

論 文

2 値化相関法によるシリコーン油の流動測定

築 地 孝 昭*, 大 山 龍一郎**, 金 古 喜代治**

(1993年1月19日受理)

Measurement of Electrically Operated Flow Fields in Silicon Oil by Correlation Technique Concerning Binary Tracer Images

Takaaki TSUKIJI,* Ryu-ichiro OHYAMA** and Kiyoji KANEKO**

(Received January 19, 1993)

This paper presents a technique of digital image processing for measuring velocity distribution of electrically operated flow fields by means of correlation technique concerning binary tracer images. Since the measurement technique of flow velocity is based on a particle tracing method, the flow velocity is calculated from the average moving distance and direction of the tracer particles through the numerical analysis of visualized images of fluid flow fields. In addition, we apply the technique to measure and analyze the electrically operated flow fields in silicon oil under non-uniform electric fields generated by dc high voltage. Experimental results show that the fluid flow near the high voltage electrode accelerates with the applied voltage due to the increased electrostatic force. The fluid flow also shows the effect that the flow velocity near the high voltage electrode biased with negative voltage is larger than that biased with positive one. Moreover, the correlation technique has the great advantage that it enables us to continuously measure the velocity distribution of unsteady flow fields.

1. まえがき

絶縁油は、外部から直流の高電界が加わるとマクロな流れを形成する^{1,2)}。この電気流体力学的な現象は、絶縁油内を移動するイオンに伴って、中性の油分子がイオンとともに移動して電気的な流動を誘起するものと考えられている³⁻⁶⁾。一般に、このような流動現象は、イオンドラッグ圧力として知られている。これまでに絶縁油の流動現象については、多くの研究成果が報告されており、しばしば電気対流を引き起こすことが認められている⁷⁻¹⁴⁾。また、絶縁油の導電率やイオンの移動度については、流体力学的な効果に付随して、それらの測定値が変化する。このことは、油自身がイオンに伴われて流動

しているために、油内において真のイオン移動度の測定を困難にさせている¹⁵⁾。したがって、絶縁油の電気伝導特性を評価する場合には、流体運動の影響を考慮して検討することが必要である。

従来より、この流れ場における速度測定にはシュリーレン法やレーザドップラー法などの光学的な手法が用いられてきた^{12,16,17)}。シュリーレン法は、流体の密度変化を利用して流れ場の様子を知ることができるが、その流れの速度を求めることが極めて困難である。また、レーザードップラー法は流れ場にレーザ光を散乱させるための粒子を混入して、その散乱光のドップラーシフトから粒子の移動速度を求める。この手法の利点は、流れの局所的な速度が非接触で測定することができる点にある。しかし、流れ場全体の瞬間的な速度分布の測定や非定常な流れを測定しようとする場合には適用が難しい。

著者らは、直流の高電界下で絶縁油に誘起する流動を対象にして、2 値化相関法¹⁸⁾を応用した速度計測手法について検討を行ってきた¹⁹⁻²¹⁾。2 値化相関法は最近になって提案された手法であり、流れ場にランダムに存在する粒子の分布パターンから、相関法を利用した画像計測により流れの速度分布を求めることができる。すなわ

キーワード：2 値化相関法、画像処理、流動測定、シリコーン油、速度ベクトル分布

* 九州東海大学電気工学科 (862 熊本市渡鹿 9-1-1)
Department of Electrical Engineering, Kyushu
Tokai University, 9-1-1 Toroku, Kumamoto, 862
Japan

** 東海大学電気工学科 (259-12 平塚市北金目 1117)
Department of Electrical Engineering, Tokai
University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka, 259-12
Japan

ち、2値化相関法は粒子の移動方向が不明であっても時系列画像間で容易に観測粒子の移動速度を求めることが出来る。2値化相関法による速度測定の検証等については、植村ら¹⁸⁾によって詳細な検討が行われ、流れ場測定の分野で2値化相関法は実用化されつつある。本手法は、絶縁油に誘起した流れ場を対象にして、時間的に連続な2つのビデオ画像から2値化相関法に基づく画像計測アルゴリズムにより粒子追跡を行い、流れの2次元速度ベクトル分布を求めるものである。

