

**小論文****直流電場中の導電性固体球による液混合**

山 口 学\*, 山 田 恵 司\*\*, 片 山 俊\*\*\*

(1994年9月13日受理)

**Liquid Mixing by Conductive Solid Spheres Driven  
in DC Electric Field**

Manabu YAMAGUCHI,\* Keishi YAMADA\*\* and Takashi KATAYAMA\*\*\*

(Received September 13, 1994)

When an electric field is applied to a system of electrically conducting solid spheres in an insulating liquid and the field strength approaches a certain value, the spheres begin to move by the field-induced force. A combination of field-induced and moving sphere-induced fluid convections resulted in the increase in mixing rate of the liquid. Present study showed that the liquid was mixed effectively by the increase in the applied voltage as a parameter of number of the sphere.

**1. はじめに**

液液分散系を取り扱う抽出操作では、その物質移動効率の向上、とりわけ物質移動界面としての比表面積と物質移動に寄与する液滴の内外の乱れなどを作り出すための工夫が必要である。しかしながら、比表面積の増加および分散相と連続液相間の相対速度の増加を同時に実現するには多くの困難を伴う。一般に、液滴径が減少すると、液滴は剛体のような液滴挙動をするため物質移動速度は低下し、分散相と連続相の相分離が極端に悪くなり抽出効率も低下する。これらの困難を克服する工夫として電界の利用が試みられた<sup>1)</sup>。また、従来の液液抽出装置では、液分散や液を攪拌・混合する際に電気エネルギーを攪拌機や振動機などの機械エネルギーに変換して利用するためエネルギー損失も大きい。装置に装備した電

極に電圧を印加して、電気エネルギーを液分散、分散相や連続相の攪拌・混合に直接利用すると、装置内に攪拌機や振動板などの可動部を必要としないため、装置および運転操作の簡便さと共にエネルギー効率の向上が期待できる。現在、本方式の工業プラントの実施例はないが、提案されている装置は、1) 攪拌機を有しないもの<sup>1-3,5-12)</sup>、2) 電極と攪拌機<sup>4)</sup>を有するものに大別される。それらは電界を形成する電極形状を多孔板<sup>1,9)</sup>、平板<sup>3,5,8)</sup>、棒状<sup>2,6,7)</sup>、針<sup>10-12)</sup>、環状<sup>4)</sup>等に工夫したもの、電極配置<sup>2,4,6-8,10-12)</sup>を工夫したもの、交流あるいは直流電圧を印加したものに分類される。電界を液混合に利用した報告<sup>10,11)</sup>もあるが、液混合における電界の効果は、その実験の困難さもあって定量的な報告例<sup>7)</sup>はほとんどない。本研究は電界を利用した液液抽出装置の開発研究<sup>12)</sup>の一環として電界駆動の分散粒子による液の攪拌・混合を実験的に調べようとするものである。実装置内で生じる液の混合度は液滴の運動によるものと液滴の変形や液滴同士の合一と再分散によるものとの総合されたものである。後者の液混合に対する評価は統計量であるため、その評価は困難である。そこで分散粒子が形状変化や合一・再分散しない固体球を用いることにした。ここでは、Dietz and Melcher<sup>13)</sup>と同様、導電性固体球を用いてその運動速度と連続液相の混合度との関係を調べた。

**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

キーワード：直流電場、荷電球、粒子球運動、液混合

\* 大阪大学基礎工学部化学工学科 (560 豊中市待兼山町 1-3)

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University, 1-3, Machikaneyama, Toyonaka, 560 Japan

\*\* 京セラ株式会社八日市工場ソーラーエネルギー事業部 (527 八日市市蛇鶴町長谷野 1166-6)

Solar Energy Department, Kyocera, Co., 1166-6 Nagatanino, Hebitomizochi, Yokaichi, Siga, 527 Japan

\*\*\* 大阪大学名誉教授 (560 豊中市待兼山町 1-3)

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University, 1-3, Machikaneyama, Toyonaka, 560 Japan

