

## 〈研究発表〉

### 画像解析によるフロックの沈降速度と形状の影響

福田(早見)美意<sup>1)</sup>, 松代武士<sup>1)</sup>, 毛受卓<sup>1)</sup>, 横山雄<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 東芝インフラシステムズ(株) インフラシステム技術開発センター  
(〒183-8511 東京都府中市東芝町1 E-mail: mii.fukuda@toshiba.co.jp)

<sup>2)</sup> 東芝インフラシステムズ(株) 社会システム事業部  
(〒212-8585 川崎市幸区堀川町72-34 E-mail: suguru.yokoyama@toshiba.co.jp)

#### 概要

浄水場における凝集沈澱処理プロセスの自動化・最適化に向け、凝集沈澱プロセスにおけるフロックの挙動を表現するモデル構築を進めている。その一環として、沈澱プロセスにおけるフロックの沈降速度を算出するモデルを検討している。フロックの沈降速度の算出にはストークス式が用いられるが、球形の剛体粒子に適用される式であり、フロックの形状の影響は考慮されていない。そこで、フロックの円形度を加味して、より実際に近い沈降速度を算出する沈降速度式を作成することを目的に、撮影と画像解析試験を行った。フロックの大きさと形状、沈降速度の測定値を基に、フロック形状を反映した沈降速度式を立案し、一般的な沈降速度式との比較を行った結果について報告する。

キーワード：凝集、沈降速度、フロック形状、画像解析、水処理

原稿受付 2022.7.11

EICA: 27(2・3) 101-105

## 1. 背景と目的

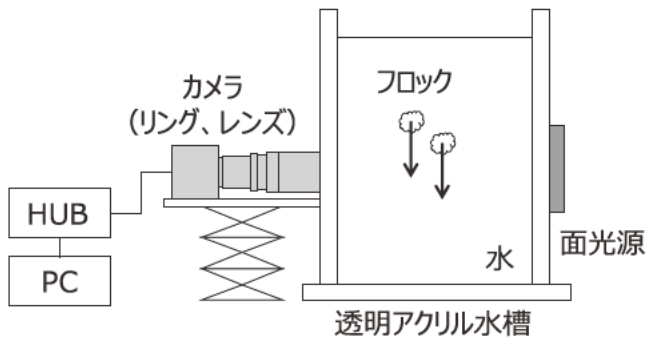
浄水場における凝集沈澱プロセスは、原水中の懸濁物質を凝集して集塊化し、沈降分離によって除去する役割を持つ。凝集剤注入率、濁度やpHなどの水質条件、攪拌などの水理条件によって形成される凝集物(フロック)の性質が異なり、沈澱池で分離効率に影響を与える。凝集混和池では、原水水質に応じた量の凝集剤が注入されるが、現在の水質、運転条件に対応した将来の沈澱池出口濁度を予測することで、凝集剤注入率やpHを適切にコントロールすることができる。そこで凝集沈澱プロセスの自動化・最適化に向けて、沈澱池におけるフロックの沈降挙動を表現するプロセスモデルの開発を進めている。沈澱池におけるフロックの沈降挙動を模擬するには、フロックの沈降速度が重要であり、今回、沈降速度を記述するモデルを構築した。フロックの沈降速度をモデル化した既往研究として、丹保ら<sup>1)</sup>が、沈降管を用いた静水域でのフロック沈降試験を行った報告例がある。ストークス式は球形の剛体粒子に適用する式であるが、丹保らはフロック密度関数を提唱し、ストークス式をフロックの沈降現象に適用した。レイノルズ数が小さい層流域においては、ストークス式はフロックの沈降挙動に適用できるとされているが、ストークス式にはフロックの形状の影響は反映されていない。そこで、水中におけるフロックの形状や沈降挙動を計測し、ストークス式に反映させることで、フロック形状の影響を評価し、沈降