本論文は、半球棒-平板電極間に直流電圧を印加したときに生じるシリコーン油の流れを対象にして、2値化相関法により流れの速度分布を測定するための適用例と測定結果について述べている。また、シリコーン油中に浸した針-平板電極系において、平板電極の表面をアクリル板で被覆した場合に生じるシリコーン油の非定常な流体運動を対象に、その速度分布を測定した結果について報告する。

2. 速度測定法

本研究では、2値化相関法¹⁸⁾に基づく画像計測アルゴリズムにより画像処理を実行して流れの速度分布を測定している。この画像計測法は、トレーサ粒子を懸濁した流れ場の可視化画像から、単位時間当たりにおける粒子群の移動方向と移動距離を測定することにより、流れの速度ベクトルを求める手法である。以下に、本手法の概略について述べる。

本手法で用いる原画像は、ビデオカメラにより撮影した流れ場の連続画像である。この流れ場の可視化画像については、図1に示すような手順で画像処理を行っている。まず、流れの可視化画像をA/D変換し、そのディジタル画像の中から微小な時間 τ [s]の間隔をあけて2枚のフレームあるいはフィールド画面を画像メモリに入力する。ここで、第1画面および第2画面を各々#1および#2と記すことにする。次に、#1と#2の両画面を適当なしきい値を設定して2値化処理する。すなわち、画面の明画素をトレーサ粒子として認識することにより、#1および#2内で空間的に不規則に存在する粒子の抽出を行う。そして、#1において速度ベクトルを求めようとする参照粒子を任意に決定し、その参照粒子の重心座標を中心にして#1と#2の両画面を各々 $[m \times m]$ 画素と $[n \times n]$ 画素の小領域に分割する。ここで、 $m < n$ の関係を満たす。また、#1の小領域を#2の小領域上で2次元的に1画素ずつ移動しながら重ね合わせて粒子分布の相互相関係数を計算し、2画面間で対応する粒子を決定する。この場合、2次元の2値化画像に関する相互相関係数Cは次式で表される²²⁾。

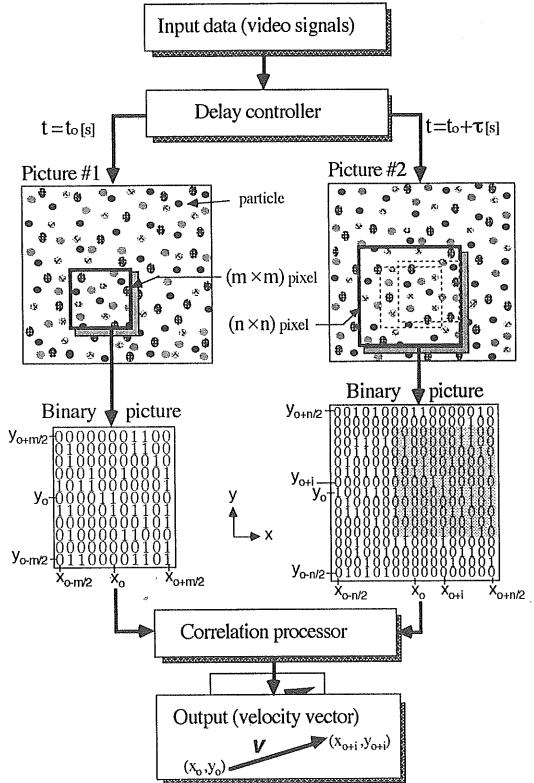


図1 相関法を用いた画像処理

Fig. 1 Explanatory illustration for image processing of binary correlation technique.

$$C = L / (p \times q)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 p と q は各々#1と#2における小領域の明画素数であり、 L は両者の重なり面積である。この相互相関係数 C については、その値が大きいほど2画面間での粒子分布の類似度が高いことを表している。そして、相互相関係数 C の最大値を用いれば、2画面間で対応する粒子が決定されるので、参照粒子の追跡を行うことができる。さらに、流れの速度ベクトルは、時間 τ [s]当たりの粒子分布の移動量と、その移動方向から求められる。すなわち、図1において#1内の参照粒子の重心位置が座標 (x_0, y_0) [画素]であり、時間 τ [s]後の移動位置が (x_{0+i}, y_{0+i}) [画素]であるとすれば、2次元の速度ベクトル V [m/s]は次式により求められる。

$$V = \alpha \{ [(x_{0+i} - x_0) / \tau] i + [(y_{0+i} - y_0) / \tau] j \} \quad (2)$$