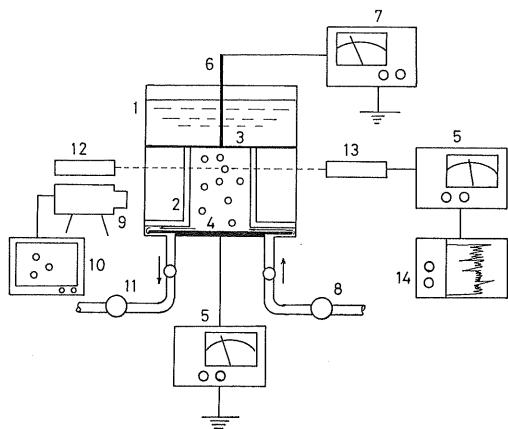


図 1 実験装置の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

1; 装置本体, 2; 混合室, 3; 上部銅電極板, 4; 下部銅電極板, 5; エレクトロメーター, 6; 銅棒, 7; 高電圧電源, 8; 液供給ポンプ, 9; テレビカメラ, 10; テレビ, 11; 液排出ポンプ, 12; He-Ne レーザー光源, 13; 受光器, 14; 記録計

脂製で二重構造になっている。装置本体, 1, は 100(幅) × 100(奥行) × 100(高さ) mm で、その内部に実験の主要部である混合室, 2, がある。混合室は 50(幅) × 50(奥行) × 50(高さ) mm と 50(幅) × 50(奥行) × 20(高さ) mm の 2 種類を用意した。下部銅電極板, 4, は容器底面に固定され、エレクトロメーター, 5, (タケダ理研 TR8651) を通して接地してある。上部銅電極板, 3, は下部銅電極板と平行に混合室の上面に固定され、高電圧電源, 7, (Brandenburg 2807) の正極に接続されている。上部電極板に電圧を印加すると、混合室内は平等電界が形成される。電界中に導電性固体球を入れると、固体球は電極間を運動して、攪拌子として連続液相を攪拌・混合する。

## 2.1 固体球の帶電電荷量と運動速度

下部電極板上に導電性固体球を 1 個あるいは複数個おき、連続液相としてシクロヘキサンと四塩化炭素の混合液を供給した。上部電極板に直流電圧を印加・昇圧し、ある印加電圧に達すると、極板上の固体球は上部極板からの電気泳動力を受けて浮き上がり、電界強度に応じた速度で電極間を上下に運動した。その運動をテレビカメラ, 9, でビデオ録画し、後にモニター, 10, に再生して球の移動距離と所要時間から球の平均速度を求めた。同時に、固体球が運ぶ電荷量を電流量として測定し、固体球の帶電電荷量を求めた。用いた導電性固体球はアルミニウム球で、その直径は  $d_e = 2.39 \text{ mm}$  で、密度は  $\rho_d = 2,801 \text{ kg/m}^3$  である。また、連続液相の物性値として、

密度は  $\rho_c = 990 \text{ kg/m}^3$ 、粘度は  $\eta_c = 0.91 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、誘電定数は  $\epsilon_c = 19.39 \times 10^{-12} \text{ F/m}$  であった。

## 2.2 連続液相の混合特性

装置内を連続液相で満たし、ついでヨウ素を含むシクロヘキサンと四塩化炭素の混合溶媒を微流量ポンプ, 8, を用いて供給した。それと同時に他方より微流量ポンプ, 11, を用いて等流量で連続液相を排出した。この混合溶媒の密度は連続液相よりもわずかに大きく、混合溶媒の密度は  $\rho_c = 1,090 \text{ kg/m}^3$ 、ヨウ素濃度は  $C = 0.011 \text{ M}$  で、ヨウ素は連続液相の混合度を調べるためのトレーサーである。下部電極板上にヨウ素溶液を膜状で流し、電極板上がヨウ素溶液で十分に覆われた時点で両ポンプを止めた。上部電極板に電圧を印加するとヨウ素が誘電泳動力を受けて上方に対流輸送され、時間と共に連続液相中のヨウ素濃度は均一になった。アルミ球を電極板間に入れると球は電極板間で上下運動し、下部電極板上のヨウ素がアルミ球背後の渦に同伴されたり、先の対流輸送されている連続液相中のヨウ素はアルミ球で攪拌されたりして連続液相中のヨウ素濃度は早く均一になった。このようにして連続液相の混合度をヨウ素濃度で表した。図に示す He-Ne レーザー光, 12, が上部電極板下 5 mm の位置を通過するように連続液相に照射し、ヨウ素濃度の変化をその透過光強度の変化で検出した。すなわち、レーザーの透過光強度を受光器, 13, とエレクトロメーターを通して電流量に変換し、その経時変化をレコーダー, 14, に記録した。連続液相のヨウ素濃度の変化と共に電流値(透過光強度)は変化し、ヨウ素濃度が均一に近づくと、電流値はほぼ一定値になった。電圧を印加した直後から最大平均電流値の 95% 電流値を得るまでの時間を求め、それを所要混合時間 ( $t_m$ ) と定義した。それは球個数が多くなるほどレーザー光をよぎる球も多くなり、電流の変動が大きく、一定値を判定するのが困難であったためである。アルミ球個数 ( $N = 0 \sim 30$ )、印加電界強度が混合時間におよぼす効果を調べた。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 固体球の帶電電荷量と運動速度

