

## 第5章

### 総括

本論文では、進行波電界を用いた絶縁性液体中のEHD効果としてEHD液体ポンピング制御、EHD現象のシュリーレン法を用いた可視化により示された特性、およびEHD気泡運動制御を実験的に確認し、また、理論的にこの基本的現象の解析を行った。

まず、絶縁性液体の液体に3相の進行波電界を作用させることによって、内部に圧力を発生させるポンピング作用があること、およびその周波数制御が可能であることを実験的および理論的に解明し確認した。さらに、基本となるEHD液体ポンピング現象の流れを確認するため、すなわち、EHD現象自身そのものを可視化するために光学的手法の1つであるシュリーレン法を用いて実験的および理論的に調べた結果、可視化された基本パターンは進行波電界の基本的な形状および伝搬速度等の特性を非常によく表しているということが判った。さらに、絶縁性液体中の微細な気泡群を3相の進行波電界によって、気泡群を停滞させるだけでなく相順方向に移動可能とし周波数制御が可能であることを実験的および理論的に解明し確認した。本研究によって得られた結論を各章ごとに要約すると次のようになる。

第2章の「進行波電界による絶縁性液体のEHD液体ポンピング制御」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制御が可能であることが判った。さらに、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ことが判った。ただし、この液体のEHD効果は、非常に多くの物理的パラメータに支配されており、厳密な取扱は困難である。ここで、引用したJ.R.Melcherらの報告<sup>(12)</sup>では、

かなり厳密な理論展開がなされているが、周波数特性や導電率の実験結果を十分説明できるまでには至ってなかった。そこで、本研究では、物理的に妥当な3つの仮定のもとに理論展開して、この現象を初等的ではあるが定性的に解明できることを示した。また、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が可能であろう。

第3章の「シュリーレン法による絶縁性液体中のEHD現象の可視化」では、第2章でとりあげたように、EHD液体ポンピング現象の理論的取扱いの中で大胆な仮定を導入し結論的には、液体の流れはないものとしているが、通常、電極近傍には流れはあるものと考えられるため、その液体自身の流れを可視化して各特性を調べてみた。その結果、流れかどうかは現在のところ測定器の関係上、確認はされなかったが、可視化した基本パターンは、進行波電界の基本的な形状および伝搬速度等の特性を非常によく表していることが判った。すなわち、8ミリ・ビデオ画像より測定した実験結果は、進行波電界の理論的な計算結果と非常によく一致することが判った。

第4章の「進行波電界による絶縁性液体中のEHD気泡運動制御」では、絶縁性液体中に注入された微小な気泡（直径、約0.2mm）に対して進行波電界により気泡運動の周波数制御が可能であることが判った。さらに、理論的には気泡のEHD効果は、クーロン力、グレイディエント力および浮力を考慮した絶縁性液体中における気泡の運動方程式により解明できることが判った。さらに、進行波電界のような電極構造は、絶縁性液体中の気泡の浮遊および輸送をより容易にすることも判った。また、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滞留時間の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が可能であろう。

以上，本研究により，進行波電界を用いた絶縁性液体中のEHD液体ポンピング制御およびEHD気泡運動制御について解明し，周波数制御可能なことを示した．本論文で取り上げた絶縁性液体中の各EHD効果には，液体における注入電荷の再結合，減衰等イオンの対流および拡散等の重要な伝導機構の因子が全く考慮されておらず，また気泡における肥大化に対する気泡の歪み等の考慮も全く考慮されていない．しかしながら，これらはまだ新しい技術であり，電氣的な力を利用して静寂な無可動部ポンプの実現および気泡輸送の実現において，基礎的データを提供するものであり，実用技術としての発展が期待できるものである．

なお，本研究の今後の発展として，進行波電界を用いた絶縁性液体自身の液体，絶縁性液体中の気体（気泡）および固体（粉体）など各種EHD制御可能な地上重力環境（地球重力環境）および微小重力環境（宇宙重力環境）における利用が期待される分野である．電極の大きさ等を含む装置等の最適環境条件の把握，絶縁性液体の種類増加，より詳細な理論解析などの技術開発は，実用化を推進する上での今後の課題である．また，第3章で述べたように，シュリーレン法で得られた基本パターンが，電極近傍の灯油自身を表すのかどうかは，測定器の関係上，確認されていないため，この測定は今後に残された課題である．また，進行波電界自身の特性として絶縁性液体（灯油）中での基本的な形状，電界の伝搬速度等を，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，電界の新しい測定法として，たいへん有益なものになるので，その理論的な裏付けおよび基礎的な実験的検証を行うことも重要な今後の課題である．

