

水溶液中に存在する微粒子の電場内での挙動†

山下 大輔・柴田 亮・村山 憲弘・芝田 隼次††

関西大学環境都市工学部 エネルギー・環境工学科, 564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

キーワード: 電気泳動, ポリスチレン, 微粒子, 電解質溶液, 分級

電場内の微粒子の挙動が, 微粒子の分級に適用することを目的として, モデル粒子に平均粒子径が 0.03, 0.1, 1.0, 4.3 および 9.6 μm の球形ポリスチレン粒子を用いて, 測定された. 電気泳動移動度およびゼータ電位の測定には, レーザードップラー効果を原理とする装置を用いた.

懸濁液の pH および温度が増加するほど, 微粒子の電気泳動移動度は増加した. 電気泳動移動度は KNO_3 濃度や粒子径によって変化する. Wiersema らの解析法を用いて, 粒子の電気泳動移動度に影響を与えと思われる緩和効果および電気泳動遅延効果について検討した.

電場内での粒子に作用する力は, 電気泳動力, 摩擦力, そしてイオンの挙動で見られる緩和効果や電気泳動遅延効果のような他の力が考えられる. 粒子の移動速度は粒子径に依存することがわかった. 粒子径が 1 μm 以下のとき, 速度は粒子径が大きくなるにつれ増加する. 一方, 粒子径が 1 μm 以上のとき, 速度は粒子径が大きくなるにつれ減少する. その現象は電場内の微粒子に作用する力によって説明される. これらの電場内での微粒子の挙動は微粒子を分級するために適用できる.

緒 言

近年, ナノテクノロジーの進歩により, 工業的に取り扱われる粒子は微小化する傾向にある. 微粒子は, 電子材料, 磁性材料, 触媒材料, 顔料, 染料などの様々な分野で用いられる. 上記の分野で用いられる微粒子は化学組成および結晶構造のみならず, 形状や粒子径も均一であることが求められている. 粒子径をナノレベルで制御することは一般的に困難であるため, 微粒子の製品中には粗粒子の混入が避けられない. 粒子径を均一にしたり, 粗粒子を効率よく除去することは, 微粒子の機能性を向上させる以外にも, 製造コストの削減やプロセスの効率化にもつながると考えられる. すなわち, 分級操作は微粒子を取り扱う全分野できわめて有益な技術である (Sasaki, 1991, 1992; Sato, 1982).

分級方法は湿式分級と乾式分級とに大別される. 湿式分級には, 重力を利用する方法および遠心力を利用する方法などがある (Iinoya, 1978). しかし, いずれの方法も分級可能な粒子径が 1-数百 μm であるため, サブミクロン粒子に対して適用できる分級技術の開発が必要とされている. 新たな湿式法による分級技術の開発を目指して, 電気泳動法を利用することに着目した. 一般に, 水溶液中では全ての粒子は正または負に帯電しており, 電気泳動現象が生じる (Aoki and Nagai, 1978; Higashitani, 1996; Nihon Kagakukai, 2002).

本研究では, 平均粒子径が 0.03 μm から 9.6 μm の球形ポリスチレン粒子を使用して, 各粒子の電気泳動移動度およびゼータ電位におよぼす温度, pH および電解質濃度の影響について検討した.

Wiersema ら (Wiersema *et al.*, 1966; Wiersema and Overbeek, 1967) の解析法を用いて, 粒子の電気泳動移動度に対する緩和効果および電気泳動遅延効果について検討を行った.

1. 分級原理

電気泳動中の粒子に作用する力は, 電場による推進力と粘性抵抗力, 緩和効果, 電気泳動遅延効果などの抵抗力である. 電場内で粒子に作用する力を Eq. (1), 逆向きに働く抵抗力を Eq. (2) に示す.

$$F_e = qE \quad (1)$$

$$F_r = 3\pi\eta D_p v + X \quad (2)$$

ここで, F_e は電場 $E[\text{V/m}]$ の下にある電気量 $q[\text{C}]$ を持つ粒子に作用する力, v は移動速度 $[\text{m/s}]$, D_p は粒子径 $[\text{m}]$ である. X は微小粒子に作用すると考えられる緩和効果や電気泳動遅延効果などを示す値として導入したパラメータである. 緩和効果とは, 粒子が移動するときにイオン雰囲気常在に中心から遅れるために生じる抵抗力であり, 電気泳動遅延効果 (Aoki and Nagai, 1978) とはイオン雰囲気内の粒子と反対符号のイオンが逆方向に移動するために生じる抵抗力である. Eqs. (1) と (2) についてニュートンの運動の第二法則を適用すると Eq. (3) が得られ, さらに粒子の運動が定常状態に達した時には移動速度は Eq. (4) であらわすことができる.

