

Ⅶ-9

下水2次処理水の凝集直接ろ過 —ろ層構成によるろ過特性の変化—

室蘭工業大学 学生員 吉田 智志
 室蘭工業大学 正員 穂積 準
 室蘭工業大学 正員 吉田 英樹
 室蘭工業大学 学生員 加尔肯 馬拉夫

1. はじめに

現在、水質環境基準達成、閉鎖性水域の富栄養化防止対策、あるいは下水2次処理水を修景・親水用水として再利用するために下水の高度処理が重要視されており、濁度等の浮遊性物質除去、色度・リン酸等の溶解性物質除去による水質の安定化が要求され、これらに対する暫定基準が提案されている²⁾。そこで本研究では、浮遊性物質と溶解性物質の同時除去を目的として、ろ過継続時間延長効果の高い人工の半円筒状粗大ろ材と天然砂の2層からなる2階床直接ろ過法を取り上げ、そのろ過特性について検討を加えてきた¹⁾。

本報告は、2階床のうち砂層の空隙率を3種類に変化させ、さらに各空隙率でろ過速度を3種類に変化させた場合のろ過特性に及ぼす影響について検討したものである。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置は、図-1に示すようで、M市某下水処理場に設置した。ろ過装置本体は、2つのろ過筒からなり、その直径はいずれも8cmである。粗大ろ材層は内径2mm、外径4mm、長さ6mmのビニールチューブを半円筒状に切断したものを用い、砂層は砂粒径0.59~0.71mmのものを空隙率37%、41%、45%の3種類に変化させ、粗大ろ材層厚90cm、砂層厚60cmとした。実験原水としては、活性汚泥法の最終沈殿池流出水を用い、凝集剤として硫酸アルミニウム、pH調整剤として塩酸を用いた。凝集の条件は、上記原水を用いた場合の本ろ過法における最適条件である Al^{3+} 注入率4mg/L、pH5.5~6.0に設定し³⁾、各砂層空隙率に対してろ過速度を120m/d、240m/d、360m/dに変化調整した。一般に、下水2次処理水の急速ろ過における許容損失水頭は浮遊物質の漏出、ろ過の効率性、ろ過池の建設費等の点から3m前後が適切であるとされている⁴⁾ので、本実験では許容損失水頭を3mとし、実験終了後は水道水を用いた逆流洗浄によりろ層の回復を図り、次の実験を行った。

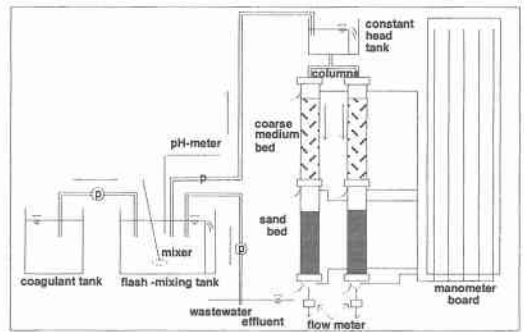


図-1：実験概要図

3. 実験結果及び考察

1. 砂層空隙率の変化とろ過特性

図-2は、砂層空隙率の変化に伴う濁度の平均除去率を示したものである。空隙率37%と41%では、各ろ過速度で95~97%と安定した高い除去率が得られる。空隙率45%では、ろ過速度120m/d、240m/dで37%と41%の空隙率と同様、97%前後の高い除去率が得られるが、ろ過速度360m/dでは87%にまで低下した。図-3は、この条件でのろ過濁度の経時変化を示したもので、ろ過前半までは安定した良好なるろ過水が得られているものの、4時間目以降、急激にろ過水濁度が增大している。その結果、ろ過期間全体としての平均除去率が低下している

