

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15日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560192

研究課題名（和文） 熱交換器効率向上を目的とした高性能油分離器の開発

 研究課題名（英文） Development of high performance oil separator
for improvement of heat exchanger efficiency

研究代表者

福田 充宏（FUKUTA MITSUHIRO）

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：70199222

研究成果の概要（和文）：冷媒圧縮機から吐出される油量を低減するため、油ミストを帯電させ、クーロン力によって分離する方法について検討した。冷媒雰囲気中では、圧力が高くなるに従ってコロナ放電開始電圧は上昇するが、コロナ放電により油滴は帯電し、クーロン力による分離が可能であった。また、誘導帯電により油滴を帯電させた場合には、より低電圧でも分離可能であった。PAG油などの極性の大きな油の場合には、分極により油滴が変形する様子も観察された。

研究成果の概要（英文）：This study examined feasibility of an oil separation by Coulomb force with electric charge of oil mist in order to decrease an oil delivery from a refrigerant compressor. In the refrigerant atmosphere, although an inception voltage of Corona discharge increases with pressure, the oil droplet can be charged by the Corona discharge and separated by the Coulomb force. When an induction charge is applied to charge the droplet, it can be separated at lower voltage. It is observed that oil having large polarity such as PAG oil deforms by polarization in the electric field.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：冷凍空調工学，冷凍サイクル，圧縮機，冷凍機油，油分離，熱交換器

1. 研究開始当初の背景

(1) 蒸気圧縮式冷凍サイクルでは、圧縮機の潤滑、冷却、内部漏れのシールのために冷凍機油が用いられており、圧縮機からは冷凍機油が冷媒とともに微量ながら吐き出される。サイクルを循環する冷媒への冷凍機油の混入は、その量が微量であっても熱交換器にお

ける伝熱性能を大きく低下させることが知られており、油循環率をさらに低下させるために、高効率の油分離器の開発が望まれている。

(2) 冷媒圧縮機において、圧縮機から冷媒とともに吐き出される冷凍機油は、一般に重力

や遠心力を利用して分離されるが、冷媒ガスの密度は空気よりはるかに大きく、また、圧縮機から吐き出される油は非常に微小であるため、さらなる分離効率の向上は困難であった。

(3)油分離器に関する研究は従来あまり行われておらず、遠心式油分離器の設計も粉体工学における知見に基づいて行われてきた。また、集塵機では帯電により塵にクーロン力を作用させる帯電分離技術が用いられているが、クーロン力を利用した油分離器についての報告はほとんどない。

(4)申請者らは、これまでに冷凍サイクルにおいて様々な方法で油/冷媒混合率を測定する方法を提案してきた。また、油/冷媒混合物の流動などについても研究を行っており、冷凍サイクルにおける油の挙動に関して多くの知見を得ている。本研究では、これまでの油挙動に関する知見および計測・可視化手法を利用し、帯電した油滴にクーロン力を作用させることにより微小な油滴を分離する高効率油分離器について検討する。

2. 研究の目的

(1)本研究では、冷凍空調サイクルの熱交換器効率向上を目的として、圧縮機から吐き出される微小な油ミストを帯電させ、クーロン力を作用させて分離する高性能油分離器の開発を目指す。この技術の実現のため、静電界場における帯電油滴挙動の解明、冷媒雰囲気下における放電特性および油滴の帯電方法の検討、帯電した冷媒機油/冷媒混合物の油滴挙動、冷媒圧縮機から吐き出される油ミストの挙動と帯電分離等について、それぞれ実験的に明らかにする。

(2)帯電方法の検討

油滴の帯電分離の基本的な現象を把握するため、電極形状による帯電特性の違いを検討し、クーロン力による油滴の分離挙動を把握する。

(3)冷媒雰囲気下における放電、帯電特性

冷媒雰囲気下における放電特性に関する報告はなく、冷媒の種類や圧力が放電特性に及ぼす影響を検討する。また、冷媒雰囲気下において油滴を帯電させる方法について検討する。