$$qE - (3\pi\eta D_p v + X) = m \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

$$v = \frac{qE - X}{3\pi\eta D_p} \quad (4)$$

緩和効果や電気泳動遅延効果は, 電解質濃度に関するパラメータ $\kappa[\text{m}^{-1}]$ と粒子半径 $R[\text{m}]$ との比によってあらわされる無次元数

† 2007 年 1 月 17 日受理, 2007 年 6 月 19 日掲載決定

化学工学第 38 回秋季大会 (福岡, 2006 年 9 月) にて発表

†† shibata@kansai-u.ac.jp

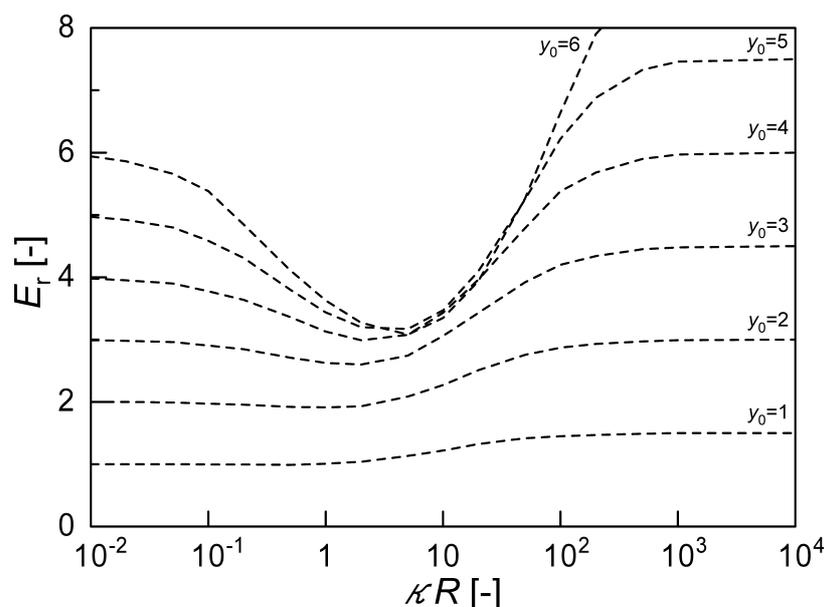


Fig. 1 Relationship between E_r and κR of Wiersema et al.

κR に依存する (Kaga *et al.*, 1993; Radko *et al.*, 2000). Figure 1の破線は Wiersema による緩和効果および電気泳動遅延効果を考慮した理論計算値であり, κR に対する換算電気泳動移動度および換算ゼータ電位の関係を示している (Wiersema *et al.*, 1966; Wiersema and Overbeek, 1967). 無次元化された換算電気泳動移動度 $E_r[-]$ および換算ゼータ電位 $y_0[-]$ は, Eqs. (5) と (6) より算出される (Iinoya, 1978; Aoki and Nagai, 1978).

$$E_r = \frac{6\pi\eta e}{\epsilon kT} u \quad (5)$$

$$y_0 = \frac{e}{kT} \zeta \quad (6)$$

25°C の希薄電解質溶液を考えると, $E_r=0.750u$, $y_0=0.0389\zeta$ と計算される. この関係は, たとえば, 電気泳動移動度 $u=4.0(\mu\text{m/s})/(\text{V/cm})$ のとき E_r は 3.0 となり, ゼータ電位 $\zeta=25\text{ mV}$ のとき y_0 が 1 となることを意味している. Wiersema の破線で示した曲線のうち, κR の値がおおよそ 1 以下の領域は電解質濃度が低いために電気泳動遅延効果や緩和効果が生じない部分であり, κR の値がおおよそ 1–30 の領域は, これらの二つの効果が著しく現れる部分である. 緩和効果や電気泳動遅延効果は, 換算ゼータ電位 y_0 が大きいほどその変化が顕著にあらわれる. 30 以上の κR の領域では, 粒子径が大きいためこれらの効果が生じない. Wiersema の解析では電解質濃度の増加に伴う電気二重層の圧縮効果は考慮されていないため, κR が 100 以上の大きな値での E_r の低下は表現されていない.

