

高速繊維ろ過による合流式下水道越流水対策

Control of Combined Sewage Overflow with High-Rate Fiber Media Filtration



(環)技術部第3グループ
土谷 聡
Satoshi Tsuchiya

下水道の役割の一つである公共用水域の水質保全が重要視されているなか、合流式下水道での雨天時越流水の汚濁負荷による公共用水域への影響が懸念されている。簡易で即効性のある越流水対策として高速繊維ろ過（浮上性繊維ろ材）による物理処理に着目し、共同研究による実証実験をへて、その実用化に向けた適応性と処理性能評価をおこなった。結果、雨天時簡易処理水をろ過速度2 000 m/d、晴天時二次処理水をろ過速度1 000 m/d 処理することにより、SS 除去率がそれぞれ雨天時50 %程度、晴天時70 %程度の処理性能を有することが確認できた。ろ過速度が高く、単純な構造、無薬注処理を特徴とする本技術が、年間を通じた合流式下水道の放流水水質の向上に寄与できるものと判断される。

Adverse effect of combined sewage overflow caused by rainfalls has been much concerned in view of conservation of water quality of public waters, one of the roles of public sewerage systems. Floating fiber media filtration was assessed as a simple and quick solution for practical application with demonstration tests under collaboration with other sewerage-related companies. The tests confirmed the SS removal ratio of 50 % when combined sewer overflow was treated at filtration rate of 2 000 m/d, and 70 % with the secondary effluent at 1 000 m/d. This system, having high filtration velocity, simple construction and no chemical requirement, is concluded to contribute to the improvement of yearly quality of the effluent from combined sewage system.

Key Words

合流式下水道	Combined sewerage system
合流式下水道越流水	Combined sewage overflow (CSO)
高速繊維ろ過	High-rate fiber media filtration
ろ過速度	Filtration rate
実用SS捕捉速度	Practical SS trapping speed
実用SS除去率	Practical SS removal ratio

まえがき

下水道普及率が高まってきた近年、下水道の役割の一つである公共用水域の水質保全が重要視されている。比較的早い時期に下水道整備がおこなわれた大都市部では、同一の管きよで汚水と雨水を収集・排除することにより、生活環境における汚濁対策と

都市の浸水対策をある程度同時に、かつ速やかに解決できる観点より、合流式下水道が多く採用されてきた。しかしその機能上、雨天時に未処理汚水の一部が雨水とともに公共用水域へ放流されることがあるため、雨天時公共用水域への汚濁負荷量が水質保全上の課題となっている。

これまで合流式下水道の改善策として、遮集管の増強や貯留管、雨水滞水池などの整備が進められてきたが、それらの対策は規模・費用が大きく、期間を要することなどから、簡易で即効性のある対策が求められている。また合流式下水道における雨天時放流負荷量は、自然吐き口からの未処理放流水と同様に、処理場からの簡易処理水（一次処理水）の占める割合も大きいことが知られており、¹⁾ 簡易処理水の高度処理化が公共用水域への放流負荷削減に寄与するものと考えられる。

当社は、(財)下水道新技術推進機構、(株)石垣、栗田工業(株)、(株)神戸製鋼所、三機工業(株)、新日本製鐵(株)、住友重機械工業(株)、日立プラント建設(株)、前澤工業(株)の以上9者とともに、高速繊維ろ過をもちいて、雨天時簡易処理水および晴天時二次処理水を対象に、合流式下水道放流負荷削減を目的とした共同研究をおこない、実証実験による本技術の実用化に向けた適応性と処理性能の評価をおこなった。

1. 高速繊維ろ過

1.1 越流水対策としての位置づけ

合流式下水道越流水とは、雨水吐き室、ポンプ場などからの雨天時未処理放流水に加え、処理場からの簡易処理放流水などを含む広義の越流水を表し、その対策には、一般に次のものが考えられる¹⁾。

- 1) 既存施設を改善し、遮集量を増大させる方法
- 2) 遮集した下水を処理する方法
- 3) 管路施設へ流入する雨水を抑制し、雨天時放流量を削減する方法
- 4) 路面や管きよなどの汚濁物を適切に清掃・捕集し、発生源で抑制する方法

本技術はスクリーニングや急速ろ過などと同様に、上記2)内の物理処理に位置づけられ、浮上性繊維をろ材として従来のろ過装置にくらべ数倍のろ過速度で、無薬注ろ過をおこなうものである。

1.2 ろ過原理

高速繊維ろ過は、原水をろ過槽の下部より流入させ、槽内部に充填した浮上性の繊維ろ材(写真1)からなるろ層を上向流で通過させ、その過程で原水中のSSを除去するものである。本ろ過装置におけるSS除去は、第1段階としてろ過槽下部より流入した原水が上向流でろ層に到達するまでに、上向流の流速より大きな重力沈降速度をもつSSが沈殿除去される。続いて原水がろ層を上向流で通過するあいだに、SSはろ材間の間隙やろ材内部の繊維の間隙で捕捉除去される。

