

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2006年度から2008年度
課題番号：18560179
研究課題名（和文） イオン流を伴う気液2相流体の電気流体力学現象の定量解析
研究課題名（英文） Analysis of Gas-Liquid Two-Phase Electrohydrodynamics on Ionic Flow Phenomena
研究代表者
大山 龍一郎（Ryu-ichiro Ohyama）
東海大学・工学部・教授
研究者番号：40233291

研究成果の概要：

本研究において解析と解明を目的とした現象は、気体相と誘電性の液体相の界面において、気相で微弱放電を発生させると同時に液体が流動する一つの電気流体力学現象であった。すなわち、本研究は層状誘電液体の自由表面上の気相に放電電極を配置した気液2相流体のモデルにおいて、気相微弱放電下で誘電液体に誘起する電気流体力学現象を定量的に解析した。そして、荷電粒子の電荷量と移動速度を定量化し、電気伝導性効力を解析した。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2006年度 | 900,000 | 0 | 900,000 |
| 2007年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2008年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 1,900,000 | 300,000 | 2,200,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：気液2相流体、電気流体力学、イオン流、粒子画像流速計測、荷電粒子

1. 研究開始当初の背景

本研究はこれまでに気体および誘電性液体に不平等電界を形成したイオン流場の電気流体力学(Electrohydrodynamics: EHD)現象について研究を行ってきた。

平成9年3月、偶然に層状誘電液体の自由表面上の気相に放電電極(針状電極)を配置して気相微弱放電下で誘電液体の電気流体力学現象を観測したところ、これまでに全く知られていない興味深い現象を発見した。す

なわち、単一相の流体において電気流体力学現象を誘起する場合には流体運動が従来から知られているように必ず放電電極から外側(対向電極側)へ向かって流動するのに対して、この気液2相層状流においては気相に放電電極を配置することで、誘電液体の流動が対向電極から放電電極側へと誘起する全く逆方向な比較的強い流体運動であった(図1)。この気相微弱放電下での気液2相層状流の電気流体力学的現象は予想外の未知現象であったことから、本現象の発見以後、現

象の解明に努めて研究を行ってきた。

現在、電磁流体力学の分野において Magnetohydrodynamics (MHD) が理論的に体系化されているのに対して、電気流体力学の理論的な体系化は未だ遅れている。その理由は、電気流体力学分野に積極的に従事している国内外の研究者数が比較的にかなり少ないのが現状であり、現象そのものが複雑で流体運動に多くのモードが存在することも大いに関係している。最近になって電気流体力学現象の取り扱いには主に流体内部の誘電的性質と電気伝導の単独作用あるいは複合作用として整理し、その理論的体系化がようやく進められようとしている。

電気流体力学現象の解析的取扱いは、一般に流体内部の誘電的性質と放電による電気伝導特性の単独作用あるいは複合作用として整理できると考えられている。これまでの電気流体力学に関する多くの実験的発見と解析は、ほとんどが気体あるいは液体の Single Phase 流体に誘起する現象であった。気体あるいは液体の Single Phase 流体における電気流体力学現象の無次元化解析方法の標準化に目途が立ちつつある。しかし、気体・液体の2相流体における電気流体力学現象については、現象の発見、整理ならびに理論的な体系化がほとんど行われていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、この電気流体力学現象を対象に、気液2相層状流の解析方法を具体化すること、ならびに本現象を解明して応用面を開拓することを研究の目的とした。具体的には、気液2相電気流体力学モデルを対象に流れ場の測定と解析を行うこと、ならびに本現象を応用した気液2相の簡易なポンプを製作して流体ポンピングを特徴付ける無次元化パラメータを評価することを目的とした。

本研究で提案している気液2相流体の電気流体力学現象の実験的発見と定量解析を実施することにより、気体・液体の2相流体における電気流体力学効果の一つの現象論的な特徴付けと解析方法を具体化するので、当研究分野の発展に大いに貢献できるものと考えている。

