

<論文>

生物接触ろ過設備の設計・操作条件の検討

DESIGN AND OPERATION PARAMETERS OF THE BIOLOGICAL
FILTER IN DRINKING WATER TREATMENT伊藤 公明¹, 淵上 浩司¹, 片桐 一成¹, 井上 定夫², 野池 達也³¹ NKK 水エンジニアリング本部 / 〒 100-8202 東京都千代田区丸の内 1-1-2² 群馬大学工学部応用化学科 / 〒 376-8515 桐生市天神町 1-5-1³ 東北大学大学院工学研究科 / 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06KIMIYAKI ITO¹, KOJI FUCHIGAMI¹, KAZUNARI KATAGIRI¹,
SADAO INOUE², TATSUYA NOIKE³¹ NKK Corporation Water and Waste Water Engineering Division
/ 1-1-2, Marunouchi Chiyoda-ku Tokyo 100-8202, JAPAN² Department of Chemistry, Faculty of Engineering, Gunma University
/ 1-5-1, Tenzinchou Kiryu 376-8515, JAPAN³ Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
/ 06 Aramaki-zaaoba Aoba-ku Sendai 980-8579, JAPAN

Abstract

Biological filter treatment process with granular media such as anthracite, ceramics or plastic resins has widely been used in wastewater treatment. However, only few plants on its application for musty odor removal in drinking water treatment are reported. Experimental studies of a biological filter pilot plant with porous granular ceramic media were conducted to determine the design criteria and optimum conditions for operation. From the results of a series of the pilot plant study, optimum flow rates of air and water for non-fluidized backwashing operation were 0.8m/min. and 0.6m/min., respectively. In terms of achieving sufficient filtration stability, the time necessary for air scour, air plus water, and water were proved to be 4min., 3min. and 7min., respectively. And starting of backwashing operation was determined to be controlled automatically by both loss of head in the column and time of the filter run. Interfilter-washing system with perforated block type underdrain units and air distribution pipes were adopted for biological filter plants having capacities of 49500m³/d and 32000m³/d in Japan.

Key Words : Biological Filter, Design and Operation Parameters, Backwashing, 2-MIB Removal

1 はじめに

近年、生物処理機能とろ過機能を組み合わせた生物ろ過法が考案され、産業排水処理、生活雑排水処理、湖沼浄化等へ広範囲に適用されている^{1, 2)}。生物ろ過法は、接触槽内に粒状のろ材を充填し下向流または上向流で原水を通水するもので、ろ材表面に

付着した生物膜と原水を接触させて浄化する方法である。ろ材として、微生物が付着しやすいセラミック、合成樹脂、アンスラサイト等が使用されている。

浄水処理においては、生物ろ過は生物接触ろ過と呼ばれ、高度浄水処理である生物処理方式の一つに位置付けられている^{3, 4, 5, 6)}。その他の生物処理方

式として、浸漬ろ床方式（ハニコム方式）と回転円板方式があり、これらの三つの方式は全て既に実用化されている。いずれの方式であれ、上水の生物処理は、自然界で発揮されている生物の浄化作用を人為的に水槽の中で効率よく進めさせるものであり、凝集沈殿、ろ過等の通常の浄水処理工程の前処理設備として設置される。主な除去対象物質は、通常の浄水処理では十分に除去できない、アンモニア性窒素、かび臭、藻類、マンガン等である⁷⁾。生物接触ろ過の構造はほぼ急速ろ過池と同じで、通水が続けるとろ材の間に濁質が捕捉されて通水抵抗が大きくなるため、定期的な洗浄が必要となる。本方式の特徴は、ハニコム方式と比較して、反応槽単位体積あたりの微生物保持量が大きく、短い接触時間で浄化できるため、所要面積が小さくできることである⁴⁾。しかしながら、本方式は、他の生物処理方式と比べて研究開発の開始が遅れていたため、大型の処理施設の実施例は少ない。また、アンモニア性窒素の除去を目的とした生物接触ろ過施設的设计例は、设计マニュアル⁸⁾として、公表されているものの、かび臭を除去対象とした生物接触ろ過施設的设计マニュアルはまとめられておらず、设计操作条件も明らかではなかった。

