

直流電場印加による水系シリカスラリーの沈降促進現象の解明

小池 風輝^{1*}, 伊藤 優¹, 北村 研太¹, 椿 淳一郎², 森 隆昌¹

Elucidation of Settling Enhancement Phenomenon during Applying a DC Electric Field to Aqueous SiO₂ Slurry

Fuki Koike^{1*}, Yu Ito¹, Kenta Kitamura¹, Junichiro Tsubaki² and Takamasa Mori¹

Received 27 February 2024; Accepted 3 April 2024

In our previous reports, it was shown that applying a DC electric field to an aqueous slurry can enhance the settling of particles. However, the mechanism of the particle settling enhancement by a DC electric field has not been fully elucidated. In this paper, we attempted to elucidate the mechanism by observing enhanced settling phenomena during applying a DC electric field to an aqueous SiO₂ slurry under various conditions, and by measuring particle diameters and pH before and after applying a DC electric field. As a result, it was found that particle settling enhancement phenomena when a DC electric field is applied to an aqueous SiO₂ slurry is caused by the particle-free region formed by electrophoresis, and its moving upward in the slurry due to the density flow generated by the horizontal density difference.

Keywords: Settling, DC electric field, Electrophoresis, Boycott effect.

1. 緒 言

沈降分離は固液分離操作の1つであり、ほかの固液分離操作と比較して分離に必要なエネルギーが少ない。そのため、古くから鉱山や各種化学工業をはじめ、用廃水処理などに広く用いられてきた[1]。

沈降分離操作においては、スラリー中に含まれる粒子が小さい場合、粒子の沈降が遅いため、分離に多大な時間がかかってしまう。そのため、微粒子を含むスラリーの沈降分離では、一般的に、凝集剤の添加によって粒子を凝集させることで粒子の沈降を速くしている[2,3]。しかし、分離プロセスで添加した凝集剤は分離後も残存するため、分離後の廃水や汚泥が環境や人体に悪影響をおよぼす可能性が懸念されている[2–4]。また、凝集剤が不純物となるために、分離回収した粒子の再利用を妨げている例もある[2–6]。

そこでわれわれは、分離対象の水系スラリーに凝集剤を添加せず、直流電場を沈降方向と垂直な方向に印加す

ることで、水中に懸濁する粒子の沈降を促進できることを報告してきた[7,8]。電場を利用して水中に懸濁する粒子の沈降を促進する研究はほかにも存在しており、たとえば、スラリー中の粒子の沈降方向に合わせて粒子が電気泳動するように直流電場を印加することで、水中粒子の沈降を促進させる方法[9,10]がある。しかし、この方法では、電気泳動によって電極上に堆積した粒子を取り除くための新たな機構が必要となる。

そのほかにも電解凝固[11,12]が広く研究されている。電解凝固は、電極から溶出した金属イオンを利用して粒子を凝集させることで、微粒子の沈降を促進させる方法である。この方法では、回収した粒子や溶媒に金属イオンが含まれてしまうため、凝集剤を添加した場合と同様に分離回収後の資源の有効利用の妨げとなる。これに対してわれわれが提案した方法では、電極に炭素板を用いているため、上記の金属イオンの残留の問題はなく、粒子の沈降を促進することができる。一方で、この電極材質の違いから、われわれが提案する方法においては電解凝固とは別の要因で粒子の沈降が促進されていることが示唆される。

前報[9,10]においてわれわれは、直流電場による沈降促進現象のメカニズムについて考察し、直流電場の印加によってスラリー中の粒子周りの電気二重層が変形し、形成された電気双極子間に作用する静電的な引力によって粒子が凝集することを考えた。同様に木村らの報告[13,14]でも、直流電場を粒子の沈降方向と垂直な方向に

¹ 法政大学大学院 理工学研究科
(〒 184-8485 東京都小金井市梶野町 3-7-2)
Graduate School of Science and Engineering, Hosei University
(3-7-2 Kajino-cho, Koganei, Tokyo 184-8485, Japan)

² 名古屋産業科学研究所
(〒 460-0008 愛知県名古屋市中区栄 2-10-19)
Nagoya Industrial Science Research Institute
(2-10-19 Sakae, Naka-ku, Nagoya, Aichi 460-0008, Japan)

* Corresponding Author fuki.koike.8y@stu.hosei.ac.jp

印加することによる沈降促進現象について検討しており、主な沈降促進メカニズムは粒子周りの電気二重層の変形による粒子の凝集であると考察している。しかし、直流電場による沈降促進メカニズムについてはまだ十分な検討がされていないのが現状である。

そこで本研究では、水系シリカスラリーを対象として、さまざまな電場印加条件下での沈降促進現象を観察すること、および、電場印加前後の粒子径と pH の測定を行うことで、直流電場を印加したときの沈降促進現象のメカニズムを明らかにすることを試みた。

