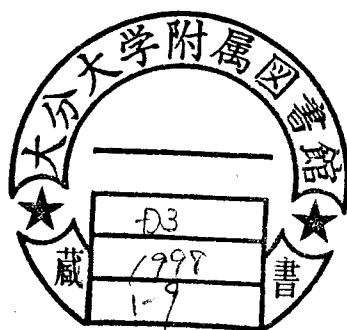


交流不平等進行波電界による絶縁性液体中の  
電気流体力学的効果に関する研究

大分大学大学院工学研究科

博士後期課程

博士論文



1998年 3月

小田 徹

## 目次

	頁
本論文で使⽤した記号	記 1
<b>第 1 章 緒言</b>	<b>1</b>
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本論文の内容	11
<b>第 2 章 進行波電界による絶縁性液体のEHD液体ポンピング制御</b>	<b>14</b>
2.1 序論	14
2.2 実験装置	15
2.2.1 3相進行波電界によるEHD液体ポンピング制御装置	15
2.2.2 6相進行波電界によるEHD液体ポンピング制御装置	15
2.3 実験方法および実験結果	16
2.3.1 垂直変位の周波数特性	16
2.3.2 垂直変位の印加電圧特性	17
2.3.3 導電率に対する垂直変位の周波数特性	34
2.3.4 導電率に対するイオンの最大変位の緩和時間と 通常移動時間との比	34
2.4 理論的考察	37
2.4.1 EHD効果の一般論	37
2.4.2 EHD液体ポンピングの運動方程式	38
2.4.3 進行波電界によるEHD現象解析モデル	39
2.4.4 EHD液体ポンピング制御特性の定式化	43
2.5 計算機シミュレーション結果および検討	48
2.5.1 垂直変位の周波数および印加電圧特性	48
2.5.2 垂直変位に対する導電率の影響	48
2.5.3 イオン緩和時間とイオン移動時間との比が 最大垂直変位に与える影響	49

2.6	イオンの挙動	54
2.6.1	誘導電荷の時間変化と空間分布	54
2.6.2	イオン運動の計算機シミュレーション	58
2.6.3	単位正電荷イオンの速度分布から導かれる関係	62
2.6.4	( $k_u - k_x$ ) 空間でのイオン速度の分布パターン	64
2.7	結論	68
<b>第3章 シュリーレン法による絶縁性液体中のEHD現象の可視化</b>		<b>69</b>
3.1	序論	69
3.2	実験装置	70
3.2.1	シュリーレン実験装置の概略	70
3.2.2	EHD現象の観測用EHDポンピング素子	70
3.3	実験方法および実験結果	75
3.3.1	EHD現象の基本パターンの代表的なシュリーレン画像	75
3.3.2	進行波電界の伝搬速度特性	76
3.3.3	進行波電界の基本パターンの形状特性	77
	(a) 基本パターンの長さ (かまぼこ状の長さ)	77
	(b) 基本パターンの幅 (かまぼこ状の幅)	77
3.4	代用電荷法による進行波電界の近似計算および検討	86
3.4.1	線電荷による進行波電位の計算	86
3.4.2	線電荷による進行波電界の計算	89
3.5	進行波電界による誘電率の変化の計算	101
3.6	結論	109
<b>第4章 進行波電界による絶縁性液体中のEHD気泡運動制御</b>		<b>110</b>
4.1	序論	110
4.2	実験装置	111
4.2.1	EHD気泡運動制御装置	111

4.3	実験方法および実験結果	115
4.3.1	気泡の大きさと電荷量	115
4.3.2	EHD気泡の基本的運動モード	118
4.3.3	EHD気泡運動の阻止および輸送制御の周波数特性	123
4.3.4	EHD気泡運動の輸送速度特性	128
4.4	理論的考察	131
4.4.1	EHD気泡運動の運動方程式	131
4.4.2	平行円筒電極列による電位・電界関数の第1次近似	132
4.5	計算機シミュレーション結果および考察	136
4.5.1	EHD気泡の基本的運動モード	136
4.5.2	EHD気泡運動の阻止および輸送制御の周波数特性	137
4.5.3	EHD気泡運動の輸送速度特性	137
4.6	灯油中の気泡運動の線形近似による特性計算	143
4.6.1	等価質量と等価粘性係数の必要性	145
	(a) 灯油中で振動する気泡の場合	145
	(b) 灯油中および大気中で振動する気泡と同一直径の 固体粒子の場合	145
4.6.2	気泡阻止位置(一定)の場合の気泡輸送速度特性	149
4.6.3	気泡阻止位置の特性	149
4.6.4	気泡阻止位置(補正)の場合の気泡輸送速度特性	153
4.6.5	停滞モード出現の予測	153
4.7	結論	159
<b>第5章 総括</b>		<b>160</b>
<b>参考文献</b>		<b>163</b>
<b>謝辞</b>		<b>167</b>