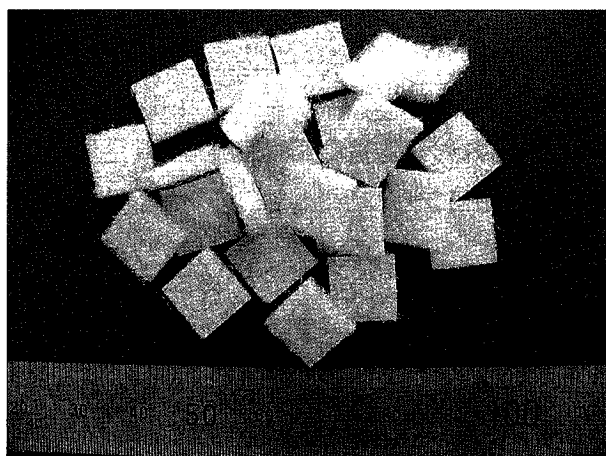


写真 1 ろ材 (mm)
Photo 1 Filter media

1.3 構造

本ろ過装置の構造を図1に示す。原水流入部はろ過槽下部に設け、原水が均等に流入されるよう原水入口が配置される。ろ過中にろ材を支持する上部ろ材受けと、ろ過槽排水時にろ材の流出を防止する下部ろ材受け間の空間上部に、浮上性繊維ろ材からなるろ層が形成される。ろ層下部にはろ材洗浄時にろ材が流動するためのろ層展開部を有する。集水部は上部ろ材受けの上部に設け、ろ過面全体に対してろ過水を均等に集水できるよう集水トラフまたは処理水出口が配置される。洗浄装置はろ材を流動・旋回させるために機械攪拌機と空気管がろ過槽内部に設けられている。

1.4 特長

本ろ過装置は次のような特長を有する。

- 1) ろ材の空隙率が高く、圧力損失が少ないため、高速処理が可能であり、設置スペースが小規模で済み、既存処理場へ適用しやすい。
- 2) ろ材の洗浄方式は機械攪拌を主体とし、空気洗浄との併用により、ろ材の洗浄が確実で洗浄水も少ない。
- 3) 上向流ろ過により重力沈降速度の大きい砂分の沈殿処理が可能である。
- 4) 構造が単純なため、維持管理が容易である。

2. 実証実験

2.1 実験概要

HS下水処理場およびYK下水処理場にて、パイロットプラントをもちいた実証実験をおこなった。HS下水処理場は、日最大汚水量86 300 m³/dの合流式下水処理場である。晴天時において、流入下水は最初沈殿池、反応タンクをへて、最終沈殿池で固液

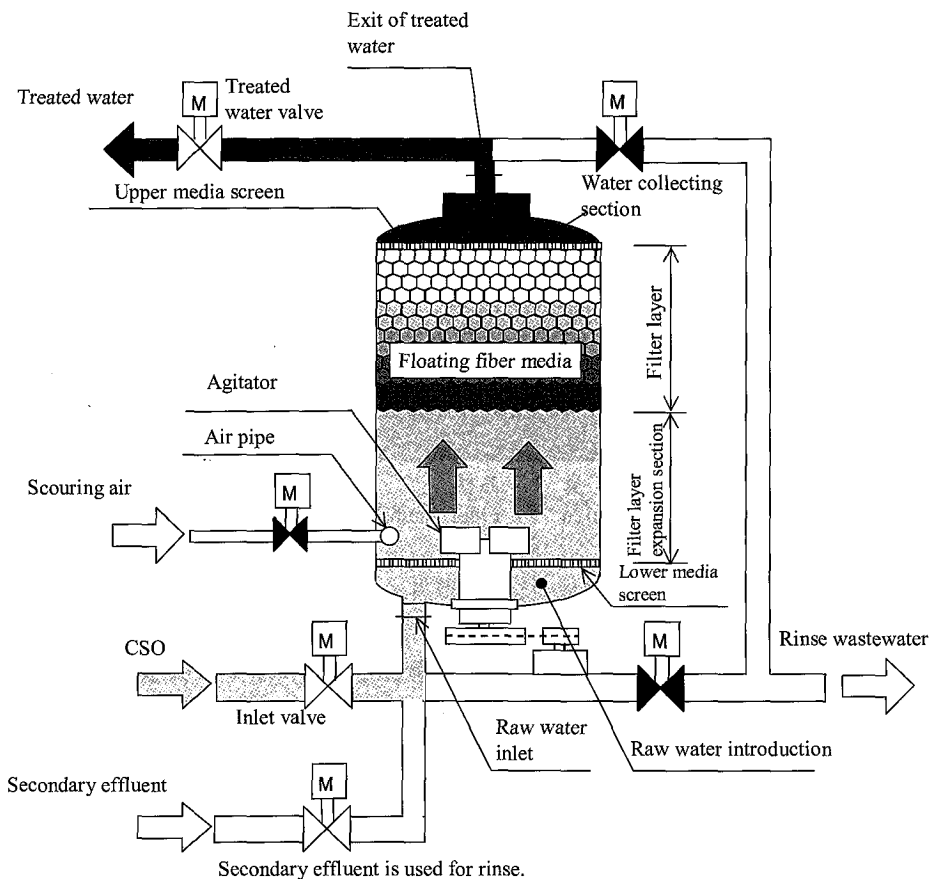


図 1 高速繊維ろ過装置の構造
Fig.1 Structure of high-rate fiber media filter

分離され、二次処理水として塩素混和池で消毒後放流される。雨天時には、流入下水は分水槽で雨水滞水池へ分岐するとともに最初沈殿池へも流入して沈殿処理をおこない、通常の反応タンク以降の処理をおこなうが、規定量を超えた量については沈殿処理後、塩素混和池へバイパスし放流される。YK 下水処理場は、日最大汚水量 $265\,900\text{ m}^3/\text{d}$ の一部合流式下水道で、雨水滞水池を持った処理場である。

HS 下水処理場では実証実験に先立ち、本ろ過装置の適応性に関する基礎調査としてカラム実験をおこない、簡易処理水に対する最適ろ材選定をおこなった。さらに各条件にて得られた実験結果を基に、ろ層厚さおよびろ過速度の処理性能に対する影響について検討をおこなった。その後 HS 下水処理場では小型実証実験機、YK 下水処理場では大型実証実験機をもちいて、連続運転による処理性能評価をおこなった。

