

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 5 月 20 日現在

機関番号：57102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760139

研究課題名（和文） 線一平行平板型電気流体ガスポンプの最適化と多段化

研究課題名（英文） Optimization and multistage of wire-parallel plate electrode type Electrohydrodynamic gas pump

研究代表者

坪根 弘明（TSUBONE HIROAKI）

有明工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：90321512

研究成果の概要（和文）：本研究は従来の羽根車式のファンを発展させる次世代型の気体輸送装置（ガスポンプ）に関する取組で、プラズマを利用した流体駆動方式を採用するため、可動部のないガスポンプの開発を行った。可動部がないため、騒音・振動がなく、小型化や様々な形状のガスポンプとして設計可能であり、さらに流れを電氣的に直接制御できる特徴を有する。今回、電極や流路の最適化と流量・流速増加のための多段化に取り組み、実験的にそれらの傾向を詳細に明らかにし、いくつかの設計パラメーターの方向性を示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to develop the conventional fan using for gas transportation, thermal management and so on, electrohydrodynamic gas pump (EHD) driven gas by plasma has been proposed as next generation gas pump or fan. The EHD gas pump has no moving components, and so has some potentials for simple design, low noise, low vibration, longer life, higher energy efficiency and faster control of gas flow. In this time, the experimental investigations were conducted for the effects of size of the flow channel and electrodes, and their arrangement on gas velocity, flow rate, pressure distribution and pump efficiency. In addition, in order to develop pump performance, multi-stage type EHD gas pump were tested, too. The tendencies of pump performance for many design parameters of the EHD gas pump were revealed with the experimental results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
22年度	800,000	240,000	1,040,000
23年度	500,000	150,000	650,000
24年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体機械、プラズマ、電気流体、EHD

1. 研究開始当初の背景

低温大気圧プラズマにおいて、電極間に高電圧を作用すると、コロナ放電により誘起されるイオン風（Electrohydrodynamics (EHD)）が発生する。特に、空気中におけるイオン風の速度は数十 m/s に達すると言われる。現在、この EHD 流れを利用した研究が熱流体輸送や除塵等の様々な応用分野で行われている。

近年、EHD 現象を利用した電気流体ガスポンプの研究が行われている。その理由は、電気流体ガスポンプは電氣的直接駆動方式であるため、従来のファンと比較して、(1) 可動部が無い、(2) シンプルな構造、(3) 低騒音、(4) 小型・軽量、(5) 応答性の高い電氣的な流れの制御が可能、(6) 高効率なガスポンプを実現できると期待されているからである。そのため、線-線型や針-リング型等の様々な電極タイプの電気流体ガスポンプが提案されている。しかしながら、それらは十分な流速もしくは流量を発生し、広い範囲の印加電圧に対して安定した放電を保つことができるとはいえず、また、これらはコンパクトな多段型や自由度の高い流路形状に設計し難い。そこで、十分な流速が得られ、安定なコロナ放電を保ちやすく、形状が簡単で小型かつ単段型と同じサイズで複数の線電極を配置した多段型の電気流体ガスポンプが可能である新型の線-平行平板型電気流体ガスポンプを提案する。

2. 研究の目的

本研究では、線-平行平板型電気流体ガスポンプの気体の流速、流量および効率に対する最適な設計指針の確立を目的とする。具体的には、(1) 流路形状（アスペクト比）、(2) 線電極と GND 電極間の距離、(3) GND 電極の長さに対する影響を実験的に明らかにする。また、多段型の電気流体ガスポンプにより気体の流速、流量および効率がどのように変化し、主に正味の気体の流速や流量をどこまで増加できるのか実験的に明らかにする。特に、(4) 線電極数と(5) 線電極間距離をパラメータとして、多段型電気流体ガスポンプの性能を調査する。さらに、(6) 電源極性（正極性と負極性）により放電現象が異なるので、極性の影響について明らかにするとともに、不均一な電界を電極間で生じさせるための方法として、(7) 線電極被覆および GND 被覆方式の 2 種類の被覆方法を考慮した設計指針についても検証する。次に、(8) 線電極を絶縁被覆塗装した線-平行平板型電気流体ガスポンプの実現性に関する調査を行なった。最後に、(9) 電気流体ガスポンプ内部の可視化および PIV 解析を行い、実験結果と合わせて、最適な設計指針について検討する。