## 本論文で使用した記号

本論文で使用した記号の意味を以下に示す。内容が混合する恐れのないものについては、同じ記号を異なる意味に使用している場合がある。

なお、記号の太字はベクトルを表している。

### 第 2 章

記号	[単位]	: 説明
$b$	$[m^2/Vs]$	: 液体中のイオン移動度
$D$	$[m^2/s]$	: 液体の拡散係数
$\mathbf{E}$	$[V/m]$	: 液体中の電界
$\mathbf{F}_v$	$[N/m^3]$	: 電気泳動力
$\mathbf{F}_g$	$[N/m^3]$	: 重力
$\langle \mathbf{F}_v \rangle$	$[N/m^3]$	: 電気泳動力の時間平均
$f$	$[Hz]$	: 周波数
$g$	$[m/s^2]$	: 重力加速度
$h$	$[m]$	: 垂直方向の変位
$k$	$[rad/m]$	: 波数
$L_D$	$[m]$	: デバイ長
$P$	$[N/m^2]$	: 液体内部の圧力
$p$	$[m]$	: 電極間ピッチ
$q_v$	$[C/m^3]$	: 液体中の体積電荷密度
$T$	$[s]$	: 1 周期
$t$	$[s]$	: 時間
$U$	$[V]$	: 電位分布
$V$	$[V]$	: 印加電圧 (相電圧の波高値)

### 第 3 章

記号	[単位]	: 説明
$A_m$	[-]	: 定数
$b$	[m]	: 電極表面最短間隔
$d$	[m]	: 電極直径
$D$	[C·m]	: デバイ単位
$E$	[V/m]	: 進行波電界の大きさ
$f$	[Hz]	: 周波数
$k$	[rad/s]	: 波数
$L$	[m]	: かまぼこ状の基本パターンの長さ
$L_0$	[m]	: 電極間ピッチ $p$ の3倍の長さ
$N$	[1/m <sup>3</sup> ]	: 単位体積中の極性分子の数
$n$	[-]	: 屈折率
$p$	[m]	: 電極間ピッチ
$P_H$	[-]	: 定数
$q$	[C]	: 代用電荷量
$R$	[m]	: 電極半径
$R_0$	[m]	: 電極中心から代用線電荷までの距離
$V$	[V]	: 相電圧の波高値
$V_0$	[m/s]	: 進行波電界の伝搬速度
$W$	[m]	: かまぼこ状の基本パターンの幅
$\epsilon_m$	[-]	: 液体の比誘電率
$\epsilon_0$	[F/m]	: 真空の誘電率
$\kappa$	[J/K]	: ボルツマン定数
$\mu$	[D]	: 双極子能率
$\omega$	[rad/s]	: 電源の角周波数

## 第 4 章

記号	[単位]	: 説明
$a$	[m]	: 気泡の半径
$d$	[m]	: 気泡の直径
$\mathbf{E}$	[V/m]	: 液体中の電界
$E_x$	[V/m]	: x 方向の電界成分
$E_y$	[V/m]	: y 方向の電界成分
$\mathbf{F}$	[N]	: 電気力学的力
$\mathbf{F}_a$	[N]	: 浮力
$F_{dy}$	[N]	: 電気力学的駆動力
$\mathbf{F}_e$	[N]	: クーロン力
$\mathbf{F}_g$	[N]	: グレーディエント力
$F_{g0}$	[-]	: 定数
$F_{sx}$	[N]	: 電気力学的阻止力
$f$	[Hz]	: 周波数
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	: 重力加速度
$\mathbf{i}$	[-]	: x 方向の単位ベクトル
$\mathbf{j}$	[-]	: y 方向の単位ベクトル
$k$	[rad/m]	: 波数
$M_b$	[kg]	: 気泡の質量
$M_{b_e}$	[kg]	: 気泡に相当する等価質量
$M_m$	[kg]	: 液体の質量
$p$	[m]	: 電極間ピッチ
$Q$	[C]	: 気泡の帯電量
$\mathbf{R}$	[m]	: 気泡の位置ベクトル
$S$	[-]	: 定数

