

平成 14 年度
修士論文

ドロップレットジェネレータの 製作と性能評価

Manufacturing and Evaluation of Droplet Generators

高知工科大学大学院

工学研究科 基盤工学専攻 (博士課程前期) 知能機械システムコース

鈴木 淳志

目次

第1章 緒言.....	1
第2章 原理.....	3
2.1 フォトニッククリスタルとは.....	3
2.2 ドロップレット生成方法.....	4
2.3 システムオペレーション.....	5
第3章 実験機器.....	7
3.1 機器全体図.....	7
3.2 ドロップレットジェネレータの作製.....	8
3.3 パルスジェネレータ.....	14
第4章 ドロップレットの粒径.....	15
4.1 実験概要.....	15
4.2 実験方法.....	15
4.3 実験結果及び考察.....	17
第5章 ドロップレットの電荷量.....	26
5.1 実験概要.....	26
5.2 インクジェットプリンティング法.....	26
5.3 実験方法.....	28
5.4 実験結果及び考察.....	31
第6章 結言.....	36

参考文献.....37

謝辭.....38

第1章 緒言

最近フォトニッククリスタルの研究が盛んに行われている．フォトニッククリスタルは誘電率に周期的な変調を起こさせたもので，人工的に作られる¹⁾．フォトニッククリスタル内で光は周期的な誘電率変化によるポテンシャル散乱を受ける．このことは，1979年に大高一雄教授が周期的に屈折率を変化するフォトニッククリスタル内における複雑な回折現象を固体物理学のテクニックを利用して解析するという示した²⁾．その後，ヤブロノビッチがフォトニッククリスタルによる光のバンドギャップを利用した自然放出制御を提案し³⁾，この分野の研究は盛んになり始めた．そのため当初はバンドギャップを持つクリスタルに注目が集まった．また，それを利用した無損失の光の研究はさらにフォトニッククリスタルの注目度を高めた．しかし，これを実現するにはいまだに技術的な困難が付きまとっているため，バンドギャップではなく，フォトニックバンドの特異な分散性に向けた研究も近年盛んになって来た．従来の方法では不可能な光の制御が可能になると考えられており，レーザ，小型ファイバー，光スイッチなど多くの応用で期待されている⁴⁾．

本論文では，フォトニッククリスタルの構成要素となる，よく制御されたドロップレット⁵⁾（球形粒子）を生成する研究を行った．

ドロップレットを生成する装置として，大別してエアロゾルジェネレータ⁶⁾とドロップレットジェネレータが使用されている．エアロゾルジェネレータは，ノズル管が振動し粒径の揃ったドロップレットを生む最適な手段である．このジェネレータは，ノズル管を通して放出する液体ジェットの周期的な分解から単分散したドロップレットを生み広範囲に生成する特徴がある．農薬の散布⁷⁾，燃料のインジェクターなどに利用されている．一方，ドロップレットジェネレータ⁸⁾⁻¹¹⁾では，粒径の揃ったドロップレットを周期的に生成することができる．インクジェットプリンタ¹²⁾⁻¹⁵⁾ではドロップレットジェネレータを使用しており，細いノズル管から微小インクドロップレットを紙に向けて噴射させる．

このドロップレットを噴出させるモードとして，ドロップレット・オン・デマンド・モード，コンティニアス・モードなどの方法⁵⁾があるが，本研究ではコンティニアス・モードで行うことにした．コンティニアス・モードは，粒径の

揃ったドロップレットを連続的に生成することに適したモードである。

本研究では、粒径の揃ったドロップレットを発生させるための装置を独自に製作した。フォトニッククリスタルを製作するためには、ドロップレットの粒径の均一性とドロップレットを帯電させた場合の電荷量が重要となる。これらの点に特に注目して製作したドロップレットジェネレータの性能を評価した。

第2章 原理

2.1 フォトニッククリスタルとは

フォトニッククリスタルは、光の波長程度の大きさのユニットが周期的に並んだ構造体で人工的に作られるものである。フォトニッククリスタル内に存在できる光の周波数や波長は限られてくるので、この構造によって光を制御することが可能となる。

図1はフォトニッククリスタルの一例をあげた模式図である。

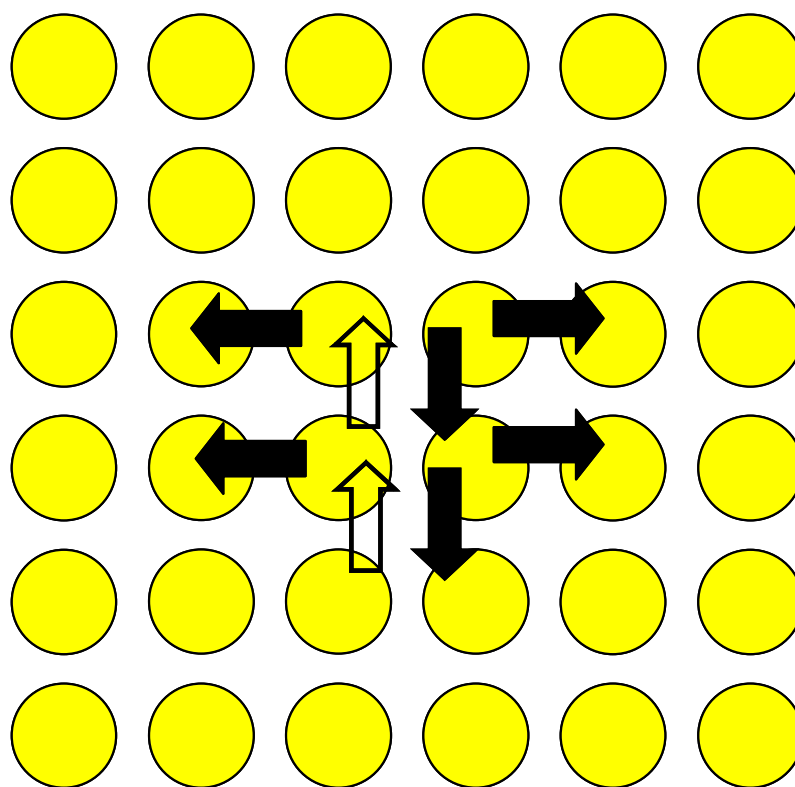


図1 フォトニッククリスタルの模式図

戸に沿ってレーザーが伝わっているとす。このレーザー光は光の回折効果により180度反対方向や ± 90 度方向に曲げることもできる。この結果、これら4方向に出るレーザーはお互い結合しながら2次元的な光共振現象を起こし、レーザー発振に至る。この時の特徴は、内部の光分布は全てフォトニッククリスタルにより決まることで、光の状態が制御されたレーザー発振が得られる。

2.2 ドロップレット生成方法

ドロップレットを生成する方法は，

- (a) エアロゾルジェネレータ
- (b) ドロップレットジェネレータ

がある．図2は，それぞれのドロップレットの生成状態を模式的に示す．

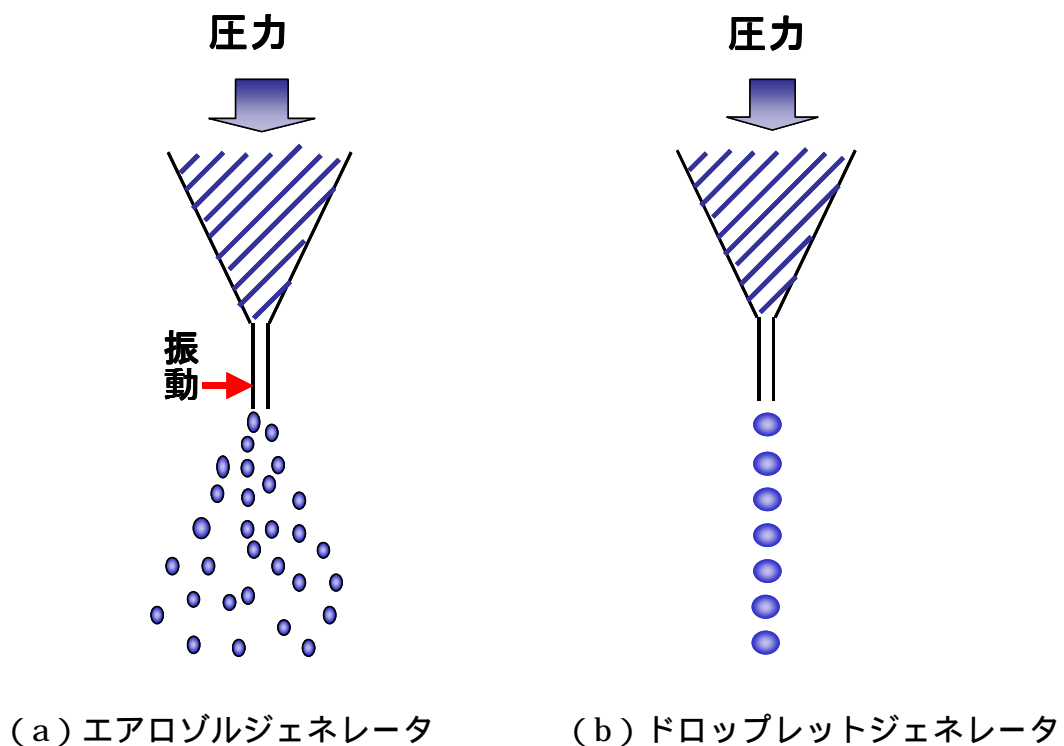


図2 ドロップレット生成状態

(a) のエアロゾルジェネレータの生成方法では，圧力をかけることによってノズル管の部分が振動し，広範囲に渡って霧状の数 μm のドロップレットが生成される特徴があり，スプレー缶などにも使用されている．一方 (b) のドロップレットジェネレータの生成方法では，ノズル管の口径や圧力をかけた時の周波数によってドロップレットの粒径が依存し，一直線上に生成される特徴があり，

インクジェットプリンタにも使用されている。フォトニッククリスタルの構成要素となるドロップレットを生成するためには、(a)より(b)の方が適している。本研究では、インクジェットプリンタの原理を用い、ドロップレットジェネレータを作製することにした。

3.3 システムオペレーション

ドロップレットを生成するためには、

- (a) ドロップレット・オン・デマンド
- (b) バースト・モード
- (c) コンティニアス・モード

などのオペレーションモードがある。

(a)のドロップレット・オン・デマンドのシステムは、 $5 \sim 250 \mu\text{m}$ の粒径を備えた単体のドロップレットを $\sim 4\text{kHz}$ までの割合で生成することができる。また、1パルスあたり1滴のドロップレットを生成する。ノズル管の先からドロップレットまでの推移は、 piezoelectric actuatorの電圧振幅、パルス幅、液体の圧力、口径サイズによる。基本的にドロップレットの粒径は、ノズル管の口径とほぼ同じである。

(b)のバースト・モードのシステムは、基本的に(a)のモードと同じである。しかし(a)との相違点は、1パルスあたりに2・3滴のドロップレットを生成する。バースト・モード・オペレーションは、流体力学の中でもドロップレットの相互作用のような研究には有利である。

(c)のコンティニアス・モードのシステムは、粒径の揃ったドロップレットの連続生成に適したモードである。ノズル管を通過し液体ジェットが噴出されるまで液体の圧力を増加する。その後、液体ジェットにpiezoelectric actuatorからの強い振動を与えることにより、粒径の揃ったドロップレットに分割する。液体の流量は、液体の圧力やノズル管によって定義されるので、ドロップレットに分解する周波数は、主な粒径にコントロールする要因である。他の2つの

操作モードとは対照的にコンティニアス・モードで生成されたドロップレットの粒径は、一般に、使用されたノズル口径の 2 倍である。 piezoアクチュエータにける電圧は、コンティニアス・モードの場合には高く与える必要はない。 5 V 未満の電圧で液体ジェットを分解することができる。

本研究では、フォトニッククリスタルを作製するには、粒径の揃ったドロップレットを連続的に生成することに適しているコンティニアス・モードのシステムでドロップレットを生成することにした。

