

小論文

コロナ放電場の油相表面電位と油相電場中の水滴の運動

山口 学*, 柴田 晃 一**

(1995年8月17日受理)

Electrical Potential at an Oil Surface and Motion of Charged Water Drops in the Oil Phase in an Electric Field Generated by Corona Discharge

Manabu YAMAGUCHI* and Koichi SHIBATA**

(Received August 17, 1995)

As a fundamental study of a novel liquid-liquid contactor which utilizes corona discharge, electrical potential at an oil surface was measured using a digital voltmeter and was compared with the value calculated by electric force which a drop formed on a nozzle was pull apart from it. Both values showed satisfactorily good agreement. Charged water drops in the electric field moved upward in the oil phase against the gravity. Experimental velocities of rising drops were considerably lower than calculated ones using an empirical equation proposed previously. It might be estimated that lower velocities resulted from leakage of the charge on the drops into the oil phase.

1. はじめに

先に開発した静電場を利用した液液分散系接触装置の流動特性¹⁾および物質移動特性を調べ、装置に必要な特性を備えていることを明らかにした²⁾。残された課題として装置主要部の電場形成がコロナ放電によるものと考えられ油相表面電位が不明であったこと、それに関連して油相電場中の液滴の運動速度の実測およびその評価ができなかったことである。そこで本研究は課題の油相表面電位を実測すると共に、油相電場中の単一水滴の運動速度を調べ、本装置の設計指針の手掛かりを得ることを目的として行ったものである。

2. 実験装置および操作法

実験装置の概略を図1に示す。装置本体はアクリル樹脂円筒①、上部電極の銅棒電極②、下部電極のステンレス板④およびステンレスノズル⑤で構成されている。上部電極は高電圧電源① (Brandenburg, Alpha Series2

max. 60 kV) に接続され、下部電極はエレクトロメータ⑧ (Takeda Riken TR8651) を経て接地してある。ノズルは下部電極板の中央よりわずかに突き出され、その他端は分散液供給のマイクロフィード⑥ (精度 0.001 cm³) に接続されている。上部電極は 5 mm の銅棒で、その先端は円錐形状に加工してあり、ノズルと同軸上に設置して電極間を所定の距離に設定する。実験は、1) 油相表面が自由表面を形成した場合と、2) 油相表面に銅板を置いた場合の2通りについて行った。

2.1 実験-1)

有機溶媒 (ISOPAR M) あるいはその混合溶媒 (ISOPAR M + D2EHPA) を所定の高さに設定する。ついでマイクロフィードより蒸留水を供給してノズル上に任意の体積の水滴を生成させる。銅電極棒に電圧を印加し、その水滴がノズルから切り離されるまで徐々に昇圧する。電流をエレクトロメータを経た記録計⑨に記録する。

2.2 実験-2)

この実験は油相表面電位を測定するためのもので、空気抜きを設けた銅板電極を接地電極から 50 mm の高さに設置し、銅板の下に空気が残らないように有機溶媒 (ISOPAR M) あるいはその混合溶媒 (ISOPAR M + D2EHPA) を供給する。銅板はデジタル電位計⑦ (Brandenburg model 1390, max. 40 kV) を経て記録計⑨に接続されている。ついで実験-1) と同様ノズル上

キーワード: コロナ放電場, 帯電水滴, 水滴運動, 油相表面電位

* 大阪大学基礎工学部化学工学科 (560 豊中市待兼山 1-3) Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University, 1-3, Machikaneyama, Toyonaka, 560 Japan

