

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05808

研究課題名(和文) 弱電離プラズマを伴う気液2相流体の可視化と電気流体力学効果の評価

研究課題名(英文) Visualization of Gas-Liquid Two-Phase Fields with weakly ionized plasma and Its evaluation of Electrohydrodynamic effects

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、弱電離プラズマ流を伴う気液2相流体のEHD現象の可視化と定量評価を具体化すること、ならびに気相ラジカル粒子と液相界面反応に基づくEHD効果を評価することであった。実験では気体側から気液界面および液体内部へ進展するパルス性状のイオン流によるEHD現象を対象とした。まず、弱電離プラズマを伴う気液2相流体の可視化結果については、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を評価し、液体の導電率が電気流体力学効果に大きな影響を及ぼすことを定量化した。次に、相対湿度をパラメータとして電離作用の評価を行った。その結果、放電遅れ特性の解析からイオン極性の効果に関わる知見を得た。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research was to consider visualization of gas-liquid two-phase flow fields accompanied by weakly ionized plasma flow, and its evaluation for EHD effects based on vapor-phase radical particles and the liquid-phase interface reaction. The experimental models were EHD flow fields where the weakly ionized plasma flow progresses to the interface of gas and liquid. For the results on visualization of EHD flow fields, the dielectric characteristics and electrical conduction characteristics in the gaseous phase and a liquid phase were evaluated. It was quantitatively urged for the conductivity of a liquid to have influence on the EHD phenomena. For the EHD effects of vapor-phase radical particles on liquid-phase interface reaction, the investigation into ionization action was conducted using the relative humidity of the mist as a parameter. These experimental results derived the knowledge that could consider effect of the ion polarity concretely.

研究分野：工学

キーワード：電気流体力学現象 Electrohydrodynamics 気液2相流体 弱電離プラズマ イオン流

1. 研究開始当初の背景

本研究では、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。特に、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、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となる。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、申請者は本現象の解明に努めて研究を行ってきた。これまでの研究成果から、この現象の応用はEHD効果により層状液体の流動を外部電界のみで駆動制御できること、および同時発生させた弱電離プラズマによる化学活性種(ラジカル)を応用できるため、弱電離プラズマを伴う気液2相層状流の可視化と解析について具体化することが望まれていた。

2. 研究の目的

電気流体力学現象の解析的取り扱い、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、国内および国外においても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。今後の当研究分野の進展は、Multi Phase流体における電気流体力学現象の解析と理解に向かうものと考えられる。本研究は気液2相流体のEHD現象の可視化と定量評価を具体化すること、ならびに気相ラジカル粒子と液相界面反応に基づく気液2相EHDの機能性を実験により調査し本現象の応用面を開拓することが目的である。

3. 研究の方法

本研究では、気液2相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。まず、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、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、気液2相流体における電氣的駆動力による流体力学的効果の定量解析を行った。EHD現象は、印加電界による流体内部の誘電的特性とイオン流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、本研究では研究目的を達成するために、次の2つの定量解析をアプローチとして課題の解決に着手した。

【流れ場の解析】イオン流れ場の解析を対象にして、申請者が開発を進めてきたレーザー誘起燐光を用いた画像計測による気液2相流の定量化を検討した。具体的には、Navier-Stokes運動方程式の外力項においてEHD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、本現象の気液2相流の流れ場を解析した。

【電氣的駆動力の解析】弱電離プラズマが本現象のトリガーであることから、その電界作用による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、発光分光法に基づくプラズマ診断によって気相ラジカル粒子と液相界面反応を検討した。具体的には、弱電離プラズマに曝された気液界面における流体力学的なエネルギー交換と荷電粒子の電磁的なエネルギー交換の解析方法を検討するため、気液界面から離れるミストの相対湿度をパラメータとして電離作用の評価を行った。ここでは、加湿空気中のイオンの極性を考慮して電子なだれの発生と進展に要する時間項を算出するため、インパルス放電遅れ時間の分析を行った。その結果、イオン極性の影響を見出すことができた。この実験データに関する知見は、空気中の弱電離プラズマイオンによるEHD効果の過渡解析を進める過程で重要な役割を果たすものと考えている。

4. 研究成果

(1) 弱電離プラズマによるイオン流

イオン流はコロナ放電場の荷電粒子流を伴うガス流(イオン風)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。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)を適用した。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。すなわち、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(CH₃COCOCH₃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100μsに及ぶことを実験的に確認した。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系統を構成した。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系統を構成した。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間に、Biacetyl トレーサが励起位置から燐光を発生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。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の速度を推定することも可能である。その例として、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。

