

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04273

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

研究課題名(英文) Visualization and evaluation of electrohydrodynamic effects of gas-liquid two-phase fluid with weakly ionized plasma

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) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究においては、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(EHD)現象について実験的な研究を行った。具体的には、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気液2相流体のEHD現象を対象とした。本研究の目的は、これまでの研究成果から弱電離プラズマを気液2相流体に適用し、気液2相流の定量評価を具体化すること、さらに、このEHD現象の応用面を開拓することであった。このため、本研究では工学的に重要な非定常流れ場の計測を含めて定量的に解析を行った。すなわち、弱電離プラズマを含む気液2相流の可視化計測と定量解析を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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。本研究の研究成果は、ラジカルを含む気液2相流体の電気流体力学現象の可視化とその定量的な解析について新たな知見を得たものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have experimentally studied an electrohydrodynamics (EHD) phenomena of ion flow fields that form nonuniform electric fields in gases and dielectric liquids. Specifically, the EHD phenomenon of a single gas-liquid two-phase fluid, in which a weak discharge is generated in the gas phase at the interface between the gas phase and the dielectric-liquid phase and the liquid flows at the same time, was investigated. The purpose of this research is to apply weakly ionized plasma to gas-liquid two-phase fluid based on the research results so far, to embody the quantitative evaluation of gas-liquid two-phase flow, and to develop the application of this EHD phenomenon. For that reason, in this study, quantitative analysis including measurement of the unsteady flow field, which is important from an engineering point of view, was carried out. That is, visualization measurement and quantitative analysis of gas-liquid two-phase flow including weakly ionized plasma were carried out.

研究分野：電気流体力学

キーワード：電気流体力学 弱電離プラズマ 可視化計測

## 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。本研究は弱電離プラズマにおける気液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、減圧空気中の弱電離プラズマ中のプラズマパラメータ((電子温度 $T_e$ と電子速度 $v_e$ ))の推定を行った。これらのパラメータはプラズマの状態を明示する数値であるため、製作装置の評価が定量化できる。推定の手段は、まず発光スペクトルから換算電界 $E/n$ を求めた。次に、換算電界 $E/n$ から電子温度 $T_e$ と電子速度 $v_e$ を求めた。発光スペクトルの波長337.1, 391.4, 394.3 [nm]の比は換算電界 $E/n$  [Td]の関数となる。換算電界 $E/n$ は、電界強度 $E$  [V/m]と気体粒子密度 $n$  [1/m<sup>3</sup>]で表される。 $n$ は気圧 $P$  [torr]から求められる。放電によるプラズマの発光状態は、印加電圧(電界強度)と気圧に影響して変化する、すなわちプラズマの発光状態は換算電界 $E/n$ によって変化する。

## 4. 研究成果

### (1) 流れ場の解析

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 $\rho_i$ 、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氣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。

$$F_E = \frac{1}{Re_{l\sigma} l_\varepsilon^2} \quad (1)$$

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

$$E_{l\varepsilon} = \frac{L^2 \varepsilon_0 E^2}{2\rho v^2} \quad (3)$$

ここで、 $\eta$ は無次元化した電界を表し、 $E_{l\sigma}$ と  $E_{l\varepsilon}$ 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(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( $E_{l\varepsilon}$ )」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  $E_{l\sigma}$ 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。

また、本現象を応用した電気流体力学ポンプ（Air Wave Type EHD Pump）については、液体の主な流れはワイヤー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。

$$R_e = \frac{u_o \cdot L}{\nu_g}, \quad (4)$$

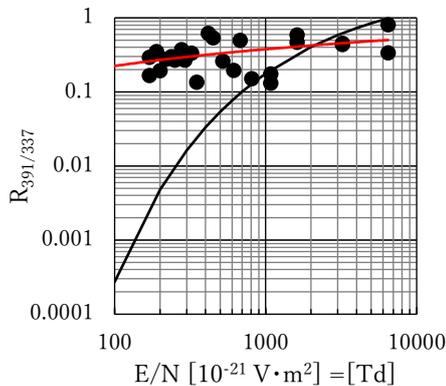
$$F_r = \frac{u_o}{\sqrt{g \cdot L}}, \quad (5)$$

$$\Sigma_E = \frac{E_{l\sigma} \cdot E_{l\varepsilon} \cdot F_r^2}{R_e^2}. \quad (6)$$

