

## 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 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560141

研究課題名（和文） 電荷注入現象を利用した高性能静電フィルタ

研究課題名（英文） High Performance Electrostatic Filter Utilizing Charge Injection Phenomenon

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

研究成果の概要（和文）：本研究代表者が提案している電荷注入式静電フィルタの高性能化と性能予測精度の向上を目的として、種々の形状の電極とフィルタエレメントを考案・試作し、実験により浄化速度を評価するとともに、数値解析により得られる電場・流れ場と浄化速度の対応を検討し、浄化速度を高める静電フィルタ内部形状を見出した。また、数値解析に必要となる情報のうち電荷注入密度の表示式とイオン移動度について有意な結果を得た。

研究成果の概要（英文）：The investigation aims at enhancing the performance of charge injection type of electrostatic oil filter, which has been proposed by the representative researcher, and at improving the accuracy of the performance prediction by numerical simulation. Filtration experiments were conducted using many types of filter models. The electric and flow fields were numerically simulated for the filter models and were compared between the models and with the results of the filtration experiments. The best filter configuration of all the proposed ones was found out. In addition, the expression for the injected charge density and the effective value of ionic mobility were decided.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機械要素，浄化，汚染管理，静電フィルタ，潤滑油，電荷注入，数値解析

### 1. 研究開始当初の背景

サブミクロンサイズの汚染物まで除去できる静電フィルタは、油中で汚染物粒子が自然に帯電する現象を利用しているため、浄化速度が遅いという短所を有している。

本研究代表者は、汚染物粒子の帯電量を増大させることを意図して、一方の電極に突起を加工し、突起先端に生じる高電界の作用に

より突起電極の極性と同一の極性を持つ電荷（イオン）が形成される電荷注入現象を利用することを提案した。基礎研究により多くの油で汚染物粒子の帯電極性が反転できるほどに電荷が汚染物粒子に付着し、浄化速度が（油種によっては著しく）増加することを示すと同時に、電荷注入は油に悪影響を与えないことを示した。また、注入電極の突起先

端近傍から生じるイオンドラッグ流れがフィルタの性能に影響することを示した。

従来の研究では、電荷注入の効果を実証することを目的として、電極対のみからなる簡単な形状のフィルタモデルを試作して実験に用いていたが、金属磨耗粉などの導電性汚染物を捕捉するためには電極間にフィルタエレメントを挿入する必要がある。フィルタエレメントの挿入により内部の流れ場や電場が影響を受けるため、また、電極とフィルタエレメントの形状と配置の組み合わせが多く考えられるため、実用化に向けて、それらの最適な形状と配置を見出す必要がある。

また、電界強度分布とともにイオンドラッグ流れを数値解析により精度良く予測できれば、より性能の良い静電フィルタの設計に際し極めて有用となる。しかし、数値解析に必要な注入電荷密度やイオン移動度の値を決定する手法はいまだ確立されておらず、したがって、イオンドラッグ現象を数値解析により予測する手法が確立できていない。

## 2. 研究の目的

電荷注入現象を利用して効率よく潤滑油を浄化し、潤滑油の再利用・長期使用を可能にするとともに、廃油量の低減による環境負荷の低減を可能とする高性能な浄化装置（電荷注入式静電フィルタ）の開発を行う。そのために、内部に挿入される電極やフィルタエレメントの形状および運転条件などが浄化速度に及ぼす影響を明らかにして、最適な形状と運転条件を見出すとともに、静電フィルタの設計に際して有用となる電場と流れ場の数値解析法の精度を向上させることを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では以下の4項目について実施する。

- (1) フィルタモデルによる油の浄化実験
- (2) フィルタ内部の電場と流れ場の数値解析
- (3) 2次元フィルタモデル内のイオンドラッグ流れの測定
- (4) イオンドラッグ流れ場の数値解析のための基礎研究

(1)では、種々の形状の電極とフィルタエレメントを考案・製作し、より浄化速度を高められるそれらの形状と配置を見出す。実際に製作した電極とフィルタエレメントの平面寸法は100mm×100mm、電極間距離は10mm、印加電圧は10kV、油温は40℃とし、数種類の潤滑油を用いて浄化実験を行い、浄化速度を比較した。

(2)では、(1)の浄化実験結果の考察をすること、および、より良いフィルタ形状について検討することを目的として、フィルタ内部の電界強度分布やイオンドラッグ流れを数値解析により調べた。電場と流れ場は相互に影響し合うため、両者を記述する式を連成し