第3章 実験機器

3.1 機器全体図

図3はドロップレットを生成するための装置の全体図である。

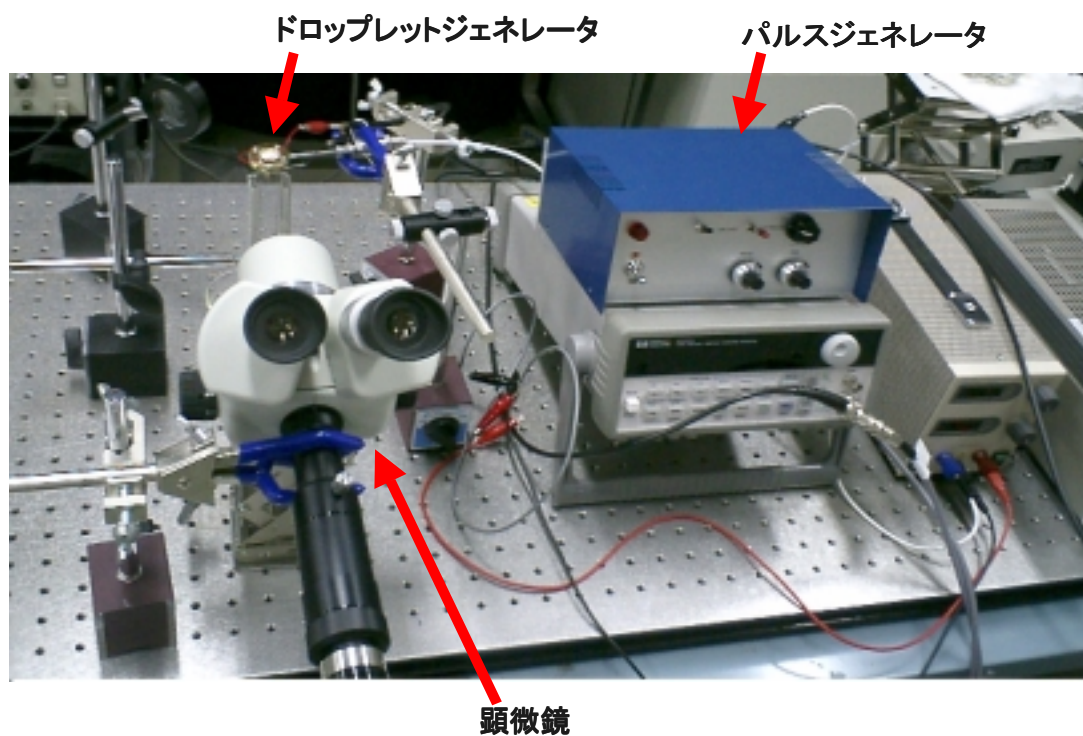


図3 実験装置の全体図

生成された微小ドロップレットは顕微鏡で観測され、その状況を CCD で撮影できるようにしている。

3.2 ドロップレットジェネレータの作製

ドロップレットジェネレータは、設計から作製まで独自で開発した。図4に組立図を示す。実際に金属加工して作製したものは、 piezoアクチュエータを止める部分（設計図1）、液体注入部分（設計図2）、ノズル管を止める部分（設計図3）である。

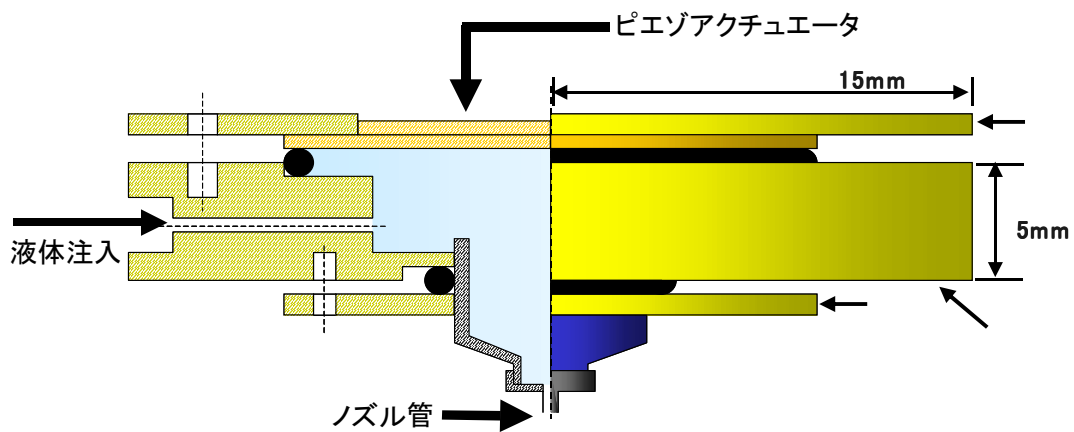
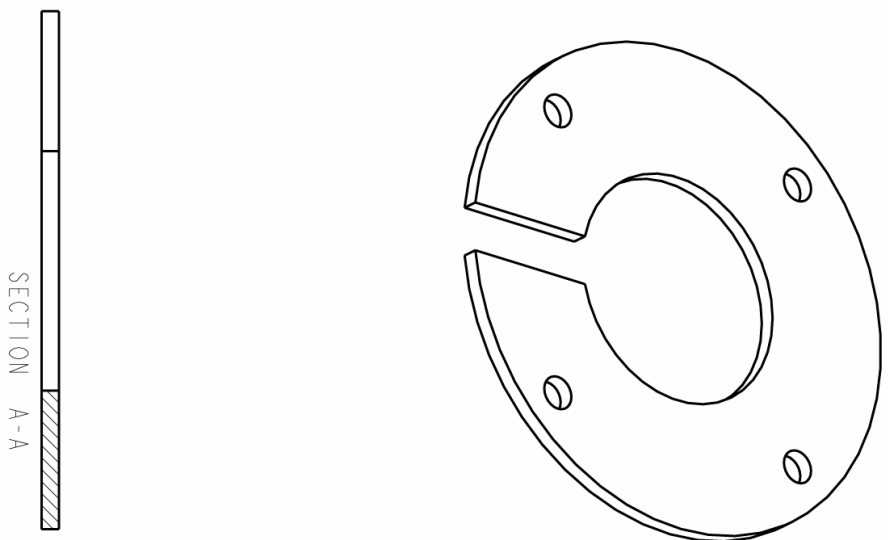
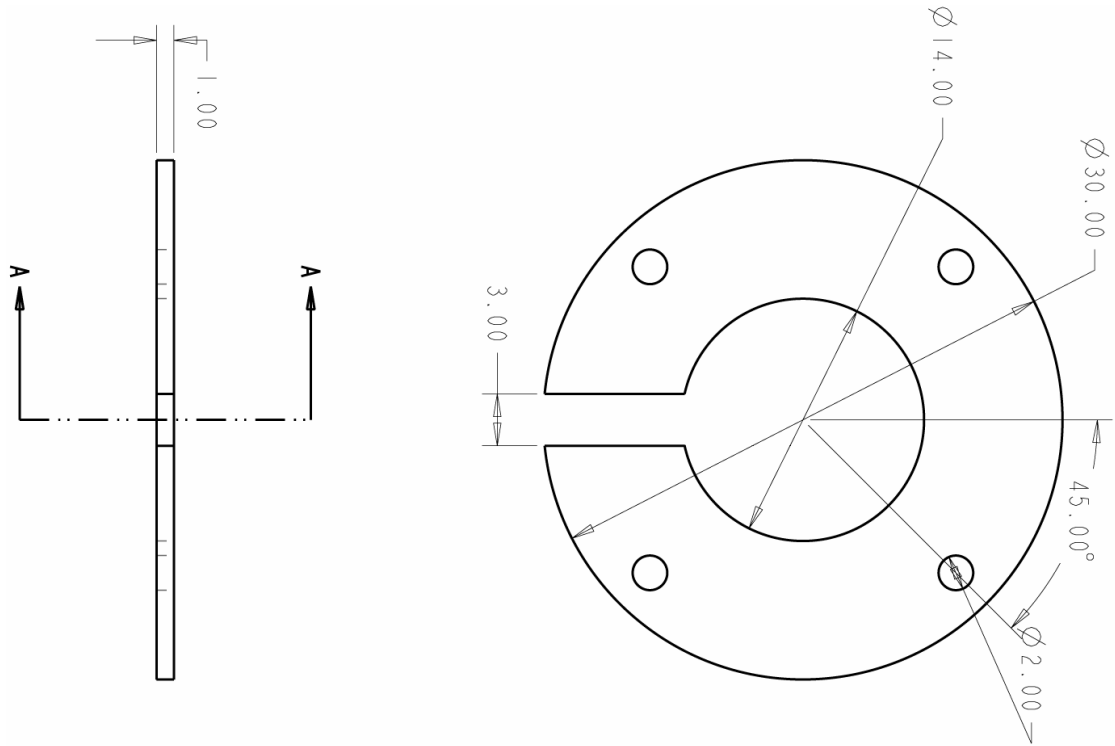


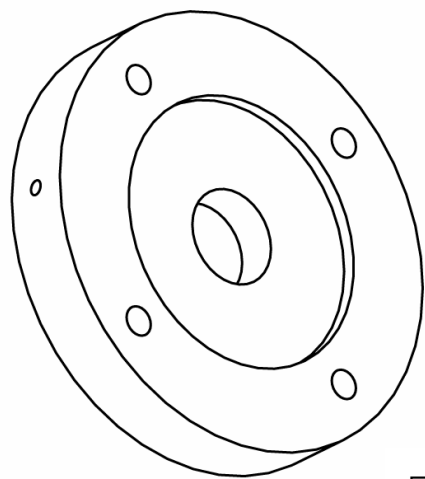
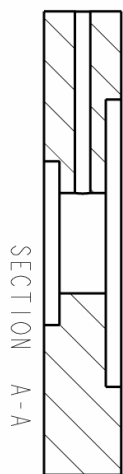
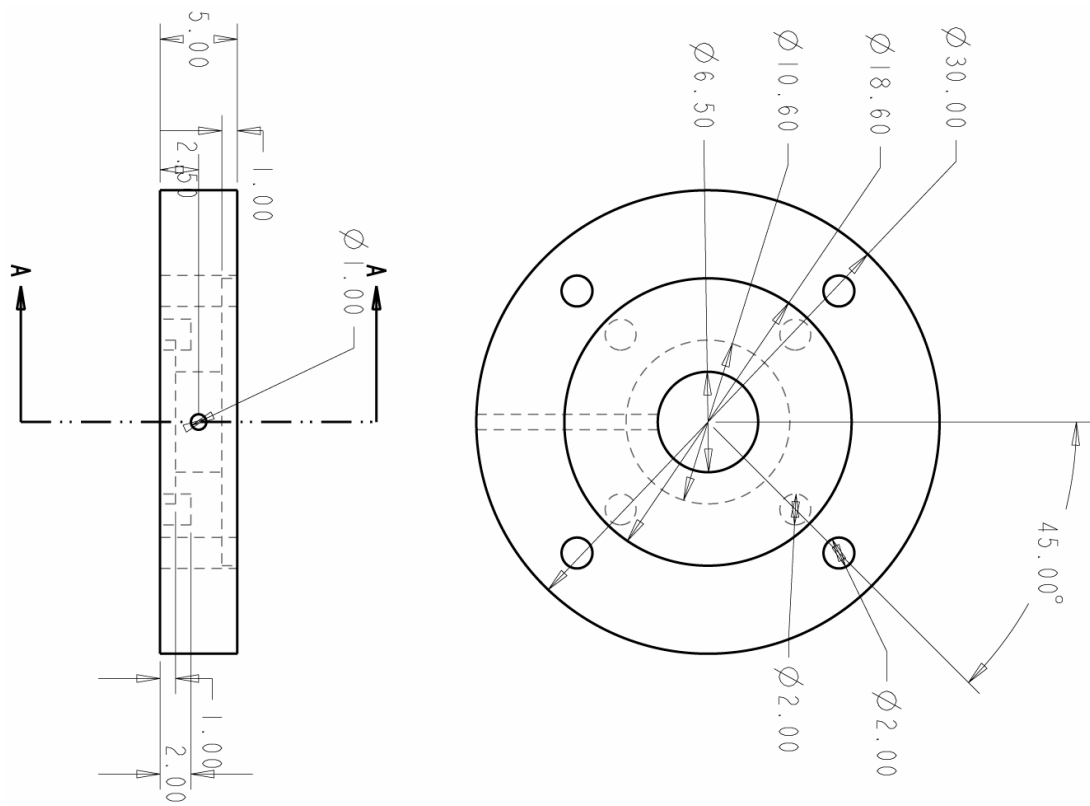
図4 ドロップレットジェネレータ断面図

