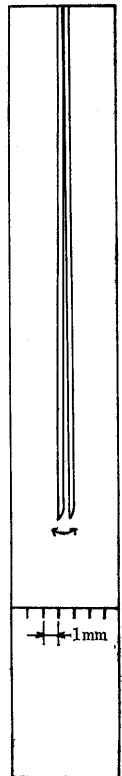


図-3 ノズル部の振動状態

Fig. 3 Behavior of the nozzle under transverse vibration

$$U_j = \frac{4Q}{\pi d_j^2} \quad (1)$$

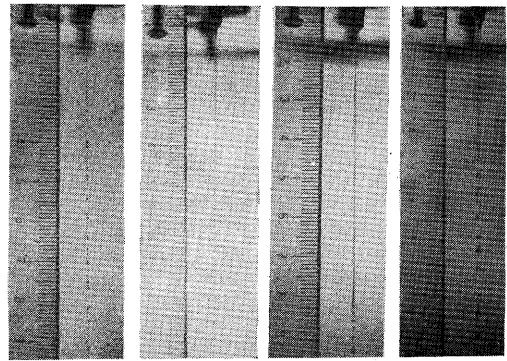
ノズルでの振動状態を検討する意味で、ノズルの位置に針を設定し、加振させた状態を図-3に示す。これによると、横方向の振動が支配的で縦方向の振動はほとんどみられないことがわかった。

実験条件として、変化させたノズル内径とタンクのヘッドの位置そして振動数を表-1に整理した。

3. 実験結果と検討

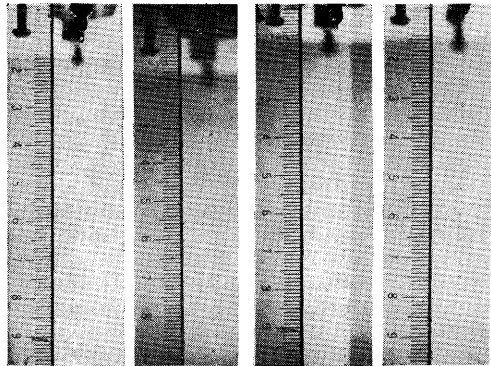
3.1 振動を加えない場合の噴流状態

液体が毛細管を通過する場合、出口では表面張力の作用によって管の出口表面に付着する小さな滴となるが、滴が大きくなりその重量が液体の表面張力をうまわるような径に達した時、液滴は落下し、毛細管ノ



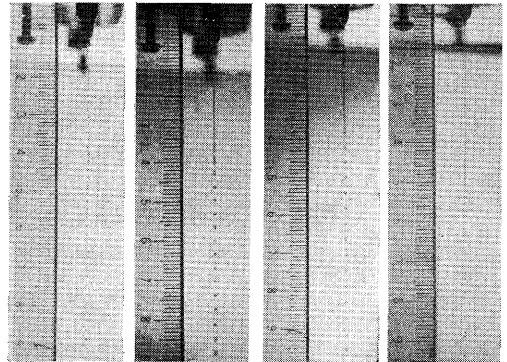
d_j (mm)=0.25	0.39	0.45	0.75
U_j (m/s)=1.41	2.93	3.14	3.95

図-4 振動を加えない場合の液滴の生成状態
Fig. 4 Production of liquid droplets without vibration excitation



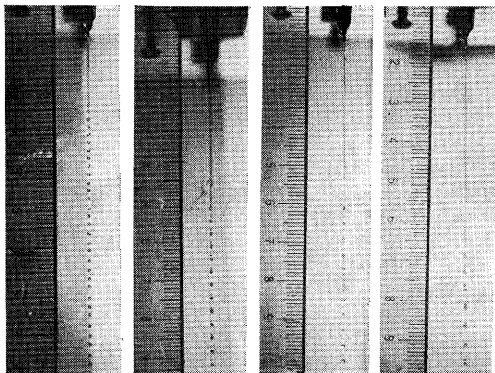
U_j (m/s)=0.58	1.06	1.34	1.41
$d_j=0.25\text{mm}$	$N=700\text{Hz}$		

(a)



