速度変化を伴う油の流れに生じる流動帯電現象の測定

高橋 智^{*,1}, 祝 守新^{*,**}, 鷲尾誠一^{*}, 田里友希^{*} (2007年10月15日受付, 2008年2月1日受理)

Experimental Study of Electrification in Oil Flow through Metal Channels with Its Velocity Changing with Time

Satoshi TAKAHASHI*,1, Shouxin ZHU*,***, Seiichi WASHIO* and Yuki TAZATO*

(Received October 15, 2007, Accepted February 1, 2008)

The present paper deals with a basic study of electrification phenomena between a mineral oil and a metal channel when the oil flows through with a periodical and transient change. When the oil being kept still in a reservoir was suddenly let flow, the current taken out from the metal rose to a peak value at the beginning of flow, then exponentially decreased until it leveled off with time, approaching a constant value. The smaller the time derivative of the flow rate was, the smaller the peak value of the current became. When the flow pulsated, the generated current varied periodically with the same frequency as the flow pulsation and had a phase lag against the flow. Although this phase lag increased with the frequency, the time lag obtained by dividing the phase lag by the frequency turned out to be almost constant.

1. はじめに

流動帯電は、固体と液体の相対運動によって両者が逆極性 に帯電する現象であり、固液界面の電気的中和が破られて電 荷が分離して帯電し、その後電荷が再分配され一部は緩和す るプロセスとして理解される⁽¹⁾.特に油などの絶縁性流体で は発生した電荷が内部に蓄積しやすいため、電位が上昇して 絶縁破壊による放電を引き起こし、事故の原因ともなること が報告されている⁽²⁾.流動帯電による事故を防止するために は、電荷の発生を防ぐとともに、電荷を速やかに取り除くこ とが重要である.

導体である金属製流路は,適切にグランドに接地し,十分 な緩和時間を設けることによって,電荷の蓄積を防ぐことが できる.しかし実際に,フィルタやオリフィス部などの金属

(700-8530 岡山市津島中 3-1-1) The Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3-1-1 Tsushima-naka, Okayama, 700-8530, Japan.

** 大連工業大学機械学院 (116034 遼寧省大連市甘井子区軽 工苑1号)

¹ tsatoshi@mech.okayama-u.ac.jp

製機器においても流動帯電の発生が問題となることが報告 されている⁽³⁾ことから考えると,固液の組み合わせや流速だ けでなく,流れの構造が流動帯電に大きく影響しているので はないかと推測される.我々は種々の形状の金属製流路に発 生した電荷を測定してきた結果,流速の急激な変化によって 多くの電流が発生することがわかった⁽⁴⁾.これは,界面の電 気的バランスが流速の変化によって崩れ,新たな均衡を保つ には時間を要するためだと考えられる.流体機械では,起動 停止やポンプの脈動などにより,流れの状態は常に変化して いると考えられる.したがって,実機における帯電現象を調 べる上では,流速の変化による帯電量の変化の影響を詳しく 調べておくことが重要となってくる.

本研究は流速の変化によって生じる帯電量を測定し,流速 変化が帯電量に与える影響を明らかにすることを目的とし ており,実験によって確かめた結果について報告する.

2. 流速が過渡的に変化するときの流動帯電

2.1 実験装置・実験方法

実験に使用した装置の概要を図1に示す. グランドに接地し たステンレス製の上部タンクA(内径210mm,高さ600mm) に試料液体を入れて電荷を十分除去するとともに,内部に取 りつけた銅パイプに恒温装置からの水を循環させて温度を

キーワード:流動帯電,速度変化,金属製流路,脈動,緩和 *岡山大学大学院自然科学研究科

Dailian Polytechnic University, #1 Qinggongyuan Dalian Liaoning, 116034, China



図1 流動帯電実験装置

Fig.1 Experimental apparatus for flow electrification measurement.



図 2 過渡的な流速変化によって発生した電流の測定結果 Fig.2 Typical data obtained by test rig using mesh in an abrupt go-and-stop flow.

