

〈研究発表〉

水処理施設におけるスカム堆積抑制の取り組み（その2）

兼子清隆¹⁾、桑折健太郎²⁾、寺井健太³⁾、中村光⁴⁾

¹⁾ 東京都下水道サービス(株) 技術部技術開発課
(〒100-0004 東京都千代田区大手町2-6-3 E-mail:kiyotaka-kaneko3@tgs-sw.co.jp)

²⁾ 東京都下水道局東部第一下水道事務所砂町水再生センター
(〒136-0075 東京都江東区新砂3-9-1 E-mail:Kentarou_Koori@member.metro.tokyo.jp)

³⁾ イービストレード(株) 環境バイオ事業室
(〒101-0046 東京都千代田区神田多町2-1 E-mail:k.terai@ebistrade.com)

⁴⁾ エビスマリン(株) 製造開発部
(〒850-0057 長崎市大黒町9-22 E-mail:nakamura@ebismarine.com)

概要

都内の下水処理施設では、スカム堆積抑制のため、湖沼等の水質浄化に利用されている「ジェットストリーマー技術」を用いた導水式無閉塞水流発生装置（以下「AS：アクアストリーマー」という）を開発し実用化している。今回は、本装置（AS）を用いてスカム堆積抑制の取り組みを行った前回の報告に引き続き、スカム浮上を抑制するメカニズムと最初沈殿池導水渠の形状におけるASの効果及び適用範囲を理論式や流体解析等により導き出したので報告する。

キーワード：下水処理，スカム，アクアストリーマー，水流，堆積抑制

原稿受付 2023.6.19

EICA: 28(2・3) 94-97

1. 概要

1.1 はじめに

東京都墨田区、江東区の大部分を下水処理区に持つ砂町水再生センターでは、最初沈殿池導水渠及び沈殿池水路におけるスカム堆積抑制のため、ASを開発し令和元年より実用化している¹⁾。

1.2 適用技術について

(1) ASの原理

ASは、圧力水(Q1)を整流筒内部のノズルから吐出させることで、整流筒周囲の水(Q2, Q3)を吸引随伴し、圧力水の数倍もの水(Q1+Q2+Q3)を直進させる「ジェットストリーマー技術」を利用した既存技術である。

また、ASは点検口に容易に設置が可能な小型の装置であり、スクリー等の回転部分がないため、圧力水の放出に伴い、しさ・ふさ等で閉塞しにくい構造となっている (Fig. 1)。

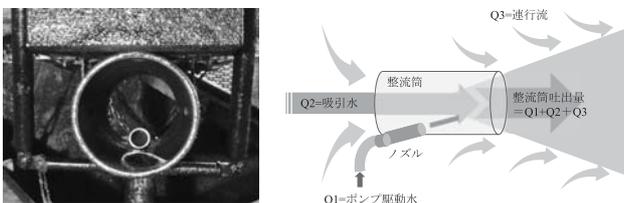


Fig. 1 ASとジェットストリーマー技術

(2) ASによるスカム堆積抑制効果

砂町水再生センターでは、最初沈殿池導水渠に1か所及び沈殿池（2池）の水路に各1か所の計3か所でASによる水流を発生させており、沈殿池水路に設置した原水ポンプ（7.5 kW）からの圧力水（Q1）は、切替弁のタイマー運転により各場所へ順番に供給している。

前回の報告²⁾では、7.5 kWのポンプを使用した際にAS（水流発生部）より前方9 mにおけるスカム堆積抑制効果を確認し、その際の水面流速は0.15 m/sであった。

スカム堆積抑制効果を最大限に発揮させるには、ASにより常に水流を与え続ければよいと考えるが、スカム発生状況に応じたASの運転（水流発生）設定を行うことにより、消費電力節減と良好なスカム堆積抑制効果が両立できることをその後の実証により確認した³⁾。

なお、最初沈殿池導水渠及び沈殿池水路でASにより流動したスカムは、それぞれ、後段に設置されているスカム収集装置等により、沈殿池系統外のスカム処理施設へ送水される。

また、ASを稼働してから2年経過後でもポンプ及び各場所の水流発生部において、しさ・ふさ等による閉塞等の不具合がないことを確認した。

(3) 調査目的

これまでは、7.5 kWのポンプを使用して現在実用

化している最初沈殿池導水渠及び沈殿池水路におけるスカム堆積抑制効果を確認したが、最初沈殿池導水渠は、沈殿池形状により長いもので数十メートルとなり、流入する汚水の流速が停滞した箇所ではスカムの堆積が生じることから、様々な形状の下水処理施設においてASによるスカム堆積抑制効果を発揮させるためには、スカムの浮上速度とASによる流速との関係に基づくASの適用範囲を検討する必要がある。

