

長岡市の実下水を用いた実機スワールの除去性能の解明

廃棄物・有害物管理工学研究室 修士2年 福間貴宏
指導教員 小松俊哉 姫野修司

1. 背景と目的

合流式下水道では、雨天時に処理場で処理しきれない下水を未処理のまま公共水域に放流している。この未処理下水は合流式下水道越流水（Combined Sewer Overflow：以下「CSO」と記載）と呼ばれ、対策が重要な課題となっている。

そこで、本研究では、このCSOの対策装置としてスワール（渦流式分離装置）に着目した。スワールとは、直径1メートル～10メートル程度の円筒形のマンホールであり、CSOが流入することで発生する渦流によって、汚濁物が中心部に集められ、マンホール底部から遮集する。また、汚濁物と分離した処理水は、上部から越流し公共水域に放流される。そのため、スワールは無動力で下水を処理することが可能であり、雨天時に頻繁に放流されるCSOの対策装置として適していると考えられる。

しかし、これまでのスワールに関する研究は、流入量、流入水質の変化が自然現象であるため、実験条件の設定が困難であり、計画的な研究が継続されなかった。また、スワール本体が道路の下に埋設されているため、観測が困難であり、十分な性能評価が行われていない。そのため、広く採用されるに至っていない。

そこで、本研究では、処理場への実下水を用いて実機スワールの汚濁物の除去性能を解明することを目的として、流入水質の変化による除去性能の解明と、その評価手法の確立について検討した。

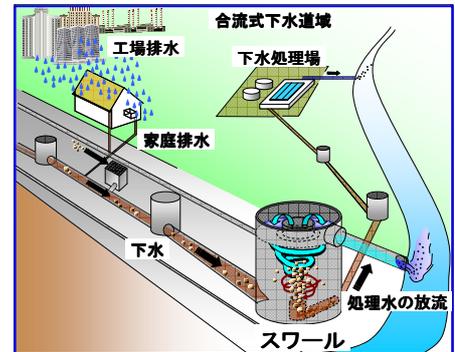


Fig.1 CSO対策のスワールの適用

2. スワール施設の設置

Fig.1に示すように除去性能の観測を容易にするため、終末処理場である長岡中央浄化センターの沈砂池棟地下1階に直径1.5mの実機スワールと関連配管等を埋設せずに設置した。

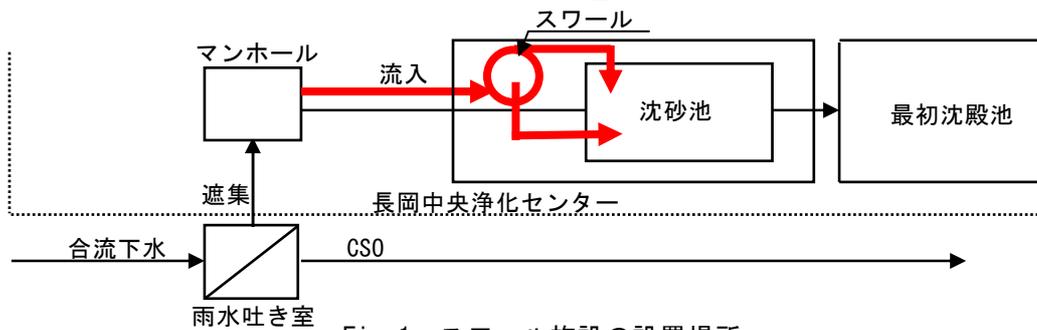


Fig.1 スワール施設の設置場所

これにより、観測を容易とし、実機スワールの可視化を可能とした。そして、流入管と遮集管に手動バルブを増設することで、任意の流入量で様々な降雨条件を再現可能とし、実験条件の設定を容易にすることを可能とした。