ここで、 α [m/画素]は、ディジタル画像データに関する比例定数であり、 i と j は各々 x 軸方向と y 軸方向の単位ベクトルである。本手法により得られる速度は、時間間隔 τ における平均速度を表している。

図2は本研究で用いた画像計測システムの概略を示し

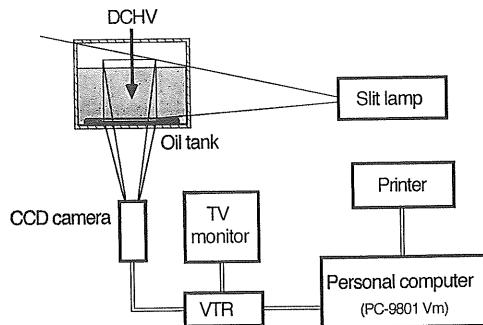


図 2 画像計測システム

Fig. 2 Measurement system by image processing of binary correlation technique.

ている。システムのハードウェアは CCD カメラ、VTR、TV モニタ、8 bit の画像入出力ボードと画像メモリー (512×256 画素 $\times 256$ 階調 $\times 2$ 画面) を実装したパーソナルコンピュータ (NEC PC-9801 Vm) およびプリンタにより構成されている。直流高電圧の印加により誘起する油槽内の流れは、まずスリット光によりその流れ場の観測面を可視化する。次に、スリット光の光軸に対して垂直な方向に配置された CCD カメラにより、流れの可視化画像を撮影して VTR に録画する。そして、VTR に記録された流れの可視化画像は画像メモリに入力される。その画像データは、前述した 2 値化相関法に基づく画像計測アルゴリズムにより処理されて、流れの速度ベクトルが求められる。この画像計測を実現するソフトウェアは、アセンブラー (MASM Ver. 5.1) と C 言語 (Microsoft-C Ver. 5.1) を用いて開発した。

3. 2 値化相関法による速度測定例

3.1 半球棒-平板電極系に誘起した流れ場の測定

図 3 は本実験に用いた電極系の概略を示す。実験は透明なアクリル製の試験容器 (容積 9.6 l) 内において、真ちゅう製の半球棒-平板電極系を絶縁油中に浸して行った。実験に用いた絶縁油は動粘度が 50 cSt で、比重が 0.95 g/cm^3 、誘電率 2.52、体積抵抗率 $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ のシリコーン油である。このシリコーン油は、真空中で脱気したものを試験容器内に注入し、その後大気中で 24 時間放置したものである。上部電極は直径が 5 mm の半球棒電極であり、下部電極には直径 200 mm の平板電極を使用した。電極間のギャップ長 d_1 は 20 mm であり、平板電極から大気/シリコーン油の界面までの距離 d_2 は 50 mm とした。

すでに述べたように、画像相関を利用した速度計測法では、流れ場にランダムに存在する粒子の分布パターンを用いる。そこで、シリコーン油の流れはトレーサ粒子

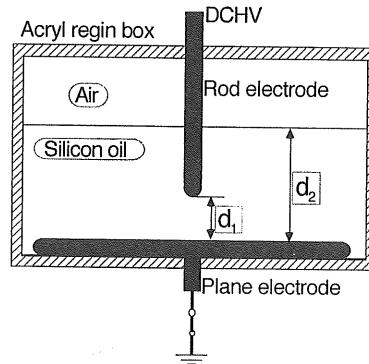


図 3 棒-平板電極系を用いた実験装置

Fig. 3 Schematic drawing of rod-plane electrode system.