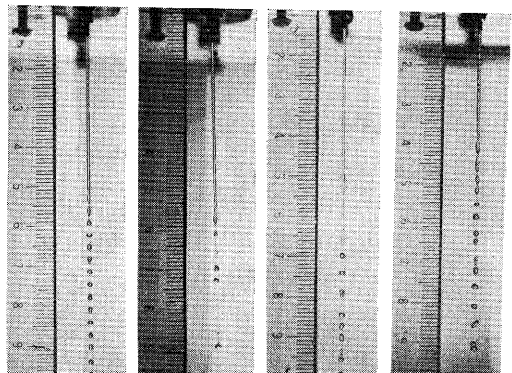
U_j (m/s)=1.50	2.18	2.68	2.93
$d_j=0.39\text{mm}$	$N=700\text{Hz}$		

(b)



U_j (m/s)=1.45	2.32	2.83	3.14
$d_j=0.45\text{mm}$	$N=700\text{Hz}$		

(c)



U_j (m/s)=1.98	3.07	3.55	3.95
$d_j=0.76\text{mm}$	$N=700\text{Hz}$		

(d)

図-5 加振による液滴の生成状態 ($N=700\text{Hz}$)

Fig. 5 Production of liquid droplets with vibration excitation at constant frequency 700 Hz (jet velocity as a parameter)

ズルの出口の径に等しい径をもつ噴流ができるような圧力レベルに達したとき噴流はノズルの出口からわずかな距離で不規則な大きさの液滴に分かれる。図-4は内径 $d_n=0.25\sim 0.75$ mm までの4種類のノズルについてノズルからの噴流の状態を示している。いずれの径の噴流においても液滴の径や間隔はかなり不規則であることがわかる。本実験はこの状態に振動を加え均一化させようとするのである。

3.2 振動を加えた場合の噴流状態

3.2.1 噴流速度の影響

図-5は4種類の異なる噴流径の噴流に振動数が一定の正弦波振動 (700 Hz) を加え、噴流速度 U_j を変化させた時の液滴の生成状態を示したものである。図-5(a)で $d_j=0.25$ mm, $U_j=0.58$ m/s の場合水滴はノズルからしたり落ち、液滴の径はかなり大きい。 U_j が増加するにつれ噴流の柱ができ $U_j=1.34$ m/s になった時全ての液滴径はほぼ均一になる。その単位時間当たりの個数は加えられた振動数に等しくなる。図-5(b)は $d_j=0.39$ mm のノズルの場合である。 $U_j=1.50$ m/s において全ての液滴径はほぼ均一であるが、噴流速度が増加するにつれて噴流の柱が長くなり、液滴とそれに付随する小滴とが観察されるようになる。 U_j が 2.93 m/s になると液滴径は不規則となり滴の間隔も乱れてくる。図-5(c)は $d_j=0.45$ mm のノズルの場合であり、(b)の場合と同様に U_j が 1.45 m/s の時はほぼ均一な径の液滴が得られるが U_j が増加し、 $U_j=2.32$ m/s になると主な液滴と付随小滴とに分かれる。さらに U_j が 2.83 m/s を越えるようになると均一な径の液滴は得られなくなる。図-5(d)は $d_j=0.76$ mm の場合である。ほぼ均一な径の液滴と滴間間隔が得られるのは $U_j=1.98$ m/s の場合のみであり、これ以上噴流速度が増加すると液滴の径、間隔ともに乱れてくる。

振動数を一定にして噴流の径を $d_j=0.25\sim 0.76$ mm に変化させた図-5(a)~(d)を通じて液滴の均一化の状態は噴流速度 U_j とともに変化し噴流速度 U_j に均一な径の液滴のできる領域が存在することがわかる。

図-6に、図-5の(a)~(d)の $N=700$ Hz の状態を各噴流径に対する液滴径 D と噴流速度 U_j との関係で示した。白抜きの記号は均一な径の液滴が得られる領域、黒点は液滴径が均一でない領域を示している。図によると噴流速度による液滴の状態は各噴流径に対し $U_j=1.5$ m/s 付近から $U_j=3.0$ m/s までの間で液滴径はほぼ均一で $U_j=3.0$ m/s 以上または $U_j=1.5$ m/s に満たないと液滴の径にばらつきがみられる。したがって $U_j=1.5$ m/s から $U_j=3.0$ m/s の範囲がそれぞれ