Fig.2にスワール施設を示す。

さらに、スワールへの流入水質を一定にするために砂と濃縮汚泥をそれぞれ流入水に投入する装置と流入水の採水装置を組み立てた。

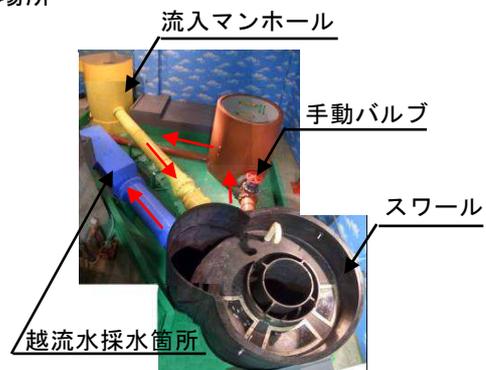


Fig.2 スワール施設

3. スワールの基本性能の確認

スワールは槽内で渦流が発生することで、汚濁物と処理水を分離することができる。そこで、本研究のスワールでもその基本的性能を確認した。それには、最終沈殿池での2次処理水を用いた。2次処理水は、処理場内の雑用水として用いられているため、処理場内のタンクに貯められている。2次処理水を貯留タンクから流入マンホールに導入し、スワールへ流入させた。

確認方法は、汚濁物のかわりとして白色物である豆腐とマシュマロをスワール内に投入して、Fig. 3 に示すスワールの一部に設けた観察窓から目視した。豆腐は沈殿物、マシュマロは浮遊物を代表させた。

Fig. 4 に示すように沈殿物は渦流により中心部に集まりながら沈殿し、底部の遮集管から流出した。

Fig. 5 に示すように浮遊物は越流することなくスワール内の水面を浮遊し、スワール内の水位が低下するとともに底部の遮集管から流出した。

このことから、本研究において実験的に製作したスワールでも渦流が発生し、沈殿物を中心部に集め、浮遊物を越流させないことが分かった。すなわち、汚濁物と処理水を分離するというスワールの基本的性能を確認した。



Fig. 3 スワールの観察窓



Fig. 4 沈殿物が中心部に集まる様子

4. 実験方法

スワールは雨天時に CSO の対策装置として作動するため、除去性能の評価実験には、雨天時の実下水を用いることが望ましい。しかし、雨天時だけでは、評価実験を行える頻度が少なく、様々な実験条件で評価実験を行うことが困難である。また、先行晴天期間、降雨強度等の条件により、雨天時の実下水の流量・水質が大きく変動することが考えられる。

そこで、除去性能の評価実験は、主に流量・水質が安定している晴天時の実下水を用いて行った。

4.1. 実下水の流入条件

晴天時の除去性能の評価実験は、処理場のオペレーターにマンホール内水位を調整していただき、実験を開始する。晴天時のマンホール内の水位は 15.000m 程度が通常であるため、沈砂池に設備されているポンプの動力を弱めていただき、マンホール内の水位をスワールの越流堰高さ (15.550m) 以上に上昇していただく。この際、スワール施設からの溢水を防ぐために流入マンホールの天端高さよりマンホール内の水位を上昇させないようにしていただいた。そして、評価実験中はマンホール内の水位が一定水位になるようにポンプの動力を調整していただく。



Fig. 5 浮遊物が中心部に集まる様子

Fig. 6 に実下水の流入条件を記した断面図を示す。

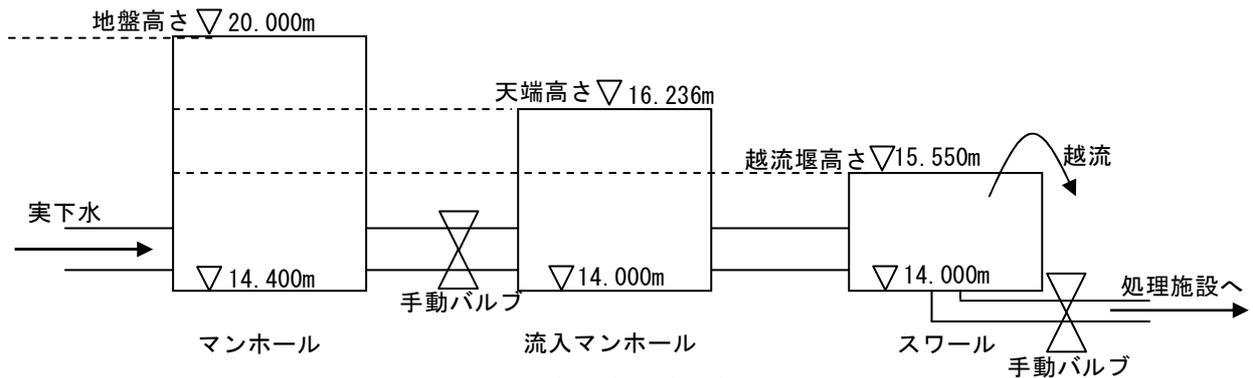


Fig. 6 実下水の流入条件

4.2. 除去性能の評価指標

本研究では、汚濁負荷量に対する除去率の評価を行うための前段として、水質の低下割合を評価する「水質除去率」の評価に視点をおいた。水質除去率が高ければ、スワールの除去性能が高いと評価できる。