を用いた懸濁法により可視化した¹⁹⁾。一般に、高電界下で油内の粒子に作用する主な電気力には、液体とトレーサ粒子間の誘電率の差によって生じる誘電泳動力、および粒子が帶電することにより生じる電気泳動力などが考えられる。これらの電気力が粒子に与えるじょうらん効果を考慮すると、トレーサ粒子の選択は重要な問題である。したがって、本実験ではトレーサ粒子に働く誘電泳動力等を低減するために、粒子の誘電率および体積抵抗率がシリコーン油のそれらに比較的近い値をもつ低密度ポリエチレン粒子 (平均粒径 0.5 mm、比重 0.92 g/cm^3 、誘電率 2.3、体積抵抗率 $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$) を用いた。低密度ポリエチレンの粒子はシリコーン油中に重量比にして 0.05% 添加した。本実験においては、トレーサ粒子がシリコーン油の流動を厳密に捉えているわけではないが、シリコーン油と同程度の比重をもったトレーサ粒子を選定することによって、ほぼシリコーン油の流れと同等な流れを実現するようにしている。また、実験では電極系の軸を含む鉛直平面上において、キセノンランプからの幅 3.5 mm のスリット光によりシリコーン油の流れを可視化した。本実験において NTSC 方式の画像信号による粒子位置の不確かさが 0.5 画素であることを考慮すると、本手法による測定の不確かさは数%程度であろうと考えられる。また、測定流速の上限は 10 cm/s 程度である。

図 4 は +10 kV の直流電圧を半球棒電極に印加したときに生じたシリコーン油の流れについて、2 値化相関法を用いた画像計測システムにより流れの速度ベクトルを測定した例である。シリコーン油の流れは、電圧を印加してから数秒経過した後に定常な流れを形成した。同図は、その定常流の速度ベクトル分布を示している。画像相関の処理に用いた #1 と #2 において、その 2 画面間の

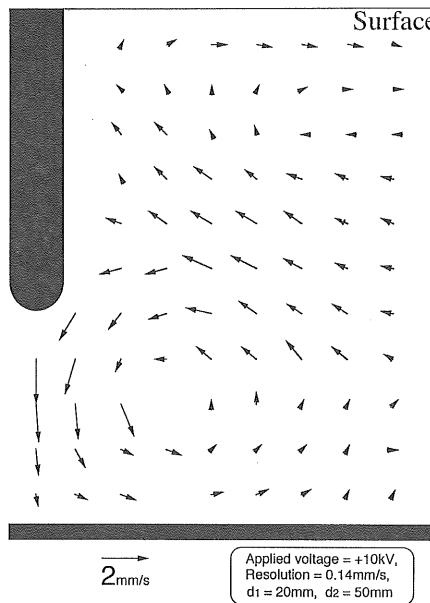


図4 流れの速度ベクトル分布 (印加電圧 +10 kV)

Fig. 4 Flow velocity vectors in case of applied voltage +10 kV.

時間差 τ は 1.00 s であり、1 画素が 0.14 mm に相当するので、測定速度の分解能は 0.14 mm/s である。シリコーン油の主な流れは、棒電極の先端から平板電極に向かって形成される流れと、棒電極に沿って液面まで上昇する流れが同時に観測された。前者は、棒電極の先端付近で速度が増加しており、流れにうずを形成していることが認められる。このうず流れの形成については、平板電極がシリコーン油の流れを妨げるために生じたものと考えられる。また、この実験結果は花岡らの実験結果¹⁷⁾と定性的によく一致している。電極周辺の流れについては、棒電極の先端から電極間の中間付近まで加速されている様子がわかる。

図5は -10 kV の直流電圧を半球棒電極に印加したときの流れの速度ベクトル分布を示す。相関処理に用いた #1 と #2 の 2 画面間の時間差 τ は 0.33 s であった。シリコーン油の流れは、主に棒電極の先端から平板電極に向かって形成されている。同図は図4 の実験結果と比較すれば、棒電極周辺の流れの速度が高まっていることがわかる。すなわち、流れ場の流速値は正極性の電圧を印加した場合よりも、負極性の電圧を加えた方が高くなることがわかる。さらに、棒電極に正極性電圧および負極性電圧を印加したときの双方とも、電極軸上におけるシリコーン油の流れは棒電極の先端から平板電極に向かって形成されている。この実験結果は、Disselnkötterら¹⁸⁾が観測した不平等電界下における絶縁油の流動パターン