ドロップレットジェネレータ内の液体を加圧するために、窒素ガスポンベを使用している。加圧されたジェネレータのノズル管から液体ジェットが噴出するようになっている。



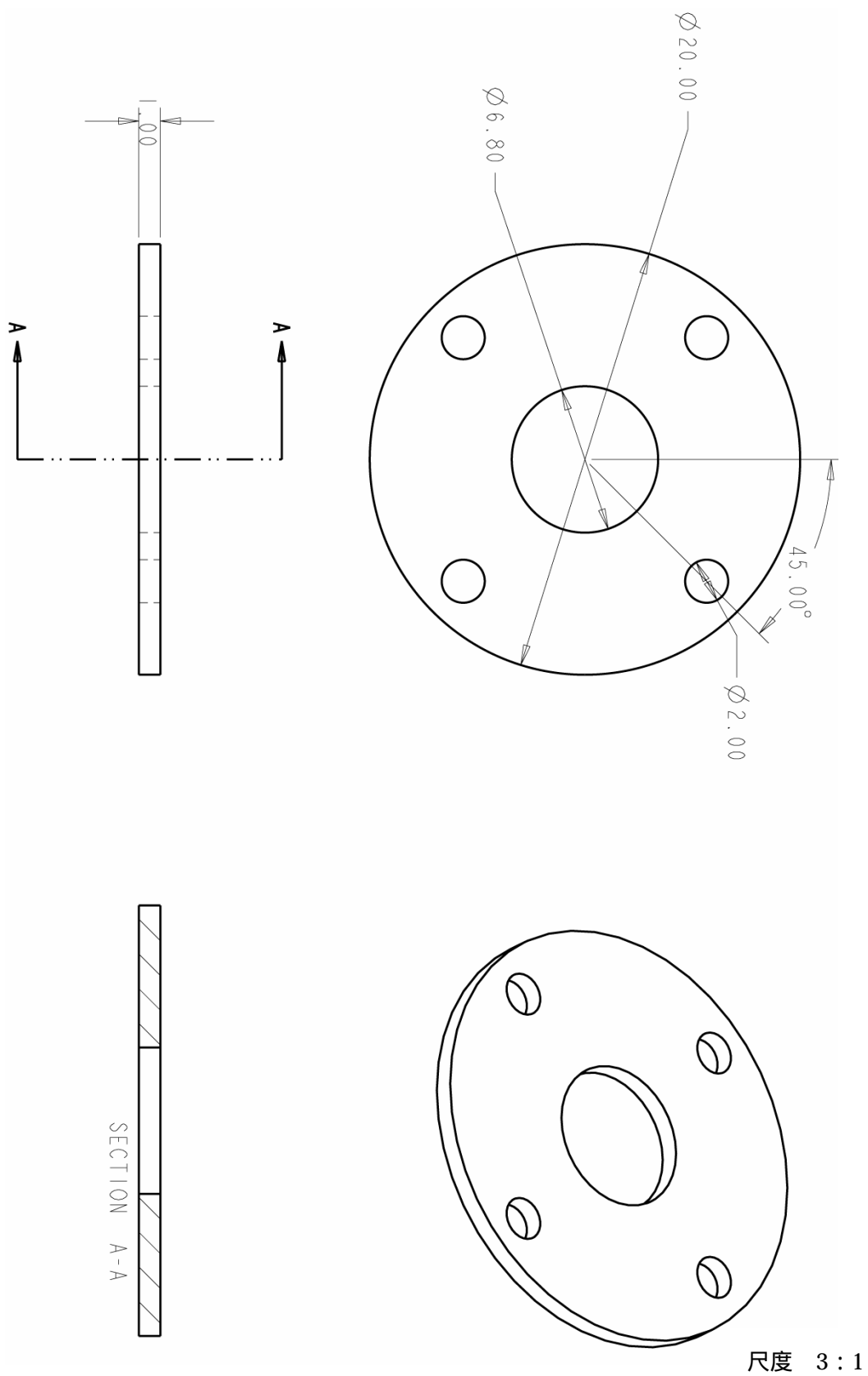
尺度 2:1

設計図1 ピエゾアクチュエータ固定部分



尺度 2:1

設計図 2 液体注入部分



設計図3 ノズル管固定部分

設計図 1 ~ 3 を組み立てたドロップレットジェネレータの写真を図 5 に示す .

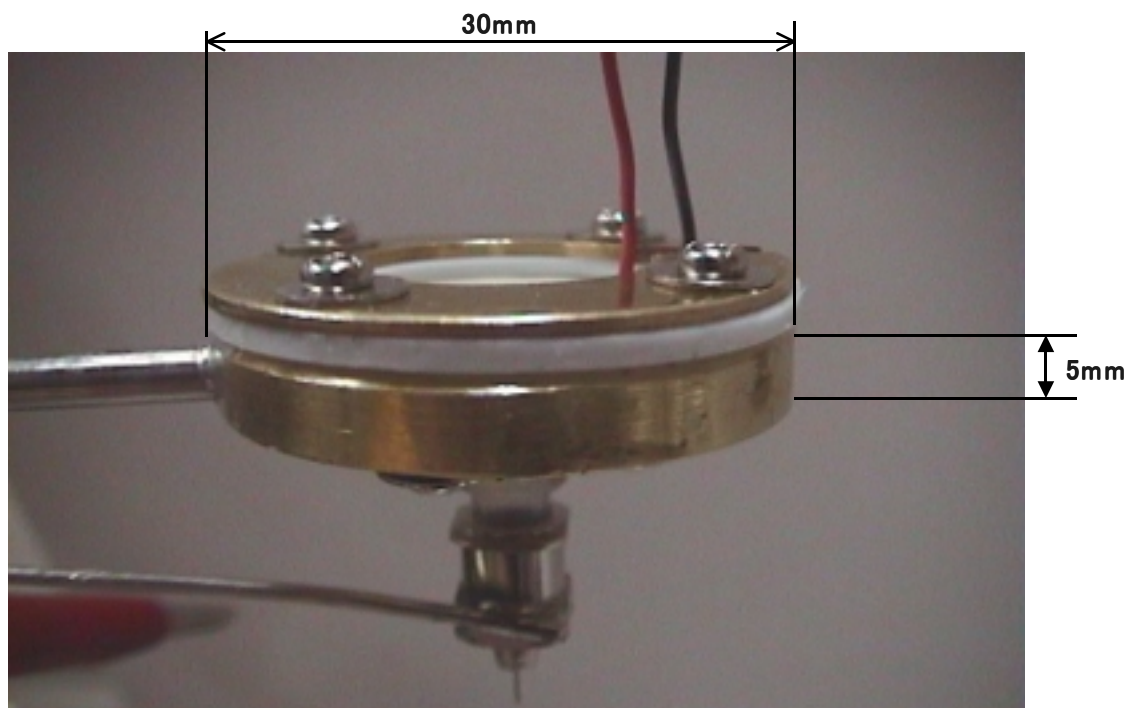


図 5 ドロップレットジェネレータ・セットアップ

ピエゾアクチュエータ , ノズル管の部分には液体が漏れないように O - リングを
を設置し密閉状態にしている .

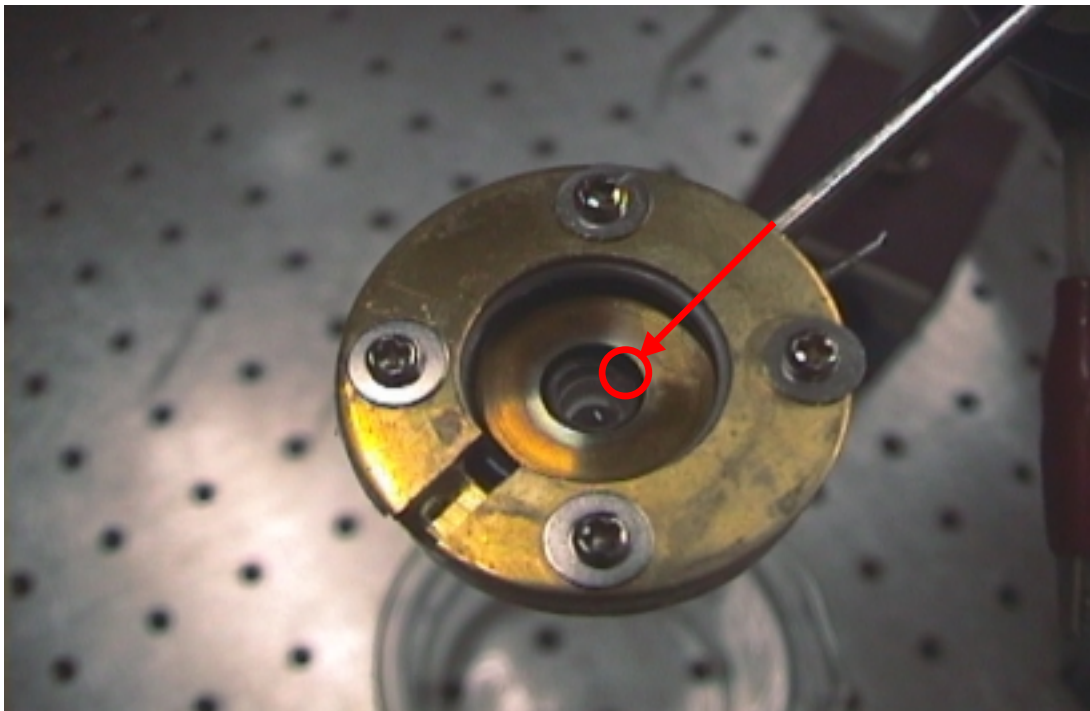


図6 ドロップレットジェネレータ内

図6は piezoアクチュエータを外したドロップレットジェネレータの内部の写真である。 の軌道で液体が常に注入され、下側のノズル管から液体ジェットが流れる仕組みになっている。

3.3 パルスジェネレータ

本研究で使用したパルスジェネレータの回路図を図7に表す。

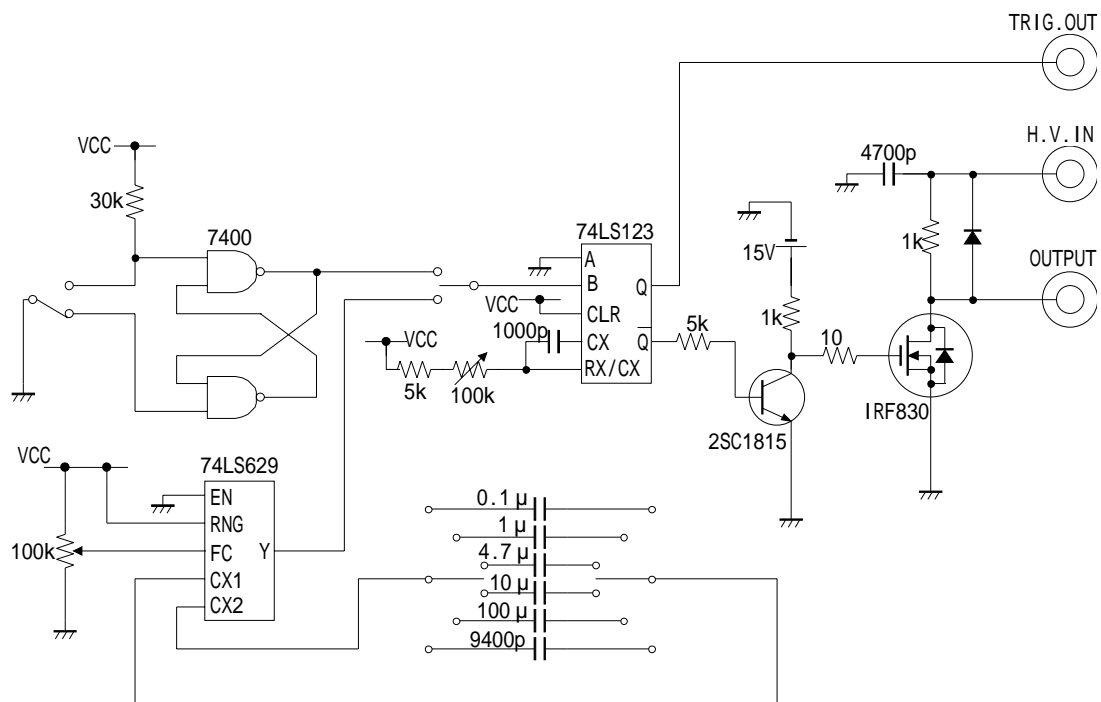


図7 パルスジェネレータ回路図

パルスジェネレータからの電圧パルスによってピエゾアクチュエータを周期的に振動させるようになっている。H. V. IN は、ピエゾアクチュエータに電圧を与える DC 電源につながり、OUTPUT はピエゾアクチュエータにつながる。