本研究では、渡良瀬川表流水を原水とした生物接触ろ過実験結果⁹⁾をベースとし、これに、琵琶湖水を原水とした実験結果の一部を加えて、良好な処理性能が得られる洗浄方法や洗浄条件について調査し、生物接触ろ過方式の適正な設計、操作条件を検討した。

2 生物接触ろ過法の原理について

上水の生物処理とは、水中に含まれる各種の汚濁物質を微生物の作用により、分解または凝集させ除去する方法であり、その発想は、河川の自浄作用をより効率的に小さな装置において再現しようとする点にある。特に、通常の浄水処理における凝集沈殿・砂ろ過プロセスではほとんど除去が期待できないアンモニア性窒素に対して、生物処理は有効であり、浸漬ろ床方式を中心に研究開発が進められてきた⁷⁾。

一方、上水道においては、古くから、微生物の生物浄化作用を利用した緩速ろ過池が用いられており、

かび臭物質やアンモニア性窒素などの除去に優れた効果があることが経験上よく知られている。しかし、緩速ろ過は、4~5m/dという低いろ過速度で運転されるため広大な敷地面積を要するという問題があり、昨今の原水水質の悪化に伴ってろ過砂の掻き取り、洗浄等の維持管理が煩雑になってきたことから、緩速ろ過による浄水システムは、ほとんど急速ろ過方式にとって代わられるに至っている。

高いろ過速度で運転しつつ、緩速ろ過の優れた生物浄化機能を再現することを意図したものが生物接触ろ過法である。Fig.1に生物接触ろ過の浄化機構の模式図を示したが、生物接触ろ過処理において、ろ材のろ過機能により、原水中の濁度や藻類等の懸濁物質が除去され、これに伴って、色度、過マンガン酸カリウム消費量、大腸菌群等も低減される。さ

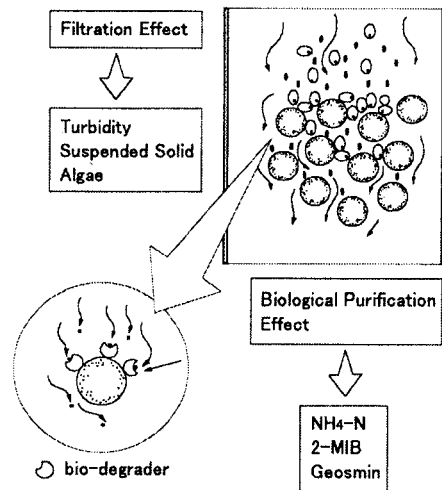


Fig.1 Image of purification mechanism by biological filtration

らに、ろ材表面に付着した微生物の生物浄化機能により、かび臭物質やアンモニア性窒素などが除去される。最近では、生物接触ろ過のろ材に付着した微生物や逆洗排水の中から、かび臭物質である2-メチルイソボルネオール（2-MIB）やジェオスミンを分解する有効菌が単離・同定されており、生物浄化機構が明らかにされてきている^{10, 11)}。

Tab.1 Experimental conditions

| | |
|-----------------------|----------------------------------------------|
| Packed column | :4m in length, 30cm in diameter |
| Depth of packed media | :1.5m |
| Packed media | : porous ceramic pellet with length of 4.1mm |
| Flow | :Down flow by gravity |
| Filtration rate | :180m/d |
| Contact time | :12min |

3 実験方法

3.1 実験設備と通水方法

桐生市元宿浄水場内および大津市柳ヶ崎浄水場内に、パイロットプラントを設置し、それぞれ渡良瀬川表流水および琵琶湖水を対象に実験を行った。渡良瀬川表流水の処理に用いた生物接触ろ過実験設備の概略を Fig.2 に、設備の仕様と通水条件を Table1 に示す。

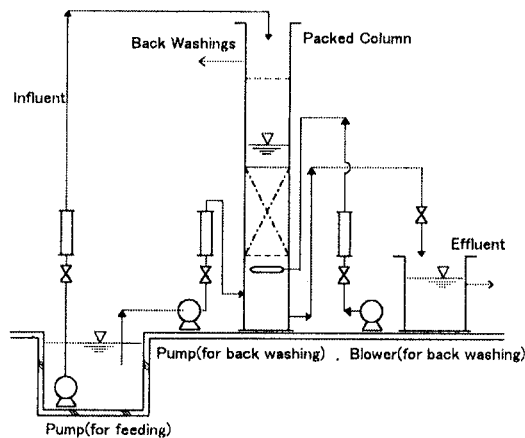


Fig.2 Pilot plant

実施設の着水井内に設置したポンプで原水を取水し、塔上部からろ過速度（以下、LV と略記する）を 180m/d の一定として下向流で通水した。塔下部より流出した処理水は塔内の充填ろ材層の上端とほぼ同じレベルまで立上げたのち流出させた。生物接触ろ過塔の洗浄実験に当たり、洗浄用水として原水を