各下水処理場における実験装置概略フローを図 2、3 に示す。HS 下水処理場における実証実験（以下小型実証機実験）においては、晴天時に塩素混和池

より二次処理水を取水した。雨天時には最初沈殿池で沈殿処理した簡易処理水を取水した。これらを貯留タンクで受け、ポンプで直接実験機に供給してろ過処理をおこなった。またろ材の洗浄は二次処理水をもちいた。YK 下水処理場における実証実験（以下大型実証機実験）においては、晴天時に塩素混和池より二次処理水を、雨天時には最初沈殿池で沈殿処理した簡易処理水を取水し、これを各ヘッドタンクに供給し、その水位差を利用して実証実験機でろ過処理をおこなった。またろ材の洗浄は二次処理水をもちいた。

2.2 カラム実験

2.2.1 実験条件

実験に供したろ材は、表 1 に示すように平均線径と寸法の異なる 4 種類のろ材とした。

ろ材の比較条件は、表 2 に示すようにろ過速度とろ層厚さを変化させて、最終ろ過圧力損失を、砂ろ過に準じ最終 30 kPa までのろ過実験によるものとした。また雨天時の簡易処理水についてファーストフラッシュを想定した高濃度（SS 濃度 $100\sim 500\text{ mg/L}$ ）から低濃度（SS 濃度 50 mg/L 前後）まで原

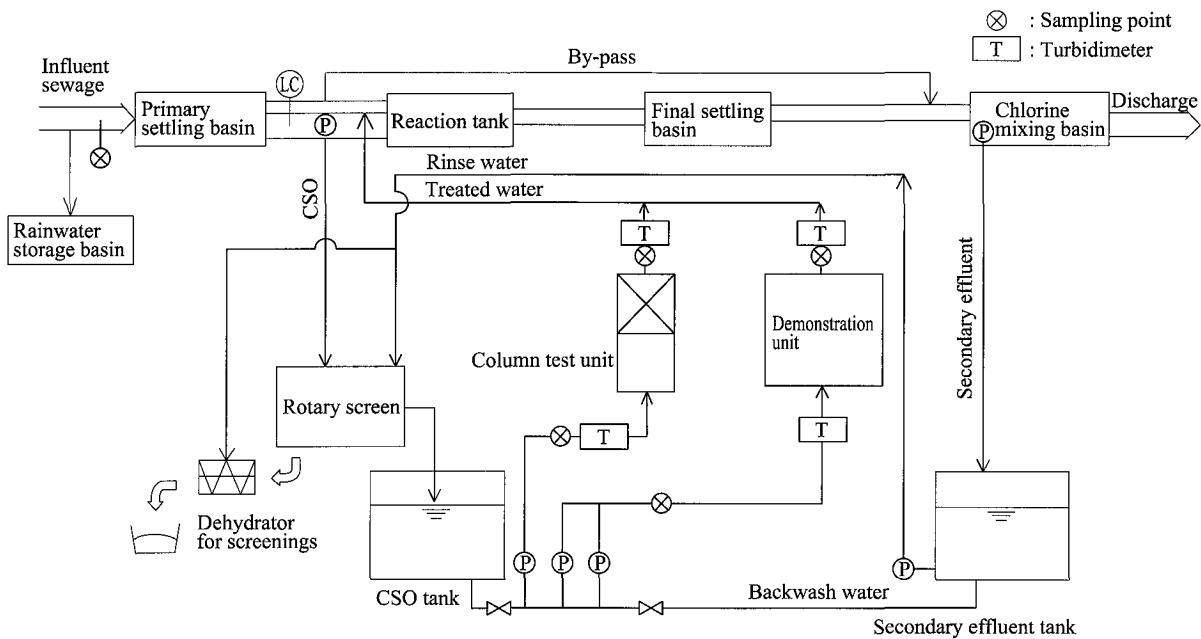


図 2 HS 下水処理場 実験装置フロー
 Fig.2 Schematic flow diagram for demonstration unit at HS sewage work

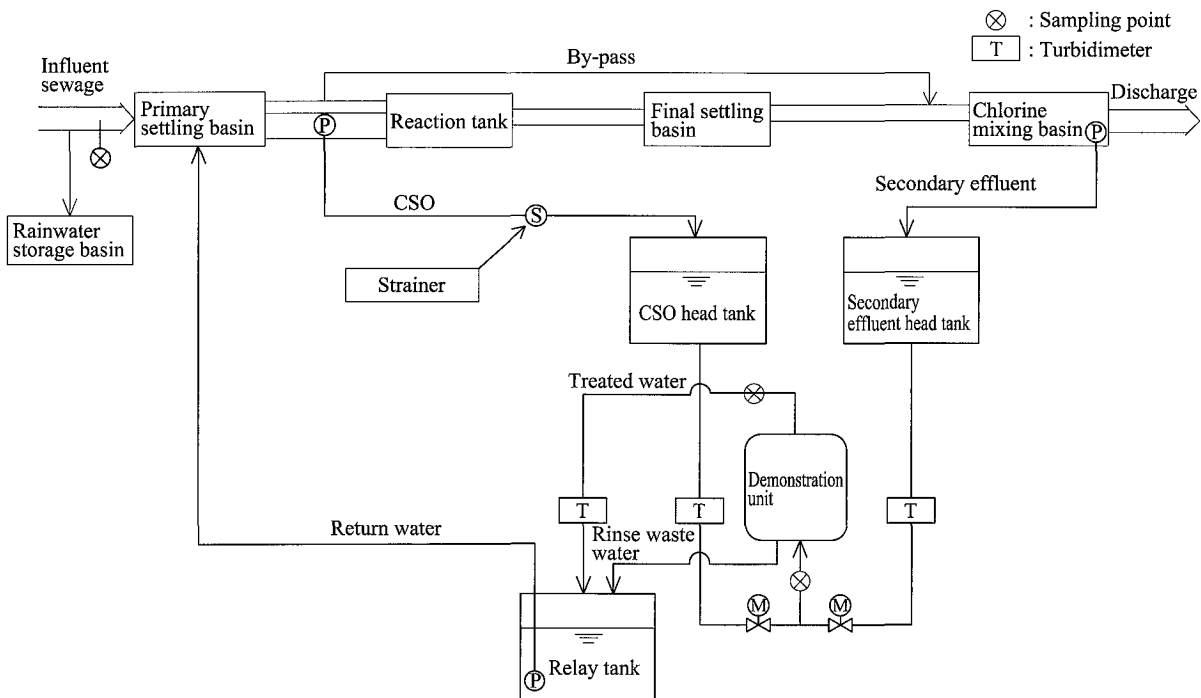


図 3 YK 下水処理場 実験装置フロー
 Fig.3 Schematic flow diagram for demonstration unit at YK sewage work

