

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	多孔板型超音波霧化器に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	前原直芳
Author(English)	
出典(和文)	学位:工学博士, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第1887号, 授与年月日:1988年12月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第1887号, Conferred date:1988/12/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

多孔板型超音波霧化器に関する研究

昭和 63 年 6 月

前 原 直 芳

目次

	頁
第一章 緒論	
1.1 背景	1
1.2 研究の目的	6
1.3 研究の概要	7
第二章 動作原理	
2.1 緒言	10
2.2 多孔板型超音波霧化器の概要	10
2.3 動作原理	11
2.4 試作霧化器の構造と振動特性	
2.4.1 試作霧化器の構造	13
2.4.2 振動特性	14
2.5 実験的検討Ⅰ（諸量の関係）	
2.5.1 吸い上げ高さ h	16
2.5.2 振幅	18
2.5.3 液滴の噴出位相と飛翔初速度	18
2.5.4 噴霧量と粒径	19
2.5.5 実験結果の検討	21
2.6 実験的検討Ⅱ（粒径の制御性）	
2.6.1 粒径とその制御	24
2.6.2 動作周波数による粒径の制御	24
2.6.3 ノズル直径による粒径の制御	27
2.6.4 実験結果の検討	28
2.7 結言	30
第三章 振動モードによる霧化の安定化	

3.1	緒言	31
3.2	振動系の基本構成	31
3.3	安定噴霧動作と振動モード	
3.3.1	周波数特性と振幅分布	34
3.3.2	気泡の挙動と振動モード	35
3.3.3	キャビティー直径の影響	37
3.3.4	節円の位置による影響	39
3.3.5	まとめ	41
3.4	噴霧パターンの制御性	42
3.5	噴霧能力	43
3.6	結言	45

第四章 最適振動系の設計

4.1	緒言	46
4.2	理論的検討	
4.2.1	振動系の整合の考え方	46
4.2.2	解析手法	47
4.2.3	最適設計	51
4.2.4	振幅分布	55
4.2.5	まとめ	56
4.3	実験的検討	
4.3.1	検討方法	57
4.3.2	振動系整合に関する実験	57
4.3.3	振幅分布に関する実験	59
4.3.4	まとめ	60
4.4	結言	61

第五章 構造設計および製造法

5.1	緒言	62
-----	----	----

5.2 構造設計

5.2.1	圧電振動子	62
5.2.2	振動板	64
5.2.3	ボディー	72
5.2.4	供給パイプと排気パイプ	73
5.3	製造法	
5.3.1	接合設計	74
5.3.2	接合条件	77
5.4	結言	82

第六章 噴霧能力の間欠制御方法

6.1	緒言	83
6.2	デューティー制御法	83
6.3	デューティー周波数の検討	84
6.4	直線性の改善	
6.4.1	振動系の応答特性の検討	85
6.4.2	液体供給系の条件の検討	86
6.4.3	キャビティー内圧Pの検討	88
6.5	適性化した霧化器の制御特性	89
6.6	結言	91

第七章 液体の物性が霧化特性に及ぼす影響

7.1	緒言	92
7.2	共振周波数に与える影響	92
7.3	噴霧量に与える影響	94
7.4	電圧特性に与える影響	97
7.5	噴霧能力制御特性に与える影響	100
7.6	まとめ	101
7.7	結言	102

第八章 多孔板型超音波霧化器の設計・試作とその応用例

8.1	緒言	104
8.2	多孔板型超音波霧化器の代表的仕様と性能	104
8.3	液体燃料燃焼機への応用可能性検討	
8.3.1	従来の石油ボイラー用バーナー	109
8.3.2	多孔板型超音波霧化器を用いた バーナーの試作・実験	111
8.4	結言	115

第九章 結論

謝辞	118
----	-----

参考文献	120
------	-----

付録	125
----	-----

発表論文目録	126
--------	-----

1.1 背景

強力超音波の特長を利用した工業的応用には、洗浄、溶接、分散、改質等の様々な分野があり、それぞれの分野に於いて多くの研究がなされ、実用化ないしはその為の検討が続けられている。¹⁾

これらの応用の一つとして液体の微粒化がある。液体の微粒化法には数多くの形態のものがあり、棚沢氏により体系化されている。²⁾ この分類の中の一つとして振動による微粒化があり、超音波による液体の微粒化はこのような位置付けにある技術である。

液体の微粒化の目的は液体の表面積の増大による分散であり、その用途としてまず第一に液体燃料の微粒化がある。液体燃料の燃焼に於いては、その表面積の増大と空気との混合の促進が燃焼効率の向上や排気ガス中の NO_x 、CO濃度の低減等の燃焼特性の向上の為に極めて重要である。また、気化器を用いてガス化した液体燃料と同等の燃焼特性を得られるレベルまで微粒化が促進できれば、現在民生用として多く用いられている気化器タイプの燃焼装置の構成の簡素化、コンパクト化が可能になる。このように液体燃料の微粒化は、省エネルギー化、無公害化、あるいは燃焼装置構造の簡素化の為に極めて有用である。また、液体燃料の微粒化と同様の利点の応用分野としては、化学反応プロセスに於ける反応の促進の為の微粒化や空調用加湿調節に於ける水の微粒化等がある。さらに、均一な微粒子を利用する応用として、微粒化溶液の乾燥による微粉の生産、スペクトル定量分析、あるいはインクジェットプリンター等があり、液体微粒化技術は多岐にわたる様々な用途がある。

超音波による液体の微粒化の歴史は古く、1927年のWood氏、Loomis氏の実験にさかのぼる。³⁾ 彼らの300kHz、50kVで動作させるLangevin型石英振動子による霧化実験により、超音波（又は音波）による液体の微粒化の研究が始まり、以来、様々な研究がなされてきている。⁴⁾⁻¹⁵⁾ また、近年では、L. Kelvinにより18世紀に提案された

インクジェットプリンティングの為のインク微粒化技術も情報化時代の到来とともに注目を浴びる超音波微粒化技術の一つになり、多くの研究がなされている。^{16)・22)} 超音波微粒化技術は他の微粒化技術に比較してそのコンパクトさ、無騒音、高制御性等の特長の故に、前述したように多くの研究者により様々な形態の霧化技術あるいは霧化装置が研究され提案されてきた。

これらの超音波霧化装置はその微粒化機構から考えて、以下の4つに大別することができる。

最も代表的な超音波霧化装置として第一にあげられるのは、キャピラリー波を利用したものである。このタイプの超音波霧化装置は Fig. 1.1 に示すように、振動体の表面に液体を供給し、振動体の振動により発生するキャピラリー波の波頭から微粒化が行われていくという霧化機構を利用したものである。微粒化粒子の粒径は

$$d_{dr} = 1 / 2 \cdot (\gamma / \rho \cdot \pi / (f_0)^2)^{1/3} \quad \dots (1.1)$$

で表され、振動体の振動周波数によりその粒径 d_{dr} が決定する。¹²⁾

ここに γ 及び ρ はそれぞれ液体の表面張力及び比重であり、 f_0 は振動体の振動周波数である。この原理を利用した霧化装置は、例えば Fig. 1.2(a) のように大円板のたわみ振動面を利用し、大量霧化を可能としたものや、Fig. 1.2(b) のように縦振動面に液体を供給する構成としコンパクト構造と高周波化による粒径の微細化を目的としたもの、あるいは Fig. 1.2(c) のように放射圧を利用して液体を吸い上げ、縦振動面に液体を自給して霧化するものなどがある。

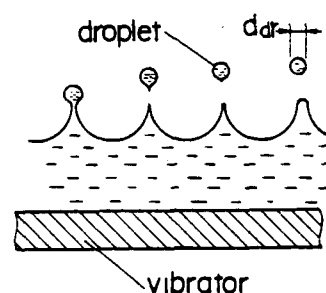


Fig.1.1 Generation of droplets from the capillary wave.

第二の超音波霧化装置としては、泉型と呼ばれるものがある。これは Fig. 1.3 のような液浸型超音波振動子により、超音波を液体表面に収束させて微粒化するものである。この霧化装置の微粒化の

機構は、Fig. 1.1に示したキャピラリー波によるもの以外にキャビテーションによるものが考えられ、主に後者の霧化機構により微粒化が行われていると考えられている。^{1),13),14)} 即ち、液体表面近傍におけるキャビテーション気泡の破壊により生じる衝撃波が液体を分裂して微粒化するものと考えられ、これがこの方式の霧化装置の主たる微粒化メカニズムであると考えられている。この微粒化粒子の粒径は、キャビテーション気泡の発生が振動周波数と一致して生じるため、振動周波数に反比例することが確かめられており、粒径 d_{dr} は実験式として

$$d_{dr} = 586 \cdot (r / \rho / (f_0)^2)^{1/3} \quad \dots (1.2)$$

で表すことができる。¹³⁾

第三の超音波霧化装置はRayleighの液柱分裂の理論に基づくものである。^{9),15),23)} 即ち、Fig. 1.4のように、圧力 P で加圧された液体をノズルから液柱として噴出させる構成とし、圧電振動子により液柱に振動 (disturbance) を与え、Rayleighの液柱分裂の理論に基づいた均一微粒化を図るものである。粒径 d_{dr} は

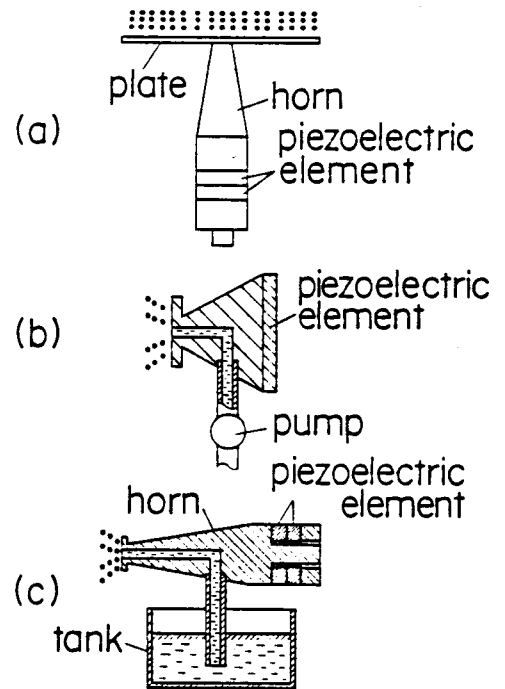


Fig.1.2 Capillary wave type ultrasonic atomizer. (a) The great amount atomization type. (b) The high frequency and compact type. (c) The pump action type.

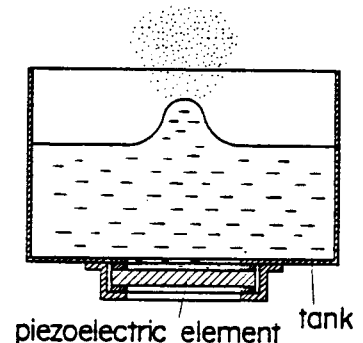


Fig.1.3 The fountain type ultrasonic atomizer.

$$d_a = (Q / f \cdot 6 / \pi)^{1/3}$$

... (1.3)

で与えられる。ここに、 Q は圧力 P により噴出される液体の単位時間当たりの噴出量である。¹⁵⁾

第四の超音波霧化装置はインクジェット記録装置に用いられているインク微粒化装置である。¹⁶⁾

Fig. 1.5はそれらのなかで最も構成が簡単なオン・デマンド型インクジェット装置であり、ノズルに対向して設けた振動体の振動により図のようにノズルから液滴を噴射するものである。この霧化法は上記第一～第三の方法に比べて均一粒径の液滴を一粒ずつ制御することができ、かつ、その粒径はノズル径と圧電振動子の歪み量（加圧室の体積変化）で決まるため、液滴径および霧化量の制御性に富み、しかも $2 \sim 3 \text{ m/s}$ の飛翔力を持った液滴を生成でき、さらにポンプ作用も有しているという優れた特長がある。²²⁾

しかしながら、液体（インク）中に溶存空気が存在すると、振動体の発生した圧力によりキャビテーション気泡が発生し、圧力がノズルまで伝達されず噴霧が不可能になるというものであった。従って、通常の水や液体燃料などのように溶存空気を多量に含む液体はこの装置により微粒化することが出来ないという欠点があったので汎用性に欠け、インクジェット装置以外には応用されていないのが実状であった。

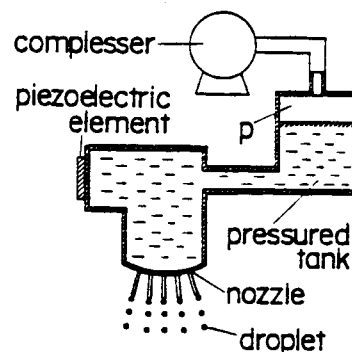


Fig.1.4 The ultrasonic disturbance type atomizer.

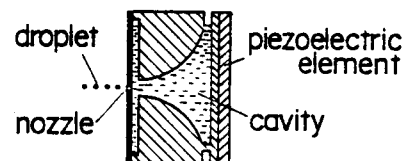


Fig.1.5 The on-demand ink jet device.

このような従来の超音波霧化装置の性能を比較してみると、表 1.1 のようになる。

表 1.1 は、特に民生用の様々な用途に応用する場合に重要な項目について、前述の四種の超音波霧化装置を比較したものである。これらを比べてみると、インクジェット型は表中に示された六項目のうち、(1) 粒径分布、(2) 霧化装置そのもののサイズ、(3) 消費電力、および(4) 霧化量制御性という本質的特質について総て良好な性能であり、他の霧化法と比較して優れた霧化法であると言える。

従って、もし汎用霧化装置として実用上不可欠な残りの二項目、即ち、(5) キャビテーション安定性、(6) 霧化量に関する欠点を解消することができれば、インクジェット装置特有の長所をそのまま受け継ぎ、しかも汎用性が高く従来にない性能の新型超音波霧化装置を提供することができると考えられる。

Table 1.1 Comparison of the conventional atomization mechanisms.

atomization mechanism	droplet's distribution	atomizer's size	power consumption	atomizing rate controllability	stability for cavitation	atomization capability
capillary wave type	X	△	X	△	△	○
fountain type	X	△	X	△	○	△
Rayleigh type	○	X	X	X	△	○
On demand Ink Jet type	○	○	○	○	X	X

1.2 研究の目的

本研究は、前述した背景の上に立ち、インクジェット装置を原形とし、その特長を生かしつつ欠点を改善した新しい超音波霧化装置の開発を目的としたものである。

既に述べたように、インクジェット装置は、(1) 粒径が均一、(2) 粒径の制御が容易、(3) 霧化量調節が簡単、(4) コンパクト、(5) 低消費電力、(6) ポンプ作用、等の特長がある。これらの特長を生かし、かつ、(a) 溶存空気のキャビテーション気泡化による悪影響を受け易い、(b) 霧化量が少ない、という二つの欠点を克服した新しい超音波霧化装置を開発できれば、従来の霧化装置に比べて著しく霧化特性に優れ、しかもコンパクトで簡単な構造の霧化装置を提供することができ、特に、民生分野に於ける種々の用途への応用を容易にすることができる。従って、超音波霧化装置の利用を促進し応用分野の拡大を図ることができよう。

ここに提案する多孔板型超音波霧化器は、上記インクジェット装置の二つの欠点、(a) キャビテーション不安定性、(b) 霧化量不足、に対して、下記のような改善策を試みその解決を図ったものである。

即ち、

(a) キャビテーション不安定性 ⇨ 振動板自身にノズルを設ける

(b) 霧化量不足 ⇨ 多くのノズルを設ける

である。

本研究は、このインクジェット装置を応用展開した新しい多孔板型超音波霧化器について、理論的および実験的に検討し、その動作原理、最適設計方法、製造方法、霧化特性、応用可能性等を明らかにし、多孔板型超音波霧化器の基礎的資料の提供を目的とした。

1.3 研究の概要

本研究で得られた結果を要約すると以下のようなになる。

(1) 多孔板型超音波霧化器の動作原理の解明

多孔板型超音波霧化器はオン・デマンド型インクジェット装置から応用展開されたものであるが、その振動系の形態および噴霧機構が全く異なっており、それ故インクジェット装置の特長を生かしつつその欠点を補った新しい超音波霧化法を実現している。

そこで、この霧化器の噴霧動作の原理をベルヌーイの定理を基本として構築し、これを実験的に実証すると共に噴霧機構に関する諸量の関係と噴霧粒径の可制御性とを明らかにした。この霧化器は多孔板のたわみ振動により生じる音圧によりベルヌーイの定理に従ってノズルから液滴を噴出し、多孔板の一回の振動で一個の液滴が噴出されることを示した。又同時に、表面張力が弁作用を果たすので液体を自給するポンプ作用を有していることを示した。さらにノズルの直径と振動板の振動速度とにより、噴霧粒径の制御が可能であることを示した。

(2) 霧化器振動系の構成と安定噴霧動作との関係の解明

キャビテーションにより発生する気泡の挙動と多孔板の振動モードおよび節円位置との関係を実験的に検討し、気泡が及ぼす噴霧動作への影響を明らかにした。そしてその結果、振動系が二次モードの振動を行い、かつ、円環状圧電振動子の内径と節円位置とが略一致する構成にすることにより、発生する気泡を除去することができ安定噴霧動作を実現できることを示した。また、成形振動板を用いることにより、噴霧パターンの制御が可能であること、ノズル数と霧化量が比例することを示した。

(3) 振動系最適設計手法の確立

振動系全体の周辺支持二次モードの共振周波数と、円環状圧電振動子内径より外側のバイモルフ振動体の周辺支持・内側自由の一次モードの共

振周波数と、円環状圧電振動子内径より内側の多孔板の周辺固定一次モードの共振周波数とをほぼ一致させる構成とすることにより、高い噴霧能力が得られる振動系を実現できることを示した。そして、この設計条件を満たすことが最適設計であることを理論的に解析するとともに実験的にこれを実証して最適設計手法を確立した。

(4) 構造設計法と製造法の基礎確立

上記(2)および(3)で示した最適設計指針に従い、霧化器の詳細な設計条件と製造条件を実験的に明らかにした。そして高い信頼性を保証することができ、かつ、工業的レベルで製造可能な設計条件と製造条件を明確化するとともにこれを実証して工業的生産技術の基礎を確立した。

(5) 噴霧能力制御法の確立

実用上不可欠かつ重要な噴霧能力制御手法として、最も簡単な構成で実現可能であり、かつ、霧化性能が全制御領域に渡って安定なデューティー（簡欠）制御法を採用した。そして、噴霧能力制御の直線性を保証するための諸条件を液体供給系を中心として明らかにした。噴霧能力制御の直線性を保証するためには、キャビティー内静圧 P_c と排気パイプ中の液柱の慣性が極めて重要であり、静圧 P_c には液体の物理的性質によって決まる最適値があること、また液柱の慣性は小さい程高い直線性が得られることを示した。

(6) 液体の物理的性質の霧化器諸特性への影響解析

噴霧液体の物理的性質が霧化器の諸特性に及ぼす影響を明らかにしておくことは、実用化が可能な応用範囲を明確にする上で重要である。そこでこの霧化器の動作原理から考えて重要な液体の物理的性質である表面張力 γ 、比重 ρ 、粘度 η 等が霧化器の諸特性に及ぼす影響を実験的に解析した。そして表面張力 γ と粘度 η が霧化特性に影響を与える主支配要因であり、少なくとも表面張力 $\gamma \leq 78$ dyne/cm、粘度 $\eta \leq 10$ cp、比重 $\rho \leq 1.05$ g/cm³、の範囲において安定に噴霧動作を行うことが可能であることを示した。

(7) 多孔板型超音波霧化器の代表的設計例とその応用の検討

多孔板型超音波霧化器は、霧化粒子の粒径及び噴霧量に関して高い可制御性を持っている。そこで、その代表的設計仕様と設計例を示すとともに、一応用例としてバーナ応用の可能性検討を行い、この霧化器が持つ独特の特長を明らかにするとともに、バーナ応用上の利点と課題を示した。即ち、代表例として、霧化粒子の粒径が $80\mu\text{m} \pm 10\%$ 、最大噴霧量が $40\text{cc}/\text{min.}$ (灯油)、消費電力 350mW のコンパクトな霧化器の設計が可能であることを示した。そして、部分予混合燃焼方式により燃焼量が $13000 \sim 2500\text{Kcal}/\text{h}$ の間で連続的に制御可能なバーナの実現可能性があることを示すと共に、応用上の課題として、霧化器の冷却と給油構成の工夫が高い信頼性実現のために必要であることを明らかにした。

以上、本研究の概要について述べた。また、霧化器の応用化実験等に用いたその駆動回路の構成を付録として末尾に付記する。

第二章 動作原理

2.1 緒言

多孔板型超音波霧化器は、前章で述べたように、オン・デマンド型インクジェット装置の持つ多くの優れた特徴をそのまま受け継ぎ、かつ、汎用的霧化器としてはその欠点であった(1)溶存空气のキャビテーション気泡化により、通常の液体を安定に噴霧できない、(2)噴霧能力が少なく、 0.5 cc/min. 以下である、を克服した新しい動作原理に基づく超音波霧化器である。

この多孔板型超音波霧化器は、上記欠点 (1)を解決するために多孔板 (振動板) そのものを振動させる構成をとり、欠点 (2)を解消するために数多くのノズル (孔) を設ける構造を採用している。

ここでは、理論的な動作原理を明らかにするとともに、液体噴出のメカニズム、吸い上げ機構、ならびに霧化に関する基本的特性について理論的ならびに実験的検討を行い、この新しい多孔板型超音波霧化器の基礎的動作理論の確立を目的とした。

2.2 多孔板型超音波霧化器の概要²⁴⁾

多孔板型超音波霧化器は、Fig. 2.1に示す円環状の圧電振動子と中央に多数のノズルを有する金属製薄板より成る多孔板 (振動板) とを、Fig. 2.2に示すように、ボディーに接着して構成されている。そしてボディーには、液体を充填するためのキャビティーが設けられている。

圧電振動子は振動板に張り合わせるることにより、一種のパイモ

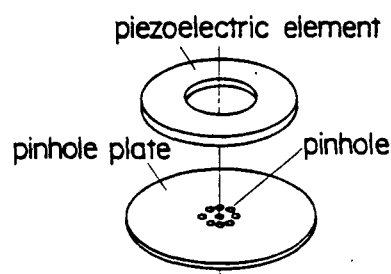


Fig.2.1 The diagonal view of the ring piezoelectric element and the pinhole plate.

ルフ振動体となっている。従って、
 圧電振動子を励振することにより
 振動板がたわみ振動し、この振動
 により発生する音圧により多数の
 ノズルからキャビティー内の液体
 が噴霧されるものである。

2.3 動作原理²⁵⁾

多孔板型超音波霧化器の動作
 原理を、Fig. 2.3を用いて説明する。

今、Fig. 2.3(a)のように、液体が満たされた室（キャビティー）
 を有するボディーに多孔板が取り付けられた状態を考える。何らか
 の方法で液体に圧力が加えられ、かつ、液体が十分補給されたとす
 ると、液体はノズルから液柱となって噴出する。

この圧力の大きさが周期的に
 変化し、かつ、ノズルにおける液
 体の表面張力 γ がノズルからの空
 気の流入を阻止するに十分なだけ
 大きいとき、ノズルからは液体が
 液滴となって噴射され微粒化が行
 われる。

Fig. 2.4は多孔板のノズル部
 分のモデル図である。これを用い
 て、キャビティー内外の圧力と表
 面張力 γ との平衡関係、ならびに
 噴霧動作について説明する。

キャビティー内に何らの圧力
 も加えられないときの力の平衡関
 係は次式のように表すことができ
 る。

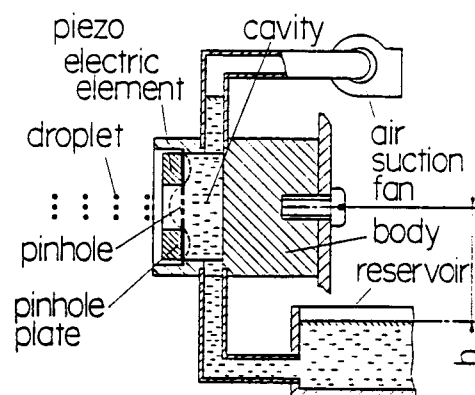


Fig.2.2 Typical structure of a pinhole plate ultrasonic atomizer.

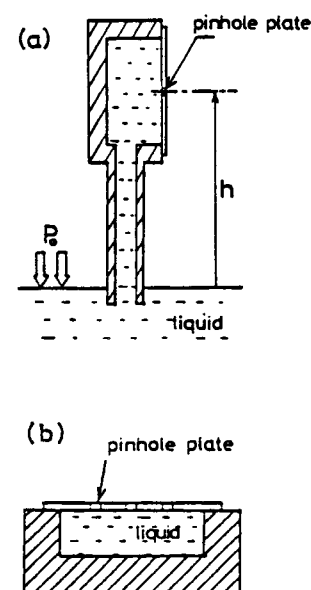


Fig.2.3 Schemes of a pinhole plate ultrasonic atomizer.

$$2 \cdot \gamma / R + P_0 - \rho \cdot g \cdot h = P_1 \quad (2.1)$$

ここで、 P_0 、 R 、 γ 、 ρ 、 g および h は、それぞれ、大気圧、ノズルにおける液体の曲率半径、液体の表面張力、液体の比重、重力加速度および液面からノズルまでの高さである。

この時、表面張力 γ による力 F_s は Fig. 2.4(a) に示すように外向きになる。何らかの負の圧力 P_1 が液体に加えられた場合、この表面張力 γ によってノズルからキャビティへの空気の流入を阻止するためには式 (2.2) が満たされることが必要である。

$$2 \cdot \gamma / R \geq P_1 + \rho \cdot g \cdot h \quad (2.2)$$

次に、正の圧力 P_1 が液体に加えられた場合を考えると、ノズルの状態は Fig. 2.4(b) のようになり、力 F_s は内向きになる。そして、

$$2 \cdot \gamma / R + P_0 \leq P_1 - \rho \cdot g \cdot h + P_1 \quad (2.3)$$

が満たされたとき、ノズルからは液滴が噴出される。このノズルからの液滴噴出のしきい値圧力は、

$$P_1 = 2 \cdot \gamma / r + \rho \cdot g \cdot h \quad (2.4)$$

で表すことができる。

ここに、 r はノズルの半径であり、曲率半径 R の最小値である。

Fig. 2.3(a) 以外に Fig. 2.3(b) のような構成も考えることができる。しかしながら、この構成は噴霧された液滴が重力の作用でノズル上に落下してしまい、安定に連続した噴霧ができなくなる可能性がある。また、キャビティ内にキャビテーションなどにより生じた気泡が存在する場合、この気泡がノズルからの安定な噴霧を阻害するおそれがある。従って、この方式の霧化器においては、Fig. 2.3(a) の構成が優れていると考えられる。

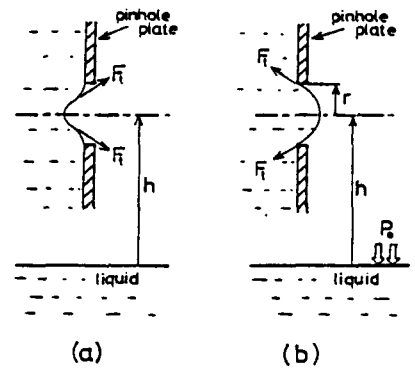


Fig.2.4 Simplified model of the atomizer for considering the force equilibrium between the inside and outside of the cavity ($F_s = 2\gamma/R$, force due to surface tension).

2.4 試作霧化器の構造と振動特性

2.4.1 試作霧化器の構造

前節で説明した周期的交番圧力をキャビティ内の液体に印加する簡単な方法として、次の二つの方法が考えられる。

第一の方法は、キャビティの底面あるいは側面に圧電振動子を設ける構成とすることにより、キャビティ内の液体を励振する方法である。この方法は、第一章の Fig. 1.5 で説明したインクジェット装置の構成の延長線上の改良にほかならない。

第二の方法は、ノズル板自身を圧電振動子で励振する方法である。この方法は、インクジェット装置では採用されていない新たな液体励振方法である。

これら二つの方法は、もし霧化される液体が非圧縮性とみなせるならば全く同等と考えられ、両者の間に差は無いと言える。しかしながら、液体が圧縮性である場合にはこの両者間には明らかな差異が生じてくる。

すなわち前者の方法の場合には、液体が圧縮性であるために、キャビティの壁面や底面に設けた圧電振動子により発生させられる圧力がノズルまで伝達されず、結果として噴霧することができないのである。水や液体燃料のような通常の液体は、溶存空気を含有しているためキャビテーションによる気泡が発生して圧縮性を生じる。従って、前者の方法を用いた霧化装置では、このような通常の液体を噴霧することができない。

一方、後者の方法の場合には、ノズル板自身が振動して圧力を発生する構成であるのでノズルの極近傍に最大の圧力が生じることになる。従って、前者の場合のようにその圧力発生源から離れた位置にあるノズルまで圧力を伝達する必要がない。このため、圧縮性をおびた液体であっても極めて安定に噴霧することができる。さらに圧力の伝達損失も少ないので、必要な最大圧力は前者の場合に比べて小さくなり、キャビテーションも発生しにくいという長所がある。

このように、前者に比べて後者の方が汎用的な霧化装置を構成する上では優れているので、本研究における霧化装置の構成として後者の方法を採用した。

試作した多孔板型超音波霧化器の構成を Fig. 2.5 に示す。

円環状圧電振動子および多孔板を貼り合わせたバイモルフ振動体を Fig. 2.5(a) のように構成し、同図 (b) のようにボディーに接着している。圧電振動子は、外径 10.0 mm、内径 3.5 mm、厚さ 1.0 mm であり、P C M 5 材を用いている。多孔板は、Fig. 2.5(c) のようにそのピッチが $250\mu\text{m}$ の等間隔で配置した直径 $80\mu\text{m}$ のノズルを 7 個有し、厚さ $50\mu\text{m}$ のステンレス製円板である。また、ボディーは、内径 10 mm、深さ 2 mm のキャビティー、および、キャビティーの中心線上に対向して設けた内径 3 mm の供給パイプおよび排気パイプを有し、しんちゅう製である。

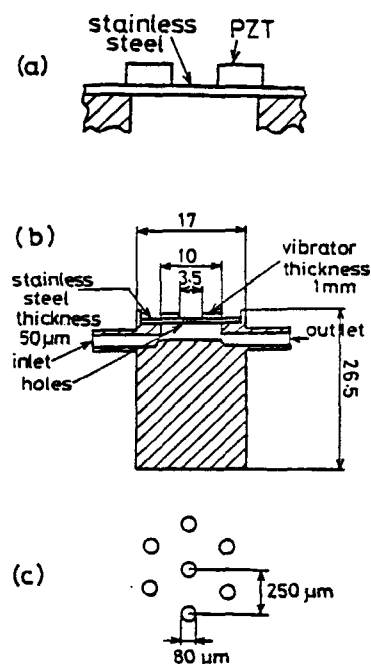


Fig.2.5 Schematic diagram and dimensions of a trial-made atomizer. (a) A bimorph vibrator. (b) A sectional view of the atomizer. (c) The arrangement of pinholes.

2.4.2 振動特性

霧化器の共振周波数は、キャビティー内に液体が充填された場合と空の場合とで大きく変化する。

キャビティーが空のとき、霧化器は 38.5 kHz および 45.3 kHz の高低二つの共振周波数を示す。一方、このキャビティーが液体で満たされると、低い方の共振周波数は著しくダンピングされ、約 20 kHz

となる。そして、この共振周波数における噴霧状況は極めて不安定となり、噴霧と停止を繰り返す断続的（息つき）噴霧状態となる。これは、第三章において詳しく説明するように、キャビテーションにより生じる気泡の影響である。

一方、高い方の共振周波数は34.41kHzまで低下し、この場合の噴霧動作時においても、キャビテーションによる気泡の発生が観察される。しかしながら、噴霧動作そのものは極めて安定である（この理由についても第三章に詳述する）。従って、この霧化器の動作周波数として高い方の共振周波数を用いることとした。

この霧化器の振動振幅分布をオプティカルヘテロダイン法を用いて測定した結果をFig. 2.6に示す。²⁶⁾ また、Fig. 2.6中には、圧電振動子と多孔板との接合体を一つの段付円形振動板とみなし、第四章に示す解析手法により、段付円形振動板の振幅分布として計算した結果も図示してある。²⁷⁾

キャビティ内が空の時、計算により求めた最大振幅は、駆動電圧1Vで圧電振動子を励振して動

作させたときの最大振幅と極めてよく一致している。計算において段付円形振動板は周辺支持条件下で解析したが、この境界条件が最もよく実験結果と一致している。これは、多孔板がボディーに周辺固定条件で接着されているけれども、圧電振動子に比べて十分薄い（約1/20）ので、この圧電振動子と多孔板よりなる段付円形振動板の境界条件が周辺支持であるとみなせるからであると考えられる。

Fig. 2.6より明らかなように、キャビティが空の時の振幅分布は、その実験値と計算値とがよく一致しており、節円は丁度圧電振動子の内径の内側近傍にみられる。従って、この霧化器の動作周波数として選んだ高い方の共振周波数は、周辺支持円形振動板の二

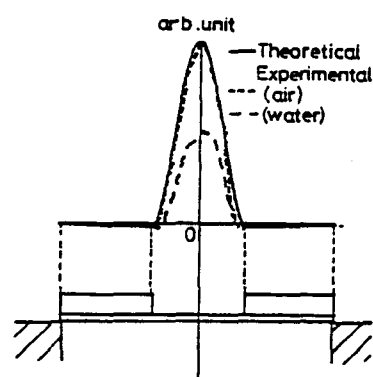


Fig.2.6 Measured and calculated distributions of displacement of the bimorph vibrator. A nodal line is found just inside the ceramic vibrator.

次のモードの共振周波数である。

圧電振動子を駆動電圧1Vで駆動した時の振幅分布の大きさは、液体を充填した時の方が空の時より小さくなり、かつ、共振周波数も液体の影響で低下するけれども、その振動姿態に変化はなく同等の二次モード共振姿態である。なお、前述した低い方の共振周波数は、円形振動板の一次のモードの共振周波数に相当するものである。

機械端子が多孔板の中央であると考えた時のバイモルフ振動体の等価質量は、振幅分布から計算することができる。これを求めると $3.82 \times 10^{-4} \text{g}$ であり、従ってその力係数は約 0.02N/V である。

2.5 実験的検討 I (諸量の関係)

2.5.1 吸い上げ高さ h

ノズルの内外の圧力差の可能範囲、すなわち、ノズルからの空気の流入や液体の流出が生じない圧力差の範囲を明らかにすること、および、液滴を噴出するために必要な最小の圧力 P_c を調べることを目的として、Fig. 2.7のように霧化器を設置し、吸い上げ高さ h を変える実験を行った。使用した液体は水である。

h を多孔板の中心から下向きの液面までの距離と定義した時、その許容範囲は、33.26 cmから-20 cmであった。この最大および最小の h に対応する圧力差を $\rho \cdot g \cdot h$ として求め、また、水の表面張力 γ を $72.8 \times 10^{-3} \text{N/m}$ 、圧力 P_c を 0N/m^2 とし、式(2.2)および(2.3)より求めたノズルにおける液体表面の曲率半径 R は表2.1のようになる。

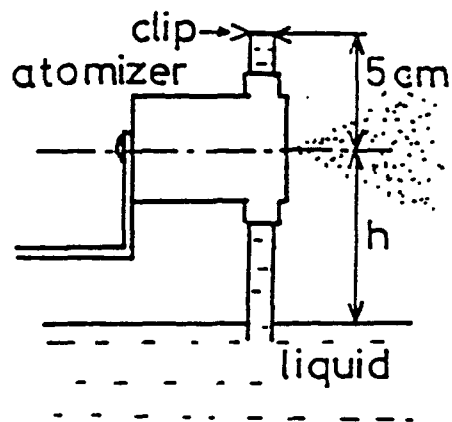


Fig.2.7 Setting of the atomizer.