(4)油/冷媒混合物の帯電特性

冷凍機油はその種類によって電気的特性が異なるため、油/冷媒混合物の組合せを変え、それぞれの組合せにおいて帯電・分離特性を実験的に調査する。

(5)微小油ミストの帯電分離挙動

圧縮機から吐き出される油は非常に微小であるため、モデル圧縮機により発生させた油ミストの大きさを測定するとともに、圧縮機から吐き出される微小油ミストの帯電分離挙動を観察し、高性能油分離器の実現可能性について検討する。

3. 研究の方法

(1)帯電方法の検討

油滴の帯電に対し代表的な方法として、コロナ放電による方法と誘導帯電による方法について、電極の構成、帯電量、帯電した油滴挙動について、大気圧下で検討した。

図1と図2に、コロナ放電による帯電と、誘導帯電の原理について示す。コロナ放電では捕集電極と放電電極に直流電圧を印加することにより、放電電極周りで不平等電界が形成され、空間の絶縁を破ってコロナ放電が発生する。この空間に液滴が入ると、コロナ放電によって発生したイオンが付着して帯電する。一方、誘導帯電では、電界が印加されたノズルから液滴が分離する際、その表面に電荷が現れた状態で分離することにより、

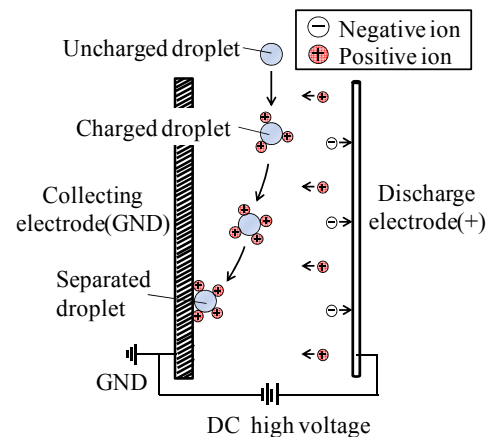


Fig.1 Principle of corona discharge

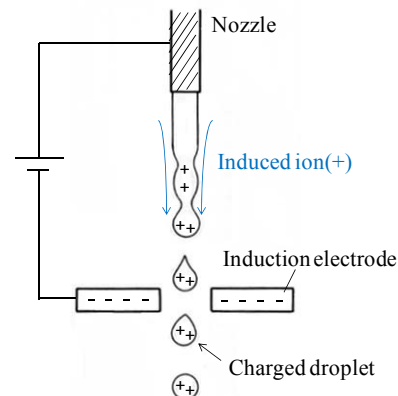


Fig.2 Principle of induction charge

帯電した状態の液滴が発生する。本研究では、図3に示した注射針およびキャピラリーチューブから液滴を電極間に落下させ、その挙動をハイスピードカメラで記録した。電極には、平板電極、線電極、ブラシ電極を用い、それらを高電圧直流電源装置に接続して、電極の構成について検討した。

(2) 冷媒雰囲気下における放電，帯電特性

コロナ放電は空間の絶縁を破って発生するため、その放電特性は大気中と冷媒雰囲気中では異なる。本研究では、図4に示す密閉圧力容器において、冷媒雰囲気における放電特性および油/冷媒混合物の帯電・分離特性を調査する。電極部はガラス管の中に入れられ、外部から油滴挙動が観察できる。電極からシェルへの放電を防ぐため、電極の取り付け部やガラス管のフランジ部はテフロンで製作した。油滴の帯電，分離挙動を検討する場合には、容器下部に冷凍機油を入れ、スターラで攪拌しながら冷媒を溶解させ、油/冷