表 1 選定対象ろ材
 Table1 Test media

Item	Unit	A	B	C	D
Average fiber dia.	μm	53	53	40	40
Dimensions	mm	10×10×2.8	5×5×2.8	10×10×2.8	5×5×2.8

表 2 ろ材比較条件

Table 2 Filter media test conditions

Filtration velocity (m/d)	Filter media		
	A, B, C, D		
	Depth of filter layer		
	1 m	1.5 m	2 m
1 500	—	○	—
2 000	○	○	○
2 500	—	○	—

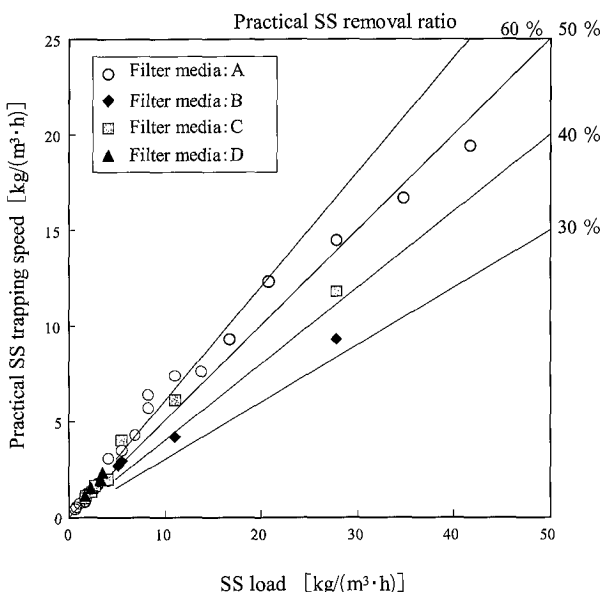


図 4 各ろ材における SS 負荷と実用 SS 捕捉速度の関係
Fig. 4 SS load vs. Practical SS trapping speed by filter media

水濃度を変化させたろ過実験をおこない、そのろ過性能を比較することによりろ材の選定をおこなった。ここで、本研究対象とする雨天時簡易処理水は二次処理水に比べ SS 濃度が高く、ろ過継続時間が短くなることから、単位時間当りの SS 負荷に対する洗浄時間を考慮した実用 SS 捕捉速度および実用 SS 除去率をろ材選定の指標とした。

$$S_c = S_i \times \alpha \times (T / (T + t))$$

$$f = S_c / S_i \times 100$$

ここに、 S_c : 実用 SS 捕捉速度 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

f : 実用 SS 除去率 %

S_i : SS 負荷 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

α : ろ過時の SS 除去率

T : ろ過継続時間 h/サイクル

t : ろ材洗浄時間 h/サイクル

2. 2. 2 実験結果

1) ろ材の選定結果

最終ろ過圧力損失 30 kPa における各ろ材の SS 負

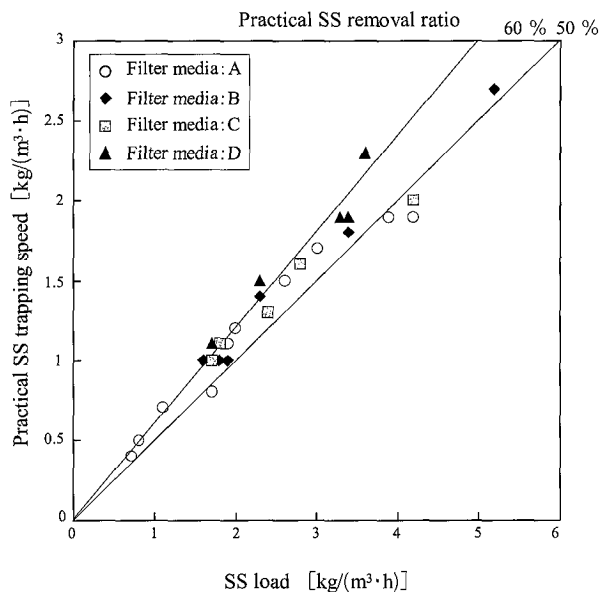


図 5 各ろ材における低負荷時の SS 負荷と実用 SS 捕捉速度の関係

Fig. 5 SS load vs. Practical SS trapping speed by filter media-at low SS load

荷と実用 SS 捕捉速度の関係を図 4 に示す。また図 4 のうち、原水濃度が低濃度 (SS 濃度 50 mg/L 前後) における関係を図 5 に示す。各ろ材について、原水濃度を変化させたときの実用 SS 除去率を指標として評価すると次のとおりであった。

- ① 原水 SS 濃度 50 mg/L 前後の低負荷時では、どのろ材でも実用 SS 除去率は 50~60 % 程度ではほぼ同じ性能を示した。
- ② ろ材 D は低負荷時の実用 SS 除去率は高いものの、原水 SS 濃度 100~500 mg/L の高負荷時にはブレイクスルーし使用不可であった。(図 4 におけるろ材 D の高負荷時のプロット無し)
- ③ ろ材 D を除いて、実用 SS 除去率はろ材 A > C > B の順で良好であった。