第4章 ドロップレットの粒径

4.1 実験概要

製作したドロップレットジェネレータが発生する，ドロップレットの粒径を測定する実験を行った．

4.2 実験方法

piezoelectric actuatorとして用いたのは，電気パルスに同期した振動を起こす圧電ブザーである．この圧電ブザーにパルス電圧を加えることによってドロップレットジェネレータ内の液体に強い振動が与えられ，粒径の揃ったドロップレットが発生することになる．また，パルス電圧の周波数を変えることによってドロップレットの粒径が変化する様子を観測する．図8はpiezoelectric actuatorを働かせない場合と働かせた場合のドロップレットの変化を表す．



図8 ピエゾアクチュエータによるドロップレットの変化
パルス電圧を与えていない時(上)とパルス電圧を与えた時(下)

4.3 実験結果及び考察

piezoelectric actuatorにける周波数を変化させ、ドロップレットの粒径の変化を観測した。図9～16は流量を一定にし、周波数を変えてドロップレットを撮影したものである。piezoelectric actuatorには40Vの電圧をかけている。

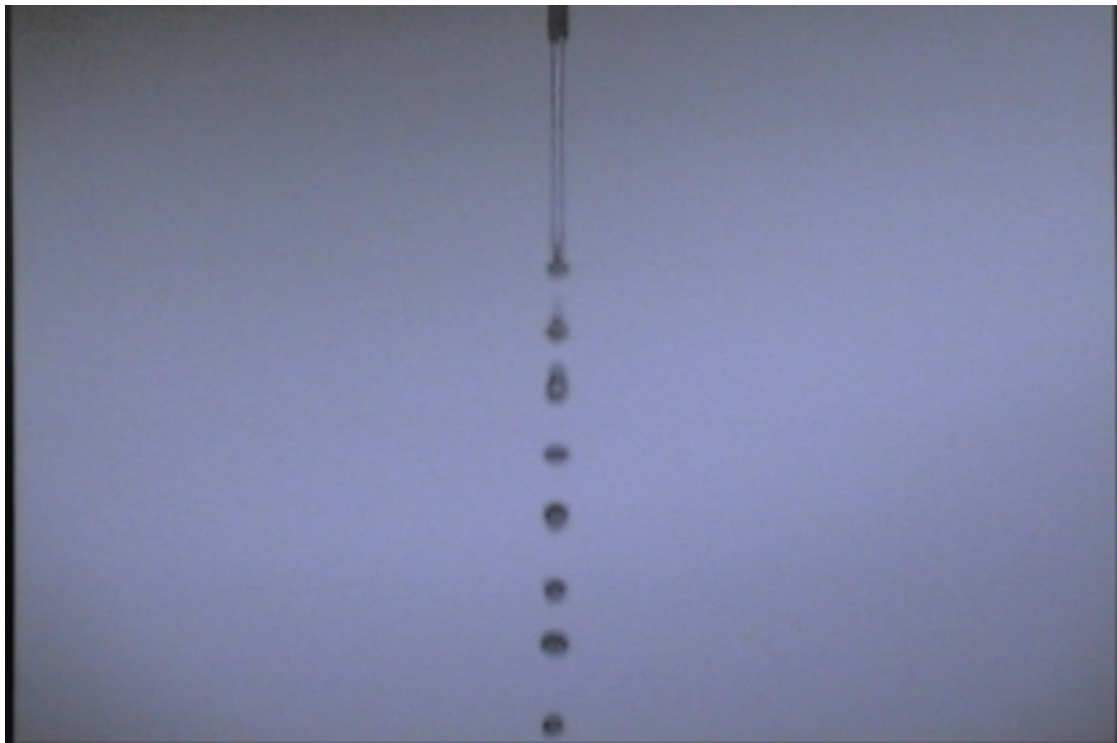


図9 周波数 900Hz

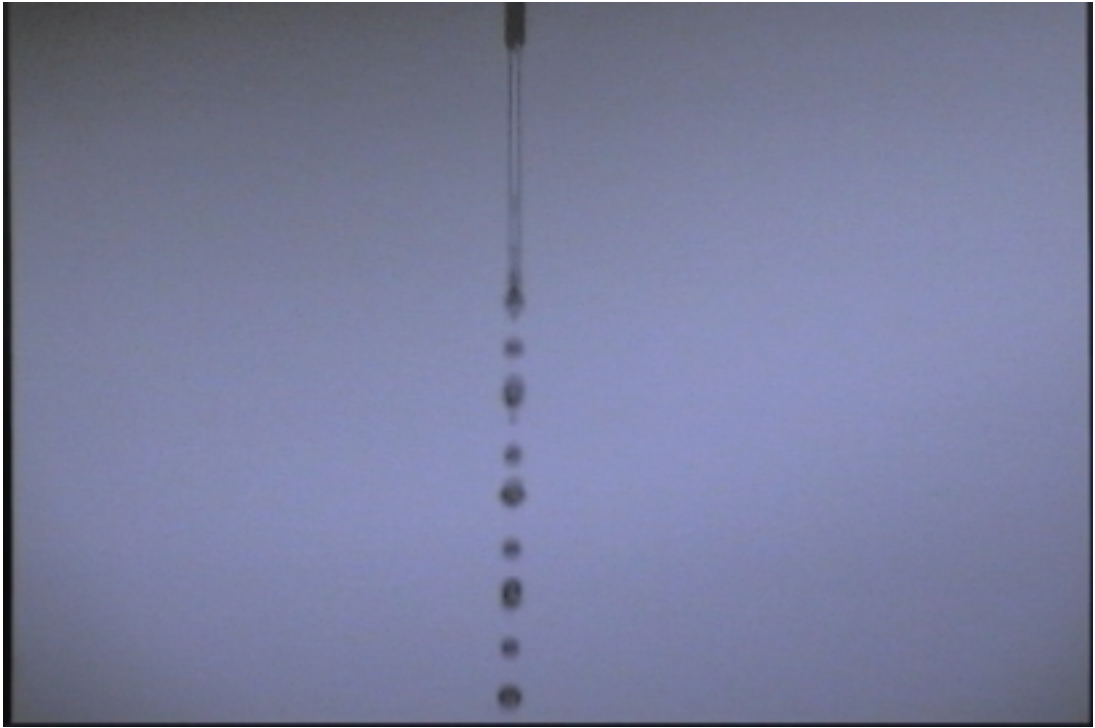


图 10 周波数 1.2kHz