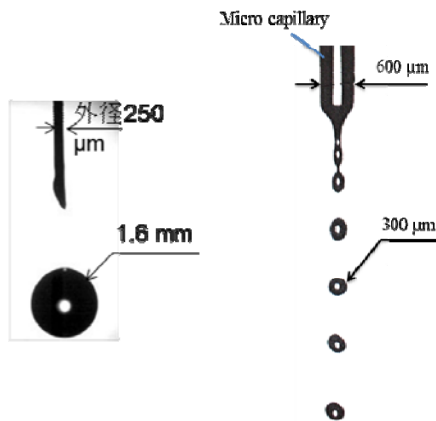


Fig. 3 Droplet formation by needle and micro capillary

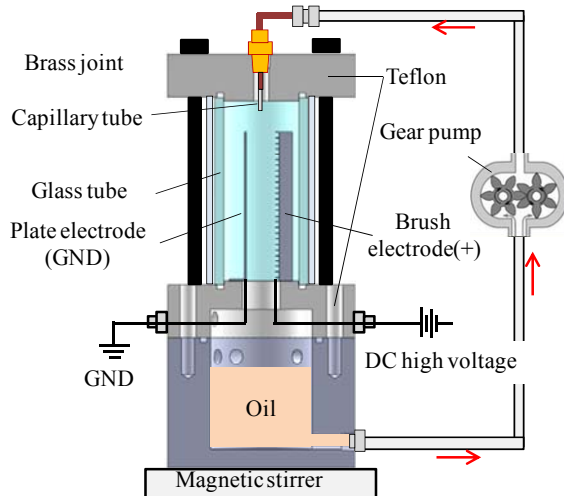


Fig. 4 Experimental setup in refrigerant

媒混合物をギヤポンプにより容器上部のノズルに送り、ノズルから油滴を電極間に滴下した。実験では、冷媒と油の組合せを変え、電圧を変化させながら、油滴の帯電・分離挙動をハイスピードカメラにより記録した

(3) 微小油ミストの帯電分離挙動

圧縮機内で発生する油ミストは非常に微小であり、前述の要素試験で行う油滴とは帯電・分離挙動が異なることが予想される。本研究では図5に示すモデル圧縮機において微小な油ミストを発生させ、そのミスト径分布をLDSAで測定するとともに、容器内に電極を設置して微小油ミストの帯電分離挙動を確認した。

モデル圧縮機は、2シリンダロータリ圧縮機の圧縮要素を用い、アクリル筒で覆われた上部吐出空間に電極を設置して、圧縮機から吐き出される微小油ミストの帯電分離挙動を観察する。圧縮機の吐き出し空間の観察を容易にするため、圧縮要素は外部の誘導モータにより駆動される。駆動軸のシェル貫通部はメカニカルシールによりシールされている。シェル吐き出し口は圧縮機吸い込みポートにつながれ、流量調整弁で吸い込み圧力をシェル内の圧力より低くすることにより、圧縮機下部の油だめ内の油を圧縮室に差圧給油して油ミストを発生させる。ミスト径を測定する場合には、シェル吐き出し口より油ミ

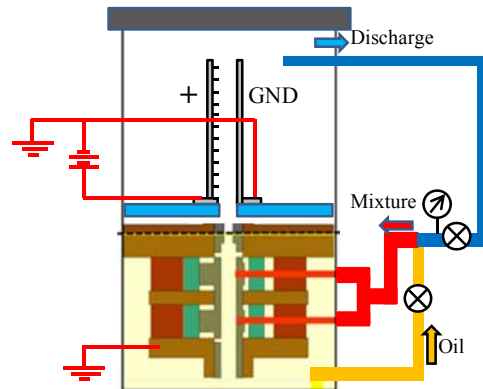


Fig. 5 Model compressor for mist generation

ストを大気中に噴出させ、LDSA を用いてミスト径分布測定し、大気中に吐き出されたミストはミスト処理機で吸引・処理した。

4. 研究成果

(1) 電極の構成と液滴の帯電

電極の形状、極性を様々に変え、大気中でのコロナ放電の発生および液滴の帯電・分離挙動を検討した。電極の構成に関しては、放電極(+)にブラシ電極を用い、捕集極(-)に平板電極を用いた場合が最も安定してコロナ放電が発生したため、以下の試験では全てこの構成とした。