** 大同鋼板株式会社 (660 尼崎市杭瀬南新町 3-2-1) Daido Kohan Co., 3-2-1, Kuise Minami Shin Machi, Amagasaki, 660 Japan

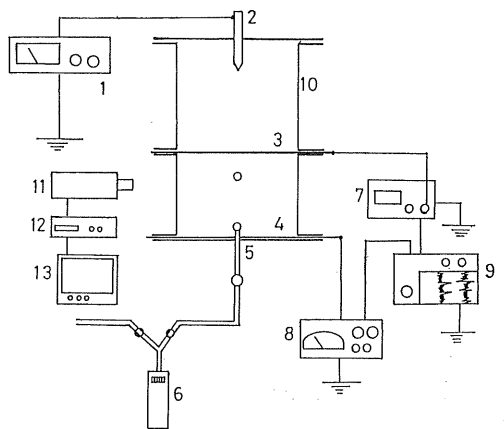


図1 実験装置の概略図

1: 高電圧電源, 2: 銅棒電極, 3: 銅板電極, 4: 接地電極, 5: ノズル, 6: マイクロフィーダ, 7: デジタル電位計, 8: エレクトロメータ, 9: 記録計, 10: アクリル樹脂円筒, 11: テレビカメラ, 12: デジタルタイマー, 13: モニターテレビ.

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

1: high voltage generator, 2: copper rod electrode, 3: copper plate electrode, 4: earth electrode, 5: stainless nozzle, 6: micro-feeder, 7: digital voltmeter, 8: electrometer, 9: pen recorder, 10: acrylic resin column, 11: TV camera, 12: digital timer, 13: monitor TV.

に水滴を生成させ、電極棒への印加電圧を徐々に昇圧して、水滴が切り離される電圧を電位計を経て記録計に記録する。この方法により銅板の電位を正確に知ることができる。同時に電流も記録する。ノズル上の水滴を切り離すに必要な油相表面電位 E_i におよぼす因子は有機相高さ L_o 、気相高さ L_a 、有機相の物性および水滴の体積であるが、実験-2) では装置の関係から $L_o=50$ mm, $L_a=50$ mm の場合についてのみ行った。ノズルから切り離された水滴の上昇速度 U_r はテレビカメラよりビデオ

オに記録し、後に再生して水滴の上昇距離と所要時間より求めた。実験に用いた溶液系とその物性値を表1に示す。

3. 関係式

3.1 油相表面電位

単一ノズル上の水滴と電場との関係の模式図を図2に示す。水滴に作用する力の釣り合いは次式となる。

$$F_e - \Delta\rho vg - \pi D_o \sigma = 0 \quad (1)$$

上式中、 F_e : 水滴に作用する電気力 [N], $\Delta\rho (= \rho_c - \rho_a)$: 密度差 [kg/m³], ρ_c : 油相密度 [kg/m³], ρ_a : 水相密度 [kg/m³], v : 水滴体積 [m³], g : 重力加速度 [m/s²], σ : 界面張力 [N/m], D_o : ノズル外径 [m] である。高松らは平行電極板で構成する電場中の下方に突き出たノズルに懸垂した液滴に作用する電気力と液滴の帯電荷量

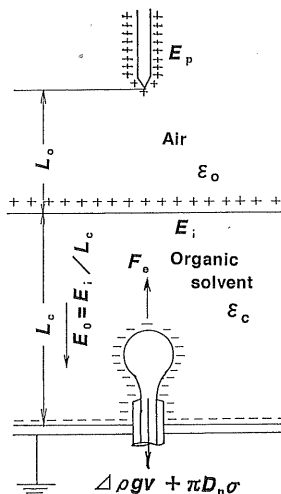


図2 油相電場中のノズル上の水滴の模式図

Fig. 2 Schematic diagram of water drop in the oil phase in the electric field.

表1 溶液の物性値

Table 1 Physical properties of liquid phase.