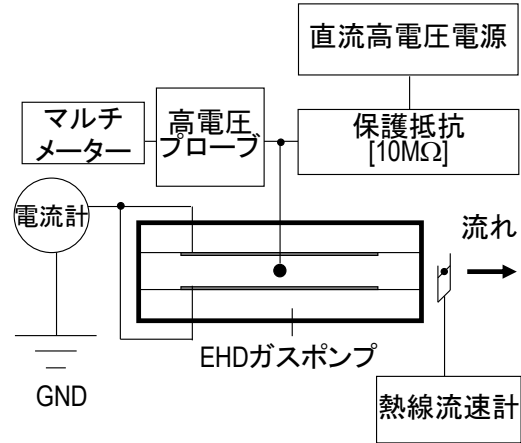


図 1 実験装置概略図

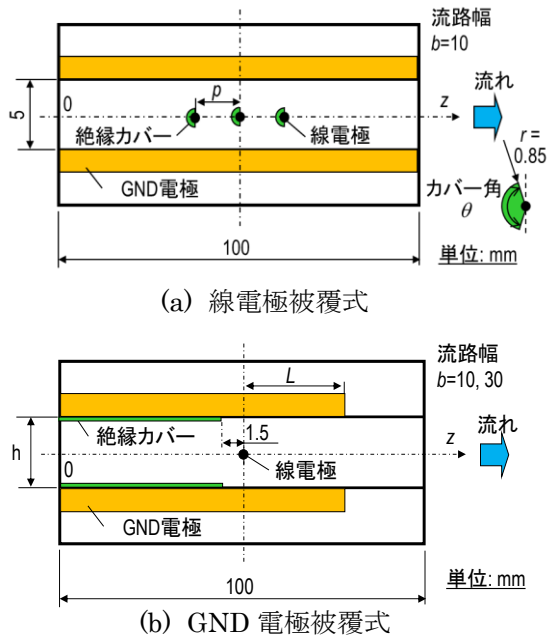


図 2 電気流体ガスポンプ詳細図

3. 研究の方法

図 1 および図 2(a), (b) に本研究で用いた実験装置の概略図と電気流体ガスポンプ詳細図をそれぞれ示す。作動流体には室温の空気を用い、大気圧下で実験を行った。直流高電圧電源 (Glassman High Voltage 製, PS/ER20R15.0-10) を用いて、正極および負極の高電圧を線電極に印加した。印加電圧の測定には高電圧プローブ (Tektronix 製, P6015A) とマルチメーター (Iwatsu 製, VOAC7513)、放電電流の測定には電流計 (Iwatsu 製, VOAC86A)、流速の測定には熱線流速計 (日本カノマックス製, 4CH Anemometer MODEL1570) をそれぞれ用いた。ここで、流速はポンプ出口から 5 mm

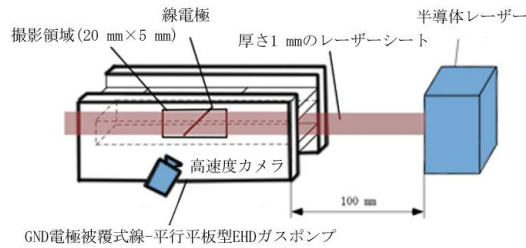


図3 電気流体ガスポンプの内部流動可視化実験装置

離れた位置における流れ方向垂直断面において、断面中心の水平・垂直軸上をそれぞれ 2 mm および 1 mm 間隔で測定し、その平均値を代表速度とした。流量については流路断面と平均流速($Q=A \times u$)から算出した。線電極には直径 0.25 mm のステンレス線、GND 電極には真鍮板を用いた。線電極には外半径 0.85 mm の PEEK 製のチューブで円周方向に $\theta=135^\circ$ の角度部分、GND 電極には厚さ 0.2 mm の絶縁テープを線電極から水平方向に $t=1.5$ mm の位置に設置し、部分的に絶縁した。さらに、ポリウレタンとフッ素を厚さ約 10 μm 程度部分的に塗布した二種類の線電極を用いて、EHD ガスポンプの作動実験を行った。