(2) 液相粒子と空気混相状態における交流イオン流の可視化と解析

イオン流（風）には、メカニカルパーツを用いなくても送風することができるなどの特徴があり、多くの研究者が古くから研究を行っている。しかしながら、イオン風はコロナ放電場の荷電粒子を含むガス流であるために、そのイオンの流れと電界を共に乱すことのないようにガス流速を測定することは容易ではない。本研究では、粒子画像流速測定法 (PIV) を用いて流動の可視化とイオン風速度の定量化を行った。また、針対円筒電極により発生するイオン風の測定結果について、無次元の EHD パラメータによるイオン風の評価を行った。イオン流場は、トレーサ粒子に使用したパラフィンオイルの液相粒子と空気の混相流の状態である。一般に、大気中のイオン風は直流コロナ放電の場合に連続的に発生し、交流コロナ放電の場合には印加電圧の周波数に応じて間欠的に発生する。そのため、イオン風の発生風量は直流コロナ放電の方が比較的大きい。しかし、直流コロナ放電電極から対向電極に向けて電極支持と気流路の構成に誘電体を設ける

と、コロナ放電電極と同極性のイオンが誘電体流路壁に付着して放電電極近傍の電界を緩和させるため、安定なコロナ放電が維持し難い。その点、交流コロナ放電駆動は電界緩和の影響が少なく、誘電体流路を設けてノズル状のイオン風吹き出し構成に向いていると予想されるが、これに関する実験データ等の知見はほとんどない。そこで、本研究では研究の方法および研究成果(1)で得た知見から、コロナ放電電極と対向電極の間に細管誘電体流路を構成し、その細孔ノズルから吹き出す交流イオン風の特性について実験による調査を行った。

一般に Mass conservation、Momentum conservation および Energy conservation が現象を支配する方程式である。物理量のパラメータとしては、空間電荷密度 ρ_f 、電流密度 J 、誘電率 ϵ 、透磁率 μ 、流体密度 ρ 、温度 T 、電界 E 、磁界 B と H がある。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、電磁応力がある。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。

$$F_E = \frac{1}{\text{Re}} \{ E_{I\sigma} \eta + E_{I\epsilon} (\epsilon - 1) \nabla \eta^2 \} \quad (1)$$

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

$$E_{I\epsilon} = \frac{L^2 \epsilon_0 E^2}{2\rho v^2} \quad (3)$$

ここで、 η は無次元化した電界を表し、 $E_{I\sigma}$ と $E_{I\epsilon}$ 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(2)と式(3)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。実験の結果から交流イオン流量は $E_{I\sigma}$ に依存し、気液 2 相層状流における評価方法と同様に定量化できることがわかった。

(3) 気液 2 相層状流体においてイオン流を伴う液相層状流のモデリング

これまでに検討を行った気液 2 相層状流体の電気流体力学効果については、Conductive electric Rayleigh number ($E_{I\sigma}$) よりも Dielectric electric Rayleigh number ($E_{I\epsilon}$) によるフォースバランスが強調されることが判明した。 $E_{I\sigma}$ はイオン流の電流密度 J

クトルが支配的となる無次元化パラメータである。そこで、気液2相層状流体でイオン流を伴う液相層状流のモデリングを検討するために、誘電性液体の導電率をパラメータとした評価を行った。

実験に使用した電極系は、針電極と導電率の異なる水(水溶液)電極である。放電電極は気相に配置した針電極であり、水電極は放電電極から5mm下方に静水面を構成した。この電極系の基本配置は、上記の研究方法及び成果(1)と(2)のものと同様である。実験では、気相放電が発生した際に同期して水電極内部の電流分布を観測した。気相放電には、コロナ放電(微弱な放電現象)と火花放電(臨界となる放電現象)の異なるタイプを適用した。液相境界(底面と側面)において測定した時間平均の電流密度分布は、コロナ放電および火花放電に対して相似になることを確認した。そこで、本研究では臨界としての火花放電を適用した際のデータで検討を行うこととした。

本研究では、研究の方法および研究成果(2)で得た知見から数値シミュレーションのためのモデリングを検討するため、火花放電時に観測される気液界面電位を境界条件として適用することを試みた。火花放電の進展長は液相導電率の増加に伴って短縮し、液面電位は放電進展長に整合した分布を呈した。このような液相導電率の影響は、気液界面における放電進展に関係ある興味深い結果であることが知られた。すなわち、Conductive electric Rayleigh number (E_{ie})で表現したEHDパラメータと同様に、数値シミュレーションによるモデリング手法に対して有効な界面条件を与えるものであることを示唆した。数値電界計算には、次の式を適用して簡便化を図った。

$$\mathbf{E} = -\nabla\Phi \quad (4)$$

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \quad (5-1)$$

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} \quad (5-2)$$

ここで、 $E[V/m]$ は電界ベクトル、 $\Phi[V]$ は電位ポテンシャル、 $J[A/m^2]$ は電流密度ベクトル、 $\sigma[S/m]$ は導電率、 $D[C/m^2]$ は電束密度ベクトルである。時間平均による計算(定常)は(5-1)式を適用し、過渡計算(非定常)には(5-2)式を適用した。液体には導電率が0.07 S/mと5 S/m(水道水と海水に相当)を用いた。数値計算結果は実験値に良く一致していることが確認できた。

