

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)	
Citation	北海道大学水産科学研究彙報, 73(2), 55-61
Issue Date	2023-12-15
DOI	10.14943/bull.fish.73.2.55
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/90928
Туре	bulletin (article)
File Information	bull.fish.73.2.55.pdf



アルミニウムー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 (ν) 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, ν , 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 (ケーク) の 比抵抗を採用した。

凝集体の沈降速度が速く、ケーク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、低いケーク比抵抗は、フィルター に堆積したケーク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 (ケーク)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 ク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 りケーク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ク比抵抗に加え、 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。

(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

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, 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(富士フイルム和光純薬株式会社製,一級)とゼラ チン(富士フイ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(富士フイルム和光純薬株式会社 製,特級)と1M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 kg/m³,粒度分布は 0.60-21.1 µm,モード径(最大頻度径)は2.87 µm,メディ アン径(50%粒子径)は4.40 µmであった。その他の試薬は, 特記しない限り富士フイ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 テスタで撹拌しながら、AI 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 分撹拌した後 に撹拌速度を 50 rpm に下げてさらに 5 分撹拌した。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。AI 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。

$$CE = 1 - A_{700} / A_0 \tag{1}$$

なお, 撹拌操作が終わり, 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降



① sediment settling tube④ optical fiber② kaolin suspension⑤ illuminometer

③ LED light

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 µm 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ー 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 クを形成させた。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60g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 ク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。

ケーク比抵抗の決定方法

ここでは、ろ過実験の結果からケーク比抵抗を求める 方法について述べる。ケーク比抵抗 a [mkg] 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, ろ液流束 *u* [m/s] は次式で表される。

$$u = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu R_{\rm T}}$$
(2)

式中の記号は、 $A [m^2]$: ろ過面積、 $V [m^3]$: ろ液体積、t[s]: ろ過時間、 $\Delta P [Pa]$: ろ過圧力、 $\mu [Pa \cdot s]$: 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、ろ液量の増加にともなって ΔP が低下するが、 ろ過器の断面積 $S [m^2]$ が一様であれば $\Delta P \in V$ 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。

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A\rho g \left(h_0 - V / S\right)}{\mu R_{\rm T}}$$
(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、ケークが 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。

$$\frac{\rho g A}{\mu S} t = R_{\rm T} \ln \frac{h_0 S}{h_0 S - V} = R_{\rm T} \ln \left(\frac{V_{\rm T}}{V_{\rm T} - V} \right) \tag{4}$$

 V_{T} [m³] はろ過原液の初期体積である。式(4)より,ケーク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。

 $R_{\rm T}$ はフィルター抵抗 $R_{\rm m}$ とケーク抵抗 $R_{\rm C}$ の和であり、次式で表される。

$$R_{\rm T} = R_{\rm m} + R_{\rm C} \tag{5}$$

ここで, ろ過原液にSS が含まれない場合は $R_{\rm T} = R_{\rm m}$ 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 $R_{\rm m}$ 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 $R_{\rm m}$ 値は 1.13×10° [1/m] であった。

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

$$R_{\rm C} = \alpha \, \frac{C_{\rm SS} V_{\rm T}}{4} \tag{6}$$

ここで, *C*_{ss} [kg/m³] はろ過原液の SS 濃度, α [kg/m] はケーク比抵抗である。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。

$$\alpha = \left(R_{\rm T} - R_{\rm m}\right) \frac{A}{C_{\rm SS} V_{\rm T}} \tag{7}$$

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を関連付けるために, 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 ($\mathbb{R}^2 = 0.999$)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 の範囲おいて、 $h_0 - h \ge I/I_0$ の 間に強い相関 ($\mathbf{R}^2 = 0.989$)が認められた。

Fig.4に,カオリン濃度10g/Lで行った沈降速度実験の結果の一例を示す。III。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,III。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 AI 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, R² = 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 AI 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 AI 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 R² = 0.97 の比較的強い負の相関があり, AI 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, AI 濃度が低い場合は AI 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, AI 濃度が高



Fig. 5. Settling velocity of kaolin floc v as functions of C_{AI} 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.



 C_{GL} . Concentration of kaolin was 10 g/L.

くなると AI 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。

ケーク比抵抗と AI 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(〇) 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、ケーク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クのα値は1.97×10¹¹ m/kgで あった。以下,この値をα₀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 AI 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(1.1×10¹¹ 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ク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





Typical results of filtration experiment using the apparatus Fig. 7. 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 (\bigcirc) and 0.15 (\bigtriangleup) 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_{A1} 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 [-] (〇) 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

0



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_{A1} 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 ν/ν_{lim} . ν_{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 vim 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 vim に対する相対速度 v/vim に置き換え,さらに v/vim 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/vim 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_{A1} 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、清澄度とケーク比抵抗の関連について考察する ために、Fig.9に示した CE(〇)と Fig.8に示した AI 濃度 0.5 mM における $\alpha(\blacktriangle)$ 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ク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 凝集ろ過効率が良いため、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ク比抵 抗 α_0 から α を差し引き、 α_0 で除した ($\alpha_0 - \alpha$) α_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、($\alpha_0 - \alpha$) α_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ク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.