サンプルの採水箇所は流入水と越流水とし、採水間隔は5分間隔とした。ここで、流入水はスワール内に流入した後、遮集水と越流水に分岐する。その際、スワール内で滞留している時間が発生する。越流水は滞留時間の経過後にスワールから越流することから流入水のサンプルと越流水のサンプルを対応させるために、滞留時間を算出して滞留時間の経過後に越流水を採水した。滞留時間 (s) はスワールの貯留量 (1.114m³) に流入量 (m³/s) を除すことで算出する
水質項目は下水試験方法に則ってSSを測定した。

5. 実験条件の検討

本研究のスワール施設では、スワールへの流入管と遮集管に手動バルブを設置しているため、実下水の流入量、遮集量を任意に変化させることができ、除去性能を評価することが可能な施設である。

除去性能を解明することで、実際に採用される際に、設置計画の現場から下水処理場に送られる遮集量に適した流入量が分かり、流入量から算出した滞留時間より、スワールのサイズを設定できる。そして、流入水質の変化による除去性能から現場のCSOの性状に適した除去性能を推定することができる。

そこで、評価実験を行っていく上で、流入量と遮集量の比 (以下「流入量/遮集量」と記載)、スワール内での滞留時間、流入水質を実験パラメータとした。そして、その中でどの実験パラメータが除去性能に最も関与しているかを検討した。まず、流入量/遮集量を3.0、滞留時間を40sとして、水質除去率50%以上を示すと考えられている実験条件¹⁾で評価実験を行った。次に設定した初期条件から流入量/遮集量を変化させた実験条件、滞留時間を変化させた実験条件、流入水質を変化させた実験条件で評価実験を行った。

Table1 に実験条件と除去率の関係を示す。

Table1 実験条件と除去率の関係 (平均値)

実験条件	流入量/遮集量	滞留時間(s)	SS (mg/L)	除去率 (%)
初期条件	3.0	40	71	8
流入量/遮集量を変化	1.5	40	93	8
滞留時間を変化	3.0	140	65	16
流入水質を変化	3.0	140	132	28

スワールの除去性能は、下水処理施設の簡易処理と同様の除去率 30%程度²⁾と期待されていることから、初期条件をもとに流入量/遮集量、滞留時間を変化させた実験条件では、除去率の変化は小さく、除去性能にそれほど関与していないことが示唆された。そして、流入水質を変化させた実験条件では、除去率の変化は大きく、除去性能に最も関与していることが示唆された。

このことから、流入量/遮集量を 3.0、滞留時間を 140s とし、流入水質のみを変化させてスワールの除去性能を評価していく。

6. 評価手法

実際に公共用水域に放流されている CSO の性状を把握し、CSO の性状と同程度の流入水質を用いて除去性能を評価していく。そして、CSO の性状を把握するために、SS、30 分間沈殿させた沈殿物量、および沈殿物の沈降速度を測定した。なお、サンプルは、丹野ら³⁾が観測した長岡駅周辺の合流式下水道区域から放流されている CSO をオートサンプラーで採取した。そして、29 サンプルを測定した結果、SS は 101~549mg/L で平均 237mg/L、沈殿物量の割合は 69~98% で平均 88%、沈降速度は 0.33~1.02cm/s で平均 0.65cm/s であることが分かった。

このことから、これらの値を CSO の性状と想定し、スワールへの流入水質を CSO と同程度の性状に変化させながら除去性能の評価実験を行っていく。そのためには、処理場の沈砂池に放流しても処理場の運転に支障がなく、CSO の性状に近づけることができるものを流入水と混合させる必要がある。そこで、消化汚泥と濃縮汚泥を選定し、これらの汚泥を流入水と混合させて、どちらと混合することで CSO の性状に近づくのかを検討した。