速度式の精度を向上できると考えた。フロックを変質させずに形状と沈降挙動を同時に計測するために、透明アクリル水槽と光源、小型カメラを使った撮影装置とフロック挙動の画像解析ソフトからなる試験装置を構築し、実験を行った。カオリンを分散させた模擬原水を用い、ポリ塩化アルミニウム(PACl)を凝集剤として作成したフロックを静水域に置き、投影面積などの形状値と沈降速度を実測した。沈降速度の測定値とストークス式による沈降速度計算値の比較を行い、その乖離からフロックの形状を円形度として反映した沈降速度式を立案した。新たな沈降速度式について、沈降速度測定値との比較検証を行った結果について報告する。

## 2. 方法

### 2.1 試験装置と撮影対象フロックの凝集条件

フロックの形状と沈降速度を計測するために Fig. 1 に示す試験装置を構築した。水槽は、外寸17 cm×40 cm×35 cm、厚さ1 cmの透明アクリル水槽を用いた。撮影機材は、高さ調整用のジャッキの上に小型CCDカメラ(東芝テリー, BG202C)を置き、水槽の外側から水中を撮影した。レンズ(TAMRON, STV-16-3MP2)は、8 μm以上2 cm以下の粒子を撮影できるものを選定した。奥行方向のフロックの重なりを軽減するため、カメラとレンズの間にはリングを挟み、被写界深度が3 mmになるように調整した。光



**Fig. 1** A test device that captures the sedimentation behavior of flocs. Took a backlight style that illuminated from behind flocs.

源は面光源 (CCS, TH2-83 × 75SW-PM) とし、撮影対象の背後から照射するバックライト方式とした。撮影画像は、パソコンに出力、記録した。

撮影対象は、河川水の懸濁粒子を模擬したカオリンを水道水中に分散させた模擬水と、ポリ塩化アルミニウム (タイプック 250A, 多木化学, 以下 PACI とする) で凝集させたフロクとした。フロクの凝集条件は、カオリン 100 mg/L に対して PACI 注入率は 50 mg/L, 急速攪拌は 150 rpm で 1 分, 緩速攪拌は 50 rpm で 5 分とした。PACI 注入率は、ジャーテストによる予備試験において、フロクの沈降性や上澄み水の清澄性から適切と判断した。フロクは、初速度を持たないように、静止水面に滴下して沈降させた。

## 2.2 画像解析

撮影した画像を解析するための画像解析ソフトを作成し、使用した。撮影と解析は連続的に行い、撮影画像を二値化して検知された粒子に ID 番号を付与し、それぞれの粒子の投影面積、周囲長、包絡周囲長、x-y 重心座標を測定した。これらの測定値を基に、式 1 から円相当径を、式 2 から円形度を算出した。円相当径は、画像処理で用いられる粒子の大きさを表す指標であり、投影面積と同一の面積を持つ円の直径で表される。円形度は、形状を表す指標であり、真円では

1.0 と定義され低下するほど真円から乖離した形状となる。5 fps で撮影した連続する画像に対して、同一粒子の重心座標の変化から、沈降速度を算出した。算出された沈降速度のうち、同一粒子の追尾に連続して 5 回以上成功したものを抽出した。**Photo. 1** に、フロクの撮影画像と沈降速度の解析画像の一例を示す。a) は撮影画像であり、b) は二値化画像である。b) の二値化画像の縦線は、フロクの軌跡を表しており、ほぼ垂直方向に沈降していたことが分かる。この撮影系での画像サイズは 1200 × 1600 px であり、スケールは 0.01038 mm/px であった。

$$\text{円相当径 [cm]} : d = 2\sqrt{A/\pi} \quad \dots \text{式 1}$$

$$\text{円形度 [-]} : \varepsilon = 4\pi A/P^2 \quad \dots \text{式 2}$$

A: 投影面積 (cm<sup>2</sup>), P: 周囲長 (cm)

