

(75) 渦流を利用した 固液分離装置の応用的研究

中島 古史郎^{1*}・荻原 国宏²・石井 誠³・吉本 國春⁴

¹積水化学工業株式会社環境・ライフラインカンパニー (〒105-8450 東京都港区虎ノ門2-3-17)

²荻水環境水理研究所 (〒189-0026 東京都東村山市多摩湖町4-28-10)

³東洋大学総合情報学部研究生 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

⁴東洋大学総合情報学部 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

* E-mail: nakajima016@seksui.jp

本研究は、水処理分野において省エネルギーかつ維持管理コストを小さくする事を目的として著者らの開発した渦流を利用した固液分離装置の評価を行った。PIV (Particle Image Velocimetry) 法を用いて装置内部の速度分布を明らかにし、流出部に設けた上昇抑止板の流れの場に及ぼす影響を解析した。

除去性能評価では、懸濁物質の沈降速度が渦流固液分離装置の水流の上昇速度を上回ると、ほぼ100%の除去率が得られ、また上昇速度が沈降速度の1.5倍になっても、85%を超える除去率が得られた。

Key Words : SSremoval, Circulating Flow, Solid-liquid Separator, settling velocity, Particle image velocimetry(PIV)

1. はじめに

21世紀は水の時代と言われ、昨今は基幹インフラ（上下水道）に加え、雨水有効利用・海水淡水化や産業廃水のリサイクルなど多くの新提案がなされて来ている。

一方、21世紀は地球規模で低炭素社会実現への努力が求められ、水処理分野も例外ではない。省エネ省資源型を指向した新たな水処理技術に寄せる期待は大きい。

廃水処理分野において固液分離技術は、殆どのプラントで必要とされ、沈降・浮上法、ろ過法、付着・凝集法などが一般的である。特殊な素材製造やエネルギーを用いない沈降法は沈澱池などで広く実用に供され、1960年代に入って、渦流を利用した小型スワール装置が合流式下水道の改善策として英国で開発された。わが国では、1970年代に荻原らによる回転流れを利用した土砂分離水槽の研究^{1) 2)}、1990年代に山田らによる回転円筒を備えた円形沈砂池の研究³⁾がなされている。2000年代に入ると東京都らによって、既に設置され実用に供されていた小型スワールのSS除去率等の調査⁴⁾も報告された。

これらの研究では、円筒水槽に渦流の形で流入すると槽中央部に懸濁物質が集められる「ティーカップ現象」を応用した固液分離性能の改良に検討が進められたが、

除去率の向上に向け渦流で流入後の槽内の沈降分離を促進させる流れの場を形成させる視点が乏しかった。また、ティーカップ現象を生じる旋回二次流には、円筒槽には所定の径が必要で、コンパクト化への検討が欠けていた。筆者らは、前記流れの場の形成と装置のコンパクト化を意図した検討を進め新たな装置構造を開発した。本装置の製造から使用、維持管理に至るライフサイクル環境負荷を低減できる可能性が示唆されている。

本研究では、円形水槽内の周縁部に回転流を自然流入の水のエネルギーを利用して発生させ、流出口に向かう上昇流に中央部で抵抗を与える事で不均一な速度分布とする構造を検討した。上昇流の抵抗となる抑止板の影響をPIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定法) 法を用いて検証し、さらに実験により懸濁物質の除去効果を確認した。

2. 実験方法

(1) 渦流固液分離装置の構造

検討対象とした渦流固液分離装置の構造を図-1に示す。懸濁物質を含む水は、流入口から装置内に入ると旋回し

ながら上昇し、装置中央に配置された流出パイプの上部に流れ込み処理水として流出する。一方、懸濁物質は旋回しながら中央部に次第に集まってくる。懸濁物質の沈降速度が、近傍の水流の上昇速度と比較して大きい場合には、懸濁物質は沈降する。沈降した懸濁物質は、渦流固液分離装置の外部に流出する機構により、流出水から分離、すなわち除去される。

本渦流固液分離装置は、装置に流入する際の水の流れを減じるための特別の整流装置などが必要なく、また沈降した懸濁物質は、渦流固液分離装置の外部に流出する機構となっていることから、いったん沈降した堆積物が水流の乱れなどによって浮上することは少ないといった特長を有している。