Table 2.1 Measured maximum and minimum pressures which are determined by the surface tension

h (cm)	-20	33.26
Pressure (N/m ²)	1.96×10^3	3.26×10^3
Radius curvature	74 μ m	45 μ m

この計算により得た曲率半径 $R = 74 \mu\text{m}$ は、Fig. 2.4 に示した最小曲率半径 r のほぼ二倍となっており、この曲率半径に達した状態で表面張力が破れてキャビティーから液体が流出する。

一方、キャビティー内が負圧の場合は、小さい曲率半径を維持しながら、前者の場合に比べて約 1.5 倍の圧力まで表面張力が破れず、空気の流入を阻止している。そして、この時の曲率半径 R はその理論的最小値 r の 1.1 倍となっている。従って、キャビティー側に向かって、ノズルの半径に近い半径の球状になった状態で表面張力が破れ空気の流入が生じることがわかる。

また、この破れる直前の表面張力により生じる力 F_s は、正圧力時および負圧力時のそれぞれに対して、

$$F_s = 1.96 \times 10^3 \text{ N} / \text{m}^2 \text{ および } 3.26 \times 10^3 \text{ N} / \text{m}^2$$

である。

上記実験結果から、直流的なバイアス圧力を適正に与えるためには、吸い上げ高さ h は許容最大および最小吸い上げ高さの平均値として、 $h = 6.63 \text{ cm}$ が適当であると考えられる。しかしながら、実際の動作時は多孔板の振動による音の放射圧が生じ、これが直流的なバイアス圧力としてさらに印加されることになる。従って、この点を考慮して、

$$h = 8 \text{ cm}$$

として実験を行った。

$h = 8 \text{ cm}$ の時、圧力差は $\rho \cdot g \cdot h = 0.78 \times 10^3 \text{ N} / \text{m}^2$ であるので、この時の噴霧しきい値圧力 P_s は式 (2.4) より

$$P_s = 2.74 \times 10^3 \text{ N} / \text{m}^2$$

となる。

2.5.2 振幅

レーザードップラー法を用いて、多孔板の中央部の振幅を測定した。²⁸⁾ Fig. 2.8 は、二次モードの共振周波数において、圧電振動子の駆動電圧を変えて振幅を測定した結果である。

噴霧現象は約 15V から生じ、約 30V 以上で安定な噴霧状態となる。そして、30V から 50V の間では駆動電圧に比例した振幅を示す。

50V 以上の駆動電圧における動作

については、第六章において、霧化量の電圧特性として詳しく説明する。なぜならば、キャビティが空の状態において過大な駆動電圧を加えることは霧化器を破壊してしまう可能性があるからである。従って、ここでは 50V 程度の駆動電圧までは振幅 δ と駆動電圧 V が一定の直線的関係にあることを示すにとどめる。

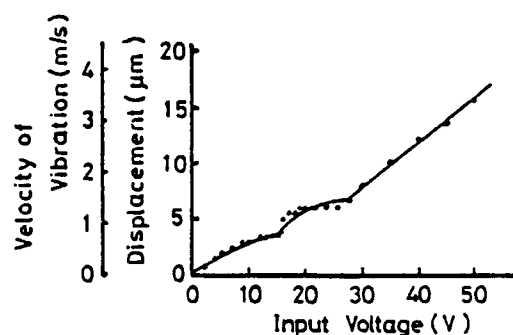


Fig.2.8 Displacement as a function of the applied voltage.

2.5.3 液滴の噴出位相と飛翔初速度

多孔板の振動により発生する圧力に対する液滴の噴出位相を発光時間が $1\mu s$ の高速ストロボを用いて測定した。測定は、Fig. 2.9 にそのブロック図を示す測定系で行った。すなわち、圧電振動子の駆動電圧信号を基準とし、ストロボの発光タイミングをシフトさせながら液滴の噴出状態を観察することにより、噴出位相を調べた。

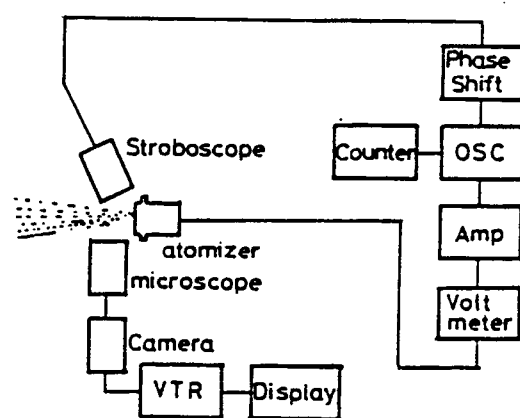


Fig.2.9 Schematic diagram for stroboscopic observations of droplet.

Fig. 2.10にその結果を示す。

液体は $\phi = 48^\circ$ で半球状にノズルから押し出され、 $\phi = 144^\circ$ で噴出される。ここで位相 ϕ は圧力 P に対する位相である。圧力 P は、薄い圧電性フィルム PVDF をキャピティの底面に貼り付け、この PVDF の出力信号を検出して測定した。

また、この結果、多孔板の一周周期当たり一つのノズルから一つの液滴が噴出されていることも確認できた。

Fig. 2.11は、多孔板の振動速度 V_p と液滴の飛翔速度 V_d の関係を示す実験結果である。飛翔速度 V_d は、ストロボスコープにより観察された液滴の間隔を測定することにより求めたものである。

図より、飛翔速度 V_d は振動速度 V_p の平方根に比例すると考えられる。

2.5.4 噴霧量と粒径

駆動電圧 V に対する霧化器の噴霧量 Q と粒径 d_a の平均粒径 GMD の測定結果を Fig. 2.12 に示す。

噴霧量 Q および平均粒径 GMD は駆動電圧 V の増加とともに大きくなるが、約 47V で 4.4 cc/min. と

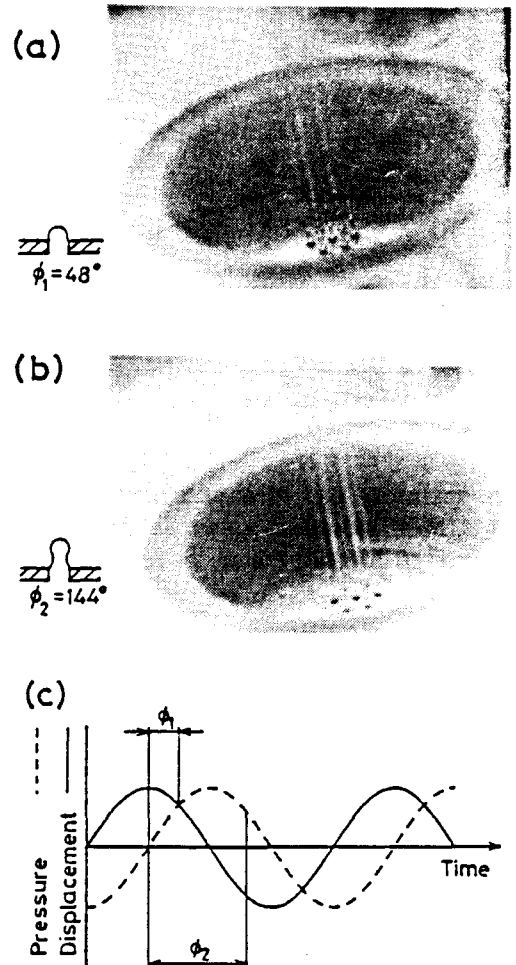


Fig.2.10 Phase of ejection of droplet. (a) and (b) are photographed at $\phi=48^\circ$ and $\phi=144^\circ$ respectively.

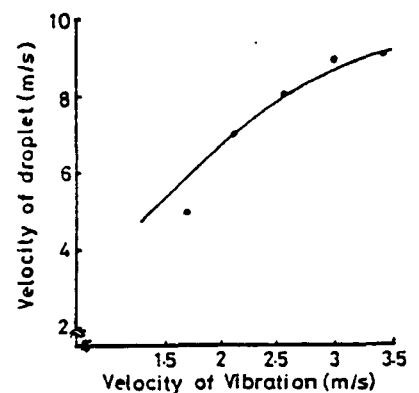


Fig.2.11 Initial velocity of droplet as a function of vibration velocity.

なり飽和を示す。

一方、多孔板の振動速度 V_p は、Fig. 2.8 に示すように、駆動電圧 V が 47V を越えてもまだ駆動電圧 V に比例して大きくなっている。駆動電圧 V が 47V を越えると、プラスチック製の排気パイプ出口からは気泡の浮揚が観察されるようになる。すなわち、47V 以上の駆動電圧においては、キャビテーションが発生しこれによる溶存空気の気泡化が生じていると考えら

れる。従って、駆動電圧 V が 47V より大きくなっていくと、多孔板の振動速度 V_p の増加による音圧 P の上昇はそのすべてが液滴の噴出に作用せず、その一部はキャビテーションの発生に費やされるようになっていくと考えられる。

実験に用いた霧化器は Fig. 2.5(c) に示したように 7 個のノズルを有しているが、ストロボ観察によれば、全ノズルから噴出される液滴の粒径 d_w はほとんど同一粒径となっており、極めて高い粒径の均一性を確認することができた。

一つのノズルから噴出される液滴列の粒径は、駆動電圧が一定すなわち音圧 P が一定に保たれていれば一定である。すなわち、一つのノズルからは均一粒径の液滴列が噴霧される。従って、この多孔板型霧化器の粒径分布は複数のノズルから発生される液滴列間の粒径の差によって生じると考えてよい。

ノズル間の粒径差が生じる要因としては、ノズルの直径 d の加工バラツキと各々のノズルに加えられる音圧 P の局所的な分布がある。前者はノズルの加工精度そのものであり、 $\pm 5\%$ 以下の加工精度を実現可能である。また、後者はノズル板の振幅分布の存在によって生じる。後節(4.3.3節)に示す振幅分布の検討結果を参照すれば明らかなように、ノズル板を成型して突起部を設けることによりこ

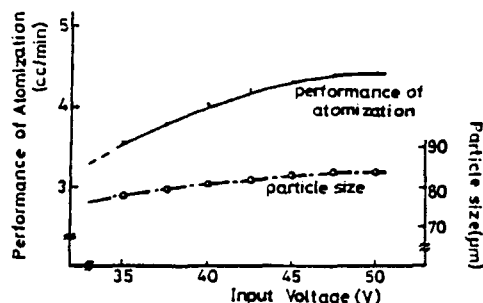


Fig.2.12 Performance of the atomizer and the geometrical mean diameter (GMD) of droplet measured as a function of input voltage.

の成型突起部分をほぼピストン振動板のように振動させることができる。同節で示すように、この突起部上における振幅分布は約5%程度と小さく、成型突起部分はほぼその形状を維持したまま平行移動していると考えてよい。従って、突起部上のノズル間の音圧差は5%程度である。次節の式2.5より考えると、噴霧された液滴の体積は音圧の1/2乗に比例するので粒径は音圧の1/6乗に比例すると考えられ、ノズル径の2/3乗にも比例すると推察される。よって、この霧化器の粒径分布は高々±10%程度であると考えられる。また、後章(3.5節)に示すようにノズル数Nと噴霧量Qが比例するが、このことは各ノズルからの噴霧粒径が均一であることを意味しており、この霧化器の粒径の均一性を裏付けているものと考えられる。

キャピラリー波を用いた超音波霧化器の粒径分布は、Fig. 2. 13に示すように $10\mu\text{m} \sim 120\mu\text{m}$ と大きく分布している。²⁹⁾ 一方、多孔板型霧化器の粒径分布は前述のごとく±10%程度以下であることを考えると、この新しい霧化法は粒径の均一性の点で極めて優れた性能を有していると結論づけることができる。

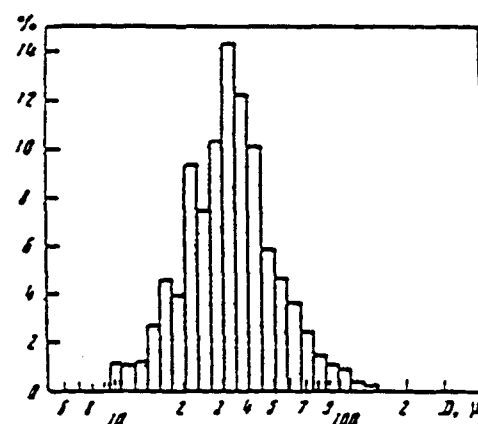


Fig.2.13 Distribution of aerosol droplets by diameters (H_2O ; $f=40\text{kHz}$) in a semilog coordinate system.

2.5.5 実験結果の検討

液体の表面張力の作用を明らかにするために、ベルヌーイの定理、すなわち、次式(2.5)を適用してキャビティー内圧を求めた。

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot V_{dr}^2 \quad (2.5)$$

ここで、Pはキャビティー内の音圧Pと直流的な圧力($\rho \cdot g \cdot h$)との差圧であり以下のように表される。

$$P = P_a - \rho \cdot g \cdot h \quad (2.6)$$

Fig. 2.11において、振動速度 V_p が 2.1m/s のとき、対応する液滴の

飛翔速度 V_{dr} は 6.8m/s である。この実験結果を用いて差圧 P を式 (2.5) より計算すると $23.12 \times 10^3 \text{N/m}^2$ となる。そしてこのとき、これに対応する音圧 P_a は式 (2.6) より $23.90 \times 10^3 \text{N/m}^2$ となる。音圧 P_a が振動速度 V_p に比例するとすれば、Fig. 2.8 における噴霧開始しきい値電圧に相当する振動速度 V_p は 0.54m/s であるから、このときの差圧 P は $1.90 \times 10^3 \text{N/m}^2$ となる。

この差圧 P の値は、前節 2.5.1 において求めた噴霧開始しきい値圧力 $2.74 \times 10^3 \text{N/m}^2$ よりも小さいけれども、この差異は音の放射圧によるものであると考えられる。しかしながら、このようにしきい値圧力 $1.90 \times 10^3 \text{N/m}^2$ が存在し、少なくともこの値が表面張力から求めたしきい値圧力 $2.74 \times 10^3 \text{N/m}^2$ に近い値であることを考慮すれば、この結果は表面張力がこの多孔板型超音波霧化器の弁作用を果たしていることを証明するものであると考えられる。

振動速度 V_p に対する液滴の飛翔速度 V_{dr} を式 (2.5) より計算すると Fig. 2.14 における破線のようにになる。実測値に対してオーダーは一致しており、式 (2.5) は妥当であると考えられる。ここで、液滴が噴出するときの状態を再考してみると、液体はその時まで振動板と同方向の運動をしているわけであるからこのことを考慮する必要があるといえる。すなわち、式 (2.5) より得られる値に噴出直

前の振動速度を加える必要がある。Fig. 2.14 における実線はこの補正を考慮した計算結果であり、実測値と極めてよく一致している。従って、飛翔速度 V_{dr} は、式 (2.7) のように表すことができると考えられる。

$$V_{dr} = V_p + \sqrt{(2 \cdot P / \rho)} \quad (2.7)$$

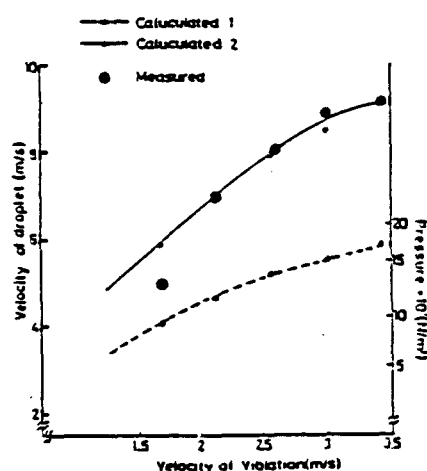


Fig.2.14 Velocity of droplet as a function of velocity of vibration of the plate.

以上の結果、霧化器の液滴噴射課程は次のように考えることができる。振動板が Fig. 2.15 に示すように状態 (a) に戻ったとき、噴出された液滴に相当する体積分だけ液体が不足するので表面張力の作用によりキャビティー内の液体もそれにつれて外側方向に矢印のように引っ張られる。そして、振動板がさらに外側に変位したときもこの状態がさらに促進される。すなわち、状態 (a) および (b) においてキャビティーの液体は外側へ引っ張られる。次に、振動板が (c) の状態になり内側へ移動すると正の圧力が発生し、液体はノズルから外側へ押し出され始める。そして、液柱は振動板の内側への移動と共に成長し、振動板が内側の最大振幅位置に達し、それにより生じた正圧力が消滅するまで増長する。そして、次には表面張力の作用で、液柱は球形になり (d) の状態のように振動板から離れて飛翔する。この課程が振動板の振動サイクルに応じて全てのノズルで繰り返されるので、液滴は振動板の振動周波数に対応して全てのノズルから噴出される。

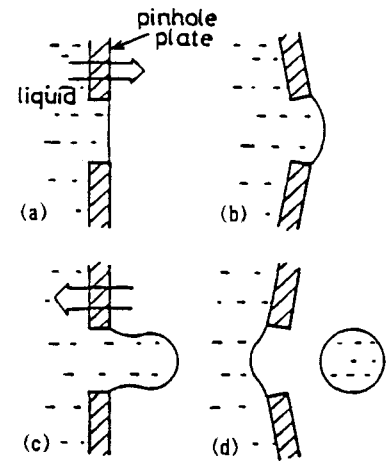


Fig.2.15 Schematic sequence of ejection of droplet.

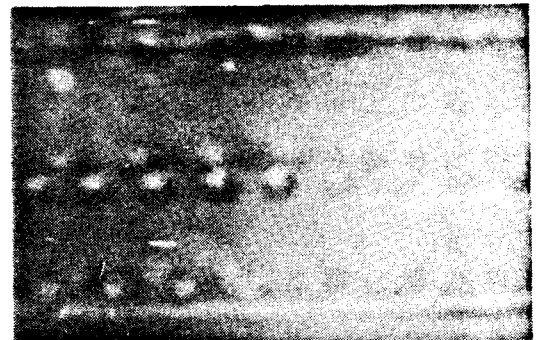


Fig.2.16 Enlarged photograph of traveling droplets jetted from the pinholes of the atomizer.

Fig. 2.16 は、このようなメカニズムで噴出された液滴の飛翔状態を示す拡大写真である。Fig. 2.9 と同等のストロボ観察法によりノズルから約 2mm 飛翔した位置を撮影したものであり、均一な粒径の液滴が多くのノズルから等間隔で飛翔していることがわかる。

2.6 実験的検討Ⅱ (粒径の制御性)

2.6.1 粒径とその制御

霧化器の霧化粒子の粒径は、その霧化器の最も基本的な特性であり、望ましい粒径の霧化粒子が自由に得られることは極めて大きな特長である。

本研究における霧化器の設計において、ノズルの直径は、主にその加工法上の制約から $80\mu\text{m}$ に設計した。また、霧化器の動作周波数は $20\sim 100\text{kHz}$ の超音波周波数を選んだ。この結果、前節で示したように均一性の高い霧化粒子を生成することができた。

この噴霧粒子の粒径は、霧化器の動作周波数、ノズルの直径、発生される音圧（すなわち振動板の振動速度）、液体の物性値等に依存する。したがって、これらのパラメータのいずれかを変えることにより、粒径の制御を行うことができる。2.5.4節で述べたように、この霧化器の噴霧メカニズムは、本質的にその粒径の均一性に富むという特長を有している。それ故、霧化粒子の均一性を保ちながら粒径の制御を自由に行うことができれば、その実用上の応用範囲は大きく拡大され、材料分野、化学反応分野、燃焼分野等に新しい技術革新を生むことが期待できる。

そこで本節では、霧化粒子の粒径制御方法として霧化器の動作周波数およびノズルの直径を取上げ、これら両パラメータによる粒径制御の可能性を検討する。

2.6.2 動作周波数による粒径の制御

前節(2.4.1節)に示した試作霧化器を用いて、動作周波数を高めた場合の粒径制御の可能性を検討した。多孔板型超音波霧化器の霧化粒子は、ノズル直径に等しい液柱が振動板の振動周期の半分の期間にノズルから押し出された液体のかたまりであると考えられることができる。したがって、液体の噴出速度を V_d 、ノズルの直径を d_n 、

動作周波数を f_0 、噴霧された粒子の粒径を d_{dr} とすれば、次式のように表すことができる。

$$d_{dr} = \sqrt[3]{(3/4 \cdot d_n^2 \cdot V_d / f_0)} \quad (2.8)$$

ここで、噴出速度を V_d は、振動板の振動速度を V_p とすると、

$$V_d = V_p + \sqrt{(10.5 \cdot V_p)} \quad (2.9)$$

と表すことができる。³⁶⁾

もし音圧 P_a が一定である場合、振動速度 V_p も一定であるから、粒径を d_{dr} は式 (2.8) より、ノズルの直径 d_n の $2/3$ 乗に比例し、動作周波数 f_0 の $1/3$ 乗に反比例することがわかる。

そこで、Fig. 2.5 に示した霧化器を駆動電圧 V_a を一定として高次の共振周波数で動作させ、高い周波数での微粒化実験を行って、動作周波数 f_0 と粒径 d_{dr} との関係を調べた。使用した液体は常温の水である。

粒径 d_{dr} の測定は、Fig. 2.17 に示すように、He-Ne レーザーを用い、飛翔する液滴の回折像の直径を測定することにより行った。レーザーの波長を λ 、液滴からスクリーンまでの距離を l 、スクリーン上の回折像の直径を $2 \cdot D$ とするとき、粒径 d_{dr} は、

$$d_{dr} = 1.22 \cdot \lambda \cdot l / (2 \cdot D) \quad (2.10)$$

と表される。⁴²⁾

測定結果を Fig. 2.18 に示す。

同図に示すように、動作周波数 f_0

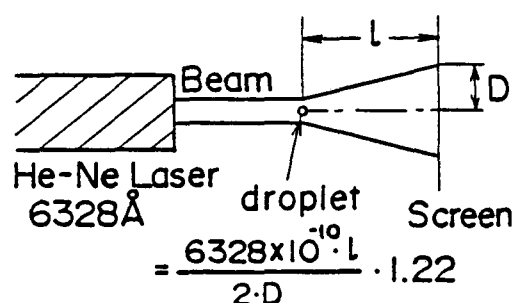


Fig.2.17 Schematic diagram of the measurement system for the droplet's diameter d_{dr} .

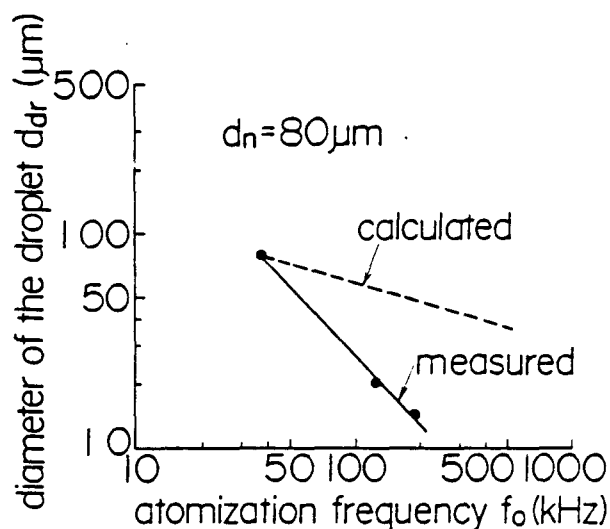


Fig.2.18 The diameter of droplet d_{dr} as a function of the atomization frequency f_0 .

と粒径を d_d との間には一定の相関があり、動作周波数 f_0 が高くなるほど粒径を d_d は小さくなっている。

式(2.8)にしたがって求めた動作周波数 f_0 に対する粒径 d_d は、Fig. 2.18中に破線で示すようになり、前述の実験結果より大きな値を示す直線になっている。これは駆動電圧 V_0 を一定としたので振動板の振動速度 V_p が変化して音圧 P_0 が一定に保たれていないこと、およびノズルにおける液体の噴出現象が100kHz以上の高周波動作になった場合、低周波動作時のそれとは違ったものになっていることを意味していると考えられる。すなわち、振動的な Poiseuille の法則に基づく液体の粘性効果が顕著に現れるようになるのでノズル直径 d_n が見掛け上小さくなると考えられる。これら二つの理由のため計算値より実験値の方が粒径 d_d が小さく、約二倍の傾きの減少直線になっていると考えられる。³⁶⁾ 振幅に及ぼす周波数の影響は、次式(2.11)で表される。⁴³⁾

$$\delta = \sqrt{[2 \cdot \eta / (2 \cdot \pi \cdot f_0)]} \quad (2.11)$$

ここに δ は粘性の振幅に及ぼす影響が $1/e$ になる値である。

式(2.11)にしたがって求めた動作周波数 $f_0 = 180\text{kHz}$ における δ は約 $40\mu\text{m}$ となり、ノズル直径の $80\mu\text{m}$ に対して無視し得ない値となる。したがって、見掛け上のノズル直径 d_n が約 $1/2$ に小さくなるという前述の結論は妥当と考えられる。

以上の検討の結果、高い周波数で動作できる霧化器を構成すれば、噴霧粒子の粒径をそれに応じて微粒化できることが明らかになった。

高周波化のための課題としては、次の二つが考えられる。

第一の課題は、高周波動作を実現するためには、振動板の寸法を小さくするか、あるいは高次の振動モードで動作させることが必要となる点である。高周波動作のためには、幾何学的寸法を小さくすることが必要となり、構造設計上の難しさが生じる。また、高次の振動モードで動作させるためには、振動系の整合が難しく、振動系の構成上の工夫が必要となる。

第二の課題は、高周波になればなるほど、式(2.11)に基づき、

流体の粘性が噴霧メカニズムに影響を与えるようになることである。すなわち、振動的な Poiseuille の法則が無視できなくなり、この霧化方式の微粒化原理をそのまま適用することが困難になるからである。

2.6.3 ノズル直径による粒径の制御

霧化粒子の粒径 d_{dr} が式 (2.8) にしたがうとすれば、前述のように、ノズル直径 d_n により粒径を制御することが可能である。そこで、この方法による粒径の制御可能性について検討した。

Fig. 2. 19 は、放電加工により作製した振動板のノズルである。

SUS304 材を用いた厚さ $50\mu\text{m}$ の振動板に、直径約 $30\mu\text{m}$ のノズルを加工したものであり、ノズル径とノズルピッチは、後節で述べる式 (5.3) を満たすように設計されている。

この振動板を用いて霧化器を作製し、霧化粒子の粒径制御についての実験的検討を行った。

実験における粒径の測定は、前節と同様に、レーザーの回折像の測定による方法を用いて行った。また、霧化器の動作電圧 V_0 を 50V 一定とし、常温の水を液体として用いて実験を行った。

Fig. 2. 20 はその測定結果である。同図に示すように、動作周波

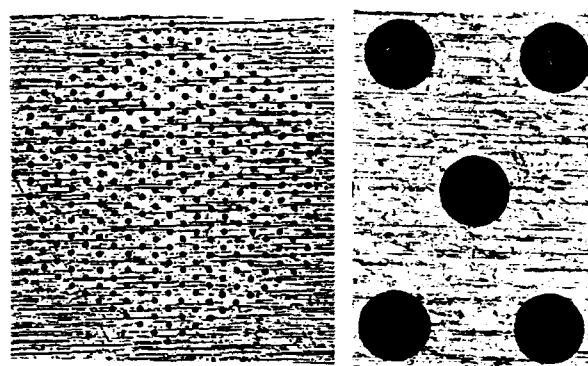


Fig.2.19 Photographs of the plate which is $50\mu\text{m}$ in thickness and made of stainless steel. Number of 331 pinholes are arranged on it by the electric discharge manufacturing way.

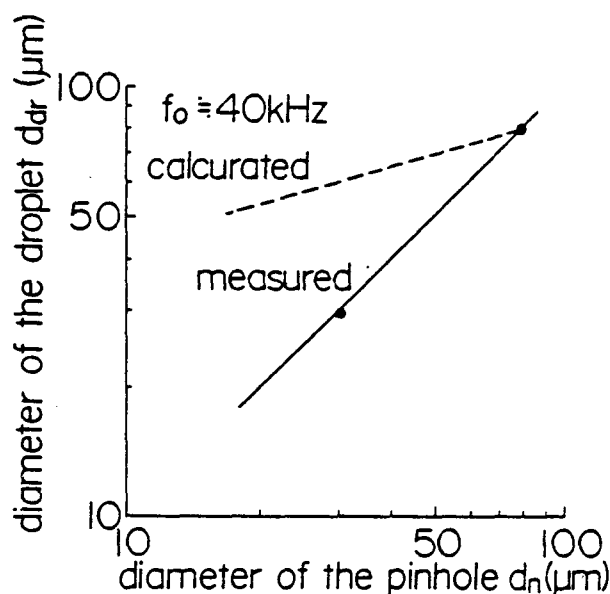


Fig.2.20 The diameter of droplet d_{dr} as a function of the diameter of the pinhole d_n .

数 $f_a = 42 \text{ kHz}$ においては、ノズル直径 d_n にほぼ比例して粒径 d_d が小さくなっている。すなわち、動作周波数 f_a および動作電圧 V_a が一定であっても、ノズル直径 d_n の設計により粒径 d_d を調節することが可能であることを明らかにできた。

式(2.8)にしたがえば、粒径 d_d はノズル直径 d_n の $2/3$ 乗に比例するので、Fig. 2.20中に破線で示したようになり、実測値はこの理論直線より小さくなっている。これは、ノズル直径 d_n が振動板の板厚 ($t_b = 50 \mu\text{m}$) に比べて小さくなってくるとノズル内における管路損失が無視できなくなり、結果

として式(2.8)中における噴出速度 V_a を減少させてしまうと考えられること、および、ノズル直径 d_n が小さくなることにより、ノズルを液体が通るときにくびれ係数が小さくなることとによるものと考えられる。³⁶⁾

また、同時に、これを高周波で動作させることにより、さらに微粒化を促進することができ、動作周波数 $f_a = 300 \text{ kHz}$ において、粒径 $d_d = 7 \mu\text{m}$ の微粒化を実現することができた。

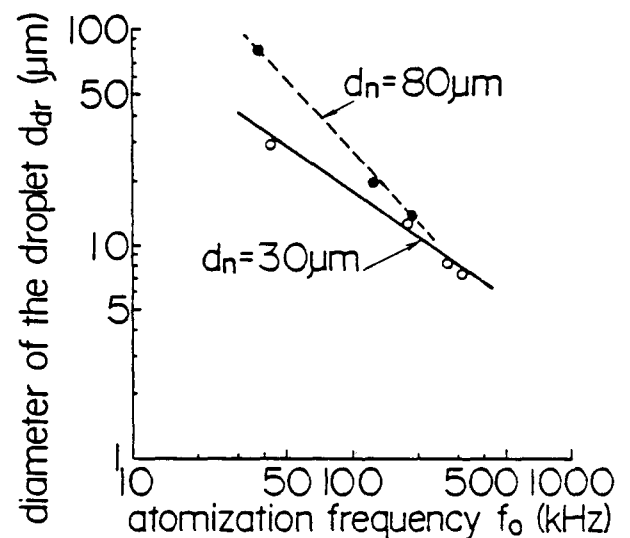


Fig.2.21 The diameter of droplet d_d as a function of the atomization frequency f_a . The d_n is the diameter of pinhole.

2.6.4 実験結果の検討

以上に述べた実験結果をまとめると、Fig. 2.21に示すようになり、以下の結論を得る。

- (1) 粒径 d_d は、動作周波数 f_a に反比例し、ノズル直径 d_n が $80 \mu\text{m}$ および $30 \mu\text{m}$ のそれぞれに対して次の実験式を得た。

$$d_{dr}(d_n = 80 \mu m) = 2919 / (f_o)^{1.02} \quad (2.11)$$

$$d_{dr}(d_n = 30 \mu m) = 565 / (f_o)^{0.77} \quad (2.12)$$

ただし、 d_{dr} および f_o の単位はそれぞれ μm および kHz であり、
駆動電圧 V_o は一定、液体は常温水である。

(2) 上記式 (2.12) は、粒径 d_{dr} が動作周波数 f_o の 0.77 乗に反比例するという結果を示しており、理論式 (2.8) より得られる理論値 0.67 乗との差は 15% である。したがって、ノズル直径 d_n が小さいほど高い周波数まで式 (2.8) が成立すると考えられる。

(3) 粒径 d_{dr} は、ノズル直径 d_n にほぼ比例する。

本節で扱った実験結果は、試作サンプル数が少なく、十分な実証を得たものであると言いがたいけれども、少なくとも、この多孔板型超音波霧化器により得られる噴霧粒子の粒径 d_{dr} が、駆動電圧 V_o 一定の条件下において、本質的に式 (2.8) に従うものであり、動作周波数 f_o およびノズル直径 d_n により粒径 d_{dr} を制御することが可能であることを示すことができた。そして、この霧化器の噴霧メカニズムを基にして得られた粒径 d_{dr} を表す基本式 (2.8) の妥当性を確認できたと考えられる。

したがって、多孔板型超音波霧化器は、種々の解決すべき課題は残されているものの、少なくとも数十 μm ～ 数 μm の間で粒径の制御が可能であることを示すことができ、広範囲な応用可能性があることを示せたと考えられる。

2.7 結 言

多孔板を用いた超音波霧化法に関し、霧化器を試作してその動作原理、振動および霧化に関する諸量の基礎的關係、ならびに粒径の可制御性を検討した。その結果、以下のことを明らかにすることができた。

- (1) 振動板の一周期当たり、一つのノズルから一つの液滴が噴射される。
- (2) 液滴の噴出は、基本的にベルヌーイの定理に従ったノズルからの液体の噴出であり、液滴の飛翔速度 V_d はこの定理に従っている。
- (3) 噴霧された液滴の粒径 d_d は高い均一性を持ち、その粒径分布は振動板の振幅分布とノズル直径のバラツキに依存している。従って、高々10%以下の粒径分布である。
- (4) 液体の表面張力が弁作用を果たしており、このため自給ポンプ機能を有している。
- (5) 液滴の粒径 d_d は基本的に式(2.8)に従い、振動板の振動周波数 f とノズル直径 d_n により自由に制御することが可能である。

第三章 振動モードによる霧化の安定化

3.1 緒言

前章において、多孔板型超音波霧化器の動作原理ならびにその基本的な物理的性質を明らかにした。

この霧化器の動作原理を簡単な構成で実現し、かつ、その性能の安定性を保証する為には、霧化器の振動系の構成が極めて重要である。霧化器は、Fig. 2.2あるいはFig. 2.5に示したように、円環状の圧電振動子、多孔板（振動板）、およびボディーより構成され、円環状の圧電振動子と振動板を貼り合わせたバイモルフ振動体のたわみ振動が、その基本動作となっている。

そこで、本章では、このたわみ振動体により構成される振動系の構成と、霧化器の噴霧安定性および性能との間にどのような関係があるかを調べ、最適な振動系を明らかにした。すなわち、振動系の振動モード、噴霧パターン、噴霧能力について実験的に検討し、この霧化器の最適振動系とその基本的性質を明らかにした。³⁰⁾

3.2 振動系の基本構成

霧化器の振動系は、2.3節で述べたように、キャビティー内に音圧 P_s を発生させる作用を果たすことが必要であり、この音圧 P_s によって液滴の噴霧が行われる。

ところで、音圧 P_s は周知のように媒質の放射インピーダンス Z_r の反作用として生じ、

$$P_s = Z_r \cdot V_p \quad (3.1)$$

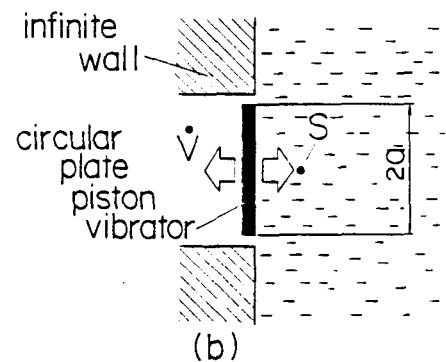
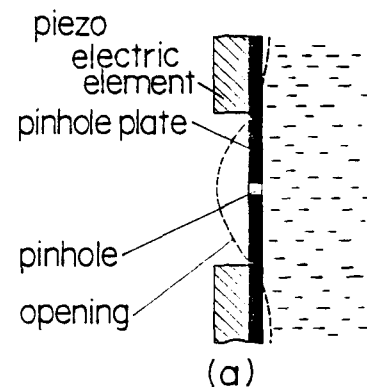


Fig.3.1 Schematic diagrams of a vibrating plate. (a) Vibration of a pinhole plate, and (b) vibration of an equivalent circular plate piston vibrator.