2. 実験方法

平均粒子径が 0.03, 0.1, 1.0, 4.3 および 9.6 μm のポリスチレン粒子 (5000, 7000 シリーズ, Duke Scientific Corporation) を用いた. 懸濁液の固体濃度を 10wt% とし, 各々のポリスチレン粒子の粒度分布測定を行った. 粒度分布測定にはレーザー回折/散乱式粒度分布測定装置 (LA-910, (株)堀場製作所) を用いた.

上述の 10 wt% の懸濁液を所定の濃度まで希釈し, スターラーで 10 分間攪拌した. 固体濃度の差異によるゼータ電位の変化は

極めて小さいため, 平均粒子径が 0.03 μm の粒子の場合には固体濃度を 0.10 wt%, 0.1, 1.0 および 4.3 μm の粒子の場合には 0.01 wt%, 9.6 μm の粒子の場合には 0.02 wt% にそれぞれ調製した. これらの懸濁液に対して, 以下に示す条件下で電気泳動移動度およびゼータ電位の測定を行った.

溶媒に純水を用いたときの電気泳動移動度およびゼータ電位の測定では, 懸濁液の pH を 4–11 および温度を 20–60°C に調整した. 電気泳動移動度およびゼータ電位の測定は Zetasizer Nano-Z (ZEN2600, MALVERN INSTRUMENTS) を用いて, レーザードップラー速度測定法により行った. pH 調整剤には HCl および NaOH を用いた. 1.0×10^{-5} –0.1 mol/dm³ の KNO₃ および LiNO₃ 溶液中に微粒子を懸濁させて, 電気泳動移動度およびゼータ電位の測定を行った. この場合, 懸濁液の pH は自然 pH, 温度は 25°C とした.

3. 実験結果および考察

電気泳動現象を調べるためのモデル粒子として, 平均粒子径が 0.03, 0.1, 1.0, 4.3 および 9.6 μm であるポリスチレンの球形粒子を用いた. 0.03 μm の粒子を除く粒度分布の測定結果を Figure 2 に示す. 各粒子のメジアン径はそれぞれ 0.09, 1.09, 4.36 および 10.09 μm であった. いずれの粒子も粒度分布幅が非常に狭く, メーカーが公表している平均粒子径の値と測定されたメジアン径はほぼ同じ値である. これらの粒子は水溶液中で分散した状態で存在していると考えられる.

懸濁液の温度と電気泳動移動度の関係を Figure 3 に示す. いずれの粒子径の場合でも, 温度の上昇とともに電気泳動移動度が増加している. 60°C の電気泳動移動度は 20°C のときより 1.3–2.0 倍増加した. 表面電荷密度および電気二重層の厚さの逆数を Eqs. (7) と (8) に示す.

$$\sigma = 1.0 \times 10^{-8} u \eta \kappa \quad (7)$$

$$\kappa = \left(\frac{8\pi n e^2 z^2}{\epsilon kT} \right)^{0.5} \quad (8)$$

ここで σ は表面電荷密度 [C/m²], u は電気泳動移動度 [$\mu\text{m/s}$]

Table 1 Temperature dependence of viscosity and dielectric constant

T [K]	ϵ [F/m]	$(\epsilon T)^{0.5}$	η [Pa·s]
293	7.09×10^{-10}	4.56×10^{-4}	1.01×10^{-3}
313	6.48×10^{-10}	4.50×10^{-4}	0.66×10^{-3}
333	5.91×10^{-10}	4.44×10^{-4}	0.47×10^{-3}