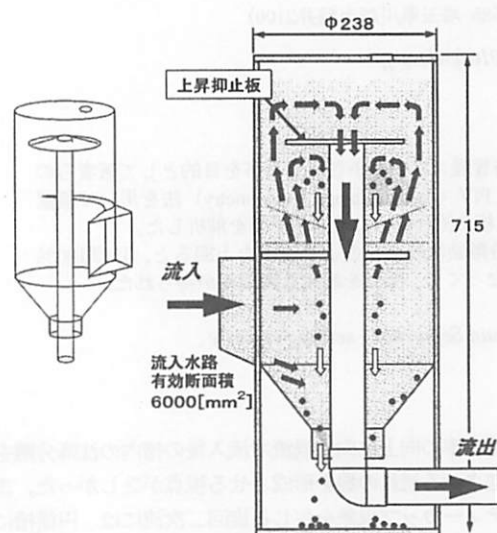


図-1 渦流固液分離装置

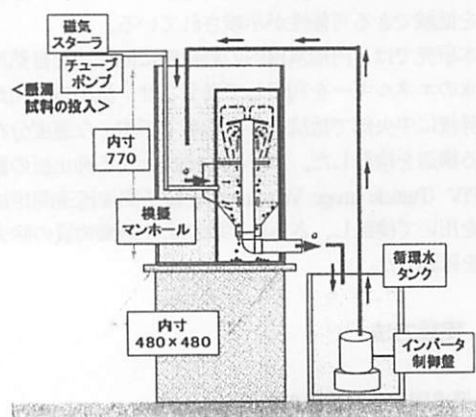


図-2 実験装置構成

(2) 実験装置の構成

渦流固液分離装置を透明アクリル板で作成した模擬マンホールの中に入れ、ポンプで模擬マンホール内に水を循環させる図-2 に示す実験装置の構成とした。流入水量は排水ポンプをインバータ制御することで設定する。懸濁物質に相当する試料は、所定濃度に磁気（マグネチック）スターラで攪拌し、チューブ（定量送液）ポンプを用いて分離装置の流入口に送水する。

表-1 試料一覧

No	試料名称	形状	比重	粒度範囲[μm]
①	プラスチックビーズ	多角形	1.50	177~125
②	ガラスビーズ	球形	2.50	125~106



図-3 資料①（画像）—プラスチックビーズ

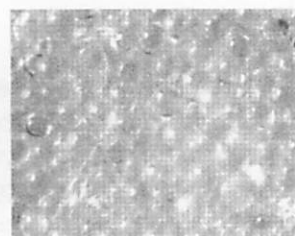


図-4 資料②（画像）—ガラスビーズ

(3) 汚濁水の供給条件

固液分離の基本性能を明確にするため、懸濁物質に相当する試料として、均一物質で径のばらつきが明らかで沈降速度が均一となる表-1 に示す2種を用意した。ガラスビーズの比重はほぼ砂礫（比重2.65）と同等、プラスチックビーズの比重はより1.0 に近く、双方とも工業用研磨剤として一般に販売（不二製作所）されており、画像を図-3、図-4に示す。

本試料を所定の濃度に調整した混合水を、実際の現象に近い形で分離装置へ供給出来ない、除去性能の信頼

性が確保されない。既往の装置・文献⁵⁾には適切な方法がなかったので、予備確認実験を行った。試料①を濃度3000 mg/Lに蒸留水で調整した混合水1Lを磁気スターラーで攪拌しつつ、チューブポンプでろ紙（真空吸引）へ20秒間、送水量0.52 L/minで送りポンプを停止させた。ろ紙上のろ過残留物の質量を測定し、実験時間内に調整した濃度を均一に保って混合水を送れる事を確認した。