電極板間を運動する固体球が運ぶ電荷量は電極板間を流れる電流量から次式<sup>13)</sup>で求めた。

$$Q = \frac{t}{2} \langle i \rangle \quad (1)$$

ここで  $Q$  は球が一方向に運ぶ電荷量 [C],  $t$  は固体球が電極板間を 1 往復するに要した時間 [s],  $\langle i \rangle$  は固体球が電極板間を 1 往復する運動により生じた電流量 [A]。  $Q$  と電界強度 ( $E_U$ ; [V/m]) の関係を図 2 に示す。図中にはマックスウェルの理論値<sup>13)</sup> ( $Q = \pi^3 d_e^2 \epsilon_c E_U / 6$ )

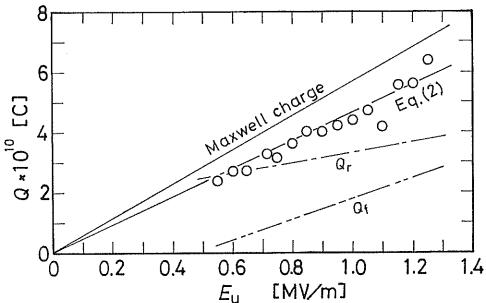


図 2 固体球の帶電電荷量と電界強度との関係

Fig. 2 Relation between charge quantity of a solid sphere and the electric field strength.

と式(1)による計算値を実測値(○)として示した。球の電荷量の実測値は理論値より20%程度低く、次の実験式をえた。

$$Q = 4.6 \times 10^{-16} E_U \quad (2)$$

運動している固体球が連続液相から受ける抗力( $R$ ; [N])は次式となる。

$$R = C_D \frac{\pi d_e^2}{4} \frac{\rho_e U^2}{2} \quad (3)$$

ここで $C_D$ は抵抗係数[—], $U$ は球の運動速度[m/s]である。本実験の球のレイノルズ数( $Re = \rho_e U d_e / \eta_e$ )は500~2,000の範囲であった。抵抗係数にニュートン則( $C_D = 0.44$ )を用い、球に作用する力を電気力( $QE_U$ )と浮力( $\pi d_e^3 (\rho_d - \rho_e) g / 6$ )とし、定常運動では $R = QE_U \pm \pi d_e^3 (\rho_d - \rho_e) g / 6$ とすると、固体球の運動速度は次式となる。

$$U = \left[ \frac{\{QE_U \pm \pi d_e^3 (\rho_d - \rho_e) g / 6\}}{0.055 \rho_e \pi d_e^2} \right]^{0.5} \quad (4)$$

式中の+は下降運動、-は上昇運動を意味する。アルミ球の上昇速度( $U_r$ )(○, ●, ⊗)と下降速度( $U_f$ )(△, ▲)の実測値を図3に示した。図中の○, △は単一アルミ球( $N=1$ )で電極板間距離( $L$ )=2cmの結果で、●, ▲は $N=1$ ,  $L=5$ cm, ⊗は $N=10$ ,  $L=5$ cmの結果である。図からわかるように $U$ の実測値は $L$ や $N$ には依存しないが、 $U_r$ と $U_f$ で大きな差異がある。これはアルミ球の浮力の影響によるものである。一方、図中の2つの実線は式(2), (4)を用いた $U_r$ と $U_f$ の計算値であるが、 $U_f$ の実測値(△, ▲)は計算値よりかなり小さい。この原因については現在のところ明らかでないが、式(4)中の $Q$ の評価に問題があると考え、以下のように考察した。固体球の $U_r$ および $U_f$ の実測値に適合するように上昇時の電荷量( $Q_r$ )と下降時の電荷量( $Q_f$ )を求め、その結果を図2中的一点鎖線( $Q_r$ )および二点鎖線( $Q_f$ )