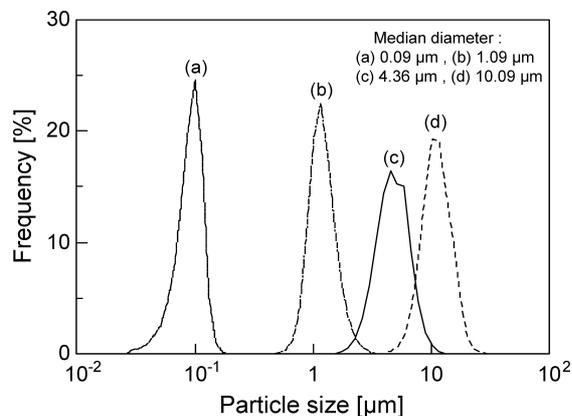


Fig. 2 Particle size distribution of polystyrene

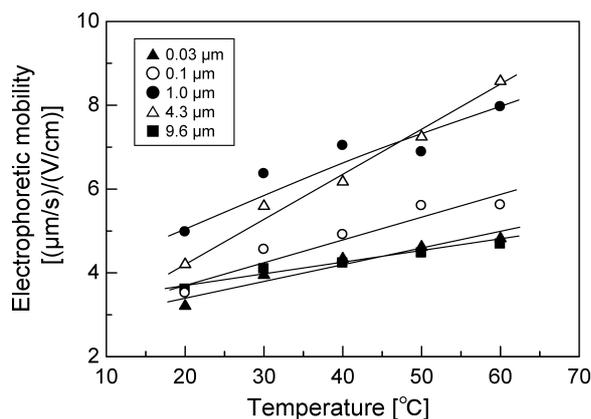


Fig. 3 Effect of temperature on electrophoretic mobility

(V/cm), η は溶媒の粘性率[kg/(m·s)], κ は電気二重層の厚さの逆数[m⁻¹], n はイオン密度[個/m³], e は電気素量[C], z はイオン価数[-], ϵ は溶媒の誘電率[C²/(J·m)], k はボルツマン定数[J/K]を示す。Equations (7) と (8) をまとめて u について整理すると, Eq. (9) となる。

$$u = 3.5 \times 10^7 \left(\frac{k\sigma^2}{\pi n e^2 z^2} \right)^{0.5} \cdot \frac{(\epsilon T)^{0.5}}{\eta} \quad (9)$$

Equation (9) の右辺で温度の関数として考えられるのは, $(\epsilon T)^{0.5}$ および η の項である。Table 1 に示すように, 293–333 K での $(\epsilon T)^{0.5}$ および η の計算結果から, $(\epsilon T)^{0.5}$ の項はこの温度域で約 4.5×10^{-4} の一定値を示すのに対して, η の項には約 2 倍の差が生じていることがわかる。すなわち, 温度の上昇に伴う電気泳動移動度の増加は, 主として溶媒の粘性率の変化に基づくものと考えられる (Aoki and Nagai, 1978)。

懸濁液の pH と電気泳動移動度の関係を Figure 4 に示す。pH が高くなるほど電気泳動移動度は増加した。ポリスチレン粒子は負

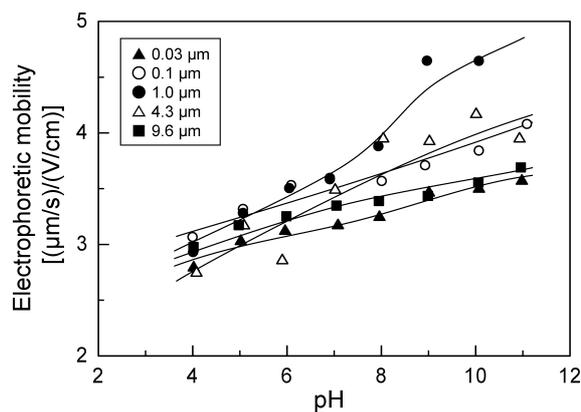


Fig. 4 Effect of pH on electrophoretic mobility

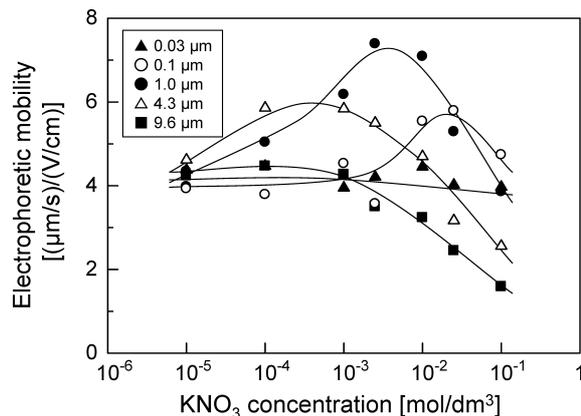


Fig. 5 Effect of KNO₃ concentration on electrophoretic mobility

に帯電し, 高 pH 領域ではプロトンの脱離が進んだためであると考えられる。pH4 付近の領域に比べて, pH10 以上の領域の方が粒子径の違いによる電気泳動移動度の差が大きい (Kitahara *et al.*, 1995)。

電解質として KNO₃ 溶液を用いたときの電解質濃度と電気泳動移動度の関係を Figure 5 に示す。0.03 μm の粒子の電気泳動移動度は KNO₃ 濃度によらずほぼ一定の値を示し, 0.1, 1.0 および 4.3 μm の粒子の電気泳動移動度は上に凸の形状となり, 9.6 μm の粒子では KNO₃ 濃度の増加に伴って減少する傾向を示した。電気泳動移動度におよぼす電解質濃度の影響は, 粒子径によって異なることがわかる。