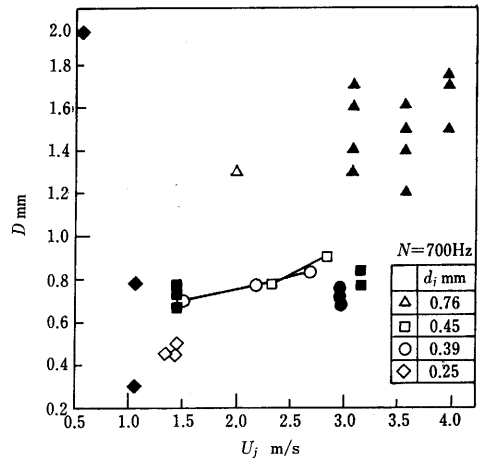


図-6 噴流速度による水滴径の変化 ($N=700$ Hz)
Fig. 6 Droplets diameter for various jet velocities ($N=700$ Hz)

れ均一な径の液滴を得るための領域といえる。

3.2.2 振動数の影響

図-7は噴流速度を $U_j=1.5$ m/s, 噴流径を $d_j=0.39$ mm で一定に保ち、加えた振動数 N を変化させた時の液滴の生成状態を示している。振動数 N が 0 Hz から 200 Hz までの低い領域では主となる液滴とそれに付随する小滴とがみられる。 N が 300 Hz を越えると液滴径 D はほぼ一様になり、 N が 800 Hz から 1000 Hz の間の領域ではほぼ均一となる。また N が 300 Hz から 1000 Hz までの領域では液滴径 D は N の増加につれて減少しており、主となる液滴間の間隔は N が 100 Hz から 1000 Hz までの領域で N の増加につれて減少している。 N が 1500 Hz になると液滴の径およびその間隔は不規則になる。

3.2.3 噴流径の影響

図-8は各噴流径に対して均一な径の液滴が得られる最小の噴流速度 U_j において、液滴間隔 λ と振動数 N の関係で示したものである。各噴流径に対して多少のばらつきはあるが、間隔 λ は振動数 N の増加とともに $N \cdot \lambda = \text{一定}$ の関係で直線的に減少しており、振動数が約 1000 Hz 付近で各噴流径固有の値に収れんし、噴流径が大きい程収れんする値が大きくなっていることがわかる。均一径の液滴が得られている場合、液滴間の距離がほぼ一定になり、ノズル出口から 8 cm の距離内の滴の数を測定し、毎秒落下する水滴数を計算すれば、これが噴流に加えた振動数に等しくなることから液滴間の間隔を、噴流に加えられた正弦波振動の波長 λ とみなすことができ、

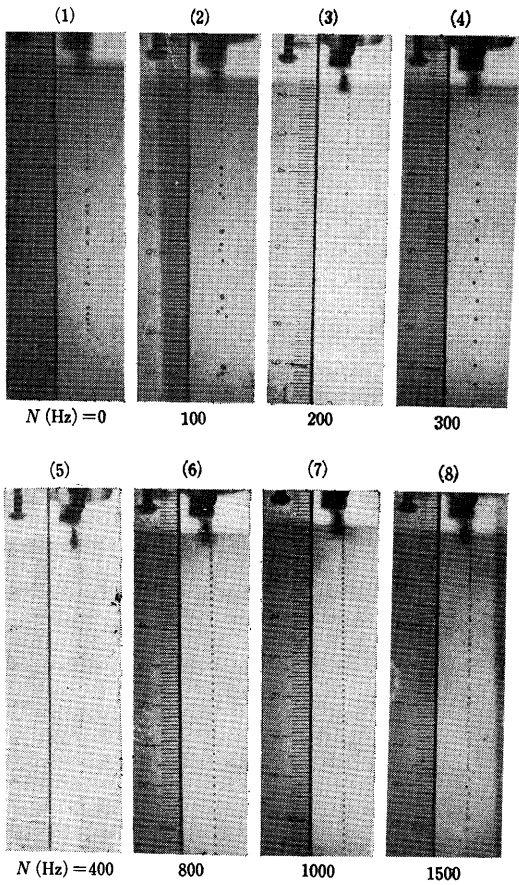


図-7 加振による液滴の生成状態
($d_j=0.39$ mm, $U_j=1.50$ m/s)