次に、GND 電極被覆方式において、流路形状(アスペクト比)の影響については、流路幅 $b=10$ mm および 30 mm、流路高さ $h=5, 6, 14, 22, 30$ mm の組み合わせで実験的調査を行なった。また、線電極と GND 電極の距離の影響についても流路高さ h を変えることで調査した。GND 電極の長さに対する影響については、 $L=5, 10, 15, 20, 25$ mm で実験的に調査した。さらに、多段型電気流体ガスポンプの検討のため、線電極数および線電極間距離の影響について、1~3 本の線電極を用い、2 本の線電極の場合における線電極間距離を 5, 10, 15, 20 mm の 4 種類に対して実験的に調査した。さらに、電源極性の影響について、単段型の電気流体ガスポンプで動作実験を行なった。

また、線電極と GND 電極の間で発生する EHD 流れがどのように正味の流れを生じさせているのかについて、高速度カメラとレーザーシート並びに PIV 解析ソフトウェアを用いて、流れの可視化および解析を行なった。図 3 に実験で使用した可視化実験装置を示す。

4. 研究成果

(1) 流路形状(アスペクト比)の影響について、図 4 および図 5 に線電極被覆式電気流体ガスポンプにおける出口平均流速および流量の実験結果を示す。1 本の線電極を用いた

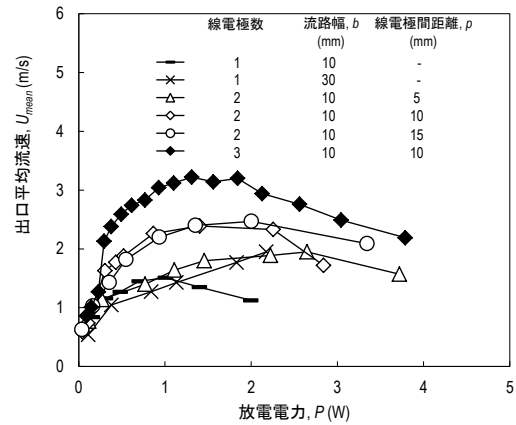


図4 線電極被覆式電気流体ガスポンプにおける出口平均流速の実験結果

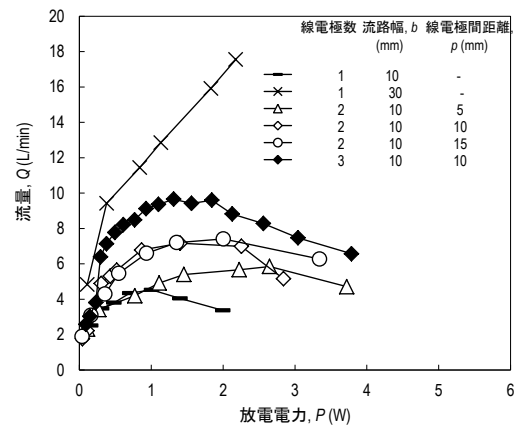


図5 線電極被覆式電気流体ガスポンプにおける流量の実験結果

流路幅が 10 mm および 30 mm の場合を比較すると、出口平均流速のピーク値は流路幅が 30 mm の場合のほうが高かった。また、流量について、流路断面積は流路幅 30 mm のほうが 10 mm よりも 3 倍大きい、流量のピーク値は 4 倍程度高く、面積比以上に流量が増加した。これらについては、流路幅 30 mm のほうが 10 mm の場合よりも水学的相当直径が大きいため、摩擦圧力損失が小さくなり、出口平均流速が高く、面積比以上に流量が増加したと考えられる。このことから、線-平行平板型電気流体ガスポンプでは線電極方向、つまり流路幅方向の拡大はガスポンプの性能を高めることにつながり、薄型(高アスペクト型)電気流体ガスポンプの可能性を示していることが分かる。

