

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420088

研究課題名(和文) 電気流体力学現象を利用する機器の性能予測と高性能化に関する研究

研究課題名(英文) Investigation of the prediction and improvement of performance of machinery and tools using electrohydrodynamic phenomena

研究代表者

柳田 秀記 (Yanada, Hideki)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90166554

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：電気流体力学(EHD)現象を利用するEHDポンプと静電フィルタを取り上げ、両者の性能に及ぼす電極等の形状や液体物性の影響などを調べた。液体の電荷注入の生じやすさにより最適なコレクタ電極の寸法・形状が異なることなど電極の寸法・形状とポンプ性能の関係を示した。また、液体の粘度が低いほどポンプ性能が高くなることなどを明らかにした。静電フィルタについては内部の電場と流れ場の解析結果を利用して粒子軌跡解析を行うことで、定性的には性能評価できることを示した。本研究で用いた数値解析手法により電気流体力学現象を利用する機器の性能予測や評価の可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：A pump and an electrostatic oil filter that utilize electrohydrodynamic (EHD) phenomena are treated. The effects of electrode configuration of the EHD pump, filter configuration, and the physical properties of liquid on the performance of the EHD pump and electrostatic filter are investigated mainly by numerical simulation. It is shown that the optimal collector electrode configuration depends on the quantity of injected charges, and that a liquid with a lower viscosity yields a better pump performance. For the electrostatic oil filter, it is shown that particle trajectory simulation using EHD simulation results of the flow and electric fields can be helpful for a qualitative evaluation of filter performance. The numerical simulation method used in this investigation can be useful for predicting or evaluating the performance of EHD pump and charge injection type of electrostatic oil filter.

研究分野：流体工学

キーワード：電気流体力学 電荷注入 EHDポンプ 静電フィルタ

1. 研究開始当初の背景

電気流体力学 (electrohydrodynamics, EHD) 現象の中の代表的なものは電荷注入とイオンドラッグである。電荷注入は、絶縁性液体に高電界を生じさせると電極と同極性の電荷 (イオン) が生成される現象であり、イオンドラッグは、注入された電荷にクーロン力が作用することで流動が生じる現象である。これらの現象はポンプ、伝熱促進、潤滑油用静電フィルタなどに応用されているが、EHD 現象を利用する機器の性能予測を数値シミュレーションで行うことは、不明な情報があることにより容易ではなく、実施された例は限られている。

EHD 現象は上記の用途で極めて有望であるが、機器の性能予測を数値シミュレーションで行うことは困難であり、機器の開発は試行錯誤による試作と実験の繰り返しにより行わざるを得ず、多くの労力が費やされる。

2. 研究の目的

本研究は、機能性流体などの絶縁性液体に生ずる EHD 現象を数値シミュレーションによって予測するのに必要な情報を明確にし、数値シミュレーションの予測精度を向上させ、各種機器の設計を容易にするとともに高性能化に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、電荷注入とイオンドラッグ現象を利用する機器の性能予測に必要な情報を明確にすること (下記課題(1)~(3))と、その情報を有効利用する課題(4)に取り組む。

- (1)電極上の電荷注入領域を特定する。
- (2)種々の液体のイオン移動度の値を見出す。
- (3)注入電荷密度と電界などの物理量との関係を明らかにする。
- (4)EHD ポンプの高性能化のための電極形状と配置、流路形状を見出す。

上記課題の(1)~(3)については、図1、図2に示す装置を用いた電位およびイオンドラッグ流れ場の実測結果を数値シミュレーションによる結果と比較することで求める。すなわち、電荷注入量、電荷注入領域、イオン移動度の違いにより電位分布およびイオンドラッグ流れ場が異なるため、数値シミュレーションによりそれらを種々変化させて電位分布と流れ場を調べ、実測結果に近いシミュレーション条件を見出すことで、課題(1)~(3)への答えを見出す。

課題(4)については、種々の電極形状の EHD ポンプの性能を数値シミュレーションにより調べ、電極形状と寸法の影響を調べるとともに、液体物性を種々変えてポンプ性能への影響を調べる。

また、当初の研究計画には予定していなかったが、EHD 現象を利用する電荷注入式静電フィルタの性能向上および性能予測を目的として、静電フィルタ内の流れ場と電場の数値解析結果を利用して、汚染物粒子の軌跡を