と表される。ここで、 V_p は振動板の振動速度である。実際の振動板の振動は、Fig. 3.1(a)に示すように円板のたわみ振動である。従って、これにより発生する音圧 P_a は、この振動板の体積速度と同等の体積速度を持つ同図(b)のような円形ピストン振動板により発生する音圧 P_a と等価であると考えることができる。即ち、振動板の振動を考えると、その振動状態をFig. 3.1(b)に示すようにモデル化し、円形ピストン振動板の振動として扱うことができる。従って、放射インピーダンス Z_r は、

$$Z_r = \rho \cdot c \cdot [(2 \cdot k \cdot a) / 2 + j \cdot (8 \cdot k \cdot a) / (3 \cdot \pi)] \quad (3.2)$$

と表すことができる。

ここに、 $2 \cdot a$ は等価円形ピストン振動板の直径であり、 c は音速、 k は波長定数であり、 $k \cdot a$ は0.6より小さいと仮定している。³¹⁾

このような振動板の振動を励起する構成として、Fig. 3.2(a)、(b)および(c)に示す構成が考えられ、これらについて実験的に検討を進めた。振動系は、Fig. 3.2に示すように、円環状の圧電振動子と振動板より成るバイモルフ振動体である。振動板は、第二章で用いたのと同様に厚さ $50 \mu\text{m}$ のステンレス板であり、圧電振動子は、 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})$ 、 PbTiO_3 および PbZrO_3 より成るPCM5材で構成され、厚さは 1mm である。

円形振動板の振動姿態については、既に理論的解析がなされている。³²⁾ Fig. 3.3に示した周辺固定の円形振動板は、一次～三次の固有振動周波数に対して、

Fig. 3.3(b)～(d)に示すような振動姿態を示す。そして、これは、その境界条件が周辺支持であっても、ほぼ同様の振動姿態となる。

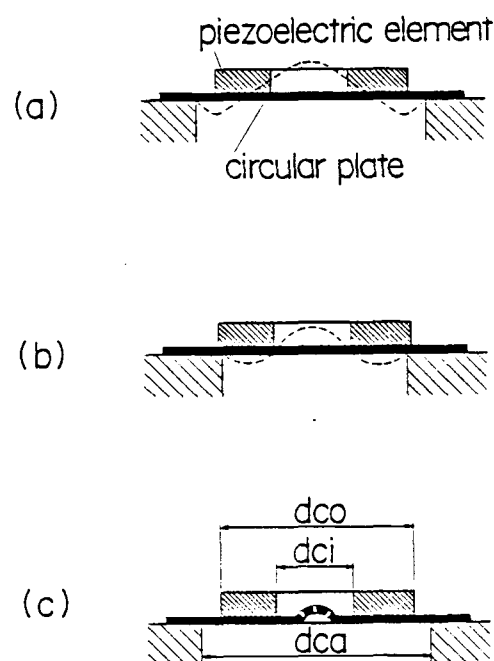


Fig.3.2 Schematic diagrams of the structure of a vibration system. (a) The A-type bimorph vibrator is supported at a circumference beyond the outer diameter of the element. (b) The B-type is supported along the outer circumference of it. (c) The C-type is supported as for the A-type.

Fig. 3.3から明らかなように、円形振動板の振幅分布は、その振動モードのいかんにかかわらず、その中央の振幅が最大となっている。したがって、このような振動系で振動板を励振する場合、ノズルはその中央に配置するのが最適である。なぜならば、振幅が最大の中央が最も振動速度 V_p が大きくなるから、式(3.1)より明らかなように、 V_p が最大のとき最大の音圧 P_a を得ることができるからである。したがって、このとき最も効率良く液滴を噴霧できると考えられるからである。

ノズルの直径 d_n が小さいほど、より微粒子を得ることができると

考えられるので、ノズルの直径 d_n は小さいほど好ましい。しかしながら、振動板材料が容易に入手でき、かつ、ノズル加工が簡単であることが種々の実験に好都合であるので、容易に入手できる厚さ $50\mu\text{m}$ のステンレス板を用い、均一なノズル加工が簡単なケミカルエッチング法による加工を採用した。ケミカルエッチング法による加工の場合、板厚より小さいノズル加工は不可能であるので、本実験においては、ノズルの直径 d_n を $80\mu\text{m}$ とした。

この霧化器の噴霧パターンの詳細な検討結果は、後に3.4節で詳しく述べるけれども、この検討を行うための振動板構成として、Fig. 3.2(c)に示すものを用いた。すなわち、同図(c)に示すように、振動板の中央に設けた球殻状の突起部上にノズルを配置する構成とし、同図(a)または(b)に示す振動系と同様の支持構成として検討した。以降、Fig. 3.2(a)、(b)および(c)を、それぞれ、A、BおよびCシステムと呼ぶこととする。

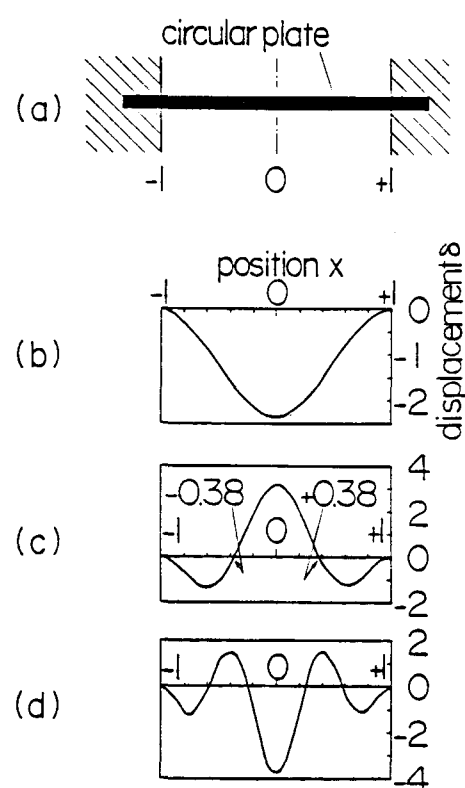


Fig.3.3 Schematic diagrams of calculated distributions of the displacement of a circular plate. (a) A model structure of a plate, (b) the distribution at the 1st resonance frequency, (c) at the 2nd, (d) at the 3rd.

3.3 安定噴霧動作と振動モード

3.3.1 周波数特性と振幅分布

Fig. 3.2(b) に示した B システムを用いた霧化器の周波数特性を Fig. 3.4 に示す。

この B システムより成る振動系は、後に 3.3.3 節で詳細に述べるように、Fig. 3.2(a) に示した A システムを用いた振動系よりも、通常の液体、すなわち、溶存空気を多量に含んだ水道水や灯油などの液体燃料を噴霧する場合の噴霧動作が安定である。したがって、本節においては、この振動系（B システム）を検討した。

前章、2.4.2 節において述べたように、この霧化器は、二つの共振周波数を持つことを Fig. 3.4 は示している。

Fig. 3.4(a) において、霧化器は、第一の共振周波数 F_{r1} または F_{r01} 、および、第二の共振周波数 F_{r2} または F_{r02} を示している。共振周波数 F_{r1} および F_{r2} は、キャビティーが空のときの第一および第二の共振周波数であり、 F_{r01} および F_{r02} は、キャビティーに液体（水）が充填されたときのそれらである。

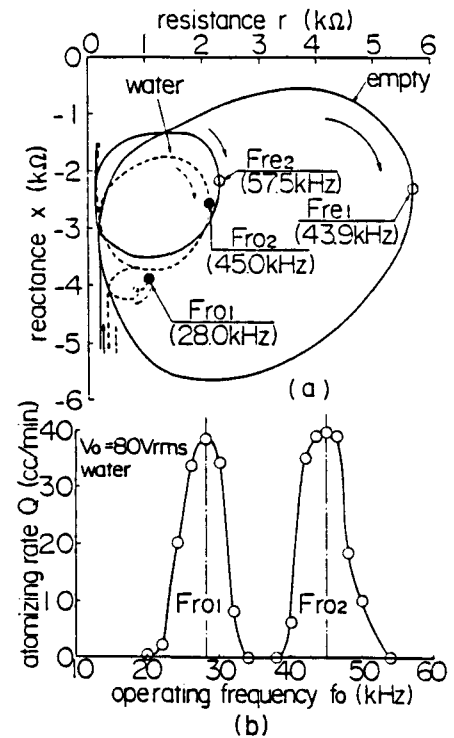


Fig.3.4 Frequency characteristics of the atomizer. (a) Frequency locus of it on the impedance plane. The solid line is for an empty cavity, and the dotted line is for a cavity filled with water. (b) The atomizing rate of it as a function of the operating frequency.

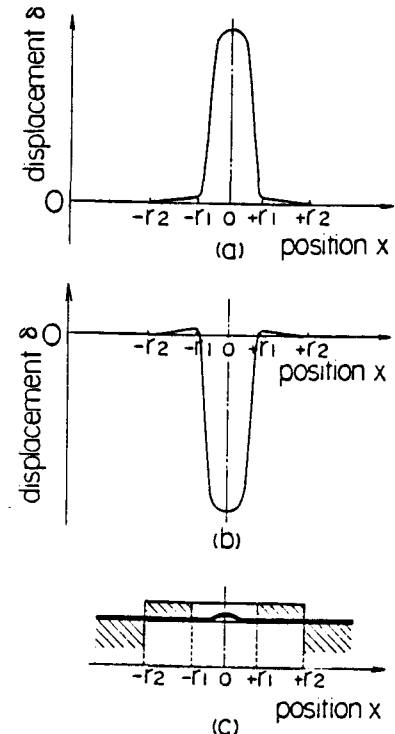


Fig.3.5 Distribution of the measured displacement of the atomizer. (a) At the frequency of F_{r01} , (b) at F_{r02} , (c) a sectional view of the atomizer.

Fig. 3.4(b) は、一分間当たりの噴霧量 Q の周波数特性であり、前述した二つの共振周波数 $F_{r,1}$ および $F_{r,2}$ において、効率的な噴霧が可能であることを示している。しかしながら、次節で述べるように、第二共振周波数 $F_{r,2}$ における噴霧状態の方が、第一共振周波数 $F_{r,1}$ におけるそれよりも安定であった。

この二つの共振周波数 $F_{r,1}$ および $F_{r,2}$ における振動振幅分布をレーザードップラー法で測定した結果が、それぞれ Fig. 3.5(a) および (b) である。²⁸⁾ この測定結果から、これらの共振周波数 $F_{r,1}$ および $F_{r,2}$ における振動モードは、それぞれ Fig. 3.3(b) および (c) に相当し、それぞれ円形振動板の一次および二次の固有振動周波数における振動モードであることが明らかになった。

3.3.2 気泡の挙動と振動モード

前節で第一共振周波数 $F_{r,1}$ における噴霧状態が不安定であることを述べた。そこで本節においては、この不安定動作の原因について実験的に検討した結果を示し、安定噴霧動作と振動モードの関係を明確化する。

霧化器の動作中におけるキャビティー内部の状態を観察するために、ボディーを透明樹脂（アクリル）で製作した内部可視化霧化器を試作した。この霧化器の振動系は、Fig. 3.2(b) に示した B システムである。

この内部可視化霧化器を用いて噴霧動作中におけるキャビティー内を観察し、気泡の挙動について調べた。その結果、両共振周波数において、共に、振動板と液体の接触面内であって、かつ、ノズ

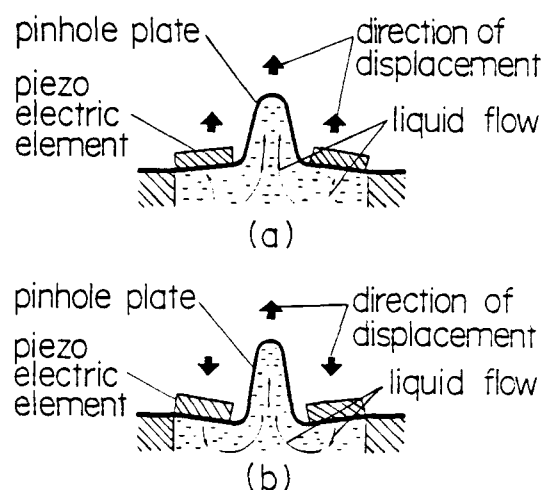


Fig.3.6 Schematic diagrams of vibration mode of a plate and the movement of the liquid in the cavity. (a) At the 1st mode, (b) at the 2nd harmonic mode.

ルとノズルの間の位置で気泡が生じていることが観察された。すなわち、キャビテーションによる気泡の発生が振動板の中央部の液体との接触面で生じていることが明らかになった。

しかしながら、これら二つの共振周波数におけるキャビテーション内の液体の動きは、Fig. 3. 6(a)および(b)に示すように全く異なっている。この液体の動きの違いから、気泡の発生のし易さ、および

発生した気泡のその後の挙動に相違が生じていることがわかった。

第一共振周波数 $F_{r.1}$ においては、キャビテーション気泡は、ノズルの近傍に付着したように捕獲される。Fig. 3. 7は霧化器の背面からキャビテーション内部を観察した写真であり、中央のノズル群の近傍に気泡が捕獲されている。このキャビテーション気泡が振動板のノズル近くに付着することにより、振動板の振動が停止し、音圧 P_a が発生しなくなって噴霧が停止する。一度振動が停止すると、付着した気泡がその浮力により上方に上昇して振動板から離れるので、振動板は再び共振状態を取り戻し、噴霧動作が再開される。このように、第一共振周波数 $F_{r.1}$ においては、キャビテーションにより発生した気泡が捕獲されて振動板に付着し、非共振状態となることによる振動の停止、および、気泡の離脱による再起動を行うので、前述した不安定な噴霧状態である『息つき噴霧』を行うのである。

しかしながら、第二共振周波数 $F_{r.2}$ においては、発生した気泡はキャビテーションの中央から弾き飛ばされるようにその周囲に向かって飛散し、前述の『息つき噴霧』現象が生じない。Fig. 3. 8はこの状態の観察結果を示す模式図であり、気泡は三個のノズルにて形成される三角形の中央位置で発生し、ノズルとノズルの間を通過してキャビテーションの外周へと飛散していく。この現象はノズルがいくら

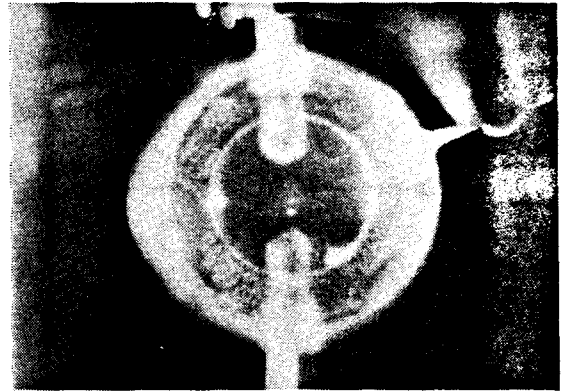


Fig. 3. 7 Photograph of the air bubbles generated by cavitation in the cavity of the visible atomizer. They are fixed in the vicinity of the pinholes and disturb the favorable vibration of the plate.

多く設けられていても全く同じであり、気泡はノズルを避けるようにしながらキャビティの外周に向かい、かつ、振動板に沿いながら飛散していく。飛散した気泡は、キャビティの最外周位置で互いに結合して大きな気泡となり、その浮力によって上昇していく。そしてキャビティの上部に設けられた排気パイプから外部に排出されていく。気泡をキャビティの中央から外周に弾き飛ば

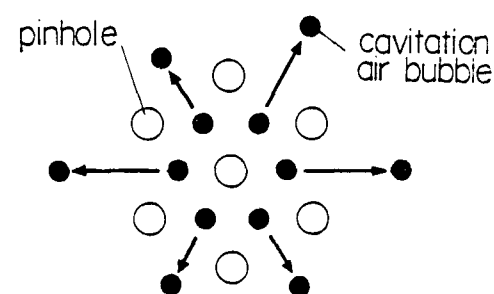


Fig.3.8 Schematic diagram of air bubbles generated by cavitation between the pinholes, which are traveling very fast in the radial direction of the cavity by the radiation pressure and the side pressure.

す力はランジュバンの放射圧であると考えられ、この直流的な圧力により気泡が外周に追いやられる現象が生じている。³³⁾

以上の実験結果から、次の結論を得ることができる。すなわち、通常の液体（溶存空気を含んだ液体）を噴霧する場合、この霧化器の安定噴霧動作を保証することができるのは、第二共振周波数 $F_{r,2}$ における二次モードの振動状態であり、この振動モードが最も安定な振動モードである。

3.3.3 キャビティ直径の影響

キャビティ直径の影響を調べるために、Fig. 3.2(c)に示したCシステムを用いた霧化器を検討した。ノズル板に突起部を設けているため、圧電振動子の内径は4mm、外径は10mmである。

駆動電圧 V_0 を一定 ($V_0 = 50V$) とし、キャビティ直径 d_{ca} を9mmから13mmまで変化させたときの一分間当たりの噴霧量 Q 、第二共振周波数 $F_{r,2}$ の変化をFig. 3.9に示す。各キャビティ直径 d_{ca} に対して第一共振周波数 $F_{r,1}$ においても噴霧は可能であるが、前節で述べたとうり、その噴霧状態は顕著な『息つき噴霧』状態となる。従って、本節の検討においても第二共振周波数 $F_{r,2}$ についてのみ扱った。

Fig. 3.9は、キャビティー直径 d_{ca} が約9mmと12mmのとき、噴霧量 Q が最大値となることを示している。しかしながら、 d_{ca} が12mmの場合は、次節で詳しく述べるように、キャビテーション気泡の影響により噴霧状態が不安定となる。第一共振周波数 F_{r01} における噴霧状態ほど著しくはないが、やはり『息つき噴霧』現象を生じるのである。

したがって、Fig. 3.2(c) のような振動体構成とし、キャビティー直径 d_{ca} を変化させた本実験の結果から、キャビティー直径 d_{ca} は9mmが最適であると結論づけることができる。

また、Fig. 3.2(a)または(b)のように、ノズル板の突起部がない振動体構成を用いた霧化器であっても、キャビティー直径に対する特性としてFig. 3.9と同様の結果を得た。すなわち、キャビティー直径 d_{ca} に対して二つの点で効率の良い噴霧を行うことができ、かつ、Fig. 3.2(b)に示したBシステムの振動体構成が最適であるという結論を得た。

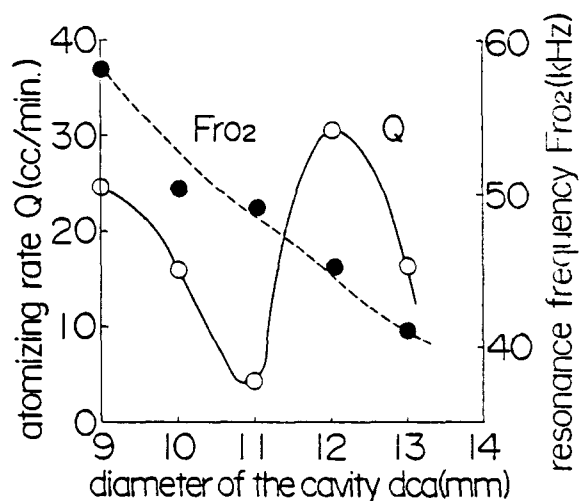


Fig.3.9 Effects of the diameter of the cavity d_{ca} . The atomizing rate Q and the second resonance frequency F_{r02} as a function of the diameter of the cavity d_{ca} .

3.3.4 節円の位置による影響

前節で明らかにしたように、噴霧量 Q はキャビティー直径 d_{ca} が9mmと12mmで極大値を示し、効率の良い噴霧を実現できる。しかし、Aシステムによる振動系($d_{ca}=12\text{mm}$)を用いた霧化器の噴霧状態は、Bシステムによる振動系($d_{ca}=9\text{mm}$)を用いた霧化器のそれよりも不安定となり、息つき噴霧現象が生じる。

この息つき噴霧現象が発生する機構を明らかにするために、Aシステムの振動系を採用した内部可視化霧化器を透明なプラスチックボディー(アクリル製)を用いて試作し、その動作状態を調べた。この霧化器の第二共振周波数 F_{r2} における振動モードをパウダー法で観察するとともに、レーザープローブを用いてその振幅分布を測定した。³⁴⁾

Fig. 3.10(a)、(b)はそれぞれの実験結果を示している。

Fig. 3.10(a)には、微小なパウダーが円環状圧電振動子の中心円上に集まってパウダーのリングを形成していることが観察される。また、同図(b)からも、やはり円環状圧電振動子上に振幅がほぼ零に等しくなる位置があることがわかる。すなわち、この両実験結果は、Aシステム振動系を用いた霧化器の第二共振周波数における動作が、円環状圧電振動子の中心円上に節円を生じせしめることを示している。

Fig. 3.11(a)、(b)は、この内部可視化霧化器の実際の噴霧動作状態を、それぞれ側面および背面

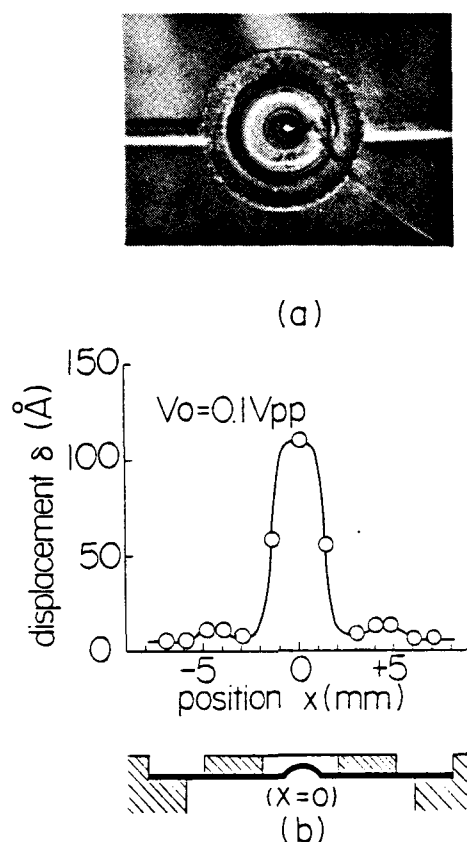


Fig.3.10 Measurement of a circular node generated on the element. (a) A photograph of it on the element observed by the powder method, (b) the distribution of the measured displacement of the element and the plate.

から観察した写真であり、透明プラスチックボディーであるためキャビティー内の状態を透視することができる。ノズルの近傍で発生したキャビテーション気泡は、3.3.2節で示したように、キャビティーの中心から外周方向に向かって振動板表面に沿いながら飛散し、円環状圧電振動子の中心円上にできる節円に到達する。そして、この節円上で捕獲されるため相互に結合して肉眼で確認できる程度の大きな気泡に成長する。

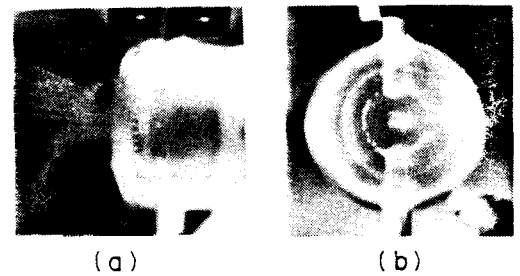


Fig.3.11 Photographs of air bubbles generated by cavitation in the cavity of the visible atomizer, which are fixed along the circular node of the element. (a) A photograph of a side view of it, and (b) a photograph of a bottom view of it.

Fig.3.11(a)、(b)は、この成長した気

泡が節円上に規則正しく配列され、気泡のリングを形成している状態を捕らえた写真である。このように気泡がリング状にならぶと、バイモルフ振動体の機械インピーダンスが変化して非共振状態となるので、見掛け上、振動を停止したようになる。したがって、次の瞬間にはこのリング状にならんだ気泡はその浮力のために上昇し、ボディーの上方の排気パイプから外部に排出されていく。もちろん、この状態においては噴霧動作が完全に停止してしまう。この気泡が排出されてしまうと、バイモルフ振動体は再び共振状態となり、あたかも振動を再開したようになる。したがって、キャビテーション気泡により前述した現象が繰り返されるという結果が生じるのである。すなわち、この現象の繰り返しにより、霧化器の噴霧状態は息つき現象と呼び得るような噴霧状態となることが明らかになった。

一方、Bシステムの振動系を用いた霧化器の場合には、Fig.3.5に示したように、節円が丁度円環状圧電振動子の内径に沿って生じ、かつ、その内径より外側の部分の振幅は極めて小さい。このためキャビテーション気泡は、この節円に捕獲されることなくキャビティー

の最外周部分まで飛散していき、ここで大きな気泡に成長してその浮力で上昇し、キャビティー外へ排気パイプを通して排出されていく。したがって、この振動系を用いた霧化器は、溶存空気を含む通常の液体を噴霧する場合、キャビテーション気泡が発生することがあるにもかかわらず安定な動作を維持することができ、息つき現象は全く生じないのである。しかも、キャビティー内の液体の動きは、Fig. 3.6に示したように、キャビテーションが生じにくい動きとなっている。したがって、キャビテーションそのものも発生しにくく、このため噴霧効率がより高いという特長も兼ね備えている。

3.3.5 まとめ

多孔板型超音波霧化器の振動系について、その振動モードと噴霧状態との関係を実験的に検討した結果、以下の事実が明らかになった。

- (i) 霧化器の振動系は、Fig. 3.2(b)に示したBシステム振動系が最も安定な噴霧状態を実現できる。すなわち、振動子の外周に沿って支持または固定する振動系が、最も優れた振動系の構成である。
- (ii) 振動系の振動モードが二次モードのとき、通常の液体を安定に噴霧することができるので、この霧化器の動作モードとしては第二共振周波数における二次モード動作が最適である。
- (iii) 不安定な噴霧状態である息つき噴霧現象が生じるか否かは、キャビテーションにより発生した気泡がキャビティー内のどの位置で捕獲され結合して成長するかということで決まり、上記(i)(ii)の構成によってキャビティー最外周にこの気泡を集め、その浮力により排気パイプから自然に排出することができる。このためこの息つき現象を防止できる。

3.4 噴霧パターンの制御性

霧化器を様々な用途に応用する場合、噴霧パターン、すなわち噴霧角をその目的に応じて調節したいという要望がしばしば生じる。

多孔板型超音波霧化器は、振動板（多孔板）の成型形状により噴霧粒子の飛翔パターンが支配されるので、Fig. 3.12(a) および (b) に示す二つの構造の霧化器について実験的検討を行った。また、この検討において、振動板の球殻状突起部の高さ h_c を変化させて、この影響を調べた。

Fig. 3.12(a) に示した平坦な振動板を用いた霧化器は、Fig. 3.13(a) に示すように、直線的に噴霧粒子が飛翔し、直射型の噴霧パターンを示す。一方、Fig. 3.12(b) のように球殻状突起を有する振動板を用いた場合は、Fig. 3.13(b) に示すように、その噴霧パターンは広がりを見せ、一定の噴霧角 θ で噴霧粒子が広がりながら飛翔していく。Fig. 3.14 は振動板の球殻状突起部の高さ h_c を変えたときの霧化器特性の変化を示す実験結果であり、突起部高さ h_c により噴霧角 θ が調節できることを示している。ここで、駆動電

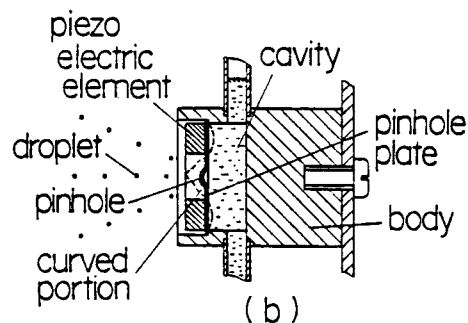
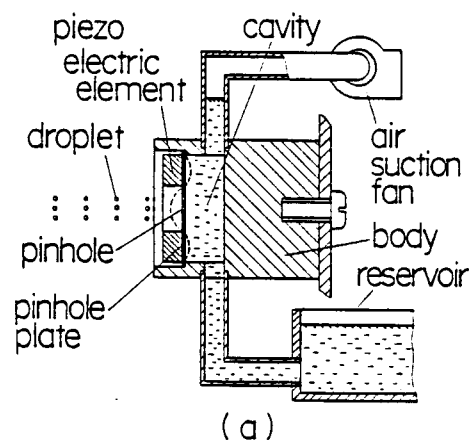


Fig.3.12 Sectional views of the trial made atomizers. (a) Flat pinhole plate with 37 pinholes of $80\mu\text{m}$ in diameter, and (b) plate with a curved portion on which 61 pinholes of $80\mu\text{m}$ in diameter are arranged.

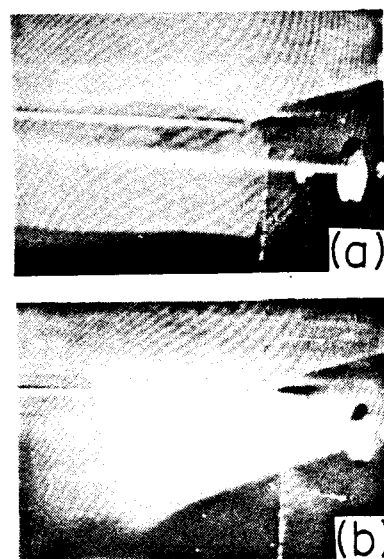


Fig.3.13 Photographs of the spray patterns of the droplets jetted from the atomizers. (a) The spray pattern of the atomizer having a flat plate, (b) the one of the atomizer having a plate with a curved portion.

圧 V は 50V 一定であり、液体は灯油を用いた。

球殻状突起部高さ h_c を変えたとき、噴霧量 Q も同時に変化している。このことは、 h_c を変化させることにより振動系の最適整合条件が変わっていくことを示していると考えられる。したがって、一つの最適設計された振動系に対し

ては、特定の適合する噴霧角 θ が存在すると考えるべきである。この実験に用いた霧化器の場合は、

Fig. 3.14 に示した結果から、噴霧

角 θ が 30～40 度となるような h_c を有する振動系の形状が最適整合条件を満たしていると言える。

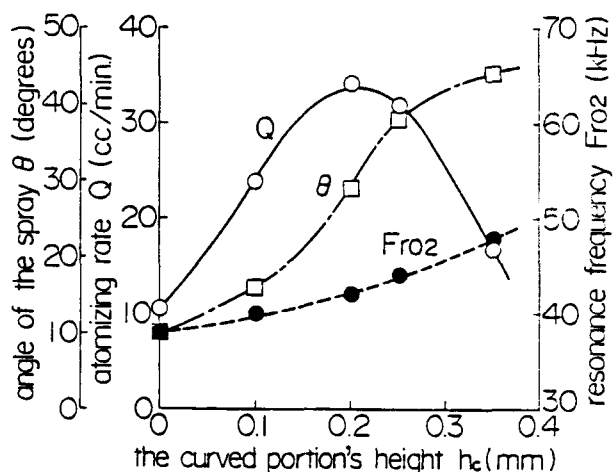


Fig.3.14 Atomizing rate, the 2nd resonance frequency, and the angle of the spray pattern of the atomizer as a function of the height of the curved portion of the plate.

3.6 噴霧能力

霧化器の噴霧量 Q と振動板のノズル数 N との関係を調べるために、Fig. 3.12 (b) の霧化器を用いて、第二共振周波数に於ける圧電振動子への入力電力 P_i と噴霧量 Q との関係を実験的に検討した。ここで、用いた霧化器のノズルは球殻状突起部上に 61 個設けられている。また、液体は灯油である。

実験結果を Fig. 3.15 に示す。

図より明らかなように、噴霧量 Q には最大噴霧量 Q_m が存在し、この場合は約 40 cc/min. がその最大噴

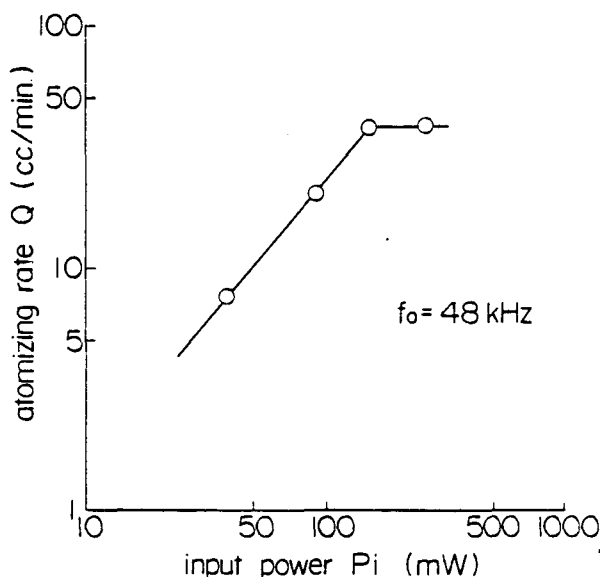


Fig.3.15 Atomizing rate of the atomizer as a function of the input power supplied to the piezoelectric element.