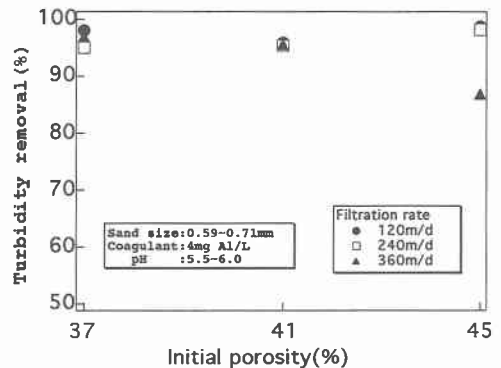


図-2：空隙率と濁度平均除去率

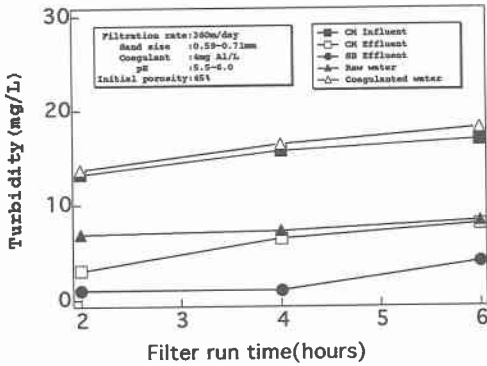


図-3：ろ過水濁度の経時変化

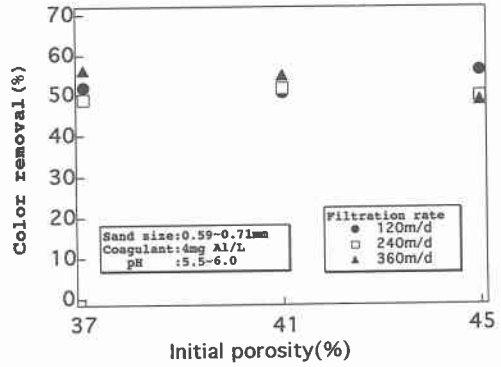


図-4：空隙率と色度平均除去率

のである。これは、ろ過後半において砂層の濁質抑留能力が損なわれ、濁質が漏出するためといえる。120 m/d、240 m/dにおいては、ろ過終了時まで濁質流出量が1 mg/L以下であるのに対し、360 m/dまでろ過速度を大きくすると、濁質堆積が大きな流れのせん断抵抗を受け、抑留された濁質の剥離が生じてしまったと考えられる。これらのことから、空隙率を45%まで、さらにろ過速度を360 m/dまで大きくした場合、ろ過水濁度の平均除去率は、他の条件と比べて10%程度低下することがわかった。

図-4、5は、それぞれ砂層空隙率の変化に伴う色度、リン酸の平均除去率を示したものである。色度については、各空隙率でろ過速度を変化させても平均除去率は50~55%程度で、空隙率の変化による大きな差異は見られなかった。また、リン酸については、空隙率37%、41%の場合、各ろ過速度で95%程度の高い除去率が得られるが、空隙率45%では、各ろ過速度で5~10%低下する傾向が見られた。

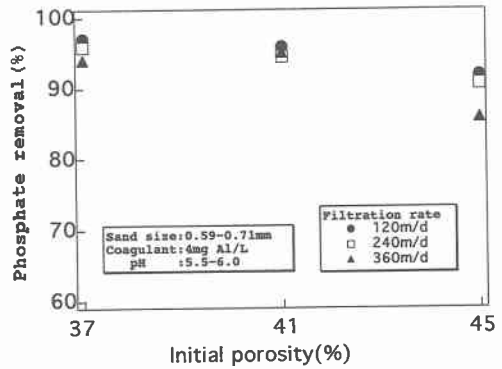


図-5：空隙率とリン酸平均除去率

II. 砂層空隙率の変化とろ過継続時間

図-6は、砂層空隙率の変化に伴うろ過継続時間について示したものである。ろ過継続時間は、空隙率が大きくなるほど長くなり、また、ろ過速度が大きくなるほど短くなる。本来、空隙率が大きくなるほど、初期損失水頭が小さくなり、利用可能なろ過の有効水頭が増大し、また、濁質抑留の均等化によって、深層ろ過となるためにろ過継続時間の大幅な延長が見込めるはずである。しかし、空隙率45%における120 m/dと360 m/dのろ過継続時間は、空隙率41%からの大幅な延長効果が得られず、240 m/dのろ過速度は、前述の濁度、色度、リン酸の平均除去率においても非常に高い除去率が得られていることから、0.59~0.71 mmの砂粒径で41%より大きい空隙率の場合、他の2つのろ過速度に比べてろ過継続時間を延長するのに適したろ過速度であると考えられる。