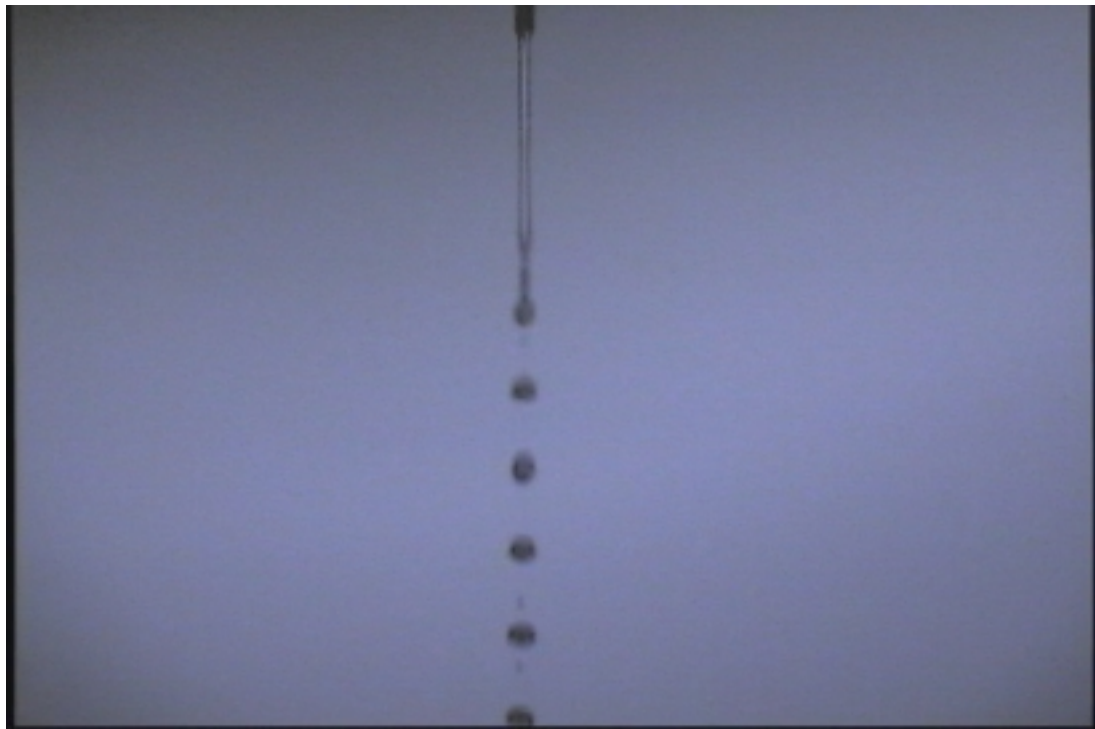


图 11 周波数 1.5kHz

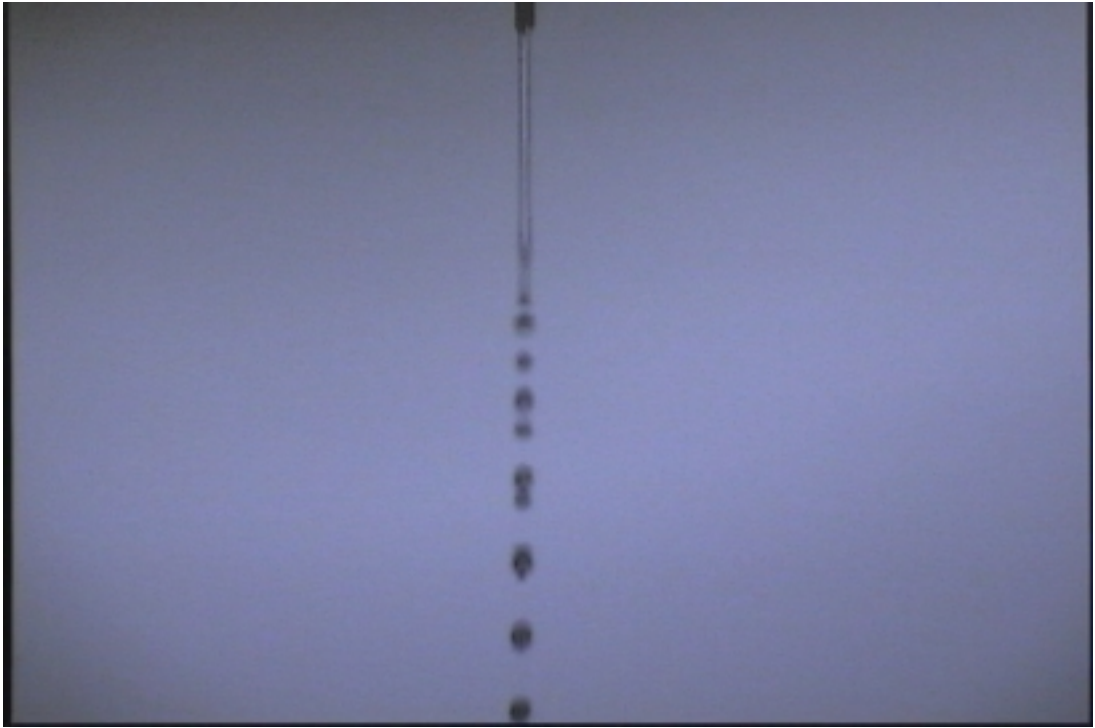


图 12 周波数 1.8kHz

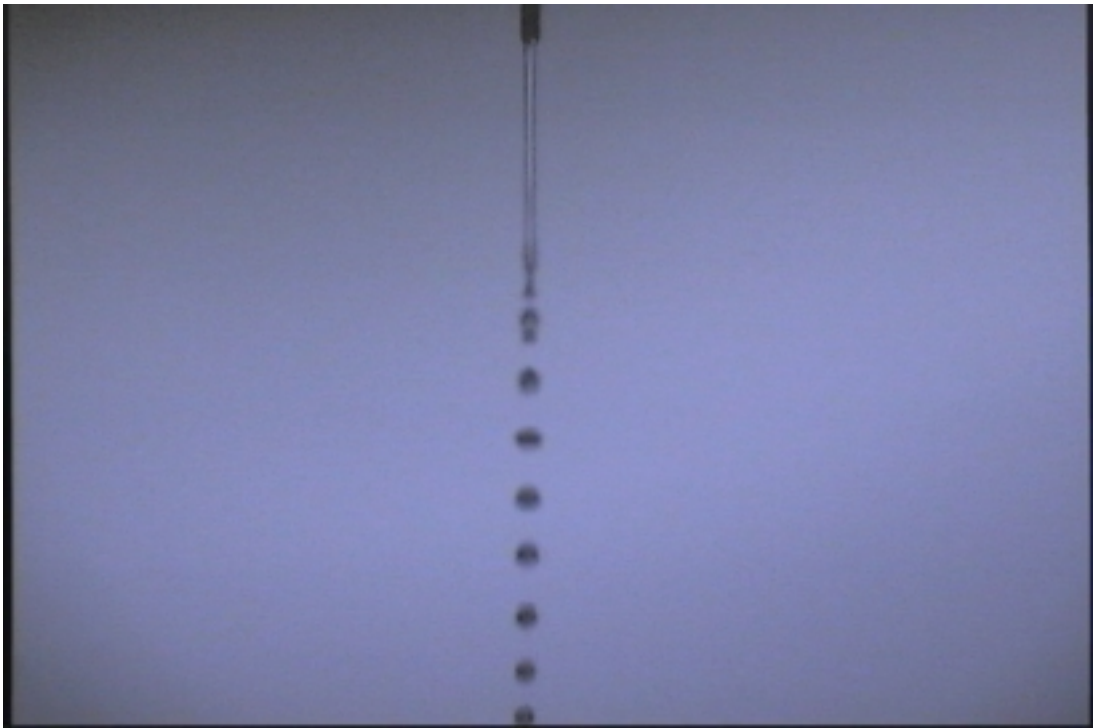


图 13 周波数 2.1kHz

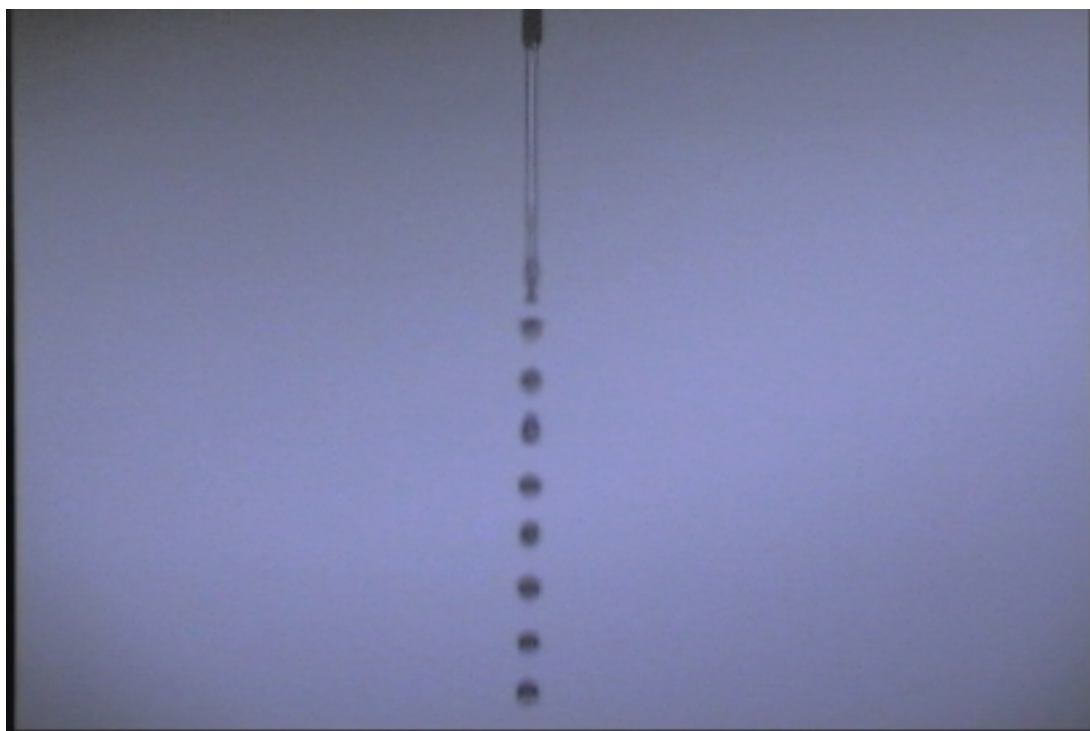


图 14 周波数 2.4kHz

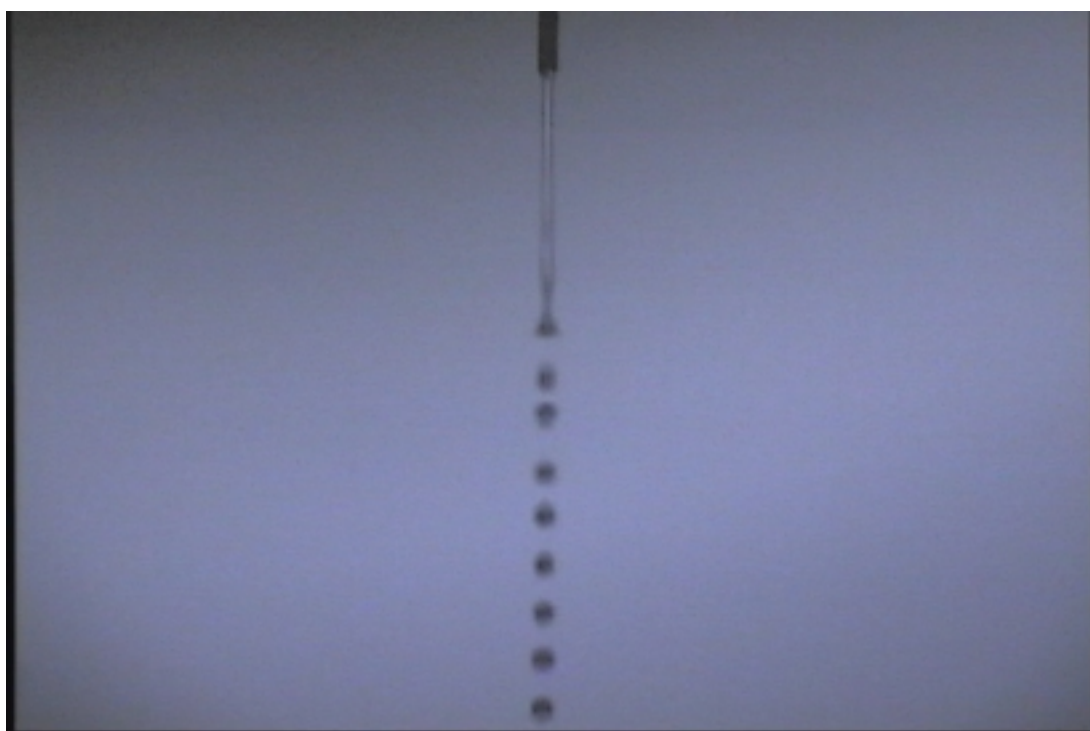


图 15 周波数 2.7kHz

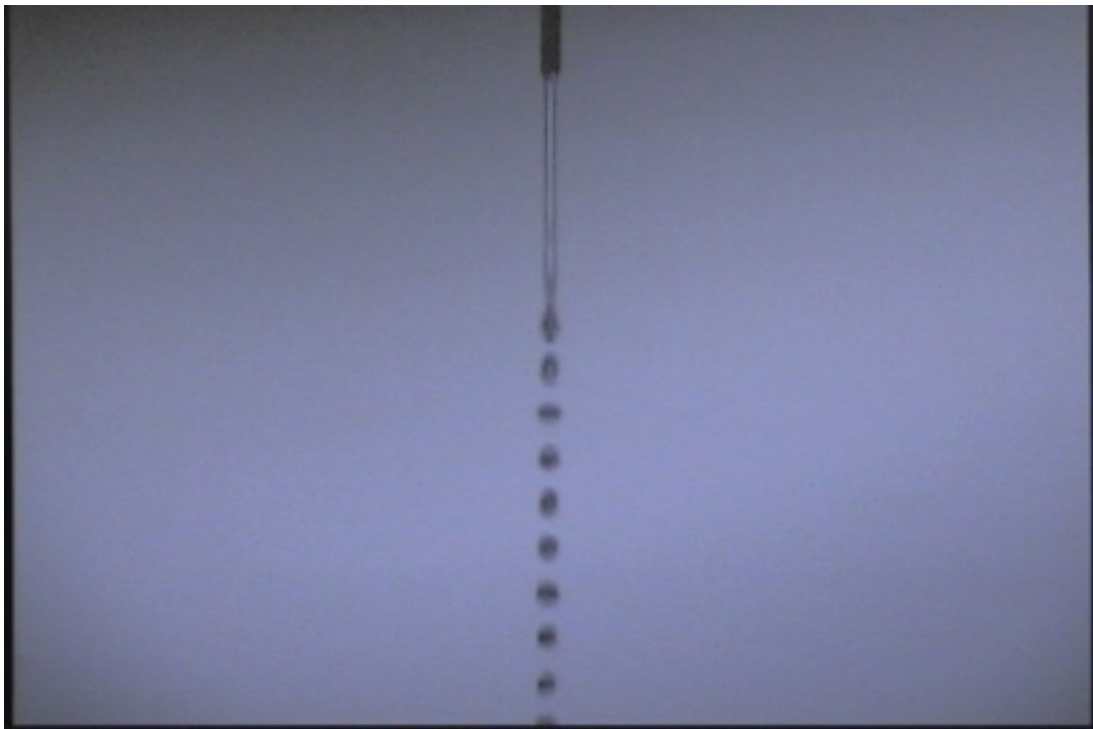


図 16 周波数 3kHz

それぞれ図の上に見える部分はノズル管である．ノズル管には内径約 $100\ \mu\text{m}$ の注射針を使用した．色々な周波数でドロップレットの状態を観測した．液体流量を常に一定にして，ドロップレットの粒径と周波数の関係を測定した結果が図 17 である．

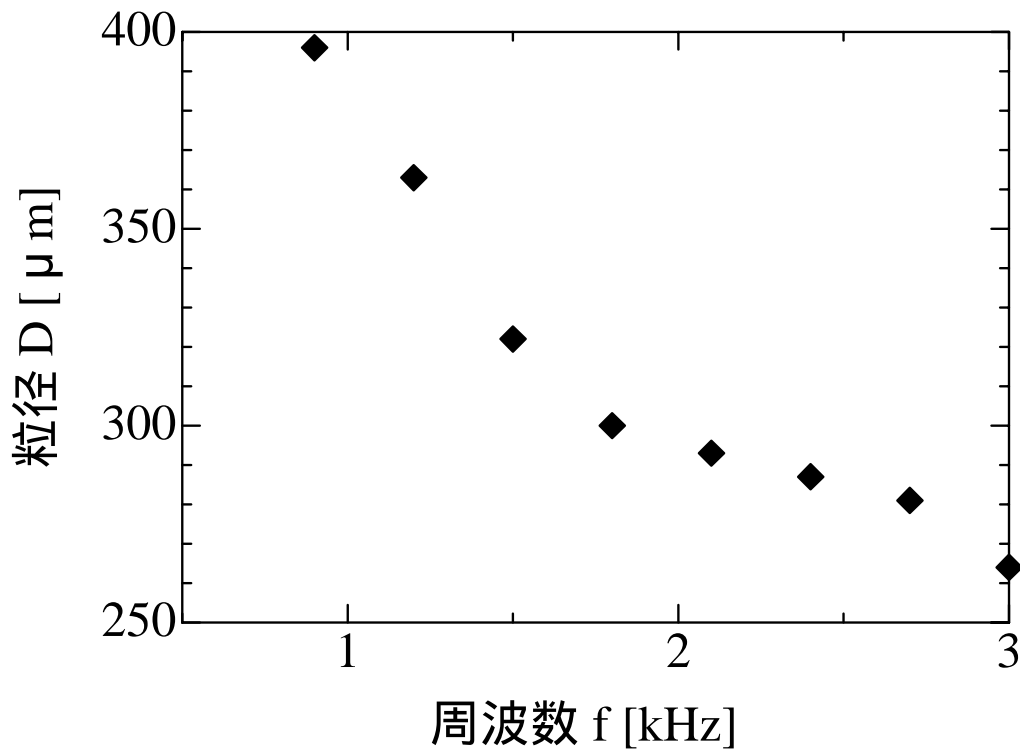


図 17 周波数と粒径（直径）の関係

直径 D のドロップレットが周波数 f で流れるとすると， f と Q の関係は

$$D = \left[\frac{6Q}{f} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.1)$$