解析し、静電フィルタの性能予測が可能か否かを調べる。

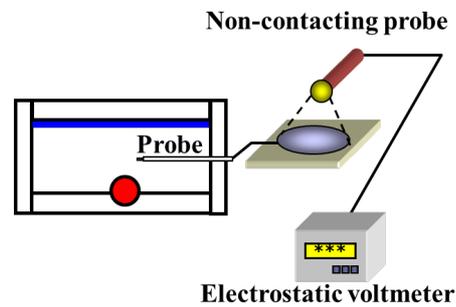


図1 電位分布測定系

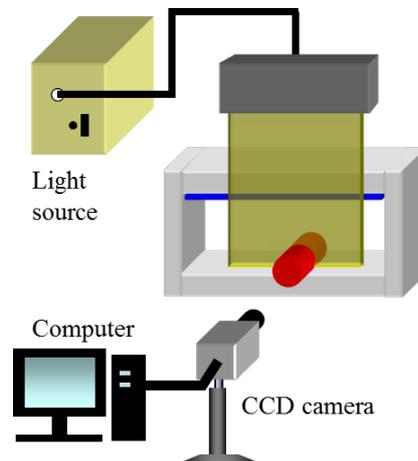


図2 PIV法による流れ場の計測

4. 研究成果

電荷注入領域の特定に関する課題(1)については、エミッタ電極上の電界強度が緩やかに変化する場合においても最大電界強度付近のみから集中して電荷が注入されると結論付けられる結果を得た。ただし、PIV計測が可能な液体1種類に限定されている。

3年間の研究を通して課題(2)と(3)について明白な解答を見出すことはできなかった。これは、高電界中の電位分布計測が容易ではなかったこと、および、機能性流体の比重は1.5前後であるのに対し PIV計測用マーカ粒子の比重は約1であること、また、マーカ粒子が液体中で帯電しやすいことにより、イオンドラッグ流れ場を PIV法で計測することが困難であったことに原因がある。マーカ粒子を種々試みたが、いずれも EHD 流れ場計測用のマーカとしては機能しなかった。

以下では課題(4)の研究成果を示す。

(1)EHD ポンプ特性に及ぼす電極形状の影響

図3に示す2次元形状の電極を有する EHD ポンプを対象として、ポンプ性能に及ぼす電極寸法と形状の影響を数値解析により調べた。電荷を注入する平板エミッタ電極を流路の中央に配置し、コレクタ電極を流路壁面に

上下に対向配置する構成とした。コレクタ電極の断面形状は長方形あるいは三角形とした。印加電圧は5kVとした。

図4はポンプの圧力・流量特性に及ぼすコレクタ電極長さの影響を示している。電極長さが長いと低流量域で圧力がやや大きくなるが、圧力・流量特性曲線の傾きが少し大きくなる。

図5は異なるコレクタ電極長さにおける電荷密度分布を示しており、長さが短いときには電荷がコレクタ下流側(右側)にも存在し、それに働くクーロン力が流れと逆向きに作用するため、圧力が低くなると考えられる。

図6は、注入電荷密度を図4,5の解析条件よりも10倍大きくした場合の結果を示している。注入電荷密度の増加により発生圧力が著しく大きくなるとともに、コレクタ電極

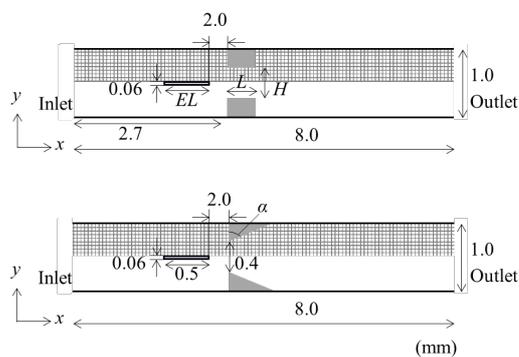


図3 2次元電極(上:長方形断面コレクタ, 下:三角形断面コレクタ)

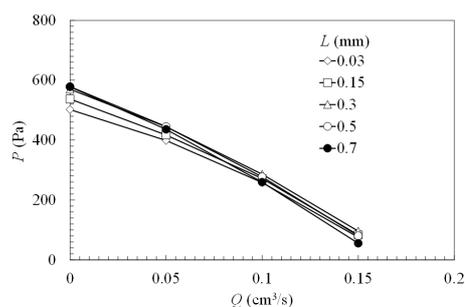


図4 圧力・流量特性に及ぼすコレクタ電極長さの影響 (H=0.4mm, 5kV)