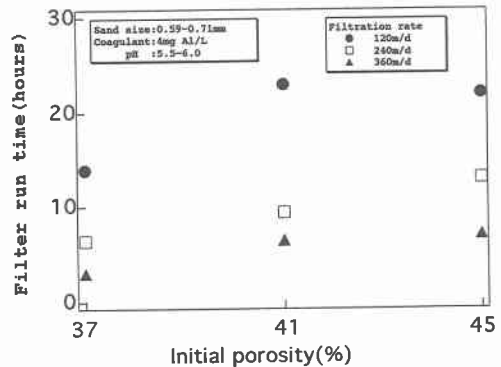


図-6：空隙率とろ過継続時間

III. 各空隙率による砂層の濁質抑留とろ層閉塞

濁質がろ材を通過すると、水が浄化され、しだいにろ材の空隙に濁質が蓄積されて、損失水頭の増加の原因となる。充填層における代表的な損失水頭公式として、以下に示すKozeny-Carman式が挙げられ、本実験のろ層においても適用することができる。この式で、ろ過の進行過程における損失水頭の測定値から、ろ過期間中の空隙に抑留された濁質によって滅殺された空隙の減少量を求めることが可能となる。

$$H/L = k (\mu / \rho g) U (A_p / V_p)^2 (1 - \epsilon)^2 / \epsilon^3$$

ここで、H：ろ層の損失水頭、L：ろ層厚、 ρ 、 μ ：それぞれ水の密度と粘性係数、g：重力加速度、U：ろ過速度、 A_p 、 V_p ：それぞれろ材1個の表面積と体積、 ϵ ：砂層の空隙率、k：Kozeny定数で、本実験で用いた砂では5程度である。

図-7は、初期損失水頭と空隙関数 $(1 - \epsilon)^2 / \epsilon^3$ の関係を示したものである。当然ではあるが、初期空隙率が大きくなるほど、また、ろ過速度が小さくなるほど初期損失水頭は小さくなる。さらに、各空隙率においてろ過速度が120 m/dから240 m/d、360 m/dと大きくなるとともに、初期損失水頭もほぼ2倍、3倍となっていくことから、ろ過初期の空隙率が所定の大きさに確保されていたということがいえる。

図-8は、ろ過速度240 m/dの場合を例として、ろ過終了時における砂層各層の損失水頭の全損失水頭に対する割合を示したものである。ろ層深さにおける損失水頭の発生割合 $\Delta H/H$ は、空隙率が大きいほど大きくなり、また、同一の $\Delta H/H$ を発現する砂層深さは空隙率が小さくなるほど大きくなる。本来、空隙率が大きいほど空隙体積が大きく、より深層ろ過になると考えられるが、図-8に示した結果からは、空隙率が小さくなるほど深層ろ過となる傾向を示した。このような結果が考えられる可能性としては、砂層内を流れる実流速による影響である。Dupuitの仮定 $u = V/\epsilon$ の関係を考えると、同一ろ過速度の場合、空隙率が小さくなるほどその実流速は大きくなる。例えば、45%では533.3 m/d、41%では585.4 m/d、37%では684.6 m/dとなり、初期空隙率の段階で37%と45%では約1.22倍となる。流速が大きいかほど流れのせん断力が大きく、ろ過係数は小さくなり、空隙水路の狭窄部等に抑制された濁質堆積は大きな流れの抵抗を受けることになる。また、それぞれの濁質の体積は、各空隙率における砂層の空隙体積よりもはるかに小さいので、流速が大きいかほどより深層まで濁質が押し込まれる。その結果、空隙率が小さくなるほど、つまり実流速が大きくなるほど、濁質が深さ方向に均等に浸入し抑制され、砂層各層の損失水頭の全損失水頭に対する割合 $\Delta H/H$ も大きくなる傾向を示したものと考えられる。