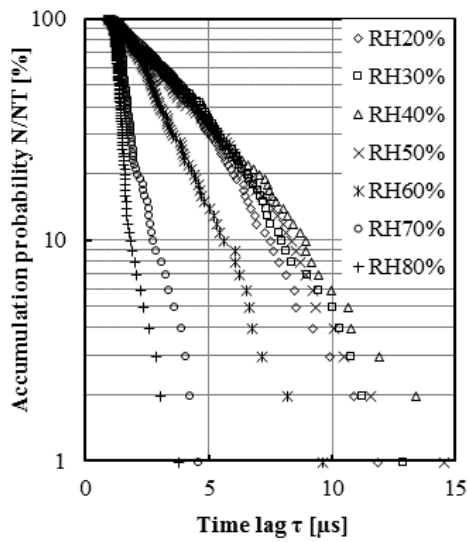
(4) 加湿空气中イオンの極性を考慮した電子なだれ発生と進展に要する時間項の検討
これまでに検討を行った液相層状流のモデリングにおいては、気相中のコロナ放電の生成に関わるパラメータを具体化する必要があった。気液界面の周囲では極微小な液相ミストがイオン流の生成と進展に大きな影

響を及ぼす。イオン流の生成と進展については、電子なだれの生成と進展から定量的に評価することを試みた。

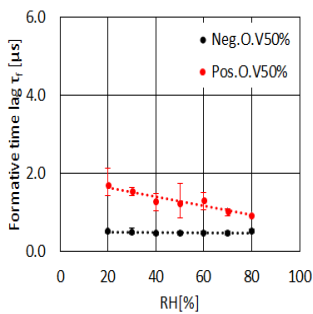
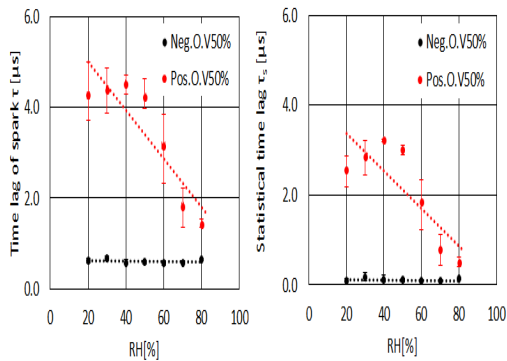
実験に使用した電極系は、イオン流の平均分布を相対的に強調するため細線電極と平板電極を対向させた線対平板電極系を用いた。電極系は湿度を可変して管理できる容器内に配置した。相対湿度は液相ミストの効果を検討するために20から80%まで可変した。この場合、液相ミストが初期電子の発生源、およびイオン流の進展にも関与する。電子なだれの生成と進展を評価するため、パルス電圧を印加して放電の遅れ時間を求めた。放電遅れ時間は、一般に次の2つの遅れ時間の和で表される。一つは電子なだれに適した初期電子が発生するまでの統計的遅れ時間 τ_s である。もう一つはイオン流場が誘電性から導電性に臨界するまでの時間、すなわち電子なだれが対向電極へ進展して導電路を形成するまでの形成遅れ時間 τ_f である。これらの時間項の測定にはラウエ・プロット(Laue plots)法を用いた。また、放電場のラジカル計測には分光器を使用した。図1(a)は測定したラウエ・プロットの例を示す。(b)は相対湿度RHの可変に対する統計的遅れ時間 τ_s と形成遅れ時間 τ_f の特性を示す。各特性は印加電圧極性に依存する結果を示している。これはイオン流場内に存在する水クラスターが負イオンを形成しやすいためである。そして、時間項に極性効果が現れることを示唆する。さらに、表1に示すように水クラスターの平均自由行程 λ_{H_2O} と電子の平均自由行程 λ_e の計算結果から、RH60%を超えるあたりから $\lambda_{H_2O}/\lambda_e < 1.0$ の状態に変化しているといった新たな相関を見出した。