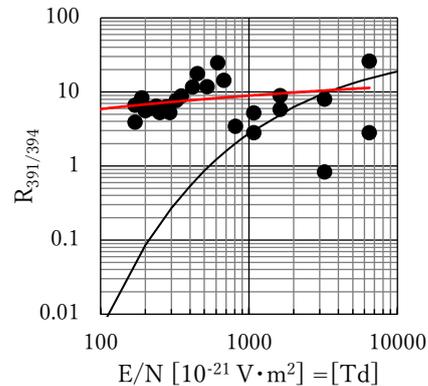
ここで  $\varepsilon_g$ 、 $\rho_g$ 、 $\nu_g$ はそれぞれガスの誘電率、密度、動粘度である。 $u_o$ 、 $L$ はそれぞれ特性速度、電極間距離である。式(6)に示した無次元数  $\Sigma_E$ は、本研究において考案しているパラメータであって、各無次元数における力のバランスをとったものである。

## (2) 電氣的駆動力の解析

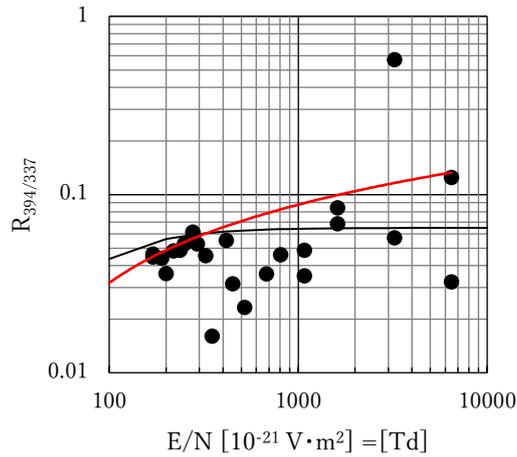
まず、本研究で測定した発光スペクトルの校正関数  $R_{391/337}(E/n)$ 、 $R_{391/394}(E/n)$  および  $R_{394/337}(E/n)$  を図1に示す。これらは  $E$  [V/m]と  $n$  [1/m<sup>3</sup>]を可変して、電極間の発光スペクトル 337.1, 391.4, 394.3 [nm]を測定した結果の例である。



(a)  $R_{391/337}(E/n)$



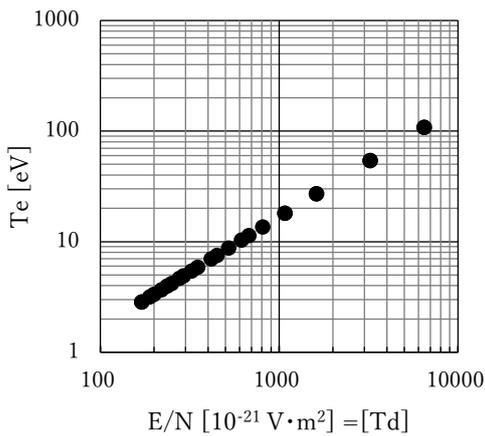
(b)  $R_{391/394}(E/n)$



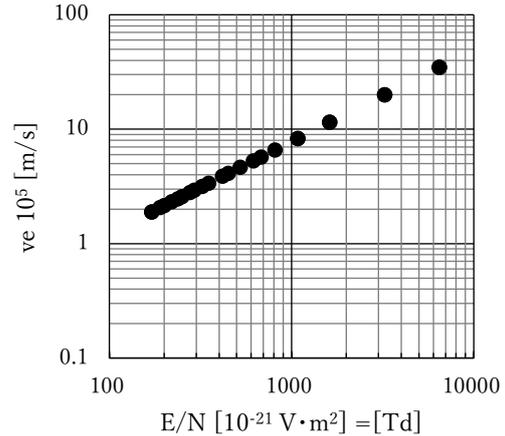
(c)  $R_{394/337}$  ( $E/n$ )

図1 測定した校正関数

次に、電子温度  $T_e$  と電子速度  $v_e$  は換算電界  $E/P$  [Td] を用いて求めた。図2に  $E/P$  に対する  $T_e$  と  $v_e$  の推定結果を示す。



(a) 電子温度  $T_e$



(b) 電子速度  $v_e$

図2 校正関数  $R_{391/337}(E/n)$  より求めた  $E/P$  に対する  $T_e$  と  $v_e$

以上、本研究は弱電離プラズマにおける気液2相流体の EHD 現象を対象に実施した。具体的には、気相領域の放電によるイオン流場を実験的に形成し、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。その結果、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、液相クラスターとプラズマパラメータ（電子温度と電子速度）から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ためのパラメータ推定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。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 大山龍一郎	4. 巻 141
2. 論文標題 IoT実装の学習に供する教材開発に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 367-372
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejfms.141.367	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------