(4) P I V計測方法

沈降分離を促進させる流れ、特に装置内上昇流を解析するために、図-5に示すPIV計測を行った。PIV法は、流れを可視化し解明する有効な手段で、特定の位置の流速を定量的に把握出来る。撮影には高速度ビデオカメラ PHANTOM MIRO4 (Version RESEARCH Inc) を用い、撮影速度は100 Frame/Sに設定した。カメラは水槽の側面に直角になるよう設置し、その面を正面とした。光源にはメタルハライドランプを使用し、厚さ0.5 mmのスリット光として水槽の両側壁から照射した。これにより上昇抑止板や流出パイプの影による撮影上のムラを抑えた。速度場計測にはPIV法を用い、直径50 μm のパーティクル ORGASOL (KANOMAX Co.) をトレーサ粒子として用いた。PIV解析ソフトは、Flow PIV (Library Co.)を使用した。PIV計測は相互相関法を用いて行い、用いた画像サイズは800×600 pixelで、画素分解能は0.32 mm/pixelである。これにより、流出パイプ周りに形成される上昇流れの場において、抵抗となる上昇抑止板の有無による速度分布やベクトルを把握し比較検討した。

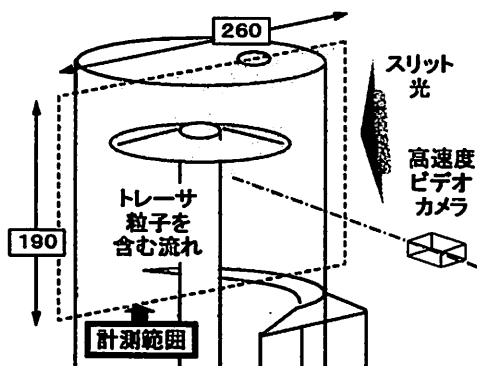


図-5 P I V測定系構成

(5) 除去率測定方法

渦流固液分離装置での懸濁物質除去率の測定は下水試験方法⁶⁾（ガラス繊維ろ紙法）に基づいて行い以下のと

おりである。模擬マンホールの中に設置した渦流固液分離装置へ、ポンプで水道水を循環させ流量を安定させた。その後蒸留水1000 mLの入ったピーカーに所定濃度に相当する試料を入れ、磁気スターラーで攪拌しながら、チューブポンプで渦流固液分離装置の流入口の中心部に0.52 L/minを送水した。渦流固液分離装置の流出パイプからの流出水を容器にて採水し、孔径1 μm のガラス繊維ろ紙で吸引ろ過し、ろ過残留物の質量を測定した。

渦流固液分離装置に投入した堆積物の総量と流出水中のろ過残留物の総量から、渦流固液分離装置における堆積物の除去率を求めた。

3. 実験結果

(1) P I V測定結果

上昇抑止板の効果の確認のため、PIV計測した上昇流れ場の映像から静止座標系で速度ベクトル表示した例を、図-6に抑止板が無い場合を、図-7に有りの場合を示す。ベクトル解析結果で、矢印は速度の方向および大きさを示し、一例として両図の中間位置で、水平面状の速度分布を水平向きを0度としたベクトル角度と共に示す。