霧量 Q_m である。この現象は、キャビティー内においてノズルに液体を供給する最大能力が、液体の慣性により制限されてしまうために生じると考えられる。このため、それ以上の入力電力を振動子に供給しても、その過剰エネルギーは圧電振動子自身の損失増加や著しいキャビテーション気泡の発生を引き起こすのみに費やされてしまうと考えられる。

この最大噴霧量 Q_m とノズル数 N との関係を明らかにするために、

Fig. 3.12(b) の霧化器構成を用い

てノズル数 N を変え、これに対する最大噴霧量 Q_m を実験的に求めた。

Fig. 3.16 はその実験結果である。

最大噴霧量 Q_m はノズル数 N に比例し、直径 $80\mu\text{m}$ のノズルに対して以下の実験式を得られた。

$$Q_m = 0.493 \cdot N \text{ (cc/min.)} \quad (3.3)$$

すなわち、多孔板型超音波霧化器の最大噴霧能力はノズル数 N によって決まるので、球殻状突起部上に設けたノズル数を選択することによりその最大噴霧能力を調節することができるのである。

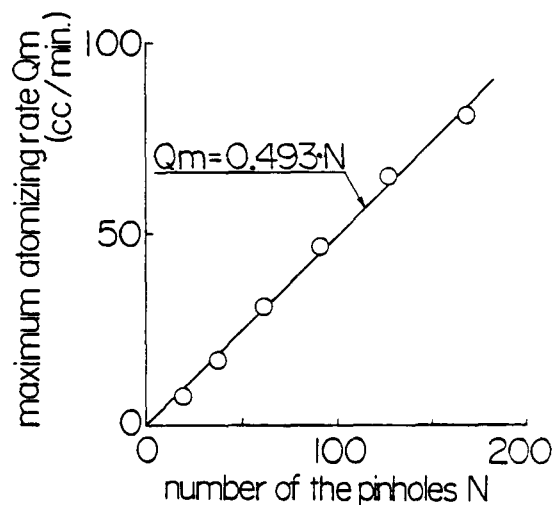


Fig.3.16 Maximum atomizing rate as a function of the number of pinholes, which are $80\mu\text{m}$ in diameter.

3.6 結 言

バイモルフ振動体のたわみ振動を利用した多孔板型超音波霧化器の振動系について検討し、溶存空気を含む通常の液体を安定に噴霧するための振動系の最適な振動モードを明らかにした。また、振動系を構成する上で重要な振動板の形状とノズル数に関しても実験的検討を加え、それらによる噴霧特性への影響を示した。

以上の検討により本章で得られた結論は以下の通りである。

- (i) 通常の液体の安定噴霧のためには、一次よりも二次の共振周波数での振動モードの方がより適切であり、霧化器のより安定な噴霧動作を実現できる。
- (ii) 二次モード動作における節円の位置を、円環状圧電振動子の内径にほぼ一致させる構成が、最も安定な噴霧動作を実現できる。
- (iii) 上記二つの条件は、キャビテーションによって発生する気泡の悪影響を避けるために極めて重要な必要条件である。
- (iv) 上記二つの条件が満たされた振動系を用いれば、水や液体燃料のような溶存空気を多量に含む通常の液体を、極めて安定に噴霧することができる。
- (v) 霧化器の噴霧パターンは、振動板に球殻状突起部を設け、その突起部上にノズルを配置することにより自由に調節することができる。ただし、突起部形状が変われば振動系の整合条件も変化するので、必要な噴霧角に応じた振動系の最適化が必要である。
- (vi) 最大噴霧量 Q_m はノズル数 N に比例するので、ノズル数 N を変えることにより最大噴霧量 Q_m を調節することができる。

第四章 最適振動系の設計

4.1 緒言

多孔板型超音波霧化器の振動系の振動モードの最適化について前章で検討し、安定噴霧のための諸条件を解明して振動系の基本的構成指針を示した。

そこで本章では、振動系整合のための設計手法について理論的および実験的アプローチにより検討し、その設計手法を明らかにする。まず理論的な設計手法として数値解析により振動体の整合条件を求める手法を検討した。次いで、これを実験的に検証してこの設計手法の妥当性を検討し、最適設計手法の確立を図った。³⁵⁾

4.2 理論的検討

4.2.1 振動系整合の考え方

円環状圧電振動子と振動板（多孔板）より成るバイモルフ振動体で構成された振動系は、3.3.3 節の検討結果から明らかのように、Fig. 4.1(a)のごとく、圧電振動子の外周をキャビティー内径に沿わせるように構成することが、安定な噴霧動作を実現する上で必要である。

この振動系の整合条件を明らかにするために、Fig. 4.1(a)の振動体を同図(b)および(c)に示した二つの部分に分けて考え、検討を行った。すなわち、圧電振動子の

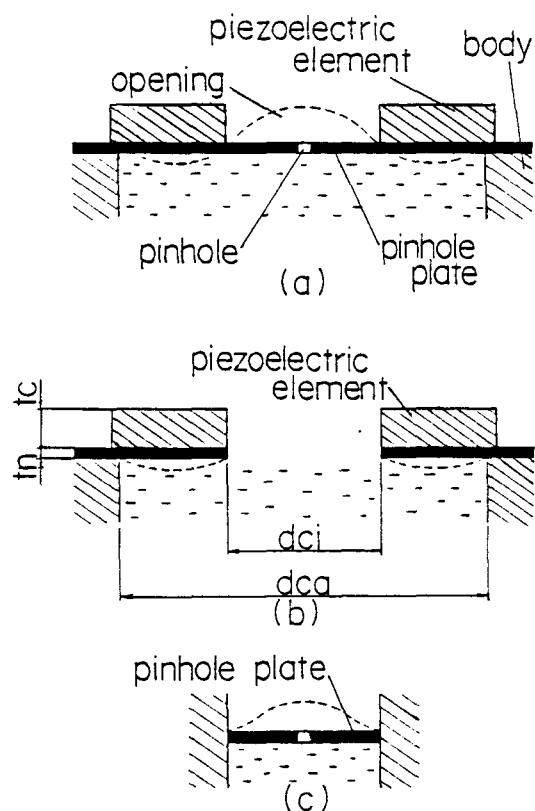


Fig.4.1 Schematic diagrams of the vibrating system. (a) A sectional view of the wholly member. (b) Of the bimorph portion. (c) Of the inner portion.

内径より外側のバイモルフ振動体で構成されている外周部と、その内側の振動板よりなる中央部とである。この二つの構成要素のうち、外周部は駆動源として働き、中央部はその負荷として作用すると考えることができる。したがって、この振動系の最適設計を実現するためには、この中央部と外周部との振動条件の整合をとることが必要であると推察できる。

このような考え方で振動系の最適設計を進める場合、圧電振動子の内径は極めて重要である。なぜならば、この霧化器の振動体は、薄い振動板とその上に接着された円環状圧電振動子とにより構成されており、圧電振動子の内径は、前述した二つの構成要素の振動条件の整合に対して、最も大きく影響を与えると考えられるからである。そこで、この圧電振動子の内径に着目して理論的な最適設計法を検討した。

4.2.2 解析手法

具体的な設計手法の検討に入る前に、ここで用いた解析法について説明する。³⁶⁾

振動系は既に述べたように、一種のバイモルフ振動体である。普通のバイモルフ振動体の振動解析については、既に明らかにされている。³⁷⁾ しかしながら、この霧化器の振動体は穴あき圧電振動子と極めて薄い振動板とを貼り合わせた振動体であるため、このような解析手法を適用することが困難である。そこで段付円形振動板のたわみ振動解析手法を応用して、その解析を行った。²⁷⁾

厚さが一様な円板のたわみ振動の方程式は、極座標を用いて式(4.1)で表され、 $W(r)$ を中心からの距離 r における変位とすれば、

$$\nabla^4 W(r) - \beta^4 \cdot W(r) = 0 \quad (4.1)$$

となる。

ここで、

$$\beta^4 = \omega^2 \cdot \rho \cdot t / D, \quad D = E \cdot t^3 [12 \cdot (1 - \sigma^2)],$$

ω : 角周波数、 ρ : 円板の比重、 t : 円板の厚さ、

E : ヤング率、 σ : ポアソン比

である。

この方程式の一般解は、ベッセル関数を用いて表され、次式(4.2)となる。

$$W(r) = A \cdot J_0(\beta \cdot r) + B \cdot Y_0(\beta \cdot r) + C \cdot I_0(\beta \cdot r) + F \cdot K_0(\beta \cdot r) \quad (4.2)$$

ここで、A、B、C、Fは任意定数である。

霧化器の振動系である Fig. 4.1(a) を、その外周部 Fig. 4.1(b) と中央部 Fig. 4.1(c) の二つの領域に分けて考え、さらに、外周部は一体の円環状振動子であると考え、これは、圧電振動子が振動板に対して十分厚く、振動板も圧電振動子の一部であるとみなし得ると考えられたからである。

この二つの領域に対して、式(4.2)を適用する。

中央部の領域においては、中心で有限な値を持たねばならないので、この領域における変位 $W_1(r)$ は、以下のようなになる。

$$W_1(r) = A_1 \cdot J_0(\beta_1 \cdot r) + C_1 \cdot I_0(\beta_1 \cdot r) \quad (4.3)$$

一方、外周部の領域においては、変位 $W_2(r)$ は、式(4.2)と同じ形となり、以下のようなになる。

$$W_2(r) = A_2 \cdot J_0(\beta_2 \cdot r) + B_2 \cdot Y_0(\beta_2 \cdot r) + C_2 \cdot I_0(\beta_2 \cdot r) + F_2 \cdot K_0(\beta_2 \cdot r) \quad (4.4)$$

ここで、

$$\beta_1 = [\omega^2 \cdot 12 \cdot \rho_1 \cdot (1 - \sigma_1^2) / (E_1 \cdot t_1^2)]^{1/4},$$

$$\beta_2 = [\omega^2 \cdot 12 \cdot \rho_2 \cdot (1 - \sigma_2^2) / (E_2 \cdot t_2^2)]^{1/4},$$

であり、添え字 1、2 は、各々、中央部および外周部の各領域を示すものである。

極座標の原点を振動体の中心にとり、振動子の内径を $2 \cdot a$ 、外径を $2 \cdot b$ とすると、 $r = a$ が中央領域と外周領域の境界であり、 $r = b$ が振動子、すなわち振動体の外周である。

二つの領域の境界、すなわち $r = a$ においては、以下の四つの境界条件を満たすことが必要である。

(i) 変位の連続性

$$W_1(a) = W_2(a) \quad (4.5)$$

(ii) 変位の傾きの連続性

$$\left. \frac{d}{dr} W_1(r) \right|_{r=a} = \left. \frac{d}{dr} W_2(r) \right|_{r=a} \quad (4.6)$$

(iii) せん断力の連続性

$$\begin{aligned} D_1 \cdot \frac{d}{dr} \left[\frac{d^2}{dr^2} W_1(r) + 1/r \cdot \frac{d}{dr} W_1(r) \right] \Big|_{r=a} \\ = D_2 \cdot \frac{d}{dr} \left[\frac{d^2}{dr^2} W_2(r) + 1/r \cdot \frac{d}{dr} W_2(r) \right] \Big|_{r=a} \end{aligned} \quad (4.7)$$

(iv) 半径方向の曲げモーメントの連続性

$$\begin{aligned} -D_1 \cdot \left[\frac{d^2}{dr^2} W_1(r) + \sigma_1 / r \cdot \frac{d}{dr} W_1(r) \right] \Big|_{r=a} \\ = -D_2 \cdot \left[\frac{d^2}{dr^2} W_2(r) + \sigma_2 / r \cdot \frac{d}{dr} W_2(r) \right] \Big|_{r=a} \end{aligned} \quad (4.8)$$

また、振動子の外周 $r=b$ における境界条件は、振動子外周とボディーとの関係、すなわち、その接着面積の大小により、支持又は固定のいずれの状態もあり得る。

(1) 外周の境界条件が支持の場合

$r=b$ のとき、変位および曲げモーメントが零であるので

$$W_2(b) = 0 \quad (4.9)$$

$$\left. \frac{d^2}{dr^2} W_2(r) + \sigma_2 / r \cdot \frac{d}{dr} W_2(r) \right|_{r=b} = 0 \quad (4.10)$$

となり、これが外周における境界条件である。

ここで、式(4.3)、(4.4)を、式(4.5)～(4.10)に代入すれば次式を得る。

$$\begin{aligned} A_1 \cdot J_0(\beta_1 \cdot a) + C_1 \cdot I_0(\beta_1 \cdot a) \\ - A_2 \cdot J_0(\beta_2 \cdot a) - B_2 \cdot Y_0(\beta_2 \cdot a) \\ - C_2 \cdot I_0(\beta_2 \cdot a) - F_2 \cdot K_0(\beta_2 \cdot a) = 0 \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} -A_1 \cdot \beta_1 \cdot J_1(\beta_1 \cdot a) + C_1 \cdot \beta_1 \cdot I_1(\beta_1 \cdot a) \\ + A_2 \cdot \beta_2 \cdot J_1(\beta_2 \cdot a) + B_2 \cdot \beta_2 \cdot Y_1(\beta_2 \cdot a) \\ - C_2 \cdot \beta_2 \cdot I_1(\beta_2 \cdot a) + F_2 \cdot \beta_2 \cdot K_1(\beta_2 \cdot a) = 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} A_1 \cdot D_1 \cdot \beta_1^3 \cdot J_1(\beta_1 \cdot a) + C_1 \cdot D_1 \cdot \beta_1^3 \cdot I_1(\beta_1 \cdot a) \\ - A_2 \cdot D_2 \cdot \beta_2^3 \cdot J_1(\beta_2 \cdot a) - B_2 \cdot D_2 \cdot \beta_2^3 \cdot Y_1(\beta_2 \cdot a) \\ - C_2 \cdot D_2 \cdot \beta_2^3 \cdot I_1(\beta_2 \cdot a) + F_2 \cdot D_2 \cdot \beta_2^3 \cdot K_1(\beta_2 \cdot a) \\ = 0 \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned}
& A_1 \cdot D_1 \cdot \beta_1 \cdot [-\beta_1 \cdot J_0(\beta_1 \cdot a) + (1 - \sigma_1) / a \cdot J_1(\beta_1 \cdot a)] \\
& + C_1 \cdot D_1 \cdot \beta_1 \cdot [\beta_1 \cdot I_0(\beta_1 \cdot a) - (1 - \sigma_1) / a \cdot I_1(\beta_1 \cdot a)] \\
& - A_2 \cdot D_2 \cdot \beta_2 \cdot [-\beta_2 \cdot J_0(\beta_2 \cdot a) + (1 - \sigma_2) / a \cdot J_1(\beta_2 \cdot a)] \\
& - B_2 \cdot D_2 \cdot \beta_2 \cdot [-\beta_2 \cdot Y_0(\beta_2 \cdot a) + (1 - \sigma_2) / a \cdot Y_1(\beta_2 \cdot a)] \\
& - C_2 \cdot D_2 \cdot \beta_2 \cdot [\beta_2 \cdot I_0(\beta_2 \cdot a) - (1 - \sigma_2) / a \cdot I_1(\beta_2 \cdot a)] \\
& - F_2 \cdot D_2 \cdot \beta_2 \cdot [\beta_2 \cdot K_0(\beta_2 \cdot a) + (1 - \sigma_2) / a \cdot K_1(\beta_2 \cdot a)] \\
& = 0 \quad (4.14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& A_2 \cdot J_0(\beta_2 \cdot b) + B_2 \cdot Y_0(\beta_2 \cdot b) \\
& + C_2 \cdot I_0(\beta_2 \cdot b) + F_2 \cdot K_0(\beta_2 \cdot b) = 0 \quad (4.15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& A_2 \cdot [-\beta_2 \cdot J_0(\beta_2 \cdot b) + (1 - \sigma_2) / b \cdot J_1(\beta_2 \cdot b)] \\
& + B_2 \cdot [-\beta_2 \cdot Y_0(\beta_2 \cdot b) + (1 - \sigma_2) / b \cdot Y_1(\beta_2 \cdot b)] \\
& + C_2 \cdot [\beta_2 \cdot I_0(\beta_2 \cdot b) - (1 - \sigma_2) / b \cdot I_1(\beta_2 \cdot b)] \\
& + F_2 \cdot [\beta_2 \cdot K_0(\beta_2 \cdot b) + (1 - \sigma_2) / b \cdot K_1(\beta_2 \cdot b)] \\
& = 0 \quad (4.16)
\end{aligned}$$

(2) 外周の境界条件が固定の場合

$r = b$ において、変位と変位の傾きが零であるので、

$$W_2(b) = 0 \quad (4.17)$$

$$\left. \frac{d}{dr} W_2(r) \right|_{r=b} = 0 \quad (4.18)$$

が、外周における境界条件である。

ここで、式(4.3)、(4.4)を、式(4.5)～(4.8)、式(4.17)、(4.18)に代入すれば、式(4.11)～(4.14)および次式(4.19)、(4.20)を得る。

$$\begin{aligned}
& A_2 \cdot J_0(\beta_2 \cdot b) + B_2 \cdot Y_0(\beta_2 \cdot b) \\
& + C_2 \cdot I_0(\beta_2 \cdot b) + F_2 \cdot K_0(\beta_2 \cdot b) = 0 \quad (4.19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& A_2 \cdot \beta_2 \cdot J_1(\beta_2 \cdot b) + B_2 \cdot \beta_2 \cdot Y_1(\beta_2 \cdot b) \\
& - C_2 \cdot \beta_2 \cdot I_1(\beta_2 \cdot b) + F_2 \cdot \beta_2 \cdot K_1(\beta_2 \cdot b) = 0 \quad (4.20)
\end{aligned}$$

以上により、式(4.11)～(4.16)が周辺支持条件の場合の式、式(4.11)～(4.14)、式(4.19)、(4.20)が、周辺固定条件の場合の式で

ある。いずれの条件の場合も、任意定数 A_1 、 C_1 、 A_2 、 B_2 、 C_2 、 F_2 が自明でない解を持つためには、その係数の行列式が零でなければならない。したがってこのことから、周波数方程式が得られるので、共振周波数および各領域における変位 $W_1(r)$ および $W_2(r)$ を求めることができる。

4.2.3 最適設計

振動系の設計のためには、圧電振動子の内径、外径、厚さおよび振動板の厚さの四つのパラメータの決定が必要である。4.2.1 節で述べたように、最適設計のためには振動子の内径が極めて重要であるので、これ以外の三つのパラメータを固定した上で、この内径を決定することとした。この設計手法によれば、固定した他の三つのパラメータについても、本節で扱う内径決定法と同様にして、最適設計を行うことができよう。

設計に用いた圧電振動子の外径および厚さは、それぞれ 10 mm および 1 mm であり、振動板の厚さは $50 \mu\text{m}$ である。また、それらの諸物性値は表 2.1 の値を用いた。

Table 4.1 Physical properties of the element and the plate.

	Young's modulus $E (\text{N/m}^2)$	Poisson's ratio ν	density $\rho (\text{kg/m}^3)$
piezoelectric element	6.3×10^{10}	0.34	7.65×10^3
pinhole plate	20.5×10^{10}	0.29	7.80×10^3

(イ) 振動系全体の解析

振動系全体は、前章で述べたように二次モードで動作する必要がある。そこで前節で示した解析手法を用い、内径 $2 \cdot a$ の値のみを変化させて二次モードの共振周波数を求めると、Fig. 4.2 における曲線 (a) が得られた。

(ロ) 中央部の振動板の解析

中央部の振動板の質量は、圧電振動子に比べて非常に小さく、約67分の1である。また、次節で詳しく述べるように、振動変位分布から考えると、圧電振動子の最大振幅点である内径部分であっても、その振幅は振動板の最大振幅の約4%である。したがって、Fig. 4.1(c)に示すように、これを直径 $2 \cdot a$ の周辺固定円形振動板と考えることができる。

円形振動板の振動方程式は、

式(4.1)で表され、この場合の一般解は式(4.21)となる。

$$W(r) = A \cdot J_0(\beta \cdot r) + B \cdot I_0(\beta \cdot r) \quad (4.21)$$

ここで、周辺固定の条件であるので、

$$W(a) = 0、$$

$$\left. \frac{d}{dr} W(r) \right|_{r=a} = 0、$$

となり、これを代入して計算する。

中央部の振動板は一次モードで振動しているとみなすことができるので、一次モードの共振周波数を振動板の直径 $2 \cdot a$ に対して求めると、Fig. 4.2の曲線(c)のような結果が得られた。

図より明らかなように、内径 $d_{ci} = 2 \cdot a = 4 \text{ mm}$ までは振動系全体の共振周波数と振動板のみの共振周波数が一致しており、系全体の共振周波数が中央部の振動板の共振周波数に支配されている。一方、内径 d_{ci} が4mm以上になると、この一致性が失われていく。したがって、内径 $d_{ci} = 2 \cdot a$ が小さい場合は、振動板は周辺固定条件であると仮定しても十分妥当性があると言える。

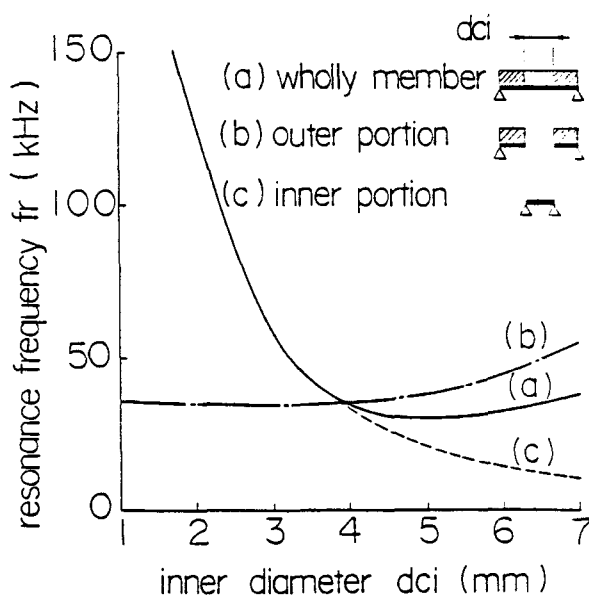


Fig.4.2 Calculated resonance frequency of the vibrating systems as functions of the inner diameter of the element.

(ハ) 外周部のバイモルフ部の解析

振動板の厚さおよび質量は、それぞれ圧電振動子の20分の1および67分の1であり、かつ、振動板は圧電振動子に比べて相対的に柔らかである。したがって、圧電振動子の内径に沿う部分の境界条件は自由であると仮定し、この場合の共振周波数を穴あきバイモルフ振動子と考えて共振周波数を求める。

上記条件下で、外周部の振動方程式の一般解は式(4.22)のように求めることができる。³⁸⁾

$$W(r) = A \cdot J_0(u \cdot r) + B \cdot Y_0(u \cdot r) + C \cdot I_0(u \cdot r) + F \cdot K_0(u \cdot r) - F_0 / (u^4 \cdot B_4) \quad (4.22)$$

ここで、

$$\begin{aligned} u^4 &= (\sum \rho_i \cdot t_i) \cdot \omega^2 / B_4, \\ \sum \rho_i \cdot t_i &= \rho_1 \cdot t_1 + \rho_2 \cdot t_2, \\ \rho_1, t_1 &: \text{圧電振動子の密度、厚さ、} \\ \rho_2, t_2 &: \text{振動板の密度、厚さ、} \\ B_4 &= B_1 - B_2, \\ F_0 &= \text{単位面積当たりの駆動力、} \\ B_1 &= q_1 / s_1' E + q_2 / s_2', \\ B_2 &= e_{r1}^2 \cdot (t_{n1} \cdot P_1 - q_1) / \varepsilon_{r1}^s, \end{aligned}$$

中性面を z_0 とすると、

$$\begin{aligned} z_0 &= -(t_1 / 2) \cdot (t_1 + t_2) / [t_1 + (s_1'^E / s_2) \cdot t_2], \\ q_1 &= t_1 \cdot [z_0^2 + (t_1 + t_2) \cdot z_0 + t_1^2 / 3 + t_1 \cdot t_2 / 2 + (t_2 / 2)^2], \\ q_2 &= t_2 \cdot [z_0^2 + (t_2 / 2)^2 / 3], \\ s_1'^E &= (1 - \sigma^2) \cdot s_1^E, \\ s_2' &= (1 - \sigma^2) \cdot s_2, \\ e_{r1} &= 1 / (1 - \sigma) \cdot d_{31} / s_1^E, \\ \varepsilon_{r1}^s &= (1 - k_p^2) \cdot \varepsilon_{33}^T, \\ P_1 &= t_1 \cdot (z_0 + t_1 / 2 + t_2 / 2) = t_1 \cdot t_{m1}, \end{aligned}$$

である。ただし、添え字 "1" は圧電振動子、"2" は振動板を表し

ている。

境界条件は、前述した仮定に基づき、圧電振動子内径において自由である。ここで、 $F_0 = 0$ 、 $V_0 = 0$ として、周辺に $F \cdot e^{j\omega t}$ なる力を加えたときの境界条件は、

$r = a$ において、

$$N_r = F / (2 \cdot \pi \cdot a), \quad M_r = 0 \quad (4.24)$$

である。

次に、 $F = 0$ 、駆動電圧 V_0 で駆動したときの境界条件は、

$r = a$ において、

$$N_r = 0, \quad M_r = 0 \quad (4.25)$$

である。ただし、 N_r は r 方向のせん断応力、 M_r は r 方向の曲げモーメントである。

上記境界条件と外周支持の境界条件とを、式(4.22)に代入し、一次モードの共振周波数を求めると、Fig. 4.2の曲線(b)を得る。

圧電振動子の内径 d_{in} ($= 2 \cdot a$)を変数として、前節の解析手法を用い、(イ)振動系全体の共振周波数、(ロ)中央部分の振動板のみの共振周波数、(ハ)外周部のバイモルフ振動体の共振周波数、を求めた結果がFig. 4.2であり、図のように $d_{in} = 3.8 \text{ mm}$ においてこれら三つの共振周波数が一致するという結果が得られた。

4.2.4 振幅分布

前述した解析手法により、周辺支持条件および周辺固定条件下で解析し、振動系の変位分布を計算した。なお、計算に用いた各物性値は表4.1に示した値である。

Fig. 4.3 は最適設計手法にしたがった場合の振動系の振幅分布を、周辺支持条件下で計算したものである。同図(b)は最適設計した二次モードの振幅分布であり、同図(c)はそのときの一次モードのそれである。

前者の場合は、中央部の振動板のみが大きく励振され効率の良い振動板の振動が行われていることを示している。したがって、二次の振動モードにおいて最適化が実現されていることがわかる。

一方、後者の場合は、振動板の振幅に対する圧電振動子の振幅が、前者の場合に比べて相対的に大きくなっている。したがって、この場合はキャビテーションが生じ易く、振動板の振動効率が悪いことを示している。

Fig. 4.4 (a) および (b) は、それぞれ前述した手法に従い、周辺支持および周辺固定の条件下で計算した振幅分布であり、それぞれ

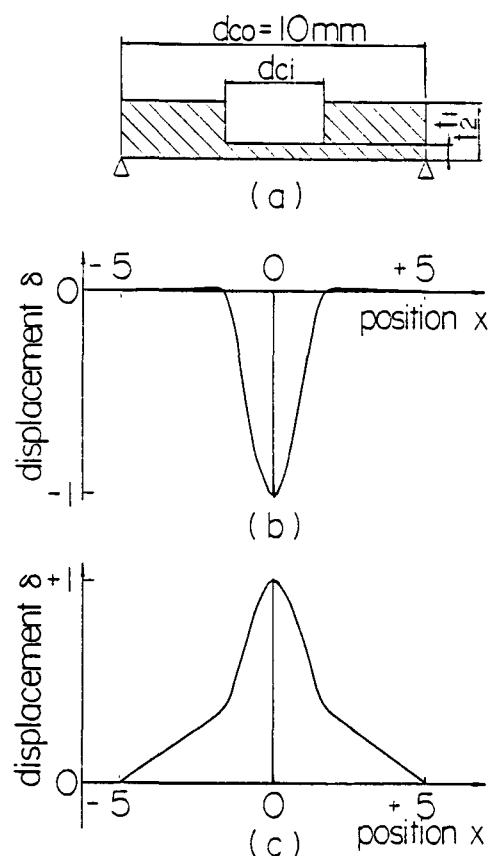


Fig.4.3 Calculated distributions of displacement of the system. (a) A sectional view of the system. (b) Distribution of the 2nd mode displacement of the system designed by the procedure, and (c) the one of the 1st mode displacement of it.

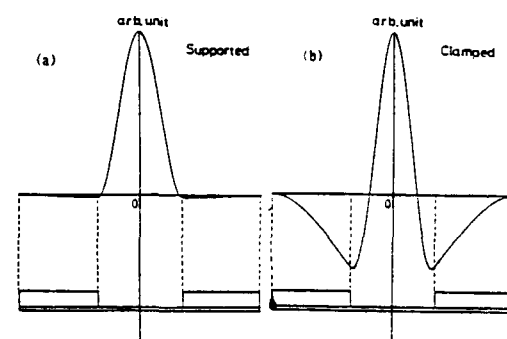


Fig.4.4 Calculated distributions of displacement of the system. (a) The element is supported around the outer circle. (b) The element is clamped.

の共振周波数は、38.0kHzおよび65.1kHzとなった。前者の方が、中央部の振幅が外周部のそれに比べて相対的に大きくなっており、より効率的な振動系を実現できることを示している。

これらの両解析結果は、振動板中央の振幅を"1"として正規化しているので、その振幅の絶対値が示されていない。このため、Fig. 4.3(b)、(c)およびFig. 4.4(a)、(b)共に同程度の振動板の振幅が得られるように見える。しかしながら、圧電振動子の振幅を過度に大きくして振動板の振幅を確保することは実際上不可能であるので、Fig. 4.3(c)およびFig. 4.4(b)の場合は、中央の振動板の振幅が充分取れないという結果になると考えられる。従って、Fig. 4.3(b)に示した二次モードで、かつ、Fig. 4.4(a)に示す周辺支持条件が最適な境界条件であると言えよう。

4.2.5 まとめ

振動系の整合に対する基本的な設計方針を基に、Fig. 4.1(a)、(b)および(c)に示した三つの独立した振動体を検討した。そして、4.2.2節に示した解析手法を用いてそれらの共振周波数を計算により求めた。その結果、4.3.3節に示したように、圧電振動子の内径 $d_{in} = 3.8\text{mm}$ において、これら三つの共振周波数が一致することがわかった。

すなわち、ある特定の内径 d_{in} を選ぶことにより、Fig. 4.1(b)の外周部分と、同図(c)の中央部分の一次モードの共振周波数を一致させることができる。圧電振動子が振動板を強制振動させるという観点から考えると、この状態は圧電振動子および振動板が、共に、同時に、同じ一次の共振状態になり、インピーダンス整合がとれている状態であると言える。そして、このとき全体の振動系は同じ共振周波数で、かつ、二次モードの共振状態になっているのである。

したがって、この内径 d_{in} が最も合理的で振動エネルギー変換効率の高い最適設計点であるということができ、この設計手法に基づい

て振動系を設計することで最適設計が可能である。

また、上記最適設計法により求めた振動系の振動板と圧電振動子との振幅比は、周辺支持条件下における二次モードにおいて最も大きくなる。したがって、この条件が最も高い振動エネルギー変換効率を実現できると推察される。

4.3 実験的検討³⁵⁾

4.3.1 検討方法

前節において、最適設計法を理論的に検討し、その設計指針を示すとともに、それに基づく振動系の望ましい振動姿態を解析的に明らかにした。

そこで本節においては、理論的設計指針を裏付けるために、圧電振動子の内径およびキャビティの内径を変えた霧化器を試作した。そして、最適な振動系を実験的に求め、これを理論的最適振動系と比較した。また、その振動姿態についてもレーザードップラー法などにより測定し、計算結果との比較を行った。²⁸⁾

4.3.2 振動系の整合に関する実験

既に述べたように、圧電振動子の内径 d_{in} は振動系の整合をとる上で極めて重要なパラメータである。そこで、この内径 d_{in} を変えた霧化器を試作してその特性を比較した。試作霧化器の構成は Fig. 3.12(b) に示したものと同等である。

Fig. 4.5 は、圧電振動子の内径 d_{in} を変えたときの霧化器の噴霧量 Q および第二共振周波数 F_{r2} の変化の様子を示す実験結果である。このとき、圧電振動子の外径 d_{out} は 10 mm、厚さは 1 mm、振動板は直径 80 μ m のノズルが 61 個設けられ、その厚さは 50 μ m、キャビティの内径 d_{in} は 9.75 mm である。また、圧電振動子の駆動電圧 V は 50 V 一定であり、使用液体は常温の灯油である。

図より明らかなように、

内径 d_{ci} の増加と共に第二共振周波数 F_{r02} は単調に減少していくが、噴霧量 Q は $d_{ci} = 3.9\text{mm}$ において極大値を示しており、この値が内径 d_{ci} の最適値であることを示している。

キャビティー内径 d_{ci} を変えたとき、霧化器の噴霧量 Q および第二共振周波数 F_{r02} は、Fig. 4. 6 に示すような実験結果となった。このとき圧電振動子の内径 d_{ci} は 3.9mm であり、他の条件は上記の実験と同じである。図より明らかなように、キャビティー内径 d_{ci} の増加と共に、第二共振周波数 F_{r02} は単調に減少していく。そして、噴霧量 Q はキャビティー内径 d_{ci} が圧電振動子の外径 d_{co} (10mm) に近付くにつれて増大している。

以上の実験的検討の結果、以下の結論を得た。(1) 圧電振動子の内径 d_{ci} には最適な値が存在し、その点で霧化器の噴霧量 Q が最大となるので、この値が最適値である。(2) またこのとき、振動系の外周は、圧電振動子の外径 d_{co} に可能なかぎり近い値で支持または固定される構成が最も振動効率が良い。

上記結論は、前節の解析的アプローチにより求めた結果と良く一致し、理論的最適設計手法の妥当性を示唆していると言える。

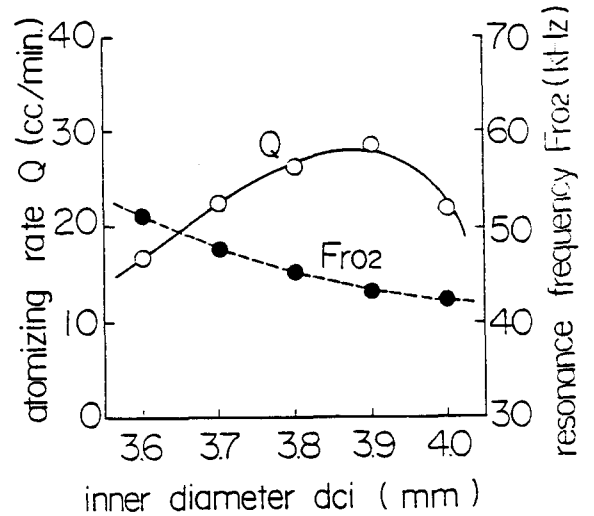


Fig.4.5 The atomizing rate Q and the 2nd resonance frequency F_{r02} as functions of the inner diameter d_{ci} of the element.

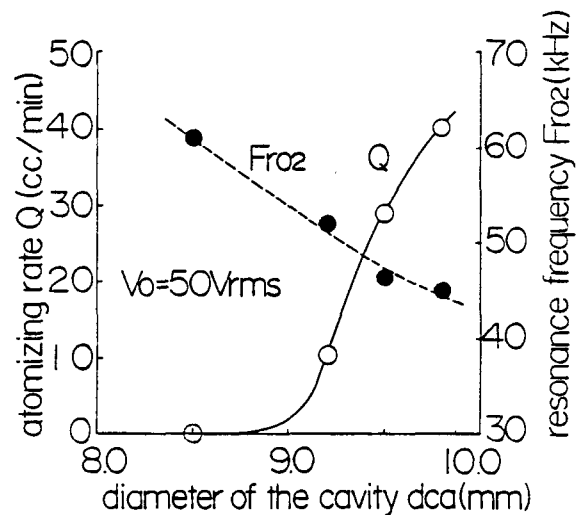


Fig.4.6 The atomizing rate Q and the 2nd resonance frequency F_{r02} as functions of the diameter d_{ca} of the cavity.