検討にあたって筆者らは、最初沈殿池等の水面におけるスカムの堆積は、油分等を含んだスカムの浮上する速度が、導水渠等を流れる汚水の上回る場合に生じ、水面流速が大きい場合は、スカム同士の結合による塊が生成されずに、堆積に至らないと仮定した。

一方、これまでの実証結果によりASによる水流が発生している領域では、水中にあるスカムの浮上と水路表面でのスカムの堆積を抑制する効果があることを確認しているため、スカム浮上速度とASによる流速との関係から、水流によりスカムが浮上しない領域を計算で求めた。

また、今回は、実用化している7.5 kWポンプのほか、11 kWポンプにおける最初沈殿池導水渠水路の流速分布について流体解析を行うことにより、導水渠形状やポンプ出力によるASの適用範囲に関する調査を行った。

2. AS適用範囲の調査

2.1 スカム浮上速度の調査

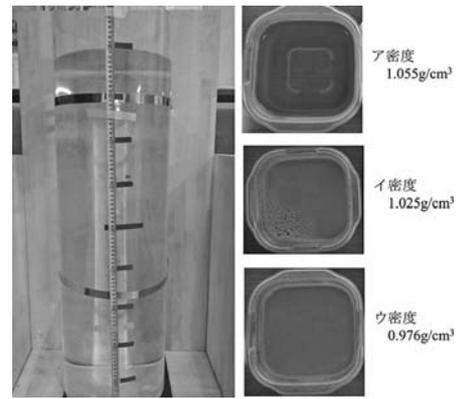
(1) 模擬スカムによる浮上速度の算出

水路内に存在するスカムが水面に浮上する際の速度を算出するため、水と食用油とゼラチンを混合し、その体積混合比で密度を変えて、試料ア、1.055 g/cm³、イ、1.025 g/cm³、ウ、0.976 g/cm³の3条件と、形状は立方体として、大きさを5 mm、10 mmの2条件で切り出し、計6条件の模擬スカムを作製した。その模擬スカムを内寸直径190 mm、高さ900 mmの亚克力水槽に、700 mmまで水を張った中に静かに投入し、その挙動をハイスピードカメラ(Fastec社製、型式TS5-H)で動画撮影し移動時間と距離で速度を求めた(Fig. 2(a))。

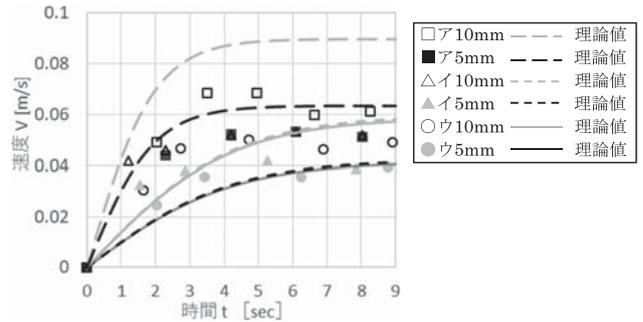
この結果を基にスカムの浮上を抑制するために必要な水平方向の流速を算定した。

(2) インパクト式の適用

粒度分析法の一つに沈降法があり、2 mm以上の粒子にはインパクト式といわれる沈降速度の計算式がある⁴⁾。インパクト式は沈降速度の一般式(①式)に抵抗係数を代入した式で表され、速度の時間変化は②式のように表される。



(a) 模擬スカムと実験水槽



(b) 時間経過による浮上・沈降速度変化

Fig. 2 模擬スカム沈降・浮上実験

$$v = \sqrt{4|\rho_s - \rho_w|gd/3\rho_w C_d} \quad (1)$$

v : 速度, ρ_s : 粒子の密度, ρ_w : 分散媒の密度, g : 重力加速度, C_d : 抵抗係数 (立方体の場合0.91, 球体の場合0.44)