3. 研究の方法

本研究では、気液2相層状流の解析方法を具体化して本現象を解明しようとする目的から、まず電気流体力学的イオン流場の流速計測法を開発すること、次に本現象の駆動力効果を解析するための物理的ファクターを明確にすることを各々目標とした。すなわち、電気流体力学分野で重要な流れ場の解析を

対象に、その流速ベクトル分布を定量化するために粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry : PIV) の適用技術を応用して、気液2相流体の電気流体力学的イオン流場の流速計測技術を開発すると同時に、その電氣的駆動力による流体力学的効果の定量解析方法を具体的にしようとするものである。

(1) 気液2相層状流のモデル

本研究において解析と解明を目的としている現象は、気体相と誘電液体相の界面において、気相で微弱放電を発生させると同時に液体が流動する一つの電気流体力学現象である。図1は β -quinophthalaneを原料とする蛍光染料によって液相流のみを可視化したものである。本研究では、この現象を見出したモデルと同じく、内径が30mmの透明な円筒ガラス容器内に平板電極(底面)と直径が1mmの針状電極を配置して、その電極間部分にシリコンオイルの自由液面を形成した評価モデルを用いた。

この代表的な可視化例は電極間に商用周波数の交流電圧(4kV)を印加した時のものであるが、本現象は直流電圧やパルス電圧であっても液体が駆動する。この現象の特徴は、これまでによく知られている液相電気流体力学現象に対して、流動の方向が反転していることである。すなわち、流体の単一相で針対平板電極系のような不平等電界を構成すると、流体の流れは針先から平板側へ向かう。ところが、本現象のように針状電極の先端を液相から引き上げると、直ちに液相の流動が逆向きになるユニークなものである。このように本現象の評価モデルは、イオン流場を伴った気液2相層状流である。

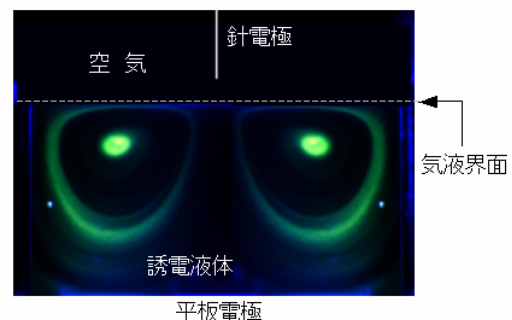


図1 気液2相の評価モデル

(2) Molecular Tagging Velocimetry の適用による気液2相流の測定と解析

計測手段に用いたトレーサには、吸収波長のピークが270nmまたは420nm付近であり、燐光波長のピークが525nm付近の可視光を放出するBiacetyl ($\text{CH}_3\text{COCOCH}_3$ 分子)である。この

分子が燐光を発する持続時間は、比較的長く数100 μ sに及ぶことを既に実験的に確認した。試験容器内の気相領域は、予め真空ポンプにより排気した後、高圧窒素ガスを用いてBiacetyl液体のバブリングを行い、そのクラスター分子化したものを雰囲気として封入した状態である。また、液相の誘電液体（シリコンオイル）にはBiacetyl液体を100ppm程度溶かした状態にした。気相および液相に混入した燐光分子トレーサの励起には、発振波長が266nmのYAGレーザー第4高調波のビームを用いた。この計測手段に用いる可視化画像の撮影と取得には、燐光分子トレーサの励起タイミング（パルスレーザービームの照射時刻）と、その励起時刻からトレーサ追跡の時間分解能に相当するトレーサの燐光タイミング（画像撮影の露光開始時刻）までの同期および遅延システムを構成した。すなわち、YAGレーザーのパルス発振ゲート、およびデジタルフレームカメラに取り付けたイメージインテンシファイアの露光ゲートを各々タイムディレイコントローラーにより制御するシステムを構成した。流速の計測はパーソナルコンピュータを用いた画像処理により行った。この処理の方法は、Biacetylトレーサの励起時刻から燐光撮影時刻までの遅延時間の中に、Biacetylトレーサが励起位置から燐光を発しながらイオン流に追従して移動した距離を算出した。そして、励起位置と燐光撮影位置の間の平均速度を求めた。

