

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560209

研究課題名(和文) イオン流を伴う気液2相流体の可視化と電気流体力学現象のモデリング

研究課題名(英文) Visualization of Gas-Liquid Two-Phase Fields with Ionic Flow and Its Modeling of Electrohydrodynamic Phenomena

研究代表者

大山 龍一郎(OHYAMA, RYU-ICHIRO)

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) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的はイオン流を伴う気液2相層状流の可視化と定量解析のモデリングを具体化することであった。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を定量化するため、磁気プローブを製作して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。そして、実験より得た結果を考慮しながら定常状態から過渡状態への電気流体力学現象のモデリングを検討し、実験結果に整合する数値解析および定量的な評価の方法について具体的な知見を得ることができた。

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 ionic flow, and its modeling for quantitative analysis. In order to investigate quantitatively ionic flow of the pulse quality which progresses to the interface of gas and liquid, and the inside of liquid from the gas side in an experiment, the magnetic probe was manufactured, the dielectric characteristics and electrical conduction characteristics in the gaseous phase and a liquid phase were evaluated, and it was quantitatively urged for the conductivity of a liquid to have influence on the electrohydrodynamic effect. The modeling of this phenomenon from a steady state to a transient was considered taking into consideration the result obtained from the experiment. The main results of this research were able to acquire knowledge concrete about the numerical analysis and the method of quantitative evaluation of adjusting to the experimental result.

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 イオン流 数値解析 モデリング

### 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、本現象を解明ならびに応用面を開拓するため、このイオン流を伴う気液2相層状流の可視化と定量化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相層状流における電気流体力学現象のモデリングを具体化し、当研究分野の有益な研究成果を見出すことが本研究の目的である。

### 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、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のためのモデリングを具体的にした。

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、本研究では鋭利な電極(針電極)を空气中に配置した際のイオン流場、ならびに同様な局所電極を気液界面の気体側に配置した際の放電場などを評価モデルとして、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、微小電流計、および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系統に接続し、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ス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. 研究成果

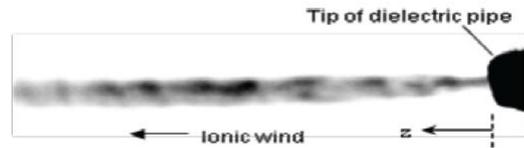
#### (1) イオン流の測定と解析

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( $\text{CH}_3\text{COCOCH}_3$ 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 $\mu\text{s}$ 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液体のパブリングを行い、そのクラスター分子化したものを雰囲気として封入

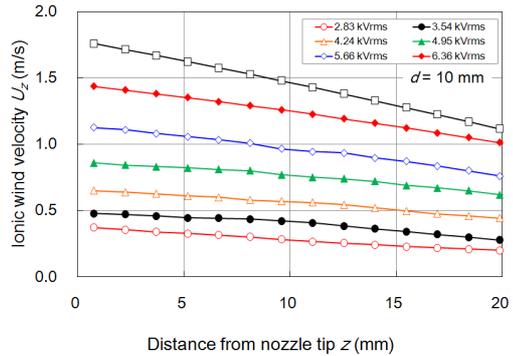
した状態である。また、液相の誘電液体（シリコンオイル）には Biacetyl 液体を 100ppm 程度溶かした状態にした。気相および液相に混入した燐光分子トレーサの励起には、発振波長が 266nm の YAG レーザー第 4 高調波のビームを用いた。この計測手段に用いる可視化画像の撮影と取得には、燐光分子トレーサの励起タイミング（パルスレーザービームの照射時刻）と、その励起時刻からトレーサ追跡の時間分解能に相当するトレーサの燐光タイミング（画像撮影の露光開始時刻）までの同期および遅延システムを構成した。すなわち、YAG レーザーのパルス発振ゲート、およびデジタルフレームカメラに取り付けたイメ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