前節において、実験的に得た最適振動系を備えた霧化器の振動振幅分布をレーザードップラー法により測定した。駆動電圧は約1Vでキャビティは空である。測定結果をFig. 4.7に示す。得られた振幅分布は、Fig. 4.4(a)に示した周辺支持条件の場合の振幅分布と極めて良く一致しており、外周の圧電振動子の部分の振幅に比べて中央部の振動板の振幅のみが著しく大きく、あたかもこの振動板のみが振動していると言えるほどの差がある。また、二次モードの共振周波数の計算結果は、周辺固定の場合61.5kHz、周辺支持の場合38.0kHzであったが、この実験結果によれば、42.0kHzであり、後者の方が良く一致している。したがって、この振動体の境界条件は周辺支持条件と考えることの妥当性を示唆していると言える。

Fig. 4.8 (a) および (b) は、第一共振周波数 F_{r1} および第二共振周波数 F_{r2} において測定したレーザーホログラムであり、駆動電圧は約 50V である。これらは 4.2.4 節にて述べた第一共振周波数 F_{r1} と第二共振周波数 F_{r2} との振動板の励振

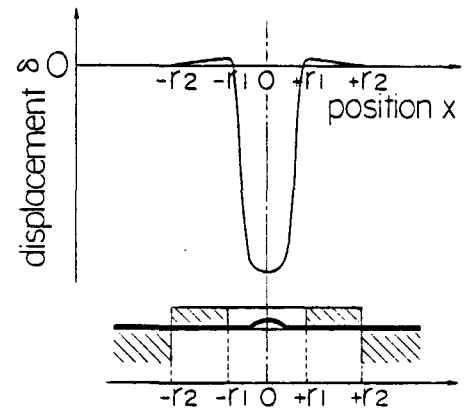


Fig.4.7 The distribution of displacement of the vibrating system designed by the optimum design procedure.

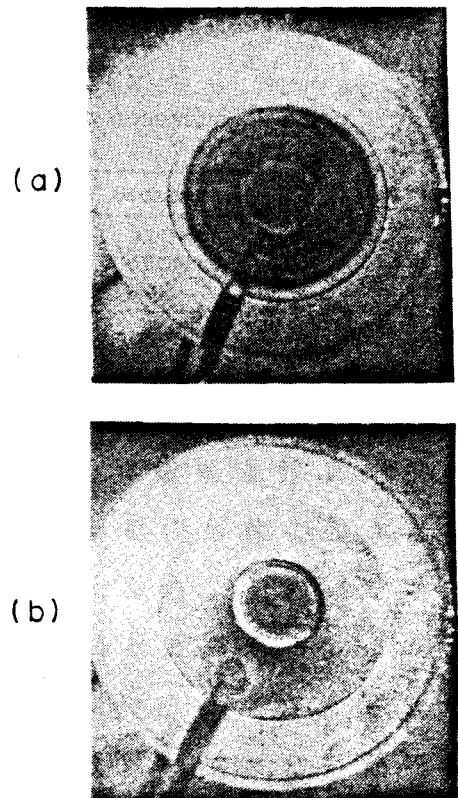


Fig.4.8 Photographs of laser phorogram of the vibrating system. (a) It is operating at the 1st resonance frequency F_{r1} . (b) At the 2nd resonance frequency F_{r2} .

効率の差を示す実験結果である。

第一共振周波数 F_{r1} においては振動子上に干渉縞が観察されるが、第二共振周波数 F_{r2} においてはそれは全く観察されず、中央の振動板のみが振動しているように見える。したがって、第二共振周波数 F_{r2} における動作の方がキャビテーションも発生し難く、振動効率も高いことがこの実験結果からも推察される。

Fig. 4.7 および Fig. 4.8(b) の振幅分布は、中央部の振動板のみが振動し、あたかも第三章で説明したピストン振動板の動作状態とみなすことができ、この点からもこの設計値で理想的な振動系が実現できていると言える。

4.3.4 まとめ

解析手法を用いて理論的に求めた最適な振動系と、実験的に求めたそれを比較すると、表 4.2 のようになる。

Table 4.2 Comparison of the calculated and measured results.

Parameters	Calculated	Measured
d_{ci}	3.75mm	3.90 mm
F_{r02}	38.0kHz	42.0kHz
x_0, x	0.38	0.39

圧電振動子内径 d_{ci} 、共振周波数 F_{r02} の実験結果と計算結果の差は $\pm 10\%$ 以下である。これらの誤差は、振動板の形状の差および霧化器の加工や組立誤差などによるものと考えられ、この点を考慮すれば理論値と実験値は極めて良く一致していると言える。また、正規化した内径 $x (= d_{ci} / d_{co})$ は、円板の二次モードの共振周波数における振動姿態の節円位置 $x_0 (= 0.38)$ と良く一致しており、節円位置において外周部と中央部が整合し、みかけ上、厚さが一様な円板の振動とみなせる動作をしていると考えることができる。³²⁾

4.4 結 言

多孔板型超音波霧化器の最適設計手法について、4.2節において理論的検討を行い、4.3節において実験的検証を行った。その結果、実験結果と計算結果は良い一致を見、以下に述べる最適設計手法を確立することができた。

- (1) 振動系全体の二次モード共振周波数、外周部のバイモルフ部の一次モードの共振周波数および中央部の振動板の一次モードの共振周波数を一致させる。
- (2) 振動系は円環状圧電振動子の外周に沿って、周辺支持条件に近くなるよう構成する。
- (3) 円環状圧電振動子の外径に対する内径の比が、円形振動板の二次モードの共振姿態の節円位置にほぼ等しくなるよう構成する。すなわち、外径に対する内径の比 $x = d_i / d_o \approx 0.38$ とする。

上記の設計手法により、多孔板型超音波霧化器の振動系は、実験による試行錯誤に頼ることなく、理論的に最適設計を行うことが可能となった。したがって、多様な用途の霧化器の検討に際し、必要な振動系の設計を容易かつ迅速に行うことができ、今後の実用化検討に有用な結果を得られたと考えられる。

第五章 構造設計および製造法

5.1 緒言

多孔板型超音波霧化器に関する最適設計法については、前章において詳しく論じた。そこで本章では、実際に霧化器を設計し製造する場合に必要な構造設計および製造法を明らかにする。

すなわち、本章の目的は、工業的な観点での霧化器の設計要素を明らかにして適切な設計の実際を示すと共に、その製造法を検討して基礎的製造技術を明らかにすることである。

霧化器は圧電振動子、振動板、およびボディーの三つの部品から構成される。そこで、これら三つの部品の構造および特性が、第三章および第四章で示した振動モードの最適化および最適設計法に従った場合、どのように設計されるべきかを示す。また同時に、これら三つの部品を、第二章および第三章の内容に合致してどのように製造することができるかを、基礎的な製造法の確立を目的として明らかにする。

5.2 構造設計

5.2.1 圧電振動子

霧化器の駆動要素である圧電振動子は、Fig. 5.1 に示すように、中心軸に対して軸対称な円環状である。その材質は、

$\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})$ 、 PbTiO_3 、 PbZrO_3 、の混合物であり、電極は図のように圧電振動子の上下面に約 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ の厚さで蒸着または焼き付けにより設ける。次節で述べるように、

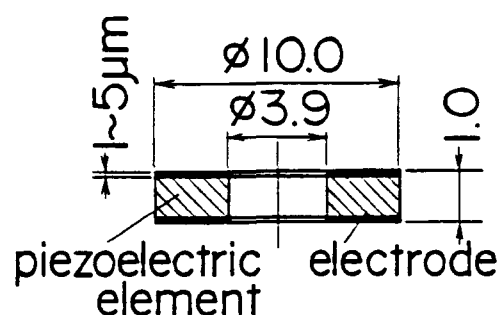


Fig.5.1 Sectional view of the ring shape piezoelectric element.

圧電振動子と振動板を半田接着により組み立てる場合は、半田付性に優れた電極が必要である。そこで、以下に示す二つの電極形成法を検討した。

第一の方法は、Cu、Au等の蒸着により電極を形成する方法であり、第二の方法は、AgPdおよびNiを用いた無電解メッキ法である。これらの電極形成法を比較した結果、霧化器の動作特性に対しては優劣差が全く無いことが確かめられた。

しかしながら、無電解メッキ法では、Fig. 5.2 に示すように、微小な電極欠落部分が数多く発生することがわかった。この電極欠落部分の直径は $20\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 程度であり、その総面積は、電極の全面積の10～20%にも及ぶ場合があることがわかった。圧電振動子と振動板を半田付けする場合、この電極欠落部分内に半田フラックスを含んだまま半田付けされてしまうおそれがあり、長期信頼性の観点からは極めて不利である。

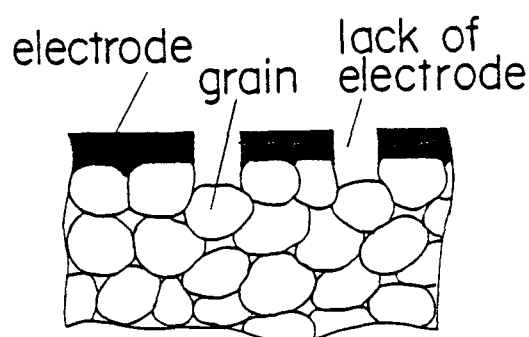


Fig.5.2 Enlarged sectional view of the piezoelectric element.

一方、蒸着法による場合は、上述の微小な電極欠落部分が全く生じず、したがって、この方法による電極形成が優れているのでこれを採用した。

圧電振動子の寸法関係は、4.3.2 節で述べたとうり、振動系の最適設計値を決定するものである。圧電振動子の内径 d_{ai} 、外径 d_{ao} 、厚さ t は、直接この最適設計値を変化させるパラメータである。

内径 d_{ai} については既に Fig. 4.5 に示したとうりであり、最適値 ($d_{\text{ai}} = 3.9\text{mm}$) を持つ。また、外径 d_{ao} については、Fig. 4.6 に示したキャビティー内径 d_{ca} の変化による影響と同程度の影響があると考えてよい。キャビティー内径 d_{ca} を圧電振動子の外径 d_{ao} に近付けるは

ど霧化器の噴霧効率は高くなる。これは、この両者が近いほど、圧電振動子の外周支持条件が理想に近付く為であると考えられる。したがって、圧電振動子の外径 d_o はキャビティ内径 d_i より大きく、かつ、限り無くこれに近い値が振動効率の観点から適切である。

Fig. 5.3 は、バイモルフ部の共振周波数と圧電振動子の厚み t の関係を 4.2.2 節で示した解析法により求めた結果である。図より明らかのように、バイモルフ部の共振周波数は圧電振動子の厚み t に大きく影響を受けている。これは同節で示したように、共振周波数を表す方程式の中に圧電振動子の厚み t の項が入ってくるからである。一般に、たわみ振動の場合は、厚み t の $3/2$ 乗に共振周波数が比例するので、Fig. 5.3 に示した計算結果は妥当な特性であると考えられる。

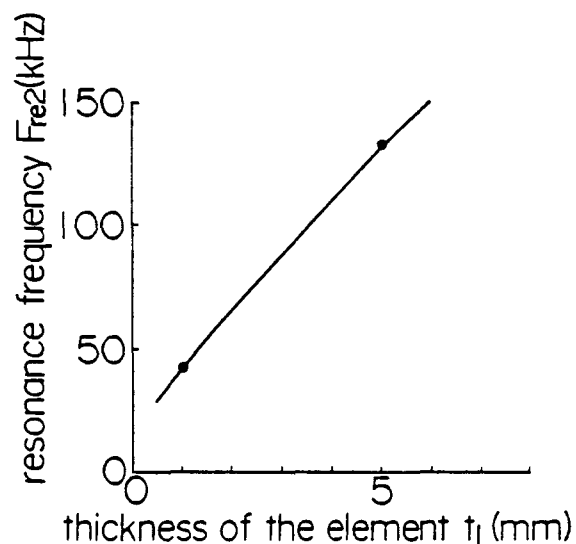


Fig.5.3 The 2nd resonance frequency F_{r2} of the vibrating system as a function of the thickness of the element.

圧電振動子は、以上に述べた設計項目を考慮して設計をすることが必要であり、Fig. 5.1 に示した各部の寸法は、一つの最適設計された各部の寸法関係を示している。

5.2.2 振動板

振動板は、圧電振動子と同等か、もしくはそれ以上に霧化器にとって重要な部品である。したがって、その材質、寸法形状、加工法などの各項目に関して、十分な検討をすることが必要である。

(1) 材質

振動板の材質を考えると、振動要素としてのバネ性、ノズルの加工し易さ、圧電振動子との半田付け性を考慮することが必要である。

表 5.1 は、検討した各種の振動板材質の比較表である。前章の最適設計法に従った霧化器を、この表 5.1 に示した材質の振動板を用いて試作し、霧化性能を評価した。

Table 5.1 Physical properties of plate's materials.

material	density ρ (g/cm ³)	Young's modulus E (kg/mm ²)	poisson's ratio ν	performance of atomization
Stainless steel SUS304	7.80	21100	0.29	◎
Stainless steel SUS430	7.75	20400	0.29	△
Nickel Ni	8.87	21000	0.26	△
Titanium Ti	4.51	10800	0.34	x
Nickel alloy DK	8.25	14000	0.32	x
brass Bs	8.39	10500	0.34	x

同表中に示すように、材質としては SUS304 が最も優れた霧化特性を示した。他の材質では、SUS430 および Ni が効率は劣るが噴霧を行うことが可能であり、その他は全く噴霧することさえ不可能であった。これは、霧化特性が、表 5.1 に示した一般的物性値のみに依存するものではなく、したがって、単に振動系の振動特性のみで決まるものではないことを示すと考えられる。すなわち振動板のはっ水性あるいは圧延条件などの非常にミクロで化学的な性質に左右されていると推察される。

振動板の機械的性質としては、後述するように、振動板の突起部を成型するためにその高度をビッカース硬度で 200 以下にすることが必要である。

(2) ノズル径とノズルの配置

振動板の各寸法の中で、まず第一に決定する必要があるのはノズル直径である。ノズルの直径は、噴霧粒子の粒径を決定する上で極めて重要であり、小さいほど微粒化促進が可能と考えられるので、ノズルの直径も小さく加工できるほうが好ましい。しかしながら、実際に微細なノズルを一枚の振動板上に数多く加工することは、加工技術の点で難しさがあり、工法上の工夫が必要である。

振動板の厚さを $50\mu\text{m}$ 、直径を $\phi 16\text{mm}$ として、表5.2に示すノズル加工技術を検討した。

Table 5.2 Comparison of methods for manufacturing the plate.

method of manufacturing	material of plate	diameter of pinhole	thickness of plate	performance of manufacturing
chemical etching	SUS304	$\phi 80\mu\text{m}$	$50\mu\text{m}$	◎
electric discharge	SUS304	$\phi 30$	50	△
YAG laser	SUS304	$\phi 50$	50	×
electro forming	Ni	$\phi 50$	50	○

Fig. 5.4 は、これらの加工法によりノズルを加工したときのノズル断面のモデル図である。同図(a)～(d)は、それぞれ、ケミカルエッチング法、放電加工法、YAGレーザー法およびエレクトロフォーミング法により加工したときのノズル断面図である。

図より明らかなように、これらの加工法には精度差があるが、数多くのノズルを一枚の振動板上に同時に加工する場合には、その仕上がりは表5.2中に示した比較

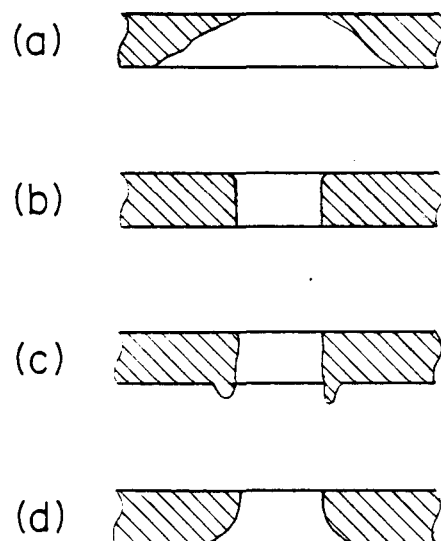


Fig.5.4 Sectional views of the nozzle.
(a) The nozzle is manufactured with chmical eaching way. (b) With electrical discharge way. (c) With YAG laser way. (d) With electro-forming way.

結果のようになる。従って、ノズルの寸法、それらの配置位置および振動板の外径等を同時に、かつ、比較的精度良く実現することができるケミカルエッチング法を選び、ノズルの直径 d_n を、 $d_n = 80 \mu m$ 、とした。これは容易に入手可能な SUS304 板材の厚さが $50 \mu m$ であり、ケミカルエッチング法では、板厚よりも小さい直径の穴加工が理論的に困難であるからである。また、エッチングにおいても片面からのみエッチングを行うハーフエッチング法を採用して、ノズル加工精度の確保を図った。

ノズルの配置は、既に第二章において Fig. 2.5(c) に示したように、ノズル相互間を等距離に保つことが望ましい。Fig. 5.5 に示すように、ノズルから噴出される液体のキャビティー内での流れのモデルを考える。すなわち、キャビティー内において、その断面の直径がノズル直径 d_n に等しい管内を液体が流れていると考える。流体力学における Poiseuille の法則によれば、この管内を流れる流体の流量 Q_n は、次式で表される。³⁹⁾

$$Q_n = \pi \cdot \Delta P / (8 \cdot l \cdot \eta) \cdot (d_n / 2)^4 = A \cdot (d_n / 2)^4 \quad (5.1)$$

ただし、 ΔP は管の出入口間の差圧、 l は管の長さ、 η は液体の粘度、 A は比例定数である。

今、Fig. 5.5 に示すように、この流量 Q_n の 10 倍の流量 Q_n' の液体を流すことができる直径 d_n' の管をキャビティー内に確保することができれば、ノズル相互間の影響は高々 10% であると考えることができる。すなわち、

$$Q_n' = 10 \cdot Q_n = A \cdot (d_n' / 2)^4 \quad (5.2)$$

したがって、

$$d_n' \geq \sqrt[4]{(10) \cdot d_n} \quad (5.3)$$

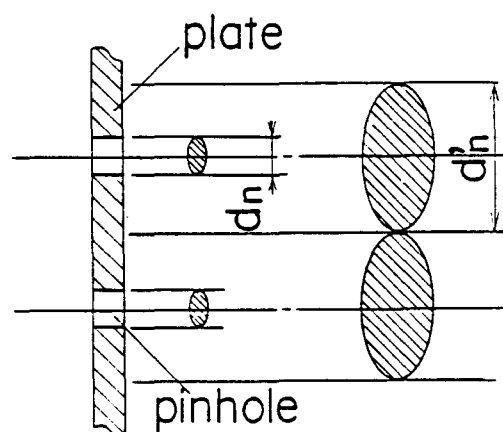


Fig.5.5 Reference between the diameter of pinholes and the interval of them.

を満たすようにノズルの配置を構成すれば、ノズル相互間の影響が実質的に生じない振動板を設計することができる。

今、ノズルの直径が $80\mu\text{m}$ であるので、式(5.3)にしたがえば、

$$d_a' \geq 150\mu\text{m} \quad (5.3)$$

となる。したがって、十分な余裕を持って、ノズル間のピッチを $250\mu\text{m}$ に設計した。また、実際に、 $150\mu\text{m}$ ピッチまでは全く噴霧特性に影響がないことを実験的に確認した。

(3) 突起部の成型

振動板の突起部は、Fig. 5.6に示すように、中央にノズルが加工された平坦な振動板を、成型用の金型 a、b および c により加圧成型して造る。

多くのノズルをエッチングにより振動板に設けた後、この成型金型で成型する場合、振動板の硬度が高いと、Fig. 5.7 に示すように、ノズルとノズルの間にクラックが生じてしまう。

振動板をアニール処理することにより、このクラックの発生を防止することができる。実験的に必要な硬度を求めた結果、ビッカース硬度で 200 以下であれば充分であることがわかった。したがって、突起部加工の点からは、振動板の材料としてビッカース硬度

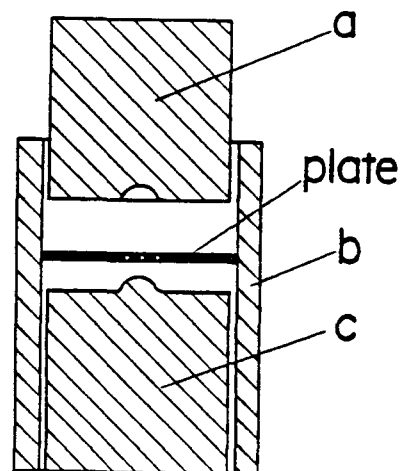


Fig.5.6 A forming apparatus for forming a curved portion on the plate.

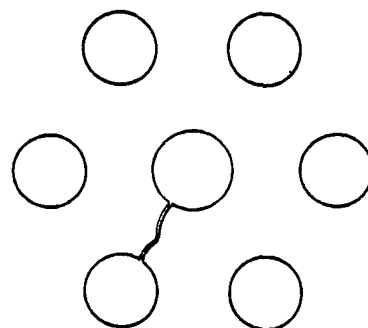


Fig.5.7 Schematic diagram of the pinhole plate damaged in the forming process. A crack is caused between pinholes by the forming stress.

100 ～ 150 の SUS304 アニール処理材が適切である。この材料を用いて成型した振動板を Fig. 5.8 に示す。図のように突起部が良好に加工できている。

このような成型金型を用いて突起部の高さ h_c を変えた検討結果は、既に 3.4 節で述べた噴霧パターンの制御性であり、噴霧角の制御パラメータとして取上げた実験結果として、Fig. 3.14 に示した。

しかしながら、この突起部の形状を左右するもう一つのパラメータとして、曲率半径 R_c があり、これを検討して、その影響を明らかにする必要がある。

そこで、この突起部の曲率半径 R_c による霧化器の霧化特性に対する影響を常温の灯油を用いて調べた。ノズルは直径 $80\mu\text{m}$ で 61 個設けられ、駆動電圧は 50V 一定である。Fig. 5.9 にその実験結果を示す。図より明らかなように、 $R_c = 2.25\text{mm}$ において、噴霧量 Q が極大値を示している。

したがって、3.4 節で述べた h_c による振動系整合に対する影響と同様に、この R_c もまた振動系の整合に影響を与え、振動系の最適設計値に対して一つの最適な曲率半径 R_c が存在することが明らかになった。

ここに示した振動板の突起部

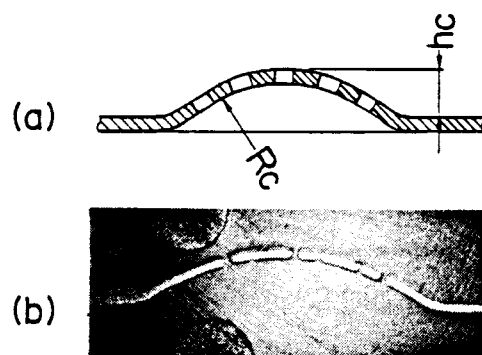


Fig.5.8 Sectional view of the curved portion of the plate. (a) A schematic diagram of it. (b) An enlarged photograph of it.

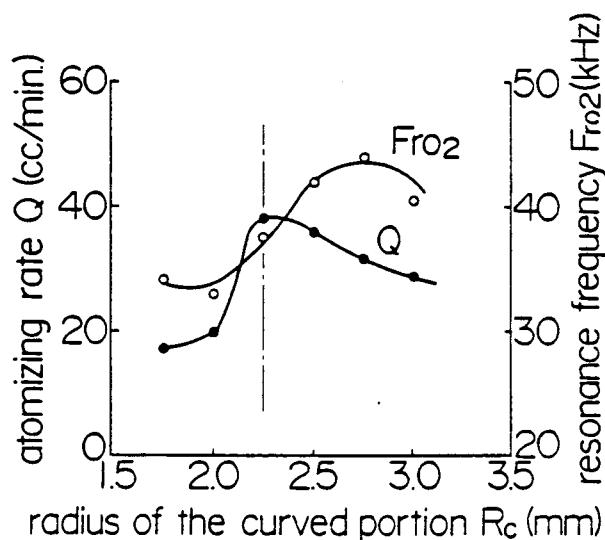


Fig.5.9 Performances of the atomizer as functions of the radius of the curved portion of the plate.

の高さ h_c および曲率半径 R_c は、それぞれ、0.25mm および 2.25mm がその最適値であることがわかったが、この値の持つ意味について以下のように考えることができる。

3.2 節において、等価ピストン振動板の考え方を示したが、ここで、Fig. 5.10を参照して、再考する。

直径 d_{ci} (円環状圧電振動子の内径) の周辺固定円形振動板の等価面積 S_e は次式で表される。³¹⁾

$$S_e = (\text{体積速度}) / (\text{振動板の中央の振動速度})$$

$$= A_e \cdot \pi \cdot (d_{ci}/2)^2 \quad (5.4)$$

ここで、 A_e は等価面積係数である。

この等価面積 S_e を有する円形ピストン振動板の直径を d_e とすると、 d_e は以下の式で表すことができる。

$$d_e = \sqrt{A_e} \cdot d_{ci} \quad (5.5)$$

円形振動板の共振状態における等価面積係数 A_e は、 $A_e = 0.306$ となることが解析されているので、 d_e は次式で表される。³¹⁾

$$d_e = 0.55 \cdot d_{ci} \quad (5.6)$$

Fig. 5.9 および Fig. 3.14 に示した実験結果により得た最適な h_c および R_c に対し、相当する突起部直径 d_{cu1} および d_{cu2} を求め、これを理論的な計算値 d_e と比較すると、表 5.3 のようになる。

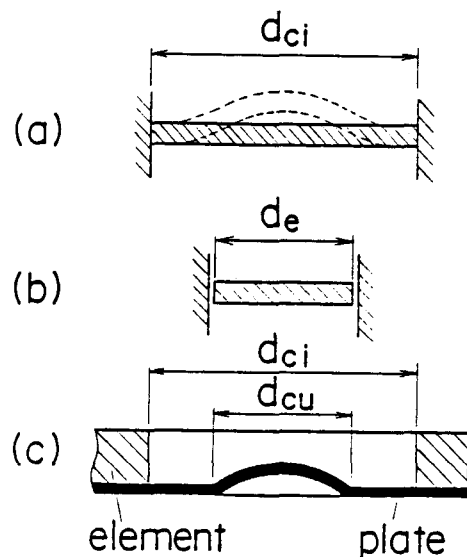


Fig. 5.10 Schematic diagrams of the plate. (a) A circular vibrating plate. (b) A circular piston vibrator which is equivalent to the plate. (c) The inner portion of the vibrating system of the atomizer.

Table. 5.3 Comparison of the experimental and theoretical optimum diameter of the curved portion.

Theoretical	experimental	
d_e	d_{cu1}	d_{cu2}
2.15 mm	2.10	2.20

すなわち、突起部直径 d_{cu} の実験的最適値 d_{cu1} および d_{cu2} は、この表より明らかなように、極めて良い一致を見ている。

したがって、突起部直径 d_{cu} を最適設計するためには、突起部の直径 d_{cu} と等価面積 S_e を有する円形ピストン振動板の直径を d_e と一致させれば良いことが明らかになった。

5.2.3 ボディー

ボディーの基本構成を

Fig. 5.11に示す。ボディーの作用は、振動体をキャビティーの内周に沿って支持すること、およびキャビティー内に液体を保持することである。そして、キャビティー内へは噴霧された液体の体積分だけ供給パイプから液体が補充されていかなばならない。

また、その材質は、振動体をボディーで支持する必要から、振動体の振動エネルギーに対して十分な剛性と質量が必要である。したがって、振動的にキャビティーの外壁が十分な支持体と成り得ることが重要である。振動的な意味からは、ステンレス鋼等のような剛性の高い材料が好ましく、高い振動効率を得られるけれども、振動体の質量が小さく、振動エネルギーも比較的小さいので、しんちゅう等の材料でも十分な噴霧特性を得ることができる。

キャビティー直径 d_a は、既に4.6節で示したように、振動系の最適設計のために極めて重要なパラメータである。振動体の支持部がキャビティー内周に沿った上たん部となっているため、その寸法誤差は著しく振動特性に影響し、その整合を左右するものである。

キャビティーの深さ d_i は、Fig. 5.12に液体として灯油を用い

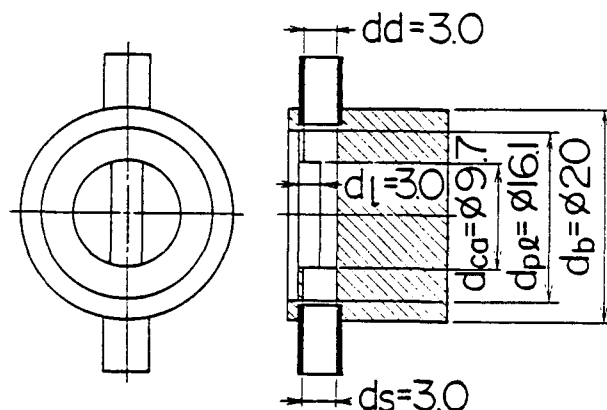


Fig.5.11 Schematic diagram of the body.

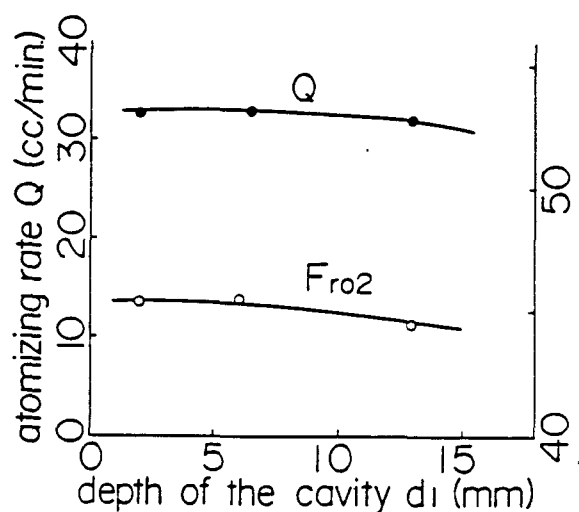


Fig.5.12 Effects of depth of the cavity d_i .

たときの実験結果を示すように、基本的にはその振動特性に影響を与えない。しかしながら、深さ d_i が深くなると、キャビティの外周壁の剛性が相対的に小さくなり、機械的インピーダンスが低下して振動子の振動エネルギーがキャビティの外周壁の振動に吸収されるようになる。すなわち、この外周壁が振動体の振動に引きずられて振動するようになる。このため、深さ d_i が深い霧化器ほど共振周波数 F_{r02} および噴霧量 Q がともに低下する傾向を示すと考えられる。

したがって、キャビティ深さ d_i は、振動効率の点ではできるだけ浅い方がよいので、3.3.2節で説明した好ましい気泡の挙動を妨げたり、液体の供給パイプからの供給に対する過度な圧損を生じたりしない範囲で、可能な限り浅く設計すべきである。このような観点から、キャビティ深さ d_i は、約2～3mmが適切な値である。

5.2.4 供給パイプと排気パイプ

供給パイプの直径 d_s は、キャビティへの液体の吸い上げの際の流路抵抗を決定する。一般に、流体力学において、管路抵抗 r_d は、

$$r_d = 1 / [(d_s)^2 \cdot \rho \cdot \eta] \quad (5.7)$$

と表される。したがって、管路抵抗 r_d は供給パイプの直径 d_s の二乗に反比例する。Fig. 5.13は、長さ200mmの供給パイプを用い、約40 cc/min.の常温灯油（比重 $\rho = 0.8$ g/cm³、粘度 $\eta = 1.5$ cp、表面張力 $\gamma = 28$ dyne/cm）を噴霧したときのキャビティ内圧 P_{ca} の噴霧前の値からの減少分 ΔP_{ca} を測定した結果である。図より明らかなように、 ΔP_{ca} は直径 d_s の二乗に反比例する

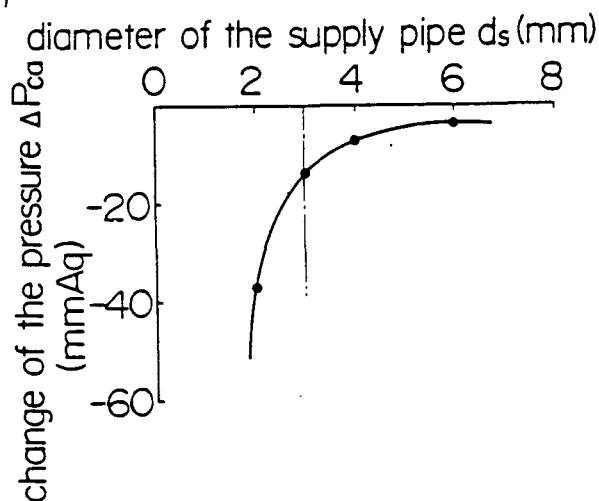


Fig.5.13 Change of the pressure ΔP_{ca} in the cavity as a function of the diameter of the supply pipe d_s .

という結果を得ており、供給パイプの直径 d_s は、霧化器動作時のキャビティ内圧 P_a の決定に大きく寄与することがわかった。前述した約 40 cc/min. の液体を噴霧するための霧化器に対しては、その内圧 P_a の変動を過度に生じさせない範囲、例えば、その変動を、

$$P_a \leq 15 \text{ mmAq} \quad (5.8)$$

とするためには、

$$d_s \geq 3 \text{ mm} \quad (5.9)$$

が適切であると考えられる。

排気パイプ直径 dd の噴霧特性への影響は、次章で詳細に述べるが、デューティ（簡欠）制御による噴霧能力制御を行う場合は、極めて重要なパラメータである。しかし、この噴霧能力制御を行わない場合は、噴霧特性への影響はほとんど無いと考えてよい。

したがって、排気パイプ直径 dd は、3.3.2 節で述べたキャビテーション気泡がキャビティからスムーズに排出できるだけの充分な大きさであればよい。この直径 dd は、噴霧される液体の性質によって影響されるけれども、実験的検討によれば、液体の物性値が以下の範囲のとき、

$$dd \geq 3 \text{ mm} \quad (5.10)$$

であれば、充分であった。

$$0.8 \leq \text{比重 } \rho \leq 1.125 \text{ g/cm}^3、$$

$$28 \leq \text{表面張力 } \gamma \leq 78 \text{ dyne/cm、}$$

$$\text{粘度 } \eta \leq 10 \text{ cp}。$$

5.3 製造法

5.3.1 接合設計

多孔板型超音波霧化器の製造の最終段階は、圧電振動子、振動板、およびボディーの接着工程である。この接着工程を容易に一工程で実現するために、ボディーは、Fig. 5.14に示すようなボディー

A と ボ ディー B よりなる二分割構造を採用した。なお、ボディー A と ボ ディー B とはネジ止め構造で十分な振動特性が得られた。したがって、接着は Fig. 5.15 に示すように、ボディー A に圧電振動子と振動板を半田付する構成で行い、振動体ユニットを形成するものである。

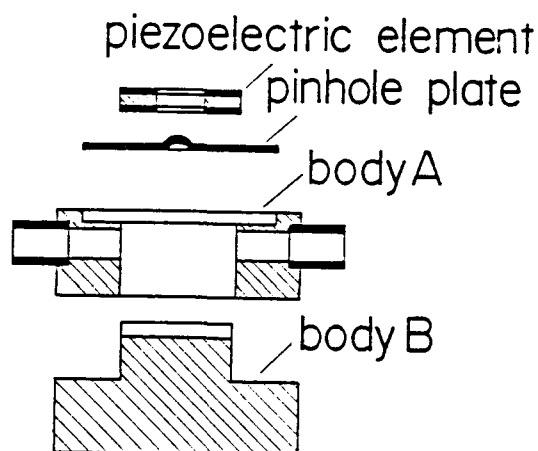


Fig.5.14 Structure of the atomizer with separated bodies, body A and body B.