2. 実験方法

2.1 スラリー調製

実験には水系シリカスラリーを使用した。シリカ粉末 (SO-C2, アドマテックス, 粒子径 0.4~0.6 μm , 密度 2.2 g/cm^3) をイオン交換水と粒子濃度が 0.1 vol% になるように混合した後、超音波ホモジナイザー (US-150T, 日本精機製作所, 定格出力 150 W, 発振周波数 20 kHz) を用いて 10 分間分散処理したものを実験用スラリーとした。調製したスラリーの温度は 21~25°C, pH は 5.6~5.7 であった。シリカ粒子の各 pH におけるゼータ電位は、レーザードップラー式電気泳動測定装置 (ゼータサイザー ナノ ZS, Spectris) で測定した。

2.2 さまざまな直流電場印加条件における沈降促進現象

2.1 のように調製したシリカスラリーに直流電場を 120 分間印加し、その間の清澄層/スラリー層界面高さ (以降、沈降界面高さとする) の経時変化を観察した。スラリーに直流電場を印加する装置の概要を Fig. 1 に示す。スラリーは両端に炭素電極を設置したアクリル製の矩形容器 (幅 3.5 cm (電極間距離に相当), 高さ 10 cm, 奥行き 5.0 cm) に高さ 8.0 cm まで流し込み、直流電場は交流安定化電源 (PCR500M, 菊水電子工業) を用いて印加した。印加する直流電圧は 5, 10, 15, 20, 25 V と変化させた。また、幅が異なる矩形容器を用いて、印加電圧を 15 V 一定として電極間距離を 3.5, 5.5, 7.5, 9.5 cm と変化させた。さらに、電界強度を 2.0 V/cm で一定として、Table 1 のように電圧と電極間距離をそれぞれ変化させて直流電場を印加した。

2.3 直流電場印加による pH の変化

Fig. 1 に示す装置で 2.1 のように調製したシリカスラリーに直流電場を 60 分間印加した後、スラリー中の pH を測定した。直流電場は交流安定化電源 (PCR500M, 菊水電子工業) を用い、直流電圧を 5, 10, 15, 20, 25 V として印加した。このとき、電極間距離はすべて 3.5 cm とした。pH は、コンパクト pH メーター (LAQUAtwin-pH-22, HORIBA) を用い、直流電場印加後に形成された清澄層とスラリー層からそれぞれスポイトで少量サンプルリングしたものを測定した。

2.4 直流電場印加を止めた後の沈降挙動

Fig. 1 に示す装置で 2.1 のように調製したシリカスラリーに直流電場を 60 分間印加した後、直流電場の印加を

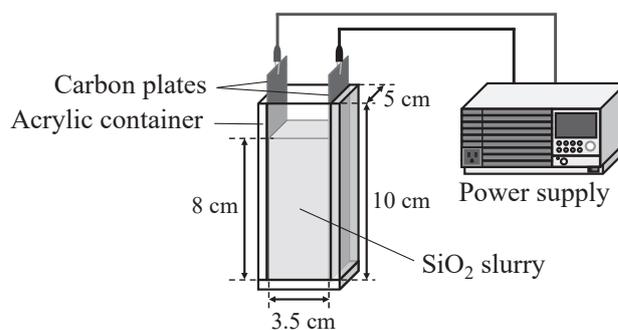


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus applying a DC electric field to SiO₂ slurry

Table 1 Summary of voltage and distance between electrodes for an electric field strength of 2.0 V/cm

Voltage [V]	7	11	15	19
Distance between electrodes [cm]	3.5	5.5	7.5	9.5

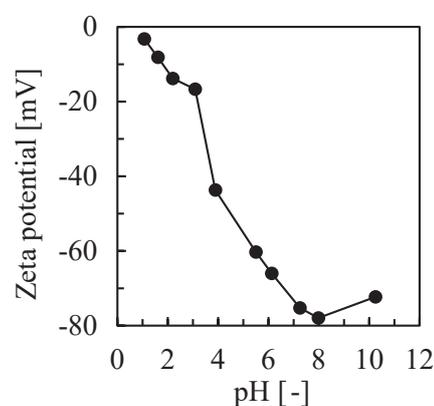


Fig. 2 Zeta potential of SiO₂ particle as a function of pH

止めてからさらに 60 分間静置し、その間の沈降界面高さの経時変化を観察した。直流電場は、交流安定化電源 (PCR500M, 菊水電子工業) を用い、直流電圧を 5, 10, 15, 20, 25 V として印加した。このとき、電極間距離はすべて 3.5 cm とした。

3. 実験結果

3.1 さまざまな直流電場印加条件における沈降促進現象

シリカ粒子のゼータ電位におよぼす pH の影響を Fig. 2 に示す。等電点は pH 1.0 付近であり、pH が大きくなると表面はより負に帯電するようになる。本実験で調製したシリカスラリーの pH は 5.6~5.7 であったため、ゼータ電位は約 -60 mV であることがわかる。

電極間距離を 3.5 cm 一定として電圧を変化させて水系シリカスラリーに直流電場を印加したときのスラリー外観の経時変化を Fig. 3 (a) に、沈降界面高さの経時変化を Fig. 3 (b) に示す。比較対象として、調製したスラリーに直流電場を印加せず、120 分間静置した場合の沈降界面高さの経時変化も示している。これらの図より、直流電