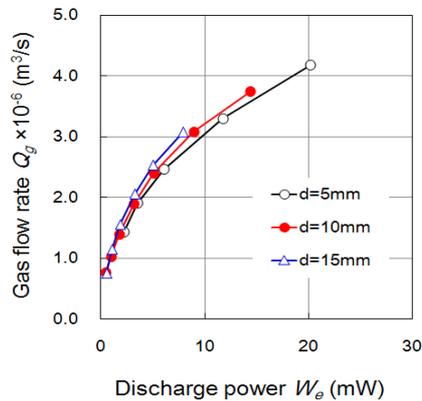
イオン流（風）には、メカニカルパーツを用いなくても送風することができるなどの特徴があり、多くの研究者が古くから研究を行っている。しかしながら、イオン風はコロナ放電場の荷電粒子を含むガス流であるために、そのイオンの流れと電界を共に乱すことのないようにガス流速を測定することは容易ではない。本研究では、粒子画像流速測定法 (PIV) を用いて流動の可視化とイオン風速度の定量化を行った。また、針対円筒電極により発生するイオン風の測定結果について、無次元の EHD パラメータによるイオン風の評価を行った。イオン流場は、トレーサ粒子に使用したパラフィンオイルの液相粒子と空気の混相流の状態である。一般に、大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、イオン風の発生流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



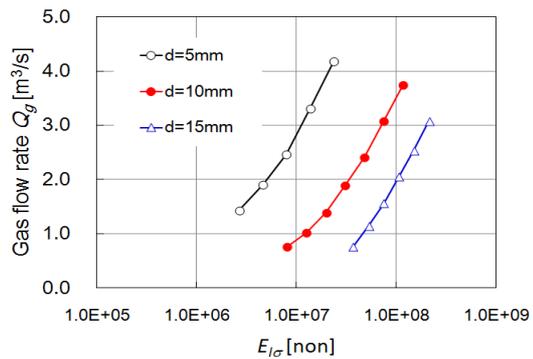
(a) 交流イオン流の可視化画像



(b) PIV により求めた軸流方向のイオン流速分布



(c) 放電電力に対するイオン流量



(d) EHD Rayleigh number  $E_{10}$  による流量の評価

図 1 交流イオン流の可視化と解析

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徴について実験による調査を行った。

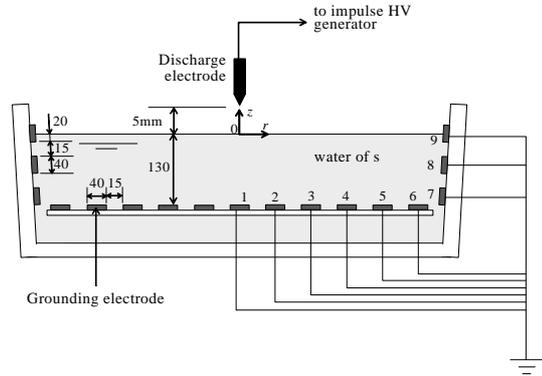
電極系の構成は、アクリル容器壁に先端孔内径を 2mm まで窄めた形状のガラス管ノズル(外径 12mm, 厚さ 1mm, 長さ 60mm)を取り付け、管内部に針電極(直径 1mm, 先端曲率半径 5 $\mu$ m)、管外壁のノズル先端に円筒状接地電極を接続したものである。この接地電極は針電極から軸方向に 10mm 離れた位置に設置した。イオン風は電極間に 50Hz 交流印加電圧を印加して針電極から誘起させた。イオン風の流速は PIV により行った。また、コロナ放電電流の測定は磁気プローブを使用し、放電電力の測定は V-Q Lissajous diagram により行った。図 1 (a) にノズル先端から室内空間へ吹き出したイオン風の可視化画像の例を示す。この画像取得の露光時間は 1ms である。イオン風はガラス管ノズル先端から軸流方向へ間欠的に流出している様子を確認することができる。この軸流方向におけるイオン風の平均流速分布を図 1 (b) に示す。イオン風速の強度は交流印加電圧に依存して高く、ノズル先端から離れるに従い緩やかに減衰していることがわかる。ここで示したイオン風速の測定位置は電極間の電界外部にあり、イオン風速の減衰はガラス管ノズル内部と外部の圧力差によるものである。図 1 (c) は放電電力に対するノズル先端からのガス流出量の特徴を示す。ガス流出量は放電電力に依存するが、比例関係が見られない。これは放電電力がコロナ放電の電離にほとんど消費されていることが原因であると考えられる。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  $\rho_v$ 、電流密度  $J$ 、誘電率  $\epsilon$ 、透磁率  $\mu$ 、流体密度  $\rho$ 、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。