以上、本研究において目的とした気液2相流体のEHD現象の定量評価では、気相領域の放電によるイオン流場を形成し、その界面となる液相においてConductive electric Rayleigh numberで表現したEHDパラメータにより定量化が可能であることを示した。さらに、定常ならびに非定常なイオン流場の条件下で実験による可視化と数値計算によるモデリングが可能である知見を得た。また、気相ラジカル粒子と液相界面反応に基づく気液2相層状EHDについては、液相クラスターと電子の各平均自由行程が時間項のパラメータとして検討できる知見を得た。すなわち、本研究ではイオン流を伴う気液2相層状流の解析方法を検討しながら、簡便なモデリングが可能である知見を得ることができたものと考えている。

今後も、イオン流に伴う化学的活性種とエネルギー状態を含む詳細な解析を進めるとともに、電気流体力学効果を活用した応用の検討を行う予定である。



(a) ラウエ・プロット結果例



(b) 放電遅れ時間

図 1 相対湿度に対する放電遅れ特性

表 1. 水クラスターと電子の平均自由行程

RH [%]	AbH [g/m ³]	Molecule/cm ³	λ_{H_2O} (cm)	λ_e (cm)	λ_{H_2O}/λ_e
20	4	$1.3382 \cdot 10^{17}$	1.8538 10^{-4}	8.772 10^{-5}	3.0
30	6	$2.0073 \cdot 10^{17}$	1.2359 10^{-4}	8.772 10^{-5}	2.0
40	8	$2.6764 \cdot 10^{17}$	9.2689 10^{-5}	8.772 10^{-5}	1.5
50	10	$3.3456 \cdot 10^{17}$	7.4151 10^{-5}	8.772 10^{-5}	1.2
60	13	$4.3492 \cdot 10^{17}$	5.7039 10^{-5}	8.772 10^{-5}	0.9
70	15	$5.0183 \cdot 10^{17}$	4.9434 10^{-5}	8.772 10^{-5}	0.8
80	17	$5.6874 \cdot 10^{17}$	4.3618 10^{-5}	8.772 10^{-5}	0.7

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Try SOBAN and Ryu-ichiro OHYAMA, "A Study on the Humidity Effect of AC Corona Discharge for a Thin-Wire Electrode Arrangement", Proceedings of The School of Engineering, Tokai University, series E, Vol.41, pp.1-7 (2016-9)

吉田悦子、岩崎紀子、大山龍一郎、横田繁昭、森一高、加藤結花、荻原清, "LSCによる廃棄物ゼロ測定法: プラスチックシンチレータの表面改質効果", 保健物理, Vol.50, No.2, pp.119-127 (2015-6)

Yuri Yoshihara, Etsuko Furuta, Ryu-ichiro Ohyama, Shigeaki Yokota, Yuka Kato, Tomoyuki Yoshimura, and Kiyoshi Ogiwara, "MEASUREMENT OF TRITIUM WITH PLASTIC SCINTILATOR SURFACE IMPROVEMENT WITH PLASMA TREATMENT", FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY- American Nuclear Society, Vol.67, No.3, pp.654-657 (2015-4)

〔学会発表〕(計5件)

吉野貴文、大山龍一郎, "DBDによる大気圧 He プラズマバレットの電荷密度測定に関する実験", 平成30年電気学会全国大会, 1-077, p.102 (2018.3), 福岡.

Vanny Rin and Ryu-ichiro OHYAMA, "An Experimental Study on Time Lag Characteristic of Lightning Discharge under Wet Condition", 電気学会平成29年基礎・材料・共通部門大会, 19-E-p2-3, (2017-9), 室蘭.

Worawat Liawthanyart, 津田真理子, 山賀幹大 and Ryu-ichiro Ohyama, "Observation of Partial Discharges in a Cylindrical Cavity with and without Carbon", 平成29年電気学会全国大会, 1-143 (2017-3), 富山.

後藤友葉、大山龍一郎, “バリア放電による大気圧Ar噴流プラズマの3D断層分光に関する研究”, 2015年放電学会年次大会講演論文集, A-1-1 (2015-12), 横須賀.

Tomoha Goto, Nur Shahida Midi and Ryu-ichiro Ohyama, “Experimental Study on Spatial Emission Spectrum Characteristics in a Dielectric Barrier Discharge Component for Ar Atmospheric Pressure Plasma Jet Formation”, Proc. IEEE 2015 Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol.1, pp.415-418 (2015-10), USA.

後藤友葉、大山龍一郎, “二重管型大気圧噴流プラズマ生成装置のガス混合条件に関する検討”, 電気学会平成27年基礎・材料・共通部門大会, 17-P-5, (2015-9), 金沢.

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