Table2 に消化汚泥と濃縮汚泥をそれぞれ 20L ずつ流入水と混合させ、流入水を採取し、測定した結果を示す。

	SS(mg/L)	沈殿物量(mg/L)	沈殿物量の割合(%)	沈降速度(cm/s)
消化汚泥	53	22	42	0.25
	90	41	46	0.24
	156	85	54	0.26
	172	98	57	0.25
濃縮汚泥	180	127	71	0.36
	196	144	73	0.31
	144	94	65	0.25
	144	100	69	0.33
	228	152	67	0.29

消化汚泥を混合させた流入水の性状は、沈殿物量の割合が平均 50%、沈降速度が平均 0.25cm/s であり、濃縮汚泥を混合させた流入水の性状は、沈殿物量の割合が平均 69%、沈降速度が平均 0.31cm/s であった。想定した CSO の性状は、沈殿物量の割合が平均 88%、沈降速度が平均 0.65cm/s であるため、濃縮汚泥を混合させた流入水のほうが CSO の性状に近づくことが分かった。

このことから、濃縮汚泥を流入水に混合させて流入水質を変化させていくこととした。また、さらに CSO の性状に近づけるために、ストークスの式⁴⁾より CSO の平均沈降速度 (0.65cm/s) から沈殿物の粒径を求め、その粒径の沈殿物も流入水と混合させることとした。

以下のストークスの式 (1) より沈殿物の粒径 d を算出する。

$$v = \frac{1}{18} \times \frac{g}{\nu} \times \left(\frac{\rho'}{\rho} - 1 \right) \times d^2 \quad (1)$$

ここで、 v : 沈降速度 0.648 (cm/s)、 g : 重力加速度 9.8 (m/s²)、

ν : 動粘性係数 1.138×10^{-2} 、 ρ' : 粒子の密度 2.64 (g/cm³)、 ρ : 水の密度 1 (g/cm³) である。

計算の結果、沈殿物の粒径は 0.09cm と想定された。

このことから、濃縮汚泥と 0.09cm=0.9mm の粒径の沈殿物を流入水と混合させる。

そこで、砂を 0.7mm 以下、0.7~1.7mm、1.7~2.0mm の 3 種類の粒径に分けた。そして、汚物用ポンプとバルブで組み立てた投入用装置を用いて粒径別の砂と濃縮汚泥 (6L/min) をそれぞれ流入水に投入して、流入水質の変化による除去性能を評価した。

7. 実験結果

流入量/遮集量を 3.0、滞留時間を 140s とし、流入水に 0.7~1.7mm の砂と濃縮汚泥を投入して、5 分間隔で流入水と越流水を採水して評価実験を行った。Fig. 7 に CSO と同程度の性状による SS : 300~350mg/L の場合の除去性能を示す。

除去率は平均 52% であり、高い除去性能を示した。

このことから、CSO と同程度の性状の流入水質であれば、除去率は約 50% を示すことが分かった。また、流入水質の変化は 300~348mg/L であり、100mg/L 以下の変化であることから、流入水質の変化の一定化を可能にしたと考えられる。

このことから、流入量/遮集量、滞留時間といった流量のパラメータのみを変化させた評価実験を行うことが可能となった。また、自然現象において刻々と変化する流入量、流入水質の実験条件を任意に決定できる評価手法を確立した。

Table3 に 3 種類の粒径の砂と濃縮汚泥を用いた粒径の変化による除去性能を示す。

Table3 粒径の変化による除去性能 (平均値)

粒径(mm)	SS(mg/L)	沈殿物量の割合(%)	沈降速度(cm/s)	除去率(%)
0~0.7	251	72	0.38	31
0.7~1.7	315	71	0.56	52
1.7~2.0	363	80	0.70	54

除去性能は、SS が高く、沈殿物の割合が多く、沈降速度が速い性状の流入水質ほど高くなることが示唆された。これは、スワールが渦流と共に重力を利用して汚濁物を処理しているためだと考えられる。

8. 除去性能の推定

粒径別の砂と濃縮汚泥をそれぞれ流入水に投入して行ってきた実験で、沈殿物量、沈降速度を測定した 29 サンプルのデータを用いて、重回帰分析より除去率を推定する式を求めた。