以上のことから、ファーストフラッシュへの対応性を考慮した場合、ろ材 A が低負荷から高負荷まで適応性があり、最適ろ材であると判断された。

2) ろ層厚さの影響調査結果

ろ材 A をもちいてろ過速度 2 000 m/d とし、ろ層厚さを変化させたときの SS 負荷と実用 SS 捕捉速度の関係を図 6 に示す。これよりろ層厚さにかかわらず、実用 SS 除去率はほとんど変わらない結果をえた。一方、同条件におけるろ層厚さとろ過水 SS 濃度の関係を図 7 に示す。この図よりろ層厚さ 1.5~2.0 m でろ過水 SS 濃度は安定して低く、ろ過時の SS 除去率は 60 % 以上であった。以上のことから、

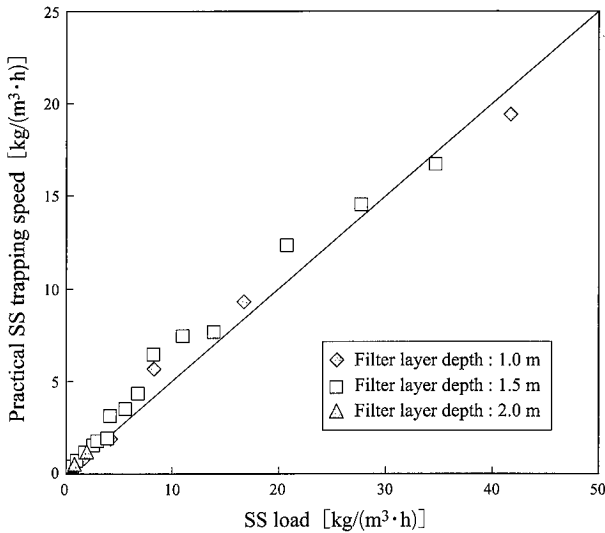


図 6 ろ層厚さによるろ過性能への影響
Fig.6 Effect of filter layer depth on filterability

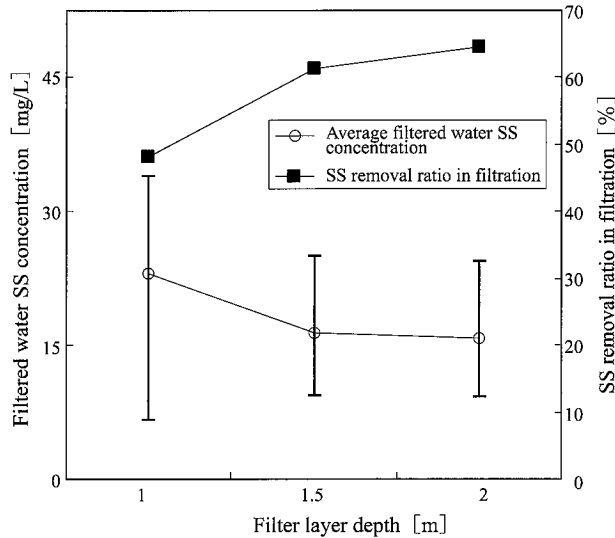


図 7 ろ層厚さによるろ過水 SS 濃度への影響
Fig.7 Effect of filter layer depth on stable SS concentration (SS in raw water : about 50 mg/L)

ろ材量が増えることによる経済性と攪拌効果による洗浄性を考慮すると、ろ層厚さは1.5 m程度が最適と考えられた。

3) ろ過速度の影響調査結果

図8にろ材Aをもちいた、ろ過速度と実用SS捕捉速度の関係を示す。ろ過速度が2000 m/d以下であれば実用SS捕捉速度は最終ろ過圧力損失を変化させても影響が少ないが、ろ過速度が2000 m/dを越えると実用SS捕捉速度の上昇率が低下した。よって、ろ過速度は2000 m/d以下とすることが適切であると考えられる。また、雨天時の遮集量を3Q(Q:計画時間最大水量)とすると、簡易処理水量

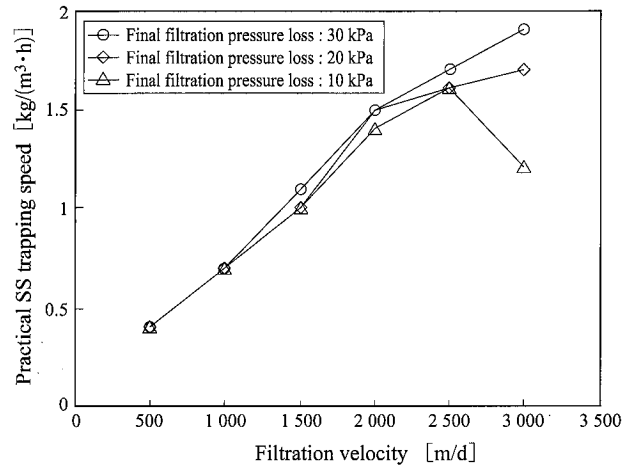


図 8 ろ過速度と実用 SS 捕捉速度の関係
Fig.8 Filtration velocity vs. Practical SS trapping speed

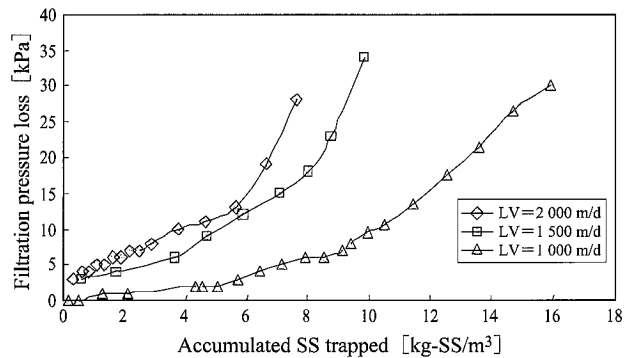


図 9 各ろ過速度における累積 SS 捕捉量とろ過圧力損失の関係
Fig.9 Accumulated SS trapped vs. filtration pressure loss by filtration velocity