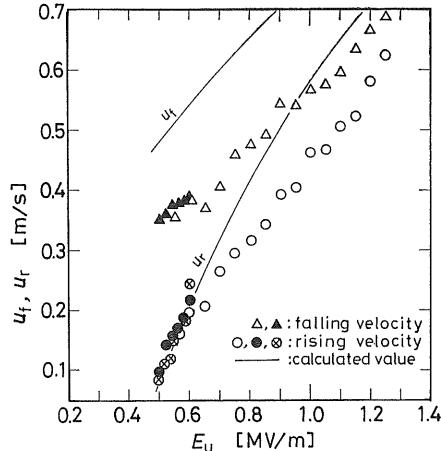


図 3 固体球の運動速度と電界強度の関係

Fig. 3 Relation between moving velocity of a solid sphere and the electric field strength.

で示した。実測値(○)は一点鎖線および二点鎖線よりもかなり大きい。上昇する帶電球が上部電極板と衝突する直前で球の電荷が電極板に液中放電をして、球は電荷を失う。浮力の関係で球は上部電極板と十分な接触をしないで、すなわち、十分に電荷を受け取らない状態で下降運動をはじめる。下降球は下部電極板に近づくにつれて球の電極板側に誘導電荷を受け、下部電極板傍で液中放電してその電荷を失う。しかし下降球は浮力により下部電極と衝突して接触し、電極板から電荷を受け取り、浮力以上の電気力を受けて上昇する。このように上昇球が下降球に移行する際に、十分な電荷授受が行われないとすると、下降運動の場合の帶電電荷量が上昇運動の場合より少ないので妥当と考えられる。試みに下降球の電荷量を $Q=0$ として、 $U_f$ を計算すると $U_f=0.36$ m/sとなり、 $E_U=0.55$ MV/mの時の $U_f=0.35$ m/sとほぼ一致した。このことは上昇球が下降球に移行する際に、上昇球が上部電極板と十分に接触せず下降するためと思われる。球と電極板の接触が十分であれば、理論的には上昇球、下降球に関係なく球の $Q_r$ と $Q_f$ は等しいはずである。図2の電荷量(○)は式(1)より求めた見かけの電荷量と考えられる。図には示していないが、ニッケル被覆球( $\rho_d=1,060$ kg/m<sup>3</sup>)を作成し、その運動速度を調べた。その結果、実測値と計算値はほぼ一致した。これはニッケル被覆球の密度が小さく、上昇および下降速度が遅いため上下電極板と固体球とが接触し、球への電荷授受が十分に行われたためと思われる。しかしながら、被覆球は上昇および下降運動を繰り返している間に、ニッケル被覆が剥がれ使用不能となり、液混合の実験には使用できなかった。

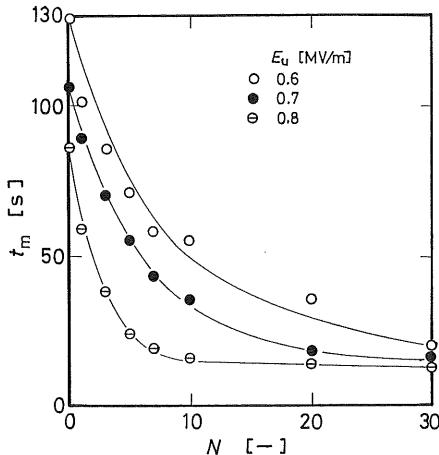


図 4 連続液相の所要混合時間と固体球個数の関係

Fig. 4 Relation between time required at saturated mixing of continuous phase and the number of solid spheres.