(3) 気液2相層状流における駆動力の解析

電気流体力学現象は流体内部の誘電的特性と放電による電気伝導特性の単独作用あるいは複合作用が支配的な要素である。そこで、本研究では図1に示した評価モデルにおいて気液2相電気流体力学現象を誘起する電氣的駆動力を解析するために、気相および液相における誘電的特性および電気伝導特性の測定を実施した。具体的には、気相微弱放電が本現象のきっかけとなっていることから、これに伴う各相流体内部のマクスウェル応力の変化を定量的に算出すると同時に、電気伝導に伴う荷電粒子に働く電気力を算出した。前者の誘電液体に働く応力については、誘電特性測定装置を使用して誘電性効力を解析した。後者の電気力に関しては、荷電粒子の移動速度が高速であるために時間分解能の高いデジタルオシロスコープとロックインアンプ、微小電流計と、微小電流検出回路を自作して測定系を構成した。そして、荷電粒子の電荷量と移動速度を定量化し、その電気伝導特性から電気伝導性効力を解析した。これらの測定装置は、流速測定装置の高電圧電源システムに接続し、流速測定と同時に動作するように構成した。

本研究では気相および液相における誘電

性効力および電気伝導性効力と、電気流体力学的誘因による流れ場の関係について流速分布測定値を含む実験結果に基づいたフォーバランス等の解析を実施した。特に、Navier-Stokes 運動方程式の外力項において電気流体力学効果に及ぼす誘電性効力項を無次元化したDielectric Electric Rayleigh Number と、電気伝導性効力項を無次元化したConductive Electric Rayleigh Number に重点を置いて本現象を解析した。このことより、誘電性効力と電気伝導性効力の効果を各々比較しながら、本現象における電氣的駆動力の定量化が可能となる。

(4) 本現象を応用した電気流体力学ポンプの開発

本現象の応用についても併せて研究を実施した。本現象の直接的な応用として、気液界面を含む気液2相流体の電気流体力学効果により液体を汲み上げるAir Wave Type EHD Pumpを考案している。このポンプは、図2に示すように気相の微弱放電によりGas-Phase EHD Flowを発生させ、それによりLiquid-Phase EHD Flowを誘起して、液体を重力に逆らって液体溜めから外部へ汲出すものである。本研究では、試験用のAir Wave Type EHD Pumpを製作して、そのポンピング性能に対する気液2相流体の電気流体力学効果の定量的な解析と実証試験を実施し、本研究で具体化する定量解析による性能評価を行った。

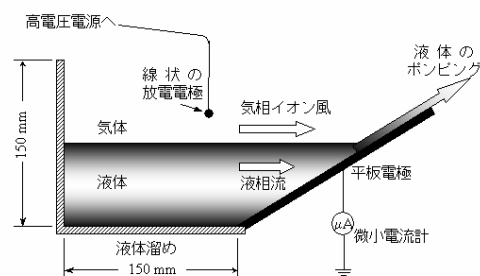


図2 Air Wave Type EHD Pump の考案

4. 研究成果

(1) Molecular Tagging Velocimetry の適用による気液2相流の測定と解析

イオン風はコロナ放電場の荷電粒子流を伴うガス流であるために、そのイオン流れ場と電界を共に乱すことのないように速度を定量化することが容易でない。また、イオン風は局所放電によって発生するために、流れ場の速度勾配が極めて大きい点もイオン風計測を難しくしている。最近、ガス流の可視化計測においては、分子の燐光現象を応用し

た Molecular Tagging Velocimetry (MTV) の適用が検討されている。この MTV は、流れ場にピアセチルなどの特定な分子を混入して、その流れに追従している分子をパルスレーザーにより励起し、直後の燐光分布の時空間変位を解析することで定量的な速度計測が行われるものである。