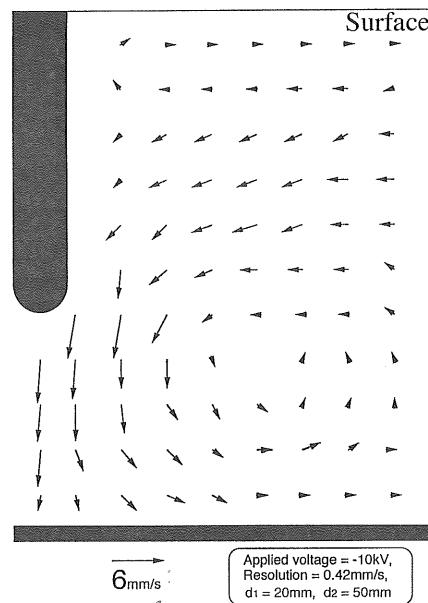


図5 流れの速度ベクトル分布 (印加電圧 -10 kV)

Fig. 5 Flow velocity vectors in case of applied voltage -10 kV.

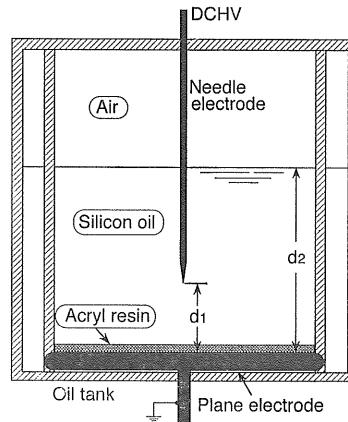


図6 針-平板電極系を用いた実験装置

Fig. 6 Schematic drawing of needle-plane electrode system.

と符合している。一般に、流動の発生原因については、イオンの移動に伴う圧力の発生やマクスウェル応力による電気力などが考えられるが、本実験において得られた流れ場の流動機構を判定するためには、今後更に電気的な諸量の測定などを含めた実験を実施して検討する必要があるものと考える。

3.2 針-平板電極系に誘起した非定常流の測定

図6は実験に使用した電極系の概略を示す。油槽には透明なアクリル製の容器を使用した。すなわち、油槽は

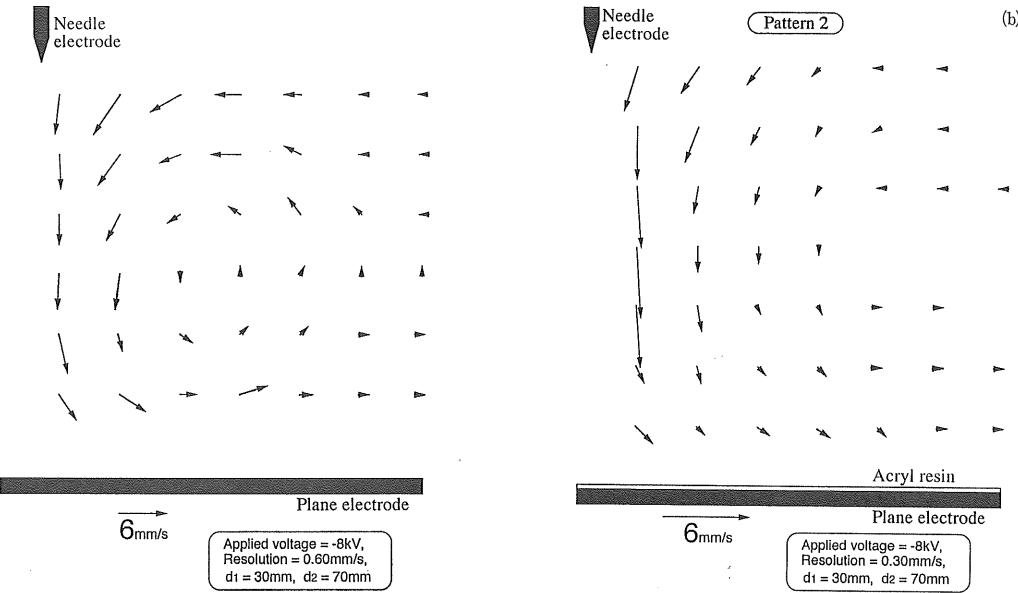


図7 流れの速度ベクトル分布（アクリル被覆なし）

Fig. 7 Flow velocity vectors. Plane electrode is not coated with acryl resin.