(2) 線電極と GND 電極間の距離の影響について、図 6 に出口平均流速の実験結果を示す。高さ H ($H/2$ が線電極と GND 電極の距離に相当) が小さいほど、出口平均流速のピーク値が高くなる傾向であった。しかしながら、流量で換算すると、流路断面積が異なるため、

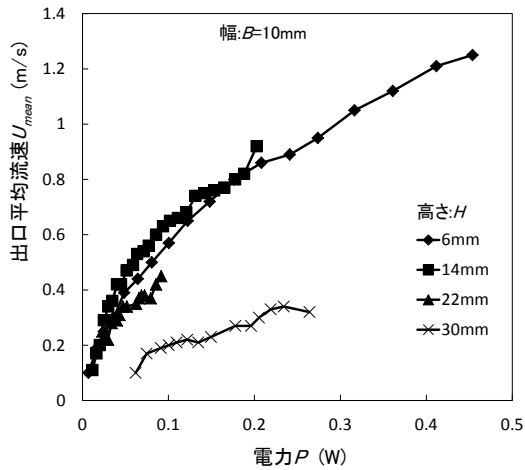


図 6 GND 電極被覆式電気流体ガスポンプにおける各流路高さに対する出口平均流速の実験結果

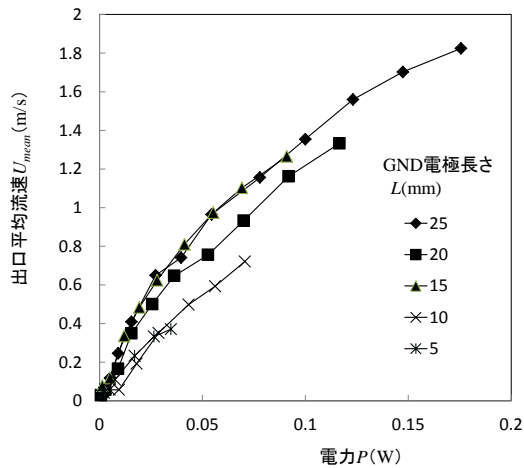


図 7 GND 電極被覆式電気流体ガスポンプにおける各 GND 電極長さに対する出口平均流速の動作実験結果

$H=14$ mm の場合が最も流量は高かった (図省略)。

(3) GND 電極の長さの影響について、図 7 に各 GND 電極長さに対する出口平均流速の実験結果を示す。GND 電極長さの増加とともに、出口平均流速は増加し、ピーク流速も GND 電極が長いほど高くなる傾向であった。これは、線電極前後の電界の不均一具合に依存すると考えられる。

(4) 線電極数の影響について、図 4 に示すように、線電極数の増加とともに放電電力に対する出口平均流速は増加した。これは、特に多段式のほうが単段式の電気流体ガスポンプより効率良く流体の運動エネルギーに変換できることを意味する。おそらく線電極同士の電界の影響と EHD 流れの発生および正

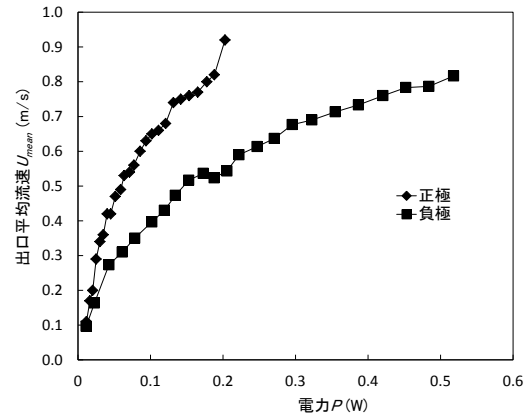


図 8 GND 電極被覆式電気流体ガスポンプ (幅 10 mm, 流路高さ 14 mm) における出口平均流速の実験結果

味の流体移動へのプロセスが複雑に影響を及ぼしあっているのではないかと推察する。今後、多段型電気流体ガスポンプ内部の流れの可視化および解析が、この実験結果を明確に説明する重要な手段の一つになると考えられる。