$U$	[V]	: 3相進行波の電位関数
$V$	[V]	: 印加電圧 (相電圧の波高値)
$V_b$	[m/s]	: 気泡の上昇速度
$V_{bv}$	[m <sup>3</sup> ]	: 気泡の体積
$V_d$	[m/s]	: 気泡の輸送速度
$V_E$	[V]	: 電界カーテンの電位分布式
$V_y$	[m/s]	: 気泡の平均移動速度
$V_0$	[m/s]	: 進行波電界の伝搬速度
$\epsilon_b$	[-]	: 気泡の比誘電率
$\epsilon_m$	[-]	: 液体の比誘電率
$\epsilon_0$	[F/m]	: 真空の誘電率
$\eta_m$	[Ns/m <sup>3</sup> ]	: 液体の粘性率
$\eta_{me}$	[Ns/m <sup>3</sup> ]	: 液体に相当する等価粘性係数
$\nu_m$	[cSt]	: 液体の動粘度
$\rho_a$	[kg/m <sup>3</sup> ]	: 空気の密度
$\rho_i$	[C/m <sup>3</sup> ]	: 線電荷密度
$\rho_m$	[kg/m <sup>3</sup> ]	: 液体の密度
$\sigma_m$	[S/m]	: 液体の導電率
$\omega$	[rad/s]	: 電源の角周波数



## 第1章

### 緒言

#### 1.1 本研究の背景と目的

最近、液体の静電気現象の研究が盛んになりつつある。この応用例としては、葉の裏側まで噴霧状の農薬を付着することのできる農薬散布や高速かつ高品質な印字が可能となるインクジェット・プリンタへの応用などがある。このような研究分野は、電気流体力学の分野である。本来は、流体として気体を考えるときには、EGD (electrofluidynamics), 液体を考えるときには、EHD (electrohydrodynamics) といい、両方含めて考えるときには、EFD (electrofluidodynamics) という<sup>(1)</sup>が、最近では両方含めてEHDと呼ぶことが多いようである。その中でも、絶縁性液体の液体輸送制御および絶縁性液体中の気泡輸送制御が、地上重力環境（地球重力環境）、また微小重力環境（宇宙重力環境）への適用において、たいへん注目をされてきている。

このEHD現象というのは、流体に電氣的な作用がおよび何らかの力学現象（攪拌、混合、分離、移動等）が発生する現象である。この領域は、静電気と流体力学の境界領域である。

以下、このEHD現象の歴史について概略を述べる。

#### EHD現象の歴史

このEHD現象の研究の歴史は、電気浸透現象の発見（1780年）に始まり、電気泳動、流動電位、流動電流などの「電気運動学的現象」もEHD現象の範疇になる。さらに、Gilbertの帯電による水面の変形の発見（1600年）、Boseの水流の帯電による分散現象の発見（1748年）もEHD現象の研究のさきがけとみなすことができる<sup>(2)</sup>。ここで、絶縁性液体中のEHD現象の電気力に関しては、種々の実験的研究が行われているが、いまだに

その種類や命名の分類について十分な整理が行われていない状態である。また、1つのEHD現象に複数の電気力効果が同時に働く場合が多く、実験的にもこれらの力効果を分離して観測することが困難である<sup>(2)</sup>。これらの電気力を大別すると次のようになる。

(1) 液体内の分極電荷に働く力：

電気ひずみ力 (マックスウェル応力)

誘電泳動力 (グレーディエント力)

(2) 自由電荷に外部電界が加わったときの力：

電気泳動力 (クーロン力)

イオンドラグ力 (引きずり力)

しかしながら、実際にこれらの電気力や現象を単独に、また液体中で精度良く測定できるような測定器および測定法が無いのが現状である。したがって、現在では、基本的要素の把握を実験的検証やかなり大胆な仮定を導入し、EHD現象としての運動方程式を立て初等的手法により、定量的に理論解析を行っている<sup>(1)</sup>。

このような状況の中で、EHD現象を「電気から流体エネルギー変換器」に利用する試み、すなわちEHD液体ポンピング制御として利用する試みが行われたのは1958年ごろである。以下、その歴史について概略を述べる。

### EHD液体ポンピング制御の歴史<sup>(3)</sup>

・1958年、W.H.Middendorf<sup>(4)</sup>は、図1.1のような円錐の穴をもつ電極系に対し、直流、交流のいずれの電圧を印加しても電界は不平等電界となり、液体を常に同じ方向にポンピングしようとしている。

・1959年、O.M.Stuetzer<sup>(5)</sup>は、「イオンドラグによる圧力発生」と題する論文中で、液体中の電界による単極性イオンの運動による摩擦効果で、液体内部に圧力が発生し、巨視的な流動が起こることを計算および実験で裏付けた。実験は、図1.2のような装置で、コロナエミッタから単極性イオンを注入して電界で泳動させ、圧力を測定しながら、絶縁油、シ