て解いている。

(3)では、イオンドラッグ流れが電極やフィルタエレメント形状などによりどのように影響されるかを2次元モデルにより実際に調べる。可視化はPIV法により行った。

(4)では、2次元形状のイオンドラッグポンプを用いて、イオンドラッグ流れや発生圧力を実験により調べ、種々の条件での数値解析結果と比較することにより、注入電荷密度の電界依存性やイオン移動度の適切な値について検討した。

## 4. 研究成果

### (1) フィルタモデルによる油の浄化実験

20種類近いフィルタ形状を考案・試作し、浄化実験を行った。その一部の形状を図1に示す。三角形突起を有するエミッタ電極（注入電極）がコレクタ電極（捕捉電極）を挟むように配置し、両者の間にフィルタエレメントを挿入する構成となっている。図1に示した3種類の形状の場合、油は紙面に垂直方向に流れる。汚染物粒子はコレクタ電極とフィルタエレメントのエミッタ側表面で捕捉される。Type7の形状の場合は、図1(d)に模式的に示すように、突起先端から生じるイオンドラッグ流れの一部がフィルタエレメントのエミッタ側表面に回り込む様子が目視により観察された。

図2は浄化実験結果の一例であり、図1に示した3タイプでの比較である。フィルタ形状により浄化速度が影響され、Type7が最も良いことを示している。その後の継続的な検

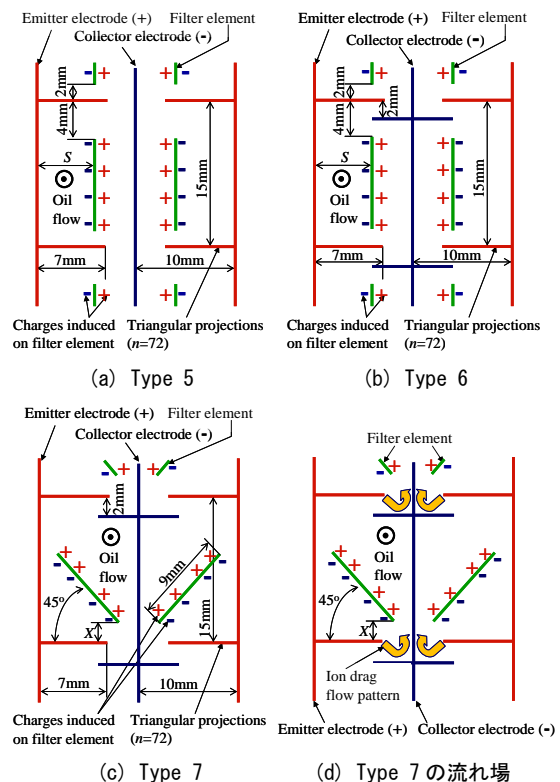


図1 試作フィルタ形状の例

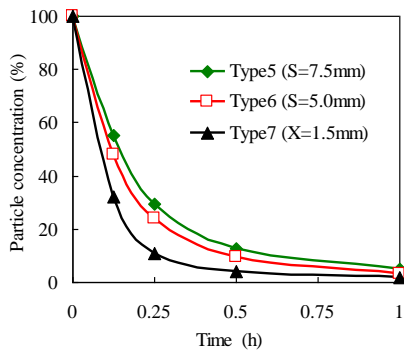


図2 浄化実験結果の一例

討により、加工の容易さも考慮して、次に示す図3(b)のフィルタ形状が本研究の範囲内では最良であることを見出した。

**(2) フィルタ内部の電場と流れ場の数値解析**

図3は、いくつかのフィルタ形状についてイオンドラッグ流れ場の数値解析結果を示している。図(a)、(b)は二つのフィルタエレメント形状の影響を比べたもので、図(c)は突起先端からコレクタ電極までの直線上の流速分布を示したものである。フィルタエレメントが電極に平行な形式(図(a))では、エ