Liquid	Density [kg/m ³]	Interfacial tension [mN/m]	Viscosity [mPa · s]	Dielectric constant [F/m]	Electrical conductivity [nS/m]
water	998	—	1.01	718.06×10^{-12}	8.6×10^4
system 1	786	42.3	2.67	17.97×10^{-12}	0.05
system 2	787	18.5	2.75	18.15×10^{-12}	0.30
system 3	789	18.3	2.78	18.24×10^{-12}	1.3
system 4	794	17.9	2.96	18.59×10^{-12}	18.0

system 1: ISOPAR M, system 2: ISOPAR M+0.024 mol/dm³ D2EHPA, system 3: ISOPAR M+0.12 mol/dm³ D2EHPA, system 4: ISOPAR M+0.3 mol/dm³ D2EHPA, D2EHPA: di(2-ethylhexyl) phosphoric acid.

を鏡像法により次式の解析解を求めた⁴⁾.

$$F_0 = 4\pi\epsilon_0\beta r^2 E_0^2 \quad (2)$$

$$Q = 4\pi\epsilon_0\gamma r^2 E_0 \quad (3)$$

ここで、 Q ：電荷量 [C]、 ϵ_0 ：油相の誘電率 [F/m]、 r ：液滴半径 [m]、 $E_0 (=E_i/L_c)$ ：油相の電場の強さ [V/m]、 E_i ：油相表面電位 [V]、 L_c ：油相高さ [m] である。式(2)、(3)の β および γ は下部電極板から突き出たノズル長さに関する補正係数で、次の近似式で与えられる。

$$\beta = \begin{cases} 1.12 & (\alpha=1) \\ \alpha+0.34 & (\alpha>1) \end{cases} \quad (4)$$

$$\gamma = \alpha + 0.63 \quad (\alpha \geq 1) \quad (5)$$

$$\alpha = (l+r)/r \quad (6)$$

ここで、 l ：ノズル突き出し長さ [m]、 r ：液滴半径 [m] である。彼らは平等電場の気相中および油相中のノズルを離脱した水滴の体積および電荷量の実測値と計算値との関係を調べ、良好な結果を得た⁴⁾。彼らの求めた解析解が本実験系にも適用できるものとする。すなわち、図2で示した水滴が式(2)の F_0 で離脱するものとする式(1)、(2)より油相表面電位 E_i は次式となる。

$$E_i = \left(\frac{\Delta\rho v g + \pi D_0 \sigma}{4\pi\epsilon_0\beta r^2} \right)^{0.5} L_c \quad (7)$$

3.2 液滴の上昇速度

溶液中の液滴の運動はよく研究されており、なかでも Hu and Kintner は溶液系に関係なく液滴の運動は一つの実験相関式で表されることを示し、液滴が直進運動する領域について次式の相関式を提出した⁵⁾。

$$Y = \frac{4}{3} X^{1.275} \quad 2 < Y \leq 70 \quad (8)$$

$$Y = C_D We P^{0.15}, \quad X = Re/P^{0.15} + 0.75 \quad (9)$$

$$We = \rho_c d_0 U_r^2 / \sigma, \quad Re = \rho_c d_0 U_r / \eta_c, \quad P = \rho_c^2 \sigma^3 / g \eta_c^4 \Delta\rho \quad (10)$$

ここで、 d_0 ：液滴径 [m]、 C_D ：抗力係数 [—]、 U_r ：液滴の運動速度 [m/s]、 We ：ウェーバ数 [—]、 Re ：レイノルズ数 [—]、 P ：物性値パラメータ [—]、 η_c ：連続相粘度 [Pa·s] である。高松らは平等電場中で帯電液滴が直進運動をする領域では、液滴の界面張力および浮力に作用する電場の効果を考慮して、式(8)を修正して次式を提出した⁶⁾。

$$U_r = \left\{ \left(\frac{6\Delta\rho E_0 v g}{\pi\sigma E_0} P_E^{0.15} \right)^{1/1.275} - 0.75 \right\} \frac{\eta_c}{\rho_c d_0} P_E^{0.15} \quad (11)$$