図 6 に、ブラシ電極と平板電極の間隔を 15mm とし、印加電圧を上げていった場合の電流値を示す。電圧が 6kV 以上になると電極間に電流が流れはじめ、コロナ放電が発生していることが分かる。コロナ放電発生時には、電圧の上昇とともに電流は急激に上昇するが、電圧が 10kV の時電流は 160 μ A であり、消費電力は 1.6W と非常に小さい(電源の駆動電力は除く)。図 7 に、電圧が 7kV の時と 10kV の時における電極間の水滴の挙動を高速カメラにより連続的に撮影した様子を示す。コロナ放電が開始すると、水滴は電極間でプラスに帯電し、クーロン力により捕集電極

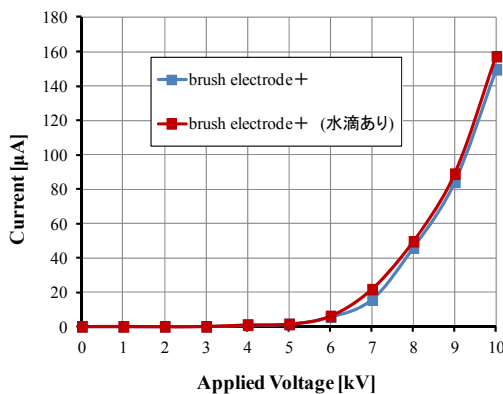


Fig. 6 Voltage-current characteristic

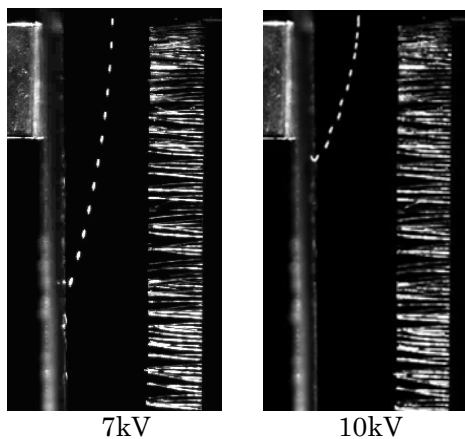


Fig. 7 Water droplet behavior

(-)へと曲がり、捕集極に付着する様子が観察された。電圧が高くなると水滴に作用するクーロン力が大きくなることも分かる。

液滴の水平方向の加速度から、クーロン力が得られ、クーロン力より液滴の帯電量を評価した。図 8 は、油滴および直径の異なる水滴の単位体積あたりの帯電量を印加電圧に対して示す。図より、コロナ放電による帯電量は電圧とともに増加し、また、液滴径の小さな方が単位体積あたりの帯電量が大きいことが分かる。このことは、圧縮機内で発生する微小な油ミストに対して、クーロン力による帯電分離法が有効であることを示している。同じ径の水滴と油滴(PVE)を比較すると、PVE の方が帯電量は小さいことがわかる。これは油の誘電率が水に比べて非常に小さいためである。図 9 には、種類の異なる冷凍機油の帯電量を示すが、誘電率の大きな PAG の帯電量が大きく、逆に極性を持たず誘電率も小さな鉱物油の帯電量が小さいことがわかる。

(2) 冷媒雰囲気下における放電、帯電特性

図 4 に示す装置を用いて、冷媒雰囲気下におけるコロナ放電の発生について検討した。図 10 は真空中と空気中および冷媒(R410A)中における電圧と電流の関係を示す。真空中では印加電圧が 0.5kV を越えると放電が発生し