リコン油などを用いて行われた。図 1.3 に各種の試料について測定した印加電圧  $U_1$  とマンメータ液柱上昇の高さとの関係を示す。

・また、1960年、O.M.Stuetzer<sup>(6)</sup> は、図 1.4 に示すような環流を発生するイオンドラグポンプを開発し、理論モデルによる計算性能を実験で裏付けた。彼は、18kVの直流駆動電圧で20%以上の効率をもつポンプを試作し、このポンプのカスケードあるいは並列接続方式についても検討した。

・1962年、G.V.Jorgenson<sup>(7)</sup> は、刃型電極をイオンエミッタとして用い、多量の電荷を注入する方式を開発し、動作電圧14kV、電流55 $\mu$ Aの状態が発生圧力800mm水柱、効率25%の電気ポンプの試作に成功した。

・1963年、W.F.Pickard<sup>(8, 9)</sup> は、イオンドラグポンプ現象について理論的解析を行った。また、彼は、EHDポンピングの実験に関して次のようなものを考察した。

- (1) ドラグ力は電極間を泳動するイオンにより発生
- (2) 電流とポンピング力は無関係
- (3) 電極材料の浸食作用
- (4) 電極における分極現象は大きな影響

・1964年、G.N.Kopylov<sup>(10)</sup> はO.M.Stuetzerのモデル<sup>(5)</sup>と同様な電気ポンプについて、発生電力、流速分布、電荷拡散係数、および圧力勾配と電界との関係を一次元モデルについて解析した。

・1966年、J.R.Melcher<sup>(11, 12)</sup> は、絶縁性液体の表面部に交流不平等進行波電界（以下、進行波電界という）を印加し液体内の誘導電荷との相互作用でポンピング力を発生させる方法を考案した。その方法は、ポンピングされる液体は、駆動電極に直接接触せず、液体内に荷電キャリアや粒子を導入する必要がないため、電極の浸食、液体の汚染現象は無視できるという利点がある。以上、おおまかなEHD液体ポンピング制御の歴史を述べたが、実際にポンプ要素として、応用する場合には、次のこと考慮しなければならない。

- (1) 機械的部分が無く，静寂である
- (2) 構造が簡単で，外部から電氣的駆動が容易である
- (3) 電極が内部にあるときは液体の浸食，汚染で性能が低下する恐れがある
- (4) ポンピング効率が低い
- (5) 高電圧源が必要

したがって，(1)，(2)，(3)，については，J.R.Melcher氏らの考案した進行波電界で，外部に電極を巻き付けたスタイルが理想的である．しかしながら，(4)のポンピング効率が低いことと，(5)の高電圧源でしかも1Hz以下という超低周波数の電源が必要である<sup>(12)</sup>．

また，彼らの論文では，いろいろなパラメータ依存性を，説明しうる理論には至っていない<sup>(12)</sup>．

そこで，本研究のEHD液体ポンピング制御としては先行論文のJ.R.Melcher氏らの論文と同様に，進行波電界を用いて，(1)，(2)，(3)をクリアし，電極自身をテフロン被覆電線として，電極列を直接液中に配置して，(4)の効率アップを配慮した．また，微小重力環境下をにらんだ装置全体のコンパクト化，特に電源部のコンパクト化を行い同様な実験での有用性の確認も試みた．

また，より詳細な理論解析は，今後の課題であるが，その手がかりの1つとして，電極近傍での局所的な液体自身の運動を確認することが必要である．したがって，この局所的なEHD現象の確認としては，液体のタフト (Tuft) 法やトレーサ法などがあるが，いずれも液体内部に糸または細かい布切れやポリスチレン粒子またはガラスビーズ等の不純物を挿入することになる<sup>(13)</sup>．これらの不純物自身の表面が帯電し駆動される可能性があり，本来のEHD現象以外に附加的な現象が生ずる問題があり，これらの方法には解決すべき課題を多く残している．そこで，液体の誘電率が電界の大きさにより変化し，そのために屈折率が変わることを利用してEHD現象の可視化を可能とする光学的手法を考案した．その結果，シュリーレン法によって得られた光学的パターンが進行波電界の基本的な形状および伝搬速度等の特性をたいへんよく表していることが判った．