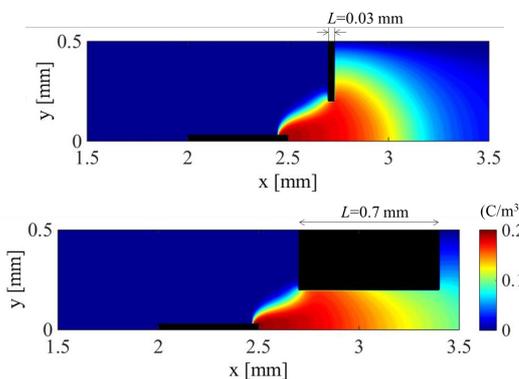


図5 電荷密度分布に及ぼすコレクタ電極長さの影響 (H=0.4mm, 5kV)

長さの影響が図4の場合よりも明瞭に表れており、ある程度以上長くするのが良いことがわかる。液体の種類等により電荷注入のし易さは異なるが、注入量に応じて最適なコレクタ電極長さが異なることを示している。

図7はポンプ特性に及ぼすコレクタ電極隙間高さの影響を示している。隙間高さを大きくするにつれてエミッタ電極先端の電界強度が低下し、注入電荷量が低下するため、圧力は全体に小さくなる。隙間高さが小さいときは逆の傾向となるが、隙間内での圧損が大きくなるため、最大流量が小さくなる。

図8はポンプ特性に及ぼすコレクタ断面形状の影響を示している。矩形断面よりも三角形断面( $\alpha = 60^\circ$ )の方が圧力が高くなる。角度の増加に伴い電荷を受け取る領域が広がることが主な要因であると考えられる。

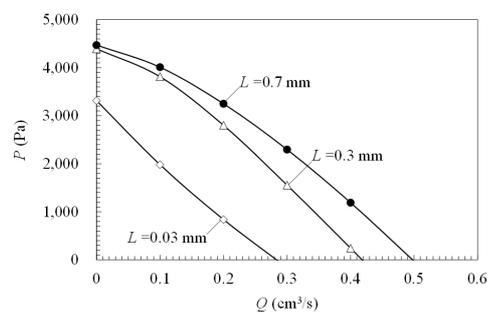


図6 圧力・流量特性に及ぼすコレクタ電極長さの影響 (電荷注入量が図4の10倍)

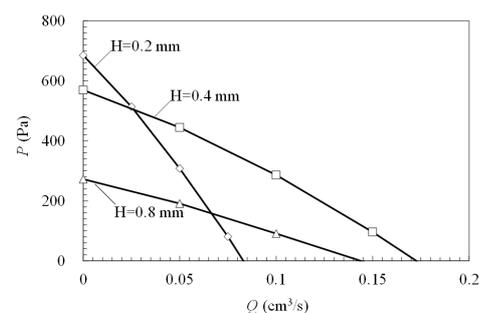


図7 圧力・流量特性に及ぼすコレクタ隙間高さの影響 (L=0.3mm, 5kV)

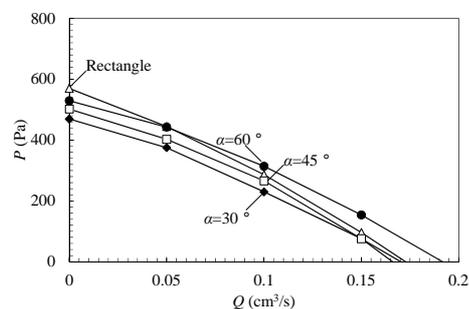


図8 圧力・流量特性に及ぼす断面形状の影響 (L=0.3mm, H=0.4mm, 5kV)

(2) EHD ポンプ特性に及ぼす液体物性の影響  
 図9はポンプ特性に及ぼす液体の粘度の影響を示している。電極・流路形状は基本的に図3(上)と同じであるが、実験との比較のためエミッタ電極厚さを0.1mm, 印加電圧を1.2kVあるいは2.4kVとした。

液体の粘度が下がるにつれて発生圧力が大きくなること分かる。用途によっては広範囲の温度環境下で使用されることになるが、図9はポンプ特性が大きく変化することを示している。

図10はポンプ特性に及ぼす液体の比誘電率の影響を示している。誘電率が高い方がポンプ圧力は高くなるが、影響は小さい。

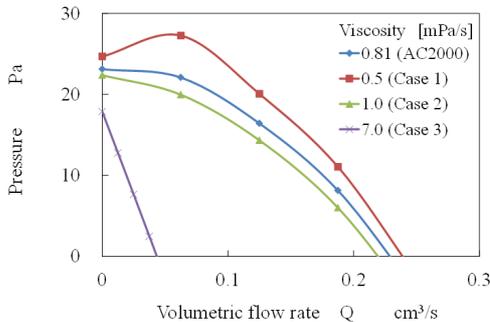


図9 圧力・流量特性に及ぼす液体粘度の影響 ( $L=0.3\text{mm}$ ,  $H=0.4\text{mm}$ ,  $1.2\text{kV}$ )