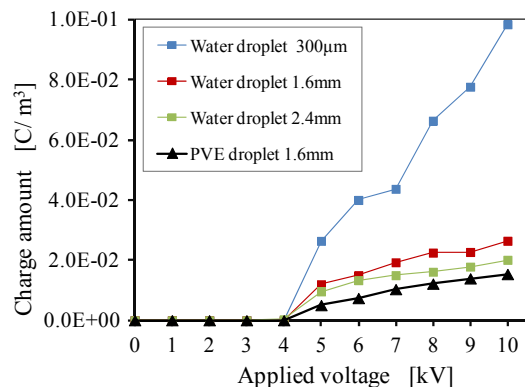


Fig. 8 Charging amount of oil and water droplet

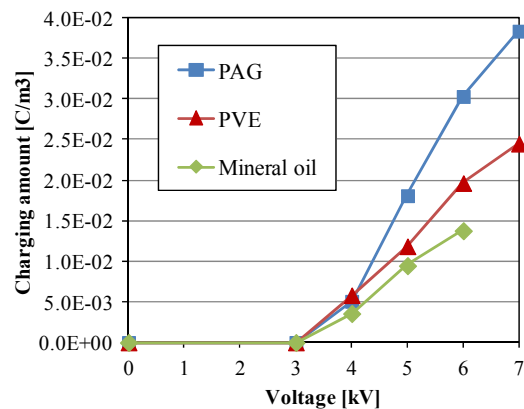


Fig. 9 Charging amount of refrigeration oil

て大きな電流が流れるが、空気中では 7kV で放電が開始する．一方、冷媒中では印加電圧を 10kV としても放電が開始せず、電気絶縁性の高い冷媒雰囲気ではコロナ放電が発生しづらいことがわかる．他の冷媒(CO₂, R134a)でも同様にコロナ放電を確認することはできなかった．そこで、電極間距離を 15mm から 7mm に変え、同様の試験を行った．R410A に対して、冷媒圧力をパラメータとした場合の電圧と電流の関係を図 11 に示す．この図より、冷媒雰囲気下であっても電極間距離が短い場合にはコロナ放電が発生するが、圧力が高くなるにつれて放電が起きにくくなることが分かる．それぞれの圧力において放電が開始する電圧を放電開始電圧とし、図 12 に、R410A, CO₂, R134a の放電開始電圧を圧

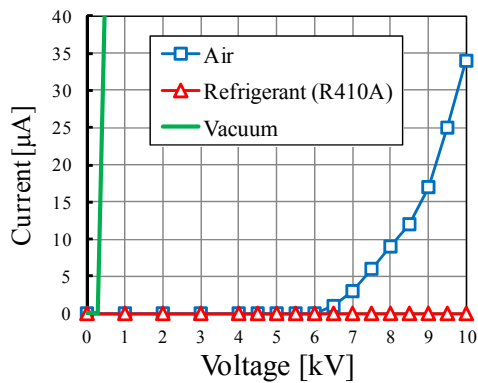


Fig. 10 Voltage-Current characteristic (Electrode distance: 15mm)

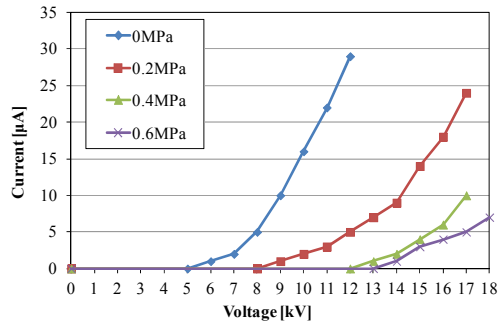


Fig. 11 Voltage-Current characteristic (R410A)

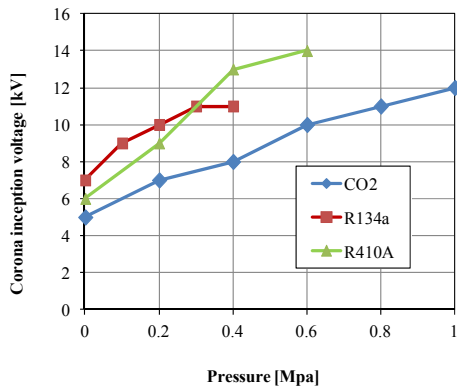


Fig. 12 Inception voltage of Corona discharge

力に対して示す．どの冷媒も圧力が増加すると放電開始電圧は大きくなる．本実験ではガラス管の耐圧のために圧力を 1MPa 以上とすることができなかったが、今後はそれぞれの冷媒の運転範囲における放電特性を確認する必要がある．