Fig. 5.15 において、半田面 A は、バイモルフ振動体としての構造を形成する上で重要である。実験的検討によれば、接着半田層の厚さ t_A は、 $10\mu\text{m}$ 以下で均一であることが、良好な振動特性を得る上で必要である。また、同様の理由で、圧電振動子と振動板の接着完了時における中心軸ずれは、 $100\mu\text{m}$ 以下で均一であることが必要である。圧電振動子の内径に沿う半田の流れ部は、内径 d_{ci} を事実上変化させるように作用する。すなわち、半田の流出量が過大になると、第三章で示した内径 d_{ci} の最適設計値を実質上変えてしまう結果となる。

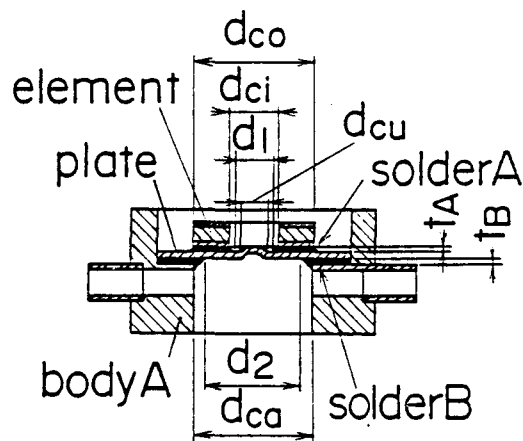


Fig.5.15 Structure of the soldered vibrating system composed of the element, the plate and the body A.

また、半田面 B は、バイモルフ振動体を圧電振動子の外周に沿って支持する作用を実現するために、非常に重要な工程である。したがって、この半田面 B のキャビティー内周に沿う半田流出量も、最適設計通りの振動特性を実現する上で、極めて注意すべきパラメータである。この半田面 B のキャビティー内周に沿う半田流

出量が過大になると、実質上、キャビティー直径 d_{ci} を変化させる結果となり、やはり振動系の最適設計値からのずれが生じてしまう。なお、半田面 B の厚さ t_b は、厚いほど振動体を支持する力が低下するので、噴霧効率が低下する傾向を示すと考えられるが、実験的には $100\mu\text{m}$ 以下であれば、その影響は無視できる程度のものではあった。

Fig. 5.16(a)および(b)は、それぞれ、前述した半田面 A および B の半田流出量を、それぞれ流出径 d_1 および d_2 をパラメータとして取上げ、それらによる霧化特性への影響を実験的に調べたものである。直径 $80\mu\text{m}$ のノズルが 61 個設けられており、使用液体は常温の灯油である。この実験結果は、流出径 d_1 および d_2 がそれぞれ実質的に、圧電振動子の内径 d_{ci} およびキャビティー直径 d_{cu} を変化させてしまい、過度に流出が生じた場合は振動系の整合を完全にくずしてしまうことを示唆しており、上述した推察を裏付けるものである。特に、半田面 B はその厚さが厚くなり易いので、その影響が大きいと考えられる。

このような流出径 d_1 および d_2 the diameter d_1 and d_2 .

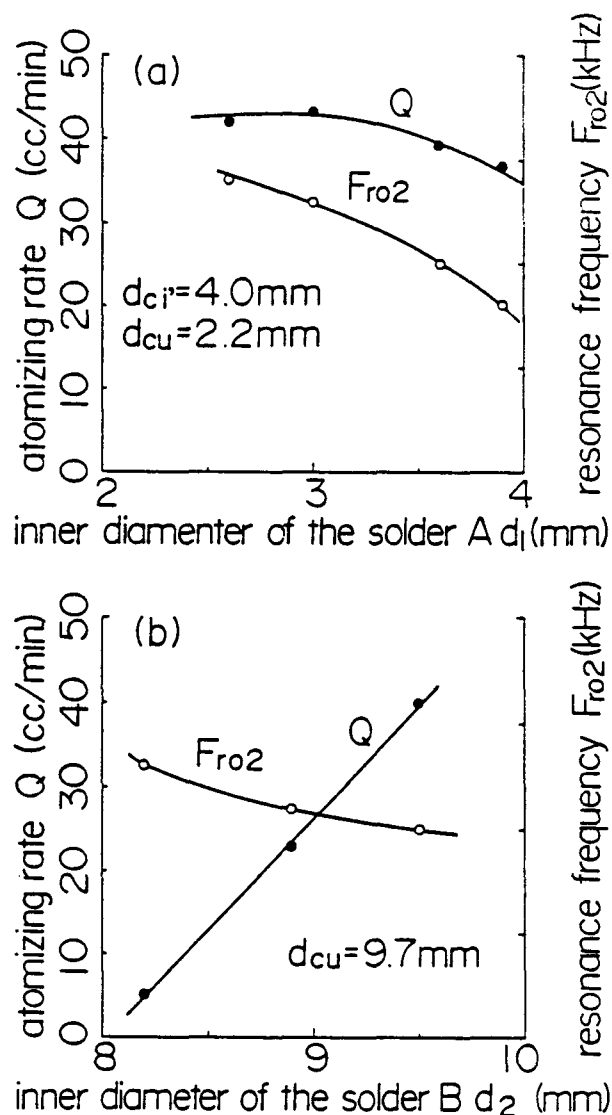


Fig. 5.16 Effects of the soldering conditions. (a) Performance of the atomizer as a function of the inner diameter of the solder A. (b) Performances of it as a function of the inner diameter of the solder B.

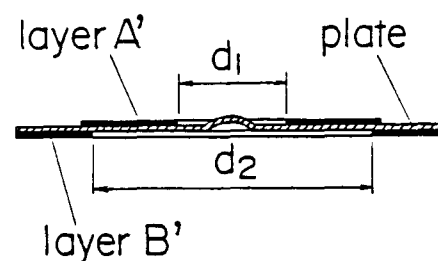


Fig. 5.17 Structure of the plate with layer A' and B'. They are formed in order to control

の影響による霧化器特性の不安定さ、バラツキを防止するためには、Fig. 5.17 に示すように、振動板の上下面に半田が付易い Cu 等で形成した被着層 A' および B' を設け、事実上、流出径 d_1 および d_2 を規制する構成とすることが必要である。この被着層 A' および B' の形成方法としては、その精度上の理由等から、フォトエッチングを利用した Cu 蒸着法が適当である。この場合の流出径 d_1 および d_2 の最適値を実験により求めると以下の結果であった。

$$d_1 = 3.4 \text{ mm}, d_2 = 9.3 \text{ mm} \quad (5.11)$$

5.3.2 接合条件

(イ) 半田付け

半田材料は Sn、Pb、In、Zn 等の主成分を組み合わせた各種のものがある。半田付けに対しては、一般的に、Sn-Pb 系より成る半田材料が用いられ、その半田付け性能は、表 5.4 に示すように、Sn および Pb の合成比率で変化し、様々の目的あるいは用途に応じて使い分けられている。

Table 5.4 Comparison of solder's properties.

Compound ratio		melting temperature (°C)	density (g/cm ³)	抗張力 (kg/mm ²)	せん断力 (kg/mm ²)
Sn(%)	Pb(%)				
100	0	232	7.29	1.49	2.02
95	5	222	7.40	3.15	3.15
60	40	188	8.45	5.36	3.47
42	58	243	9.15	4.41	3.15
0	100	327	11.34	1.42	1.39

振動板の接合には、機械的性能に最も優れた Sn60% のものが適切であるので、これを用いた。実際に用いた半田の成分は、半田の流れ性や母材材質等を考慮して、Sn60%、Pb38%、Ag2% とした。

Sn60% 半田を用いたとき、その溶解温度は 188°C であるが、実際の半田付け処理温度は高すぎても低すぎても不都合である。圧電振

動子の分極劣下をできるだけ少なくするためには、処理温度は低いほうが良い。

Table 5.5 Optimization of soldering temperature for assembling the vibrating system.

soldering temperature (°C)	result of soldering	result of flux washing
270	X	X
250	X	X
240	△	○
230	○	○
220	○	○
210	○	○
200	△	○

表5.5は、半田流れと半田フラックスの半田付け後の洗浄性を処理温度に対して実験的に調べたものである。表5.5より明らかのように、この実験結果は210～230℃の処理温度が最適であることを示している。

また、Fig. 5.18は、半田処理時間を5分としたときの処理温度に対する圧電振動子の分極劣下特性を実験により求めたものである。この実験結果から、圧電振動子の極端な分極劣下は約270℃前後から生じ始めることが明らかになった。

したがって、以上の検討結果から、上記の半田付け処理上最適な210～230℃の処理温度では極端な分極劣下は発生せず、圧電振動子の性能劣下を生じることなく半田付けすることが可能であることが明らかにできた。

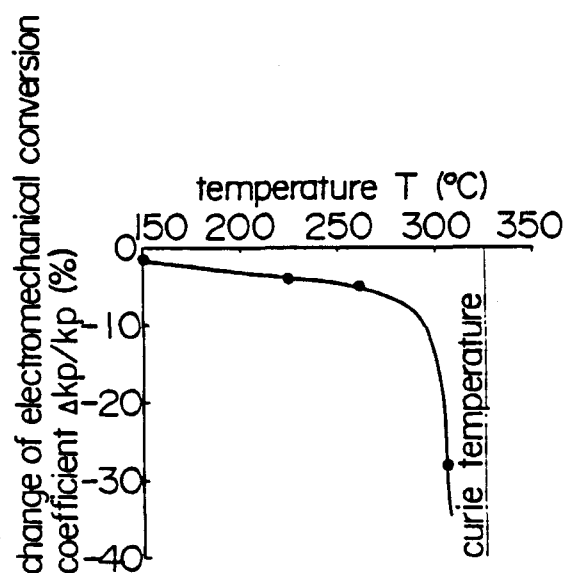


Fig.5.18 Change of electromechanical conversion coefficient $\Delta K_p / K_p$ as a function of the treating temperature T . The treating time is five minutes.

(ロ) 信頼性

前述したように、半田付け処理に際しては、 $220 \pm 10^\circ\text{C}$ 前後の高温にさらされ、圧電振動子、振動板およびボディーは、そのなかで一体に接合される。ここで重要なことは、これら三つの構成部品の熱膨脹係数の差である。

圧電振動子はセラミック材料であるので熱膨脹係数が小さく、かつ、特に引っ張り応力に対して脆いという欠点がある。表 5.6 はこの圧電材料の引っ張りおよび圧縮強さを調べた結果であり、圧縮強さは引っ張り強さに比べておよそ一桁大きいことがわかる。

Table 5.6 Strength of the piezoelectric element
against pull and push force.

strength against pull force	300 ~ 500 (kg/cm ²)
strength against push force	6000 ~ 6500 (kg/cm ²)

このような理由により、半田接合時の熱膨脹係数差による残留応力は、霧化器の信頼性を左右する大きな要因となるのでこれを検討した。

表 5.7 は、圧電振動子および各種材料で構成したボディーの物性比較表である。

Table 5.7 Properties of materials of the element and the body.

	material	component	coefficient of expansion α ($1/^\circ\text{C}$)	Young's modules E (kg/cm ²)
piezo electric element	PCM-5		4.5×10^{-6}	6.4×10^3
	B s B M	30Zn-Cu	18×10^{-6}	1.0×10^4
	S U M	Fe(S,Pb,Mn)	12×10^{-6}	—
b o d y	T M B	45Ni-Fe	8×10^{-6}	1.6×10^4
	P B	42Ni-Fe	5×10^{-6}	1.6×10^4
	S V R	29Ni-17Co -Fe	4.5×10^{-6}	1.4×10^4

振動板の厚さは極めて小さいので無視することができ、熱膨脹係数

差による応力は圧電振動子およびボディーの間で生じると考えてよい。

すなわち、Fig. 5.19に示すモデルで考えると、圧電振動子およびボディーの熱膨脹係数差により生じ、その結果、圧電振動子に加えられる応力 σ_{push} は、次式で表すことができる。

$$\sigma_{push} = \Delta T \cdot (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot E_1 \quad (5.11)$$

ここで、 α_1 および α_2 は、それぞれ圧電振動子およびボディーの熱膨脹係数であり、 E_1 は圧電振動子のヤング率である。また、 T は、180℃で半田が凝固するとすれば、室温（20℃）において、160deg.である。

式(5.11)を用いて、表5.7に示した各種ボディーの熱膨脹係数 α_2 と、圧電振動子に加えられる応力 σ_{push} の関係を求めると、

Fig. 5.20 のようになる。この応力 σ_{push} の存在を圧電振動子の静電

容量の変化 $\Delta C/C$ を測定して確認した。Fig. 5.21は、ボディーと圧電振動子との熱膨脹係数差により生じる、半田付け前後の圧電振動子の静電容量変化 $\Delta C/C$ を実験的に調べた結果である。静電容量変化 $\Delta C/C$ は熱膨脹係数差に応じて圧電振動子に生じる応力 σ_{push} に比例して発生していることを示している。

この応力 σ_{push} による信頼性への影響を調べるために、熱衝撃試験を実施した。試験は -20℃ 25℃ 150℃ の温度条件で各ステージに20min. とした。また、ライフエンドの判定は、噴霧量 Q が20%低下

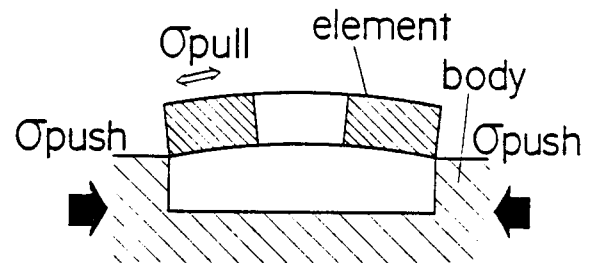


Fig.5.19 Schematic diagram of the element stressed by the body.

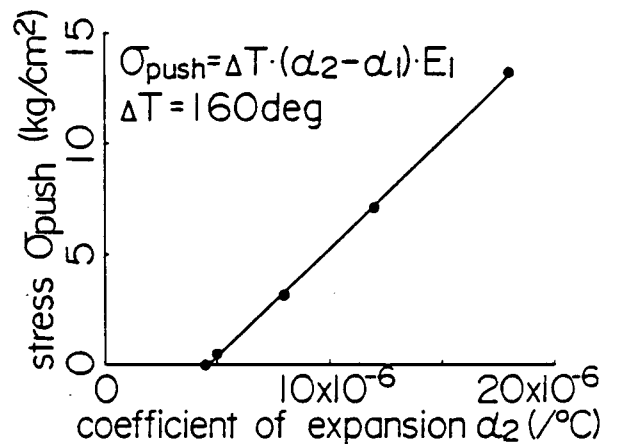


Fig.5.20 The stress σ_{push} , caused by the thermal remain stress of the body, as a function of the coefficient of expansion α_2 of the body.

した時をライフエンドとすることで行った。

Fig. 5.22は、上記熱衝撃試験の結果である。図より明らかなように、熱膨脹係数 $\alpha_2 = 5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ の42Ni材のボディーを用いることにより、極めて高い信頼性を得ることが可能であることが確認でき、圧電振動子およびボディーの熱膨脹係数を合わせることが高信頼性を保証した接合を可能にすることを明らかにできた。

しかし、42Ni材を用いた場合は、 $N = 1800$ cycles 経過後においても未だライフエンドに達していないので、実際の実用化に当たっては、加えられる熱ストレスの程度に応じたボディー材料を選択する余地が充分あると考えられる。したがって、例えば45Ni材やSUM材などのような材料であっても充分な信頼性を保証できる場合も多いと考えられる。

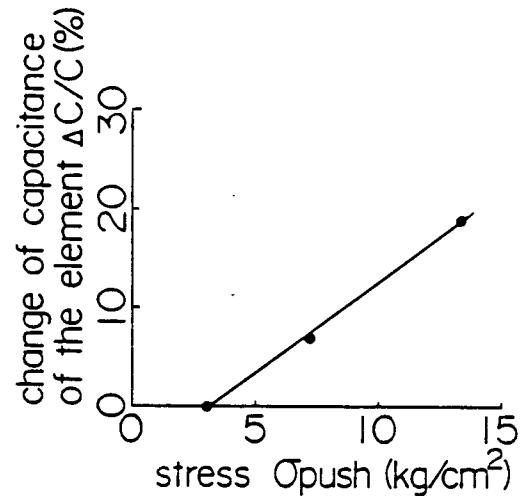


Fig. 5.21 Change of capacitance of the element $\Delta C/C$ as a function of the thermal stress σ_{push} .

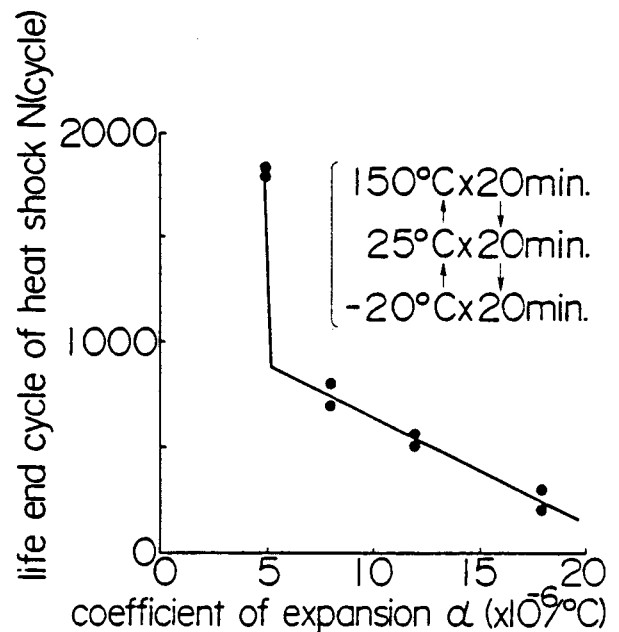


Fig. 5.22 Life-end cycle of heat shock as a function of the coefficient of expansion α_2 of the body.

5.4 結 言

本章においては、第四章で示した最適設計法に基づいて設計した霧化器を製造するための、より具体的な構造設計ならびに製造方法について実験的に検討した。

その結果、各構成部品（圧電振動子、振動板およびボディー）の設計ポイントと、それが霧化器の特性に与える影響度合いを明らかにすることができた。また、製造、特に接合工程の諸条件が及ぼす霧化特性への影響および信頼性への影響を明らかにし、安定な特性を示し、かつ、信頼性の高い霧化器を製造するための基礎的な製造工法とその諸条件を確立することができた。

また、薄い振動板（厚さ $50\mu\text{m}$ ）に微小ノズル（直径 $80\mu\text{m}$ ）を設けるという構成であるため、ノズルの磨耗や振動板の疲労劣化などのおそれが考えられる。しかしながら、少なくとも液体として灯油を用いた連続噴霧動作試験結果によれば、約5000時間経過後においてもその傾向が観察されておらず、問題の無いことが確認されている。従って、ステンレス板（SUS304）を振動板として用いる限りはこれらの点に関しても高い信頼性があると言えよう。

ここに示した設計法ならびに製造法は、まだまだ工業的なレベルで十分なものではないけれども、この検討結果を基礎的資料として、より工業化に適した詳細設計法、製造法を確立することが可能であると考えられる。

第六章 噴霧能力の間欠制御方法

6.1 緒言

多孔板型超音波霧化器を実際の工業的用途に応用する場合、空気あるいはガス等と霧化粒子とを混合して用いる場合が少なくない。例えば、液体燃料燃焼装置に応用する場合には、燃焼特性あるいは排ガス特性を良好に維持するために、燃焼空気と燃料との混合比率をその燃焼装置に適した値に保って燃焼させることが必要となり、燃焼空気または燃料の少なくとも片方をきめ細かく調整することが要求される。したがって、このような用途にこの霧化器を応用する場合、それらの混合比制御を良好に行うためには、噴霧能力の制御は極めて重要であり、高い直線性と制御の簡単さを有する噴霧能力制御法が望まれる。

そこで、本章では、多孔板型超音波霧化器の特長を損うことなく上記目的を達成するために、デューティー（間欠）制御による噴霧能力制御を取り上げ、その直線性と、振動系の応答特性、液体供給系の諸条件、デューティー周波数等との関係を実験的に検討し、簡単で高い直線性を保証するためのデューティー制御条件を明らかにする。⁴⁰⁾

6.2 デューティー制御法

霧化器の噴霧能力を制御する方法として、駆動電圧 V_0 、又は、駆動周波数 f_0 を調整する方法が有効であることが、第二章の Fig. 2.12 および第三章の Fig. 3.4 に示した電圧特性および周波数特性から推察されよう。しかし、これらの方法は、いずれも振動板の振動速度を変えることによるものであるから噴霧パターンの乱れや粒径の変化などの不都合を伴わざるを得ない。

そこで、このような場合に一般的に用いられるデューティー制御（間欠制御）法の適用を試み、その制御特性を検討した。すなわ

ち、Fig. 6.1 に示す実験システムにより、デューティ制御による噴霧能力制御について調べた。発振器 1 (OSC₁)により周波数 f_0 の電圧 V_0 で霧化器 (atomizer) を駆動する構成とし、発振器 2 (OSC₂)により発振器 1 を周波数 f_d のデューティ周波数で間欠発振制御するものである。なお、ここで使用する液体は常温の灯油である。

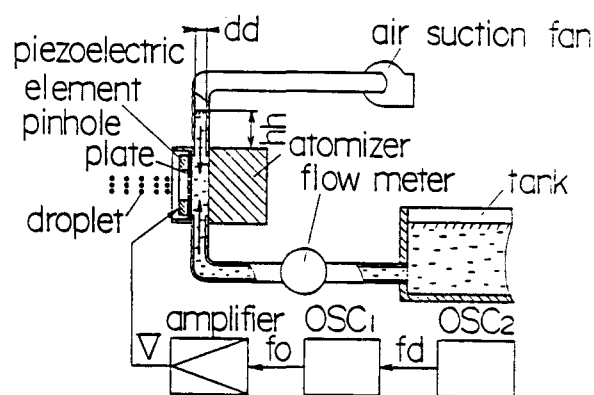


Fig.6.1 Schematic diagram of the measurement system.

6.3 デューティ周波数の検討

デューティ制御を行う場合に、まず第一に決定すべきであり、かつ、最も注意すべきパラメータは、デューティ (間欠) 制御の周期、すなわち、デューティ周波数 f_d である。

Fig. 6.2 は、このデューティ周波数 f_d をパラメータとし、横軸にデューティ比

($\alpha = t_1 / t_2$)、縦軸に単位時間当たりの噴霧量 Q をとった霧化器のデューティ制御特性である。ここに t_1 、 t_2 は、図中に示すように、それぞれバーストの時間とこのバーストの間欠周期 ($1 / f_d$) であり、駆動電圧 V_0 は $141 V_{pp}$ である。この図から f_d が低いほど直線性に優れ、理論値に近い制御特性を示していることが分かる。

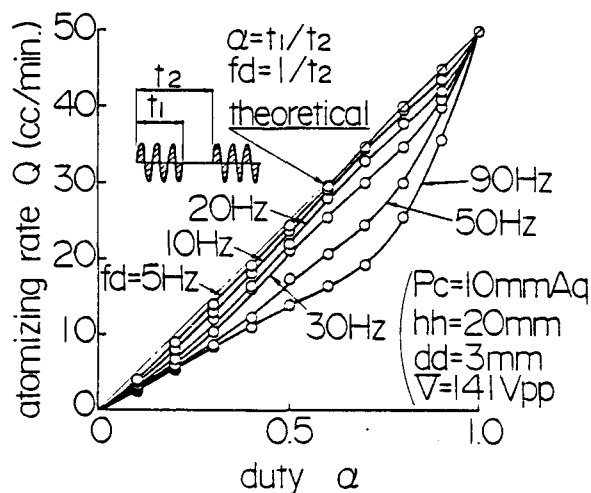


Fig.6.2 Duty control characteristics of the atomizer referring to the duty control frequency f_d .

制御特性の直線性の点からは f_d が低い方が好ましいことになる

が f_d が低すぎると噴霧粒子の連続性を保てなくなり、燃焼等の応用では火炎の吹き消えなどが生じ問題となる。実験観察によれば、 $f_d > 20\text{Hz}$ 程度とすることによりほぼ見掛け上連続的な噴霧パターンを得られ、またこの場合、予備的な燃焼実験でも火炎の吹き消え現象が生じなかった。従って、ここではデューティー周波数 f_d を 30Hz に選んだ。

Fig. 6.3(a)および(b)は、 $f_d = 30\text{Hz}$ 、デューティー比 $\alpha = 1.0$ 、および 0.5 としたときの噴霧パターンをそれぞれ示すものであり、 $\alpha < 1$ でもほぼ連続した噴霧パターンを得ている。

なお、噴霧粒子の飛翔速度 V_d は、噴射直後は約 5.6m/s であるが、空気の粘性抵抗によりすぐに減少してしまう。

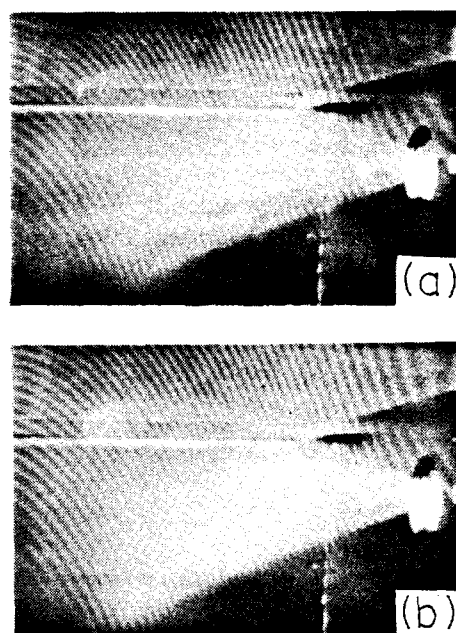


Fig.6.3 Photographs of spray patterns.
(a) $\alpha=1.0$ (b) $\alpha=0.5$

6.4 直線性の改善

デューティー制御特性の直線性をより改善することを目的として、デューティー制御に関連する諸条件の検討を行った。

6.4.1 振動系の応答特性の検討

霧化器の振動系は、既に述べたように、圧電振動子と振動板とから構成されたバイモルフ振動体である。振動板のほぼ中心の位置の振動振幅立ち上がり、液体を噴霧させながら、光ファイバーを利用したレーザードップラー法により測定した。²⁸⁾

Fig. 6.4 は振動板の振動振幅 δ の立ち上がり応答特性であり、時定数 $\tau = 0.15 \sim 0.2 \text{ ms}$ の応答特性を示している。振動系のクォリティーファクター Q_r と時定数 τ との関係は、 $\tau = Q_r / (\pi f_0)$ である。 $Q_r = 10 \sim 20$ 程度であるので、その最大値は $\tau = 0.2 \text{ ms}$ 程度と考えるとよい。

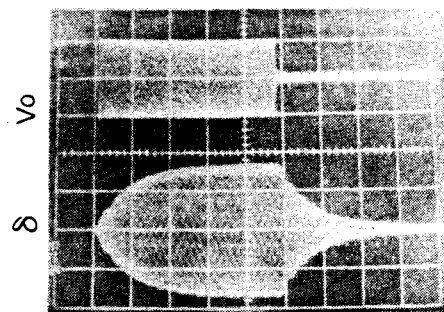


Fig.6.4 A photograph of the rise time of the displacement of the vibrating system.

$f_d = 30 \text{ Hz}$ 、 $\alpha = 0.5$ の時、霧化器の動作時間 t_i は、 $t_i = 16.6 \text{ ms}$ である。従って、時定数 τ の直線性に及ぼす影響は平均 0.3% 以下であり、比較的小さいと考えるとよい。

6.4.2 液体供給系の条件の検討

霧化器より噴霧される液滴群は、 $f_d = 30 \text{ Hz}$ の間欠噴霧状態となるから、Fig. 6.1 中に矢印で示す液体供給系内の液体の流れもまた間欠流となると考えられる。従って、この間欠的な流れがいかにスムーズに実現できるかにより、デューティー制御の直線性の良さが決まると考えられる。

Fig. 6.1を参照すると明らかな様に、供給パイプは長くかつタンクに接続されている。従って、その中の液体の慣性はかなり大きく、 $f_d = 30 \text{ Hz}$ の間欠流をスムーズに実現することが困難である。一方、排気パイプ中の液柱の高さはそれに比べて短いので、その慣性

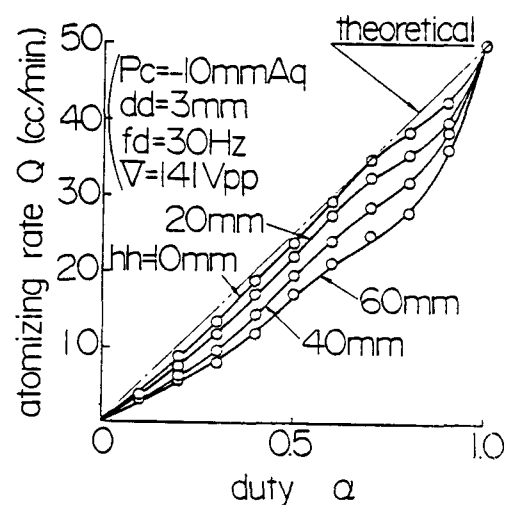


Fig.6.5 Duty control characteristics of the atomizer referring to the hh.

が小さく、かつ、キャビティのステイフネスに付加されるそれとして作用すると考えることができる。

従って、この排気パイプの構成を適正に選ぶことにより、高い直線性を保証した液体供給系を実現することができる。

Fig. 6.5および Fig. 6.6は、排気パイプの条件として、その直径 dd および液柱の高さ hh を変化させたとき、デューティー制御の直線性がどのように変化するかを調べたものである。

図より明らかなように、 hh が小さいほど、また、 dd が大きいほど直線性が改善される。即ち、これらのパラメータは、排気パイプの中の液柱の慣性を小さく、また、ステイフネスを大きくしているものと考えられ、前述した直線性保証の考え方の妥当性を示唆するものである。

以上の実験結果から、 $hh \leq 10\text{mm}$ 、 $dd \geq 3\text{mm}$ 、とすることにより、平均直線性誤差 ± 5 以内を実現できることが明らかになった。

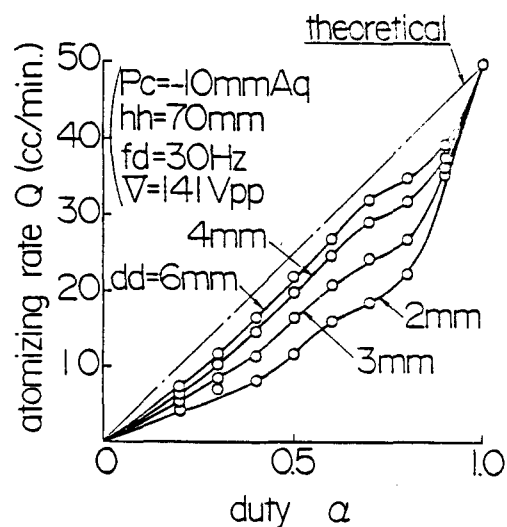


Fig.6.6 Duty control characteristics of the atomizer referring to the dd .

6.4.3 キャビティー内圧 P_c の検討

キャビティー内圧 P_c は、霧化器の安定な噴霧動作を保証する上で極めて重要である。²⁵⁾ 従って、デューティー制御特性の直線性に対してもその影響が少なくないと予想され、これについて検討した。

キャビティー内圧 P_c と噴霧量 Q との関係を、駆動電圧 V をパラメータとして測定した。動作周波数 f は第二共振周波数 F_{r2} であり、使用液体は灯油である。実験結果を Fig. 6.7 に示す。 $P_c \leq 0$ のとき、 P_c と Q との関係はほぼ一定に保たれる。しかしながら、 $P_c > 0$ の場合、安定な噴霧動作が困難となる。5.2.2節で示したような球殻状突起部を振動板が有している場合においては、 $P_c > 0$ となると、ノズルからの液漏れが発生するので、この現象は実験結果と一致している。また、駆動電圧 V が低いほどこの傾向が強くなっている。従って、デューティー制御時に生じる間欠制御の過渡状態のときには、この P_c の影響が少なくないと推測される。

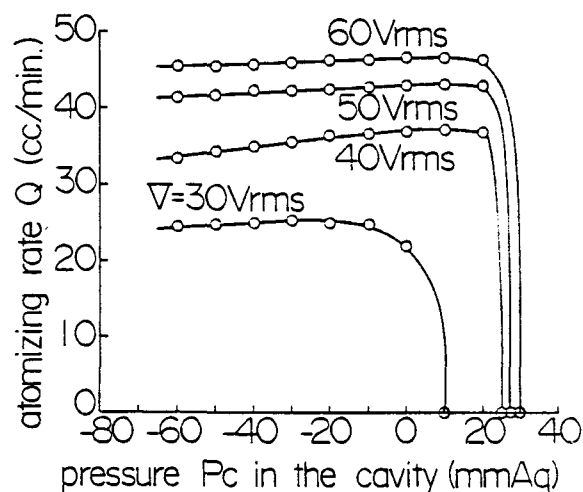


Fig.6.7 Performances of the atomizer as a function of the P_c where the drive voltage is constant.

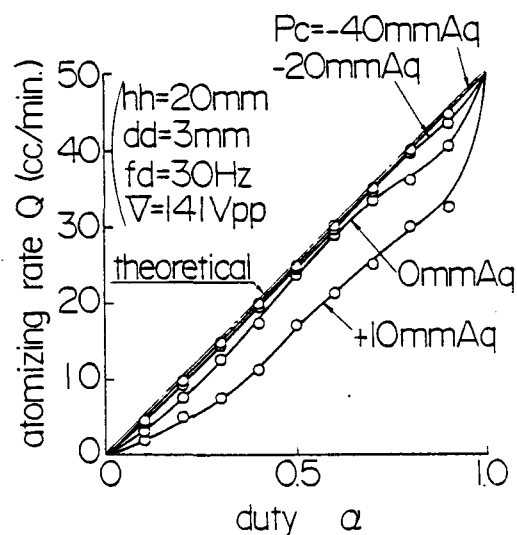


Fig.6.8 Duty control characteristics of the atomizer referring to the P_c .

Fig. 6.8 はこの影響を調べたものであり、デューティー制御特性に対する内圧 P_c の影響を示している。前述した P_c の影響が顕著に現れており、 $P_c = +10\text{mmAq}$ では、著しく直線性が悪くなっている。

Fig. 6.9 は、デューティー α をパラメータとして P_c の影響を調べたものである。デューティー制御特性の直線性に対する影響は極めて大きく、特に、 $P_c > 0$ ではデューティー制御を行うことで噴霧量が大きく減少している。また、逆に、 $P_c = -40 \text{ mmAq}$ では極めて良い直線性を示しており、内圧 P_c をこの値に保つことが良好な直線性を実現する上で重要な条件であることが明らかになった。

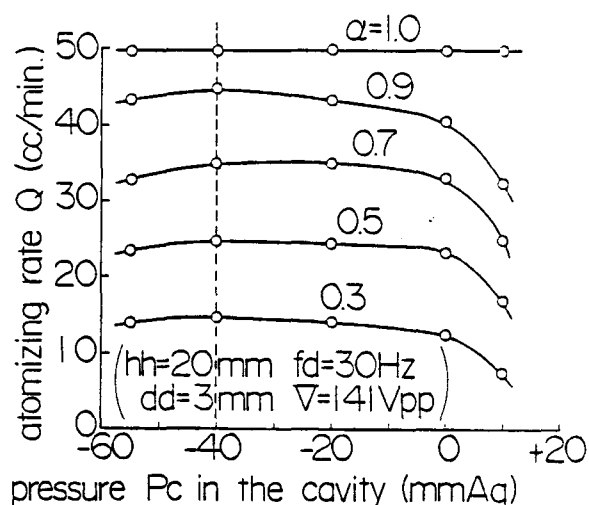


Fig. 6.9 Performances of the atomizer as a function of the P_c where α is constant.