使用し、空気洗浄 → 空気・水同時洗浄 → 水逆洗という洗浄工程における洗浄時間を変えてデータを採取した。また、臭気物質として市販試薬の 2-MIB を原水に添加しての処理実験も、随時行った。生物処理法において、原水水質によっては生物活性の維持のために通水時に曝気を行う必要がある。しかし、本実験では、渡良瀬川表流水も琵琶湖水も、飽和濃度に近い溶存酸素を含んでおり、生物接触ろ過塔内の酸素消費を十分に賄えることが確認できたため、処理プロセスでの曝気は行わなかった。なお、原水および処理水のサンプリング・分析のほか、ろ過塔内数カ所からの採水、分析および抜き出したろ材についての分析などを行った。

3.2 使用ろ材

使用したろ材は、生物付着性が良好で、強度が強く、安価であることを意図し、シリカーアルミナ系物質を原料として成形加工したものである¹²⁾。多孔性のろ材とするために、原料物質に気孔形成剤としてオガクズを添加し、配合・混練後造粒し、ロータリーキルンで 1100~1150°C で焼成したものであり、Fig.3 に示すように、気孔形成剤が燃焼・焼滅した跡に 10~40μm の開孔を持つ孔が形成されている。このセラミックろ材の物性値は Table2 に示した。

3.3 分析・測定方法

水質分析方法は、主に上水試験方法¹³⁾に準拠した。2-MIB の定量には、パージトラップ法による前処理を行った試料に対して GC-MS 法を適用した。

Tab.2 Properties of particles

| Item | Ceramic | Anthracite | Chamotte |
|---------------------------|---------|------------|----------|
| Particle size mm | 4.1 | 5.6 | 2.6 |
| Uniformity coefficient | 1.1 | 1.3 | 1.1 |
| Apparent specific density | 2.24 | 1.58 | 2.20 |
| Bulk density | 1.47 | 0.82 | 1.01 |
| Porosity % | 38.4 | 5.2 | 22.8 |

ろ材に付着した汚泥（ろ材付着汚泥）の濃度は、洗浄後のろ材に超音波処理装置（株式会社トミー工業製 UD-200）による処理（200W、20kHz、目盛り 5×5min）を行い、はく離させた汚泥を乾燥秤量して求めた。また、生物付着ろ材の 2-MIB 分解能の測定方法は、住友ら¹⁴⁾による高速砂利ろ過装置による臭気除去実験を参考とした。容量 20mL の滅菌 L 型チューブ（Monod tube）に、原水を入れ、これに生物接触ろ過塔から取り出したろ材と 2-MIB を添加した上で、25°C 恒温培養器内で一定時間振とうさせた後、2-MIB を分析した。全く同様な方法で対照系として滅菌したろ材についても試験を行い、双方の 2-MIB 濃度の差から分解能を求めた。

4 実験結果および考察

4.1 洗浄方式の選定

使用したろ材は、3.2 で述べたように、*Pseudomonas* 属や酵母 *Candida* 等の 2-MIB 分解菌^{10, 11)}や硝化細菌などの有用微生物の付着性を考慮し、新たに開発した多孔質セラミックろ材である。このろ材は、Table2 に示したように、水処理分野で使用されているアンスラサイトや膨張頁岩（シャモット）に比べて、見掛け比重が大きくなっている。

逆流洗浄における流速（LV）とろ材の膨張率との関係を Fig.4 に示す。逆流洗浄に際し、ろ層内に抑留された濁質がろ材からはく離でき、はく離した濁質をろ層から分離してトラフから排出させるに必要な洗浄流速と均等な水流分布が保たれていることが必要である。砂ろ過等の洗浄において、付着物質をはく離させる層から分離して排出するには、ろ層を