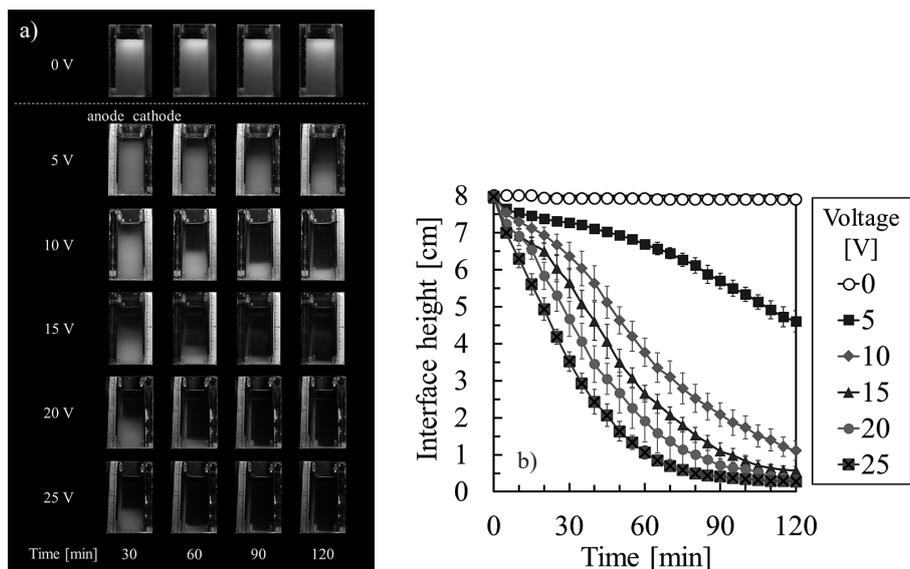


Fig. 3 Time changes of SiO₂ slurry during applying a DC electric field at different voltages. (a) Appearance. (b) Interface height between the supernatant and the slurry

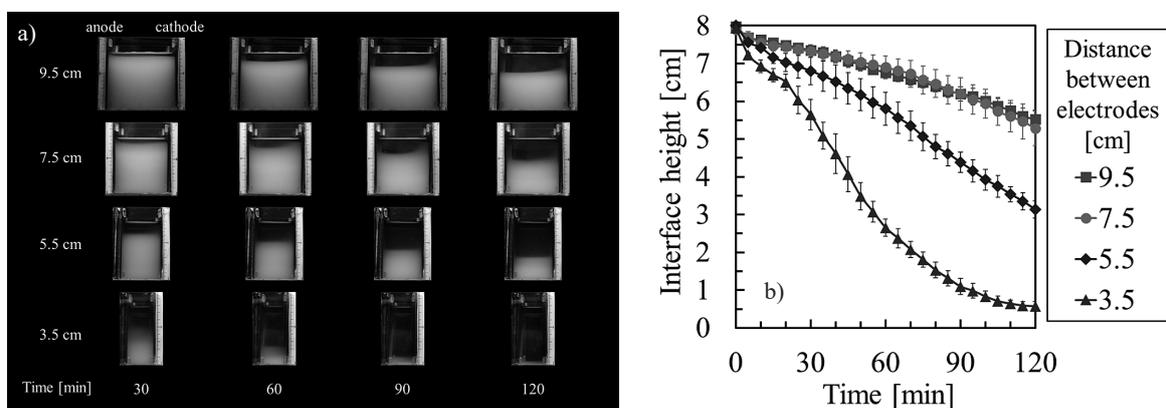


Fig. 4 Time changes of SiO₂ slurry during applying a DC electric field at different distance between electrodes. (a) Appearance. (b) Interface height between the supernatant and the slurry

場を印加しない場合、沈降界面高さは120分間で約0.10 cmしか下降しておらず、粒子の沈降はほとんど起こっていないことがわかる。本実験で用いたシリカ粒子について、粒子径を0.50 μm 、粒子密度を2.2 g/cm^3 、スラリー温度を25°Cとしてストークスの式から算出される沈降速度は約11 $\mu\text{m}/\text{min}$ であるため、シリカ粒子が分散して沈降した場合、120分間で約0.13 cmしか沈降界面は下降しない。このことから、直流電場を印加しない場合、シリカ粒子は分散して沈降したと判断できる。これに対して、スラリーに直流電場を印加した場合、すべての電圧で沈降界面の下降が速くなっていることがわかる。特に、電圧が大きいくほど、すなわち電界強度が大きくなるほど沈降界面の下降は速くなることがわかる。

次に、電圧を15 V一定として電極間距離を変化させて水系シリカスラリーに直流電場を印加したときのスラリー外観の経時変化を Fig. 4 (a) に、沈降界面高さの経時変化を Fig. 4 (b) に示す。これらの図より、電極間距離が狭いほど、すなわち電界強度が大きくなるほど沈降界面

の下降は速くなることがわかる。

さらに、電界強度を2.0 V/cm一定として、電圧と電極間距離をそれぞれ変化させて水系シリカスラリーに直流電場を印加したときのスラリー外観の経時変化を Fig. 5 (a) に、沈降界面高さの経時変化を Fig. 5 (b) に示す。これらの図より、電界強度一定の条件下においては、電圧を大きくするよりも電極間距離を狭くする方が沈降界面の下降は速くなることがわかる。