6.5 適正化した霧化器の制御特性

霧化器の噴霧能力制御に対してデューティー制御法の適用を試み、デューティー周波数 f_d 、振動系の応答特性、液体供給系の諸条件、キャビティー内圧 P_c 等が、能力制御特性の直線性に与える影響を検討した。

その結果、以下の事項を明らかにすることができた。

- (1) f_d が低いほど直線性が良い。
- (2) $f_d > 20 \text{ Hz}$ ならばほぼ連続した噴霧パターンと見なし得る。
- (3) 振動系の応答遅れによる直線性誤差は、平均、0.3% 以下である。
- (4) 排気パイプ中の液柱の直径 dd が大きいほど直線性が良くなる。
- (5) 排気パイプ中の液柱の高さ hh が小さいほど直線性が良くなる。
- (6) キャビティー内圧 P_c は、少なくとも $P_c < 0$ が必要であり、望ましくは $P_c = -40 \text{ mmAq}$ が適当である。

以上の結論を基にして、下記の条件でデューティ制御特性を調べた結果が Fig. 6.10である。図より明らかなように、平均3%以下の直線性誤差を実現している。

- (a) $f_d = 30 \text{ Hz}$
- (b) $P_c = -40 \text{ mmAq}$
- (c) $dd = 3 \text{ mm}$
- (d) $hh = 10 \text{ mm}$

この結果は、この霧化装置の噴霧能力制御特性が上記(a)～(d)のパラメータにより支配されるものであり、かつ、これらのパラメータを適正值に制御することで十分実用に耐え得る高い直線性を実現できることを示している。

また、このようなデューティ制御法により噴霧能力を制御し

た場合、次のような不都合が生じ易くなる。すなわち、キャビティ内圧 P_c やその他の液体供給条件によっては、ノズルからの液だれが生じ易くなる。また、振動系の立ち上がり時および立ち下がり時は振幅の小さい期間が存在するので、この期間にはサテライトと呼ばれる極微小な液滴が発生し易くなる。このような液だれやサテライトの発生が顕著な場合は、当然噴霧能力制御の直線性に影響を与え、直線性を低下させると考えられる。

上記に示すように高い直線性を実現できるということは、このような液だれやサテライトの発生を非常に少なく抑制することが可能であるということを示唆している。従って、噴霧能力制御の直線性を実現する条件は、同時に液だれやサテライトの発生を抑制する条件であると考えることができる。すなわち、上記(a)～(d)の条件はこれらの不都合を抑制する条件でもあると言えるのである。

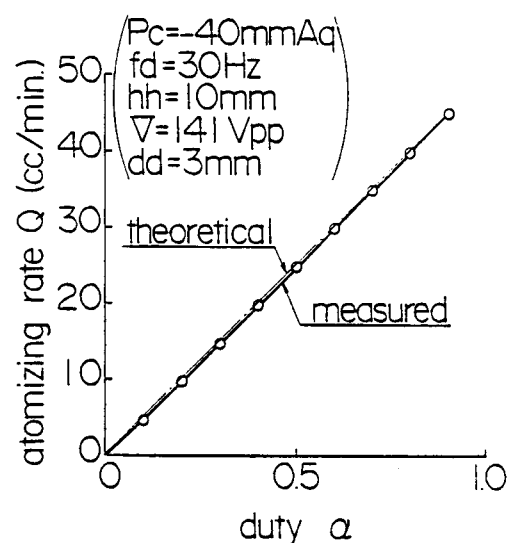


Fig. 6.10 Duty control characteristics of the atomizer on the optimum conditions.

6.6 結 言

多孔板超音波霧化器の制御特性について調べ、(i) デューティー制御法の適用可能性、および、(ii) 直線性に対する影響要因と実用上十分な直線性を得るための条件を検討した。

この結果によりこの霧化器の噴霧能力制御特性とその直線性保証条件を明らかにすることができた。また、これらの条件が液だれやサテライトの発生などの実際の応用上の不都合を抑制する条件であることも示すことができた。従って、様々な工業的用途に対する応用検討の一助となると考えられる。

第七章 液体の物性が霧化特性に及ぼす影響

7.1 緒言

多孔板型超音波霧化器の振動系を構成する振動板は、液体に接する構造であり、かつ、小孔から液滴を噴出するという機構である。したがって、その振動系に対する液体の影響が少なからず存在することが予想され、実際に応用する場合には、液体の物理的性質と霧化特性との関係を明らかにし、適正な設計を行うことが必要である。特に、適用可能な液体の物理的性質の範囲を明らかにしておくことは、水、液体燃料、薬液等の種々の液体の霧化装置として応用する場合極めて重要であると考えられる。

そこで本章では、実際に応用される場合を想定した様々な液体の物理的性質と霧化装置の電気的特性および霧化特性との関係を実験的に検討し、適正な設計指針、並びに応用可能範囲を明らかにする。⁽¹⁾

第二章に示した霧化器の動作原理からその諸特性に対する影響が大きいと推察される物理的性質、すなわち、比重 ρ 、粘度 η 、表面張力 γ および液体中の溶存空気量に着目した。

表7.1は、実用上重要な液体燃料と上記の観点から選んだその他の液体の物理的性質を示す表である。これらの液体を用いて霧化器の諸特性が受ける影響を調べ、液体の物理的性質と霧化器の特性との関係を明らかにした。

なお、実験において使用した霧化器の振動板は、厚さ $50\mu\text{m}$ のステンレス板（SUS304）であり、ノズルはハーフェッチング法で作製した。ノズルの直径は $80\mu\text{m}$ であり、61個設けられている。また、使用した液体の温度は常温である。

7.2 共振周波数に与える影響

噴霧用の供試液体として表7.1の液体を用いた時の霧化器の第

2 共振周波数 F_{r02} を調べ、比重 ρ 、粘度 η 、表面張力 γ および溶存空気量に対する F_{r02} の依存性を検討した。

Table 7.1 Physical properties of liquid.

No. Liquid	Density(ρ)	Viscosity(η)	Surface tension(γ)
A kerosene	0.79 g/cm ³	1.5 cp	28 dyne/cm
B degassed kerosene	0.79	1.5	28
C light oil	0.80	2.0	28
D pure water	1.00	1.0	72.8
E triethylene glycol	1.05	7.5	36.0
F ethylene glycol	1.115	20.9	47.7
G polyethylene glycol	1.125	48.0	44.5

temperature : 20°C

Fig. 7.1(a)、(b)、および(c)は、それぞれ、 F_{r02} の比重 ρ 、粘度 η 、表面張力 γ に対する依存性を示す図である。

共振周波数 F_{r02} は、比重 ρ 、粘度 η に対して依存性が認められ、表面張力 γ の共振周波数 F_{r02} に対する影響は極めて小さいと考えられる。

音圧 P_s は、圧電振動子と振動板より成る振動系に対する放射インピーダンス Z_r の反作用として発生するので、共振周波数 F_{r02} はこの Z_r の影響を受ける。 Z_r は ρ に比例するので ρ に対する F_{r02} の依存性の存在は妥当な結果である。

一方、 η はこの Z_r に無関係なパラメータであるので理論的には F_{r02} は η に依存しないと考えられ

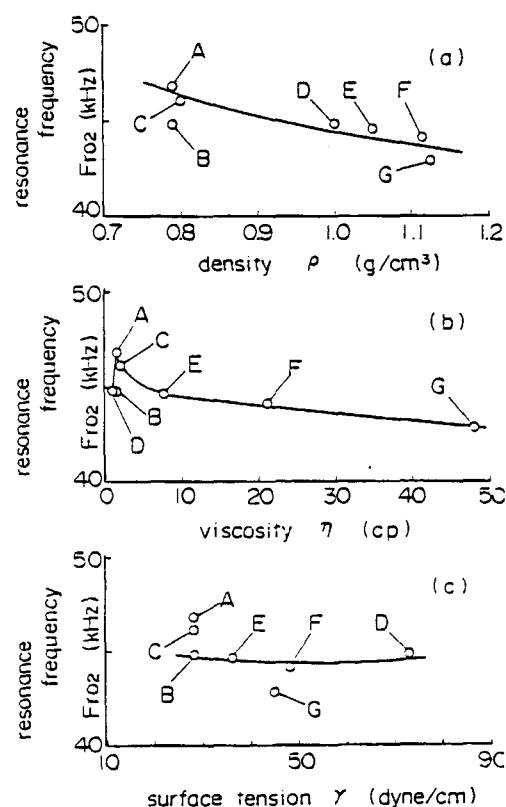


Fig.7.1 Influences of liquid's physical properties on the resonance frequency F_{r02} . (a) Influence of the density ρ . (b) Of the viscosity η . (c) Of the surface tension γ .

る。従って、Fig. 7.1(b)の低粘度領域に於ける共振周波数 F_{r02} の粘度 η に対する依存性は認め難い事、粘度 η の大きい液体は同時に比重 ρ も大きい事を考慮すれば、 F_{r02} の η に対する依存性は少ないとの結論が妥当である。

これらの事実、及びこの振動系の動作原理を考慮して推察すれば、共振周波数 F_{r02} は比重 ρ によって主に影響を受けると考えることができる。

また、通常の灯油である供試液体 A と溶存空気を脱気した灯油である供試液体 B (degassed) とを比較すると溶存空気の有無によりその共振周波数 F_{r02} が変化している。

Z_L は前述した比重 ρ と音速 c に比例する。溶存空気を脱気することによりキャビテーションが生じにくくなるので体積圧縮率 κ が変化して音速 c が変化し、結果として Z_L が変わって F_{r02} が変化していると考えられる。

以上の結果、共振周波数 F_{r02} は比重 ρ 及び溶存空気量によって影響を受けることが明らかになった。しかし、その影響度合いは実験した ρ および溶存空気量の範囲に於いて ± 2 kHz 以下であり、振動系の Q が 10~15 程度であるので、この程度の変化は実用上問題ないと考えられる。

7.3 噴霧量に与える影響

霧化器の噴霧量 W (一分間当たりの噴霧された液体の重量) と液体の物理的性質との関係は極めて重要であり、これについて検討した。

この検討に於いて、霧化器の動作周波数は各々の供試液体に対する共振周波数 F_{r02} であり、動作電圧は 60 Vrms 一定である。また、噴霧量 W は、噴霧された液体を受け止めて回収する方法で測定した。

Fig. 7.2(a)、(b)、および(c)は、それぞれ、比重 ρ 、粘度 η 、

表面張力 γ に対する噴霧量 W の依存性を示す図である。

供試液体 F および G は全く噴霧することができなかったが、これらの供試液体 F および G と他の供試液体との関係を検討すると明らかなように、表 7.1 で示した物理的性質の範囲の中では、噴霧の可否を決定する要因は粘度 η であると考えられる。即ち、粘度 η が 10~20cp の間に噴霧可能限界が存在すると考えられ、図より約 15cp がその限界値である。

振動的な Poiseuill の法則によれば、液体の粘度 η が大きくなると振動的に非粘性流体と見なせなくなるので振動系の境界条件が全く変わってしまうものと考えられる。また、流体力学に於いてノズルからの液体の噴出はくびれ係数が関与し、粘度 η が大きくなるとノズル径が実質上小さくなって

噴霧できなくなる。³⁶⁾ 上記結果はこれらの理由によるものと考えられ、この霧化器の動作機構を考慮すれば、粘度 η はその噴霧限界を決定する物理的性質であると言える。

Fig. 7.2(a) および (b) は、粘度 η が約 10cp 以下の場合、比重 ρ と粘度 η には無関係に噴霧量 W が決まるという事を示している。従って、噴霧される液体の粒径は比重 ρ が大きいほど小さいものになると考えることができ、比重 ρ が大きい液体ほど微粒化が促進されるという特質がある。

表面張力 γ は、高粘度の供試液体 F および G を除くと Fig. 7.2 (c) のように噴霧量 W に対して明らかな相関関係を示している。ノ

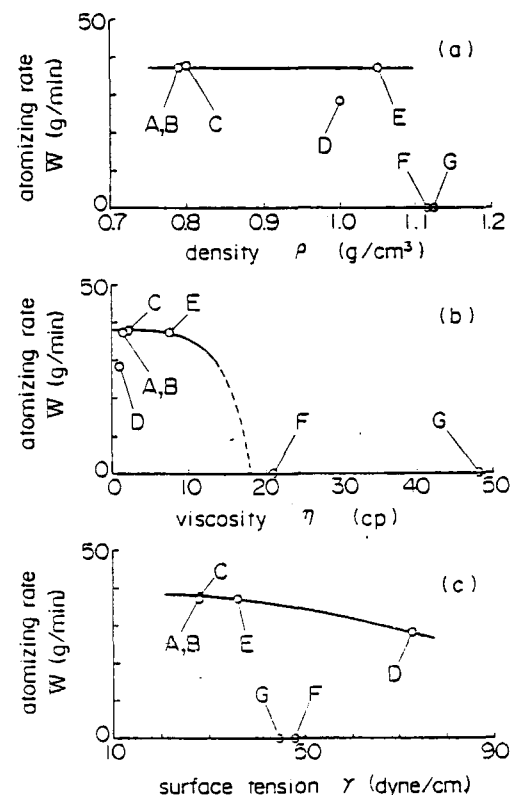


Fig.7.2 Influences of liquid's physical properties on the atomizing rate W . (a) Influence of the density ρ . (b) Of the viscosity η . (c) Of the surface tension γ .

ズルからの噴出は式(2)を満たすことが必要であるから、噴出するためには表面張力 γ が大きくなるほど大きな音圧 P_a が必要となる。即ち、表面張力 γ が大きい液体ほど、表面張力 γ を打ち破る為の大きなエネルギーを必要とする事を意味している。言い換えると、振動板によって液体に与えられたエネルギーから、弁作用を果たす表面張力 γ を打ち破るのに要するエネルギーを差し引いた残りのエネルギーで液体が噴射される事を示すものである。

また、溶存空気の有無は、駆動電圧が極度に大き過ぎずキャビテーション気泡があまり発生しない状態であれば、噴霧量 W に対して与える影響は少ないと考えられる。この事は、Fig. 7.2 に於いて、供試液体AとBとを比較すると明らかであろう。

以上の結果、以下の事実が明らかになった。

即ち、

- (イ) 粘度 η が約15cp以下で噴霧可能である、
- (ロ) 粘度 η が約10cp以下で噴霧量 W は粘度 η および比重 ρ に無関係に一定となる、
- (ハ) この範囲で噴霧量 W は表面張力 γ に依存し、表面張力 γ が大きいほど同一駆動電圧に対して噴霧量 W が減少する、
- (ニ) 適度な駆動電圧であれば溶存空気量は噴霧量 W に影響しない、

である。

7.4 電圧特性に与える影響

霧化器の噴霧量の電圧特性を詳しく調べると、Fig. 7.3 のような特性を示し、この特性は以下のように考えることができる。但し、動作周波数は第二共振周波数 F_{r02} である。

噴霧開始電圧 V_{st} は約 6.5 V であり、この電圧で式 (2.3) が満たされる音圧が発生する。この噴霧開始電圧 V_{st} から安定噴霧しきい値電圧 V_{th} までの領域 X_1 は、組み立てあるいは接合の不均一等が原因で不安定な噴霧動作を示す領域であり、総てのノズルからは噴霧

せず偏った噴霧パターンとなる。また、この安定噴霧しきい値電圧 V_{th} から最大噴霧電圧 V_m までは、電圧の増加と共に噴霧量が増加していく領域 X_2 である。したがって、この領域では電圧の大きさに従って粒径が変化していく。最大噴霧電圧 V_m を越えた領域 X_3 では、駆動電圧 V_0 を大きくするほどキャビテーション気泡の発生が著しくなり、噴霧量はかえって減少していく。これらの特徴的な電圧 V_{st} 、 V_{th} 、 V_m および最大噴霧量 W_m は、液体の種類によって変化するものであり、その物理的性質と極めて深い関係があると考えられる。

そこで、これら噴霧開始電圧 V_{st} 、安定噴霧しきい値電圧 V_{th} 、最大噴霧電圧 V_m および最大噴霧量 W_m について、液体の物理的性質との関係を調べた。表 7.2 は、これらのパラメータの各供試液体 A～E に対する値を示す実験結果である。

Fig. 7.4(a)～(d) は、上記実験結果を基に、4 つの各パラメータが液体のどの物理的性質に影響を受けているかを示したものである。

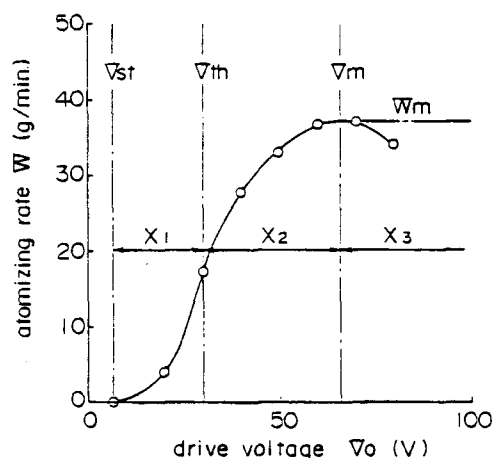


Fig.7.3 Performances of the atomizer as a function of the drive voltage.

Table 7.2 Experimental results of atomization.

No. Liquid	V_{st}	V_{th}	V_m	W_m
A kerosene	6.0 V	30 V	66 V	38 g/min.
B degassed kerosene	8.0	30	100	41
C light oil	9.0	40	82	42
D pure water	12.0	60	120	56
E triethylene glycol monomethyl ether	14.0	50	110	49

temperature : 20°C

噴霧開始電圧 V_{st} は、Fig. 7.4

(a) に示すように、主として比重 ρ によって決まり、約 $10 V_{rms}$ の値である。この噴霧開始現象は多くのノズルのうちの一部から噴霧が開始される現象である。即ち、微小振幅動作時は、組立接合あるいは各々の部品加工時のアンバランスにより、一部のノズルの振幅のみが極端に大きくなり、このためそのノズルからのみ噴出するのである。この時、この一部のノズルに於いてのみ式 (2.3) が満たされると考えることができる。このような微小振幅で、かつ偏った振幅分布の場合には、式 (2.3) 右辺第2項の効果が大きいと考えられ、噴霧開始電圧 V_{st} の比重 ρ に対する依存性が大きいと推察できる。

安定噴霧しきい値電圧 V_{th} は、Fig. 7.4(b) のように、主に表面張力 γ によって決定されており、表面張力 γ が大きいほど V_{th} が高く

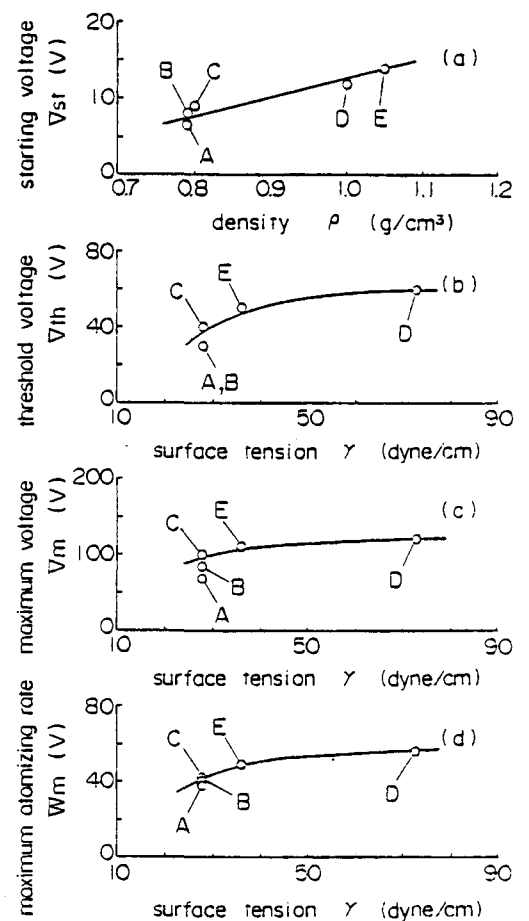


Fig.7.4 Influences of liquid's physical properties on the voltage characteristics. (a) Starting voltage V_{st} as a function of the density ρ . (b) Threshold voltage V_{th} as a function of the surface tension γ . (c) Maximum voltage V_m as a function of the surface tension γ . (d) Maximum atomizing rate W_m as a function of the surface tension γ .

なっている。 V_u は、振動板がほぼ平行ピストン振動板のように動作することができ、振動板上に設けた多くのノズルの総てから安定噴霧が可能な電圧である。即ち、 V_u は、総てのノズルに対して式(2.3)が十分に成立した時の駆動電圧である。式(2.3)が十分に成立するためには表面張力 γ が大きいほどより大きな音圧 P_a が必要となる。この音圧 P_a は振動振幅 δ に比例し、 δ は駆動電圧 V に比例するから γ が大きいほど式(2.3)を十分に満たす為の駆動電圧 V_u が大きくなる。前述のように、微弱な振動振幅では組立や加工上の誤差により生じるアンバランスが振幅分布に大きく影響し、大振幅時はこの影響が相対的に小さくなる。この為、安定噴霧しきい値電圧 V_u は表面張力 γ が大きいほど大きくなると考える事ができる。代表的には、しきい値電圧 V_u は約40Vrmsと考えてよく、この観点から工業的用途に応用する場合、50～60Vrmsでの動作が駆動電圧として適切である。

最大噴霧電圧 V_m および最大噴霧量 W_m は、Fig. 7.4(c)および(d)に示すように共に表面張力 γ に支配されている。表面張力 γ は、ノズルに於ける弁作用を果たすので γ が大きい液体ほどこの弁作用が強くなる。このため γ の大きい液体ほど大きな電圧で駆動してもノズルからの空気の逆流が阻止され大きな音圧 P_a を発生し得るので大電圧駆動が可能となる。また、表面張力の大きい液体ほどキャビテーションが生じにくいのでそれによるエネルギー損失も少ない。従って、最大噴霧電圧 V_m の値は表面張力 γ に支配されるという結果を得ていると考えられる。同時に、当然の結果として、最大噴霧量 W_m も表面張力 γ が大きいほど大きくなっている。

同図(c)および(d)を考慮すれば、最大噴霧電圧 V_m および最大噴霧量 W_m の代表値は、ノズルの直径が80 μ mで61個のとき、それぞれ約100Vrmsおよび約45g/min.である。

Fig. 7.4(c)および(d)に於いて、供試液体AとBとを比較するとAよりもBの方が共に大きい値を示している。供試液体Aである灯油は溶存空気量が他の液体に比べて特に多く、しかも、その蒸気圧の低い成分を多量に含んでいる。このため気泡性キャビテーション

ソの発生によるエネルギー吸収が大きく、特に供試液体 A (kerosene) は同図の曲線からのずれが大きくなっている。従って、溶存空気量は V_m 及び W_m に大きく影響を与える要因であると言える。

7.5 噴霧能力制御特性に与える影響

この霧化器の簡単な噴霧能力制御法としてデューティー（間欠）制御法を第六章で示し、その制御特性の直線性実現の為の構成を明らかにした。すなわち、その直線性は霧化器の液体供給系の慣性やスティフネスに基づく点が多く、これらの観点から液体供給系を構成すれば良好な直線性を実現できる。それ故、逆に、液体の物理的性質がこの噴霧能力制御法に与える影響は少なくないと考えられる。

そこで、種々の物理的性質の液体に対してこのデューティー制御による噴霧能力制御法の適用可能性を検討した。

Fig. 7.5 は、表 7.2 の液体を用いた時のデューティー制御特性である。ここで、駆動周波数 f_d は各供試液体に対する第 2 共振周波数 F_{r2} であり、駆動電圧 V_d は供試液体 A、B および C に対しては 50 Vrms、D および E に対してはそれぞれ 80 Vrms および 70 Vrms である。デューティー周波数 f_d ($= 1/t_2$) は 30 Hz である。また、噴霧量比 W/W_{100} は、デューティー α が 100% の時の噴霧量 W_{100} に対する任意の α に於ける噴霧量 W の比である。

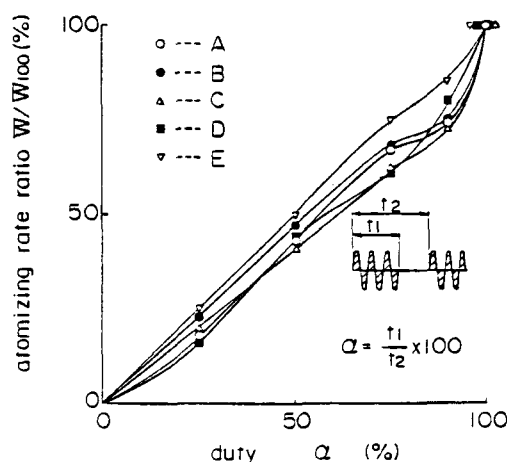


Fig.7.5 Influences of liquid's physical properties on the duty control characteristics.

同図より明らかなように、表 7.2 に示した液体のうち噴霧可能な液体 ($\eta \leq 10 \text{ cp}$) に関しては、制御特性の直線性の不十分さはあ

るもののデューティー制御法による噴霧能力制御が可能である。そして、この程度の制御性の非直線性は、前述したように、慣性やスティッフネスの観点から液体供給系を構成する事により、実用上十分な改善を行う事ができる。

しかしながら、各供試液体に対するデューティー制御曲線は一樣ではない。従って、高精度な制御特性の直線性を必要とする場合は液体の物理的性質の変化に応じて液体供給系の構成条件を最適化し、それぞれの液体に合った液体供給条件を整える必要がある。

7.6 まとめ

以上に述べた実験的検討により得られた、液体の物理的性質が霧化器の諸特性に及ぼす影響の検討結果をまとめると以下のようなになる。但し、振動板は厚さが $50\mu\text{m}$ のステンレス板(SUS304)であり、エッチング法により加工した直径 $80\mu\text{m}$ の61個のノズルが突起部上に設けられたものである。

- (1) 共振周波数 F_{r02} は、主として液体の比重 ρ により影響を受け、比重 ρ が大きいほど低下する。また、 F_{r02} は、溶存空気量の影響が大きく、溶存空気量が少ないほど低下する。
- (2) 噴霧の可否は粘度 η の影響が大きく、 η が約 15cp 以下でないと噴霧することができない。
- (3) 噴霧量 W は、安定噴霧が可能な比重 ρ と粘度 η の範囲、即ち、 $\rho \leq 1.05\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $\eta \leq 10\text{cp}$ では ρ および η に無関係である。そして W は、表面張力 γ によってのみ影響を受け、駆動電圧が一定であれば γ が大きいほど減少する。
- (4) 噴霧開始電圧 V_{s1} は約 10Vrms である。 V_{s1} は比重 ρ に依存し、 ρ が大きいほど高くなる。
- (5) 安定噴霧しきい値電圧 V_{s2} は、約 40Vrms である。 V_{s2} は表面張力 γ に依存し、 γ が大きいほど高くなる。
- (6) 最大噴霧電圧 V_m および最大噴霧量 W_m は、それぞれ約 100Vrms

および約 45 g/min. である。 V_m と W_m は共に表面張力 γ と強い相関を持ち、 γ が大きいほど高電圧、大噴霧量となる。即ち、この霧化器は γ の大きい液体ほど大噴霧能力を発揮するものであり、その動作原理から妥当な結果である。

- (7) デューティー（間欠）制御による噴霧能力制御は、少なくとも以下の範囲で適用可能である。即ち比重 ρ 、粘度 η 、および表面張力 γ が、それぞれ、 $\rho \leq 1.05 \text{ g/cm}^3$ 、
 $\eta \leq 10 \text{ cp}$ 、 $\gamma \leq 80 \text{ dyne/cm}$ の範囲である。但し、 ρ 、 η 、
 γ および溶存空気量によってその制御特性の直線性が変化するので、高精度の直線性保証の為には液体の種類に応じて液体供給系の最適化が必要である。

7.7 結言

多孔板超音波霧化器の諸特性に対する被噴霧液体の物理的性質の影響を実験的に検討した。

用いた霧化器が限定されるため、具体的な数値を一般的な値として示すことは困難であるが以下のような定性的な結論を得ることができるものと考えられる。

- (i) 共振周波数 F_{r02} は液体の比重 ρ と溶存空気量に依存性を持ち、比重 ρ が大きく溶存空気量が少ないほど低下する、
- (ii) 噴霧限界は粘度 η によって決まり、振動的に非粘性液体であることが噴霧可能条件である、
- (iii) 噴霧能力および噴霧安定性は表面張力 γ に依存性を持ち、表面張力 γ がこの霧化器の噴霧機構に対して最も重要な物理的性質である、

(iv) デューティー（間欠）制御法による噴霧能力制御は、安定噴霧が可能な物理的性質の範囲内であれば適用可能であり、その直線性は比重 ρ 、粘度 η 、表面張力 γ および溶存空気量の総てに依存する。

以上の様に定性的かつ実験的ではあるが、この霧化器の諸特性に及ぼす液体の物理的性質の影響およびその度合いを明らかにすることができた。従って、様々な用途にこの霧化器を応用するための被噴霧液体の具備すべき必要条件、並びにそのための設計条件とを知ることができ、この霧化器を工業的に幅広く応用していくための条件を確立できたと考えられる。

第八章 多孔板型超音波霧化器の設計・試作とその応用例

8.1 - 緒言

オン・デマンド型インクジェット装置を原形とし、ノズルの複数化とノズルを設けた振動板（多孔板）自身を振動させる構成を採用することにより、インクジェット装置の欠点を解消した新しい噴霧機構を有する多孔板型超音波霧化装置を提案した。

そして、第二章から第四章に於いて、その基礎技術に関する研究結果を述べ、第五章から第七章に於いて、実際に応用を検討する場合に必要な周辺技術に関する研究結果を述べた。

そこで本章では、前章までの検討結果を基に、多孔板型超音波霧化器の代表的設計仕様と設計例、およびその一応用例について述べ、この新しい超音波霧化器の実使用上の特長並びに課題について明らかにする。

8.2 多孔板型超音波霧化器の代表的仕様と性能

多孔板型超音波霧化器は第二章および第三章で述べたように、その最大噴霧量 Q_m および噴霧粒子の粒径 d_p に関して高い可制御性を有している。従って、適用する用途に応じてこれらの霧化性能が自ずと異なってくる。

そこで本節では、代表的な応用例として後節で扱う石油ボイラー用の液体燃料霧化装置を取上げ、これに適すると考えられる霧化性能を有する多孔板型超音波霧化器として、その仕様ならびに設計例を示すと共に霧化性能についてまとめた。

家庭用として用いられる燃焼機器の最大能力（燃焼量）は、 $20000 \sim 40000 \text{ Kcal/h}$ のものが多く、従って、それに適用される液体燃料霧化装置は相当する灯油霧化能力を必要とされる。

従って、家庭用燃焼機器の液体燃料霧化装置として必要とされる基本的な霧化性能は

(1) 灯油噴霧能力・・・40～80cc/min.

(20000～40000Kcal/h)

(2) 霧化粒子粒径・・・30～100 μ m

である。

そこで、上記霧化性能を満たす霧化装置として仕様を明らかにすると共に、第五章で述べた構造設計・製造方法に基づいてその設計を行った。

(イ) 構成部品の設計仕様

表8.1 は、多孔板型超音波霧化器を構成する各部品の設計仕様であり、この設計に基づいて霧化器を試作した。

Table 8.1 Specifications of components for the atomizer.

components		specifications
piezoelectric element	quality	PCM 5
	form	$\phi 10 \times \phi 3.9 \times t 1.0$ mm
	electrode	Cu - Au
pinhole plate	quality	SUS 304 (annealed)
	form	$\phi 16 \times t 0.05$ mm
	curved portion	hc = 0.25 mm, Rc = 2.25 mm
	pinholes	80 μ m $\times$ 61, 250 μ m (interval)
body	quality	42Ni - Fe
	form	$\phi 23 \times 25$ mm
	pipes	$\phi 3.0$ mm (inner diameter)
	cavity	dl = 3.0 mm
solder	quality	Pb : Zn : Ag (60 : 38 : 2)
	melting temp.	180°C

三つの構成部品である圧電振動子、振動板、およびボディーと、それらを接合するための半田に関する仕様を示すものであり、それらの材質、外形、ならびに主要部の加工仕様が示されている。これらの仕様は、第五章の設計法に従って設計したものである。

(ロ) 霧化器仕様

Fig. 8.1(a)および(b)は、前述の設計仕様により試作した霧化器の正面写真および側面写真である。

ボディーは、Fig. 8.2に示す写真のように分割構造であり、Fig. 8.1(a)に示された振動体を支持するボディーA（左側図）と、キャビティーの底面を閉じ、かつ、全体を支えるためのボディーB（右側図）から構成されている。

振動板は、Fig. 8.3(a)にその外観写真を示すように、中央に球かく状の突起部が設けられ、その突起部上に直径 $80\mu\text{m}$ のノズルが61個設けられている。Fig. 8.3(b)はこの突起部の拡大写真である。Fig. 8.3(a)に示す振動板は、Fig. 8.1(a)に示すように、その突起部がリング状の圧電振動子の中央に位置するよう半田接合によってボディーAに取り付けられている。

この霧化器の仕様をまとめたものが、表8.2である。

同表は、霧化器を機械的な観点と電氣的な観点とからまとめたものである。この仕様から明らか

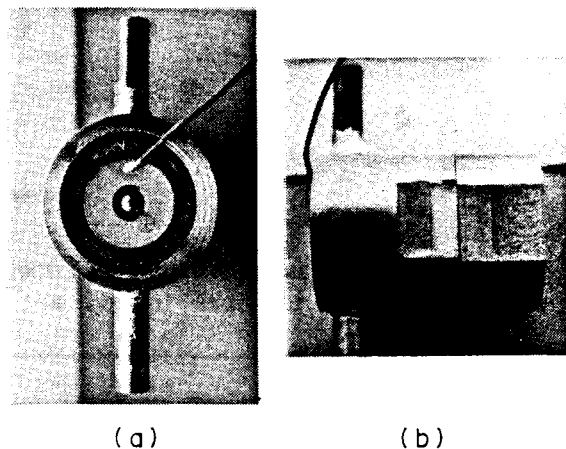


Fig.8.1 Photographs of the atomizer designed for a typical application. (a) The front view of it. (b) The side view of it.

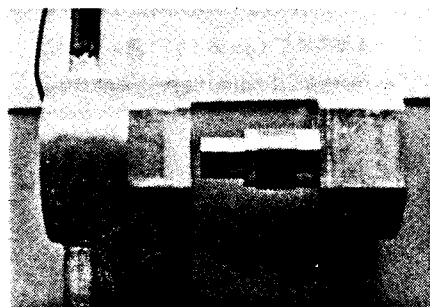


Fig.8.2 A photograph of the atomizer which has two bodies as shown.