## 2.3 ストークス式とフロク密度関数

フロクを球形と仮定した場合のストークス式を  $v_1$  式とし、円相当径を用いた沈降速度の演算方法を示す。 $v_1$  式は、層流域における沈降挙動に適用できる式であり、フロクの大きさから沈降速度を推定するには、フロクの密度と周囲の流体の密度差である有効密度  $\Delta\rho_1$  と円相当径の関係を予め求めておく必要がある。式 3 は  $v_1$  式を変形して得られた式であり、フロク密度関数と呼ばれている。得られた有効密度  $\Delta\rho_1$  を  $v_1$  式に適用し、沈降速度を算出する。

$$v_1 = \Delta\rho_1 g d^2 / 18\mu \quad \dots v_1 \text{ 式}$$

$$\Delta\rho_1 = (\rho_s - \rho_w) = 18\mu v g d^2 \quad \dots \text{式 3}$$

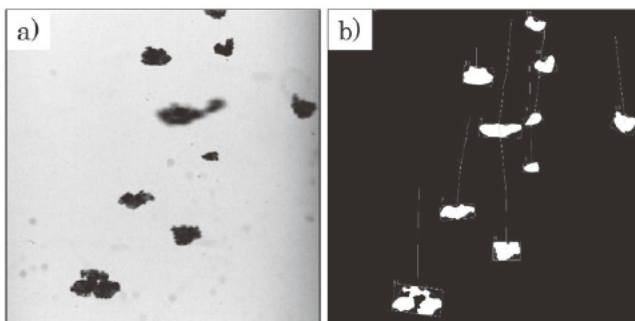
$\Delta\rho_1$ : 有効密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $\rho_s$ : フロク密度 (g/cm<sup>3</sup>),

$\rho_w$ : 水の密度 (1.00 g/cm<sup>3</sup>)

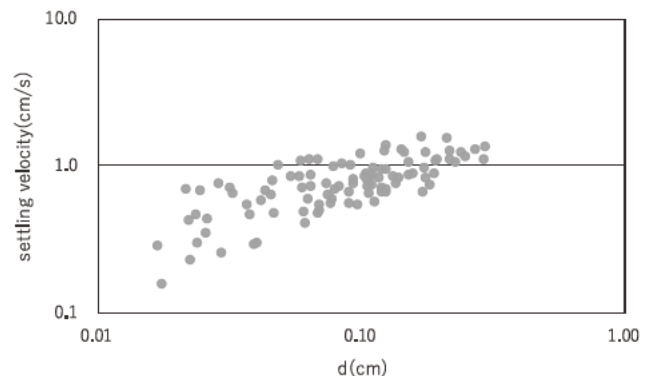
$v$ : 沈降速度 (cm/s),  $g$ : 重力加速度 (980 cm/s<sup>2</sup>)

$\mu$ : 水の粘性係数 (0.01005 g/cm · s, 20°C)

**Fig. 2** に、測定した沈降速度と円相当径の関係を示す。多少のばらつきはあるものの、円相当径と沈降速度には明確に正の関係が確認できた。**Fig. 2** における



**Photo. 1** a) The capturing image of kaolin flocs in water. The flocs look like shadows because they were shot with the backlight. b) Binary image of a). The flock lines are the trajectory of sedimentation behaviors.



**Fig. 2** Positive relationship between the measured value of sedimentation velocity and the equivalent diameter of the circle.

円相当径と沈降速度の関係を式3に適用し、有効密度  $\Delta\rho_1$  は式4で表せる。

$$\Delta\rho_1 = 0.000426d^{-154} \quad \dots\text{式4}$$

フロック撮影により計測した沈降速度と、ストークス式、フロック形状を反映した沈降速度式から算出される沈降速度の比較検証を行う。

### 3. フロック沈降速度と形状の計測結果とストークス式の比較

#### 3.1 沈降速度測定値とストークス式における計算値の比較

Fig. 3 に、同様の条件で測定した円相当径に対する沈降速度の測定値と、 $v_1$  式の計算値を示す。 $d > 0.1$  cm の大きい粒子に対しては、測定値と計算値の差異は比較的小さいものの、小さい粒子に対しては、測定値と計算値の差異は大きくなった。また、全体的に計算値は測定値よりも大きく算出される傾向にあった。 $v_1$  式では、フロックの形状によって決まり沈降速度に影響を与える抗力係数は、式5に示すようにレイノルズ数で表現されることから、計算の過程で式に入れ込まれている。したがって  $v_1$  式では、実際のフロック径と演算に使用されているフロック径の値に乖離があると考えた。フロック径が実際よりも大きく計算されているか、あるいは、有効密度は円相当径に対して負の関係にあることから、実際よりも小さな値として計算されていると推測された。この原因を、フロックを球と仮定している点にあるとし、円相当径に円形度による補正を加える検討を行った。