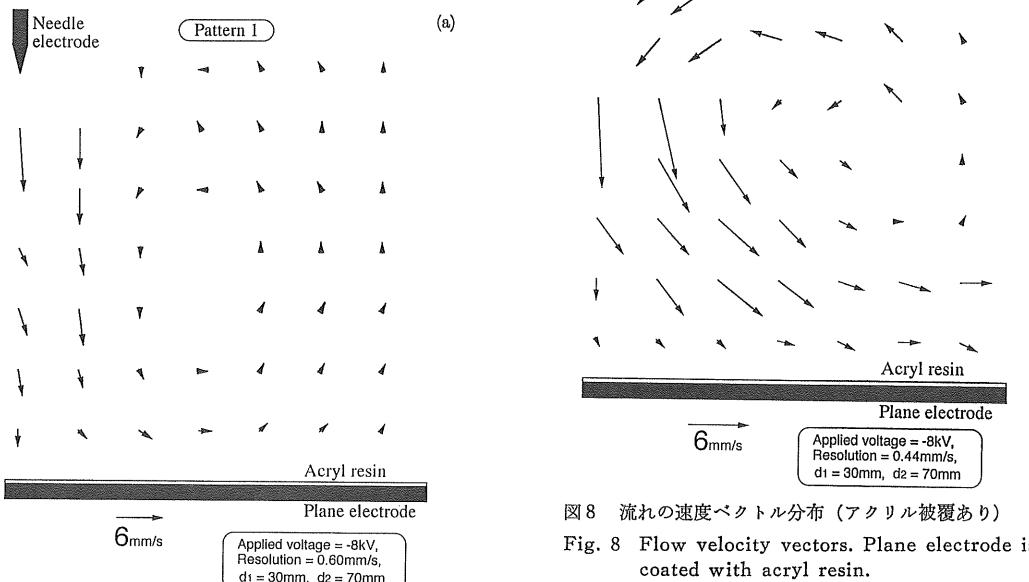


図8 流れの速度ベクトル分布（アクリル被覆あり）

Fig. 8 Flow velocity vectors. Plane electrode is coated with acryl resin.

長方形容器（容積 1.6 l）の内部に内径が 94 mm の円筒容器を配置した二重構造のものである。油槽内に円筒容器を配置した理由は、四角部での流れの影響を除くためである。上部電極は直徑が 1 mm、先端角が 30° で先端曲率半径が 5 μm の鋼製針状電極であり、下部電極には直徑が 100 mm の真ちゅう製平板電極を用いた。電極間のギャップ長 d_1 は 30 mm であり、平板電極から大気/シリコーン油の界面までの距離 d_2 は 70 mm とし

た。直流高電圧は針状電極に印加して、平板電極は接地した。また、実験では平板電極の表面を厚さが 1 mm のアクリル板で被覆したものも用いており、シリコーン油の流動に及ぼすアクリル被覆の影響を調べた。シリコーン油の流れは、低密度ポリエチレン粒子を用いた懸濁法により可視化した。流れ場の測定は、幅 1 mm のレーザシート光を用いて電極系の軸を含む鉛直平面上で行った。本実験において対象となる流動は、3 次元的な流れ

場を形成するが、ここでは流れ場を2次元的に捉えた速度ベクトル分布について測定を試みた。

図7は針状電極に-8kVの直流電圧を印加したときに生じたシリコーン油の速度ベクトル分布である。シリコーン油の流れは、針状電極の先端から平板電極に向かって形成されており、うず流れを生じている。また、その流れは電圧を印加してから数秒後に定常流を形成した。この実験結果は、前述した半球棒-平板電極系において誘起した流れ場と同様な流動のパターンを示していることがわかる。

図8は平板電極の表面をアクリル板で被覆した場合の速度ベクトル分布である。この場合、シリコーン油の流れには時間の経過により流動のパターンとその流速値に複雑な変化を生じた。同図(a), (b)および(c)は各々異なる流動パターンの一例である。すなわち、同図(a)に示した流動パターン1は、図7の実験結果と比較すれば、ほぼ類似した速度分布を示している。これに対して、同図(b)と(c)のパターン2およびパターン3の流れは、うず流れの中心部が電極軸から外側の向きに移動している様子が観測された。さらに、パターン3では水平方向の速度成分に比較的大きな変化が生じており、速度分布に特徴のある流動になっている。すなわち、針状電極の先端で加速されたシリコーン油の流れは、その進展が電極間の中間付近で妨げられるように、水平方向の速度成分を増している。測定例に示したような流動パターンの変化は、時間の経過とともに繰り返し生じており、シリコーン油の流動は非定常な流れ場を形成している。アクリル板の挿入によって生じた流動パターンの変化は、アクリル/シリコーン油界面での帶電による効果が作用して現れたものと考えられる。しかし、シリコーン油に誘起した流動は複雑なモードを有するので、流れ場を解析するためには、今後さらに3次元流速ベクトル測定法の開発と伝導電流分布の測定を考慮した検討を進める必要があるものと考える。