図 3 は霧化したピアセチルを燐光トレーサとしてイオン風の可視化に適用した際の一例である。これは電極間に正極性の直流電圧 10kV を印加して針電極先端から平板電極へ向けてイオン風が形成している際の燐光像である。ここで、霧化ピアセチル粒子の励起には YAG レーザービームの第 4 高調波 (266nm) を 10ns 間、針電極先端から 0.5mm の位置に照射した。この可視化画像はレーザー照射からの遅延時間が 100 μ s 後に撮影したものである。画像の中心付近に見える一つの点状な発光は、針電極先端部のコロナ放電による発光である。針電極先端付近の燐光像の歪みは、針先直下で霧化ピアセチル粒子がイオン風によって平板電極側に運ばれているので、レーザー励起の位置から遅延時間に応じて移動した霧化ピアセチル粒子の分布である。2 時刻間で撮影した燐光分布の可視化画像を用いれば、その輝度分布の解析によりイオン風速度を推定することも可能である。すなわち、図 3 に示した可視化画像においては、針電極先端から 0.5mm の位置のイオン風速度が 19.2m/s であると推定された。また、イオン風は直流高電圧の印加に限らずに交流高電圧においても発生することを確認した。

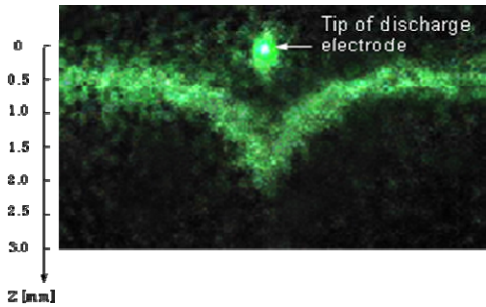


図 3 イオン風の燐光像

針電極先端から発生したイオン風は平板電極へ向かって進展するので、その電極軸上のイオン風速度は 1 次元成分であると考えられた。従って、ここでは電極軸上に沿った燐光粒子の単位時間あたりの移動量を輝度解析から求めた。図 4 はコロナ放電電極軸上のイオン風速度分布である。その結果、コロナ放電電極近傍の速度勾配が極めて高いことを定量的に評価することができた。

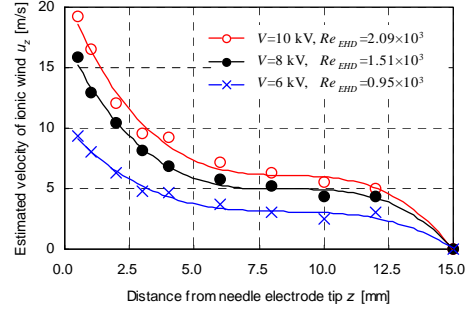


図 4 イオン風速度分布

(2) EHD 効果による力の分類

一般に、流体力学においては Mass conservation、Momentum conservation および Energy conservation が現象を支配する方程式である。特に、Momentum conservation 方程式において電気磁気的な環境下で流体に作用する外力 F_{EB} は次のようになる。

$$\mathbf{F}_{EB} = \rho_i \mathbf{E} + \mathbf{J} \mathbf{B} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon - \frac{1}{2} H^2 \nabla \mu + \nabla \left\{ \frac{1}{2} \rho E^2 \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T + \frac{1}{2} \rho H^2 \left(\frac{\partial \mu}{\partial \rho} \right)_T \right\} \quad (1)$$

ここで、 ρ_i は空間電荷密度、 J は電流密度、 ε は誘電率、 μ は透磁率、 ρ は流体密度、 T は温度、 E は電界、 B と H は磁界である。式 (1) における右辺の各項については、空間電荷による力、帯電粒子による力、誘電特性の変化による力、透磁特性の変化による力、誘電応力による力、電磁応力による力を表している。式 (1) を無次元化して磁界の影響を無視できる条件を考えると、電界曝露下での外力 F_E は次のように無次元化される。

$$\mathbf{F}_E = \frac{1}{\text{Re}} \{ E_{I\sigma} \boldsymbol{\eta} + E_{I\varepsilon} (\varepsilon - 1) \nabla \boldsymbol{\eta}^2 \} \quad (2)$$