図-9は、砂層における損失水頭の増分と濁質抑留量の関係を示したものであるが、濁質抑留量の増加に伴う損失水頭の増分が、各空隙率でほぼ直線的に一致する傾向を示した。同一の濁質抑留量に対する損失水頭の増分が各空隙率によって同一であるということは、空隙率が大きくなるほど空隙の体積も大きいわけであるから、見掛け上の空隙体積の減殺も大きくなっているといえる。つまり、空隙率が大きくなるほど見掛け上の大きな空隙が閉塞されているといえる。

図-10は、砂層空隙率の減少量と抑留量の関係を示したものであるが、同一の抑留量に対する空隙の減少量は、空隙率が大きくなるほど増大する。同一の抑留量に対して、各空隙率で損失水頭の増分が同じであるのに、空隙率が大きくなるほど空隙率の減少量が増大していることから、空隙率が大きくなるほど空隙体積の減殺も大きくなっているといえる。また、各空隙率の砂層の空隙の減少量は濁質抑留量の増大とともに大きくなるが、その増加率は次第に小さくなってい

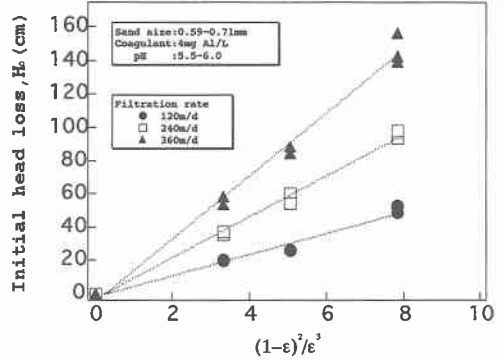


図-7：初期損失水頭と空隙関数の関係

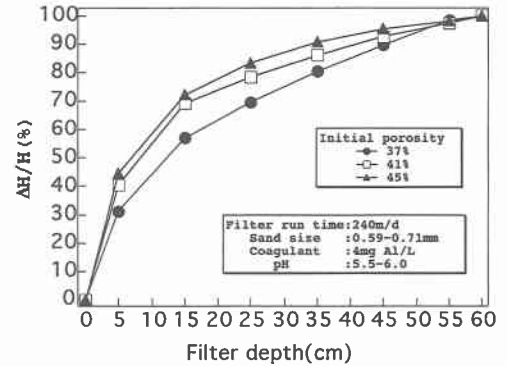


図-8：ろ過終了時における砂層各層の損失水頭に対する割合

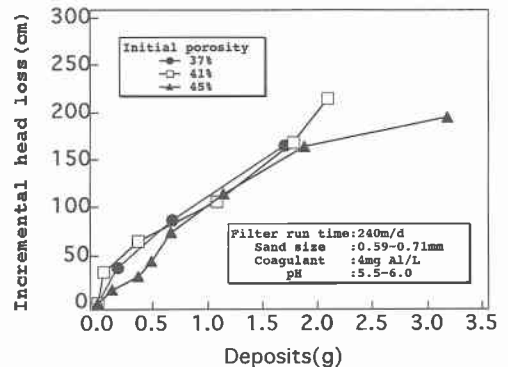


図-9：損失水頭の増分と抑留量の関係

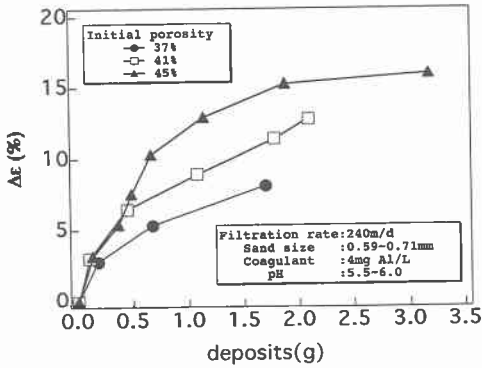


図-10：空隙率減少量と抑留量の関係

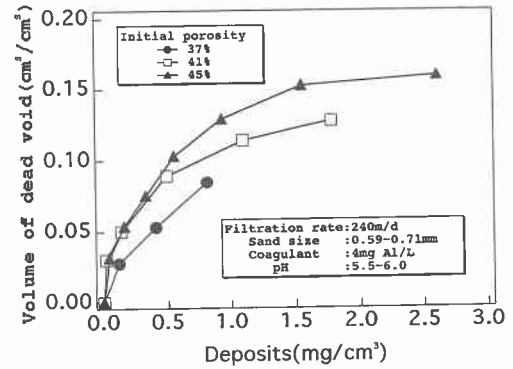


図-11：砂層単位体積当たりの空隙減少量と抑留量の関係

く。これは、ろ過の初期において、隙間間隔の小さい狭窄部が閉塞され、ろ過の進行とともに間隔の小さい狭窄部は減少し、隙間間隔のより大きな狭窄部が次第に閉塞されるようになる。その結果、濁質抑留に伴う砂層の空隙の減少量の変化率は、ろ過の進行とともに次第に小さくなると考えられる。また、図-11は、砂層単位体積当たりの空隙減少量と濁質抑留量の関係を示したものである。抑留濁質の密度は、 1 g/cm^3 より大きいに対し、濁質 1 g の体積は 1 cm^3 を越えておらず、さらに、 1.0 mg/cm^3 では、濁質の比重を 1 とすると $1 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ であるのに対し、その時の空隙の減殺体積は約 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ であるので、濁質の容積の約 100 倍が減殺されているということになる。