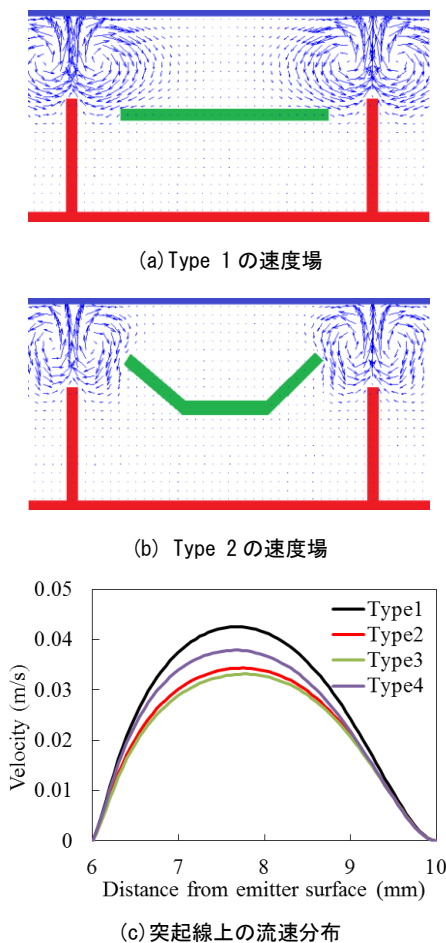


図3 流れ場の数値解析例

ミッタ電極の突起先端から生じるイオンドラッグ流れが強く、その流れはフィルタエレメントとコレクタ電極の間に留まっている。一方、図(b)に示すように、フィルタエレメントを折り曲げることにより、イオンドラッグ流れはやや弱くなり、流れの一部はフィルタエレメントのエミッタ側に流れ込むことがわかる。これは図1(d)に示した観察結果と符合している。図(c)が示すように、Type 2の形状でイオンドラッグ流れが小さく、コレクタ電極面に捕捉された汚染物粒子を流れにより離脱させにくくなると期待できる。

電極やフィルタエレメントの形状の多少の違いにより流れ場だけでなく、エミッタ電極突起先端の電界強度(したがって、注入電荷密度)、ならびに、コレクタ電極やフィルタエレメント表面の電界強度分布も異なり、フィルタ性能に影響することが数値解析により明らかとなった。

**(3) 2次元フィルタモデル内のイオンドラッグ流れの測定**

図4は、図3(a)と同一形状でフィルタエレメントの挿入位置が異なる場合のイオンドラッグ流れの測定結果の一例である。印加電圧を高くすると流れの速さや広がりは大きくなるが、イオンドラッグ流れがフィルタエレメントとコレクタ電極の間に制限される点は図3(a)の数値解析結果と同様である。図4と図3(a)の比較より、数値解析により流れ場が比較的良好に予測できることが示された。

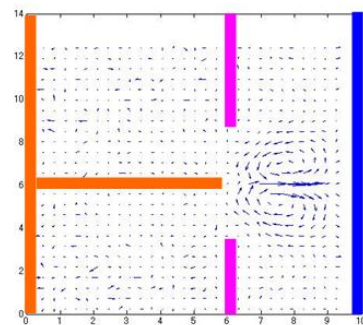


図4 イオンドラッグ流れの測定例(最大流速40mm/s)

**(4) イオンドラッグ流れ場の数値解析のための基礎研究**

図5は、本研究項目のために製作したイオンドラッグポンプである。平板状のエミッタ電極と矩形穴を有するコレクタ電極で構成されている。このポンプを対象として流れ場とポンプ特性を測定し、測定結果と数値解析結果を比較することで、注入電荷密度の電界依存性とイオン移動度の適切な値について検討した。なお、他の電極形状についても同様な検討を行っている。

図6は、電荷密度分布に及ぼすイオン移動

の影響を示したもので、図(a)は文献値(Walden 則より定まる値)を用いた場合、図

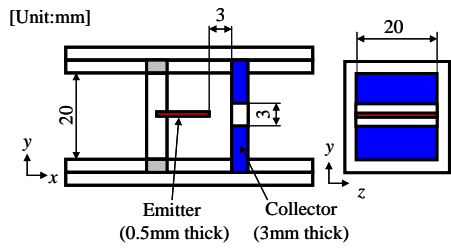
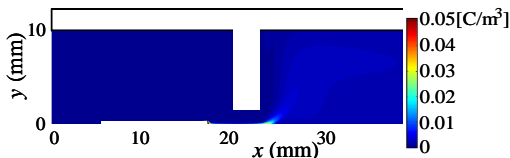
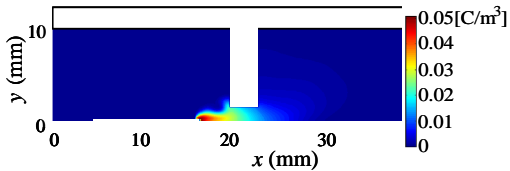


図5 イオンドラッグポンプ

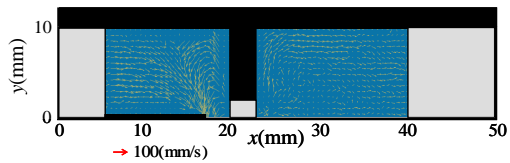


(a) Walden 則値を用いた場合

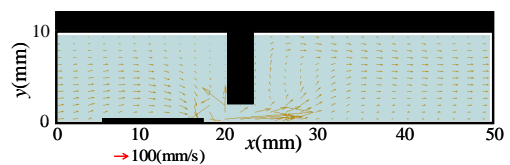


(b) Walden 則値の60倍の値を用いた場合

図6 電荷分布に及ぼすイオン移動度の影響



(a) 実験結果



(b) 数値解析結果(Walden 則値の60倍の値を用いた場合)