以上より、電界強度が大きくなるほど、水系シリカスラリーにおける直流電場印加による沈降促進現象は顕著になることがわかった。さらに、電界強度を大きくする際は、電圧を大きくするよりも電極間距離を狭くする方が沈降促進効果を向上させられることがわかった。

3.2 直流電場印加による粒子凝集の有無

前報[7]では、水系スラリーに直流電場を印加することで沈降界面の下降が速くなる現象は、粒子の凝集によるものだと説明していた。実際にアルミナスラリーでは、直流電場の印加を止めた後のスラリーの沈降試験から、

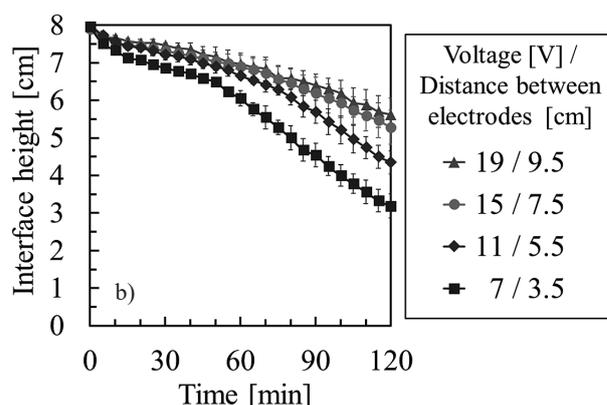
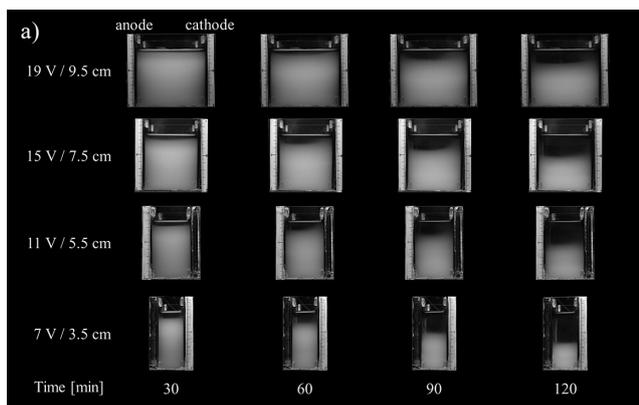


Fig. 5 Time changes of SiO₂ slurry during applying a DC electric field at constant intensity. (a) Appearance. (b) Interface height between the supernatant and the slurry

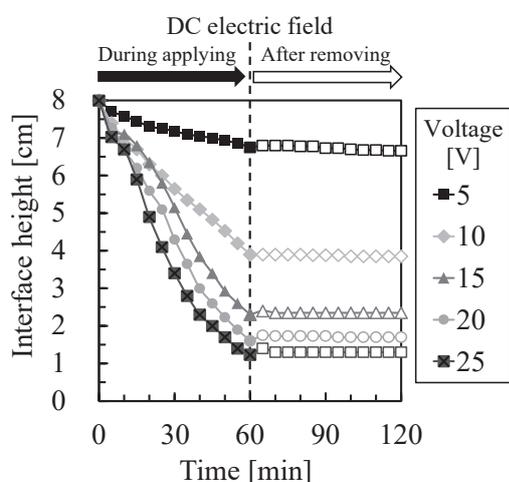


Fig. 6 Time changes of interface height during applying and after removing a DC electric field (solid mark: during applying DC, open mark: after removing DC)

粒子の沈降速度が一次粒子の沈降速度よりも大きくなっていることを確認した。

そこで、本実験のシリカスラリーについて、直流電場を60分間印加した後、直流電場の印加を止めてからさらに60分間静置し、その間の沈降界面高さの経時変化を観察した。直流電場の印加を止めた後のシリカスラリーの沈降界面高さの経時変化を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、直流電場の印加を止めた後、沈降界面の下降は急激に遅くなっていることがわかる。その速度はすべての電圧において 11 $\mu\text{m}/\text{min}$ 未満であり、これは先述した直流電場を印加しなかった場合のシリカスラリーの沈降速度と等しかった。したがって、今回使用した水系シリカスラリーにおいては、直流電場の印加を止めた後に粒子の凝集体は確認できなかったといえる。また、直流電場の印加を止めると、すべての印加電圧において同じ沈降速度となったことから、シリカスラリーにおいては電場印加中も粒子が凝集せずに沈降していたと考えられる。しかし、印加電圧が大きいほど沈降界面の下降は速くなった。以上のことから、シリカスラリーにおける直流電場印加によ