$$C_d = 24/Re = 24v/vd \quad \dots\text{式5}$$

Re: レイノルズ数 (-),  $v$ : 水の動粘性係数(0.01007 cm<sup>2</sup>/s, 20°C)

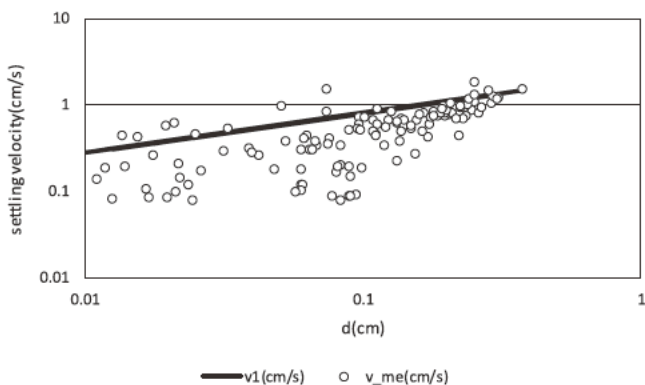


Fig. 3 The calculation result of the  $v_1$  formula is bigger than measured values. The estrangement of a calculated value and the measured value is big about small flocs.

#### 3.2 フロックの円形度と円相当径の関係

Fig. 4 に、測定されたフロックの円形度と円相当径の関係を示す。円相当径が大きいほど、円形度は1.0から乖離する負の線形関係にあった。フロックは、成長とともに密度が低下していくフラクタル構造を有すると考えられており<sup>2)</sup>、カオリンとPACIの凝集においても、円相当径が大きいほど形状が複雑になっていく傾向が確認できた。画像撮影機器の都合上、1px程度(10  $\mu$ m)の微細なフロックは、形状が正確に捉えられていない可能性があり、円形度は高い値を示す傾向にある。画像解析上、精度が確保できる2pxより大きいフロックについても円形度が円相当径に対して負の関係にあることから、フロックの大きさと形状の複雑さに関係があると考えられた。

#### 3.3 フロックの円形度を反映した沈降速度式の立案

式6に、球形を仮定した単粒子自由沈降速度式を示す<sup>3)</sup>。抗力係数  $C_d$  は、粒子の形状や大きさで決まる係数であり、剛体粒子では実測されている。フロックにおいては、レイノルズ数を用いた実験式で表される。式6は球の体積、円の面積を用いた球形粒子を仮定した式であるが、実際のフロックは球形ではない。そこで、式7のように、円相当径に対して円形度を反映した  $d_{cir}$  を導入した。球から乖離して円形度が小さい粒子ほど、投影面積から円相当径に換算したときの誤差が大きいと考えた。円形度は面積に関する形状値であるため、円相当径に対して0.5乗で掛かると仮定した。抗力係数  $C_{d2}$  は、Fig. 2の測定値より求めた。

$$v = \sqrt{4\Delta\rho gd/3C_d\rho_w} \quad \dots\text{式6}$$

$$d_{cir} = d\varepsilon^{0.5} \quad \dots\text{式7}$$

$$v_2 = \sqrt{4\Delta\rho_2gd_{cir}/3C_{d2}\rho_w} \quad \dots\text{式8}$$

$\varepsilon$ : 円形度 (-),  $C_d$ : 抗力係数 (-),  $C_{d2}$ :  $v_2$  式における抗力係数 (-)