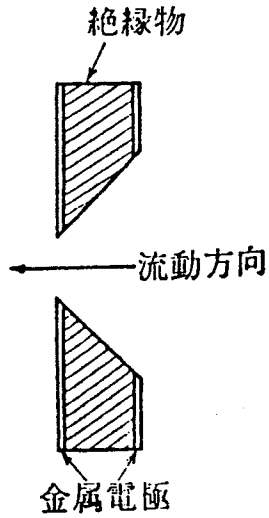


図 1.1 円錐孔の電極系

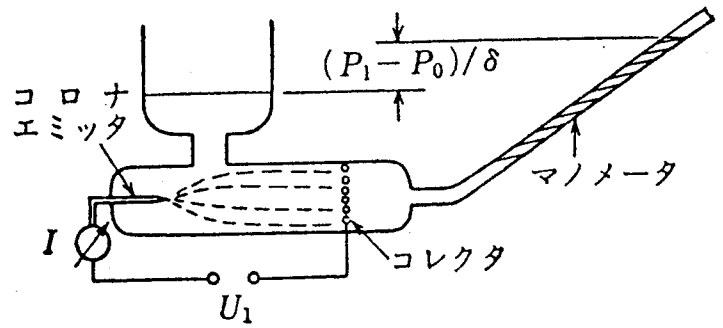


図 1.2 イオンドラグ圧力測定装置

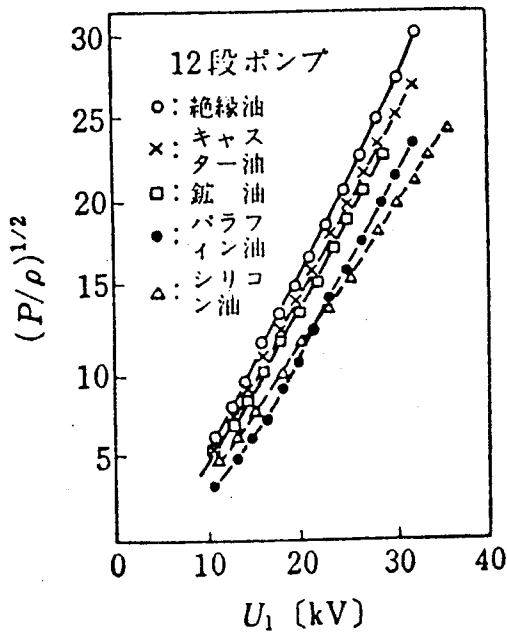


図 1.3 ポンプ圧力によるマンメータ液中上昇高さ  $P/\rho$  の平方根対電圧 (P: [mm水柱],  $\rho$ : 密度)

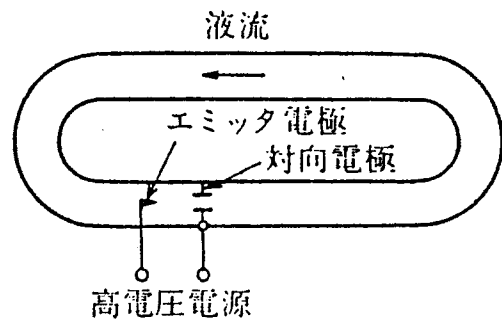


図 1.4 閉路形イオンドラグポンプ

また、絶縁性液体中に発生した気泡の運動を電界によって、制御することも、EHD現象の一つであり、本研究ではこの問題も取り上げた。以下、その歴史について、概略を述べる。

#### EHD気泡運動制御の歴史 <sup>(14)</sup>

・1961年、K.C.Kao <sup>(15)</sup> は絶縁性液体中の気泡に加わる電氣的張力を最小ポテンシャルエネルギーの原理で計算している。

・1961年、O.M.Stuetzer <sup>(16)</sup> は、気泡の周囲液体に空間電荷と外部電界が共存する場合について、気泡に加わる電氣力をイオンドラグ圧力を用いて、計算し、実験結果と比較を行った。この状態では、気泡に加わる電氣力はイオンドラグに圧力に逆らう方向に動く。この力の解析と実験に用いられた方形チャンネルの配置を図1.5に示す。電荷注入は図のイオナイザ部電源(1)で行われ、電界中の気泡運動は電源(2)による観測部で行われた。電界が不均一の場合には、気泡は電界の弱い領域に向かう電氣力を受けることが確認されている。

・1969年、1975年、渡辺 <sup>(17, 18)</sup> は、図1.6に示す装置で、金属毛管電極から絶縁性液体中に注入した気泡が、電氣力によって液中に浮揚される効果や、図1.7に示すように電圧印加によって気泡の微粒化現象が確認されている。

・1970年、R.Coelhoら <sup>(19)</sup> は絶縁性液体の絶縁強度の関する測定を行い、破壊が液体中に依存する粒子または気泡によることと述べている。