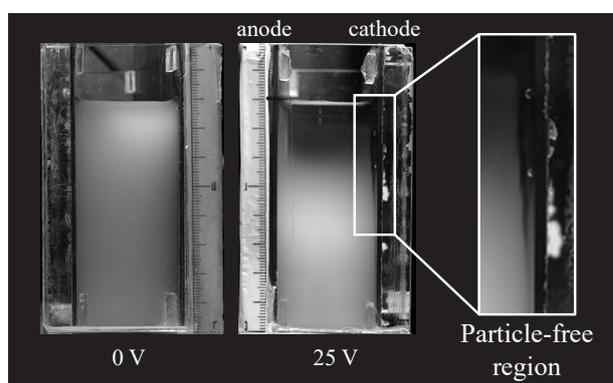


Fig. 7 Particle-free region appeared near the cathode

る沈降促進現象は粒子の凝集以外の要因が支配的となって起きていると考えられる。

4. 考 察

直流電場印加中のシリカスラリーの様子を観察していると、Fig. 7 に示すように、陰極近傍に透明度の高い領域が現れ、この領域の液が上方へ移動する様子が確認された。これは岡崎ら[15,16]の、常磁性粒子を含む懸濁液を入れた直立円筒に水平方向の磁場を印加すると、磁場によって粒子が水平方向に移動し、粒子が存在しない領域が形成され、この領域の液体が浮力（密度差）によって上昇するという報告と類似している。この報告の中では、磁場によって形成された粒子が存在しない領域の液体が上昇し、清澄層を形成することで沈降界面の下降が速くなるとしている。

そこで Fig. 8 に示すモデルで清澄層／スラリー層界面位置の経時変化を試算することとした。まず、シリカスラリーに直流電場を印加すると、シリカ粒子は今回の実験条件において負に帯電しているため、陽極に向かって電気泳動する。したがって、シリカスラリーに直流電場を印加すると、Fig. 7 に示したように、粒子の電気泳動によって陰極近傍には粒子がきわめて少ない透明な領域（以降、無粒子領域とする）が形成される。この無粒子領域は、スラリーと比較して密度が小さいため、容器内に

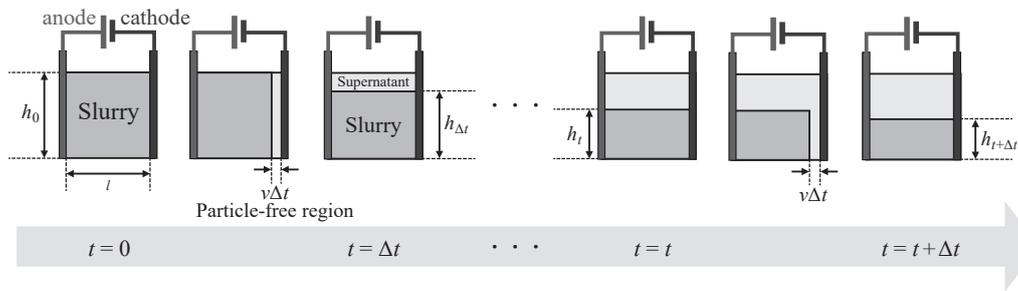


Fig. 8 Model of settling enhancement behavior under a DC electric field

は水平方向に密度差が生じる。すると、密度の大きいスラリーは下部へ、密度の小さい無粒子領域の液は上部へ移動する流れが発生し、上部に移動した無粒子領域の液が清澄層となる。その結果として、シリカスラリーに直流電場を印加すると沈降界面の下降が速くなると考えられる。

電気泳動によって形成された無粒子領域には粒子がまったく存在せず、形成された無粒子領域の液がすべて清澄層になるとし、微小時間 Δt の間に形成される清澄層の体積が、無粒子領域の液の体積と粒子の沈降によって形成された清澄層の体積の和として表せるとすると、以下の Eq. (1) が成り立つ。

$$A(h_t - h_{t+\Delta t}) = \frac{A}{l} h_t v \Delta t + A u_{\infty} \Delta t \quad (1)$$

ここで、 A [cm^2]は容器断面積、 l [cm]は電極間距離、 h_t [cm]は任意の時間 t における沈降界面高さ、 u_{∞} [cm/min]は粒子の自由沈降速度、 v [cm/min]は所定の電場印加条件における粒子の電気泳動速度である。この式を変形し、Eq. (2) のように積分した後、任意の時間 t における沈降界面高さ h_t について整理すると、Eq. (3) を導くことができる。

$$\int_{h_0}^{h_t} \frac{l}{v h_t + d u_{\infty}} d h_t = - \int_0^t d t \quad (2)$$

$$h_t = \left(h_0 + \frac{l}{v} u_{\infty} \right) \exp \left(- \frac{v}{l} t \right) - \frac{l}{v} u_{\infty} \quad (3)$$

ここで、 h_0 [cm]はスラリー投入高さである。

Eq. (3) を用い、水系シリカスラリーに直流電場を 120 分間印加したときの沈降界面高さの経時変化を算出し、実験で測定した沈降界面高さの経時変化と比較したものを Fig. 9 に示す。ここで、シリカ粒子の電気泳動速度 v は、実験用スラリー中のシリカ粒子の電気泳動移動度をレーザードップラー式電気泳動測定装置(ゼータサイザー ナノ ZS, Spectris) で測定した値 ($0.019 \text{ cm}^2/\text{V}/\text{min}$) と各実験条件における電界強度の積とした。また、シリカ粒子の自由沈降速度 u_{∞} は、直流電場印加を止めた後と無印加で沈降界面の下降速度に差が見られなかったことから、直流電場無印加の場合の沈降界面の下降速度 ($11 \mu\text{m}/\text{min}$) を用いて計算を行った。

Fig. 9 より、水系シリカスラリーに直流電場を 120 分間印加したときの界面位置の経時変化は、提案したモデルで定性的に説明できることがわかる。ここで、120 分

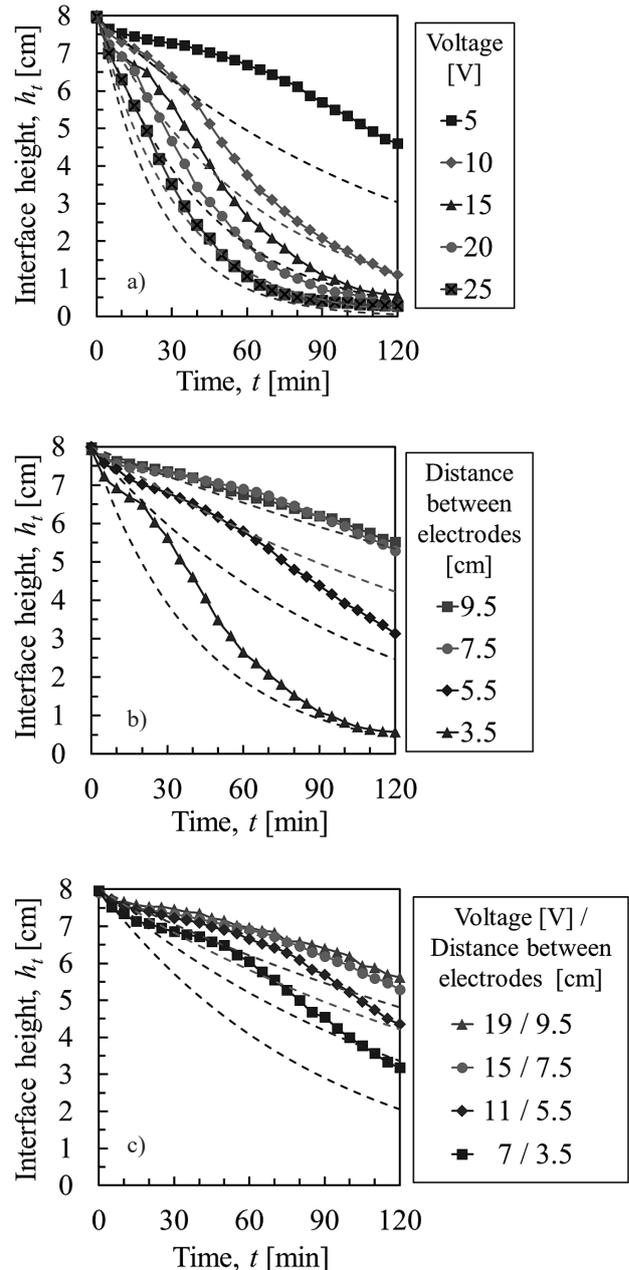


Fig. 9 Comparison of time changes of settling interface height between experiment (plots) and calculation (dotted lines). (a) Different voltages. (b) Different distance between electrodes. (c) Constant electric field intensity

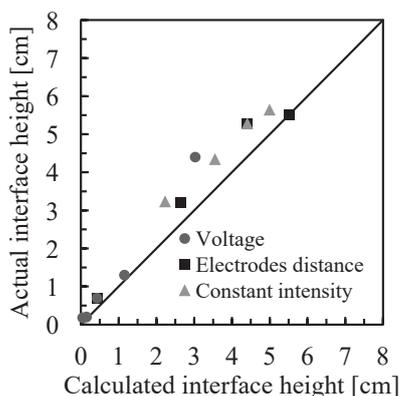


Fig. 10 Difference of the interface height after 120 min DC application between experiments and calculations

直流電場印加後の沈降界面高さのモデル式計算値を横軸、実測値を縦軸とした図を Fig. 10 に示す。Fig. 10 より、直流電場印加条件にかかわらず、沈降界面高さの実験値は計算値より常に高くなっていることがわかる。これは、モデルでは形成された無粒子領域の液がすべて清澄層になると仮定しているのに対し、実際は無粒子領域にスラリー中の粒子の一部が混入するためであると考えられる。無粒子領域への粒子の混入が起こる原因としては、スラリーと無粒子領域の粒子濃度差によるブラウン拡散や、無粒子領域の液が上方へ移動する流れでスラリー中の粒子の一部を巻き込んで舞い上げてしまうことなどが考えられる。実際にスラリーに直流電場を印加していると、Fig. 5 (a) の印加電圧 15 V、電極間距離 7.5 cm で直流電場を印加しているスラリーの外観に代表されるように、陰極側で粒子が舞い上がって界面が水平ではなくなっている様子が確認できる。無粒子領域の液が上方へ移動する際に粒子を舞い上げてしまう現象については、過去の Boycott 効果に関する研究でも同様の現象が報告されている[17,18]。Boycott 効果は、沈降時に傾斜板を挿入するなどして沈降界面積を増加させると沈降界面の下降速度が上昇する現象であり、傾斜板近傍に形成された清澄な液（本実験の無粒子領域に相当する）がスラリーとの密度差により上部に移動することが知られている。この清澄な液が上部へ流れる際に、粒子を舞い上げる場合があると報告されている。

したがって、今回のシリカスラリーに直流電場を印加した場合については、陰極近傍に形成された無粒子領域の液にスラリー中の粒子の一部が混入するため、沈降界面高さの実測値が計算値より高くなったと考えられる。

モデルによる計算結果から、Fig. 9 (a), (b) で示したように、電界強度が大きくなるほど沈降界面の下降が速くなったのは、電界強度の増加とともにシリカ粒子の電気泳動速度が増加し、単位時間に形成される無粒子領域の体積が大きくなった結果、単位時間に形成される清澄層の体積が増加したためであるといえる。さらに、Fig. 9 (c) で示したように、電界強度が一定の場合に電極間距離が狭いほど沈降界面の下降が速くなった原因は以下のよ

Table 2 Change and localization of pH by applying a DC electric field

Voltage [V]	After preparation pH: 5.6–5.7	
	Supernatant layer pH [-]	Slurry layer pH [-]
5	7.2	5.3
10	7.7	4.9
15	6.5	4.5
20	6.5	4.3
25	5.9	4.3

うに考えられる。電界強度が等しい場合は粒子の電気泳動速度も等しいため、単位時間に形成される無粒子領域の体積は変わらない。しかし、電界強度が等しい場合においても、電極間距離が狭くなると容器の断面積は小さくなるため、無粒子領域の液によって形成される清澄層の深さが大きくなる。したがって、等しい電界強度においては電極間距離が狭いほど沈降界面の下降が速くなる。

以上のように、電圧を変化させた実験、電極間距離を変化させた実験、電界強度一定で電圧・電極間距離をもに変化させた実験、いずれにおいても、水系シリカスラリーに直流電場を印加した時に沈降界面の下降が速くなる現象は、シリカ粒子の電気泳動により形成された無粒子領域の液が清澄層となることによって説明できる。したがって、シリカスラリーへの直流電場印加によって粒子が凝集していないにもかかわらず沈降界面の下降が速くなったのは、電気泳動によって形成される無粒子領域が水平方向の密度差によって上部に移動して清澄層になったことが原因といえる。

一方で、スラリーに直流電場を印加しているため、スラリーの温度が上昇し対流が起こることも要因として考えられる。しかし、本実験条件において 120 分間の直流電場印加によるスラリー温度の上昇は最大で 1.5°C であったため、温度による対流の影響は小さいと考えられる。

シリカスラリーに直流電場を印加したときに、電極近傍に無粒子領域が形成され、水平方向の密度差によって無粒子領域の液が上部に移動することは、直流電場印加によるスラリー中の pH 変化に影響をおよぼす。前報[9,10]では、水系スラリーに直流電場を印加してもスラリーの pH にほとんど変化がないことを確認した。しかし、これは直流電場印加後に清澄層とスラリー層の二層に分かれた容器内を攪拌し、清澄層とスラリー層を混合してから測定した pH であった。そこで本研究では、60 分間の電場印加後に全体を攪拌せず、清澄層とスラリー層それぞれの pH を測定した。その結果を Table 2 に示す。

Table 2 より、清澄層とスラリー層それぞれでは pH が異なることがわかる。清澄層の pH は調製直後と比較して大きくなっており、スラリー層の pH は小さくなっている。この pH 変化は、電極近傍で起きる水の電気分解反応と上記した液の移動によるものと考えられる。打越らの報告[19,20]より、水系スラリーに直流電場を印加すると、陽極近傍では O₂ と H⁺ が生成されることで低 pH

領域が形成され、陰極近傍では H_2 と OH^- が生成されることで高 pH 領域が形成されることがわかっている。一方で、先述した通り、今回の水系シリカスラリーでは直流電場を印加すると陰極近傍に形成された無粒子領域が容器上部に、陽極近傍に形成された濃縮層が容器下部に移動する。したがって、電極反応による pH 変化と無粒子領域および濃縮層の移動によって、Table 2 に示した pH 変化が生じたと考えられる。よって、スラリーの pH の測定結果および考察からも、直流電場の印加により無粒子領域が形成され、密度差によって清澄層が形成されたことが裏付けられる。

5. 結 言

本研究では、水系シリカスラリーにおけるさまざまな直流電場印加条件下での沈降促進現象の観察や、電場印加前後の粒子径や pH の測定を行うことで、直流電場を印加したときの沈降促進現象のメカニズムについて検討した。その結果、以下のような結論が得られた。

① 印加する直流電場の電界強度を大きくするほど、得られる沈降促進効果は大きくなる。また、電界強度を大きくする際には、電圧を大きくするよりも電極間距離

を狭くする方がより大きな沈降促進効果を得ることができると考えられる。

② 水系シリカスラリーへの直流電場印加による沈降促進現象は、電気泳動によって電極近傍に無粒子領域が形成され、水平方向に密度差が生じた結果、無粒子領域が上部に移動することが支配的となって起こる。

③ 直流電場の印加によって清澄層とスラリー層の pH が変化する。この pH 変化は、電極近傍における水の電気分解反応と、水平方向の密度差による無粒子領域および濃縮層の移動によって説明できる。

なお、本実験で示した無粒子領域の形成による沈降促進現象は、水中でシリカ粒子が帯電していることが要因で起こったものである。したがって、シリカ粒子以外の帯電粒子においても同様の沈降促進効果が現れると推定される。一方で、実験結果の項でも示したように水系アルミナスラリーでは直流電場印加後に粒子が凝集していることが確認されている[7]。そのため、どのような粒子やスラリー条件で直流電場による粒子の凝集の有無が変わるのかについては今後系統的な実験によって明らかにしていく予定である。

Nomenclature

A	: container cross-sectional area	[cm ²]	t	: time	[min]
l	: distance between electrodes	[cm]	u_{∞}	: free settling velocity of particles	[cm/min]
h_0	: initial interface height	[cm]	v	: electrophoretic velocity of particles	[cm/min]
h_t	: interface height at time t	[cm]			

References

- [1] Society of Powder Technology, *Ekisouchuu no Ryuushi Bun-san Gyoushuu to Bunri Sousa*, Nikkan Kogyo (2010) p.123.
- [2] C. S. Lee, J. Robinson, M. F. Chong, A review on application of flocculants in wastewater treatment, *Process Saf. Environ. Prot.* 92 (2014) 489–508.
- [3] V. Ajao, H. Bruning, H. Rijnaarts, H. Temmink, Natural flocculants from fresh and saline wastewater: Comparative properties and flocculation performances, *Chem. Eng. J.* 349 (2018) 622–632.
- [4] K. B. Dassanayake, G. Y. Jayasinghe, A. Surapaneni, C. Hetherington, A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges, *Waste Manage.* 38 (2015) 321–335.
- [5] H. Nakato, M. Nitta, R. Uchimura, H. Iinuma, H. Uesugi, Investigation of characteristics and pretreatment method of high purity silicon sludge filtrated from wastewater of silicon industry, *J. Japan Inst. Metals* 67 (2003) 562–568.
- [6] H. Itoh, *Resource recovery technology from industrial wastewater and solid wastes*, CMC Publishing Co., Ltd. (2010).
- [7] T. Mori, H. Nagashima, Y. Ito, Y. Era, J. Tsubaki, Agglomeration of fine particles in water upon application of DC electric field, *Miner. Eng.* 133 (2019) 119–126.
- [8] T. Mori, N. Iseki, Y. Ito, K. Kitamura, Thickening of aqueous nanoparticle suspension using DC electric field, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 648 (2022) 129387.
- [9] H. Yukawa, Y. Yusina, *Denkaiyorusurarinorenzokushi-kichinkounoushukuhou*, Kagaku Kogaku Ronbunshu 32 (1968) 81–88.
- [10] H. Yukawa, S. Ekawa, *Denkaiyokuwaetachinkoukyokusennosuiteihou*, Kagaku Kogaku Ronbunshu 32 (1968) 73–80.
- [11] M. M. Emamjomeh, M. Sivakumar, Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes, *J. Environ. Manage.* 90 (2009) 1663–1679.
- [12] S. Garcia-Segura, M. M. S. G. Eiband, J. V. de Melo, C. A. Martinez-Huitle, Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies, *J. Electroanal. Chem.* 801 (2017) 267–299.
- [13] H. Kimura, S. Takahashi, A. Tsuchida, Rapid sedimentation of poly(methyl methacrylate) spheres and montmorillonite particles in water upon application of a DC electric field of the order of a few V/mm, *Appl. Clay Sci.* 101 (2014) 623–625.
- [14] H. Kimura, A. Tsuchida, Sedimentation behavior of poly(methyl methacrylate) spheres in water upon application of a DC vertical electric field of the order of a few V/mm, *Powder Technol.* 320 (2017) 362–367.
- [15] M. Okazaki, A. Seiyama, K. Kon, N. Maeda, T. Shiga, Boycott effect with vertical cylinder for paramagnetic red blood cells under the inhomogeneous magnetic field, *J. Colloid Interface Sci.* 146 (1991) 590–593.
- [16] A. Seiyama, T. Shiga, *Ketsuekireoraji-niyoobosujibanokouka*, *J. Biorheol.* 9 (1995) 58–64.

- [17] R. H. Davis, Sedimentation of noncolloidal particles at low reynolds numbers, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 17 (1985) 91–118.
- [18] A. Acrivos, E. Herbolzheimer, Enhanced sedimentation in settling tanks with inclined walls, *J. Fluid Mech.* 92 (1979) 435–457.
- [19] K. Ishii, T. Uchikoshi, Microstructure control of ceramic functional membrane by electrophoretic deposition method and its application to oxygen separation membrane using mixed ionic-electronic conductor, *Powder Metall.* 68 (2021) 121–128.
- [20] M. Mishra, Y. Sakka, T. Uchikoshi, pH localization: A case study during electrophoretic deposition of ternary MAX phase carbide-Ti₃SiC₂, *J. Ceram. Soc. Japan.* 121 (2013) 348–354.