一般に沈降分離を行う沈澱池では、処理水量をQ、表面積をAとすると水面積負荷率⁷⁾は、 $V=QA$ で示され本

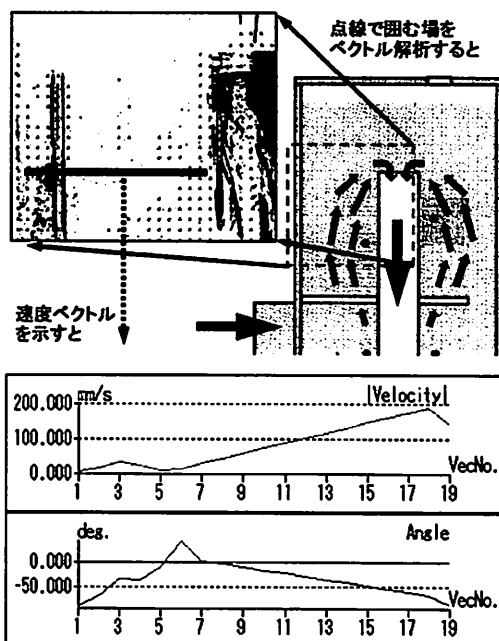


図-6 速度ベクトル（上昇抑止板無し）

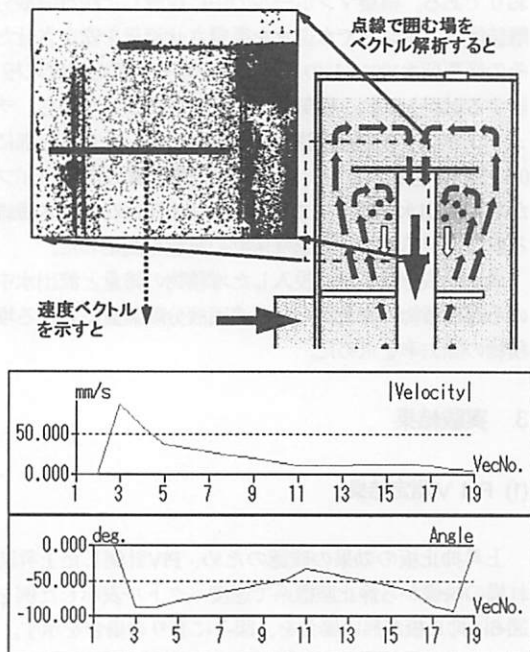


図-7 速度ベクトル（上昇抑止板有り）

装置では上昇流速に相当する。本実験時の設定水量22.9 L/min から平均流速 $V=8.6$ mm/s となるが、図-6では中央部で100mm/s 以上の早い上昇流領域が存在し、その外周部でも水平向きの早い流れが広くあり、流出パイプ上部開孔へ流れ込んでいる。既往の固液分離装置に多い上部流出型はその流出構造によって、水面積負荷率より数倍大きい流れが支配する可能性が示された。

一方、図-7では上昇抑止板の下部領域で10 mm/s 以下の停滞した流れが広く存在し、周縁部に50 mm/s 以上の早い上昇速度の狭い領域があり、上昇抑止板表面に沿って流出パイプ上部開孔へ流れ込んでいる。

(2) 除去性能評価結果

除去性能評価の実験条件を、表-2に示す。

分離装置へ流す水量は、各実験において①15～19 L/min、②27～32 L/min、③35～38 L/min の3ケースで行った。

a) 試料①および②の除去性能検討

試料①と②の沈降速度（ニュートン式による理論値と実測値）と、実験時の流量から算出した上昇速度を表-3に示す。沈降速度の理論値は、式(1)から算出した。

$$v = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g(s-1)d}{C_d}} \quad (1)$$

ここに、 g は重力加速度、 s は比重、 d は代表的長さで直径、 C_d は抵抗係数でレイノルズ数との関係で決めた。砂粒子などの沈降速度を正確に測定するには沈降天秤法などが用いられるが、本研究では、内径10cm・長さ145cmの亚克力製の透明カラムを用いて、一定質量のものを水に入れて攪拌し、マクロビペットで採取しまとめて沈降させた。沈降速度がほぼ一定になると認められる位置から50cm沈下した位置までの時間を、沈下方向に対して先方・中央・後方3カ所の試料についてストップウォッチで計測し、試料の大半が示した中央沈降速度を実験的に求めた。

表-2 除去性能評価実験

No	試料名称	試料濃度 1000[mg/L] (上昇抑止板 有り)	試料濃度 1000[mg/L] (上昇抑止板 無し)	試料濃度 3000[mg/L] (上昇抑止板 有り)
①	プラスチックビーズ	●	—	—
②	ガラスビーズ	●	●	●

表-3 試料①—沈降速度と実験時上昇速度（計算値）

No	試料名称	沈降速度[mm/s]	
		理論値	実測値
①	プラスチックビーズ	5.1	6.8

上昇速度[mm/s]		
Q=15.0 [L/min]	Q=28.8 [L/min]	Q=36.3 [L/min]
5.6	10.8	13.6

表-4 試料②—沈降速度と実験時上昇速度（計算値）

No	試料名称	沈降速度[mm/s]	
		理論値	実測値
②	ガラスビーズ	8.8	9.0

上昇速度[mm/s]		
Q=18.4 [L/min]	Q=27.5 [L/min]	Q=35.3 [L/min]
6.9	10.3	13.2

実験時の試料濃度 1000 mg/L は、多くの産業廃水のSS濃度上限を想定して設定し、除去性能実験を行った結果を図-8に示す。実験時の水温は17～18℃で、沈降速度を実測した際の水温とほぼ同じである。