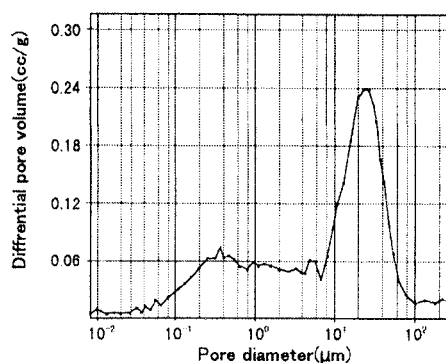


Fig.3 Pore size distribution plot of the ceramic pellet media

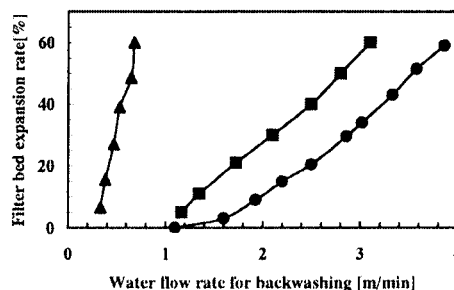


Fig.4 Filter bed expansion rate versus water flow rate for backwashing
● ; ceramic, ▲ ; anthracite ■ ; chamotte

20~30%膨張させた場合が最も有効であり、洗浄効果が良いとされている³⁾。

Fig.4 からすれば、セラミックろ材を充填したろ層を20%以上流動させるためには、2.5m/min以上の逆流洗浄流速が必要であり、アンスラサイトの洗浄に必要な流速の5倍以上であった。そこで、このセラミックろ材の場合には流動化洗浄方式を適用することが困難と判断し、ろ層内を上昇する気泡の振動で、ろ層内に抑留された濁質をふるい落とし、水流で洗い流す非流動化洗浄方式(空気洗浄→空気・水洗浄→水逆洗)を採用することにした。

この非流動化洗浄方式は、ヨーロッパ系の砂ろ過池や好気性ろ床による下水の2次処理において採用されている。

非流動化洗浄方式においてはろ層全体が流動しないため、流動化洗浄方式に比べて次のような特長がある¹⁵⁾。

- ① ろ層を膨張させないで洗浄するため、ろ材の流出の可能性が極めて少ない。
- ② 空気泡の振動でろ材粒子からふるい落された懸濁物を、逆洗水流によって流し出す方法であるため、大きな重いろ材を使っても、逆流洗浄流速を大きくする必要はない。
- ③ マッドボールが発生しにくい。

4.2 洗浄条件の検討

ろ層が流動状態になるまで逆流洗浄流速を高め、ろ材相互の衝突摩擦や水流による剪断力で付着した濁質をはく離し、ろ層から流出させる表面洗浄と逆流洗浄を組み合わせた流動化洗浄方式については、数多くの実績があり設計手法が確立されている³⁾。

これに対し、非流動化洗浄方式は、標準的な設計手法が存在せず経験的な値を用いているのが現状である。また、使用するろ材の種類、粒径、形状、見掛け比重等の物性によって、洗浄条件が異なってくると考えられる。洗浄条件としての空気量、水量及び時間はそのいずれかが過少であれば洗浄効果は不十分となり、過大であれば不経済となるだけでなく、場合によっては、ろ材表面の生物膜がはく離し生物浄化機能が損われる恐れもあるため、適正な洗浄条件を把握する必要がある。特に、生物接触ろ過法に

おける洗浄は、処理に關与していない汚泥を排出し、ろ過継続時間をできるだけ長く保ち、なおかつ生物量を適当な範囲に保持し処理能力を高いレベルで安定に保つ条件が必要である。

日本下水道事業団が行った、好気性ろ床法による下水の2次処理に関する調査¹⁶⁾によれば、シャモットをろ材に用いた非流動化洗浄方式に関して、空気洗浄や水逆洗の条件を変えた実験を行った結果から、適正な洗浄条件として空気洗浄流速0.8m/min、空気・水洗浄時の逆流洗浄流速0.55m/min、水逆洗時の逆流洗浄流速0.67m/minが推奨されている。

そこで、本実験では、空気洗浄流速を0.8m/min、空気・水洗浄および水逆洗時の逆流洗浄流速を0.6m/min(0.01m/sec)に設定し、洗浄効果を調査することにした。