となる．この式は piezo-actuator 1 周期に対してドロップレット 1 粒の粒径を示す．流量は決まった時間に落ちる全ドロップレットの体積を測ることによって得られる．このようにして決めた流量 Q を使って (4.1) 式から得られる実測値()と計算値()を比べたグラフが図 18 である．

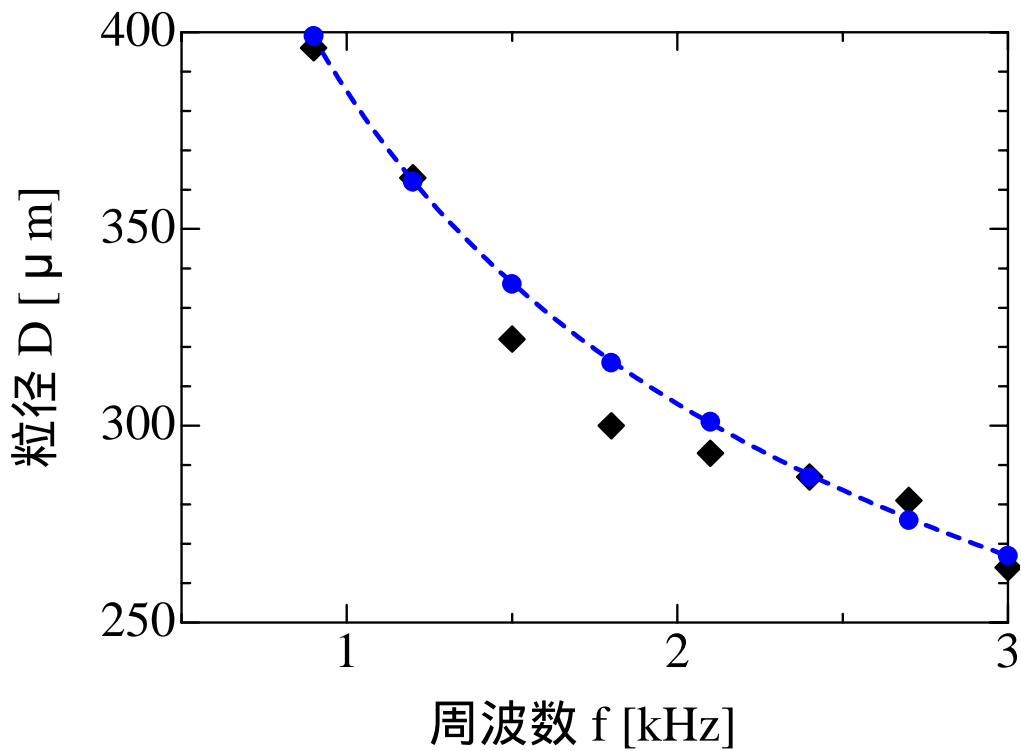


図 18 粒径の実測値と計算値

図 18 で取った点は次の表 1 の通りである。

周波数(kHz)	実測値(μm)	計算値(μm)
0.9	396	399
1.2	363	362
1.5	322	336
1.8	300	316
2.1	293	301
2.4	287	287
2.7	281	276
3	264	267

表 1 周波数とドロップレット粒径

液体流量を常に一定にしていたので、その時の値を代入し粒径と周波数の係数を出すと

$$D = 3.85 f^{-\frac{1}{3}} \times 10^2 \quad (4.2)$$

計算値と実測値を見比べるとドロップレットの粒径は、液体流量と周波数の関係式(4.1)がよく成り立つと言える。

また、観測した部分に f の係数となるようにフィッティングを行うと図19のようなグラフになった。

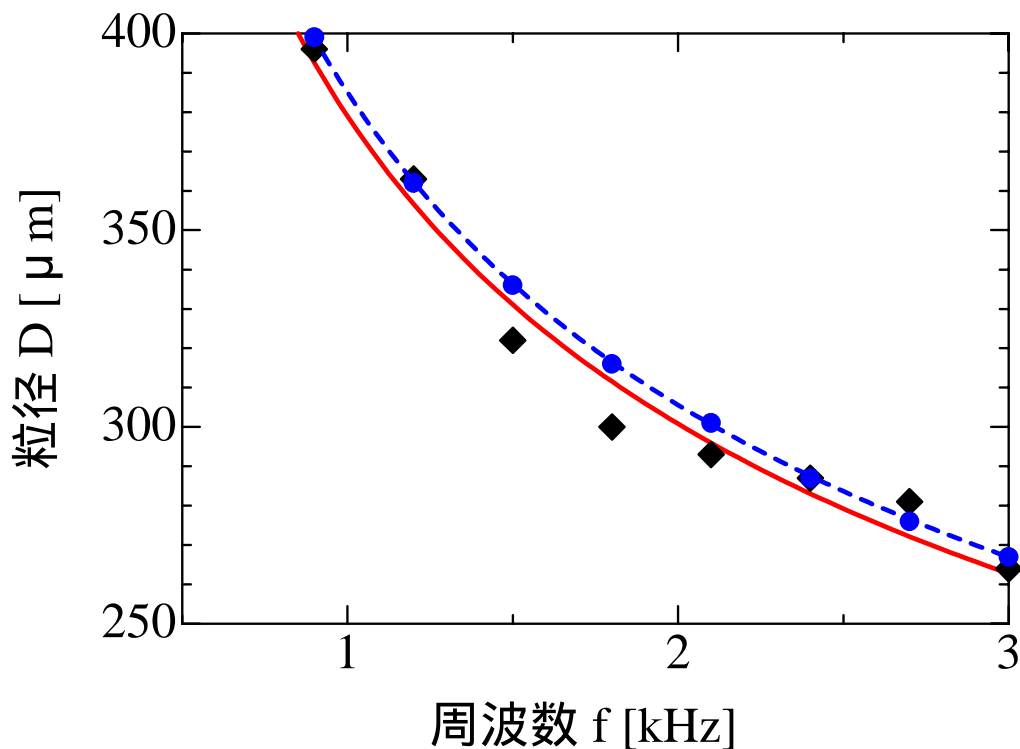


図19 実測値のフィッティング

実線で描かれた部分がフィッティングをした結果である．この時の粒径 D と周波数 f の関係は

$$D = 3.79 f^{-\frac{1}{3}} \times 10^2 \quad (4.3)$$

となった．(4.2)(4.3)の式を見ると係数もほぼ一致した．

第5章 ドロップレットの電荷量

5.1 実験概要

フォトニッククリスタルを作るためには、粒径の揃ったドロップレットを操作する必要がある。ドロップレットを操作するにあたって、インクジェットプリンティング法¹²⁾を利用することにした。生成したドロップレットに適量の電荷を持たせ、偏向電極間を通過させる。電極間に電場による帯電したドロップレットの偏向の大きさからドロップレットの電荷量を決定した。

5.2 インクジェットプリンティング法

インクジェットプリンティング法は、インクジェットプリンタの原理を利用したものである。インクジェットプリンタは、細いノズルからインクの微小ドロップレットを電気信号により制御しながら紙に向けて噴射させ、文字や図形を記録する装置で、コンピュータなどの出力装置として広く利用されている。

インクジェットプリンティング装置の構造を図 20 に示す。

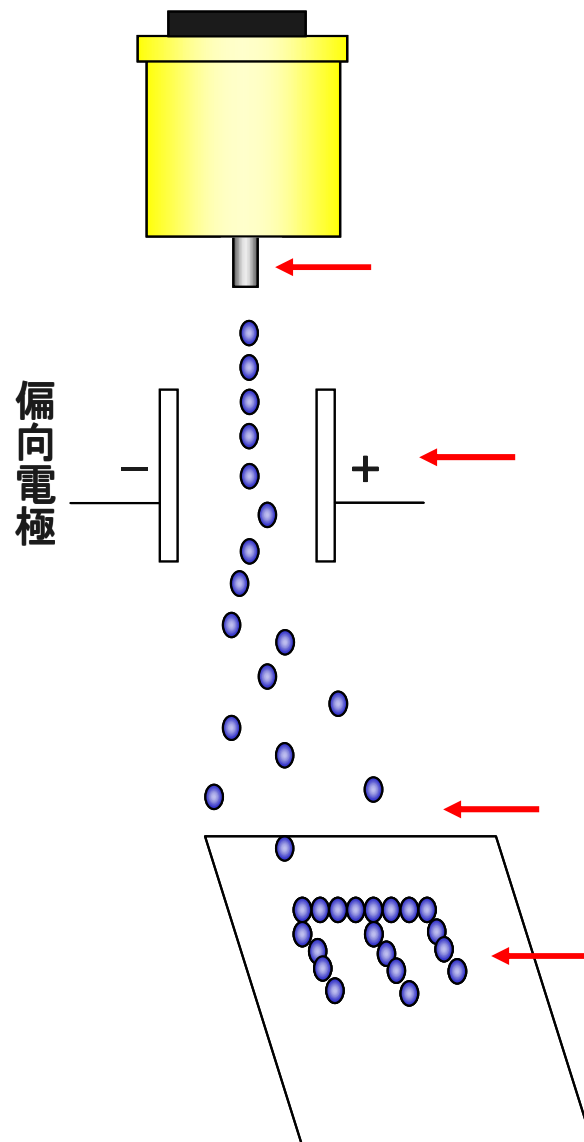


図 20 インクジェットプリンティング法の原理

インクジェットプリンティング法のプロセスは、次のようにする。

- ノズルからドロップレットを出す
- 偏向電極で進行方向を変える
- 狙った位置に吹き付ける
- 粒子集積パターンを形成する

このようなプロセスを利用してドロップレットを操作することにした。

5.3 実験方法

ドロップレットが流れる軌道上に偏向電極を置いた（図 21）。

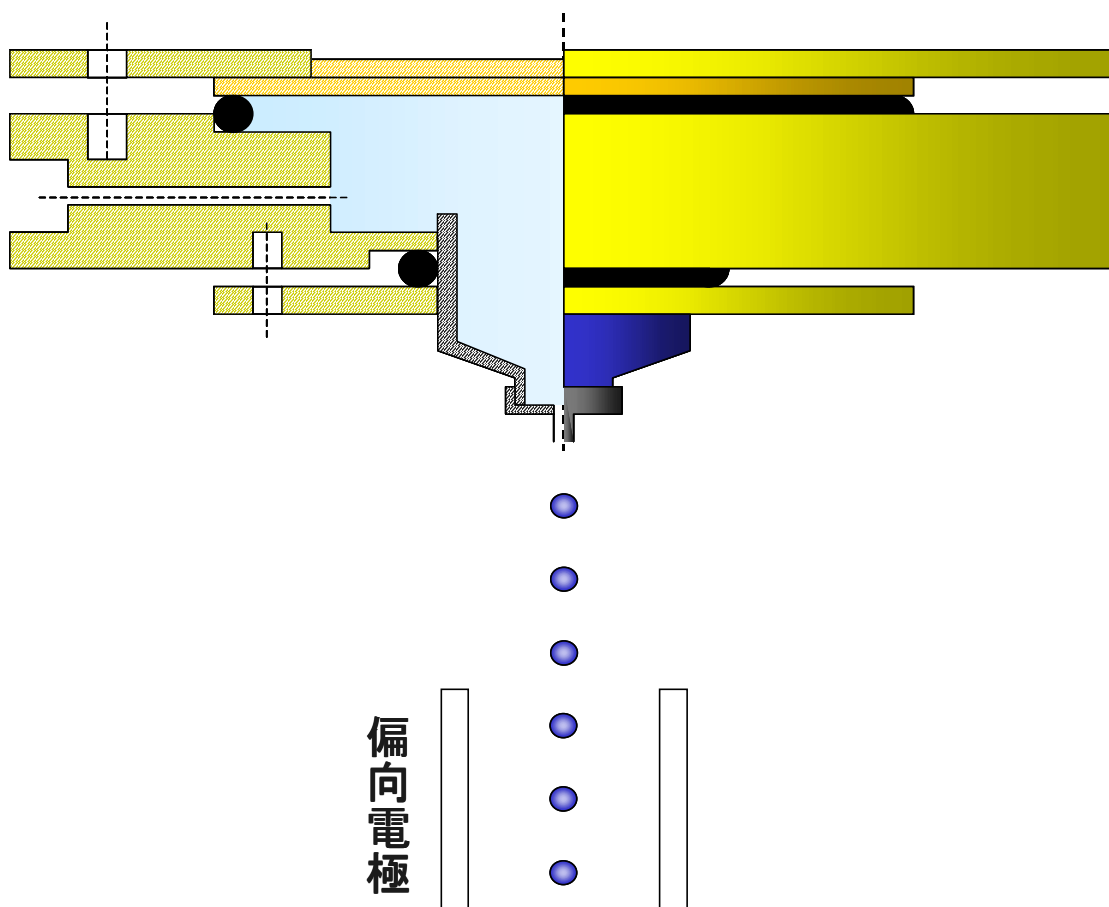


図 21 偏向電極配置

図 21 のように偏向電極を置いただけではドロップレットは移動しない . 偏向電極に電圧を加えることによって , 電極間に電場をもたらせるようにした (図 22) .