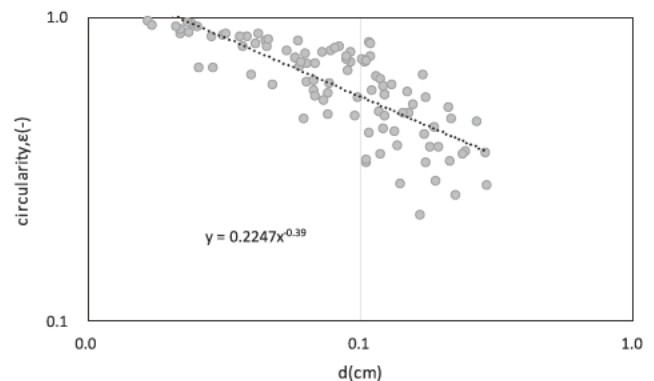


Fig. 4 The circularity have a negative relationship with respect to the equivalent circle diameter. It is presumed that the larger the flock size, the more the shape deviates from the sphere.



#### 4. ストークス式とフロックの円形度を反映した沈降速度式の比較検証

$v_1$ ,  $v_2$  式の検証は、約 120 個のフロックの円相当径と円形度、沈降速度のデータセットを用いて行った。単粒子自由沈降を仮定し、干渉沈降などの相互作用は考慮していない。実験における沈降速度の測定値  $v_{me}$  と、 $v_1$ ,  $v_2$  式を用いた沈降速度の計算値について、円相当径との関係を Fig. 5 示す。円相当径を円形度で補正した  $v_2$  式での計算値は、球形を仮定した  $v_1$  式よりも全般的に小さく算出され、測定値に近い結果となった。円相当径が 0.01 ~ 0.1 cm の領域では乖離があるものの、0.1 cm 以上の領域ではより測定値に近づいていた。式 8 を用いて、測定値と計算値の偏差  $e$  を算出した。本試算では  $v_1$  式における偏差の総和  $e_1 = 16.2$ 、 $v_2$  式における偏差の総和  $e_2 = 8.5$  であった。粒子 1 個あたりでは、 $v_2$  式は  $v_1$  式よりも 0.10 cm/s 測定値に近い試算となる。

$$e = \sum_{i=1}^n (v_{me} - v_i)^2 \quad \dots \text{式 8}$$

$v_{me}$ : 沈降速度の測定値 (cm/s)

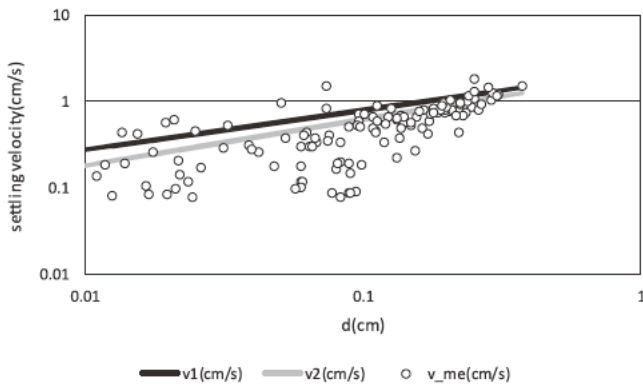


Fig. 5 The  $v_2$  formula calculation result is almost measured value than a  $v_1$  formula.

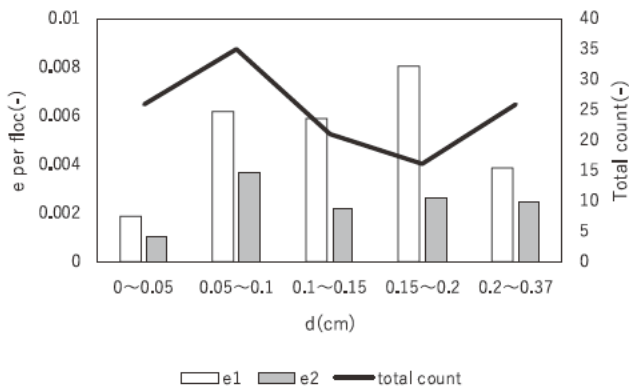


Fig. 6 The deviation of a  $v_1$  formula and the  $v_2$  formula varies according to particle size area. The deviation of a  $v_1$  formula and the  $v_2$  formula varies according to particle size area