### 3.2 連続液相の混合特性

アルミ球に作用する浮力と電気力の平衡条件より、アルミ球の浮上に必要な印加電界強度は、 $E_U = 0.525 \text{ MV/m}$  であった。そこで  $E_U = 0.6, 0.7, 0.8 \text{ MV/m}$  における所要混合時間 ( $t_m$ ) とアルミ球個数 ( $N$ ) との関係を図 4 に示した。 $t_m$  は  $N$  の増加と共に指数関数的に減少しており、 $E_U = 0.8 \text{ MV/m}$  で  $N = 3$  個の場合の  $t_m$  は  $E_U = 0.7 \text{ MV/m}$  の  $N = 10$  個に、また、 $E_U = 0.6 \text{ MV/m}$  の  $N = 20$  個に相当する効果がみられる。

液混合について  $(t_m - t_{m0}) / (t_{m0} - t_{m30})$  と  $N \cdot Re$  の無次元相関を試み、その結果を図 5 に示した。図中の  $t_{m0}$  は図 4 中の各印加電界強度における  $N = 0$  の  $t_m$  の値で、電気力駆動の液対流による液混合時間である。 $t_{m30}$  は  $E_U = 0.8 \text{ MV/m}$  で  $N = 30$  の値である。 $Re (= \rho_e U_{av} d_e / \eta_e)$  数の  $U_{av}$  には  $T_{av} = (U_r + U_f)/2$  を用いた。図 5 に示すように  $E_U = 0.6, 0.7 \text{ MV/m}$  の結果は良好に相関されたが、 $E_U = 0.8 \text{ MV/m}$  の結果は異なる挙動をしている。現在、その原因は不明で、一般的な結論を得るには、さらに多くの実験結果の蓄積が必要である。

### 4. ま と め

電圧印加場中の分散液滴による連続液相の搅拌・混合の基礎研究として、導電性固体球を用いて、その運動が

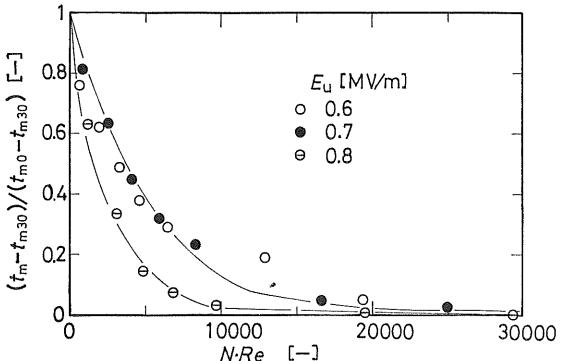


図 5 無次元混合時間と球レイノルズ数の関係

Fig. 5 Relation between dimensionless mixing time and Reynolds number of sphere.

液混合におよぼす効果を調べた。得られた結果は先に開発した電場利用の液液抽出装置<sup>12)</sup>の液混合の基礎知見を与えるものとして有効である。しかし固体球運動では、実測値と計算値とで大きな差異がみられ、粒子球と電極板間の電荷授受機構を含めた検討が必要である。

### 参 考 文 献

- 1) J.D. Thornton : Rev. Pure and Appl. Chem., 18 (1968) 197
- 2) W. Kowalski and Z. Ziolkowski : Int. Chem. Eng., 21 (1981) 323
- 3) L. Martin, P. Vignet, C. Fombarlet and F. Lancelet : Sep. Sci. Techn., 18 (1983) 1455
- 4) P.J. Bailes and E.H. Stitt : Chem. Eng. Res. Dev., 62 (1987) 514
- 5) F. Yoshida, M. Yamaguchi and T. Katayama : J. Chem. Eng. Japan, 19 (1986) 1
- 6) M. Yamaguchi, H. Sugaya and T. Katayama : J. Chem. Eng. Japan, 21 (1988) 179
- 7) M. Yamaguchi, H. Sugaya and T. Katayama : J. Chem. Eng. Japan, 22 (1989) 25
- 8) T.C. Scott and R.M. Wham : Ind. Eng. Chem. Res., 28 (1989) 94
- 9) Z.M. Gu : J. Membrane Sci., 52 (1990) 77
- 10) W.P. Cropper and H.S. Seelig : I & EC Fundamentals, 1 (1962) 48
- 11) R.O. Holland : I & EC Fundamentals, 5 (1966) 204
- 12) 山口 学, 簡野正明 : 静電気学会講演論文集 '94, p. 327, 静電気学会 (1994)
- 13) P.W. Dietz and J.R. Melcher : Trans. ASME J. Heat Transfer (1975) 429