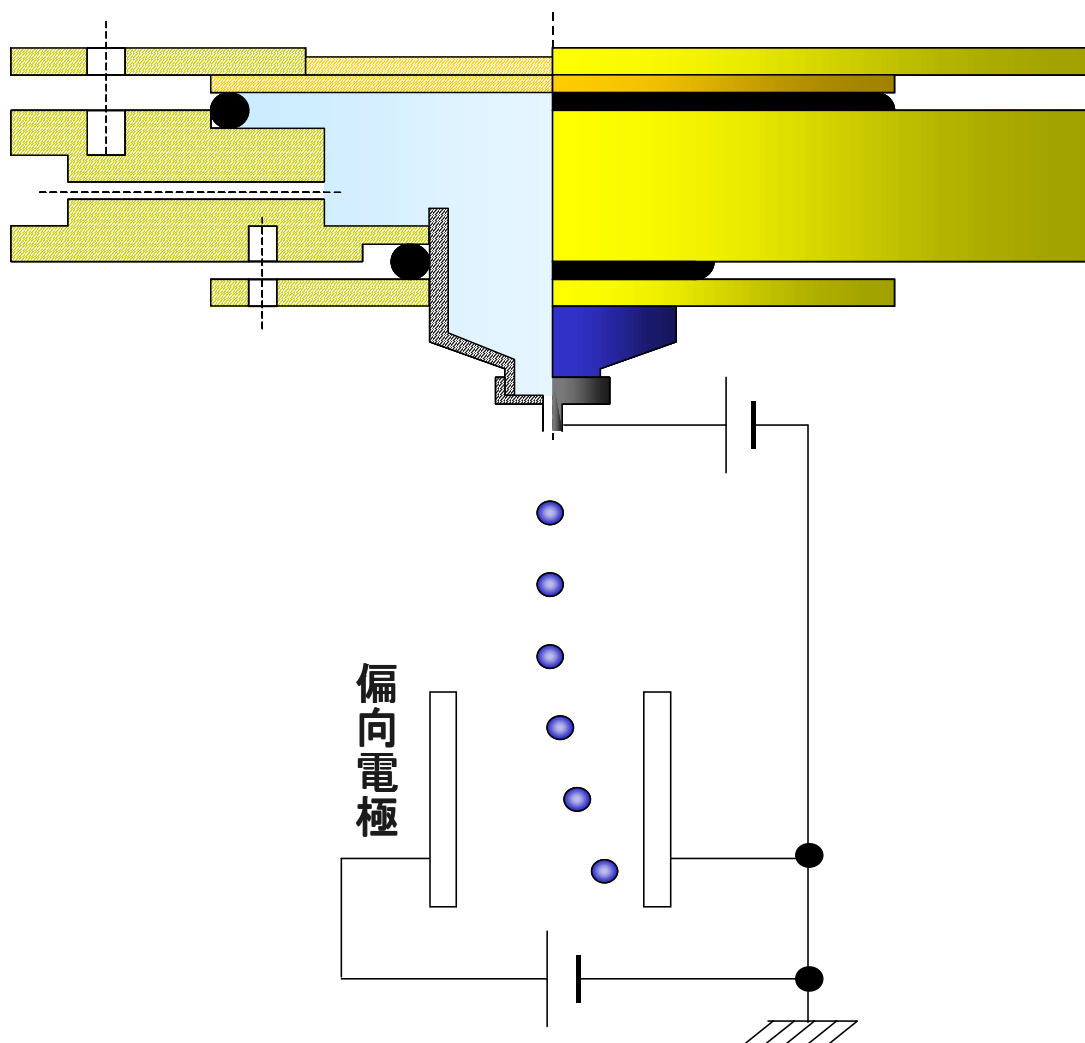


図 22 電場によるドロップレットの偏向

ノズル管の部分に電圧を加えているのは , 偏向電極だけではドロップレットの移動が小さい液体にある程度の電荷を持たせることによって移動する距離を大きくするためである .

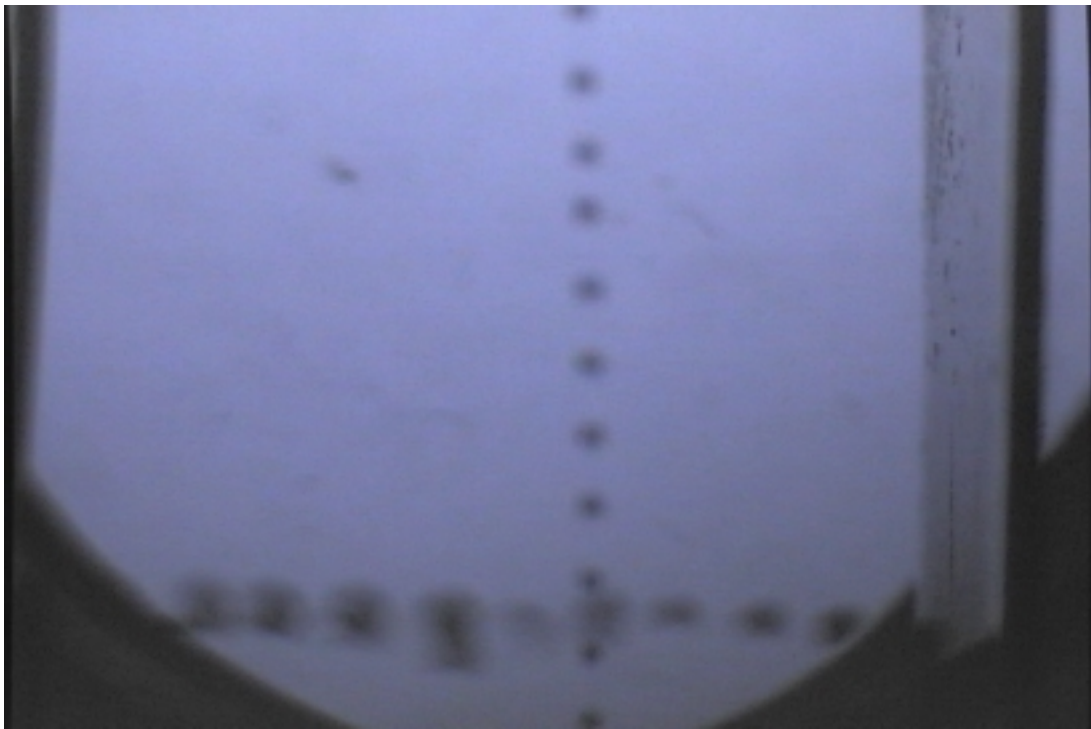
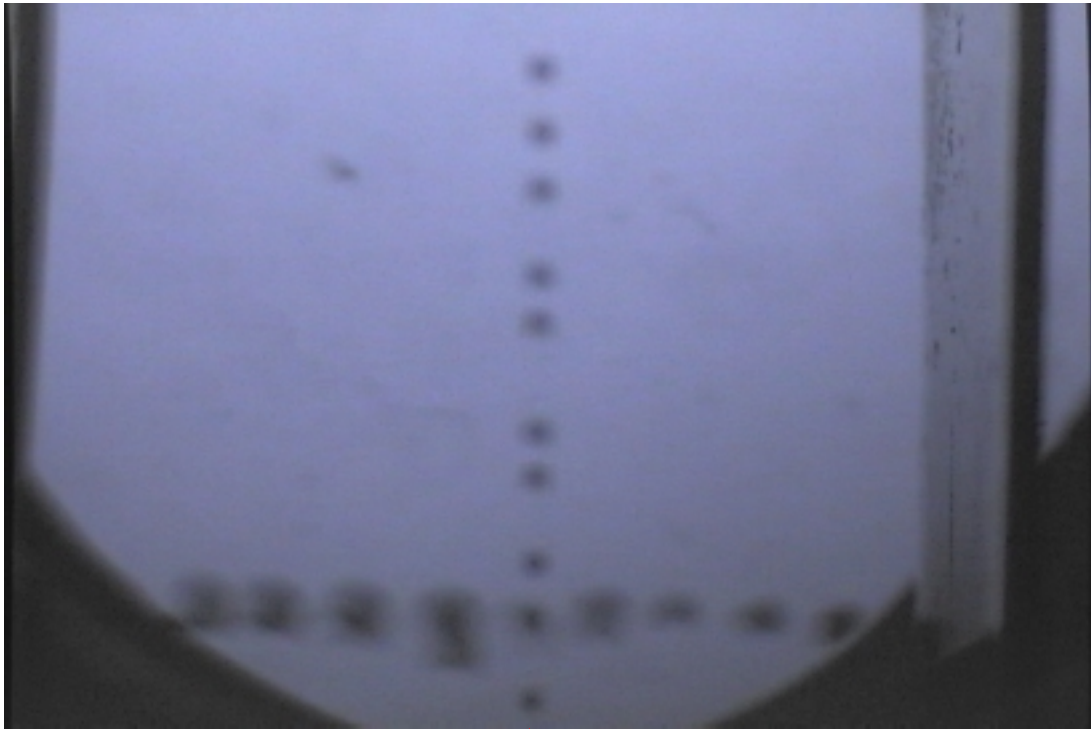


図 23 偏向電極に電圧を与えた時の変化
(上が与えていないとき 下が与えた時)

図 23 の変化は をつけた部分で移動したことが分かる . つまり , ドロップレットが電荷を持っていることを証明している .

5.4 実験結果及び考察

ドロップレットの移動から電荷量を求めるために関係式を次のように求めた .