ここで、 P_E は式(13)、(14)で表される σ_E および ρ_E を用いて式(10)の P を修正した次式の物性値パラメータで

ある。

$$P_E = \frac{\rho_c^2 \sigma_E^3}{g \eta_c^4 \Delta\rho_E} \quad (12)$$

ここで、 $\Delta\rho_E$ は水滴の浮力より式(13)、 σ_E は液滴界面が外向きの電気応力を受ける界面張力 [N/m] で式(14)^{7,8)}となる。

$$\Delta\rho_E = \Delta\rho + \frac{QE_0}{vg} \quad (13)$$

$$\sigma_E = \sigma - \left(\frac{3}{8} d_0 \epsilon_0 E_0^2 + \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{\pi d_0^3} \right) \quad (14)$$

高松らは油相電場中の水滴の降下実験を行い、式(11)~(14)の計算値と実測値が良く一致することを示した⁶⁾。

4. 実験結果および考察

4.1 油相表面電位

ノズル上の水滴体積 v とそれを切り離すに必要な油相表面電位 E_i および水滴の上昇速度 U_r の実測値および計算値の1例を図3に示した。油相は system 4 で図中の Δ 印は実験-2)より検出した E_i の実測値で、破線は式(7)より求めた E_i の計算値である。両者はほぼ一致している。 $L_0+L_c=100$ mm 一定にして L_c を40, 50, 60 mm と変化させ、その影響を調べたが、式(7)からも類推できるように L_c の増加と共に高い E_i が必要であった。

4.2 コロナ風

油相表面電位を測定するために、油相表面に挿入した

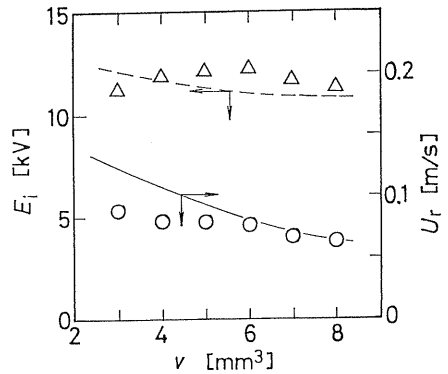


図3 油相表面電位、水滴上昇速度と水滴体積との関係
 Δ ：表面電位実測値、 \circ ：上昇速度実測値。system 4, $L_0=50$ mm, $L_c=50$ mm。----：表面電位計算値、—：上昇速度計算値。

Fig. 3 Relation between electric potential at the oil surface, rising velocity of water drops and the drop volume.

Δ : experimental surface potential, \circ : experimental rising velocity, system 4, $L_0=50$ mm, $L_c=50$ mm. ---- : calculated surface potential, — : calculated rising velocity.

銅板電極上に薄膜の油相を存在させ、電極棒に約 $E_p = 10 \text{ kV}$ の電圧を印加すると、銅板上の薄膜油相がある半径の同心円でカラム円筒壁側に押しやられるのが観察された。これは上方より気流が銅板上に吹き付けているため、この気流はコロナ風と思われる。この観察より油相電場形成には電極棒の先端からのコロナ放電が関与しているものと思われる。10 kV の印加電圧では薄膜油相の移動半径は周期的に脈動しており、これは銅板電極から計測器を通して得られた電圧波形および電流波形からも確認された。これはコロナ放電が不安定で周期的に変化しているためと思われる。15 kV 以上では、印加電圧の大きさに応じて薄膜油相の移動半径は大きくなり、静止して脈動も生じなかった。