式 (2) に推定する式を示す。

$$y = 0.038a + 0.41b + 32c - 15 \quad (2)$$

ここで y : 除去率 (%) a : SS (mg/L) b : 沈殿物量の割合 (%) c : 沈降速度 (cm/s) である。

決定係数は 0.64 であり、推定値と実測値の相対誤差の絶対値は平均 14% であった。

そして、CSO の性状と想定した水質の値を式 (2) に代入すると、除去率は 51% と推定される。このように、推定式を用いることで、様々な実験条件による除去性能を推定することができ、実験条件に含まれていない条件の除去性能も評価することが可能となった。

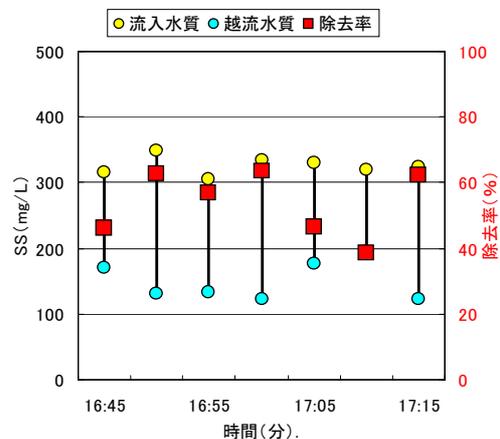


Fig. 7 CSO と同程度の流入水質による除去性能

9. 結論

- (1) 実機スワールを下水処理場沈砂池棟地下 1 階に設置したことにより、観測を容易とし、実機スワールの可視化を可能とした。そして、流入管と遮集管に手動バルブを増設することで、任意の流入量で様々な降雨条件を再現可能とし、実験条件の設定を容易にすることを可能とした。
- (2) 本研究の実験的に製作した実機スワールでも、基本的性能である渦流が発生し、沈殿物を中心部に集め、浮遊物を越流させないことを確認した。
- (3) 砂と濃縮汚泥を流入水に投入する装置を用いて流入水質を CSO と同程度の性状にすることを可能とし、流入水質の一定化も可能とした。このことから、除去性能に大きく関与している流入水質の変化を一定にしたまま流入量/遮集量、滞留時間といった流量のパラメータのみを変化させた評価実験を行うことが可能となった。そして、現場実験において刻々と変化する流入水質、流入量の実験条件を任意に決定できる評価手法を確立した。
- (4) CSO と同程度の性状の流入水質であれば、水質除去率は約 50%を示し、簡易処理の水質除去率 30%より高い水質除去率を示すことが分かった。
- (5) スワールの除去性能は、SS が高く、沈殿物量の割合が多く、沈降速度が速い性状の流入水質ほど高くなることが示唆された。

10. 今後の展望

本研究の実験条件では流入量を $0.008\text{m}^3/\text{s}$ 程度と一定にしたが、スワールを CSO の対策装置として実際に採用する場合に、流入量は設置する吐き口の放流量によって変化するため、流入水質を一定にして流入量/遮集量、滞留時間を変化させた流量の変化による除去性能を評価していくことが必要である。しかし、流量の変化による評価を行っても除去性能に大きく関与しないことが得られているため、流量を変化させる際には、3 段階程度の変化とし、大きく流量を変化させることが、流量の変化による除去性能の解明には望ましい。

そして、スワールを CSO の対策装置として提案し、水環境の保全に資するために、今後も様々な実験条件で、スワールの除去性能を評価していく。

参考文献

- 1) Gebhard J WeiB, Steven Michelbach : Vortex separator dimensionless properties and calculation of annual separation efficiencies, Water Science and Technology, Vol.33, No.9, pp.277-284, 1996.
- 2) 社団法人 日本下水道協会 : 合流式下水道改善対策指針と解説, p207, 2002.
- 3) 丹野智史, 大羽澤圭佑, 藤田昌一, 小松俊哉, 姫野修司 : 長岡市の合流式下水道越流水の水質挙動解析と越流負荷削減対策, 環境工学研究論文集, Vol.42, pp.129-136, 2005.
- 4) 椿東一郎, 荒木正夫 : 水理学演習上巻, 森北出版, p107, 1978.