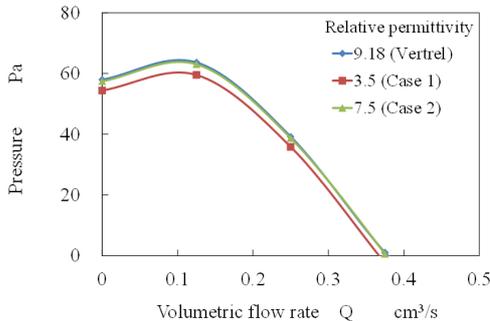


図10 圧力・流量特性に及ぼす液体比誘電率の影響 ( $L=0.3\text{mm}$ ,  $H=0.4\text{mm}$ ,  $2.4\text{kV}$ )

### (3) EHD ポンプ特性の数値解析と実験の比較

図11はポンプ特性の数値解析結果と実験結果を比較したものである。正規の数値解析結果は図11中でstandardと記した曲線であり、実験結果との乖離が大きい。しかし、実験に用いたEHDポンプの電極部を詳細に観察した結果、組み付け誤差が大きく生じており、エミッタ電極が中心から大きくずれていることが判明した。そのずれを0.1mm, 0.2mmとして数値解析した結果がCase 1とCase 2であり、ずれが大きくなるにつれて実験結果に近づく結果となった。EHDポンプの製作精度を向上させて改めて実験を行う必要があるが、本数値解析結果は実験結果と比較的良好に一致しており、本数値解析結果の妥当性を示していると考えられる。

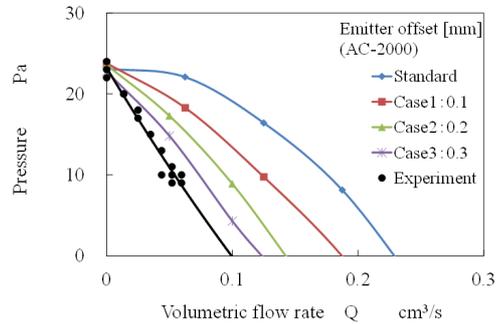


図11 実験と数値シミュレーションの比較 ( $L=0.3\text{mm}$ ,  $H=0.4\text{mm}$ ,  $1.2\text{kV}$ )

### (4) 電荷注入式静電フィルタ内の粒子軌跡解析による性能予測

電荷注入式静電フィルタは、規則的に配置した三角形突起を有するエミッタ電極(電荷注入電極)、汚染物粒子を捕捉するコレクタ電極、両者の間に位置し汚染物を捕捉するフィルタエレメントから構成される。その形状の繰り返し単位を示したのが図12であり、油は左から右に流れる。フィルタ内の流れ場と電場を予め数値解析し、その結果を利用して汚染物粒子の運動軌跡の解析を行った。

図13は軌跡解析の一例であり、油は左から流入し右方向に流れる。突起先端から注入される電荷に作用するクーロン力により、突起からコレクタ電極に向かうイオンドラッグ流れが生じ、そのため、突起先端(図13の赤点)より上流で粒子は一度コレクタ電極から離れ、イオンドラッグ流れに乗ってコレクタに向かう様子が示されている。コレクタおよびフィルタエレメント上の黒丸印は粒子の捕捉点である。明らかにフィルタエレメント上での捕捉数が少なく、有効に機能していないことを示している。

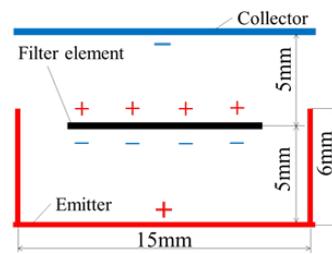


図12 電荷注入式静電フィルタ(構造の繰り返し単位のみを表示)

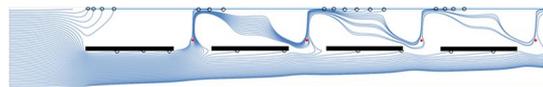


図13 粒子軌跡の解析例(フィルタエレメント間の赤点は突起先端位置, 黒丸は粒子捕捉位置を示す)