調整する.実験は,弁aを開閉し,十分除電した液体を圧縮 空気で押し出して測定部(内径 50mm)を通過させ,下部タン クB (内径 260mm,高さ450mm)に蓄える.測定部には,ス



図3 速度変化に伴う発生電流の変化

Fig.3 Profiles of generated current for gradual increase of oil velocity through mesh.

テンレス製(SUS304)の網(針金径 0.11mm, 針金間距離 0.46m m, 開口率 0.49)を流れに直交するように, アクリル樹脂(体積 抵抗率 5×10¹⁴Ωm)によって絶縁保持する. 網を測定部入口 の最も上流側に取り付けることによって、測定部に流入する 油とアクリル樹脂との接触面積が小さくなるようにしてお り、油とアクリル壁面の接触は測定結果にあまり影響しない ことを予め確認している.発生した電荷が10MΩの抵抗を流 れることによって生じる電圧変化を, OP アンプ(LF356, 入 カインピーダンス10¹²Ω)の非反転増幅回路を用いて約100倍 に増幅し、1msごとに AD 変換器を用いて測定した結果から 電流の時間変化を求める.電流の測定分解能は約3pA,増幅 回路のカットオフ周波数は1.5kHz である.同時に、下部タン クに設置した超音波液面センサ(位置分解能 0.172mm),また はレーザ変位計(繰り返し精度2µm)で油面変位を検出し,流 量を求める.実験には油圧管路で使用した鉱物油(VG46マシ ン油)を用いており、体積抵抗率 ρ_v は 25℃で約 1.2×10¹⁰ Ωm であった.

2.2 測定結果

弁を短時間で開け流速を過渡的に変化させたときの測定 結果の一例を図2に示す.上図は油面変化から求めた開口部 を通過する油の平均流速を、下図は測定した電流値の変化を、 それぞれ流れ始めからの時間に対して描いている.流れはじ めに大きな負の電流が発生し、約5秒後に流速に比例した定 常状態の値へと落ち着いている.測定電流が負であることか



図4 平均加速度と最大電流との関係

Fig.4 Correlation between the peak value of current and acceleration of oil flow.



図 5 脈動時の流速分布の変化 Fig.5 Velocity distribution in pulsating flow.

ら、ステンレス網が負に、油が正に帯電していることがわかる.

次に、図1の弁aの開閉速度を操作し、流速を変えながら 測定した結果が図3である. どの測定においても、定常状態 における流速がほぼ同じになるように設定している. 流速が 一定となるまでの変化はほぼ直線的であることから、弁aを 全開するまでの速度変化から平均加速度aを求めた. 図より 平均加速度aが大きいほど、発生電流の最大値 I_p の絶対値 は大きく、その後は流速に比例した定常状態に落ち着いてい る.

図 4 は、電流の最大値 I_p を平均加速度 a に対して描いた もので、これを見るとa の増加とともに I_p がほぼ直線的に 増加している. a = 0m/s²における I_p の値が図 2 の 5 秒後の 値とほぼ同じであり、速度変化が小さいときの発生電流は定 常状態とほぼ同じであるとみなせることがわかる.

3. 流速が周期的に変化するときの流動帯電

3.1 界面の速度勾配と発生電流の関係

図4の速度変化を伴う流れに生じる発生電流は、流速に比 例した定常成分に加え、流速が変化することによって生じる 非定常成分が加わったものと考えることができる.流動帯電 が界面で発生する現象であることを考えると、界面での速度 勾配の大きさと変化速度が、流動帯電に大きく影響すると予 想される.

管路内の流速の半径方向分布は、流速が一定の場合は放物 分布になる.しかし流速が周期的に変化する場合は、周波数 によって管路半径方向に位相差が生じることが知られてい る⁽⁵⁾.後に示す図 7 の平均流速の定常流成分と変動流成分の 値を文献(5)の式に代入して計算した管路半径方向の流速分 布は、図 5 のようになる.図(a)は脈動周波数 f が 50Hz の、 図(b)は500Hzの速度分布の結果である.横軸は管路半径 r_0 で 無次元化した半径方向距離,縦軸は流速一定の定常流れにお ける管軸中心流速 u_0 で無次元化した値であり、脈動の各位 相における流速分布を実線で示している.図(a)では、どの位 相においても流速分布の形状は放物線で相似であり、位相遅 れはほとんど見られない.しかし図(b)では、先に壁面近傍の 流速が増加し、中心部分が遅れて変化している.このことか ら、脈動周波数が増加すると、壁面近傍の速度勾配の変化は 流量変化に比べて位相が進み、発生電流の位相も進むことが 予想される.

