

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560189

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定量解析

研究課題名(英文) Visualization of Gas-Liquid Two-Phase Fields with Ionic Flow and Its Qualitative Analyses for 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

研究成果の概要(和文)：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(EHD)現象であった。実験では、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(PIV)の適用技術を燐光画像流速測定法(MTV)に応用した。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によって、荷電粒子の電荷量と移動速度を定量化し、電気伝導性効力に関する知見を得た。

研究成果の概要(英文)：In the interface of gas and dielectric liquid phases, while the phenomenon in this research aiming at analysis and an elucidation generated weak electric discharge in the gaseous phase, it was one electrohydrodynamic (EHD) phenomenon in which a liquid flowed. In the experiment, the convenience technology of the particle image velocimetry (PIV) was applied to the molecular tagging velocimetry (MTV). While developing the flow velocity measurement technology of the EHD ionic flow field of gas-liquid two-phase fluid, a quantity of amounts of electric charges and drift speed of the charged particle were turned, and the knowledge about electrical conductivity effect was acquired.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：光学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流、電気流体力学、イオン流、粒子画像流速計測、電気伝導

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。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[文献:R.Ohyama et al., IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.10, No.1, pp.57-64 (2003-1)]。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。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的な解析方法を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解析を具体化し、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、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) 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 ($\text{CH}_3\text{COCOCCH}_3$ 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 μs 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間に、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。

(2) 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。

(3) 液相粒子と空気混相状態における直流イオン風の可視化と解析

イオン風には、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。

(4) 液相導電率の影響

これまでの研究成果から、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、放電エネルギーを誘電液体の運動に輸送することができることがわかった。このエネルギー輸送過程は、気液界面におけるイオン風の運動エネルギーのみならず、電荷交換による作用も支配するものと考えられる。そこで、電荷交換作用を検討するために、液相の電気伝導率パラメータに定めて、気相イオン風から液相へ注入される電流の分布を実験的に調査した。

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 1 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。

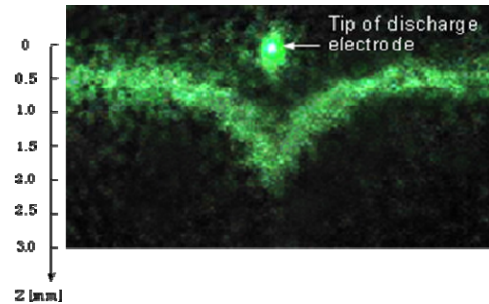


図 1 イオン風の燐光像

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 2 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。

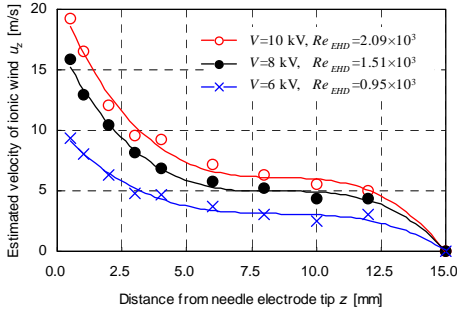


図2 イオン風の世界速度分布

(2) EHD 効果による力の分類

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_i 、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。

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

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

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

ここで、 $\boldsymbol{\eta}$ は無次元化した電界を表し、 $E_{l\sigma}$ と $E_{l\epsilon}$ 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 ($E_{l\sigma}$)」と「誘電特性の変化による作用 ($E_{l\epsilon}$)」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3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(2)に示した Conductive electric Rayleigh number ($E_{l\sigma}$) の関数として