4.3 液滴の上昇速度

図3の○印は system 4 について実験-1) で得られた U_r の実測値である。図中には示していないが、それぞれの液滴径について式(3)~(7)および式(11)~(14)を用いて求めた U_r の計算値は実測値より約2倍ほど大きかった。この傾向は実験に用いた他の溶液系についても同じであった。この原因についてはよくわからないが、式(11)の U_r に影響するのは電場強度 E_0 と水滴の電荷量 Q である。油相表面電位 E_i の実測値と計算値がほぼ一致していることから、誘導電荷をもってノズルを離脱した水滴の電荷の一部がその運動中に油相中へ漏出したためと考えた。そこで式(7)の E_i を用いて、それぞれの水滴について U_r の実測値に一致するように式(11)~(14)より求めた電荷量 Q_{exp} と式(3), (5), (6)より求めた電荷量 Q_{cal} を用いて電荷の漏出比率 $1 - Q_{exp}/Q_{cal}$ を求めた。すなわち、漏出比率 system 1 で 0.538 ($v = 3 \text{ mm}^3 \sim 0.433$ ($v = 8 \text{ mm}^3$), system 2 で 0.550 ($v = 3 \text{ mm}^3 \sim 0.457$ ($v = 8 \text{ mm}^3$), system 3 で 0.567 ($v = 3 \text{ mm}^3 \sim 0.525$ ($v = 8 \text{ mm}^3$), system 4 で 0.641 ($v = 3 \text{ mm}^3 \sim 0.561$ ($v = 8 \text{ mm}^3$) の範囲で変化し、D2EHPA 濃度の増加と共に増加した。これは D2EHPA 濃度の増加と共に電気伝導度が大きくなるためと思われる。理由はよくわからないが水滴体積の減少と共に漏出量は増加した。図中の実線は $v = 8 \text{ mm}^3$ の U_r に合うように漏出比率を求め、その比率を一定とした U_r の計算値である。同様にそれぞれの溶液系の $v = 8 \text{ mm}^3$ の漏出比率を求め、その値を一定として求めた U_r の計算値と実測値の比較を図4に示した。いずれの系も計算値と実測値との対応は図3の結果と同じ傾向をもって偏倚し

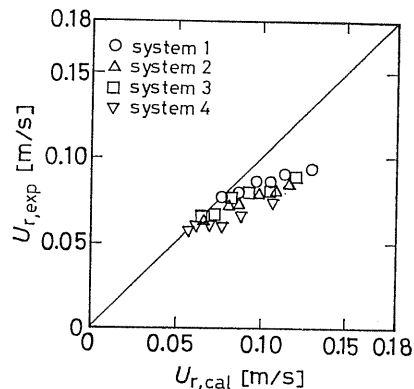


図4 水滴上昇速度の実測値と計算値の比較

Fig. 4 Comparison of rising velocity of water drop between experimental and calculated values.

$L_0 = 50 \text{ mm}$, $L_c = 50 \text{ mm}$.

ている。電荷の漏出比率が溶液の電気伝導度に依存するが、水滴体積にも依存している。その原因は現在不明であるけれど、溶液によらず電荷の漏出機構に類似性があるものと思われる。

5. ま と め

静電場を利用した液液接触装置の重要な設計基礎資料である油相表面電位の推定法と油相電場中の単一液滴の運動速度式の評価について検討した。その結果、油相電場中での帯電した水滴の運動は油相の電気伝導度に依存して変化することがわかった。油相電場中の液滴の運動速度の推算には連続相の電気物性を考慮した水滴の帯電量の推算式の開発が必要である。

参 考 文 献

- 1) 山口 学, 筒野正明: 静電気学会講演論文集 '94, p. 327, 静電気学会 (1994)
- 2) M. Yamaguchi and M. Kanno: *AIChE J.* in press
- 3) M. Yamaguchi and M. Kanno: US Pat. 5411651 (1995)
- 4) T. Takamatsu, M. Yamaguchi and T. Katayama: *J. Chem. Eng. Jpn.*, **15**(5) (1982) 349
- 5) S. Hu and R.C. Kintner: *AIChE J.* **1** (1955) 42
- 6) T. Takamatsu, M. Yamaguchi and T. Katayama: *J. Chem. Eng. Jpn.*, **16**(4) (1983) 324
- 7) J. Jeans: *Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*, 5th ed. p. 192, Cambridge University Press, Cambridge (1951)
- 8) G. Stewart and J.D. Thornton: *Inst. Chem. Engrs. Symp. Ser.*, **26** (1967) 29, 37