いずれの粒子径の場合でも, 粒子の電気泳動移動度は, KNO₃ 溶液 0.001–0.1 mol/dm³ の領域では, 電解質濃度の増加に伴って減少する傾向を示す。本系では pH 調整を行っていないことから, 懸濁液中に存在するイオン数は電解質濃度に比例すると考えてよい。Eq. (8) より室温の水溶液では, κ の値は Eq. (10) となる。

$$\kappa = \frac{zc^{0.5}}{3 \times 10^{-10}} \quad (10)$$

ここで, c は電解質濃度[mol/dm³]である。電気二重層の厚さ κ^{-1} は $c^{0.5}$ の逆数に比例する。電解質濃度が高くなるとポリスチレン粒子の周りのイオン数が増加するため, 電気二重層が圧縮され, ゼータ電位の絶対値が減少する。Figure 5 の結果はこのような現象に基づくものと考えられる。一方, 0.03 μm の粒子の電気泳動移動度は KNO₃ 濃度に関係なく, ほぼ一定であった。懸濁液中の同じ固体濃度では, 小さい粒子は大きい粒子に比べて数多く存在

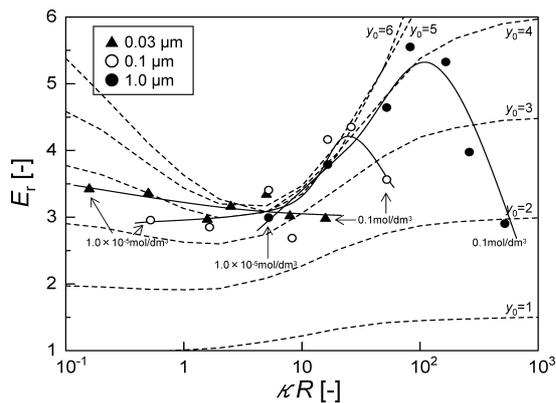


Fig. 6 Relationship between E_r and κR

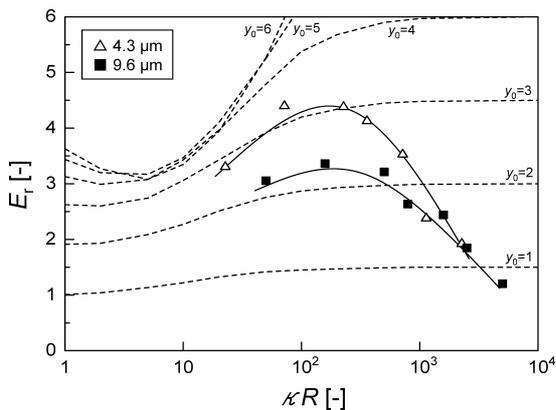


Fig. 7 Relationship between E_r and κR

するために、小さい粒子の方が一個あたりの粒子近傍に存在する K^+ および NO_3^- イオンの数が相対的に少なくなり、その結果として電気二重層の圧縮が起こりにくくなったためであると考えられる。0.03 μm 粒子のような超微粒子では、より高い電解質濃度で電気二重層の圧縮がおこると考えられる。

平均粒子径が 0.03, 0.1 および 1.0 μm の粒子の κR と換算電気泳動移動度 E_r の関係を Figure 6 に示す。各点は実験値から得られた換算電気泳動移動度であり、破線は Wiersema による計算値を示す。各粒子径について κR が最大となる点は電解質濃度 0.1 mol/dm³ に位置し、 κR が最小となる点は電解質濃度 1.0×10^{-5} mol/dm³ に位置する。平均粒子径が 0.03, 0.1 および 1.0 μm である粒子の換算電気泳動移動度の実験データは、各粒子径について κR が最大となる点付近で破線から大きくそれる挙動を示した。一方、各粒子径の最大 κR 値以下の領域では、換算電気泳動移動度は破線に沿った挙動を示した。この領域では、0.03, 0.1 および 1.0 μm の粒子は緩和効果および電気泳動遅延効果の影響を受けるものと考えられる。緩和効果および電気泳動遅延効果が生じる程度は κR の値によって変化するが、 KNO_3 濃度 0.1 mol/dm³ 付近では電気二重層の圧縮による電気泳動移動度の減少の方が支配的であると考えられる。平均粒子径 0.03 および 0.1 μm に対する κR は 100 未満であることから、いかなる KNO_3 濃度であっても緩和効果および電気泳動遅延効果が顕著に現れる領域である。