は2Qとなり雨天時の簡易処理水を対象とした場合のろ過速度を2000 m/d以下とし、晴天時の二次処理水を対象とした場合のろ過速度を1000 m/d程度とすると、設備を有効に使用することが可能と考えられる。

低濃度(SS濃度50 mg/L前後)原水に対するろ材1 m³当たりの累積SS捕捉量とろ過圧力損失の関係を図9に示す。全体的に累積SS捕捉量が少ない間はろ過圧力損失の上昇は緩やかであるが、累積SS捕捉量が多くなるにしたがい、ろ過圧力損失が急激に上昇した。この傾向はろ過速度によって異なるが、おおむねろ過圧力損失を15 kPa程度と設定することが効率的であると考えられた。また、ろ過速度とSS除去率の関係を図10に示す。ろ過速度500~3000 m/dの範囲では、SS除去率は60%程度であり、大きな差異は見られなかった。また最終ろ過圧力損失を10, 20, 30 kPaと変化させた場合でも同様の傾

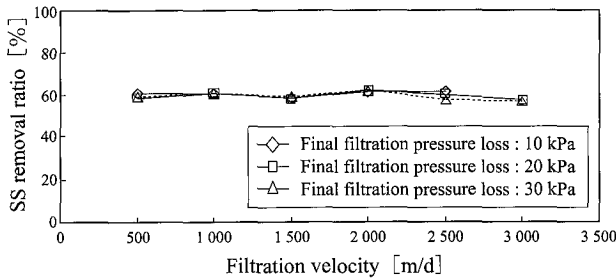


図 10 ろ過速度と SS 除去率の関係
Fig. 10 Filtration velocity vs. SS removal ratio

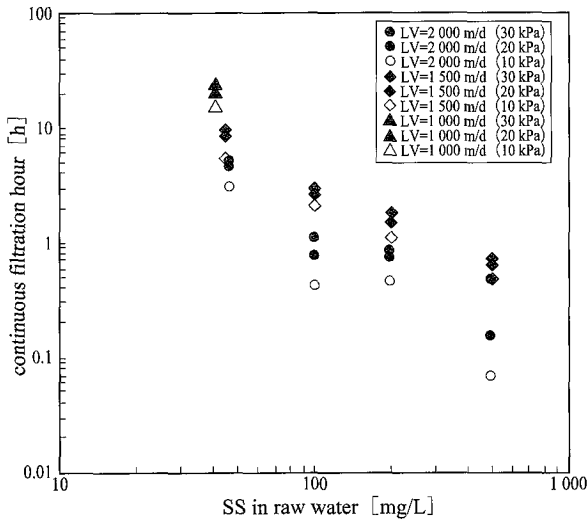


図 11 原水 SS 濃度とろ過継続時間の関係
Fig. 11 SS in raw water vs. continuous filtration hour

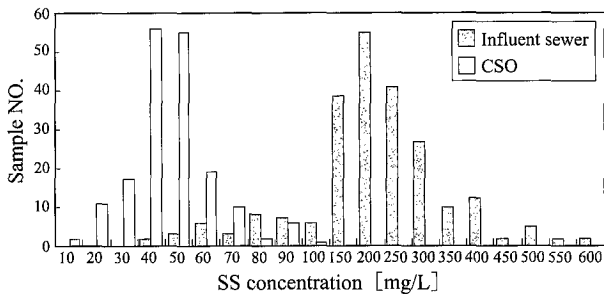


図 12 SS 濃度の分布
Fig. 12 Distribution of SS concentration
(from data taken from the demonstration test at HS sewage work)

表 3 実証機 運転条件
Table3 Operating conditions for demonstration unit

Item	Unit	Small demonstration unit		Large demonstration unit	
		CSO	Secondary effluent	CSO	Secondary effluent
Filtration velocity	m/d	2 000	1 000	2 000	1 000
Final filtration pressure loss	kPa	30	30	15	15

向を示した。よって、最終ろ過圧力損失は10~30 kPa の範囲で設定することが適切であると判断した。

ろ過継続時間と原水 SS 濃度およびろ過速度の関係を図11に示す。高速繊維ろ過のろ過継続時間は、砂ろ過など一般的なろ過と同様に、原水 SS 濃度が高いほど、またろ過速度が速いほど、ろ過継続時間は短くなる。ここで本実証実験期間中の雨天時流入下水と、簡易処理水の SS 濃度のヒストグラムを図12に示す。雨天時流入下水の SS 濃度はおおむね100~500 mg/L の範囲にあるが、簡易処理水の SS 濃度は40~60 mg/L が主で100 mg/L を越えることは無かった。よって簡易処理水の SS 濃度は100 mg/L 以下であると予想されることから、図11よりろ過速度2 000 m/d 以下、最終ろ過圧力損失30 kPa で、ろ過継続時間は1時間以上と判断された。

2. 3 小型・大型実証機実験

2. 3. 1 実験条件

雨天時の運転切替は、実験装置近傍に雨量計を設置し、30分間に0.5 mm 以上の雨量を検知した場合に自動で切替をおこなった。雨天時、晴天時における各運転条件を表3に示す。ろ材の洗浄開始の制御は、ろ過抵抗が設定最終ろ過圧力損失に達した場合、もしくはろ過継続時間が24時間となった場合のいずれか早い時点とした。