整理したものである。この結果から流動の速度 u_{max} は $E_{l\sigma}$ に比例していることがわかった。

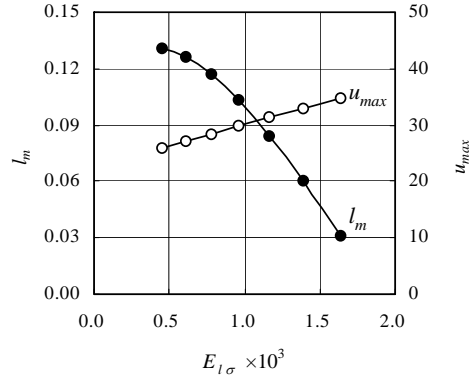


図3 無次元化パラメータ $E_{l\sigma}$ に対する気液界面の特性

(3) 液相粒子と空気混相状態における直流イオン風の可視化と解析

実験に使用したイオン風発生装置は、一辺の長さ 100mm の立方体アクリル容器に直径 12mm、厚さ 1mm、先端孔の直径を 2mm まで窄めた形状のガラス管を取り付けた形となっている。このアクリル容器内に直径 1mm、先端曲率半径 $5 \mu\text{m}$ の針電極を設置し、ガラス管外壁に針電極から 10mm の距離に円筒状電極を接続した。そして、電極間に直流高電圧を印加し、針電極先端からイオン風を誘起させた。また、トレーサ粒子には容器内底部に設置したニクロム線にパラフィンオイルを塗布し、加熱することで気化させたものを用いた。すなわち、イオン風の可視化は、パラフィンオイルの気化粒子にシリンダカルレンズを取り付けたレーザポインタのシート光を照射して行った。可視化画像の映像は 1200fps のデジタルカメラにより撮影した。また、使用したデジタルカメラの空間分解能は 8400pixel/m であった。そして、イオン風の可視化画像の空間変位を算出して、コロナ放電電極軸上のイオン風速度分布を求めた。

図4は液相粒と空気の混相流におけるイオン風を可視化したものである。ノズル先端からイオン風が剪断を含み噴流構造を呈していることがわかった。また、図5に示すようにイオン風の Conductive electric Rayleigh number $E_{l\sigma}$ と噴出流量 Q の特性を定量化した結果、互いの相関が極めて高いことがわかった。Conductive electric Rayleigh number $E_{l\sigma}$ は、イオン流場のディメンションと伝導電流のみによって算出できる。このことは、イオン流場の電気流体力学効果を評価する際、コンピュータシミュレーション等によるモデリング手法に対して有効なパラメータであることを示唆している。

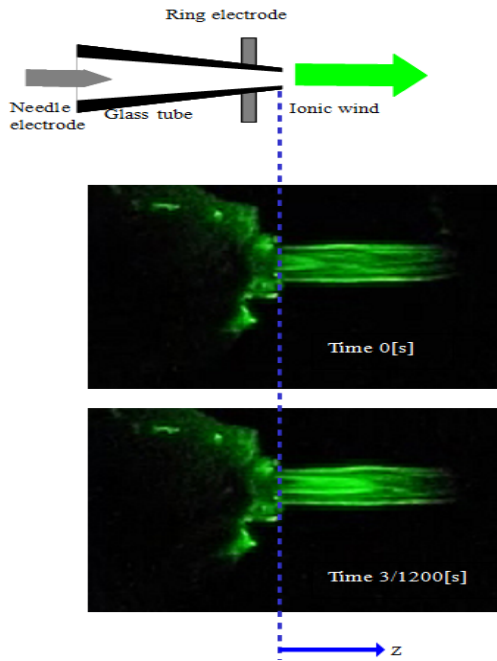
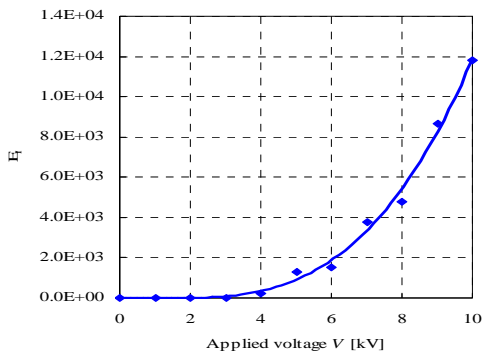
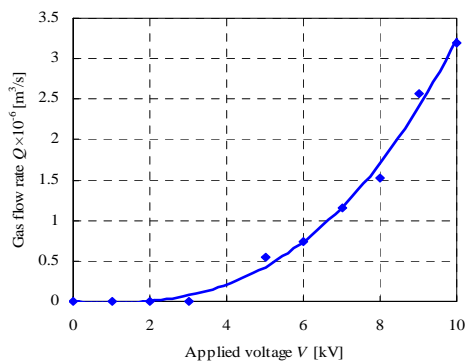