4.3 および 9.6 μm の粒子の κR と E_r の関係を Figure 7 に示す。換算電気泳動移動度は破線に類似しない挙動を示し、電解質濃度が高くなるほど、換算電気泳動移動度は大きく低下した。この場合には、粒子径が大きいため電解質濃度が低くても κR が 100 以

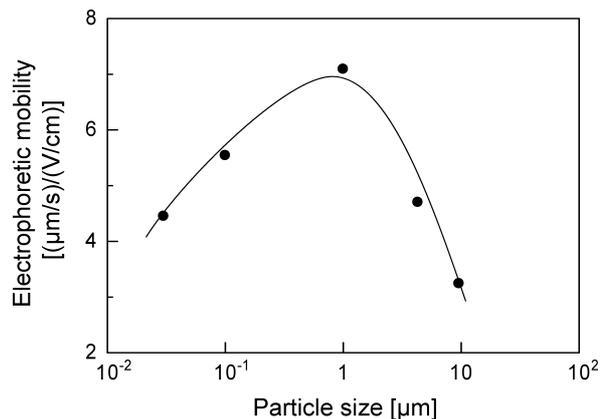


Fig. 8 Relationship between particle size and electrophoretic mobility

上となり、緩和効果および電気泳動遅延効果の影響が無視できる領域となる。このために、換算電気泳動移動度の減少は電解質濃度の増加による電気二重層の圧縮に起因すると考えられる。すなわち、電気泳動移動度を与える緩和効果および電気泳動遅延効果の影響は小さく、電気二重層の圧縮による影響の方が支配的であると考えられる。

Figure 5 の KNO_3 溶液 0.01 mol/dm³ での粒子径と電気泳動移動度の関係を Figure 8 に示す。1.0 μm 付近に最大値を持つ傾向が見られた。Figure 8 で見られた現象と Eq. (4) をあわせて考えると、粒子径が 1.0 μm 以下の領域では、緩和効果や電気泳動遅延効果の項 X の影響が表れる領域、すなわち粒子径が小さいほど X の値が大きくなり、その結果として粒子の移動速度が粒子径に反比例するという関係から外れるものと思われる。一方、粒子径が 4.3 μm 以上の領域では、緩和効果や電気泳動遅延効果が無視できるようになる。すなわち、 X の値が小さくなると考えれば、移動速度は粒子径に反比例すると考えられる。このような理由から粒子径 1.0 μm 付近で最大の電気泳動移動度となる挙動を示したと考えられる。1 μm 以下の領域に限れば、粒子径と電気泳動移動度は比例関係であり、分級操作として適用可能であると考えられる。

KNO_3 および $LiNO_3$ 溶液の種類と電気泳動移動度の関係から、電気泳動遅延効果について検討した。Li⁺ は K⁺ よりも水和分子数が多いことが知られている。0.03, 0.1 および 1.0 μm の粒子について、 KNO_3 濃度 および $LiNO_3$ 濃度から算出した κR と E_r の関係を Figure 9 に示す。 κR が 100 以下のとき、 KNO_3 および $LiNO_3$ 溶液のいずれの場合も、破線に沿った挙動となった。0.03 μm の粒子のとき、 1.0×10^{-5} –0.1 mol/dm³ の濃度で $LiNO_3$ 溶液を用いた時の方が KNO_3 溶液より電気泳動移動度は小さくなった。0.1 μm の粒子のとき、0.1 mol/dm³ 付近の濃度で $LiNO_3$ 溶液を用いたときの方が KNO_3 溶液より電気泳動移動度は小さくなった。1.0 μm の粒子のときには、 $LiNO_3$ 溶液を用いたときの電気泳動移動度は KNO_3 溶液のときとほぼ等しい値であった。粒子径が大きくなると、電気泳動移動度は電解質の種類による差異が生じなくなった。

電解質の種類による電気泳動移動度の差には、Li⁺ と K⁺ の水和分子数の違いが関係していると考えられる。圧縮率測定による Li⁺ と K⁺ の水和数は 6.7 および 3.2 である (Miyahara, 1976)。Li⁺ と K⁺ はどちらも一価の陽イオンであることから、ポリスチレン粒子の周りには同じ数のイオンが存在していると考えられる。水和分子数の多い Li⁺ が対イオンとして粒子近傍に存在しているときには、粒子の電気泳動とは逆方向に Li⁺ および水和水が移動し、電気泳動遅延効果が強く現れると考えられる。粒子径が小さくなる