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

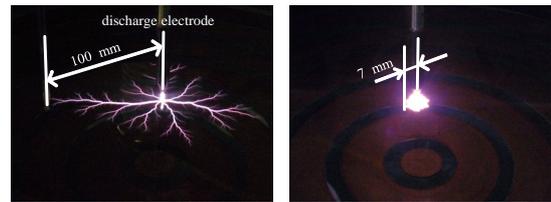
$$E_{I\sigma} = \frac{IL^3}{\rho v^2 \mu_i A} \quad (2)$$

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

ここで、 $\boldsymbol{\eta}$  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

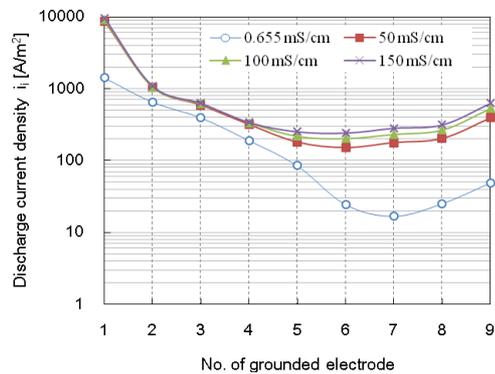


(a) モデリングに用いた気液 2 相流体の電極系



導電率 0.07 S/m      導電率 5 S/m

(b) 気液界面の過渡放電発光像の例



(c) 液相境界における電流密度分布

図 2 気液 2 相層状流体における実験結果

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。図 1 (d) は EHD Rayleigh number  $E_{I\sigma}$  による流量の評価を示したものである。こ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 ( $E_{ie}$ ) によるフォースバランスが強調されることが判明した。 $E_{ie}$  はイオン流の電流密度ベ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。図2(a)に示すように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)のものと相似である。また、水電極の底部および側壁部には計9端子で接地配線した。実験では、気相放電が発生した際に同期して、各接地線と磁気プローブを用い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。図2(b)は火花放電タイプにおける気液界面の放電発光像について、液体導電率に依存した様子を示す。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、図2(c)に示すように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。

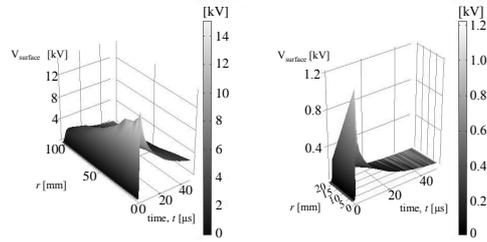
本研究では、研究の方法および研究成果(2)で得た知見から数値シミュレーションのためのモデリングを検討するため、火花放電時に観測される気液界面電位を境界条件として適用することを試みた。図3(a)は本研究で製作した電位プローブを用いて測定した気液界面電位の分布を示す。図2(b)に示した沿面放電状の発光像において、火花放電の進展長は液相導電率の増加に伴って短縮していることがわかる。液面電位は放電進展長に整合した分布を呈していることがわかる。このような液相導電率の影響は、気液界面における放電進展に関係ある興味深い結果であることが知られた。すなわち、Conductive electric Rayleigh 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。