Fig. 7 Production of liquid droplets with vibration excitation at constant jet velocity $U_j=1.50$ m/sec and jet diameter $d_j=0.39$ mm (frequency as a parameter)

$$N \cdot \lambda = \frac{4Q}{\pi d_j^2} = U_j \quad (2)$$

の関係が得られる。ここで Q は噴流の流量を表している。したがって図-8の $N \cdot \lambda = \text{一定}$ の定数は噴流速度 U_j となる。

3.3 振動による均一な微粒化領域

図-9は噴流径 $d_j=0.39$ mm で、本実験で設定した噴流速度 U_j が最小の場合と最大の場合について液滴間隔 λ と振動数 N との関係を表したものである。噴流速度が小さい場合は λ は $N=60$ Hz から $N=1000$ Hz までの振動数の領域で $N \cdot \lambda = \text{一定}$ の関係で直線的に減少しているが、噴流速度が大きくなると液滴間隔は $N=100$ Hz 以下の低い振動数領域では $N \cdot \lambda = \text{一定}$ の直線式からはずれており、図-6においてもこの噴流速

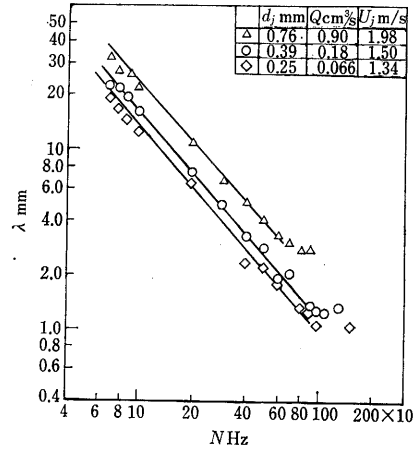


図-8 最小噴流速度における波長と振動数の関係
Fig. 8 Relation between wavelength and frequency at the lowest jet velocity for each jet diameter

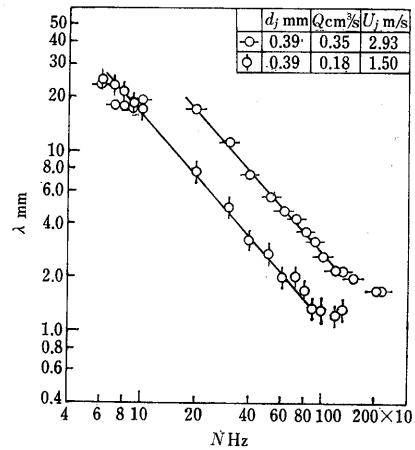


図-9 波長と振動数の関係 ($d_j=0.39$ mm)
Fig. 9 Relation between wavelength and frequency at constant jet diameter $d_j=0.39$ mm

度では液滴間のばらつきが大きくなっている。

つぎに振動数と液滴径の関係について検討する。均一な径の液滴の数は噴流に加えられた振動数に等しいことから流量 Q とその範囲内の液滴の総体積が同じであるとすれば均一な液滴の径は次式で表せられる。

$$D = \left(\frac{6Q}{\pi N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

図-10は噴流径 $d_j=0.39$ mm について液滴径 D と振動数 N との関係を噴流速度 U_j をパラメーターとして表し、同時に式(3)を直線で示している。比較的高振動数では直線よりわずかにずれているが、ほぼ同様の傾向を示している。ただ振動数が 100 Hz 以下では測定

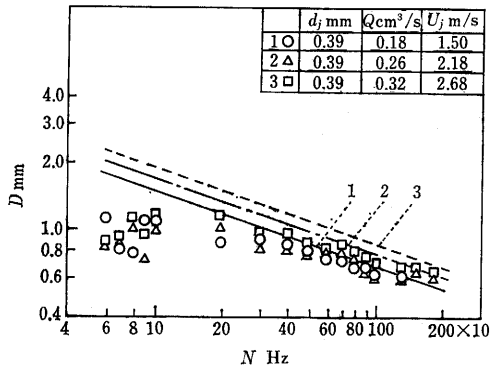


図-10 水滴径と振動数の関係
Fig. 10 Relation between droplet diameter and frequency

値は計算値よりかなり低くなっている。これは図-7からわかるように液滴が分散するためにその体積が計算値より小さくなるからである。全体としてのずれの原因は全振動数領域を通じ振動エネルギーの噴流への伝達が完全ではないためと考えられる。