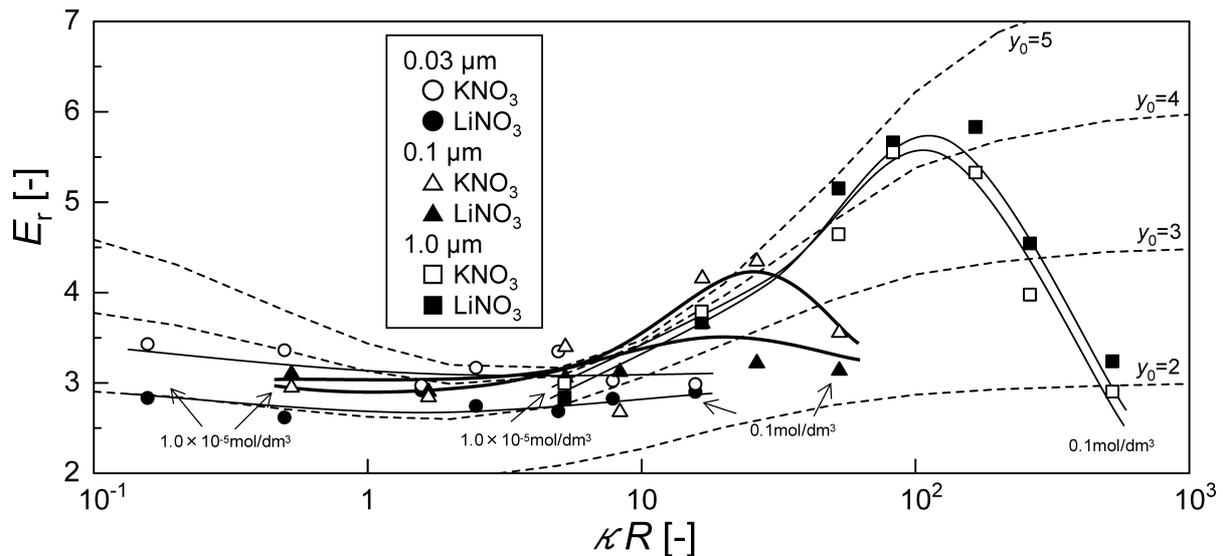


Fig. 9 Comparison between KNO₃ and LiNO₃ solution for E_r vs κR

ほど、電解質の種類による差が大きくなったことから、電気泳動遅延効果は粒子径に強く関係すると思われる。このような現象は、微小粒子には電気泳動遅延効果や緩和効果が存在することを証明するものである。

結 言

異なる粒子径を持つポリスチレン粒子の電気泳動移動度およびゼータ電位を測定して、粒子の電気泳動移動度およびゼータ電位に及ぼす温度、pH、電解質濃度および電解質の種類の影響を検討した。粒子径と電気泳動移動度の関係を実験より確かめた。

(1) 各粒子径の電気泳動移動度は温度が高くなるほど大きくなる。温度の増加に伴って ε および η が変化するが、粒子に作用する粘性抵抗力が小さくなることが主たる要因である。

(2) 各粒子の電気泳動移動度は pH が高いほど大きくなる傾向を示し、高 pH 領域で粒子径の違いによる電気泳動移動度の差はより顕著になる。

(3) 電気泳動移動度に対する KNO₃ 濃度の影響は、粒子径によって異なる。電気泳動移動度は粒子径によって変化し、1.0 μm 付近で最大の電気泳動移動度となる挙動を示す。粒子径が 1.0 μm 以下の領域では、緩和効果や電気泳動遅延効果の影響が顕著になるために、電気泳動移動度は粒子径が小さくなるほど低下する。

(4) 陽イオンの種類の違いによって電気泳動移動度が変化する現象には、陽イオンの水和分子数が関連している。このことは、微小粒子には電気泳動遅延効果や緩和効果が作用することを証明するものである。