つまり、図-11 は濁質抑留体積に比べてはるかに大きな空隙体積が減殺されることを表しているのである。これは、砂層の空隙が数多くの狭窄部を有する水路の集合体とみなすことができ、抑留濁質によるこの狭窄部の閉塞によって流れに有効な空隙水路が利用されない状態の死空間ができるためと考えられる。その結果、損失水頭が濁質抑留量に対して極めて大きくなり、見掛け上はるかに大きな体積が閉塞される状況を呈すことになるのである。

このような結果は、 120 m/d ではほぼ同様であったが、 360 m/d では見られなかったので、今後、検討していきたいと思う。

4. 結論

- (1) 各砂層空隙率変化に伴う濁度の平均除去率は、空隙率を 45% まで、さらにろ過速度を 360 m/d まで大きくした場合、他の条件と比べて 10% 程度低下する。色度の平均除去率については、空隙率の変化による大きな差異は見られず、また、リン酸については、空隙率を 45% まで大きくした場合、各ろ過速度で 5~10% 程度低下する。
- (2) 砂粒径 $0.59 \sim 0.71 \text{ mm}$ で空隙率が 41% より大きい場合、ろ過速度では 240 m/d がろ過継続時間を延長するのに適している。
- (3) 空隙率が大きくなるほど、砂層内における実流速の影響により、濁質が深さ方向に均等に浸入し抑留される。
- (4) 空隙率が大きくなるほど、見掛け上はるかに大きな空隙体積が減殺される。

5. 参考文献

- 1) 穂積準、吉田英樹、加爾肯馬拉夫、吉田智志：下水 2 次処理水の 2 層ろ過における処理性能に及ぼす砂粒径の影響と砂層閉塞パターン、環境工学研究論文集、Vol.33、pp95~102、(1996)
- 2) 小越真佐司：下水処理の修景・親水利用水質検討マニュアル(案)、下水道協会誌、Vol.29、No.338、pp3~5、(1992)
- 3) N'guessan bi tozan Michel, et al: Direct Filtration of Secondary Wastewater Effluent by A Dual Media Filter, Proc. of Environmental Engineering Reason, Vol.30, pp267-273, (1993)
- 4) 建設省高度処理会議：高度処理施設設計資料、pp19、(1994)
- 5) Carman, P.C: Fluid Flow Through Granular Beds, Trans. Inst. Chem. Engrs, Vol.15, pp150-166, (1937)