## 参 考 文 献

- ( 1 ) E H D 調査専門委員会編：電気学会技術報告 ( E H D 調査専門委員会報告 ) ,  
p. 2, 電気学会, ( 1977 )
- ( 2 ) 静電気学会：静電気ハンドブック, オーム社, p. 305-306, ( 1989 )
- ( 3 ) 静電気学会：静電気ハンドブック, オーム社, p. 676-678, ( 1989 )
- ( 4 ) W. H. Middendorf : A. I. E. E. Power App. , 77 III, p.795, ( 1958 )
- ( 5 ) O. M. Stuetzer : J. Appl. Phys. , 30, p.984, ( 1959 )
- ( 6 ) O. M. Stuetzer : ibid. , 31, p.136, ( 1960 )
- ( 7 ) G. V. Jorgenson : R. S. Instrum. , 53, p.55, ( 1962 )
- ( 8 ) W. F. Pickard : J. Appl. Phys. 34, p.246, ( 1963 )
- ( 9 ) W. F. Pickard : ibid. , 34, p.251, ( 1963 )
- ( 10 ) G. N. Kopylov : Sov. Phys. Tech. Phys. , 8, p.962, ( 1964 )
- ( 11 ) J. R. Melcher : Phys. Flui. 9, p.1548, ( 1966 )
- ( 12 ) A. P. Washabugh, M. Zahn and J. R. Melcher : IEEE, 88CH2565-0/88, pp.1564-  
1569, ( 1988 )
- ( 13 ) 浅沼：流れの可視化ハンドブック, pp. 314-341, 大橋秀雄編, 朝倉書店,  
( 1981 )
- ( 14 ) 静電気学会：静電気ハンドブック, オーム社, p. 688-694, ( 1989 )
- ( 15 ) K. C. Kao : Brit. J. Appl. Phys. , 12, p.629, ( 1961 )
- ( 16 ) O. M. Stuetzer : J. Appl. Phys. , 34, p.9, ( 1961 )
- ( 17 ) 渡辺：応用物理学会学術講演会予稿集, Pt2, p. 12, ( 1969 )
- ( 18 ) A. Watanabe : Jap. J. Appl. Phys. , 14, p.1301, ( 1975 )
- ( 19 ) R. Coelho and J. P. Gosse : Ann. Phys. , 5, p.255, ( 1970 )
- ( 20 ) J. C. Campeau, J. S. Chang and S. Masuda : Proceedings of 1986 Annual Meeting  
of The Institute of Electrostatic Japan, 25pc5, pp.417-420, ( 1986 )
- ( 21 ) Z. C. Wang, H. Yoshizuka, K. Takano and M. Hara : 電気学会論文誌 A, 116,  
pp. 873-880, ( 1996 )

- (22) 須田, 武藤, 酒井, 松浦, 本間 : 電気学会論文誌 A, **117**, pp.1109-1114, (1997)
- (23) 静電気学会 : 静電気ハンドブック, オーム社, pp.305-313, (1989)
- (24) 増田, 松本 : 電気学会論文誌 A, **94**, pp.515-522, (1974)
- (25) N. J. Felci : Journal of Electrostatics, **4**, pp.119-129, (1977/1978)
- (26) S. Masuda, K. Fujibayashi and K. Ishida : Staub-Reinhaltung der Luft, **30**, pp.449-456, (1970)
- (27) 増田, 藤林, 石田, 稲葉 : 電気学会論文誌 B, **92**, pp.9-17, (1972)
- (28) 青山, 増田 : 電気学会論文誌 B, **97**, pp.451-458, (1977)
- (29) 青山, 増田 : 静電気学会誌, **1**, pp.123-130, (1977)
- (30) 小田, 青山, 萩原, 池上 : 電気学会全国大会講演論文集[6], No.702, pp.209-210, (1991)
- (31) 小田, 青山, 萩原, 池上 : 静電気学会講演論文集, No.29p-C2, pp.45-48, (1991)
- (32) 青山, 小田, 萩原, 池上 : 電気学会全国大会講演論文集[6], No.685, pp.154-155, (1992)
- (33) 青山, 小田, 萩原, 池上 : 静電気学会講演論文集, No.22a-A3, pp.329-332, (1992)
- (34) T. Oda, M. Aoyama and T. Adachi : Proceedings of the 6th Asian Conference on Electrical Discharge, pp.59-62, (Oita, Japan, 1993)
- (35) 小田, 青山, 大久保, 野本, 足立 : 電気学会, 放電, 誘電・絶縁材料合同研究会, ED-96-31, DEI-96-25, pp.97-103, (1996)
- (36) T. Oda, M. Aoyama, T. Ohkubo, Y. Nomoto and T. Adachi : IEEE Annual Report, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol.II, pp.662-665, (San Francisco, USA, 1996)
- (37) 小田, 青山, 川元, 大久保, 野本, 足立 : 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, No.158, p.58, (1996)