(5) 線電極間距離の影響として、図 4 に示すように、2 本の線電極を用いた場合の線電極間では、 $p=10$ mm と 15 mm ではほとんど出口平均流速が変わらないものの、 $p=5$ mm では他の線電極間距離と比べて出口平均流速が小さくなった。このことから、EHD 流れおよび正味の流体移動と線電極間距離の間には重要な関係があり、最適値があることを示唆する結果を得ることができた。

(6) 電源極性の影響について、図 8 に流路幅 10 mm, 流路高さ 14 mm の GND 被覆式電気流体ガスポンプにおける出口平均流速の実験結果を示す。本電気流体ガスポンプの印加電圧に対する作動範囲、および出口平均流速と印加電圧の関係もほぼ同様であった。しかし、任意の印加電圧に対する放電電流は負極の場合よりも正極の場合のほうが 2 倍以上高く、それに伴いポンプ効率も正極のほうが 2 倍以上高くなった (図省略)。また、GND 電極被覆式における負極での実験では本ガスポンプで安定した放電を維持することができなかったため、流速等の実験結果を得ることができなかった。これは線電極に部分的被覆を行なっていることが主な原因と考えられる。したがって、これらの結果より、現時点では印加電圧には正極を用いた場合のほうが線電極被覆および GND 電極被覆のどちらにおいても適していることを確認した。

(7) 線電極被覆および GND 電極被覆式の 2 種類の被覆方法の検討について、これまでに

得られた実験結果より、いくつかの視点から行なった。まず、出口平均流速について、線電極被覆式と GND 電極被覆式ではほぼ同程度の流速が得られることが分かった。これは、電気流体ガスポンプの作動原理を考えれば容易に理解することができる。つまり、線電極に対して、下流側（出口側）と上流側（入口側）の電界の強さに大きな差を生じさせれば、一方向への正味の流体移動が生じるため、線電極前後で不均一な電界を生じさせるための方法は電気流体ガスポンプの性能に特に大きな問題ではないということである。

次に、流速や流量、ポンプ効率の向上について、線電極被覆式のほうが省スペースで多段化することが可能であるため、最高流速や流量、最高ポンプ効率は線電極被覆式のほうが有利であることが分かった。

また、電気流体ガスポンプ製作の容易さや流路幅方向への拡張性について、GND 電極被覆式のほうが圧倒的に簡単で、ガスポンプの起動成功確率も高い。これは、線電極被覆式の場合、わずか直径 0.2 mm の線電極に周方向に 135° 程度の絶縁を行う必要があり、さらにその角度で線電極の長さ方向に一樣である必要があるが、その正確な製作方法が確立されていないことが主な原因であると考えられる。したがって、現時点では例えば流路幅が大きな流路のガスポンプを製作する場合、GND 電極被覆式のほうが実現性が高い。しかしながら、線電極への正確な部分的被覆の製作技術が確立すれば、多段型での線電極式の優位性と合わせて、線電極式の電気流体ガスポンプのほうがさらなる高性能化を実現できると考えられる。

(8) 線電極に絶縁被覆塗装した線-平行平板型電気流体ガスポンプについて、図 9 に作動実験結果を示す。塗装材料にポリウレタンを使用した場合、0.5 m/s 程度の最大流速を発生することができた。また、フッ素を使用した場合、EHD 流れが生じるコロナ放電を安定的に生じることができず、流速を発生できなかった。これらの理由は塗装材料と電極との接着力や濡れ性に関係し、塗装材料での線電極の部分的被覆の状態の違いに起因するものである。これらのことから、直径 0.2 mm の線電極の周方向の一部に正確に絶縁被覆塗装できる技術があれば、本電気流体ガスポンプはさらに小型化とともに出力を向上できると考えられる。