これまで噴流速度、振動数等に関連して均一化の状態を考えてきたが、図-9、図-10等より全体として均一化領域を分類する際、噴流の運動エネルギーと加えられる振動との関係で決まるのではないかと考えられ、実験点を均一な液滴と不均一な液滴の場合について液滴の運動エネルギー $(1/2) \cdot MU_j^2$ (ただし、 M : 単位時間当たりの噴流の質量) と加えた振動の加速度の振幅 $A \cdot \omega^2$ (ただし、 A : 正弦波信号の振幅、 ω : 角速度) の関係で示したのが図-11である。白抜き印の記号は均一な液滴領域で、黒点は液滴の均一化されていない領域であり、破線で明確に領域が区別できる。これによると均一化になるためには液滴の運動エネルギーの最大、最小が存在し、この白抜き印の領域になるように加える振動を考慮すれば、より均一な液滴を得ることが可能になる。これは一般的にも適用可能と思われる、均一な液滴を得る一つの目安となろう。

4. 結 論

ノズルに振動(主に横方向)を加え均一な液滴を得る実験を行った結果次のことが明らかになった。均一な液滴が得られる領域では振動数 N と液滴間の距離 λ の積 $N \cdot \lambda$ が噴流速度になる。つまり $N \cdot \lambda = U_j$ の関係が成立している。これまで均一な液滴を得るために振動数のみに注目していたが、液滴の運動エネルギー

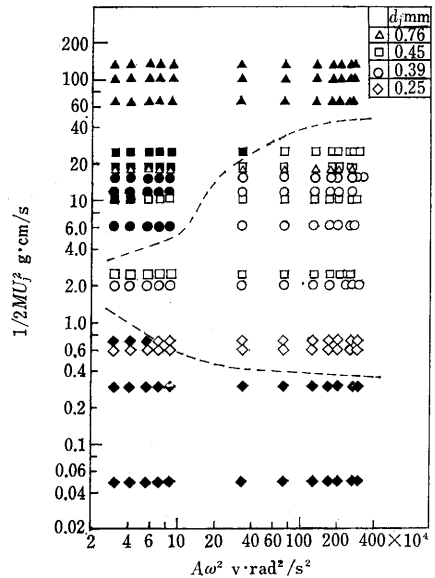


図-11 液滴の均一化領域
Fig. 11 Domain of uniform atomization

と振動の加速度の振幅関係により、領域の分類ができることが明らかになり、今後一般的適用も考えられる。

参考文献

- 1) Rasbash, D. J.: The Production of water spray of Uniform Drop Size by a Battery of Hypodermic Needles, Journal of Colloid Science, Vol. 9, p. 321-328 (1954)
- 2) Rayner, A. C., and Haliburton, W.: Rotary Device for Producing a Stream of Uniform Drops, The Review of Scientific Instruments, Vol. 26, No. 12, p. 1124-1127 (1955)
- 3) Wolf, W. R.: Study of the Vibrating Reed in the Production of Small Droplets and Solid Particles of Uniform Size, The Review of Scientific Instruments, Vol. 32, No. 10, p. 1124-1129 (1961)
- 4) 棚沢, 荒木: 静電気力による均一微粒化, 日本機械学会論文集, Vol. 37, No. 298, p. 1178-1186 (1971)
- 5) Mason, B. J., Jayaratne, O. W., and Woods, J. D.: An Improved Vibrating Capillary Device for Producing Uniform Water Droplets of 15-500 μ m Radius, Journal of Scientific Instruments, Vol. 40, p. 247-249 (1963)
- 6) Dabora, E. K.: Production of Monodisperse Spray, The Review of Scientific Instruments, Vol. 38, No. 4, p. 502-506 (1967)
- 7) Araki, N., and Masuda, A.: Production of Droplets of Uniform Size by Vibration, ICLAS, Vol. 8, No. 1, p. 173-180 (1978)