図4 液相粒と空気混相イオン風の可視化



(a) 印加電圧 V と EHD Conductive electric Rayleigh number $E_{I\sigma}$



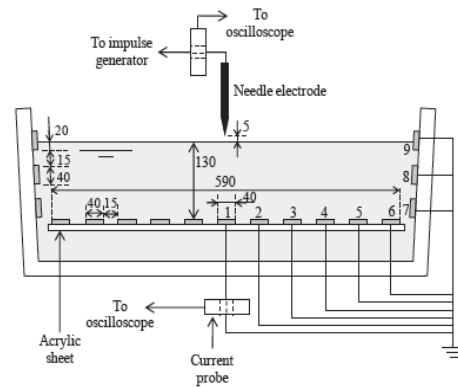
(b) 印加電圧 V とイオン風の噴出流量 Q

図5 液相粒子を含む EHD Conductive electric Rayleigh number $E_{I\sigma}$ と噴出流量 Q

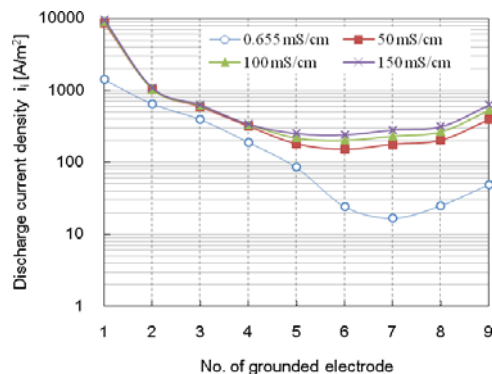
(4) 液相導電率の影響

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6(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。

図6(b)には水電極の底部（図中1~6 CH）および側壁部（7~9 CH）における電流密度を示す。電流密度の分布は、導電率50 mS/cmより小さくなると低電流密度へシフトすることがわかった。これ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。また、このEHDに関する特性は、上記の研究方法及び成果(3)で得られたEHDパラメータと同様、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ている。



(a) 水電極系の概略



(b) 電流密度分布

図6 導電率の異なる液相への電流分布

以上、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、本研究ではイオン流を伴う気液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、流れの可視化による電気流体力学的イオン流場の流速計測法を検討した。

イオン流による流体移送と熱移送の応用を考察するために、これらに関係した電気伝導に伴う荷電粒子に働く電気力の算出を行った。具体的には、Particle Image Velocimetry に基づいた手法によりイオン流速を定量化し、微弱な放電電流と流体流動の相関を解析することによって非定常流れ場における電氣的駆動力の定量化を行った。

電気伝導性効力と流速分布の定量化から、イオン流を伴う気液2相流体を対象に Navier-Stokes 運動方程式の外力項において電気流体力学効力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できる知見を得るとともに、流体摩擦によるイオン流の圧力損失を解析することも可能となった。

気液界面において生じるイオン流による電荷交換を考慮し、気体相と誘電液体相の各電気流体力学現象の定量解析に対する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 R.Ohyama, M.Sakamoto, A.Nagai: "Axial plasma density propagation of barrier discharge non-thermal plasma bullets in an atmospheric pressure argon gas stream", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol.42, No.10, 105203 (4pp) (2009-5-21), 査読有り
- ② 中村、大山: " 針対円筒電極系における正極性イオン風速度の画像計測に関する研究", 東海大学工学部紀要, Vol.49, No.2, pp.37-42 (2010-3), 査読有り
- ③ 深渡瀬、稲塚、大山: " 噴流型大気圧プラズマ発生装置におけるプラズマバレット観測の試み", 電気学会論文誌 A, Vol.130, No.10, pp.925-929 (2010-10), 査読有り

[学会発表] (計7件)

- ① R.Inazuka, M.Yamazaki, R.Arai, R.Ohyama: "An experimental study for application of a gas-stream atmospheric pressure plasma device to surface modifications", Proc. IEEE 2010 Annual Conference on Electrical Insulation and

Dielectric Phenomena, pp.636-639 (2010-10), USA

- ② N.S.Midi, R.Ohyama: "Distribution of Discharge Current in Stratified Seawater under Impulse Discharges", Proc. IEEE 2010 Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena", pp.640-643 (2010-10), USA
- ③ ヌル シャヒダ、大山: " 火花放電による水面・水中の放電電流の観測", 平成 23 年電気学会全国大会講演論文集, 1-064, p.80 (2011-3), 大阪
- ④ 大山、紺野、中村: " 誘電体細管流路における交流イオン風の観測", 平成 23 年電気学会全国大会講演論文集, 1-077, p.96 (2011-3), 大阪
- ⑤ Nur Shahida Midi and Ryu-ichiro Ohyama: "Experimental Studies of Current Distribution in Stratified Seawater under Spark Discharges", Proc. IEEE 2011 Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol.1, pp.223-226 (2011-10), USA
- ⑥ S.Ohyama and R.Ohyama: "Ionic Wind Characteristics of an EHD Micro Gas Pump Constructed with Needle-Ring Electrode System", Proc. IEEE 2011 Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol.1, pp. 227-230 (2011-10), USA
- ⑦ Hazmi Hijazi Abdul Halim, Ryu-ichiro Ohyama, Toshihide Tsuji, Tetsuo Yoshida: "Influence of Electrostatic Induction Electrode Configuration on Water Mist Charging", Proc. IEEE 2011 Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol.1, pp. 231-234 (2011-10), USA

6. 研究組織

(1) 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