2. 3. 2 雨天時実証機実験結果

1) 水 質

雨天時実証機実験期間中の水質の分布状況を図13に示す。図中のプロットは算術平均値を示す。小型実証機実験時について、流入下水の最大 SS 濃度は平均濃度の約6倍、BODは約3倍、CODは約4倍であり、大きいばらつきがみられた。また SS 濃度は流入下水が14~920 mg/L に対してろ過処理水は1~30 mg/L となり、最初沈殿池と高速繊維ろ過の組み合わせにより安定した除去性能を示した。

大型実証機実験時についても流入下水の最大 SS 濃度は平均濃度の約4倍、BODは約3倍、CODは約4倍であり、大きいばらつきがみられた。また SS 濃度は流入下水が75~840 mg/L に対してろ過処理水は5~54 mg/L となり、小型実証機実験時と同様に、最初沈殿池と高速繊維ろ過の組み合わせにより安定した除去性能を示した。

2) 除去率

雨天時除去率の状況を表4に示す。最初沈殿池の除去率と実証機の除去率は、各降雨において所定のサンプリング間隔ごとに計測した各成分濃度と水量を乗算して求めた総負荷量から算出した。なお最初

沈殿池の除去率については、沈降時間を2時間として、最初沈殿池の流出濃度に流入から2時間後のデータをもちいて算出したが、実証機の除去率については過時間が約2分と短いため、入口と出口の濃度には同時に採取したデータをもちいて算出した。

小型実証機実験時について、最初沈殿池における

表 4 簡易処理水対象実験時の除去率
Table4 Removal ratio for CSO

Item removed	Unit	Small demonstration unit		Large demonstration unit	
		Primary settling basin	High-rate fiber filter	Primary settling basin	High-rate fiber filter
SS	%	60~93 (78)	53~89 (68)	72~92 (79)	51~67 (60)
BOD	%	0~84 (51)	0~38 (20)	55~82 (72)	18~42 (32)
COD	%	15~71 (41)	14~38 (23)	57~82 (69)	3~42 (15)

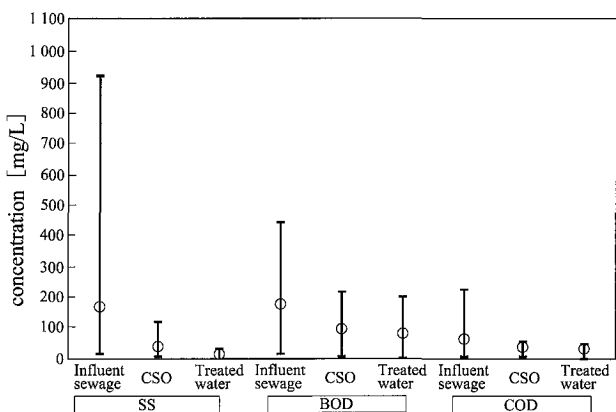
Figures in parentheses indicate mathematical average.

SS 除去率は高く、BOD および COD 除去率は非常にばらつきの多い結果であった。高速繊維ろ過における除去率は SS 除去率が高く、BOD および COD 除去率は低い結果であった。大型実証機実験時については、最初沈殿池における除去率は、SS、BOD、COD ともにほぼ70%以上と高い結果であった。一方高速繊維ろ過における SS 除去率は約60%と高いものの、BOD、COD 除去率は SS 除去率の1/2~1/4であった。

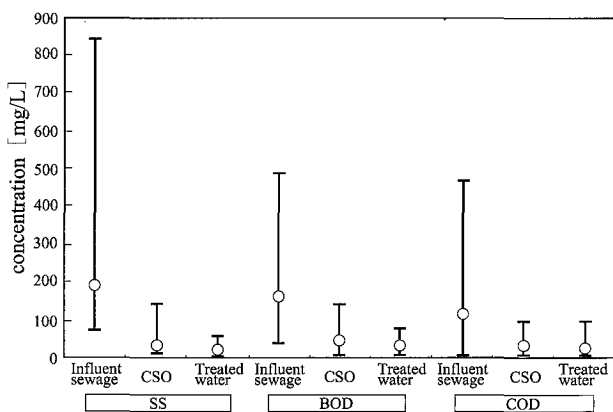
2. 3. 3 晴天時実証機実験結果

1) 水 質

晴天時実証機実験期間中の水質の分布状況を図14に示す。図中のプロットは算術平均値を示す。小型実証機実験時では、晴天時二次処理水の各成分の最大濃度は平均濃度の2倍程度であり安定した水質であった。SSは6 mg/L以下の二次処理水に対し、高速繊維ろ過により2 mg/L以下の水質がえられた。