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

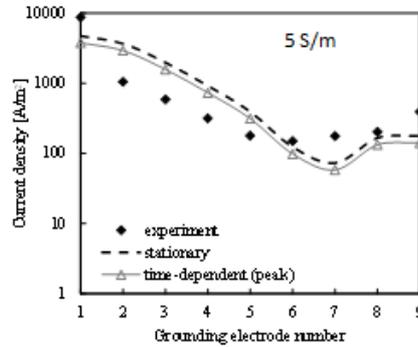
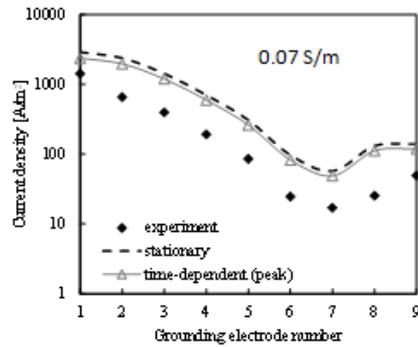
$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \quad (5-1)$$

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

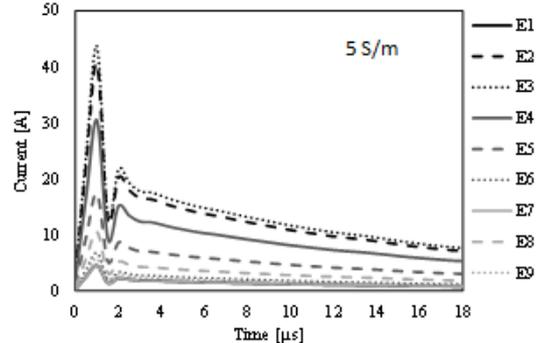
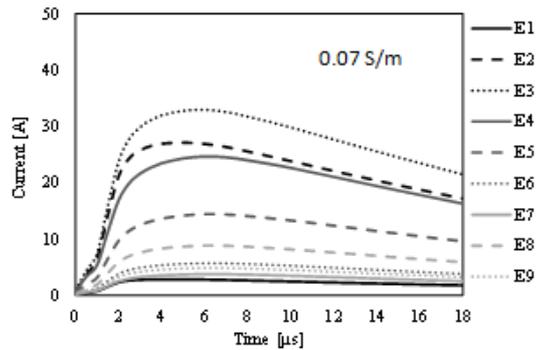
ここで、 $E[V/m]$ は電界ベクトル、 $\Phi[V]$ は電位ポテンシャル、 $J[A/m^2]$ は電流密度ベクトル、 $\sigma[S/m]$ は導電率、 $D[C/m^2]$ は電束密度ベクトルである。時間平均による計算（定常）は(5-1)式を適用し、過渡計算（非定常）には



導電率 0.07 S/m      導電率 5 S/m  
(a) 気液界面電位分布の例



(b) イオン流による液相境界の電流密度計算値



(c) 非定常イオン流による電流波形計算値

図3 気液2相層状流体におけるモデリング

(5-2)式を適用した。例示した導電率が 0.07 S/m と 5 S/m はそれぞれ水道水と海水に相当する液体である。図 3 (b)と(c)は、それぞれ定常と非定常におけるイオン流による電流密度分布と電流波形を示す。これらの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。

以上、本研究において目的としたイオン流を伴う電気流体力学現象の可視化とモデリングでは、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。気相における放電形態には、コロナ放電（微弱放電）と火花放電（絶縁破壊を伴う臨界放電）を適用し、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を評価した。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。

今後は、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。

## 5 . 主な発表論文等

[ 雑誌論文 ] ( 計 4 件 )

Chaichan Pothisarn, Ryu-ichiro Ohyama, “A Fundamental Characteristic of AC Ionic Wind Released from a Narrow Dielectric Tube with Needle-cylinder Electrode System”, 電気学会論文誌A, 査読有, Vol.132, No.12, pp.1146-1150, 2012, DOI: 10.154/ieejfms.132.1146

Nur Shahida, Ryu-ichiro Ohyama and Shigeru Yamaguchi, “Underwater current distribution induced by spark discharge in a water surface”, Journal of Electrostatics, 査読有, Vol.71, Issue 4, pp.823-828, 2013, DOI: 10.1016/j.elstat.2013.03.002