[謝 辞] この研究は、平成 17 年度科学研究費補助金・基盤研究 (A) (17206091) の助成金により行われた。ここに感謝の意をあらわします。

Nomenclature

c	= Electrolyte concentration	[mol/dm ³]
D_p	= Particle diameter	[m]
e	= Elementary charge	[C]
E	= Electric field	[V/m]
E_r	= Reduced electrophoretic mobility	[-]
k	= Boltzmann constant	[J/K]

n	= Ionic density	[個/m ³]
q	= Quantity of electricity	[C]
T	= Temperature	[K]
u	= Electrophoretic mobility	[($\mu\text{m/s}$)/(V/cm)]
v	= Velocity	[m/s]
X	= Parameter relating electrophoretic retardation effect and relaxation effect	[N]
y_0	= Reduced zeta potential	[-]
z	= Valency	[-]
ε	= Dielectric constant	[F/m]
σ	= Density of electric charge on surface	[C/m ²]
η	= Viscosity	[Pa·s]
κ	= Reciprocal number of thickness of electric double layer	[m ⁻¹]
ζ	= Zeta potential	[mV]

Literature Cited

- Aoki, K. and Y. Nagai; New Electrophoresis Method (Saishin Denkieidoho), pp.1-184, Hirokawasoten, Tokyo, Japan (1978)
- Higashitani, K.; "Other Chemical Analyses Necessary for Evolution of Powder," *J. Powder Technol. Japan*, **33**, 582-590 (1996)
- Iinoya, K.; Technology Handbook of Classification Apparatus (Bunkyo Soti Gijutsu Binran), Nihon Funtai Kogyokyoikai, pp.1-46, Sangyo Gijutsu Senta, Tokyo, Japan (1978)
- Kaga, A., E. Arai and K. Higashitani; "ζ-Potential of PSL Particles in Alcohol-Water Solutions." *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **19**, 1031-1037 (1993)
- Kitahara, A., K. Hurusawa, M. Ozaki and H. Ohshima; Zeta Potential-Physicochemistry of Interface of Fine Particle (Ze-ta Den-i Biryushikaimen no Butsurikagaku), pp.5-147, Scientist, Tokyo, Japan (1995)
- Miyahara, Y.; Theory of Solution (Yoekiron), pp. 38-40, Kodansha, Tokyo, Japan (1976)
- Nihon Kagakukai; Fundamental of Modern Interface Colloid Chemical (Gendai Kaimen Koroido Kagaku no Kiso), pp.27-35, Maruzen, Tokyo, Japan (2002)
- Radko, S. P., M. Stastna and A. Chrambach; "Capillary Zone Electrophoresis of Sub- μm -sized Particles in Electrolyte Solutions of Various Ionic Strengths," *Electrophoresis*, **21**, 3583-3592 (2000)
- Sasaki, H.; "Classification of Submicron Particle by Electrophoretic," *Kagaku Kogyo*, **43**, 592-599 (1992)
- Sasaki, H.; "New Classification Method of Ultrafine Particle," *Boundary*, **7**, 28-33 (1991)
- Sato, N.; "Size Separation of Fine Particle by Electrophoretic," *Fukui Kogyo Koto Senmon-gakko Kenkyukiyo*, **15**, 83-88 (1982)

Behavior of Fine Particles Present in Aqueous Solution in an Electric Field

Daisuke YAMASHITA, Ryo SHIBATA, Norihiro MURAYAMA and Junji SHIBATA

Department of Chemical, Energy and Environmental Engineering, Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, 3–3–35 Yamate-cho, Suita-shi, Osaka 564–8680, Japan

Keywords: Electrophoresis, Polystyrene, Fine Particle, Electrolyte Solution, Classification

The behavior in an electric field of fine particles present in aqueous solution was measured in order to apply the results to the classification of fine particles. The sample particles used were spherical polystyrene particles with average diameters of 0.03, 0.1, 1.0, 4.3 and 9.6 μm . Electrophoretic mobility and zeta potential of the particles were measured based on the principle of the laser Doppler effect.

The electrophoretic mobility was found to increase with increasing pH and temperature of suspensions, and to vary with electrolyte concentration and particle size. The electrophoretic retardation effect and relaxation effect were considered to explain the behavior of fine particles in an electric field by applying the electro-kinetic theory of Wiersema et al.

The forces acting on particles in an electric field are considered to be electrical force, friction force and other forces like relaxation effect and electrophoretic retardation effect which appear in ionic behavior. We found that the particle moving velocity depends on the particle size. When the particle size is less than 1 μm , the velocity increases with increasing the particle size. On the other hand, the velocity decreases with increasing in particle size when the particle size is larger than 1 μm . These phenomena can be explained by the forces acting on the fine particles in the electric field. The behavior can be applied to classification of fine particles.

~~~~~