$$E_{I\sigma} = \frac{IL^3}{\rho v^2 \mu_i A} \quad (3)$$

$$E_{I\varepsilon} = \frac{L^2 \varepsilon_0 E^2}{2 \rho v^2} \quad (4)$$

ここで、 $\boldsymbol{\eta}$ は無次元化した電界を表し、 $E_{I\sigma}$ と $E_{I\varepsilon}$ は Conductive electric Rayleigh number と Dielectric electric Rayleigh number と呼称する。すなわち、流体に外力として作用

するものには、式(3)と式(4)に示した「電荷移動による作用($E_{I\sigma}$)」と「誘電特性の変化による作用($E_{I\epsilon}$)」に分類される。従って、その両者の作用力の比較には式(2)から

$$E_{I\sigma}\eta \leq \text{or} \geq E_{I\epsilon}(\epsilon-1)\nabla\eta^2 \quad (5)$$

が参考となることがわかる。流体中に針状電極や線状電極などを局所放電（コロナ放電）電極として配置することによって比較的簡単にそのEHD現象を発生させることができる。

図5は気液界面に沿って発生した液相EHD流の無次元化最大速度 u_{max} と、その速度を示す位置を電極軸からの無次元化距離 l_m について、それぞれを式(3)に示した Conductive electric Rayleigh number ($E_{I\sigma}$) の関数として整理したものである。この結果から図1に示した流動の速度 u_{max} は $E_{I\sigma}$ に比例していることがわかった。

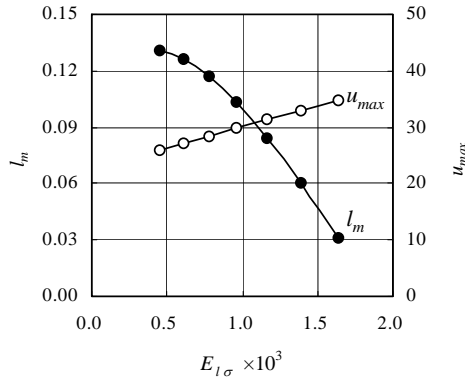


図5 無次元化パラメータ $E_{I\sigma}$ に対する気液界面の特性

(3) Air Wave Type EHD Pump

本現象を応用した電気流体力学ポンプ (Air Wave Type EHD Pump) について、図6は電極間に電圧を印加した際に現れる誘電性液体の流速ベクトルの分布を示す。液体の主な流れはワイヤ電極下方の液体自由表面から水平方向に平板電極へ向かって加速している様子がわかった。すなわち、平板電極へ向かった液流の一部は気液界面と平板電極の3重接合点から重力に逆らって平板電極に沿ってポンピングされていることになる。平板電極上の液流の厚みは1mm程度の液膜となっている。また、気液界面と平板電極の3重接合点から液体溜めの底に向かって逆に降下した流れがある。このような平板電極表面に沿ってポンピングする流れと液体溜めの底に向かって降下する流れの強さは、電極間の電位差、電流および距離に相応して強まった。

実験において測定した時間平均汲み上げ流量 Q_{ave} と液体自由表面における流速 v_x は、電極間の電位差 V 、電流 I_{ave} および幾何学的な距離にそれぞれ依存することがわかった。そこで、これらの諸量に依存する無次元化パラメータを用いて液体ポンピングの基本的な特性を解析した。次式は各無次元化パラメータを示す。

$$R_e = \frac{u_o \cdot L}{\nu_g}, \quad (6)$$

$$F_r = \frac{u_o}{\sqrt{g \cdot L}}, \quad (7)$$

$$\Sigma_E = \frac{E_{I\sigma} \cdot E_{I\epsilon} \cdot F_r^2}{R_e^2}. \quad (8)$$