図7 実験と数値解析の流れ場の比較

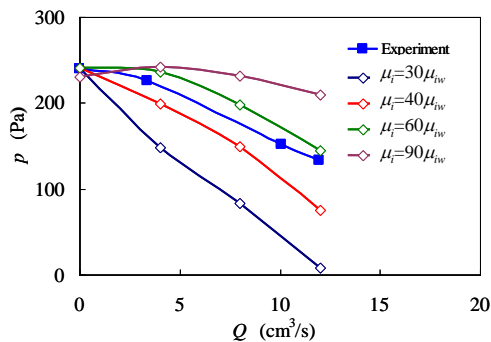


図8 圧力・流量特性へのイオン移動度の影響 ( $\mu_{iw}$  はイオン移動度の Walden 則値)

(b)はその60倍の値を用いた場合である。Walden 則値を用いた場合には電荷がほとんど広がらず、その結果発生圧力は測定値よりも著しく小さくなる。イオン移動度の値を大きくしていくと図6(b)に示すように電荷が広がり、その結果流れ場(図7)とポンプの特性(図8)が測定値に比較的良く一致するようになる。

以上のように、イオンドラッグ現象にはイオン移動度の値が大きく影響し、この値を適切に設定することが重要であることが明らかとなった。なお、Walden 則値の60倍の値を用いても数値解析の電流値は測定値と矛盾せず、決して不自然な値ではないことを確認した。また、本研究の範囲内では、注入電荷密度は、エミッタ電極先端の静電界強度とイオンドラッグ流れが生じ始める閾値電界強度の差に比例するとして定式化することが適切であるとの結論を得た。なお、その比例定数は、ある条件での実験と数値解析の圧力が一致するように決定した。

### 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3件)

- ① Yanada, H., Daiou, Y., Ogi, Y., Improvement of filtration speed of charge injection type of electrostatic oil filter, Journal of Electrostatics, Vol.70, No.1, 2012, 117-125, 査読有. DOI:10.1016/j.elstat.2011.11.005
- ② Yanada, H., Okamoto, T., Tran, K. D., Fundamental investigation of charge injection type of electrostatic oil filter (effect of filter element on filtration speed), Journal of Electrostatics, Vol.69, No.3, 2011, 180-188, 査読有. DOI:10.1016/j.elstat.2011.03.007
- ③ Yanada, H., Yamada, T., Asai, Y. and Terashita, Y., Measurement and numerical simulation of ion drag pump characteristics, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.5, No.3, 2010, 617-631, 査読有. DOI:10.1299/jfst.5.617

[学会発表] (計7件)

- ① 寺本福章・吉本健介・大竹俊行・柳田秀記, 矩形断面平行電極分らなる EHD ポンプの特性, 日本機械学会東海支部第62期総会講演会講演論文集, 2013, 239-240, 査読無
- ② 高木翔太・宮川穰・間宮祥太郎・柳田秀記, 電荷注入式静電フィルタの改良研究, 日本機械学会東海支部第62期総会講演会講演論文集, 2013, 293-294, 査読無
- ③ 柳田秀記・間宮祥太郎・高木翔太・宮川穰,

電荷注入式静電フィルタの性能に及ぼす構成要素形状の影響, H24 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 2012, 169-171, 査読無

- ④ Yanada, H., Isohata, Y., Tsuruta, K., Numerical simulation of ion drag pump characteristics, Proceedings of The 8th JFPS International Symposium on Fluid Power, Okinawa Japan, 2011, 495-500, 査読有
- ⑤ Yanada, H., Daiou, Y., Okamoto, T., Charge injection type of electrostatic oil filter, Proceedings of The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power, 2011, Tampere, Finland, Vol.4, 2011, 181-193, 査読有
- ⑥ 大王裕有我・柳田秀記, 電荷注入式静電フィルタの性能向上に関する研究, 日本機械学会東海支部第 60 期総会講演会講演論文集, 2011, CD 全 2 頁, 査読無
- ⑦ 五十畑優太・柳田秀記, EHD ポンプ特性に及ぼす電極構成の影響, 日本機械学会東海支部第 60 期総会講演会講演論文集, 2011, CD 全 2 頁, 査読無

[図書] (計 1 件)

- ① 中野政身・横田眞一・吉田和弘・竹村研治郎・柳田秀記・他, 機能性流体を核としたフルードパワーシステムの融合化に関する研究委員会研究成果報告書, 2012, 168(79-85), (一社) 日本フルードパワーシステム学会

[その他]

ホームページ等

<http://www.tut.ac.jp/teach/main.php?mode=detail&article=13>

## 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 :