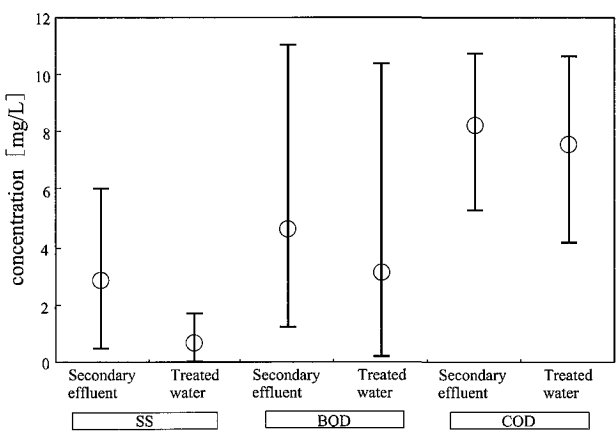
13-a) Small demonstration test unit



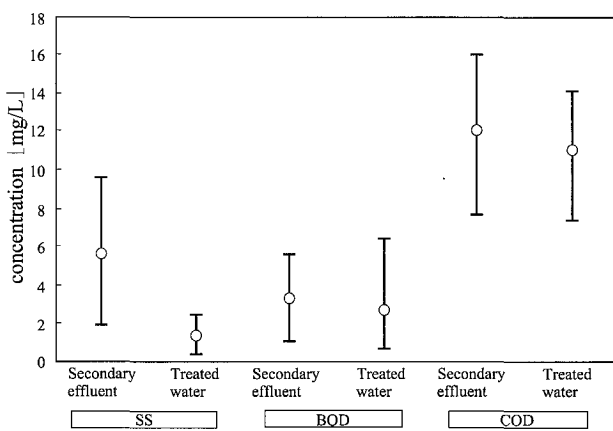
13-b) Large demonstration test unit

図 13 簡易処理水対象実験時の水質分布状況

Fig. 13 Variation of water quality-influent sewage, CSO and treated water



14-a) Small demonstration test unit



14-b) Large demonstration test unit

図 14 二次処理水対象実験時の水質分布状況

Fig. 14 Variation of water quality-secondary effluent and treated water

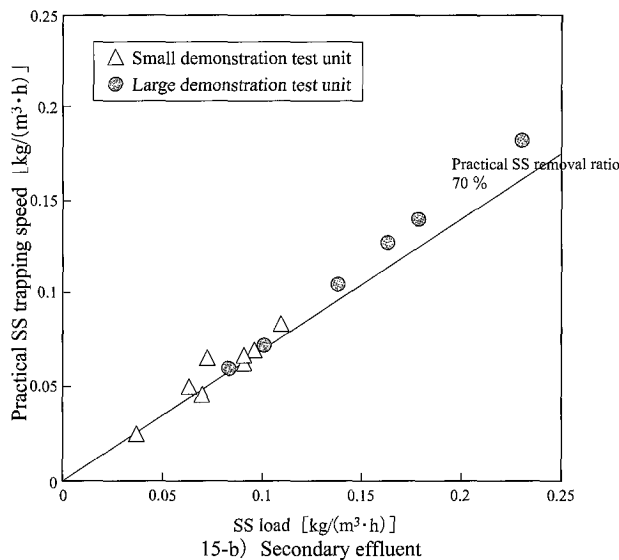
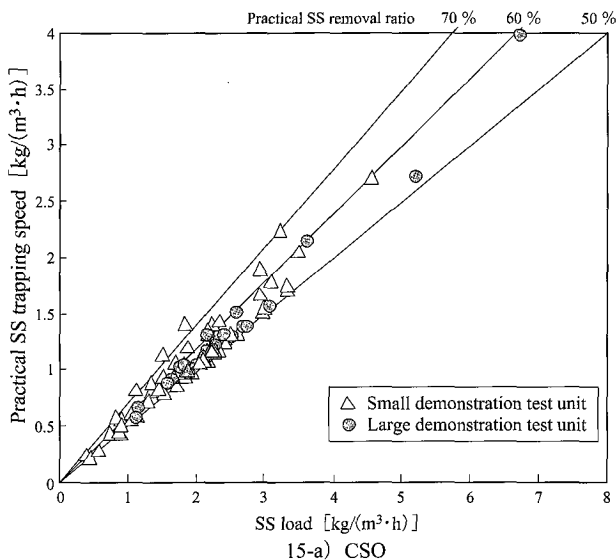


図 15 実証機実験における SS 負荷と実用 SS 捕捉速度の関係
Fig.15 SS load vs.Practical SS trapping speed-Demonstration test unit

表 5 二次処理水対象実験時の除去率
Table5 Removal ratio for secondary effluent

Item removed	Unit	Small demonstration unit	Large demonstration unit
S S	%	67~92 (76)	71~80 (76)
BOD	%	8~79 (32)	11~25 (17)
COD	%	5~14 (9)	5~12 (7)

Figures in parentheses indicate mathematical average.

大型実証機実験時についても安定した二次処理水水質であり、SS10 mg/L 以下の二次処理水に対し、高速繊維ろ過により 3 mg/L 以下の水質がえられた。

2) 除去率

晴天時除去率の状況を表 5 に示す。二次処理水に対する実証機の除去率は、水量、水質が安定していることから、2 時間ごとに採取した 24 時間 (計 12 点) の水質データの平均値より算出した。小型実証機実験時、大型実証機実験時ともに高速繊維ろ過による SS 除去率は高く、安定していたが、BOD、COD 除去率はばらつきが大きく、低い結果であった。

2.3.4 まとめ

雨天時簡易処理水および晴天時二次処理水を対象

とした SS 負荷と実用 SS 捕捉速度の関係を図 15 に示す。簡易処理水については SS 負荷 0.3~6.7 kg/(m³·h)、実用 SS 捕捉速度は 0.2~4.0 kg/(m³·h) の範囲にあり、実用 SS 除去率は 50~77 % であった。二次処理水については SS 負荷 0.04~0.23 kg/(m³·h)、実用 SS 捕捉速度は 0.02~0.18 kg/(m³·h) の範囲にあり、実用 SS 除去率は 70 % 程度で砂ろ過と同程度の SS 除去性能を示した。

むすび

実証実験結果より、本ろ過装置は雨天時簡易処理水をろ過速度 2 000 m/d 処理により実用 SS 除去率 50 % 程度、晴天時二次処理水をろ過速度 1 000 m/d 処理により実用 SS 除去率 70 % 程度の処理性能を有することが確認された。本技術は雨天時の簡易処理水を主処理対象として、設備の有効活用を図ることから晴天時には二次処理水を処理することで、年間を通じた合流式下水道の放流負荷削減に有効であると判断する。

[参考文献]

- 1) (社)日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説 前編 (2001)

連絡先

土谷 聡 環境本部
技術部
第 3 グループ

TEL 078 - 232 - 8102
FAX 078 - 232 - 8057
E-mail s.tsuchiya@pantec.co.jp