・1986年、J.S.Changら <sup>(20)</sup> は図1.8に示すように傾いた長方形のチューブをトランス油で満たし、その上部の壁に3相平板電極を取り付け、進行波電界を用いた。チューブの壁の上部に沿って異なった半径の気泡運動制御が確認されている。

・1996年、M.Haraら <sup>(21)</sup> は図1.9の示す電極系において液体ヘリウム中で超伝導機器のクエンチ時の熱気泡運動および絶縁強度の詳細な解析が行なわれている。電氣力としてはグレーディント力が重要であるとしている。

・1997年、酒井ら <sup>(22)</sup> は、図1.10に示す電極系において、液体窒素中

で、微小重力環境下の気泡運動の様子を検討している。電気力としては、グラデーション力である。

以上、おおまかな、EHD気泡運動制御の歴史を述べたが、実際に電界を加えられた絶縁性液体および液体中での気泡の運動制御として応用する場合には、次のことを考慮しなければならない。

- (1) 基礎的な電気力の解析
- (2) 液体中の放電現象との関連
- (3) 気泡を使って液体中の電界や電気力を調査
- (4) 微小重力環境下での利用

したがって、(1)、(2)については、以前より、盛んに研究されている。(3)については前述したシュリーレン像を利用することで、液体中の気泡と進行波電界のパターンを同時に観測することができれば、たいへん有用である。今回の研究のEHD気泡運動制御としては、先行論文のJ.S.Changらの論文と同様に進行波電界を用いて、電極自身をテフロン被覆電極とし、平行円筒電極列を直接液中に配置して、気泡運動制御力を上げることにした。また、(4)の微小重力環境下での適用をにらんだ装置全体のコンパクト化、特に電源部のコンパクト化を行い同様な実験での有用性の確認も試みた。

したがって、本研究の目的は、絶縁性液体中で進行波電界を形成させた場合のEHD液体ポンピング制御およびEHD気泡運動制御を実験的に確認し、これらの基本的現象を理論的に解析する。さらに、詳細な理論解析のために、これらのEHD現象の可視化も行うことを目的とした。

まず、絶縁性液体の進行波電界によるポンピング特性を調べ、液体ポンピングの周波数制御について検討した。次に、この制御のために重要なEHD現象の可視化を光学的手法の1つであるシュリーレン法を利用して検討した。さらに、絶縁性液体中の微小な気泡（直径：約0.2mm）群を進行波電界によって停滞させたり、相順方向への輸送特性を調べ気泡運動の周波数制御について検討した。これらの実験に使用した絶縁性液体として、市販の灯油(Kerosene)、シリコン油、およびトランス油を選んだ。

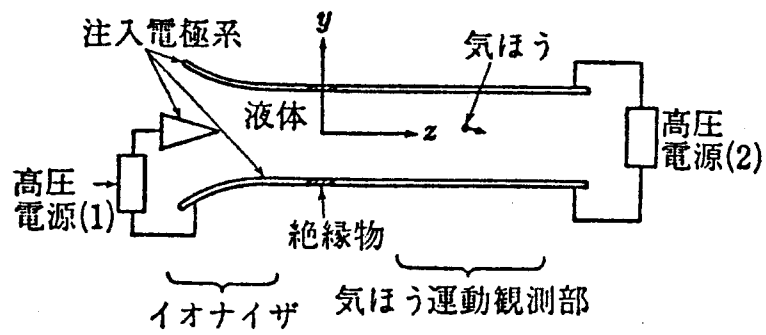


図1.5 電極配置

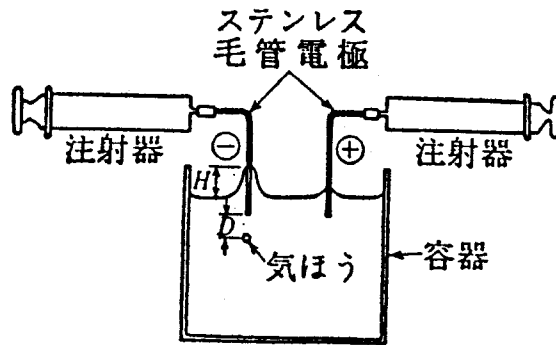
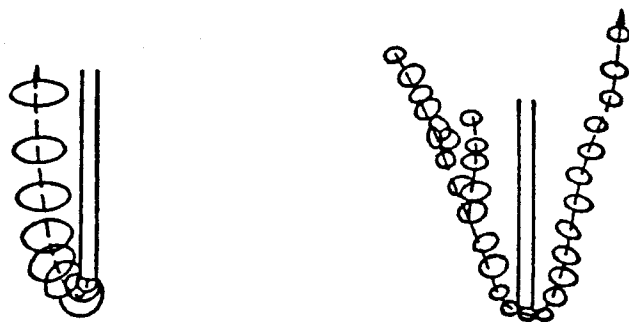