$$v(t) = V_\infty \tanh(t/\tau) \quad (0 < v < V_\infty \text{ の時}) \quad (2)$$

ここで $\tau = \rho_s / \{|\rho_s - \rho_w|g\}$ とする。

この時、 $t = \infty$ とすると終端速度 V_∞ は、

$$V_\infty = \sqrt{4|\rho_s - \rho_w|gd/3\rho_w C_d} \quad (3)$$

となり、①の一般式と同式となる。

細目(1)で作製した模擬スカム(試料)の物理量を②式に代入し経過時間と速度の関係を求め、実験結果と比較しその妥当性を確認した。

2.2 ASによる流速分布の調査

(1) 噴流式による計算

ASの整流筒から吐出される水流は軸対称噴流と呼ばれ、その噴流の速度分布を実験で求め表した式がある。その一例であるAlbertsonの噴流式⁵⁾を以下に示す。

$$\text{初速: } U_0 = 4/\pi \cdot Q/D^2 \quad (4)$$

$$\text{噴流方向流速: } U_m = 6.2D \cdot U_0/x \quad (5)$$

$$\text{噴流幅方向流速: } u = U_m \text{EXP}(-76.2y^2/x^2) \quad (6)$$

Q : 整流筒吐出量[m³/s], D : 整流筒出口直径[m], x : 噴流方向距離[m], y : 軸幅方向距離[m]

11 kW ポンプで圧力水を供給した際の条件は、整流筒からの吐出流量を $5.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 、7.5 kW ポンプでの条件は、整流筒からの吐出流量を $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$ として整流筒先端の初速を噴流式に代入し計算した。

(2) 流体解析

導水渠における AS 水流による流速等については、施設形状による流速への影響を確認するため、三次元シミュレーションモデルによる流体解析を実施した。

噴流式の条件と同様に 11 kW ポンプでの条件は、整流筒からの吐出流量を $5.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 、7.5 kW ポンプでの条件は、整流筒からの吐出流量を $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$ の値を適用した。計算手法は非圧縮性/等温の不混和混相流非定常計算、自由表面流は VOF 法 (メッシュのうち液体が占める体積の割合を液体充填率という関数として定義し、移流方程式を解いて界面を求める手法) で行った。気相と液相の密度を空気: $1 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、水: $1,000 \text{ kg}/\text{m}^3$ とし、動粘性係数を空気: $1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、水: $1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。水路形状は長さ 30 m、幅 3.0 m と 1.5 m の 2 種類、境界条件は整流筒および壁は no-slip 条件、下流と上流端面は静水圧として解析を行った。乱流モデルは LES (ダイナミック k 方程式) モデルを用いた (Fig. 3)。

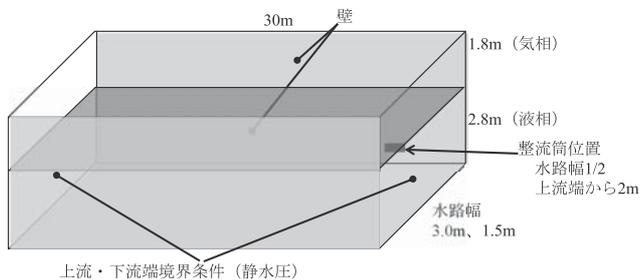


Fig. 3 解析モデル概略

3. 調査結果

3.1 スカム浮上速度の調査結果

実験時の水温 (18°C) での密度 $0.998 \text{ g}/\text{cm}^3$ を②式に代入し各試料の時間経過による速度変化を求めて実験結果と比較したグラフを Fig. 2(b) に示す。一部でインパクト式 (理論値) に沿わない結果となっているが、9 秒前後経過した時の終端速度は、概ね実験結果と②式の計算結果が合致していることを確認した。

また、Fig. 2(a) で試料ウの水中で浮上する模擬スカム ($0.976 \text{ g}/\text{cm}^3$) と試料イの沈降する模擬スカム ($1.025 \text{ g}/\text{cm}^3$) の 18°C の水 ($0.998 \text{ g}/\text{cm}^3$) との密度差の絶対値は、ウは 0.022、イは 0.027 ポイントと近い値となるのに対し、実験結果 (Fig. 2) の 8~9 秒後の浮上及び沈降速度も $0.0395 \text{ m}/\text{s}$ と $0.0387 \text{ m}/\text{s}$ と