Nur Shahida Midi, Kaito Sasaki, Ryu-ichiro Ohyama, Naoki Shinyashiki, “Broadband Complex Dielectric Constants of Water and Sodium Chloride Aqueous Solutions with Different DC Conductivities”, IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, Vol.9, No.S1, p.8-12, 2014, DOI: 10.1002/tee.22036

大山龍一郎, Nur Shahida Midi, 阿部 香澄, “ガラスエポキシ板間に組込んだ円筒形空孔における部分放電の観測と評価に関する試み - 部分放電現象の理解を助長させる学生教育を考慮した実験として”, 電気学会論文誌A, 査読有, Vol.134, No.10, pp.532-537, 2014, DOI: 10.1541/ieejfms.134.532

[ 学会発表 ] ( 計 10 件 )

N.S. Midi, M.K.A. Muhamad, R. Ohyama, “ Breakdown Characteristics of Spark Discharge on Water Surface (SDWS) with an Air Gap ”, Proc. IEEE 2012 CEIDP, pp.153-156 (2012-10), Montreal

M.K.A Muhamad, N.S. Midi and R.Ohyama, ” EXPERIMENTAL STUDIES OF ELECTRIC POTENTIAL IN TAP WATER DUE TO SPARK DISCHARGE ON WATER SURFACE WITH AN AIR GAP ”, MJIIT-JUC Joint Sym. 2012, ESE-2-5, pp.1-4 (2012-11) Kuala Lumpur

ヌルシャヒダ, 大山 龍一郎, M.K.A ムハマド, “ 水面上火花放電の電気的特性: 水道水と海水の比較 ”, IEED Japan Annual Meeting, p.38-39 (2012-12), 東京

Nur Shahida Midi and Ryu-ichiro Ohyama, “ Visualization of Current Density due to Spark Discharge on Water Surface ”, 可視化情報, Vol.33, Suppl., No.2, pp.169-170 (2013-9), 福島

M.K.A. Muhamad, N.S. Midi, R. Ohyama, “ Electric Potential in Tap Water and Saline Solution due to Spark Discharge on Water Surface ”, Proc. IEEE 2013 CEIDP, pp.630-631 (2013-10), Shenzhen

N.S. Midi, M.K.A. Muhamad, R. Ohyama, “ Experimental Studies on Electrical Characteristics of Spark Discharge on Water Surface of Tap Water ”, Proc. IEEE 2013 CEIDP, pp.647-650 (2013-10), Shenzhen

M.K.A Muhamad, N.S Midi, R. Ohyama, “ 2-DIMENSIONAL MEASUREMENT OF ELECTRIC POTENTIAL DUE TO SPARK DISCHARGE ON WATER SURFACE ”, Proc. The MJIIT-JUC Joint Inter. Sym.2013, ES-001, pp.1-4 (2013-11), Kanagawa

Nur Shahida Midi, Ryu-ichiro Ohyama,

“ STATIONARY NUMERICAL CALCULATION OF SPARK DISCHARGE ON WATER SURFACE USING SURFACE POTENTIAL AS BOUNDARY CONDITION ”, Proc. The MJIIT-JUC Joint Inter. Sym.2013, SST-006, pp.1-4 (2013-11), Kanagawa

Nur Shahida Midi and Ryu-ichiro Ohyama, “ Electrical Characteristics during Spark Discharge on Water Surface of Tap Water and Saline Solution with Increased Voltage ”, Proc. IEEE 2014 CEIDP, pp.554-557 (2014-10), Des Moines

Nur Shahida Midi and Ryu-ichiro Ohyama,

“ DISCHARGE CURRENT DISTRIBUTION TO UNDERWATER DUE TO SPARK DISCHARGE ON WATER SURFACE OF A 1D MODEL ”, Proc. The MJIIT-JUC Joint In. Sym.2014, 1E1-ESE 2, pp.1-4 (2014-11), Kuala Lumpur

## 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