図1.6 気泡に加わる電気力の観測装置



(a) 印加電圧 0 V

(b) 印加電圧 0.5 kV

図1.7 電圧印加による気泡の微粒化



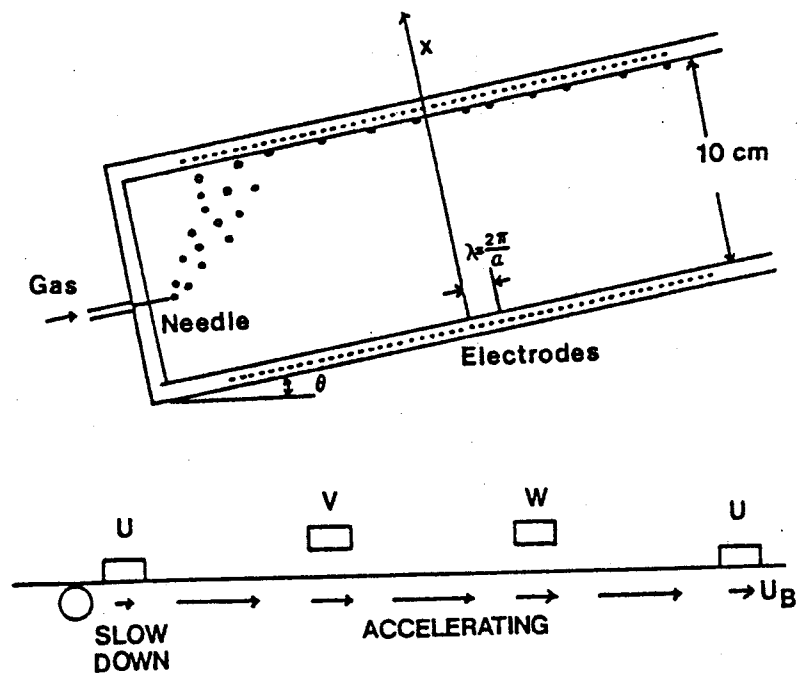


図 1.8 進行波電界による気泡制御装置

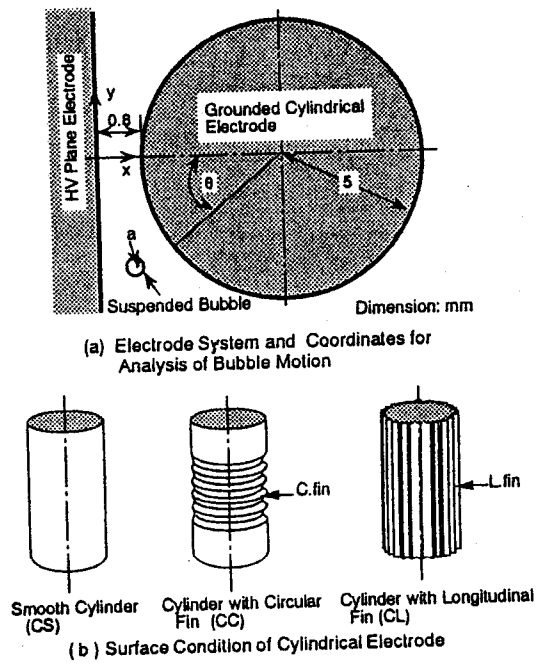


図 1.9 電極系システム

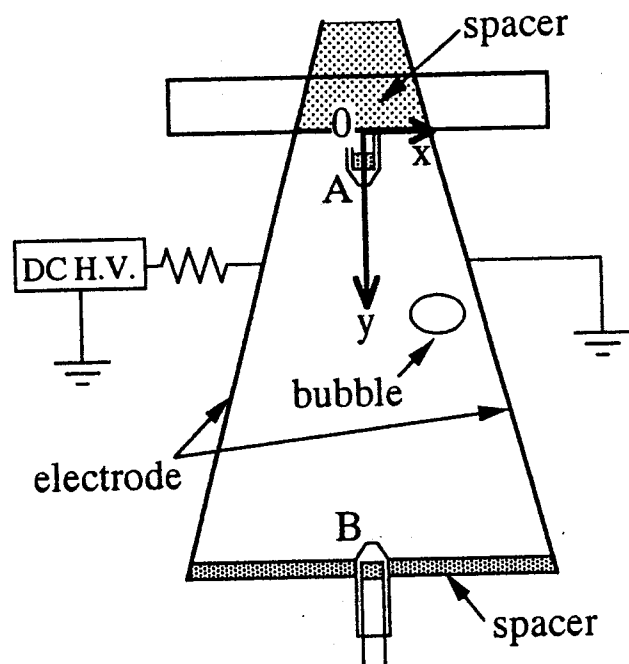


図 1.10 電極系ならびに気泡 (AとBは気泡発生源)