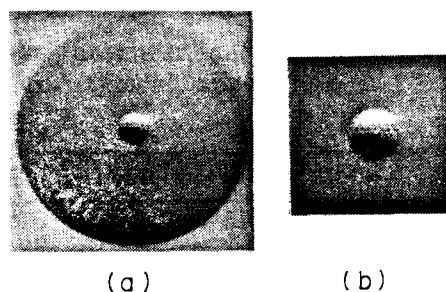


Fig.8.3 Photographs of the plate which is made of stainless steel and $50\mu\text{m}$ in thickness. (a) The outline view of it. (b) The curved portion of it. The number of 61 pinholes which is $80\mu\text{m}$ in diameter are arranged on it.

なように、新しい多孔板型超音波霧化器は、従来の超音波霧化器では到底実現できなかった以下のようなコンパクトさと低消費電力とを可能としている。

- (1) コンパクトサイズ . . . $\phi 23 \times 27 \text{ mm}$
- (2) 軽量 . . . 85 g
- (3) 低消費電力 . . . 350 mW

Table 8.2 Mechanical and electrical specifications of the typical atomizer.

items	specifications	
mechanical	form of the atomizer	$\phi 23 \times 27 \text{ mm}$
	weight of the atomizer	85 g
	pinhole plate	SUS 304 $\pm 50 \mu\text{m}$ $\phi 80 \mu\text{m} \times 61$ (pinholes)
	piezoelectric element	PCM 5 , $\phi 10 \times \phi 3.9 \times \pm 1.0 \text{ mm}$
electrical	operating frequency	47 kHz (kerosene)
	operating voltage	50 Vrms (141 Vpp)
	power consumption	350 mW (maximum)

(ハ) 霧化器性能

上記霧化器の性能を表 8.3 に示す。この霧化器は上述したようなコンパクトさと低消費電力であるにもかかわらず、同表のような優れた霧化性能を有している。

Table 8.3 Performance of the new atomizer designed for typical application.

items	performances	
maximum atomizing rate	40	cc/min. (kerosene)
atomizing rate control range	100~0 %	(by the duty control)
mean diameter of droplets	80	μm (kerosene)
distribution of droplets diameter	± 10	% (maximum)
angle of the spray	40	degrees
initial velocity of droplets	6.8	m/s (kerosene)

この霧化器の霧化性能の特長をまとめると、以下の四項目である。

(1) 均一粒径	$80\mu\text{m} \pm 10\%$
(2) 高効率噴霧	$40\text{cc}/\text{min. at } 350\text{mW}$
(3) 簡単な噴霧量制御	$100 \sim 0\%$
(4) 適正噴霧パターン	40° 、 $5.6\text{m}/\text{s}$

(ニ) まとめ

以上、本節において、多孔板型超音波霧化器の代表的設計例に関し、その構成部品と霧化器本体の設計仕様、並びにその霧化器の霧化性能についてまとめ、新しい多孔板型超音波霧化器の構成と特長とを明らかにした。

8.3 液体燃料燃焼機への応用可能性検討

多孔板型超音波霧化器の応用として、第一章で述べたように、様々な分野が考えられるが、代表的応用例として石油燃焼装置への応用検討を行い、その可能性および課題について明らかにする。

家庭用として用いられている石油ボイラー用のバーナーは、その最大発熱量が $20000 \sim 40000 \text{ KCal/h}$ のガンタイプバーナーが多く、灯油の消費量に換算すると、約 $40 \sim 80 \text{ cc/min.}$ に相当する。このガンタイプバーナは、運転開始と同時に燃焼を開始することができる瞬間着火性能に優れたものであるので、家庭用小型バーナとして広く用いられているものである。

しかしながら、その灯油の噴霧機構の性能上、燃焼量すなわち噴霧量の制御が難しく、このためボイラーの発熱量の調節は燃焼の断続による平均値（オンオフ）制御によるものが大半を占めていた。このため、点火・消火時の排ガステ性の悪化や湯温のスイングが大きく湯質が悪くなり易い等の不都合があった。

前節において述べた霧化器の噴霧能力は、最大 40 cc/min. であるので、この石油ボイラー用バーナーは一つの応用検討対象として好適であり、しかも、上記の不都合の原因である噴霧能力の制御性は極めて良好であるという特長を有している。

そこで、このバーナーへの応用可能性とその課題の検討を行いこれを明らかにする。

8.3.1 従来の石油ボイラー用バーナー

従来の石油ボイラー用バーナーは、Fig. 8.4 に示すように、約 $5 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ 程度の吐出圧を有する圧力ポンプと、噴霧用のノズルを備えた構成のものが多く用いられている。これは圧力噴霧式と呼ばれる霧化方式を灯油の微粒化装置として用いているものであり、いわゆるガンタイプバーナと呼ばれているものである。⁴⁾

圧力ポンプにより加圧された灯油は、噴霧ノズルから図のよう

に、 $30 \sim 100 \mu\text{m}$ 程度の微粒子として噴霧され、燃焼空気と適度に混合されながら燃焼室に送られて燃焼する。燃焼室の回りには熱交換器が設けられており、これにより燃焼熱は給水口から送られてくる水の温度を上昇させる。したがって、送湯口からは湯が供給される。

このような燃焼装置に用いられる圧力噴霧装置の実際の構成は、灯油の微粒化性能、すなわち、平均粒径、粒径分布、噴霧パターン等を燃焼装置の構造とうまく整合させるために、かなりの構成上の工夫がなされている。例えば、ノズルはFig. 8.5に示すように、加圧された灯油がノズル吐出口に向かって斜めに流入し、かつ、旋回運動を生じるような複雑な構造のものが用いられている。しかも、ポンプの吐出圧力は $5 \sim 20 \text{kg}/\text{cm}^2$ もの強い圧力で、かつ、極めて高い圧力安定性が必要である。

そして、このような工夫がなされた上であっても、霧化粒子の平均粒径と最大粒径の比は、 $1.8 \sim 2.5$ 程度と極めて大きいものである。平均粒径と最大粒径の比が大きいことは、火炎の長さが長くなることを意味し、結果として、燃焼特性や燃焼効率の低下を生じる。すなわち、火炎長が長くなるので燃焼室を大きくする必要性が生じ、燃焼効率の低下や煤煙の発生が生じたり、あるいは、火炎の温度の上昇し過ぎによる NO_x の発生が著しくなったりするのである。

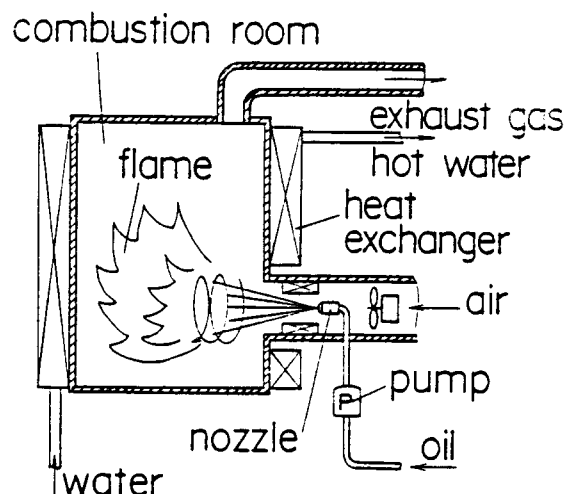


Fig.8.4 Schematic diagram of a gun type oil burner for a water heater.

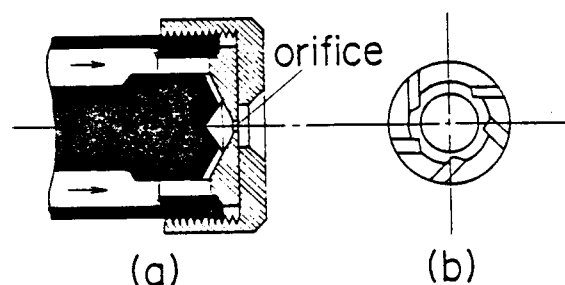


Fig.8.5 A sectional view of a nozzle chip for a gun type atomizer.

また、燃焼量を調整するため、ポンプの吐出圧力を変化させようとすると、噴霧ノズルからの噴霧条件が変わってしまうので、噴霧特性が著しく悪化してしまうという不都合が生じるものであった。すなわち、噴霧粒子の粒径が大きくなったり、噴霧パターンが乱れたりして燃焼特性が著しく悪くなるのである。このため、このような方式のバーナーでは、前述のように、断続による燃焼量の平均値制御が主に行われているのである。しかし、この方式ではバーナーの点火消火を頻繁に繰り返すので、機器の寿命が短くなる、湯温の変動が大きくなる、排ガス特性が悪い、等の不都合が生じ易いものであった。

そこで、本節では、新しい多孔板型超音波霧化器の特長を生かした新バーナーの構成を試み、上記の不都合の解決可能性とバーナー応用可能性とを検討する。

8.3.2 多孔板型超音波霧化器を用いたバーナーの試作・実験

前節の試作霧化器を用いて、石油ボイラー用バーナーを試作し、従来のバーナーの不都合の解決可能性およびこの霧化器のバーナー応用の実現可能性を検討した。

Fig. 8.6 は、バーナー装置の構造を示す断面図である。バーナーの構造は円筒形であり、中央に一次空気を供給する柱筒があって一次空気室を形成している。この柱筒を中心として、そのまわりに気化予混合室（兼一次燃焼室）、燃焼室（二次燃焼室）が構成され、柱筒上部の二次燃焼室のまわりからは、主火炎を形成する二次空気が供給される。柱筒および二次空気室から噴出する空気は、中心軸のまわりを旋回するように円筒の接線方向に噴出するよう噴出口が工夫されている。

霧化室に設けられた霧化器からの噴霧粒子は、前述した旋回気流に沿うように噴出方向が定められているので、噴霧粒子と一次空気および二次空気との混合気体は柱筒のまわりを旋回しながら上昇する混合気体の流れを形成する。

噴霧粒子は、混合気体が柱筒のまわりを旋回している間に、燃焼熱により完全なガス状になる。このため二次燃焼室では完全にガス化した灯油と空気との混合気体となって青火燃焼する。したがって、煤煙の極めて少ない良好な燃焼を行うことができる。これを部分予混合燃焼方式と呼ぶ。

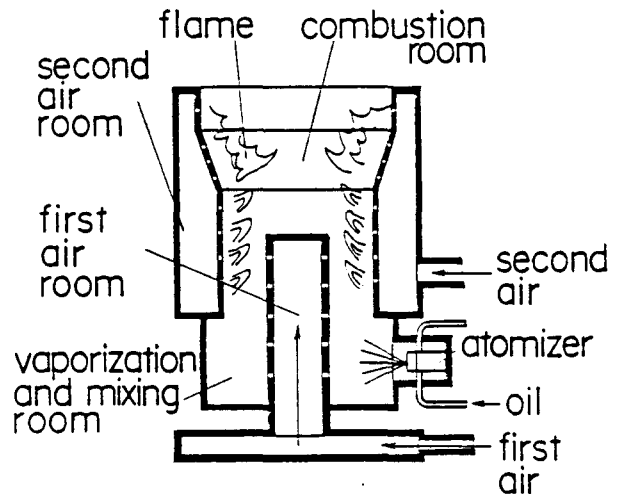


Fig.8.6 Schematic diagram of a new burner using the pinhole plate ultrasonic atomizer. The atomized oil is vaporized and mixed with air to be burned in the combustion room.

このバーナーは、表8.4 に示すバーナー設計指針に基づいて設計した。

コンパクトバーナーの実現のためには、燃焼負荷率は $1 \sim 2 \cdot 10^7 \text{KCal} / \text{m}^3 / \text{h}$ 程度を目指すべきであるが、実験機であるので燃焼負荷率の設計指針を、 $5.2 \cdot 10^7 \text{KCal} / \text{m}^3 / \text{h}$ とした。したがって、このバーナーは中程度のコンパクトさのバーナーである。

Table 8.4 The guide of the burner design.

burning rate (kCal/h)	burner volume (m^3)	burning load factor ($\text{kCal} / \text{m}^3 / \text{h}$)
13000	2.51×10^{-4}	5.2×10^6
2500		6.0×10^5

このバーナーの試作実験におけるポイントは、以下の三つである。

- (1) 多アーム型超音波霧化器を用いたバーナーの実現可能性を確認すること、

(2) 上記バーナーを13000～2500KCal/hの燃焼量範囲で検討し、特に、低燃焼量時における燃焼性能が実用に耐え得るか否かを把握し、従来バーナーの課題解決可能性を明らかにすること、

(3) バーナー応用上の霧化器の課題を明確にすること、である。

このような観点から、

Fig. 8.6 の試作バーナーを用い燃焼実験を行った。この試作バーナーにおける霧化器の給油システムは、Fig. 8.7 に示すモデル図のような構成である。すなわち、霧化器の供給パイプは油タンクにその一端が浸され、排気パイプは燃焼ファンの吸気側に接続されている。燃焼ファンが起動されるとその吸気側には負圧力が生じるので、油面は油タンクから吸い上げられ、霧化器のキャビティを油で満たした後、図のように排気パイプ内の所定の位置で釣り合う。

この状態で霧化器を動作させると同時に点火すると、Fig. 8.6 に示したような保炎状態となって燃焼する。燃焼中において、燃焼量を、第六章に述べたデューティ制御法により最大燃焼量の約 $1/2$ と $1/5$ に減少させると、保炎位置は、Fig. 8.6 に示した最大燃焼位置から徐々に低い位置に移行し、約 $1/2$ 以下の燃焼量のときは燃焼室の上部の火炎は消滅してしまい、燃焼室下部のみで保炎する。

上記燃焼実験において得られた試作バーナーの燃焼特性を、表8.5 に示す。

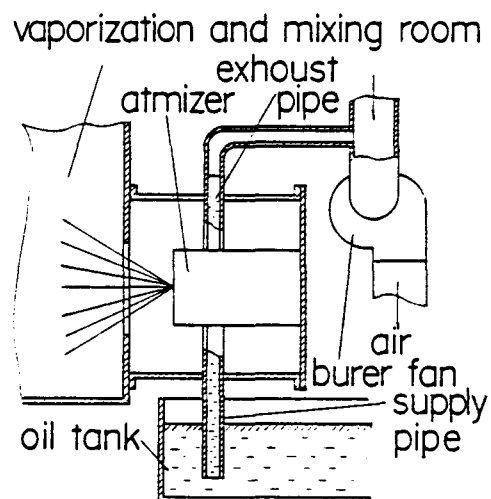


Fig.8.7 Schematic diagram of the fuel oil supply system used for the new burner.

Table 8.5 Characteristics of the new burner.

		burning rate q (kcal/h)		
		2500	6200	12000
atomizing rate Q	(cc/min)	5.12	12.70	24.59
exhaust gas	CO ₂ (ppm)	10	10	10
	CO ₂ (%)	4.95	3.15	(6.5)
quantity of air	first (m ³ /h)	1.40	1.40	1.40
	second(m ³ /h)	4.50	8.50	15.04
ratio of air by fuel		1.99	1.34	1.15
temperature of atomizer Tb(°C)		87	93	106

この実験の結果、以下の事項を明らかにすることができた。

- (1) 多孔板型超音波霧化器を用いた部分予混合燃焼方式のバーナーを構成することにより、噴霧型バーナー方式でありながら、最大燃焼量の約1/5までの燃焼量制御を行うことができる、
- (2) 燃焼量制御は、霧化器を約30Hz以上のデューティ周波数でデューティ制御することにより、極めて簡単に実現できる、
- (3) 最大燃焼量の約1/5 (2500KCal/h)まで燃焼量を絞っても、燃焼特性は良好である、
- (4) 霧化器に冷却風が殆ど供給されないので、その温度が約100℃となる。したがって、このような燃焼方式の場合は、圧電振動子の分極劣下開始温度である、120℃に近い環境条件となり、信頼性の充分な確認が必要である。
- (5) バーナー応用の場合、これ以上の温度環境下での使用は困難であるので、バーナー応用上は、霧化器の冷却を考えたバーナー構造の開発が重要である。

8.4 結 言

新しい霧化機構を有し、多岐に渡る自由な霧化性能の実現が可能な、多孔板型超音波霧化器の代表的設計仕様と設計例を示すと共に、この霧化器の家庭用石油ボイラーバーナーへの応用可能性ならびにその課題の検討を行った。設計した霧化器性能とその応用実験結果をまとめると以下のようなになる。

設計した多孔板型超音波霧化器は、

- (1) 新しい霧化機構のおかげで、従来にない粒径の均一性 ($80\mu\text{m} \pm 10\%$) と適度な噴霧パターン (噴霧角度 40°) を有する霧化器を実現できる。
- (2) 噴霧能力は、最大 $40\text{cc}/\text{min.}$ であり、デューティー制御により、 $100 \sim 0\%$ の間で自由に調節可能である。
- (3) 構造が簡単でコンパクトかつ軽量であり、しかも、消費電力が著しく小さい (350mW) ので、その駆動装置も簡単で小容量になる。

という特徴を実現した。そして、

- (4) 多孔板型超音波霧化器を用い、 $13000 \sim 2500\text{KCal}/\text{h}$ の燃焼量範囲でほぼ良好な燃焼特性を示す部分予混合燃焼方式バーナーを実現できる可能性があり、従来バーナーの課題解決可能性がある。
- (5) 特に、燃焼機器に応用する場合、霧化器の冷却構成と給油方式が重要である。実際の応用に当たっては、それに応じた霧化器の冷却設計と給油構成の検討が必要である。

という燃焼装置への応用上の特長と課題を明らかにできた。

以上、多孔板型超音波霧化器の設計仕様と設計例、及び応用の一例を示し、その特長と課題を明らかにした。従って、今後の改良及び応用展開をより容易にする一助となろう。

第九章 結論

新しい超音波霧化法として多孔板型超音波霧化法を提案し、

- (a) 噴霧動作原理、
- (b) 振動系の最適設計法、
- (c) 設計・製造法、
- (d) 応用諸条件、
- (e) 代表的設計仕様とその応用可能性、

に関する理論的ならびに実験的研究を行い、以下のような結論を得られた。

- (1) 多孔板型超音波霧化器の動作原理と噴霧機構を明らかにすると共に、噴霧動作に関する諸量の関係および霧化粒子径の可制御性について検討し、噴霧動作と霧化機構に関する基礎理論を確立した。

すなわち、多孔板の振動に応じて液滴が一滴づつノズルからベルヌーイの定理に従って噴出されること、液体の表面張力が弁作用を果たしポンプ機能を持つこと、粒径はノズル直径と振動速度で決定されることを示した。

- (2) 霧化器の振動系の振動モード最適化について解析的検討を行い、安定噴霧動作のために振動系が満たすべき諸条件を明らかにしてインクジェット技術の欠点を克服し、かつ、それが持つ特長をそのまま備えた霧化器を実現した。

すなわち、振動系の振動モード、支持条件および節円の位置と、噴霧動作を不安定にする気泡の挙動との関係を実験的に明らかにし、安定噴霧動作のための諸条件を明らかにした。

- (3) 振動系の設計に関する理論の導出とその実験的検証を行い、振動系の整合条件と整合設計法を明らかにして、最適設計手法を確立した。

すなわち、様々な特性、形状の霧化器の設計に適用可能な理論的最適設計指針を確立した。

- (4) 霧化器の構造設計および製造法に関する実験的検討を行い、高い信頼性を保証し、かつ、工業的レベルで製造する為の基礎的設計および製造条件を確立した。

- (5) 応用上重要な噴霧能力制御法について、粒径が安定なデューティー（間欠）制御法の適用を試み、この制御法に於ける高い直線性を保証するための諸条件を明らかにした。

すなわち、簡単なデューティー制御法により粒径を一定に保ちつつ容易に、かつ、高い直線性を持って噴霧能力制御を行うための必要条件を明らかにした。

- (6) 霧化器の動作に影響を与える液体の物性として、表面張力、粘度、比重および溶存空気を取上げて検討し、これらの諸物性が霧化器の特性に与える影響を明らかにして、表面張力と粘度がその主支配要因であることを示し、かつ、安定な噴霧動作が可能なそれらの物性値の範囲を示した。

- (7) 噴霧能力および霧化粒子径に関し、高い可制御性を有する多孔板型超音波霧化器の代表的設計仕様と設計例及びその性能を示すと共に、一応用例として石油バーナーへの応用可能性検討を行い、この霧化器の応用上の特長と課題を明らかにした。

すなわち、噴霧能力 $40 \sim 0 \text{ cc/min.}$ 、粒径 $80 \mu\text{m} \pm 10\%$ 、消費電力 350 mW の霧化器性能を確認すると共に、新しい部分予混合燃焼方式バーナーを試作し、 $13000 \sim 2500 \text{ Kcal/h}$ の連続燃焼量調節が容易なバーナー装置の実現可能性とその課題を明らかにした。

本論文において上記の結論を得ることができたが、ここに示した新しい多孔板型超音波霧化器に関する研究は、まだまだその完成の域に達したと言えるものではない。

例えば、ドライフォグ微粒化を実現し霧化性能の一層の改良と応用範囲のさらなる拡大を可能ならしめ得るためには、霧化器の構造、振動系の構成、そして振動板構造等の改良あるいは開発が必要である。また、燃焼装置等の実際の応用において要求される耐熱性等の環境性能の向上を可能とする霧化器構造や材料の開発、あるいは簡単で実用的な液体供給方法等の応用法の確立など様々な課題が残されている。

本研究により、多孔板型超音波霧化法は、その基礎技術の確立と実用化への端緒に辿り着いたばかりである。したがって、それが有する独特の特長を充分生かした霧化特性を有する霧化器を開発し、かつ、有用な応用技術を確立するためには、今後の継続した研究が不可欠であると考えられる。

謝 辞

本研究を終えるに当たり、この研究の推進に終始懇切な温かい御指導をいただきました、東京工業大学 精密工学研究所 森栄司名誉教授、上羽貞行助教授に深く感謝致します。

また、本研究をまとめるに当たり、丁重な御指導を頂きました、東京工業大学 奥嶋基良教授、古川静二郎教授、安居院猛教授、神本武征教授、大槻茂雄助教授に心より感謝の意を表します。

さらに、本研究の機会を与えて頂くと共に、永続的な励ましと御指導を頂いた、松下住設機器（株）元専務取締役 研究所長 伊賀和夫氏、同元研究所 部長 井上象二郎氏、同元研究所 部長 細川供言氏、同元研究所 部長 藤澤清治氏、同専務取締役 研究所長 山田正氏、同研究所 部長 切通歩氏、同研究所 部長 村瀬重夫氏、同石油機器事業部 技術部長 里田浦氏、同研究所 システム開発室 主任技師 宇野尚氏、同研究所 制御第一研究室 室長 楠木滋氏、他関係各位の方々に深く感謝します。

さらにまた、本研究において、熱心な共同研究あるいは温かい協力を頂いた、元東京工業大学 精密工学研究所 酒井伸芳氏、磯崎準氏、佐久間貞臣氏、松下住設機器（株）山本一志氏、中根伸一氏、長井彪氏、粉川勝蔵氏、大野正氏、山本克彦氏、橋戸健吉氏、平田浩氏、名古屋大学 服部秀三教授、元名城大学 助教授 米田勝実氏、圧電振動子の資料提供に御協力頂いた松下電子部品（株）山添敏博氏、他関係各位の方々に深く感謝します。

参考文献

- 1) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦, 超音波技術便覧 (日刊工業新聞社、1966), P. 615-1162
- 2) 棚沢, 日本機化学会誌 66, 531, 92-98(1963).
- 3) Wood W. R. and Loomis A. L., Phil. Mag., 4-7, 413(1927)
- 4) L. D. Rozenberg, Physical Principles of Ultrasonic Technology, Vol. 2 (Plenum Press, New York, 1973), P. 4.
- 5) H. S. Fogler and K. D. Timmerhaus, "Ultrasonic atomization study," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 39, 515-518(1966).
- 6) Y. Y. Boguslavskill and O. K. Eknadiosyants, "Physical mechanism of the acoustic atomization of a liquid," Sov. Phys. Acoust. 15, 14-21(1969).
- 7) R. J. Lang, "Ultrasonic atomization of liquid," J. Acoust. Soc. Am. 34, 6-8(1962).
- 8) E. G. Lierke, "Ultrasonic atomizer incorporating a self-actig liquid supply," Ultrasonics, 214-218(1967).
- 9) E. K. Dabora, "Production of monodisperse sprays," Rev. Sci. Instrum. 38, 502-506(1967).
- 10) H. H. Hunter, "A small ultrasonic atomizer for liquid fuels," Ultrasonics, 63-64(1969).

- 11) R. G. Pohlman, "Research on ultrasonic atomization of liquid and molten baths," Ultrason. Int. 1973 Conf. Proc., 52-57(1973).
- 12) W. D. Drews, Karamische Zeitschrift 1, 23(1977).
- 13) C. Chiba, Nenryou Kyoukai Shi 58, 632, 1015(1976).
- 14) C. Chiba, Proceedings of the 9th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems in Japan 1981, 119-129(1981).
- 15) L. F. Bouse, D. G. Haile and O. R. Kunze, Trans. A. S. A. E. 1974, 183(1974).
- 16) F. J. Kamphoefner, IEEE Trans. Electron Devices ED-19, 584(1972).
- 17) E. Stemme and S. Larsson, IEEE Trans. Electron Devices ED-20, 14(1973).
- 18) R. D. Carnahan and S. L. Hou, IEEE Trans. Ind. Appl. 13, 95(1977).
- 19) J. D. Beasley, "Model of fluid ejection and refill in an impulse drive jet," Photogr. Sci. Eng. 21, 78-82(1977).
- 20) L. Ström, "The generation of monodisperse aerosol by means of a disintegrated jet of liquid," Rev. Sci. Instrum. 40, 778-782(1969).

- 21) S. Atumi, F. Nakagawa, T. Miyata and K. Tsuji, "The fluid ejection characteristics of the impulse jet head," Gazo Denshi Gakkai 10, 215-227(1981).
- 22) M. Miura, Y. Hiromori, K. Suzuki and A. Mizoguchi, National Thec. Rep. 24, 685(1978).
- 23) L. Rayleigh, Proc. London Math. Soc. 10, 4(1878).
- 24) N. Maehara, S. Nakane, K. Yamamoto and K. Iga, "A pinhole-plate ultrasonic atomizer," Ultrasonics 22, 259(1984).
- 25) S. Ueha, N. Maehara and E. Mori, "Mechanism of ultrasonic atomization using a multi-pinhole plate," J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 6, 21-26(1985).
- 26) S. Sakuma, S. Ueha and E. Mori, "Measurement of vibration velocity distributions in disks of $\text{Pb}(\text{Zr}\cdot\text{Ti})\text{O}_3$ using optical heterodyne technique," J. Acoust. Soc. Jpn. (J) 39, 44-51(1983).
- 27) J. A. Gallego Juarez, J. Sound Vib. 26, 411-416(1973).
- 28) S. Ueha, T. Simada and E. Mori, "Laser doppler vibration amplitude measurement with optical fiber probe," J. Acoust. Soc. Jpn. (J) 41, 420-423(1985).
- 29) L. D. Rozenberg, "Phisical Principle of Technology 2," P. 13.

- 30) N. Maehara, S. Ueha and E. Mori, "Influence of the vibrating system of a multipinhole-plate ultrasonic nebulizer on its performance," Rev. Sci. Instrum. 57, 2870-2876(1986).
- 31) J. Saneyoshi, "Electroacoustical Engineering" (Corona Pubishing Co., Ltd. 1978), P. 37-39.
- 32) T. Hayasaka and S. Yoshikawa, "Acoustical Vibration Theory" (Maruzen Pubishing Co., Ltd. 1974), 440-445.
- 33) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦, 超音波技術便覧 (日刊工業新聞社, 1966), P. 427-445
- 34) K. Yoneda, T. Tawata and S. Hattori, Ultrasonic Symposium Proceedings 1979, 51-55.
- 35) N. Maehara, S. Ueha and E. Mori, "Optimum Design Procedure for Multi-Pinhole-Plate Ultrasonic Atomizer," J. J. A. P. 26, Suppl. 26-1, 215-217(1987).
- 36) 酒井伸芳, "多孔板を用いた超音波霧化器に関する研究," 東京工業大学 森・上羽研究室 修士論文.
- 37) 富田泰夫, 山口強, "圧電受話器の検討," 通研実報 14, 4, 703-742(1965).
- 38) 鈴木辰男, "円形バイモルフ変換器の電気音響変換定数," (未発表), 1-8(1981).
- 39) 原島鮮, "物理学 上巻" (学術図書出版社, 1966),

P.175-177.

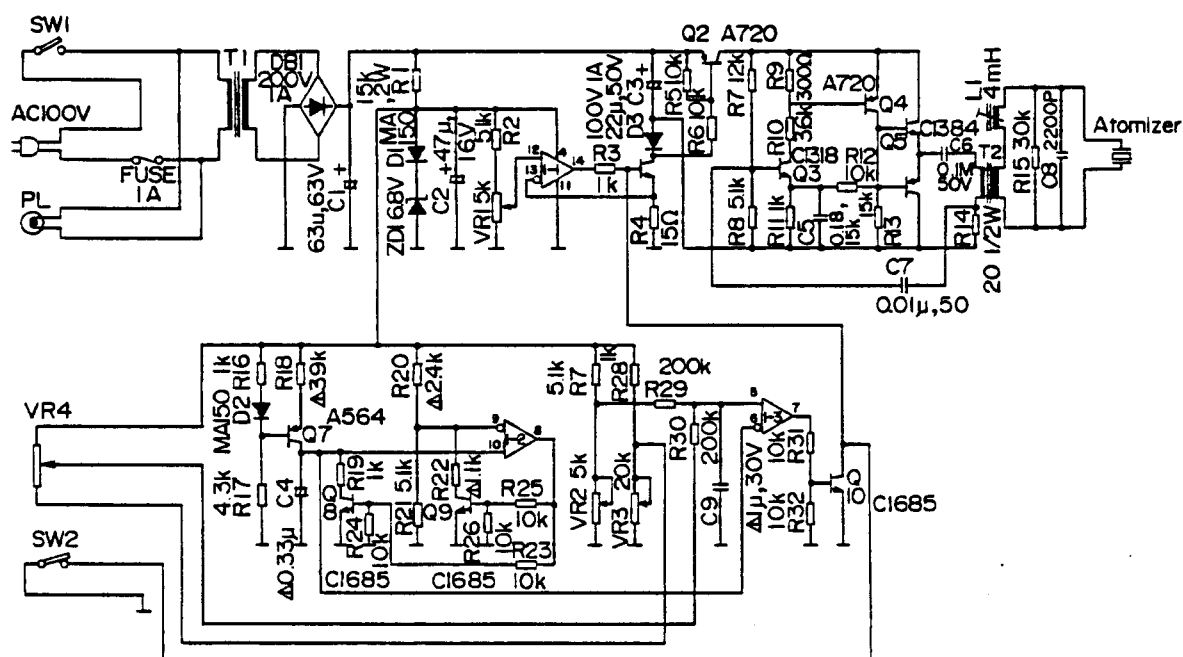
- 40) 前原直芳, 上羽貞行, 森栄司, "多孔板型超音波霧化器の霧化量制御特性," 日本音響学会誌 44, 2, 116-121(1988).
- 41) 前原直芳, 上羽貞行, 森栄司, "多孔板型超音波霧化器の諸特性に及ぼす液物性の影響," 日本音響学会誌, 44, 6, 425-431(1988).
- 42) 石黒浩二, "光学", (共立全書), P.62.
- 43) 今井巧, "流体力学 前編" (裳華堂), P.296.
- 44) 日本バーナ研究会, "油燃烧装置取り扱いの実際" (日刊工業新聞社, 1971), P.51-55.

付 録

第八章で述べたように、実際の応用を検討する場合、霧化器を簡単な駆動装置とともに組み込んで動作させることがしばしば必要となる。

以下に示す駆動回路は、同章に示した応用可能性検討実験の際に用いた実験用回路であり、簡単な応用実験用として有用であるので付録としてここに記載しておく。

schematic diagram of a drive-circuit for
the multi-pinhole plate ultrasonic atomizer



発表論文目録

公表関係論文

- (1) N. Maehara, S. Nakane, K. Yamamoto and K. Iga, "A pinhole-plate ultrasonic atomizer," *Ultrasonics*, Vol. 22, No. 6, PP. 259-260 (1984).
- (2) S. Ueha, N. Maehara and E. Mori, "Mechanism of ultrasonic atomization using a multi-pinhole plate," *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, Vol. 6, No. 1, PP. 21-26 (1985).
- (3) N. Maehara, S. Ueha and E. Mori, "Influence of the vibrating system of a multipinhole-plate ultrasonic nebulizer on its performance," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 57, No. 11, PP. 2870-2876 (1986).
- (4) N. Maehara, S. Ueha and E. Mori, "Optimum Design Procedure for Multi-Pinhole-Plate Ultrasonic Atomizer," *J. J. A. P.*, Vol. 26 Suppl., No. 26-1, PP. 215-217 (1987).
- (5) 前原直芳, 上羽貞行, 森栄司, "多孔板型超音波霧化器の霧化量制御特性," *日本音響学会誌*, Vol. 44, No. 2, PP. 116-121 (1988).
- (6) 前原直芳, 上羽貞行, 森栄司, "多孔板型超音波霧化器の諸特性に及ぼす液物性の影響," *日本音響学会誌*, Vol. 44, No. 6 (6月号, 1988), PP. 425-431 (1988).

口頭発表

- (1) 上羽貞行, 酒井伸芳, 磯崎準, 森栄司, 前原直芳, 山本一志,
"多孔板を用いた超音波霧化器に関する研究," 日本音響学会
昭和59年度春季研究発表会, 昭和59年 3月, 日本音響学会昭和
59年度春季研究発表会講演論文集, PP.589-590(1984).
- (2) 上羽貞行, 酒井伸芳, 磯崎準, 前原直芳, 山本一志, 中根伸一
"多孔板を用いた新しい超音波霧化法," 電子情報通信学会
超音波研究会, 昭和59年 5月, 電子情報通信学会技術研究報
告, Vol.84, No.24, US84-4, PP.23-30(1984).
- (3) 上羽貞行, 酒井伸芳, 磯崎準, 森栄司, 前原直芳, 山本一志,
中根伸一, "高次モードにおける霧化特性、及び多孔板の穴数
の影響、多孔板を用いた超音波霧化器(Ⅱ)," 日本音響学会
昭和59年度秋季研究発表会, 昭和59年10月, 日本音響学会昭和
59年度秋季研究発表会講演論文集, PP.685-686(1984).
- (4) 米田勝実, 多和田昌弘, 前原直芳, 山本一志, 中根伸一, 服部
秀三, "超音波霧化器多孔振動板の振動姿態測定," 昭和59年
度電気関係学会東海支部連合大会, 昭和59年11月.
- (5) 武藤一義, 米田勝実, 前原直芳, 山本一志, 中根伸一, 服部秀
三, "L.V.D.法を用いた超音波霧化器による霧状粒子の飛翔
速度の測定," 昭和59年度電気関係学会東海支部連合大会, 昭
和59年11月.

- (6) 前原直芳, 上羽貞行, 森栄司, "多孔板型超音波霧化器の最適設計法," 第7回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, "昭和61年11月, 第7回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演予稿集, PP.119-120(1986).
- (7) 前原直芳, 上羽貞行, 森栄司, "多孔板型超音波霧化器の制御特性," 電子情報通信学会 超音波研究会, 昭和62年 2月, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.86, No.356, US86-74, PP.15-22(1987).