(3) 油／冷媒混合物の帯電・分離特性

①誘導帯電の場合 図 13 にノズル部を正極に接続し、油滴がノズルから分離する際に誘導帯電により初期帯電させた場合の PVE/R410A の油滴挙動を示す．電極間距離は 15mm であり、図 10 に示されるように R410A 雰囲気下では印加電圧が 10kV となってもコロナ放電は発生しないが、図 13 では印加電圧が非常に低い場合でも油滴にクーロン力を作用させて油滴を分離できることがわかる．このように冷媒雰囲気下では誘導帯電による帯電は非常に有用であるが、実際の圧縮機内において誘導帯電により油ミストを帯電させるには何らかの工夫が必要となる．

図 14 は、冷媒の圧力、すなわち冷媒の溶解度を変えた場合の R410A/PVE 混合物の油滴の軌跡を、電圧をパラメータとして示している．R410A/PVE 混合物の場合には、圧力を上げて溶解度を増加させると、より大きなクーロン力が作用する．これは冷媒の溶解により誘電率が大きくなったことと、冷媒の溶解に

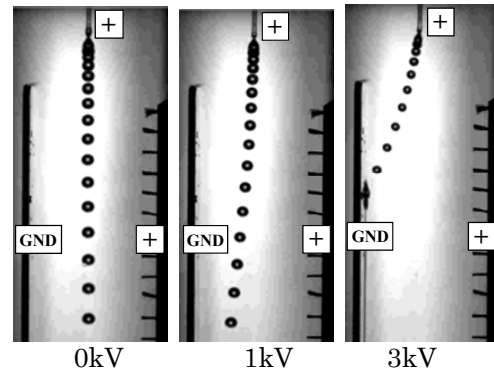


Fig. 13 Droplet behavior by induction charge (PVE/R410A)

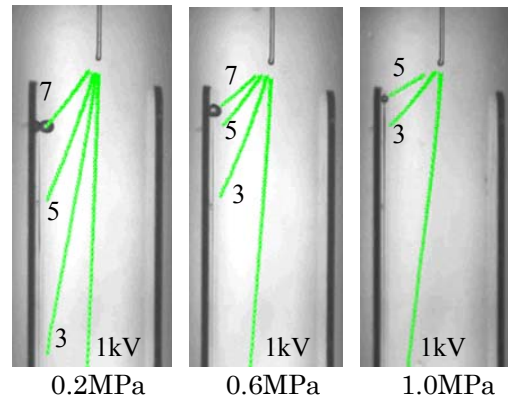


Fig. 14 Influence of pressure on droplet behavior (PVE/R410A)

より表面張力が小さくなってより小さな液滴でノズルから分離するためである。一方、図には示さないが、PAG/CO₂やPAG/R134aの場合には、圧力が増加してもその分離特性には顕著な差が見られなかった。

②コロナ放電の場合 コロナ放電による油滴挙動を検討する場合には、ノズル部にシールドを設け、初期帯電の影響を受けないようにした。電極間距離は7mmである。

図15はPAG/CO₂混合物のコロナ放電による分離挙動を示している。図よりコロナ放電が発生する電圧(5kV)を超えると、コロナ放電により油滴が帯電してクーロン力により分離できることが分かる。一方、図16は圧力を1MPaまで上げた場合の油滴挙動であるが、この場合の放電開始電圧は12kV(図12参照)であるのに対し、図16では5kVの時でも油滴にクーロン力が作用している。これは、PAG/CO₂混合物内で分極が起こることにより、左右に油滴が引っ張られ、大きく変形して電極に接触して帯電するためであると考えられる。この分極による油滴の変形はPAG/R134a混合物の場合に特に顕著であり、PVE/R410A混合物の場合にはほとんど見られなかった。分極による油滴の変形挙動に関しては、圧縮機内で発生する微小な油ミストでは現象が異なると考えられ、更に検討が必要である。