## 1.2 本論文の内容

本論文は、5章からなり、各章の内容を要約すると以下の通りになる。第1章は緒言であり、本研究でとりあげた絶縁性液体中のEHD効果に対する概要について述べ、進行波電界を用いた場合のEHD液体ポンピング制御およびEHD現象のシュリーレン法による可視化により示された特性とEHD気泡運動制御に関して、現在までの研究状況を報告し、本研究の必要性を示した。

第2章では、進行波電界を絶縁性液体中に形成させた場合、誘導電荷との相互作用で、EHD液体ポンピング現象が発生することを確認し、液体の垂直変位の周波数特性を実験的に求めた。この実験装置の基本構成は、アクリルU字管の外周に、3本の絶縁性被覆電線（電極）をスパイラル密着巻きにした円筒型チューブである。これに低周波の3相交流高電圧を直接印加することで、進行波電界を形成し、液体の垂直変位の周波数制御を行うものである。この垂直変位は、印加電圧の振幅と周波数に強く依存している。本研究の類似の先行研究には、J.R.Melcherらの論文<sup>(12)</sup>があるが、本章では、物理的に妥当な3つの仮定のもとに流体に作用する作用力について理論的に展開し、この現象を初等的ではあるが定性的に解明した。EHD液体ポンピング制御の応用としては、微小重力環境、すなわち宇宙重力環境における人工衛星等の静寂な装置内での液体輸送などの各種流体制御を考えている。したがって、微小重力環境下においての同様な実験を行うため、装置全体のコンパクト化、主として市販のインバータによってコンパクト化された電源を使用した場合の特性の変化についても実験的に検証した。

第3章では、第2章でとりあげたようにEHD液体ポンピング現象では結論的には、進行波電界による垂直変位は、ある位置でバランスしてい

るので液体の全体的な流れはないものとしている。しかしながら、電極近傍では局所的な流れがあるものと考えられる。そこで、電極近傍を光学的手法の1つであるシュリーレン法で可視化した。その結果、流れかどうかは現在のところ測定器の関係上、確認はされていないが、得られたシュリーレン像の特性は、進行波電界の基本的な形状および伝搬速度等の特性と非常によく一致していることが判った。すなわち、シュリーレン法による実験結果は、進行波電界の理論的な計算結果とたいへんよく一致している。この進行波電界の基本パターンの特性から第2章および後述する第4章のようなEHD効果等がより詳細に推察できる。したがって、この進行波電界の基本パターン特性として絶縁性液体（灯油）中での基本的な形状、電界の伝搬速度を光学的手法の1つであるシュリーレン法を利用して可視化し測定することが可能であれば、興味深いことであり電界の新しい測定法として、たいへん有益なものになる可能性がある。

第4章では、進行波電界を絶縁性液体中の気泡に作用させた場合、気泡に働く浮力と進行波電界による電気的な力のバランスより気泡を輸送することが可能で、その特性が進行波の周波数に依存することを実験的に確認し、かつ気泡運動の基本方程式を解くことで理論的に解明した。この実験装置の基本構成は、灯油のような絶縁性液体中に、同一平面上に一定の間隔で並べた平行円筒電極列で構成される電界カーテンである。これに、3相交流高電圧を直接印加することで進行波電界を形成し、微細な気泡群の上昇運動の周波数制御を行うものである。この気泡運動は、印加電圧の振幅と周波数に強く依存している。本研究の類似の先行研究には、J.S.Changらの論文<sup>(20)</sup>があるが、本章では、進行波電界中での気泡のEHD作用について、より詳しく実験を行い、浮力の見かけ上の減少や輸送制御に注目し、気泡運動の周波数制御を達成した。応用としては、化学工学の分野の気液相の界面を利用した気泡の液体中の滞留時間制御

や微小重力環境，すなわち宇宙重力環境におけるジェット燃料内の気泡除去などの各種流体制御を考えている．したがって，微小重力環境下においての同様な実験を行うため，装置全体のコンパクト化，主として市販のインバータによってコンパクト化された電源を使用した場合の特性の変化についても実験的に検証した．

第5章は総括であり，本研究で得られた成果をまとめるとともに，今後に残された諸問題や進行波電界を用いた絶縁性液体中の各種EHD効果の将来の展望について述べた．