近い値となる。

このことから、浮上と沈降で向きが 180° 違っても密度差によって速度が決まることを確認した。

この結果を踏まえて、実際の浮上スカムを有機汚泥物と油分の混合物と考え、密度と浮上速度を求めた。

有機汚泥の密度を $1.03 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、食用油の密度を $0.92 \text{ g}/\text{cm}^3$ としてスカムの密度範囲を $0.92 \sim 1.03 \text{ g}/\text{cm}^3$ と想定した。試料ウの模擬スカム ($0.976 \text{ g}/\text{cm}^3$) は、有機物: 食用油 = 1:1 の体積混合比と算出できる。一方、資料アの模擬スカム ($1.055 \text{ g}/\text{cm}^3$) は、 20°C ($0.998 \text{ g}/\text{cm}^3$) の水中を浮上する密度として算出すると $0.998 - 0.057 = 0.941 \text{ g}/\text{cm}^3$ となり、このとき有機物: 食用油 = 1:4 の体積混合比と算出できる。浮上スカムの大きさを 5 mm、形状を円柱 (抵抗係数 0.63) と球体 (抵抗係数 0.44) との混合物と考え、抵抗係数を 0.55 と仮定した場合の流速を、スカム浮上を抑制するために必要な水平方向の流速とした。この時の流速は①式より $0.08 \text{ m}/\text{s}$ 以上が必要と算出した。

3.2 AS による流速分布の調査結果

Fig. 4 に Albertson の噴流式を用いて計算した結果と流体解析の結果及び 7.5 kW ポンプでの実測結果を示す。

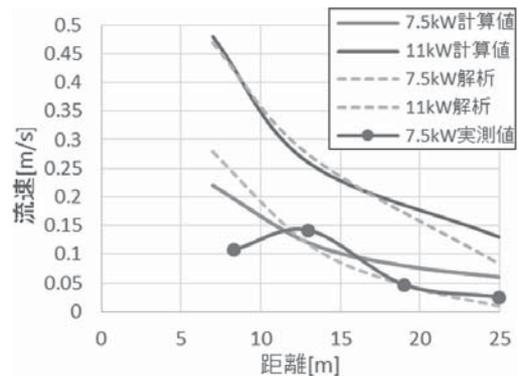


Fig. 4 整流筒中心 (水面下 0.2 m) 付近の流速

流体解析の結果は、項 2.2 細目 (2) の流体解析における、AS が停止状態から 120 秒進めた結果の終了間際の約 20 秒間の平均流速を示す。この結果から一部を除き計算値、解析値及び実測値が近い値となっていることを確認した。なお、7.5 kW 実測値と計算値に乖離がある原因は、計算値は噴流軸上の値であるが、実測値は施設の都合により噴流軸から離れた位置で測定した値であるためと考える。

また、項 3.1 の実験結果で定めた $0.08 \text{ m}/\text{s}$ 以上の範囲を計算値の流速分布に示した結果を Fig. 5 に示す。噴流軸方向は 7.5 kW ポンプでは 17 m、11 kW ポンプでは 45 m、噴流幅方向は 7.5 kW ポンプでは $\pm 0.8 \text{ m}$ 、11 kW ポンプでは $\pm 2.25 \text{ m}$ がその範囲となった。

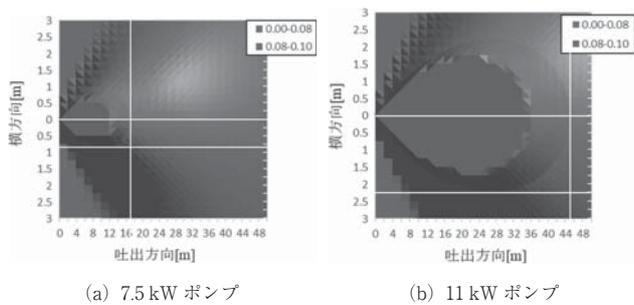


Fig. 5 0.08 m/s以上の流速分布 (計算値)

3.3 流体解析結果

吐出開始から115秒後のAS位置(水路中央)における鉛直断面流速分布結果をFig. 6に示す。(a)は水路幅3.0m, 11kW用ASの場合, (b)は水路幅3.0m, 7.5kW用ASの場合, (c)は水路幅1.5m, 11kW用ASの場合, (d)は水路幅1.5m, 7.5kW用ASの場合を示す。

(a)の場合は, ASから10m下流以降は下流側へ動いた水面の水量を補うように水路底の流れが逆流する(0.25 m/s程度)補償流の発生も重なり下流側への流速が減衰しながらASより25m下流地点まで概ね0.08 m/s以上の流速を確認した。(b)の場合は, ASから8m下流以降は(a)に比べ逆流は弱い(0.175 m/s程度)もの下流側への流速が減衰しながらASより15m下流地点まで概ね0.08 m/s以上の流速を確認した。(c)の場合は, ほぼ16m以上進むことはなく水路底に向かう流れとなって逆流が強くなる(0.5 m/s程度)結果となった。(d)の場合は, 水路底の逆流が0.2 m/s程度あるものの, ASから20m近くまで0.08 m/sの流れが届いていることを確認した。