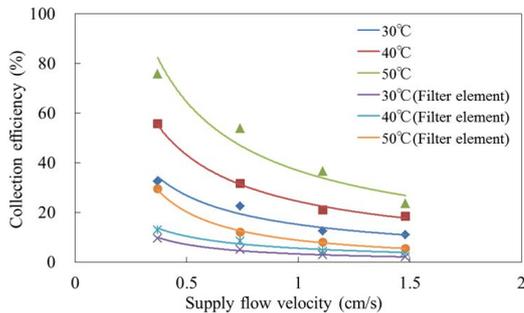


図 14 ワンプス捕捉効率に及ぼす供給流速と油温の影響

図 14 は、ワンプスでの粒子の捕捉効率に及ぼす供給流速と油温（粘度）の影響を示している。上 3 本の曲線はフィルタ全体での捕捉効率、下 3 本の曲線はフィルタエレメントでの捕捉効率を示し、両者の差がコレクタでの捕捉効率を示す。供給流速の増加および油温の低下とともにワンプスの捕捉効率は低下し、定性的には実験結果と一致した。また、本数値解析によりフィルタエレメントの捕捉効率が低いことが明らかとなり、粒子の軌跡解析は静電フィルタの性能向上のために有用であることを示すことができた。

#### 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 1 件)

- (1) Yanada, H., Takagi, S., Mamiya, S., Effects of electrode and filter element shapes on characteristics of charge injection type of electrostatic oil filter, Journal of Electrostatics, 74 (2015), 1-7. 査読有

〔学会発表〕(計 13 件)

- (1) 柳田秀記, EHD ポンプの特性(電極形状と液体物性の影響), (一社)日本フルードパワーシステム学会 (JFPS) 第 4 回機能性流体テクノロジーの次世代 FPS への展開に関する研究委員会, 2016 年 3 月 24 日, キャンパスイノベーションセンター(東京)
- (2) 西郷瑞輝・西川原理仁・柳田秀記, EHD ポンプ特性に及ぼす液体物性の影響, 日本設計工学会東海支部平成 27 年度研究発表講演会, 2016 年 3 月 9 日, 名城大学(名古屋市)
- (3) 柳田秀記・松浦慎仁・横山智洋, 電荷注入式静電フィルタ内の粒子の軌跡解析, 2015 年 5 月 28 日, 平成 27 年春季フルードパワーシステム講演会, 機械振興会館(東京)
- (4) 柳田秀記・島田光浩・西郷瑞輝, イオンドラッグポンプ特性の数値シミュレーション, 2015 年 5 月 28 日, 平成 27 年春季フルードパワーシステム講演会, 機械振興会館(東京)
- (5) 大木佑介・井坂俊貴・柳田秀記, 静電フィ

ルタ内の電位・電界分布に及ぼす液体の種類の影響, 日本設計工学会東海支部平成 26 年度研究発表講演会, 2015 年 3 月 11 日, 名城大学(名古屋市)

- (6) 松浦慎仁・横山智洋・柳田秀記, 電荷注入式静電フィルタの性能に及ぼす供給流量と温度の影響, 日本設計工学会東海支部平成 26 年度研究発表講演会, 2015 年 3 月 11 日, 名城大学(名古屋市)
- (7) 堂賢人・西郷瑞輝・正村孝太・柳田秀記, 絶縁性液体中の電荷注入現象に関する研究, 日本設計工学会東海支部平成 26 年度研究発表講演会, 2015 年 3 月 11 日, 名城大学(名古屋市)
- (8) 島田光浩・大谷浩輔・柳田秀記, EHD ポンプ特性に及ぼす電極形状の影響, 日本設計工学会東海支部平成 26 年度研究発表講演会, 2015 年 3 月 11 日, 名城大学(名古屋市)
- (9) 大前雄平・磯村鷹弥・柳田秀記, 空気用 EHD ポンプの基礎研究, 日本設計工学会東海支部平成 26 年度研究発表講演会, 2015 年 3 月 11 日, 名城大学(名古屋市)
- (10) 柳田秀記・高木翔太・松浦慎仁, 電荷注入式静電フィルタに関する研究(浄化速度に及ぼす供給流れの影響), 日本設計工学会東海支部平成 25 年度研究発表講演会, 2014 年 3 月 12 日, 名城大学(名古屋市)
- (11) Yanada, H., Numerical simulation and applications of electrohydrodynamic phenomena, 2013 年 12 月 5 日, Penang (Malaysia)
- (12) 吉本健介・柳田秀記, EHD 流動現象に及ぼす液体の種類の影響, 日本設計工学会 2013 年度秋季研究発表講演会, 2013 年 10 月 4 日, 名城大学(名古屋市)
- (13) 高木翔太・柳田秀記, 電荷注入式静電フィルタの浄化速度に及ぼす供給流れの影響, 日本設計工学会 2013 年度秋季研究発表講演会, 2013 年 10 月 4 日, 名城大学(名古屋市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:

番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.nak.me.tut.ac.jp/yanada/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柳田 秀記 (YANADA HIDEKI)  
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・  
教授  
研究者番号：90166554

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：