ここで ϵ_g , ρ_g , ν_g はそれぞれガスの誘電率、密度、動粘度である。 u_o , L はそれぞれ特性速度、電極間距離である。式(8)に示した無次元数 Σ_E は、本研究において考案しているパラメータであって、式(3), (4), (6), (8)の各無次元数における力のバランスをとったものである。

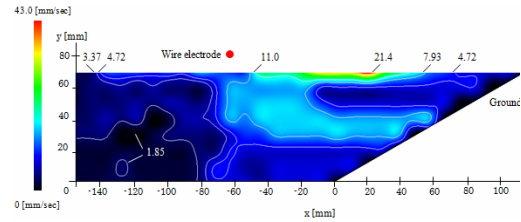


図6 Air Wave Type EHD Pump の液相速度分布

このポンピングは気相のコロナ放電により Gas-Phase EHD Flow を発生させ、それにより Liquid-Phase EHD Flow を誘起して、液体を重力に逆らって液体溜めから外部へ汲出すものであった。Liquid-Phase EHD Flow については、コロナ放電の EHD 駆動力等によって解析した。その結果、EHD ポンプの性能は無次元数 Σ_E がポンピング特性に及ぼす基本的な因子になることを見出すことができた。

以上、本研究においては電気伝導性効力と流速分布の定量化から、Navier-Stokes 運動方程式の外力項において電気流体力学効果に及ぼす電気伝導性効力項を無次元化した Conductive Electric Rayleigh Number に重点を置いて本現象を解析した。このことより、電気伝導性効力の効果を詳細に検討しながら、本現象における電氣的駆動力の定量化が

可能であることを明らかにした。そして、本現象の気液2相層状流における流れ場の諸量と電氣的駆動力の関係について整理し、イオン流を伴った気液界面の流体力学的効果の特徴と電気力学的な特徴から本現象の解明を行った。特に、イオン流を伴う気液2相界面の各層状流の効力比等に関する新たな知見を得ることができたものと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 大山: “EHD 現象の可視化—コロナ放電場において誘起するEHD流動—”, 可視化情報, Vol.27, No.105, pp.98-102 (2007年), 査読有
- ② R. Ohyama, K. Aoyagi, Y. Kitahara, Y. Ohkubo: “Visualization of the Local Ionic Wind Profile in a DC Corona Discharge Field by Laser-Induced Phosphorescence Emission”, Journal of Visualization, Vol.10, No.1, pp.75-82 (2007年), 査読有
- ③ R. Ohyama, K. Inoue, J. S. Chang: “Schlieren Optical Visualization for Transient EHD Induced Flow in a Stratified Dielectric Liquid under Gas-Phase AC Corona Discharges”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.40, No.2, pp.573-578 (2007年), 査読有

[学会発表] (計5件)

- ① 中村、大山: ” 直流コロナ放電場における針対円筒電極系正イオン風の画像解析”, 平成21年電気学会全国大会講演論文集, 1-089 (2009年3月), 札幌
- ② 北原、大山: ” 直流コロナ放電場における針体平板電極系負イオン風の画像解析”, 平成20年電気学会全国大会講演論文集, p.120 (2008年3月), 福岡
- ③ Y. Kitahara, K. Aoyagi, R. Ohyama: ” An Experimental Analysis of Ionic Wind Velocity Characteristics in a Needle-Plate Electrode System by Means of Laser-Induced Phosphorescence”, Proc. IEEE 2007 Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.529-532 (2007年10月), Canada·Vancouver
- ④ K. Aoyagi, Y. Kitahara, R. Ohyama: ” Optical Characterization of Ionic Wind Field by Means of Laser-Induced

Phosphorescence”, Proc. IEEE 2006 Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.174-177 (2006年10月), USA·Kansas City

- ⑤ 北原、青柳、大山: ” 分子発光トレーサを用いたレーザー誘起燐光による針—平板電極系イオン風の可視化に関する試み”, 平成18年電気学会基礎・材料・共通部門大会講演論文集, p.459 (2006年8月), 熊本

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大山 龍一郎 (Ryu-ichiro Ohyama)
東海大学・工学部・教授
研究者番号: 40233291

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし