



Title	アルミニウム－ゼラチン系凝集剤によるカオリン凝集体の沈降速度とろ過特性
Author(s)	月村, 梨乃; Tsukimura, Rino; 関, 秀司 他
Citation	北海道大学水産科学研究彙報, 73(2), 55-61
Issue Date	2023-12-15
DOI	https://doi.org/10.14943/bull.fish.73.2.55
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/90928
Type	departmental bulletin paper
File Information	bull.fish.73.2.55.pdf



アルミニウム-ゼラチン系凝集剤によるカオリン凝集体の沈降速度とろ過特性

月村 梨乃¹⁾・関 秀司²⁾・丸山 英男²⁾

(2023 年 8 月 17 日受付, 2023 年 9 月 28 日受理)

Settling Velocity and Filtration Characteristics of Kaolin Floc Formed by Aluminum-Gelatin Composite Flocculant

Rino TSUKIMURA¹⁾, Hideshi SEKI²⁾ and Hideo MARUYAMA²⁾

Abstract

The flocculation ability of aluminum-gelatin (Al-GL) composite flocculant was examined with kaolin suspensions as functions of Al concentration (C_{Al}) and GL concentration (C_{GL}) at pH 6.5-7.5. The reagents were added separately to the kaolin suspension in order of Al solution, pH adjuster, and GL solution. The flocculation performance was evaluated in terms of the clarification efficiency (CE), the settling velocity (v) of kaolin floc on flocculation experiment, and the specific cake resistance (α) on filtration experiment. The settling velocity was determined by an *in-situ* measurement of transmitted light intensity through the kaolin suspension using a self-made apparatus. Based on the obtained parameters, CE, v , and α , the optimum conditions were found to be $C_{Al} = 0.5$ mM and $C_{GL} = 0.05$ g/L for the flocculation of kaolin suspension of 10 g/L.

Key words : Biodegradable flocculant, Aluminum, Gelatin, Kaolin, Clarification efficiency, Flocculation-filtration, Floc settling velocity

緒 言

排水の懸濁・浮遊物質 (SS) の除去処理は、通常、凝集沈殿法とろ過法の二段階プロセスによって行われる (山下, 2005; 渡辺・西村, 2006)。著者らは、環境に安全なアルミニウムミョウバンとゼラチンの併用による無機 SS (白陶土, 別名カオリン) の凝集分離に関する研究を行い、その凝集性能を液相の清澄度によって評価した。その結果、カオリン懸濁液にアルミニウムミョウバン溶液を添加し、pH 5-8 に調整した後にゼラチン溶液を添加すると高い凝集効果を示すことを見出した (月村ら, 2023)。

本研究は、アルミニウムミョウバンとゼラチンを併用した凝集剤 (Al-GL 系凝集剤) の性能について、カオリン懸濁液をモデル系とした凝集実験を行い、評価をすることを目的としている。そして、評価指標として凝集体の沈降速度と、ろ過実験における凝集体堆積層 (ケーキ) の比抵抗を採用した。

凝集体の沈降速度が速く、ケーキ比抵抗が小さければ SS の固液分離に要する時間を短縮可能であるため、処理プロセス全体のランニングコストの削減が期待される (Zhao et al., 2021)。また、低いケーキ比抵抗は、フィルターに堆積したケーキの通水性と脱水性が高いことを意味す

る。そのため、凝集沈殿物の減量・減容化による運搬コストや中間・最終処分コストの削減が期待される (Lee et al., 2009)。

そこで、円管の片側に 10 個の LED 光源、その対面に 6 本の光ファイバーを垂直方向に取り付けた沈降管を自作し、凝集体の沈降速度を測定した。光ファイバーは束ねて照度計に接続されており、沈降管全体の透過光強度を 2 秒間隔で記録することが可能である。この装置を用いて、界面を形成して沈降する凝集体群の沈降速度の測定を試みた。

そして、ろ過器の下にコンピューターに接続した電子天秤を置き、ろ過中のろ液質量を 2 秒間隔で記録可能な装置を自作し、凝集沈殿した SS 堆積層 (ケーキ) の比抵抗を求めた。はじめに、あらかじめ凝集させたカオリン懸濁液をろ過器に移し入れ、フィルター上に凝集体のケーキを形成させた後に重力ろ過を行った。それから、ろ液質量の経時変化に Ruth のろ過速度式を適用することによりケーキ比抵抗の決定を試みた。以上の方法で決定した凝集体の沈降速度と凝集体堆積層のケーキ比抵抗に加え、清澄度の結果を勘案することにより、Al-GL 系凝集剤を用いた凝集操作における最適条件について考察する。

¹⁾ 北海道大学大学院水産科学院水産資源開発工学講座
(Laboratory of Marine Chemical Resource Development, Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University)

²⁾ 北海道大学大学院水産科学研究院水産資源開発工学分野
(Laboratory of Marine Chemical Resource Development, Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University)

試薬と実験方法

試薬

凝集剤として硫酸アルミニウムカリウムミョウバン 12 水和物 (富士フィルム和光純薬株式会社製, 一級) とゼラチン (富士フィルム和光純薬株式会社製, 一級), pH 調整剤として炭酸ナトリウム (富士フィルム和光純薬株式会社製, 特級) と 1 M 塩酸 (関東化学株式会社製, 容量分析用) を用いた。以下では, アルミニウムカリウムミョウバンを Al, ゼラチンを GL, pH 調整剤を PH と略記する。被凝集粒子にはカオリン (白陶土, 関東化学株式会社製) を用いた。カオリンの真密度は $2,610 \text{ kg/m}^3$, 粒度分布は $0.60\text{--}21.1 \text{ }\mu\text{m}$, モード径 (最大頻度径) は $2.87 \text{ }\mu\text{m}$, メディアン径 (50% 粒子径) は $4.40 \text{ }\mu\text{m}$ であった。その他の試薬は, 特記しない限り富士フィルム和光純薬工業株式会社製の特級試薬を使用し, すべての試薬の調製と実験に蒸留水を用いた。

清澄度の測定

カオリンを蒸留水に 12 時間以上浸漬し, 細孔の内部まで水を浸透させた懸濁液を用いた。この懸濁液をジャーテストで攪拌しながら, Al 溶液, PH 溶液および GL 溶液を加えて全容を 100 mL とし, 150 rpm で 5 分攪拌した後, 攪拌速度を 50 rpm に下げてさらに 5 分攪拌した。この懸濁液を 100 mL メスシリンダーに移し, 1 分間静置した後に深さ 10 cm から 3.5 mL の試料を採取した。これに数滴の 1 M 塩酸を加えてよく降り混ぜ, 凝集体を再分散させた後に 700 nm における吸光度 A_{700} を測定した。Al 溶液と GL 溶液を加えずに同じ手順で行った対照実験の吸光度を A_0 とし, 次式で定義した清澄度によって凝集効果を評価した。以下では, 清澄度を CE (Clarification efficiency) と略記する。

$$CE = 1 - A_{700}/A_0 \quad (1)$$

なお, 攪拌操作が終わり, 静置する前の懸濁液を凝集懸濁液とよび, これを凝集体沈降速度実験と凝集ろ過実験に用いた。

凝集体の沈降速度測定

凝集体の沈降速度測定に用いた装置の模式図を Fig. 1 に示す。沈降管として, 直径 28 mm, 高さ 225 mm の透明なポリメチルペンテン製メスシリンダーの頂部を約 10 mm 切り取ったものを用いた。その側面に LED 光源 10 個を 10 mm 間隔, その対面に光ファイバー 6 本を 20 mm 間隔で垂直方向に均等に取り付けた。これに, 黒い厚紙製の円筒を被せ, その頂部をゴム栓でふさぐことで外部光を遮断した。光ファイバーは一つに束ねてデータロガー付照度計 (株式会社 FUSO, YK-2005LX) に接続した。本装置の沈降管に 100 mL の液体を入れると, その高さは 185 mm となる。沈降速度実験では, 上述の凝集懸濁液を沈

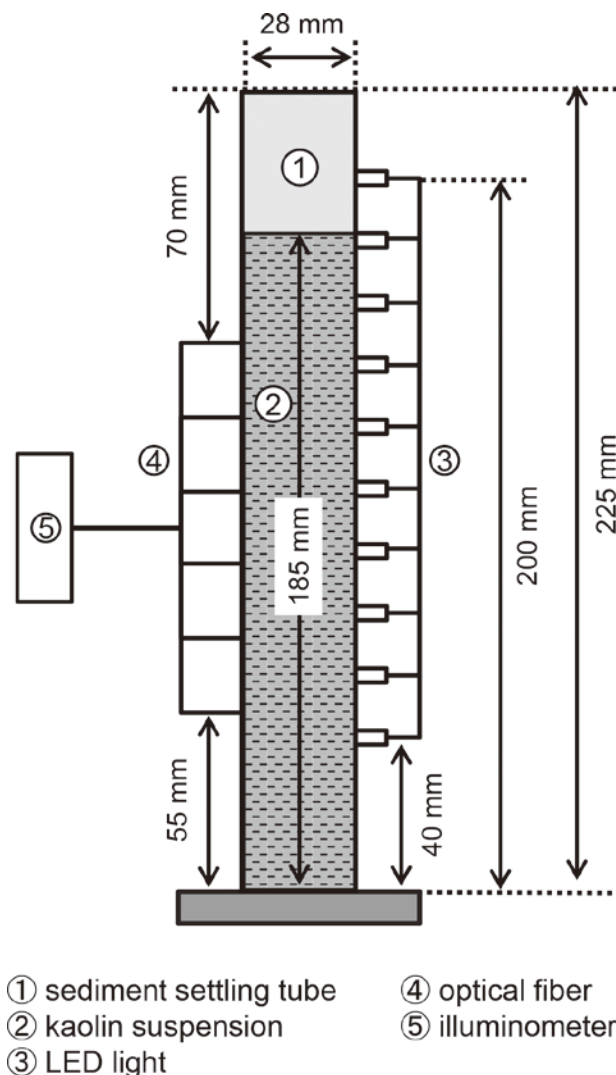


Fig. 1. Schematic diagram of the apparatus used for measuring settling velocity of kaolin floc.

管に移し入れ, その直後から照度の経時変化を 1 秒間隔で 10 分間記録した。

凝集ろ過実験

凝集体のろ過実験に用いた装置の模式図を Fig. 2 に示す。沈降速度測定装置と同じメスシリンダーの上下を切り取り, 下部に塩化ビニル製のフィルターホルダーを取り付けたものをろ過器として用いた。フィルターには ADVANTEC No. 2, 孔径 $5.0 \text{ }\mu\text{m}$ のろ紙を用いた。ろ過器をクランプでスタンドに固定し, その下にコンピュータに接続した電子天秤を置いてろ液の質量を測定した。ろ過実験では, はじめに排水口をシリコン栓で閉じたらろ過器に凝集懸濁液を移し入れ, 30 分静置して凝集体のケーキを形成させた。次に, ろ過圧力を算出するためにフィルターから液面までの高さを測定した。最後に, シリコン栓を外し, ろ液の質量が 60 g を超えるまで 2 秒間隔でろ液質量の経時変化を記録した。凝集剤を加えない対照

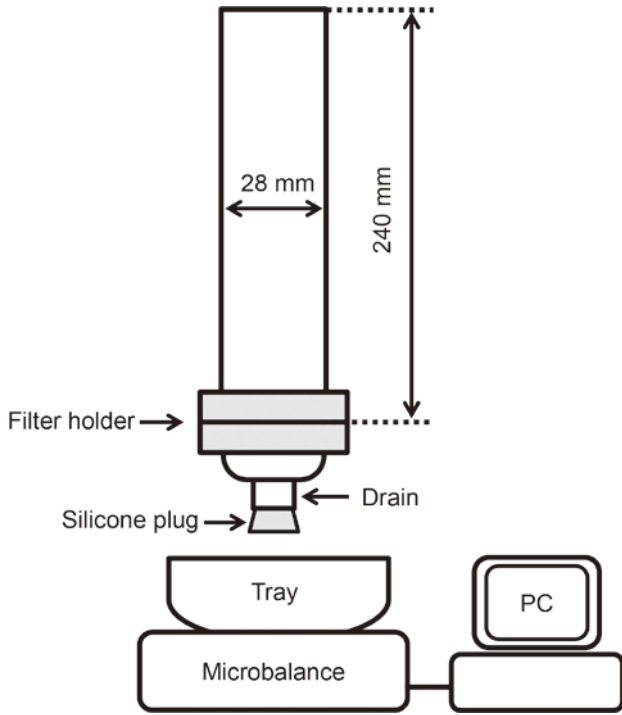


Fig. 2. Schematic diagram of the apparatus used for filtration experiment.

実験では、カオリンの沈降速度が非常に遅く 30 分ではケーキが形成されないため、24 時間静置した後に同様の操作を行った。同じ条件で実験を 3 回繰り返し、その平均値を用いて解析を行った。

ケーキ比抵抗の決定方法

ここでは、ろ過実験の結果からケーキ比抵抗を求める方法について述べる。ケーキ比抵抗 α [m/kg] は、フィルターに堆積した SS 単位質量当たりのろ過抵抗であり、ろ過工程に要する時間や凝集沈殿物の脱水性を評価する上で重要な指標となる。

Darcy の法則によれば、ろ液流速 u [m/s] は次式で表される。

$$u = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu R_T} \quad (2)$$

式中の記号は、 A [m²]：ろ過面積、 V [m³]：ろ液体積、 t [s]：ろ過時間、 ΔP [Pa]：ろ過圧力、 μ [Pa·s]：流体の粘度、 R_T [1/m]：全ろ過抵抗である。本実験では重力ろ過を行ったため、ろ液量の増加に伴って ΔP が低下するが、ろ過器の断面積 S [m²] が一様であれば ΔP を V の関数として表すことができ、式 (2) から次式を導くことが可能である。

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \rho g (h_0 - V/S)}{\mu R_T} \quad (3)$$

ここで、 ρ [kg/m³] は懸濁液の密度、 g [m/s²] は重力加速度、

h_0 [m] はろ過原液の初期高さである。ここで、ケーキが非圧縮性で実験中に R_T が変化しないと仮定し、式 (3) を $t = 0$ から t まで、 $V = 0$ から V まで積分すると次式が得られる。

$$\frac{\rho g A}{\mu S} t = R_T \ln \frac{h_0 S}{h_0 S - V} = R_T \ln \left(\frac{V_T}{V_T - V} \right) \quad (4)$$

V_T [m³] はろ過原液の初期体積である。式 (4) より、ケーキが非圧縮性であれば、 $(\rho g A / \mu S) t$ vs. $\ln[V_T / (V_T - V)]$ のプロットは原点を通る直線となり、その傾きから R_T が得られる。

R_T はフィルター抵抗 R_m とケーキ抵抗 R_c の和であり、次式で表される。

$$R_T = R_m + R_c \quad (5)$$

ここで、ろ過原液に SS が含まれない場合は $R_T = R_m$ となる。よって、ろ過実験と同じ装置を用いて水の透過実験を行い、その結果に式 (4) を適用すれば R_m を決定することが可能である。実験結果は示さないが、凝集実験に用いた ADVANTEC No.2 ろ紙に本法を適用した結果、式 (4) によく従い R_m 値は 1.13×10^9 [1/m] であった。

本実験では、凝集体がすべて沈降しケーキが形成された後にろ過を開始したため、実験中にケーキの質量は変化しない。よって、ケーキが非圧縮性であれば R_c は次式で表される。

$$R_c = \alpha \frac{C_{ss} V_T}{A} \quad (6)$$

ここで、 C_{ss} [kg/m³] はろ過原液の SS 濃度、 α [kg/m] はケーキ比抵抗である。式 (5) と (6) から導かれる次式により、 α 値を決定することが可能である。

$$\alpha = (R_T - R_m) \frac{A}{C_{ss} V_T} \quad (7)$$

結果と考察

沈降速度測定装置の特性

Fig. 1 に示した装置は、凝集体が明瞭な界面を形成して沈降する際に時間とともに広がる上澄みの透明部分の面積を透過光の強度によってモニタリングするために作製したものである。そこで、光の透過面積と透過光強度の相関関係を把握するために、沈降管に遮光材として珪藻土の粉末を入れて透過光の強度を測定した。この操作を、珪藻土の高さが沈降速度実験における凝集懸濁液の高さ h_0 に達するまで繰り返した。珪藻土は測定ごとに 4-6 g を精秤して沈降管に追加した。

これとは別に、沈降管に入れた珪藻土の質量と管底からの高さに関連付けるために、沈降管と同じメスシリンダーに珪藻土を入れたときの珪藻土の高さ h と質量 m の相関を求めた結果、相関式 $h = 0.193 m$ ($R^2 = 0.999$) が得られた。この相関式を用いて、沈降管に入れた珪藻土の質量を珪藻土層の高さに換算した。

沈降速度実験における液面から凝集体界面までの距離に相当する h_0-h と相対光強度 (I/I_0) の関係をプロットした結果を Fig. 3 に示す。ここで、 I_0 は沈降管を蒸留水で満たしたときの光強度である。Fig. 3 から、光ファイバーを取り付けた $h_0-h=30-130$ mm の範囲において、 h_0-h と I/I_0 の間に強い相関 ($R^2=0.989$) が認められた。

Fig. 4 に、カオリン濃度 10 g/L で行った沈降速度実験の結果の一例を示す。 I/I_0 が時間とともにほぼ直線的に上昇したことから、生成した凝集体が明瞭な界面を形成し、等速で沈降したことが示唆された。また、 I/I_0 vs. t のプロットが直線性を示したことにより、その傾きから凝集体の界面沈降速度が得られた。

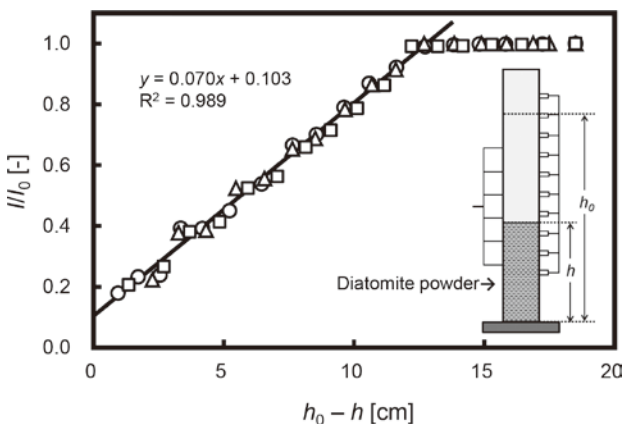


Fig. 3. Relationship between the relative light intensity I/I_0 and light transmission area of the sediment settling tube, h_0-h . Diatomite powder was used as a shading material. I_0 represents the light intensity in the absence of diatomite powder. h_0 represents the height of the surface of 100 mL liquid column in the tube, 185 mm. h represents the height of diatomite packed in the tube.

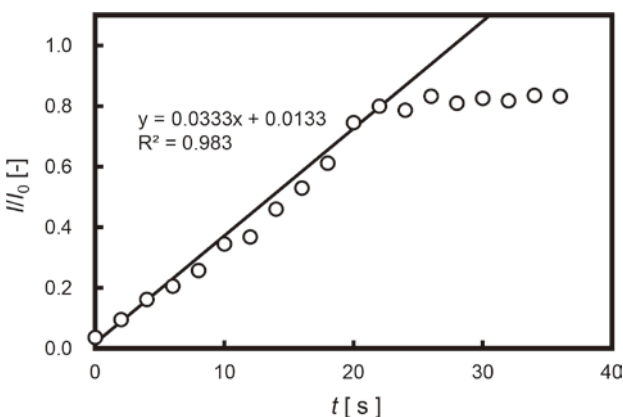


Fig. 4. Typical result of sediment settling experiment using the apparatus shown in Fig. 1 at pH 6.5–7.5. The concentrations of kaolin, Al, and GL were 10 g/L, 0.5 mM, and 0.25 g/L, respectively. The data are shown for $I/I_0 = 0-0.8$.

凝集体の沈降速度と Al 溶液および GL 溶液の添加量

カオリン濃度 10 g/L, pH 6.5–7.5 において、Al 濃度 (0.5–3.0 mM) と GL 濃度 (0–0.2 g/L) を実験変数として行った沈降速度実験の結果を Fig. 5 に示す。Al 濃度 0.5 mM では GL 濃度 0.05 g/L まで、Al 濃度 1.0 mM, 2.0 mM, 3.0 mM では GL 濃度 0.1 g/L まで沈降速度が上昇したが、それ以上に GL 濃度を上げると沈降速度は低下した (Fig. 5a)。

Fig. 5b は、Fig. 5a の GL 濃度 0.05 g/L 以下の範囲を拡大したものである。この図から、GL 濃度 0.05 g/L 以下では GL 濃度の上昇とともに沈降速度が直線的に上昇する傾向が見てとれる。Fig. 5b の実線は回帰直線であり、 $R^2 = 0.96-1.00$ の高い相関が得られた。Fig. 5b の直線の傾きは、GL 濃度が沈降速度に及ぼす影響の強さの指標であり、傾きが大きいほど GL 濃度の影響が強いことを意味する。そこで、GL 濃度の影響の強さと Al 濃度の関係について検討するために、Fig. 5b の直線の傾きと Al 濃度の関係をプロットした結果を Fig. 6 に示す。これらの間には $R^2 = 0.97$ の比較的強い負の相関があり、Al 濃度が上がると GL 濃度の影響が弱くなることが示された。以上の結果から、Al 濃度が低い場合は Al と GL が協働することでサイズが大きく沈降速度の速い凝集体が生成するが、Al 濃度が高

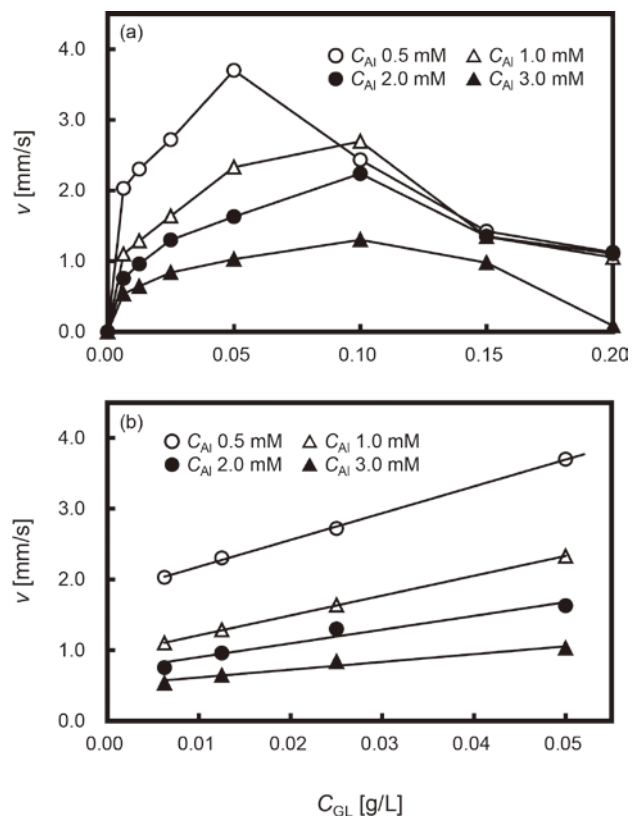


Fig. 5. Settling velocity of kaolin floc v as functions of C_{Al} and C_{GL} at pH 6.5–7.5. Concentration of kaolin was 10 g/L (Fig. 5a). Fig. 5b is a partial enlarged view of Fig. 5a at $C_{GL} < 0.05$ g/L.

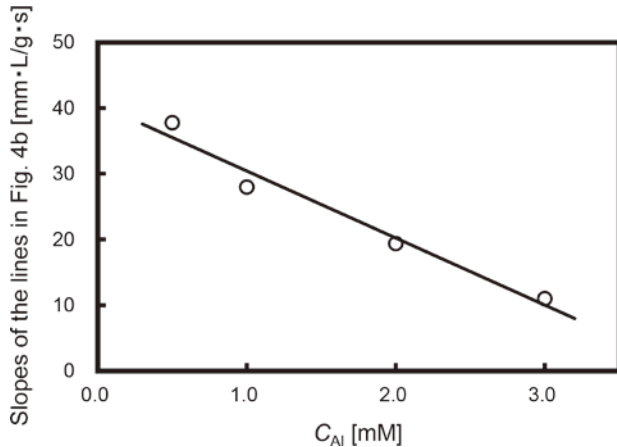


Fig. 6. Slope of the lines shown in Fig. 5b as functions of C_{Ai} and C_{GL} . Concentration of kaolin was 10 g/L.

くなると Al 水和物による凝集作用が支配的になる。そのため、PAC (ポリ塩化アルミニウム) や硫酸バンド (硫酸アルミニウム) などの Al 化合物を単独で凝集剤に用いた場合と同様に、サイズが小さく沈降速度の遅い凝集体が生成すると推察した。

ケーキ比抵抗と Al 溶液および GL 溶液の添加量

ろ過実験の結果の一例を Fig. 7a に、これに式 (4) を適用した結果を Fig. 7b に示す。この実験は、カオリン濃度を 10 g/L、Al 濃度を 0.5 mM とし、GL 濃度は 0.025 g/L (○) と 0.15 g/L (△) で行った。ろ過速度がかなり異なる実験結果であるが、いずれも式 (4) による解析結果が原点を通る直線となったことから、ろ過実験の結果が Darcy の法則によく従うこと、また、ケーキが非圧縮性で実験中に R_T が変化していないことが検証された。よって、この解析法により α 値を決定することが可能であると判断した。そこで、凝集ろ過実験に先立ち、Al 溶液と GL 溶液を添加せずに対照実験を行い、その結果に本法を適用して決定したカオリンのみのケーキの α 値は 1.97×10^{11} m/kg であった。以下、この値を α_0 とする。

カオリン濃度 10 g/L、pH 6.5-7.5 において、Al 濃度 (0.5-3.0 mM) と GL 濃度 (0-0.2 g/L) を実験変数としたろ過実験を行い、その結果から求めた α 値と GL 濃度の関係を Fig. 8 に示す。Al 溶液単独 ($C_{GL} = 0$) でも α 値が対照実験の約 1/2 に低下したが、これに GL 溶液を併用すると α 値がさらに低下した。その傾向は Al 濃度が低いほど顕著であり、Al 濃度 0.5 mM では GL 濃度 0.0125-0.050 g/L で対照実験における α 値の 1/17 (1.1×10^{11} m/kg) まで低下した。この結果により、凝集ろ過操作における Al-GL 系凝集剤の有効性が実証されたものと評価した。

清澄度、沈降速度およびケーキ比抵抗による性能評価の相関性

カオリン濃度 10 g/L、Al 濃度 0.5 mM、pH 6.5-7.5 にお

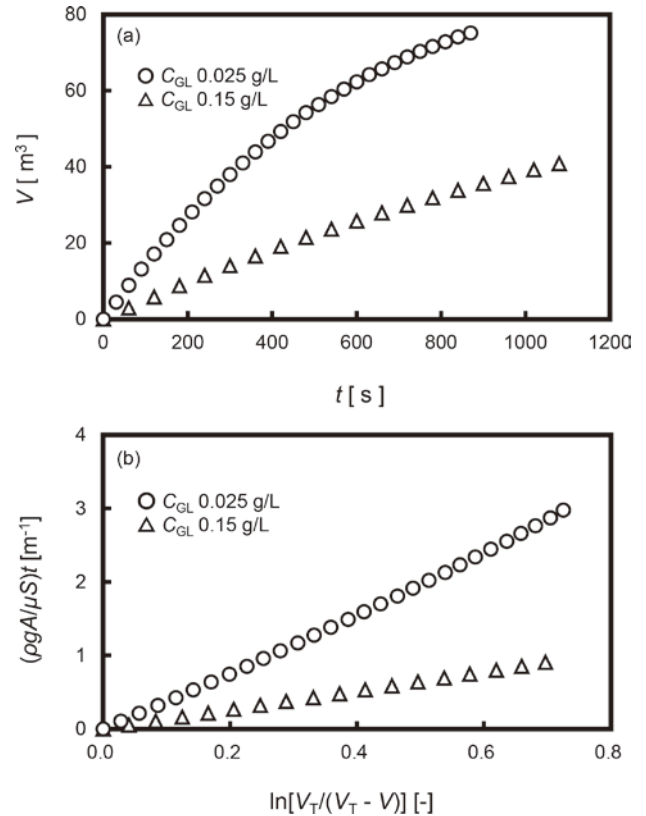


Fig. 7. Typical results of filtration experiment using the apparatus shown in Fig. 2 at pH 6.5-7.5. The concentrations of kaolin and Al were 10 g/L and 0.5 mM, respectively. The concentration of GL was 0.025 (○) and 0.15 (△) g/L (Fig. 7a). Fig. 7b shows the fitting of the data in Fig. 7a to Eq. (3).

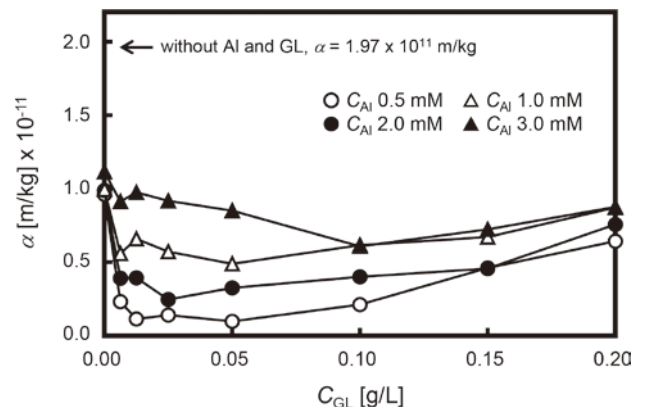


Fig. 8. Specific cake resistance of kaolin floc as functions of C_{Ai} and C_{GL} at pH 6.5-7.5. Concentration of kaolin was 10 g/L.

いて、GL 濃度を実験変数として行った凝集実験における清澄度 CE [-] (○) と Fig. 5 に示した凝集体の沈降速度 v [mm/s] (●) の比較を Fig. 9a に示す。pH 6.5-7.5 は著者らのこれまでの研究における最適 pH であり (月村ら, 2023), Al 濃度 0.5 mM は本研究において沈降速度とケー

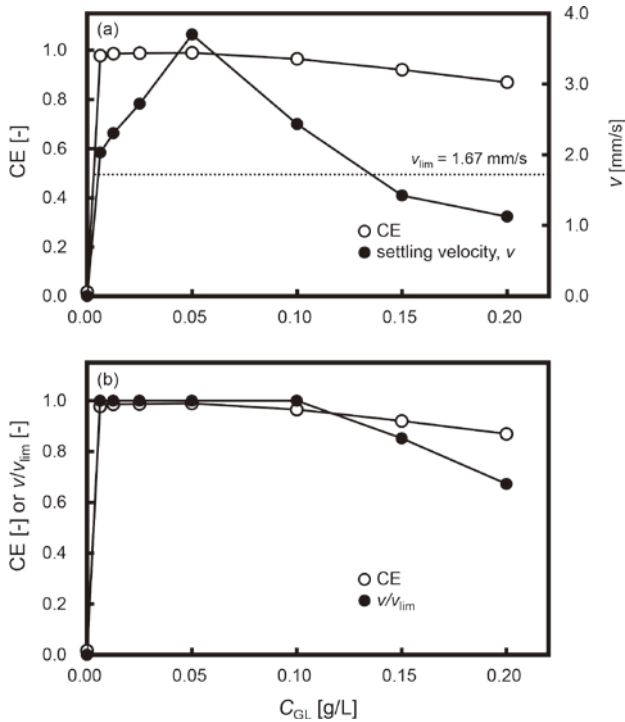


Fig. 9. Clarification efficiency of kaolin suspension CE and settling velocity of kaolin floc as a function of C_{GL} at pH 6.5-7.5. C_{Al} and kaolin concentration were 0.5 mM and 10 g/L, respectively (Fig. 9a). Fig. 9b is the comparison between CE and relative settling velocity of kaolin floc v/v_{lim} . v_{lim} represents the settling velocity of floc required to reach to the depth of 10 cm from the suspension surface within 60 seconds.

ク比抵抗から評価した最適濃度である。図中の点線は、清澄度測定における試料採取点の深さ 10 cm に 1 分で到達するための沈降速度 v_{lim} [mm/s] (1.67 mm/s) を示している。CE については、GL 濃度 0 g/L ではわずか 0.02 であったが、GL 濃度 0.006 g/L で 0.98 に急上昇し、GL 濃度 0.0125 g/L から 0.05 g/L まで 0.99 となった。一方、沈降速度については、GL 濃度 0 g/L ではほぼ 0 mm/s であったが、GL 濃度 0.0125 g/L で 2.0 mm/s まで上昇し、0.05 g/L で最高値の 3.7 mm/s に達した後、0.2 g/L で 1.1 mm/s まで低下した。

この図から、沈降速度が速ければ清澄度も高いという傾向は見てとれるが、両者の挙動はかなり異なる。その原因は、沈降速度が v_{lim} を超える凝集体は、清澄度測定における静置から試料採取までの 1 分間にすべての凝集体が試料採取点の深さ 10 cm を通過してしまうため、CE で評価すると必然的に 1.0 となるためである。そこで、 v を v_{lim} に対する相対速度 v/v_{lim} に置き換え、さらに v/v_{lim} が 1.0 を超える場合は CE の最高値である 1.0 としてプロットした結果を Fig. 9b に示す。GL 無添加の場合を除いて、 v/v_{lim} と CE の間に相関係数 0.980 の強い相関が認められたことから、このプロットにより、清澄度と沈降速度を指標とした凝集性能に及ぼす GL 濃度の影響の評価を関連づけることができると考えられる。

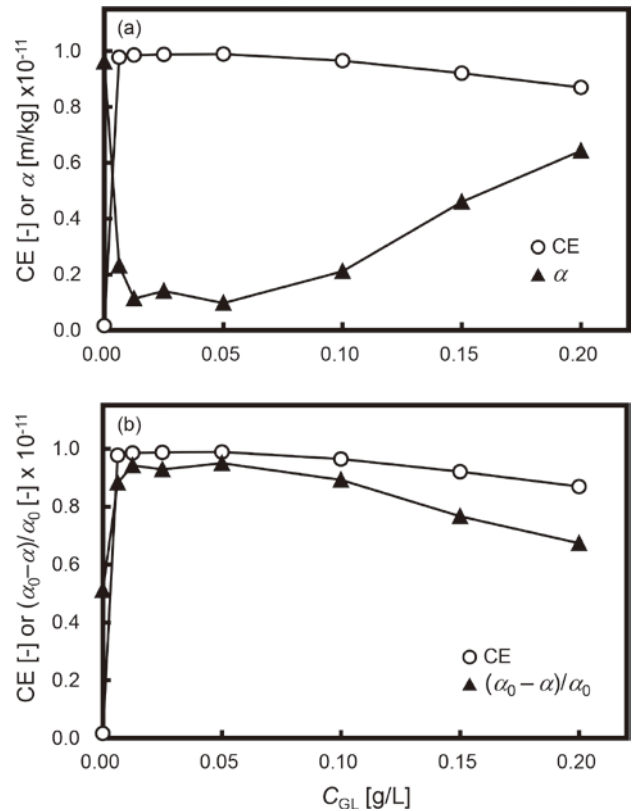


Fig. 10. Clarification efficiency of kaolin suspension CE and specific cake resistance of kaolin floc as a function of C_{GL} at pH 6.5-7.5. C_{Al} and kaolin concentration were 0.5 mM and 10 g/L, respectively (Fig. 10a). Fig. 10b is the comparison between CE and relative specific cake resistance $(\alpha_0 - \alpha)/\alpha_0$. α_0 represents the specific cake resistance of kaolin in the absence of Al and GL, 1.97×10^{11} m/kg.

次に、清澄度とケーキ比抵抗の関連について考察するために、Fig. 9 に示した CE (○) と Fig. 8 に示した Al 濃度 0.5 mM における α (▲) の比較を Fig. 10a に示す。この図から、清澄度が高いときにはケーキの抵抗が小さいという傾向が認められるが、CE は大きいほど、 α は小さいほどより凝集過効率が良いため、傾向が逆となり直感的に比較し難い数値である。そこで、カオリンのみのケーキ比抵抗 α_0 から α を差し引き、 α_0 で除した $(\alpha_0 - \alpha)/\alpha_0$ に置き換えてプロットした結果を Fig. 10b に示す。GL 無添加の場合を除いて、 $(\alpha_0 - \alpha)/\alpha_0$ と CE の間に相関係数 0.987 の強い相関が認められた。よって、凝集性能に及ぼす GL 濃度の影響の清澄度とケーキ比抵抗による評価を関連づけることができると考えられる。

参 考 文 献

Lee, B.B., Choo, K.H., Chang, D. and Choi, S.J. (2009) Optimizing the coagulant dose to control membrane fouling in combined coagulation/ultrafiltration systems for textile wastewater

- reclamation. *Chem. Eng. J.*, **155**, 101-107.
- Moreira, V.R., Guimarães, R.N., Moser, P.B., Santos, L.V.S., Paula, E.C., Lebron, Y.A.R., Silva, A.F.R., Casella, G.S. and Amaral, M.C.S. (2023) Restrictions in water treatment by conventional processes (coagulation, flocculation, and sand-filtration) following scenarios of dam failure. *J. Water Process. Eng.*, **51**, 103450.
- 月村梨乃・関 秀司・丸山英男 (2023) アルミニウム－ゼラチン系凝集剤によるカオリン懸濁液の凝集. 北海道

- 大学水産科学研究彙報, **73** (印刷中)
- 渡辺 実・西村総介 (2006) 最近の排水処理技術について. 日醸造協会誌, **101**, 549-562.
- 山下一夫 (2005) 石灰と水処理. *J. Soc. Inorg. Mater., Japan*, **12**, 504-511.
- Zhao, Z., Muylaert, K. and Vankelecom, I.F.J. (2021) Combining patterned membrane filtration and flocculation for economical microalgae harvesting. *Water Res.*, **198**, 117181.