そこで流量変動と発生電流の位相差に着目して,実験結果 を考察する.

3.2 実験装置·実験方法

実験は、図 6(a)の油圧管路を用いて測定する. ポンプから吐き出された油は、油圧モータによって駆動される回転式正弦 波流れ発生器⁽⁶⁾を通り、内径 16mm の主管路と測定部を通っ た後油タンクに戻る.回転式正弦波流れ発生器を用いること によって、管路に 30~400Hz の間の任意の周波数の脈動流れ を作り出す.測定部には、前章と同じステンレス製網と、図 6(b)に示す直径 2mm の穴を同心円状に8個開けたステンレス 製板を用い、流れに直交するように絶縁保持し、油が開口部 を通過することによって生じる電流を測定する.流動帯電に 固液界面近傍の流れが大きく影響し、さらに図5に示すよう に脈動周波数によって速度勾配が変化することから、以下の 解析では流路内の速度分布が推測しやすいステンレス製板 の測定結果を中心に考察する.さらに流路内の流れ方向の速



(a) hydraulic circuit

(b) detail of test section

図6 脈動流れによる流動帯電測定用実験回路

Fig.6 Experimental setup to measure flow electrification in hydraulic line.



Fig.7 Currents detected from metal channels in pulsating flow.

度分布を一様にするために、 測定部と同じ形状に加工した幅 10mm のステンレス製の板を測定部の前後に重ね合わせて取 り付ける.測定部で発生した電流は、図1と同様に電気回路 を用いて電圧に変換し、AD 変換器を介してコンピュータに 取り込んでフーリエ変換し, 増幅回路の動特性を考慮して解 析を行う. 測定部から1200mm上流と, さらに1000mm上流 にそれぞれ半導体圧力変換器を取り付けており、測定部を通 る変動流量を,二点間の圧力差から慣性差圧式変動流量測定 法⁽⁷⁾を用いて求める.流量を流路断面積で割った流路断面平 均流速を u_a とし、そのうち定常流成分を \overline{u}_a 、振動流成分を Δu_a とする.油圧管路は全てグランドに接地しており、測 定部を通過する油の平均流量は測定部下流に置いたオリフ ィス流量計で、油温は測定部上流のサーミスタ温度計で測定 する.実験中の油温はオイルクーラによって一定温度に保つ.

3.3 測定結果

図7は、 \overline{u}_a を2.4m/s(測定穴内のレイノルズ数は42)、 Δu_a を1~1.5m/s程度に設定し,脈動周波数 f を(a)40Hz, (b)190Hz とした時の流速と電流の測定結果である. 上図が流路断面平



図8変動流成分と発生電流の関係

Fig.8 Changes of flow velocity and currents in pulsating flow.





Fig.9 Currents detected from metal channels in steady state flow and in pulsating flow.

均流速 u_a ,下図が測定電流Iであり、測定信号を周波数解析し、基本波成分の時間変化を実線で、基本波から第三高調波成分までを用いて再現した波形を破線で描いている。横軸は、時間を脈動周期Tで無次元化している。実線と破線の形状は良く合っており、波形がほぼ基本波成分のみから成っていることがわかる。図(a)に比べて図(b)の流速の変動流成分の

振幅が大きくなっているが、これは測定管路全体の周波数特 性によるものである.