(9) 電気流体ガスポンプの内部流動の可視化および PIV 解析について、図 10 にそれらの結果を示す。線電極より上流側ではほとんど乱れを生じずに線電極付近まで流れ、線電極より下流側では周期的な渦の生成および離脱が観察された。これは線電極と GND 電

極の間の EHD 流れが原因となり生じていると考えられる。これが、レイノルズ数が 2000 以下であるにもかかわらず、流路出口での速度分布が乱流の速度分布に近い形状有している原因であると考えられる。なお、線電極と GND 電極距離や GND 電極長さ、多段型における線電極数、線電極間距離の影響について、可視化および PIV 解析を用いた検討までには至っておらず、これらの手法による線-平行平板型電気流体ガスポンプの設計指針の検討については、今後の課題である。

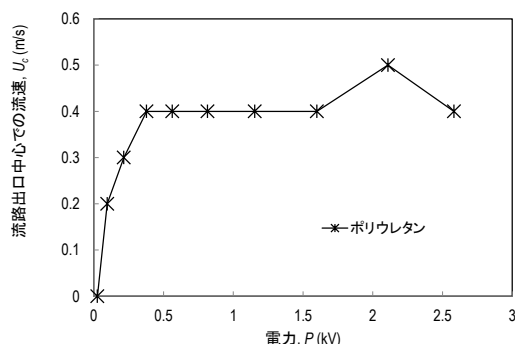


図 9 線電極を絶縁被覆塗装した線-平行平板型電気流体ガスポンプにおける動作実験結果

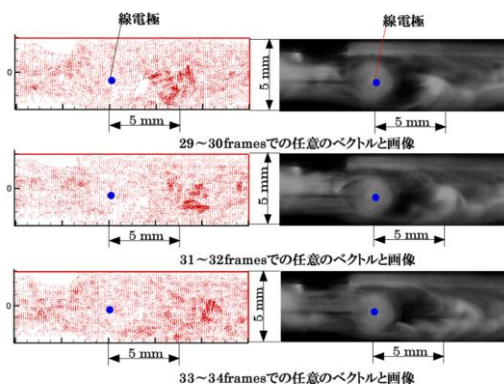


図 10 電気流体ガスポンプの内部流動の PIV 解析と可視化結果

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 H. Tsubone, G. D. Harvel, K. Urashima, K. Akashi, and J. S. Chang, Performance Characteristics of Partially Covered Wire-Parallel Plate Electrodes Type Electrohydrodynamic Gas Pumps, International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, 査読有, Vol.7, No. 1, 2013, pp.51-58, http://www.iesj.org/html/service/ijpest/ijpest_vol7_no1_2013.html

有明工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：90321512

〔学会発表〕（計 4 件）

① H. Tsubone, K. Akashi, G. D. Harvel, K. Urashima and J. S. Chang, Performance Characteristics of Partially Covered Wire-Parallel Plate Electrodes Type Electrohydrodynamic Gas Pumps, 2012 International Symposium on Electrohydrodynamics, 24th September, 2012, Gdansk, Poland

② 坪根弘明、線一平行平板型 EHD ガスポンプにおける絶縁被覆法のポンプ特性への影響、日本機械学会 2012 年度年次大会、2012 年 9 月 12 日、金沢大学角間キャンパス

③ 坪根弘明、赤司弘済、被覆線一平行平板型 EHD ガスポンプにおける流路幅および多段化のポンプ性能への影響、日本機械学会 2011 年度年次大会、2011 年 9 月 13 日、東京工業大学大岡山キャンパス

④ 坪根弘明、赤司弘済、被覆線一平板型 EHD ガスポンプの性能向上、日本機械学会九州学生会 (2011) 第 42 回学生員卒業研究発表講演会、2011 年 3 月 11 日、大分工業高等専門学校

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：イオン風発生装置及びガスポンプ

発明者：坪根弘明

権利者：独立行政法人国立高等専門学校機構

種類：公開特許

公開番号：特願 2013-45591

出願番号：特願 2011-182001

出願年月日：平成 23 年（2011 年）8 月 23 日

国内外の別：国内

○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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪根 弘明 (Hiroaki Tsubone)