4.2.1 空気洗浄の強度

空気洗浄の強度は、一般に(1)式に示す速度勾配 G_A 値で評価されている¹⁷⁾。

$$G_A = (P\mu \cdot v)^{0.5} \tag{1}$$

| | |
|--------------|---------------------|
| G_A :速度勾配 | 1/sec |
| P :空気による動力 | J/sec |
| μ :水の粘性度 | 0.001kg/m·sec |
| v :ろ材充填容積 | 0.106m ³ |

ここで、

$$P = n \cdot R \cdot T \ln[P_1/P_2]$$

| | |
|------------------|--------------|
| n :空気量 | mol/sec |
| R :気体定数 | 8.314J/mol·K |
| T :空気温度 | K |
| P_1 :ろ過塔下端での圧力 | atm |
| P_2 :水面での圧力 | atm |

水温20°C、水深1.5mの条件で本実験における空気洗浄条件での速度勾配 G_A を求めると $G_A 355$ /secとなり、砂ろ過池や活性炭ろ過池の空気洗浄における速度勾配 $G_A 300 \sim 400$ /sec¹⁸⁾ と同等な値が得られ、洗浄強度は十分であることが分かった。

4.2.2 水洗浄の強度

逆流洗浄時のろ層における損失水頭 h を求めた後、 h を用いて水洗浄の強度の指標である速度勾配 G_W

値を求めた。

損失水頭 h は、レバ式 (2) ¹⁵⁾ により求めた。

$$h = 200L_0 \frac{V \cdot \mu}{\rho_f \cdot g \cdot \phi_s^2 \cdot D_s^2} \times \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} \quad (2)$$

ここで、

| | |
|---------------------------------|-----------------------|
| L_0 :ろ層厚 | 1.5m |
| V :逆流洗浄流速 | 0.01m/sec |
| D_s :ろ材径 | 4.0mm |
| ϕ_s :ろ材形状係数 ¹⁹⁾ | 0.7 |
| ε_0 :ろ材空隙率 | 0.4 |
| ρ_f :水の比重 | 1000kg/m ³ |
| μ :水の粘性度 | 0.001kg/m-sec |

本実験に用いたろ層における損失水頭 h を計算すると 0.22m となった。なお、砂利層、集水装置、連通弁の損失水頭を加えると、生物接触ろ過塔の損失水頭は約 0.5m となり、急速ろ過池の損失水頭 0.6~0.8m とほぼ同程度であることがわかった。

水洗浄の強度の指標である速度勾配 G_W ¹⁷⁾ は (3) 式により求めた。

$$G_W = (\rho_f \cdot g \cdot V \cdot h / \mu \cdot L_0)^{0.5} \quad (3)$$

ここで、

| | |
|----------------|-----------------------|
| G_W :速度勾配 | 1/ sec |
| ρ_f :水の比重 | 1000kg/m ³ |
| g :重力速度 | 9.8m/sec ² |
| V :逆流洗浄流速 | 0.01m/sec |
| h :損失水頭 | 0.22m |
| μ :水の粘性度 | 0.001kg/m-sec |
| L_0 :ろ層厚 | 1.5m |

本実験における水洗浄条件での速度勾配 G_W を求めると、約 120/sec となり、この結果は、砂ろ過池において、逆流洗浄流速 V が 0.01m/sec、ろ層厚 L_0 が 0.6m、洗浄時のろ層膨張率が 30%、損失水頭 h が 0.5m の場合の速度勾配 G_W の値 250/sec²⁰⁾ の約 1/2 程度であった。

4.2.3 空気洗浄・水洗浄に必要な時間

空気洗浄、空気・水洗浄及び水逆流に必要な洗浄時間を検討した。通常運転時及びオーバーフロー時(目詰まりによりろ過塔のオーバーフロー管から流出したケース)に洗浄を実施した際の SS 濃度の経

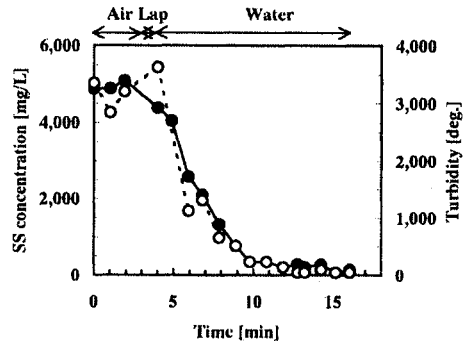


Fig.5 Time course of SS concentration and turbidity in backwash drainage

● ; SS concentration, ○ ; Turbidity

時変化を、それぞれ Fig.5 及び Fig.6 に示す。通常時の洗浄に関し、Fig.5 に見られるように、空気洗浄開始直後に SS 濃度が 5000mg/L に達した後、3 分間はほぼ一定濃度で推移していることから、4 分程度で空気洗浄時間は十分であると判断された。また水逆流開始直後の SS 濃度は 4000mg/L 以上の高濃度であったが、7~8 分後には 200mg/L 以下まで低下した。