- (38) 小田, 青山, 川元, 大久保, 野本, 足立: 静電気学会講演論文集, No.29p-C1, pp.335-338, (1996)
- (39) 小田, 青山, 金沢, 大久保, 野本, 足立: 静電気学会誌, 22, No.1, pp.27-36, (1998)
- (40) S. Masuda, K. Fujibayashi and K. Ishida: Staub-Reinhaltung der Luft, 30, pp.449-456, (1970)
- (41) 中込, 岡, 仲下: <改訂版>科学写真の撮り方, pp.166-167, 聖文社, (1980)
- (42) 岡: 誘電體論, pp.152-170, 岩波書店 (1954)
- (43) 小田, 青山, 川崎, 久保, 金沢, 大久保, 野本: 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, No.1357, p.667, (1997)
- (44) 小田, 青山, 川崎, 久保, 金沢, 大久保, 野本: 静電気学会講演論文集, No.16p-C8, pp.329-332, (1997)
- (45) S. Masuda and T. Kamimura: Journal of Electrostatics, 1, pp.351-370, (1975)
- (46) 青山: マクロ帯電粒子の電気力学的制御に関する研究, pp.1-409, 東京大学博士学位論文, (1974)
- (47) 青山, 小田, 荻原, 池上: 電気学会全国大会講演論文集[6], No.686, pp.156-157, (1992)
- (48) 青山, 小田, 荻原, 池上: 静電気学会講演論文集, No.22a-A2, pp.325-328, (1992)
- (49) 荻原, 藤井, 青山, 小田: 日本マイクログラビティ応用学会誌第8回学術講演会, 9, No.4, 28, pp.356-357, (1992)
- (50) 青山, 小田, 荻原, 池上: 電気学会全国大会講演論文集[6], No.755, pp.216-217, (1993)
- (51) M. Aoyama, T. Oda, M. Ogihara, Y. Ikegami and S. Masuda: Journal of Electrostatics, 30, pp.247-258, (1993)
- (52) 小田, 青山: 西日本工業大学紀要理工学編, 26, pp.1-7, (1996)

- (53) 小田, 青山, 上川路, 野本, 足立 : 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, No. 148, p. 48, (1995)
- (54) 小田, 青山, 上川路, 野本, 足立 : 静電気学会講演論文集, No. 3p-C6, pp. 185-188, (1995)
- (55) 山口, 清水, 高川 : <改訂版>石油製品の知識, pp. 229, 幸書房, (1977)
- (56) 杉山監修, 黒田, 架谷 : 演習化学工学, p. 275, 共立出版, (1981)
- (57) 小田 : 静電気学会誌, 20, No. 5, pp. 305-307, (1996)
- (58) H. Lamp : Hydrodynamics, Cambridge at the university press, Art. 356 (Effect of
- (59) viscosity on the pendulum), pp. 643-644, (1932)
- Y. C. Yang : Uber Messungen im Millikankondensator, Annalen der Physik, 76,
- (60) pp. 333-368, (1925)
- T. B. Jones and G. W. Bliss : Journal of Applied Physics, 48, No. 4, pp. 1412-1417, (1977)

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり，終始熱心な御指導・御鞭撻を賜りました大分大学工学部電気電子工学科の野本幸治教授，ならびに西日本工業大学電気工学科の青山道夫教授に心より感謝の意を表します。

本論文をまとめるに際し，御討論と御教示を頂いた元大分大学工学部電気電子工学科の足立宜良教授，大分大学工学部電気電子工学科の大久保利一教授，金沢誠司助教授に，深く感謝の意を表します。また，カナダのMcMaster 大学のJ.S.Chang 教授にも御指導頂きました。心より感謝致します。

また，研究を進めるにあたっては，大分大学工学部生産システム工学科の時田雄次教授，鹿毛一之教授，ならびに大分大学工学部応用化学科の羽野忠教授には有益な御助言と御討論を頂きました。西日本工業大学の岡部淳一学長，西日本工業大学電気工学科の川崎元之教授，ならびに大分大学工学部知能情報システム工学科の遠藤勉教授からは常に暖かい御支援を頂きました。

実験の遂行にあたっては，大分大学工学部電気電子工学科の赤峰修一技官をはじめ，大分大学大学院生の上川路昭彦（現在，九州電力（株）），川元孝三（現在，山口県庁），ならびに久保博史（現在，M1年生）諸氏に多くの協力を頂きました。

本研究は，以上に挙げた方々の御助力のもとに，はじめて完遂し得たものであり，ここに記して心より感謝の意を表します。

最後に，本研究を完遂するまで暖かく見守ってくれた家族に深く感謝します。

1998年2月

小田 徹