(4)微小油ミストの分離

図5に示すモデル圧縮機の吐き出し口から油ミストを大気中に吐き出し、その粒子径を計測したところ、粒子径が数 μm の微小な油ミ

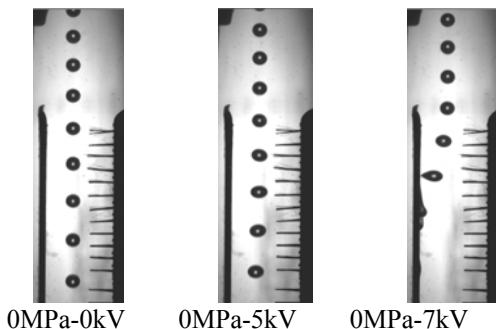


Fig. 15 Droplet behavior (PAG/CO₂)

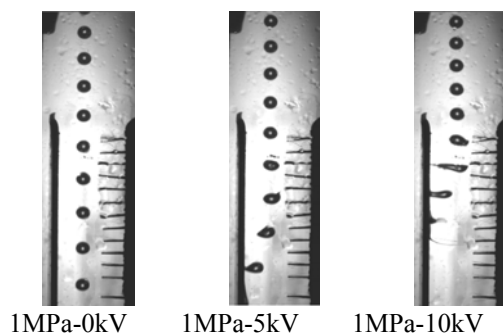


Fig. 16 Droplet behavior (1MPa, PAG/CO₂)

ストと100 μm 程度の比較的大きな油滴の分布が得られた。今後、圧縮機内での油分離に対しては数 μm 程度の微小油ミストの分離について詳細に検討する必要がある。

モデル圧縮機で発生させたCO₂雰囲気下(0MPa)でのPAG微小油ミストの挙動を図17に示す。図は電圧が6kVの時のミスト挙動をPIVにより測定した例である。コロナ放電が開始すると油ミストにクーロン力が作用し、捕集電極に向かって動く様子が観察された。このことはクーロン力を利用した高性能油分離器の実現可能性を示しているが、より詳細なミスト挙動や実際の運転圧力下における帯電・分離特性、実際の冷凍サイクルにおける適用方法等は今後の課題である。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計2件)

1. E. Nakaya, M. Fukuta, Y. Ogi, Fundamental study on separation of oil droplet by coulomb force, 2012年度日本冷凍空調学会年次大会講論集, 2012年9月12日, 北海道.

2. 遠藤健, 福田充宏, 小木康博, ロータリ圧縮機シェル内における油滴挙動に関する研究, 2011年度日本冷凍空調学会年次大会講論集, 2011年9月16日, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 充宏 (FUKUTA MITSUHIRO)
静岡大学・工学部・教授
研究者番号: 70199222

(2) 研究分担者

柳沢 正 (YANAGISAWA TADASHI)
静岡大学・工学部・教授
研究者番号: 60126787

※大学の理事就任のため、2009年度のみ研究に従事

(3) 連携研究者

なし

Brush electrode (+) Plate electrode (GND)

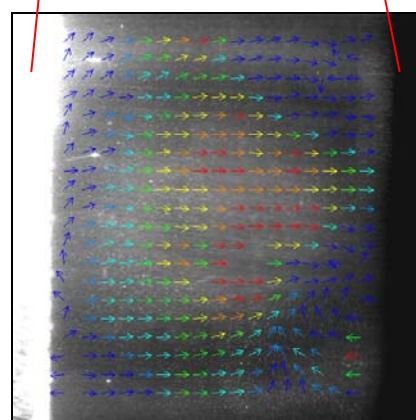


Fig. 17 Oil mist separation at 6kV