砂礫の比重（2.65）に近い試料②では、上昇速度（13.2 L/min）が沈降速度（8.8 L/min）の1.5倍になっても、除去率は85%以上となった。

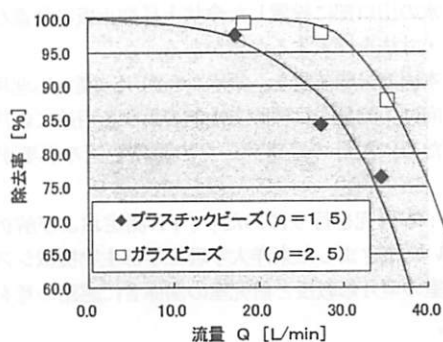


図-8 試料①と②の除去率

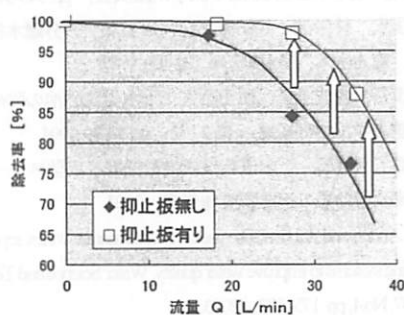


図-9 上昇抑止板の有無と除去率

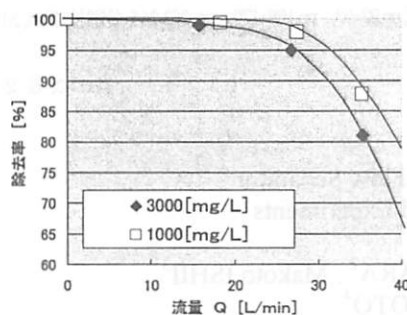


図-10 試料濃度と除去率

b) 上昇抑止板および干渉沈降の検討

上昇抑止板がない図-6の構成での除去性能実験結果を図-9に、干渉沈降の影響を確認するため試料濃度を3倍濃くして行った実験結果を図-10に示す。上昇抑止板により、約10% 除去率は向上し、干渉沈降の影響では、約5%の低下が認められた。

4. 考察

(1) 固液分離方式

本渦流固液分離装置と類似の施設がスワール⁴⁾と一般には呼ばれており、合流式下水道の雨水吐における水質問題、とくに有機物の除去を目的として、東京都の善福寺川流域に小規模の施設が、また実規模の施設が愛媛県松山市や北海道恵庭市に設置、さらには海外でも使用⁵⁾されている。また、化学工学の分野では、液体サイクロン⁷⁾という名称で使用されている。しかし、いずれの施設も本研究が目指している主に無機物の除去とは異なり有機物の除去・削減を図るものであり、流出水(処理水)の流出法も異なっている。

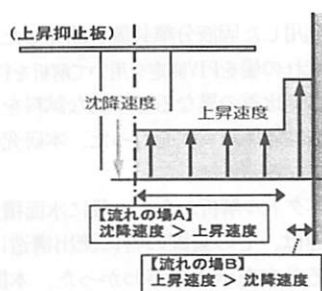


図-11 上昇流れの場合

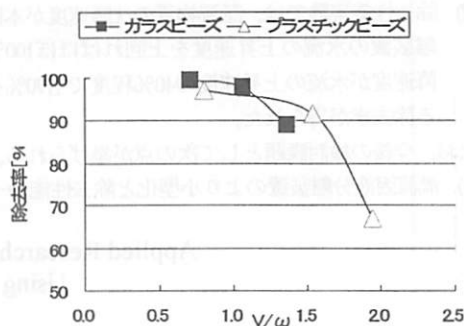


図-12 除去率のまとめ

本方式では、まず円形装置内に懸濁物質を含む今後雨水が流れ込み、ゆっくり回転する時に懸濁物質が装置中央部に集められ、次に上昇流となって流出パイプ上部へ向かう流れの場で、図-11に示すような懸濁物質の沈降速度より速い上昇流領域が既往技術と異なり最外周部に限られる形になるよう上昇抑止板が有効にはたらくので、除去率の向上が得られていると考えられる。