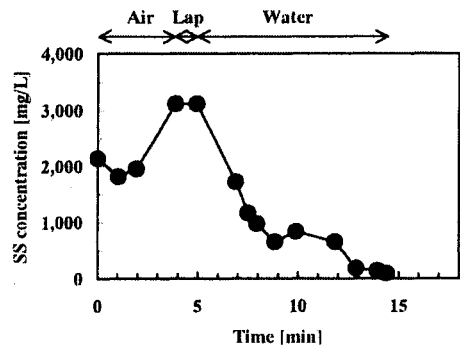


Fig.6 Time course of SS concentration in backwash (influent's overflowing)

オーバーフロー時の洗浄に関し、Fig.6 に見られるように、空気・水洗浄時の SS 濃度は、空気洗浄時のものより 1000mg/L ほど上昇し、空気洗浄によってろ材から剥離した汚泥が空気・水併用洗浄の効果によって水中に洗い出されることが確認された。空気・水洗浄については、海老江¹⁷⁾が、急速ろ過池

における空気・水逆洗併用実験に基づいて述べているように、空気量や水量を増加させることなく洗浄強度を高める効果的な方法であると言える。なお、この場合の水逆洗時の排水のSS濃度の減少の割合は通常時の洗浄におけるものと比べると小さかったが、水逆洗を開始して8~9分後には、SS濃度は200mg/L以下まで低下した。

以上の洗浄条件の検討の結果、洗浄に関する設計操作諸元をTable3に示すように決めた。なお、洗浄後の初期ろ抗については、常に20cm以下であり、ここからも洗浄が良好に機能していることがうかがえた。また通常時の洗浄に関するSSの排出量測定結果と、通水時の処理前後のSS濃度の経時変化の測定結果とから、SSのマス・バランスを求めた結果、ろ過塔でのSS捕捉量と洗浄によるSS排出量はほぼ一致していた。

4.3 洗浄頻度の検討

ろ過速度LV180m/dで、Table3に示した条件での洗浄を繰り返して長期運転し、原水の濁度とろ過塔の損失水頭の変化を調べた。その結果、洗浄頻度は、琵琶湖水の場合には週1~2回、渡良瀬川表流水の場合には週2回程度で十分であることがわかり、洗浄間隔を設定したタイマー制御による自動洗浄を採用することにした。

しかしながら、河川表流水の場合には、ダム水・湖沼水とは異なり、水質・水量とも変動が著しく、特に洪水時などに高濁度水が生物接触ろ過塔に流入し、ろ層を完全に閉塞して洗浄が行えなくなる恐れがある。これに対処するには、洗浄頻度を多くするか、あるいは通水を一時的に停止してバイパスする等の措置を講ずることが必要であり、そのために、運転操作上、どの程度の原水濁度まで連続通水が可能であるかを把握する必要があった。

そこで、降雨時における生物接触ろ過処理前後のSS濃度及びろ過塔の損失水頭の経時変化を調べ、原水と処理水のSS濃度の経時変化をFig.7に、損失水頭の経時変化をFig.8に示した。Fig.7に示した結果に基づいて、SSの捕捉量は約580gと求められ、一方、損失水頭の上昇分は、24時間で50cmであった。原水濁度が一時的に50~100程度になる場合には、1日1回の洗浄で運転対応可能と考えられた。

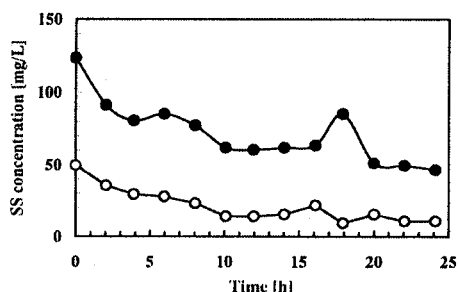


Fig.7 Influent and effluent SS concentration during rainfall
● ; Influent, ○ ; Effluent