測定値と計算値の一致という観点では、円形度による円相当径の補正は一定の効果をもたらす。円形度による円相当径の補正は、フロックの大きさを球形よりも小さく見積もる分、得られる沈降速度の計算値は小さくなった。これは、フロック径に対して負の関係にある有効密度よりも、フロックの大きさが影響していたと考えられる。フロックの大きさは、抗力係数にも関係があり、フロックの沈降挙動は、有効密度が支配的である粒径域と、抗力係数が支配的である粒径域が存在していて、有効密度と抗力係数が同程度の影響を与える条件下で、ストークス式が当てはまると考えている。Fig. 6 に、円相当径の範囲ごとの偏差を比較した結果を示す。第一縦軸は範囲ごとの偏差  $e$  の平均値  $\bar{e}$ 、第二縦軸は円相当径の範囲に存在する粒子のカウント数を示す。円相当径が小さいと、沈降速度も小さい傾向にあり、偏差  $e$  も小さい値となることから、範囲ごとに  $\bar{e}_1$  と  $\bar{e}_2$  の比較を行った。0.15 ~ 0.2 cm において、 $\bar{e}_1$  と  $\bar{e}_2$  の差は最も大きく、次いで 0.1 ~ 0.15 cm での差が大きかった。この結果から、0.1 ~ 0.2 cm の粒子に対して、 $v_2$  式は  $v_1$  式よりも測定値に近い計算結果となると言える。反対に、0 ~ 0.05 cm の微小領域、0.2 ~ 0.3 cm の大きな領域の粒子は、 $v_1$  式でも  $v_2$  式でも、計算値は大きく変わらない。先にも述べたように、有効密度と抗力係数のバランスによって沈降速度が決まっており、今回の試験では、0.1 ~ 0.2 cm の粒子に対して、有効密度をより大きく、抗力係数  $C_{d2}$  をより小さく見積もった  $v_2$  式が測定値に近い結果となった。

#### 5. ま と め

一般的な沈降速度式  $v_1$  式では、球形粒子を対象としているが、実際のフロックは不定形な形状をしている。そこで、円形度による円相当径の補正を行い、新たな沈降速度式  $v_2$  式を立案、試算した結果、以下の知見が得られた。

- ・フロックの円形度は、円相当径に対して負の関係にある。フロックが成長すると、真円から乖離して構造が複雑になっていくこれまでの知見と一致している。
- ・ $v_1$  式は、実際よりも大きな沈降速度を算出する傾向がある。粒径 0.01 ~ 0.1 m の小さい領域において、測定値と計算値の乖離が大きい。
- ・フロックの円形度を円相当径に反映させた  $v_2$  式の計算結果は、より測定値に近い値が得られる。沈降速度式は有効密度と抗力係数のバランスが関係しており、分離対象のフロックの大きさによって適切な式が異なる可能性がある。

## 6. おわりに

フロックの円形度を反映した沈降速度式を立案，検証した。フロック沈降速度には，形状の影響があることが確認でき，測定値と計算値が近づく一定の成果は得られた。沈降挙動や抗力係数に対する形状の影響については，剛体粒子を参考にした理論側からのアプローチが必要である。また，二次元画像では，奥行方向の情報が不足しているため，フロックの体積の表し方に課題がある。凝集条件，特にPACl注入率の大小によってフロックの形状が異なると考えられ，凝集条件の異なるフロックについて適用可能な沈降速度式であるか，今後検証を続けていく。

## 参考文献

- 1) 丹保憲仁：アルミニウム・フロックの密度に関する研究，日本水道協会誌，pp.2-10(1967)
- 2) 足立泰久：コロイド凝集体の幾何学的構造とその形成過程，化学と生物，Vol.31，No.7，pp.464-469(1993)
- 3) 社団法人土木学会：環境工学公式・モデル・数値集，pp.13-16(2004)