(2) 既往沈降分離技術と除去率比較

分離装置へ流す水量を装置の上昇流部の有効断面積で除して水流の上昇（鉛直）速度を求め、この水面積負荷率を V とし、堆積物の粒子の水中の沈降速度を ω として、 V/ω と除去率との関係として除去性能評価結果をまとめ図-12に示す。山田らの研究³⁾では、除去砂平均径0.32 mmの除去率80%とあり、R.Y.G.Andohらの研究⁵⁾では、約60～80%の除去率が報告されている。既往の分離水槽、沈殿槽等では、水面積負荷率は沈降速度より小さくなる事を原則（ $V/\omega < 1.0$ ）として設計されており、 $V/\omega > 1.5$ はあり得ないが、今回の85%を超える結果は、除去率向上が図られたものと考えらる。

5. 結論

渦流を利用した固液分離装置を開発した。沈降分離を促進する流れの場をPIV測定を用いて解析を行い、次に粒度分布が小さく比重の異なる標準的な試料を入れた混合水による除去性能確認実験を行った。本研究の主な結論は次のようになる。

- (1) 速度ベクトル解析から、一般に水面積負荷が示す上昇流速は、その装置の特に流出構造により大きく異なる分布を示す事がわかった。本開発の上昇抑止板は、上昇流れの場において懸濁物質の集まる中央部に上昇流速の小さい流れの停滞領域を形成する効果を有する事を確認した。
- (2) 除去性能実験では、懸濁物質の沈降速度が本固液分離装置の水流の上昇速度を上回ればほぼ100%、沈降速度が水流の上昇速度の40%程度でも70%を超える除去率が得られた。

なお、今後の検討課題として次の点が挙げられる。

- (1) 渦流固液分離装置のより小型化と除去性能の一層の

向上を目指して、渦流固液分離装置の流入口や流出水の出口部に設置した傘状上昇抑止板の最適な形状・寸法を探索する必要がある。

- (2) 本固液分離装置を、雨水から河川・廃水処理用途に向け流量や目標除去性能の異なる用途に応用するために設計の基礎データの蓄積を図る必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、PIV測定および解析にご協力いただきました東洋大学理工学部生物機械システム研究室の望月修教授と研究室の関係者に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 荻原国宏, 坂口外男: 円形回転水槽による沈砂効果についての研究, 土木学会第38回年次学術講演会, pp.545-546, 1984.
- 2) 荻原国宏, 林栄港: 回転流れを利用した土砂分離水槽の現地実験, 電力士木, Vol.207, pp.102-109, 1987.
- 3) 山田慎吾, 金成英夫, 西田哲夫: 下水道沈砂池の除砂機能, 国土館大学工学部紀要, 第27号, pp.25-39, 1994
- 4) 東京都下水道局, 下水道新技術推進機構: 小型スワールによる合流改善効果の追跡調査報告書, 2003.
- 5) R.Y.G.Andoh and A.J.Sail, The use of hydrodynamic vortex separator and screening systems to improve water quality, Water Science and Technology, Vol.147, No.4, pp.175-183, 2003.
- 6) 日本下水道協会: 下水試験方法 (上巻) 第2章 水質試験, pp.294-296, 1997.
- 7) 日本液体溶澄化技術工業会編: ユーザーのための実用固液分離技術, pp.92-93, pp.168-170, pp.263-265, 分離技術会, 2010.

(2010. 5. 21受付)

Applied Research On Circulating Flow Separator Using PIV method and Experiments

Koshiro NAKAJIMA¹, Kunihiro OGIHARA², Makoto ISHII³
and Kuniharu YOSHIMOTO⁴

¹Urban Infrastructure & Environmental Products Company, Sekisui Chemical Co., Ltd

²Tekisui Institute of Environmental Hydraulics

³Research Student, Faculty of Information Sciences and Arts, Toyo University

⁴Faculty of Information Sciences and Arts, Toyo University

The Research to Solid-liquid Separator by using Circulating Flow, which was developed by authors, was conducted with the aim of enabling energy saving, low maintenance cost system for water treatment. PIV (Particle Image Velocimetry) method was applied to measure velocity fields of the separator, to clarify the effect of the obstruction plate installed at the outlet part of the separator.

The results showed that the removal rate of Circulating Flow Separator was almost 100%, when the settling velocity of deposit exceeded a rising speed of water in a Circulating Flow separator. Even when the rising speed of water became one and a half times as the settling velocity, the removal efficiency exceeding 85% was obtained.