図より,流速が正弦波的に変動すると,発生電流も同じよ うに変動している.油との組み合わせにおいてステンレスは 負に帯電し,発生電流はレイノルズ数が低い領域では流速に 比例することから,流速波形と電流波形は逆方向に増減し, 特に図(a)では明らかにその傾向が見られる.しかし図(b)を見 ると,流速と電流の間に大きな位相のずれが見られる.しか も流速変化に対して電流の変化は遅れており,先の予想と反 対の結果となっている.それぞれ位相差は,図(a)では7°程 度であるのに対し,図(b)では110°になっている.また図(b) は流速の変動流成分の振幅が大きいにもかかわらず,電流の 振幅はむしろ小さくなっている.

さらに図 8 は、流速と電流の基本波成分の変化の関係を実線で、両者の定常な関係を破線で示した図である。周波数が 40,60Hz では、 $\Delta u_a - \Delta I$ の関係はほぼ直線的で、両者は比例しているように見えるが、周波数が 140Hz では、両者の間の位相差が増加し、大きな楕円軌道を描くようになる。



図 10 脈動流れによって発生する電流の周波数特性 Fig.10 Frequency characteristics of currents to the flow rate.



図 11 流速変化に対する電流の遅れ時間

Fig.11 Delay time of current in pulsating flow.

流速変動が無い定常流れにおける平均流速と発生電流との関係は、図9の〇印のようになり、平均流速に比例して電流が負に増加している.これに対し、脈動周波数が40Hzの結果である実線は定常特性に沿って変化しているが、周波数が190Hzにまでなると、定常特性とは異なる結果となっている.

定常特性の流速と発生電流の比 I/u_a に対する,脈動時の 変動流成分と電流変化の比 $\Delta I/\Delta u_a$ を脈動周波数に対して 描けば図 10 のようになる. この値は,脈動周波数が 50Hz 前 後では 1 に近いが,脈動周波数が増加すると,その値は小さ くなっている. さらに流速変化に対する電流変化の位相遅れ を周波数で割り,遅れ時間として描けば図 11 のようになり, 測定を行った周波数範囲でほぼ一定値を示している.このこ とは、低脈動周波数域では流速と電流の変化が定常特性に沿 っていて、両者の間に遅れが無いとしても、周波数がある程 度以上(30Hz)になると、周波数に関係なく電流変化は流速変 化に対し一定時間遅れるようになることを意味する.

以上の結果は、流速変化時の発生電流が加速度に比例し、 さらに壁面近傍での速度勾配が周波数の増加に対して大き くなることからは説明できない.この原因として、発生した 電荷によって界面近傍の電荷密度の増加や、導体であるステ ンレス壁面との間で発生する電荷の緩和を考慮していない ことが挙げられる.このことから、脈動時における流動帯電 現象を解明するために、固液界面の電荷分布の変化を考慮し た解析が必要である.

4. まとめ

流速変化を伴う油の流れによってステンレス製流路に発 生する流動帯電を測定し,以下の結果を得た.

- (1) 流速が単調増加する場合には、流速変化が速いほど大きな過渡電流が発生し、その後一定値へと近づく.
- (2) 脈動流れにおいては、低脈動周波数域では速度の変化 とともに発生電流が変化する.しかし脈動周波数が増 加すると、発生電流は遅れて変化し、値も小さくなる.

最後に、今回実験装置の設計、製作においてご尽力いただ いた岡山大学工学部技術職員 田村義彦氏に深甚の謝意を記 す.

参考文献

- 安田正行,後藤清,大久保仁,月岡淑郎,宮本晃男:電 気学会論文誌 B, 105-3, (1985), 265-272.
- 2) 静電気学会編, 静電気ハンドブック, オーム社, p.130-149. (1998)
- A. Sasaki, T. Yamamoto: Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, 55-9, (1999), 14-21.
- 高橋智,祝守新,鷲尾誠一,藤原人司:日本機械学会論 文集(C編),73-727, (2007), 871-878.
- 5) 武藤高義,中根勝己:日本機械学会論文集(B編), 46-404, (1980), 610-618.
- 6) 鷲尾誠一,小西忠孝:日本機械学会論文集(第2部),43-376,(1977),4574-4584.
- 陳恵青, 鷲尾誠一, 高橋智:日本機械学会論文集(B 編), 72-720, (2006), 1920-1926.