4. まとめ

本論文では、2値化相関法に基づく速度計測の技術を応用して、直流高電界下でシリコーン油に誘起した流動の速度ベクトル分布測定法とその測定結果について述べた。すなわち、半球棒-平板電極間に生じたシリコーン油の流れは、直流の高電界下で棒電極の先端から平板電極に向かって形成され、油中にうず流を伴った流動を形成することが認められた。このうず流は、シリコーン油の流れを平板電極が妨げるために発生したものと考えられる。また、シリコーン油の流速は印加電圧の極性に依存し、棒電極に負極性電圧を印加した方が流動は速まる

ことがわかった。さらに、棒電極に正極性電圧を印加した場合に、棒電極に沿ってシリコーン油が液面まで上昇するような流れを観測した。また、針-平板電極間に誘起したシリコーン油の流れは、電極間にアクリル板を挿入することによって、非定常な流れの速度分布を示すことがわかった。

本手法は、光学的な観測を行っているので、レーザドップラ法と同様に流れの速度分布を非接触に測定することができる。さらに、3次元的な流れを測定しようとする場合には、解析に要する情報量が不足しているなどの欠点があるので、他の速度測定法との併用が必要である。本手法は小型コンピュータを用いた比較的簡単な画像解析アルゴリズムであるとともに、非定常な流れ場における速度ベクトルの分布を測定することができる点に利点を有している。

参考文献

- 1) 静電気学会(編)：静電気ハンドブック，p. 305，オーム社(1981)
- 2) 電気学会：電気学会技術報告(II部)，No. 56，電気学会(1977)
- 3) P. Atten and R. Moreau : C.R. Acad. Sc. Ser. A, 269 (1969) 469
- 4) P. Atten and R. Moreau : C.R. Acad. Sc. Ser. A, 270 (1970) 415
- 5) W.H. Midendorf and G.H. Brown : AIEE Power App., 77 (1958) 795
- 6) O.M. Steutzer : J. Appl. Phys., 31 (1960) 136
- 7) D.R. Brown : Nature, 202 (1964) 868
- 8) N. Felici and J.C. Lacroix : J. Electrostat., 5 (1978) 135
- 9) J.M.H. Peters, J.L. Sproston and G. Walker : J. Electrostat., 9 (1980) 1
- 10) A.M. Mackey and J.C. Gibbings : J. Electrostat., 10 (1981) 257
- 11) J.C. Gibbings and A.M. Mackey : J. Electrostat., 11 (1981) 119
- 12) A. Rich, J.L. Sproston and G. Walker : J. Electrostat., 12 (1982) 503
- 13) R. Disselnkötter and K. Bärner : J. Electrostat., 22 (1989) 43
- 14) 渡辺 彰：静電気学会誌, 10 (1986) 392
- 15) 落合鎮康, 水谷照吉, 伊藤正一, 家田正之：電気学会論文誌A, 99 (1979) 329
- 16) 佐藤 孝, 坂本三郎：電気学会論文誌A, 93 (1973) 63
- 17) 花岡良一, 高嶋 武, 石橋謙造：電気学会研究会資料ED-87-136 (1987)
- 18) 植村知正, 山本富士夫, 幸川光雄：可視化情報, 10, No. 38 (1990) 196
- 19) 大山龍一郎, 築地孝昭, 金古喜代治：平成4年電気学会全国大会講演論文集, p. 293 (1992)
- 20) 大山龍一郎, 築地孝昭, 金古喜代治：可視化情報, 12, Suppl., No. 1 (1992) 39
- 21) 築地孝昭, 大山龍一郎, 金古喜代治：電気学会論文誌A, 112 (1992) 810
- 22) 植村知正, 水越 渉, 露崎 展, 辻本良信：流れの可視化, 9, Suppl. (1989) 35