また, (a)の条件に定常的に沈殿池導水渠への流入

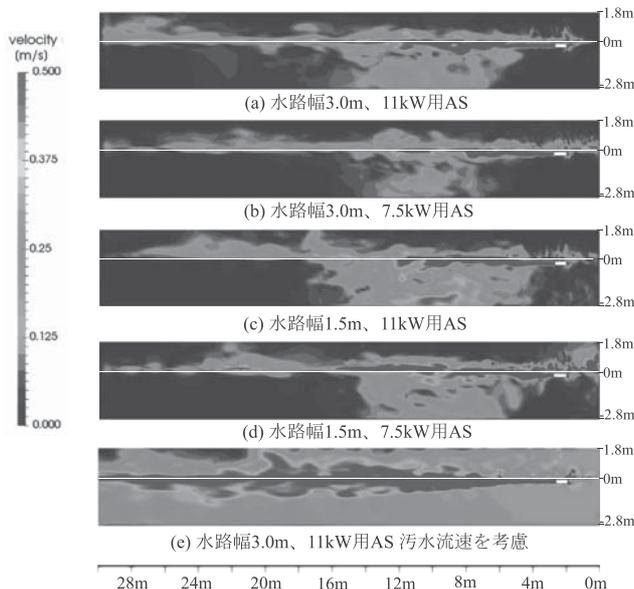


Fig. 6 水路鉛直断面の流速分布 (噴流吐出から115秒後)

汚水が0.3 m/sあると仮定して解析すると (Fig. 6 (e)), ASから10m付近で発生していた逆流が治まり, ASから25m地点の平均流速が定常的な汚水の流れを考慮していない時の0.08 m/sから0.14 (0.44-0.3) m/sと速くなり, Fig. 4に示した11kW計算値に近い結果を得た。

以上の結果, 定常的な流入汚水の速度を考慮しない条件では流速が0.08 m/s以上となるASの適用範囲は, 水路幅が1.5mでは水路長は25mまでは7.5kWポンプのASが適用され, 水路幅が3.0mでは, 水路長が15mまでは7.5kWポンプ, 25mまでは11kWポンプのASが適用できることを確認した。

4. ま と め

今回は, 模擬スカムを使用した実験からスカム浮上を抑制する水平方向の必要流速を0.08 m/s以上と算定し, 7.5kWポンプのASと11kWポンプのASの適用範囲をAlbertsonの噴流式及び流体解析により設定した。

また, 今回は導水渠形状によるASの適用範囲を調査したが, 7.5kWポンプのASを設置している最初沈殿池クロス水路(水路幅約5m)に当てはめると, 48時間運転後では装置から20mの地点で0.3 m/sの流速があることを確認している⁶⁾ことから, 水路幅が広い施設形状では小さいサイズのポンプ仕様のASを適用するのがよいと考える。

今後は, 11kWポンプのASを実施設に仮設して検証を行うことや他の施設形状での適用範囲調査を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 三牧大朗: 水処理施設におけるスカムの破壊・堆積防止対策, 第55回下水道研究発表会講演集, pp.806-808 (2018)
- 2) 小高 勇, 池田恵一, 清水雅之, 中村 光: 導水式無閉塞水流発生装置 (AS) のスカム堆積抑制効果について, EICA 第24巻, 第2・3号, pp.66-69 (2019)
- 3) 兼子清隆, 池田恵一, 寺井健太, 中村 光: 第58回下水道研究発表会講演集, 導水式無閉塞水流発生装置 (AS) のスカム堆積抑制効果について (その2), pp.650-652 (2021)
- 4) Gibbs, R. J., Matthews, M. D., and Link, D. A. 1971, The relationship between sphere size and settling velocity. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 41, No. 1, pp. 7-18 (1971)
- 5) N・Rajaratnam, 野村安正訳: TURBULENT JETS 噴流, 森北出版, p. 43 (1985)
- 6) 小高 勇, 池田恵一, 清水雅之, 中村 光: 第57回下水道研究発表会講演集, 導水式無閉塞水流発生装置 (AS) のスカム堆積抑制効果について, pp.760-763 (2020)

[特許: 日本特許, 6842817 (2021)]