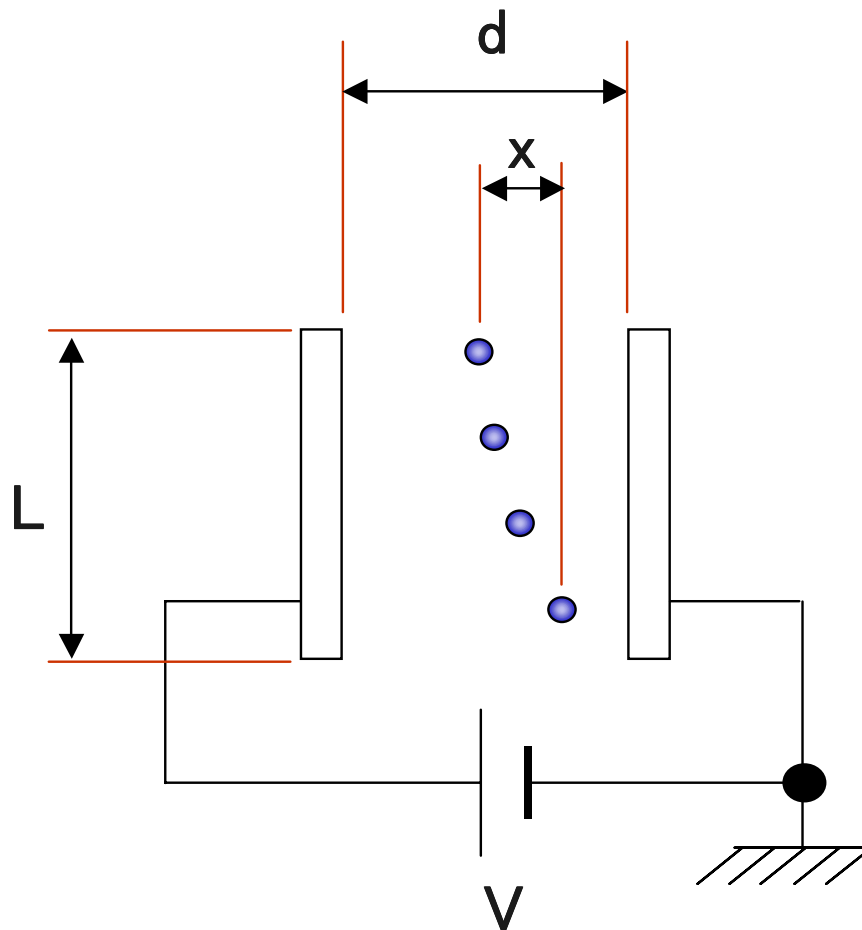


図 24 L :偏向電極の長さ d :偏向電極の間隔
 x :ドロップレットの偏向距離 V :印加電圧

偏向電極の間を通過する時の速度 v を等速と仮定すると、

$$t = \frac{L}{v} \quad (5.1)$$

となる。ドロップレットの質量 m 、加速度 a 、電荷量 q として、偏向電極間の運動方程式と電場の仕事を組み合わせると

$$ma = q \frac{V}{d} \quad a = \frac{qV}{md} \quad (5.2)$$

となる。偏向電極間の自由落下は

$$x = \frac{1}{2} at^2 \quad (5.3)$$

となり、 a と t に (5.1) と (5.2) の式を (5.3) 代入すると

$$x = \frac{1}{2} \frac{q}{m} \frac{V}{d} \left(\frac{L}{v} \right)^2 \quad (5.4)$$

が得られる。(5.4) 式を q について解くと

$$q = \frac{2xmdv^2}{VL^2} \quad (5.5)$$

となる。また、ドロップレットの質量 m は

$$m = \frac{4}{3} r^3 \rho \quad (5.6)$$

で求めることができる（ドロップレットの半径 r , 水の密度 $\rho:1\times10^3$ [kg/m³]).
ドロップレットの落下速度 v は

$$v = \frac{mg}{\kappa} \quad (5.7)$$

となる . また , (5.7) 式にある κ は

$$\kappa = 6 \eta r \quad (5.8)$$

で表される（空気の粘性係数 $\eta:1.8\times10^{-5}$ [Pa · s]). 関係式 (5.6)(5.7)(5.8)
を電荷量 q を求める式 (5.5) に代入すると

$$q = \frac{32\pi x r^7 \rho^3 d g^2}{243 V L^2 \eta^2} \quad (5.9)$$

が得られた . V, L, d, x は , それぞれ実測値を使用した .

$$V = 360 \text{ [V]} \quad L = 70 \text{ [mm]} \quad d = 12 \text{ [mm]} \quad x = 3 \text{ [mm]}$$

粒径と電荷量の関係を見たいので , V, L, d, x は一定の状態を保つようにした .
前章で求めたドロップレットの粒径を (5.9) 式に代入して電荷量を求めると ,
図 25 のグラフになる .

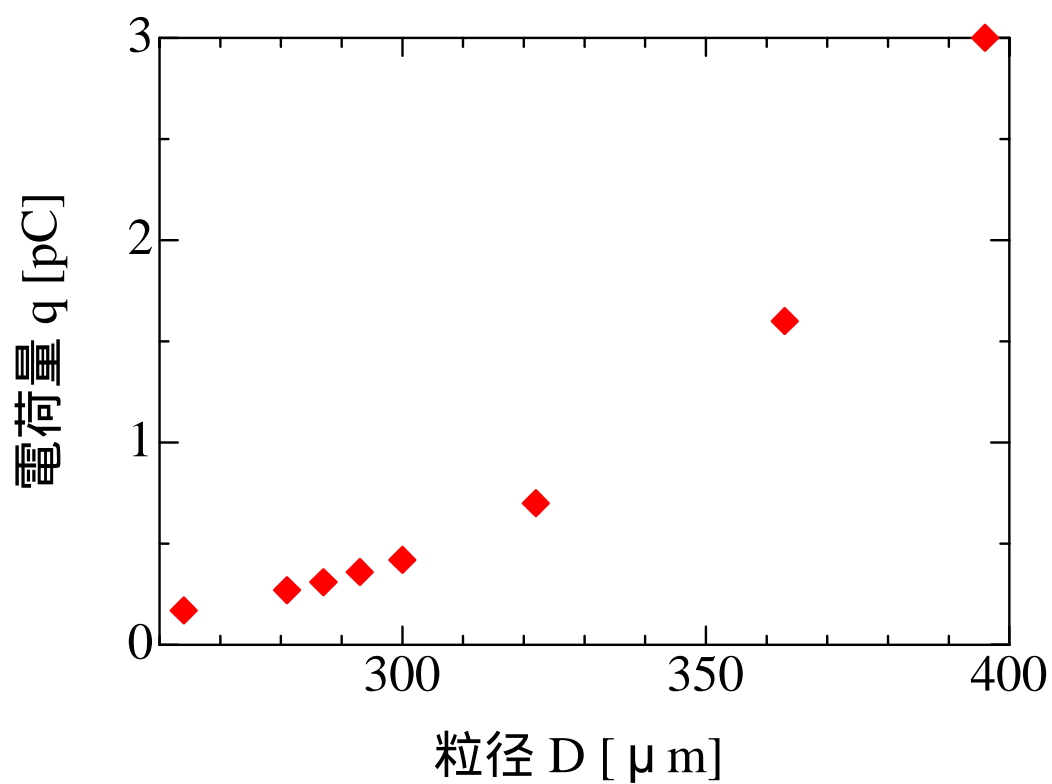


図 25 ドロプレットの粒径と電荷量の関係

粒径が大きくなると共に電荷量も大きくなることが分かる。また、このグラフにフィッティングした式を描くと図 26 のようになった。

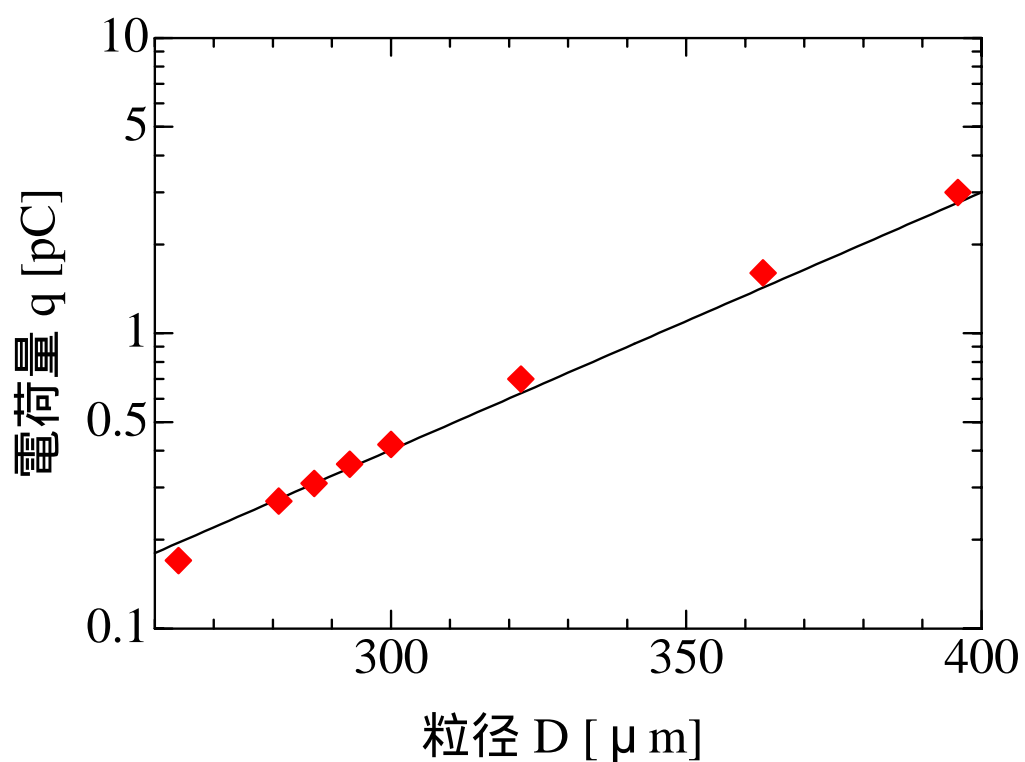


図 26 ドロップレットの粒径と電荷量の関係

粒径が大きくなると電荷量は指数関数的に大きくなることが分かった．実線の方程式は，

$$q = 3.4 \exp[0.020D] \quad (5.10)$$

である．このことから式 (5.10) で表される結果が得られた．

第6章 結言

本論文では、フォトニッククリスタルを作製することを目的として、ドロップレットを生成する研究を行った。今回は、本研究で独自に開発した、 piezoelectric アクチュエータを利用するドロップレットジェネレータの性能評価を行った。

第2章では、どの原理を用いて実験をしていくかを決定した。

第3章では、実験機器について検討した。独自に製作したドロップレットジェネレータの構図を描き、設置した場所などを示した。

第4章、第5章では、ドロップレットの粒径と電荷量を計測する実験を行い、本研究で独自に開発した、 piezoelectric アクチュエータを利用するドロップレットジェネレータの性能評価を行った。フォトニッククリスタルを作製するための基礎的データとなる、ドロップレットの粒径と周波数の関係及びドロップレット粒径と電荷量の間関係を決定した。

本研究ではドロップレットを生成することを目的としていたので、今後の課題として周期性と粒径の均一性を測定し、さらに高めた技術を確立することにより、フォトニッククリスタルを作製することに貢献したいと思う。

参考文献

- 1) T. Hattori, N. Tsurumachi, N. Muroi, H. Nakatsuka and E. Ogino, Prog. Crystal Growth and Charact 33, 183 (1996).
- 2) 6. K. Ohtaka, "Density of states of slab photonic crystals and the laser oscillation in photonic crystals", J. Lightwave Tech., 17, 11, 2161(1999)
- 3) E. Yablonovitch. Scientific American (International Edition), vol. 285, no. 6, pp. 47-55, December 2001.
- 4) 「フォトニック結晶の最新トレンド」特集号, レーザー研究 30 巻 第 2 号(2002).
- 5) Gary L. Switzer. Rev. Sci. Instrum. 62, 2765-2771 (1991).
- 6) R. N. Berglund and B. Y. H. Liu, Environ. Sci. Technol. 7, 147 (1973).
- 7) E. D. Threadgill, R. E. Williamson, and G. E. Miles, Trans. ASAE 17, 837 (1974).
- 8) W. D. Wamica, M. Van Reenen, M. Renksizbulut, and A. B. Strong Rev. Sci. Instrum. 62, 3037-3046 (1991).
- 9) H-B. Lin, J. D. Eversole, and A. J. Campillo, Rev. Sci. Instrum 61, 1018 (1990).
- 1 0) J. C. Yang, et. al. Experiments in Fluids. 23:445-7. (1997)
- 1 1) M. Trunk, et. al. Appl. Spectrosc. 48(10):1291-3. (1994).
- 1 2) 物質・材料研究機構 粒子アセンブル研究会編, 粒子集積化技術の世界, K ブックシリーズ 165, 工業調査会
- 1 3) E. Stemme and S-G. Larsson, IEEE Trans. Electron Devices ED-20, 14 (1973).
- 1 4) W. L. Buehner, J. D. Hill, T. H. Williams, and J. W. woods, IBM J. Res. Develop. 21, 2 (1977).
- 1 5) R. D. Carnahan and S. L. Hou, IEEE Trans. Indust. Appl. IA-13, 95 (1977).

謝辞

本研究を進めるにあたって、終始ご指導して下さいました木村正廣先生（現高知工科大学知能機械システム工学科教授）に深く感謝致します。戸名正英先生（現高知工科大学知能機械システム工学科実験講師）には貴重な助言と熱心なご指導をして頂きました。深く感謝致します。

また、研究のサポートをして頂いた光物性工学研究室の皆さんにも感謝致します。