しかし、原水濁度が100度を超える場合には、損失水頭が24時間以内に急速に上昇する恐れがあるため、タイマー設定による洗浄開始の指定のみでは危険であり、ろ過抵抗値の設定による洗浄開始が必要であると判断された。

また、濁度以外に、藻類が大量発生する時期については別途対応を検討する必要があることが分かった。実際、渡良瀬川表流水による生物接触ろ過実験において、原水濁度が10度以下であるにもかかわらず、ろ過継続時間24時間以内に生物接触ろ過塔がオーバーフローしたことがあった。その時期には

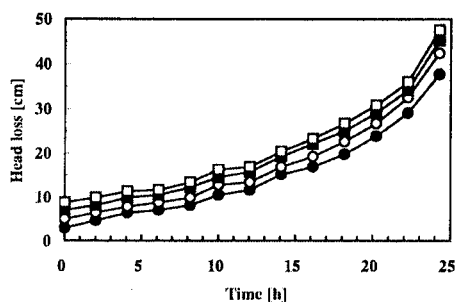


Fig.8 Time course of the head loss in the column during rainfall
Depth of media ● ; 25cm, ○ ; 50cm, ■ ; 100cm, □ ; 150cm

水源である草木湖においてろ過障害を引き起こすといわれている珪藻類 *Synedra* が大量発生し、浄水場の取水口で10000個/ml前後の濃度が継続的に計測された。原水濁度が低くても、大量発生した藻類の

Tab.3 Backwashing conditions

| | Air flow rate (m/min) | Water flow rate (m/min) | Time (min) |
|-------------|--------------------------|----------------------------|---------------|
| Air scour | 0.8 | — | 4 |
| Air + Water | 0.8 | 0.6 | 3 |
| Water | — | 0.6 | 7 |

Air scour → Air + Water → Water

種類によっては、ろ過継続時間が短くなることが分かった。また、琵琶湖水においても、多くの種類の珪藻類の発生が認められていることから、大量発生した藻類によるろ層の閉塞が懸念された。

以上の結果から、実施設においては高濁度水や藻類対策として、流入水の特性に於じた洗浄間隔を設定したタイマー制御による自動洗浄と、ろ層上面から水深が1m上昇した段階での自動洗浄とを併行して機能させることとし、シーケンスに組入れることにした。

4.4 洗浄後の硝化、2-MIB 処理性能

生物接触ろ過法におけるろ層の洗浄の条件によっては、ろ材間に捕捉された濁質が排出されるのみならず、ろ材表面に付着している微生物のはく離・流出をも引き起し、処理性能の低下をもたらす可能性がある。そこで、洗浄前後のアンモニア性窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) と 2-MIB の除去性能について調べた。

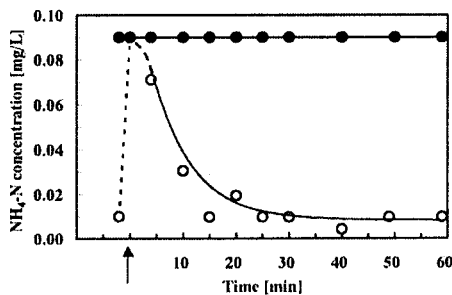


Fig.9 $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration of the influent and the effluent

Depth of media ● ; 25cm, ○ ; 50cm, ■ ; 100cm, □ ; 150cm

LV180m/d、原水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 0.09mg/L という通水処理条件下における、洗浄前後の処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ の経時変化を求めた結果を Fig.9 に示す。洗浄後通水を再開した 30 分後には、処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ は、洗浄前の値である 0.01mg/L にまで低下し、良好な処理が行われることがわかった。

この結果は、原田ら²¹⁾が多孔質セラミックろ材を用いて行った洗浄後の硝化特性の調査結果と同様であり、洗浄後に硝化機能が速やかに回復することは、多孔質ろ材の優れた特徴であると言える。

次に、生物接触ろ過塔の洗浄操作がその後の 2-MIB 除去特性に及ぼす影響を調べるために、洗浄終了直後から次の洗浄終了直後までの 2-MIB 除去率の経時変化及び洗浄前後でのろ層内の 2-MIB 濃度プロファイルを調べた。結果をそれぞれ Fig.10 及び Fig.11 に示した。Fig.10 に見られるように、通水継続中の

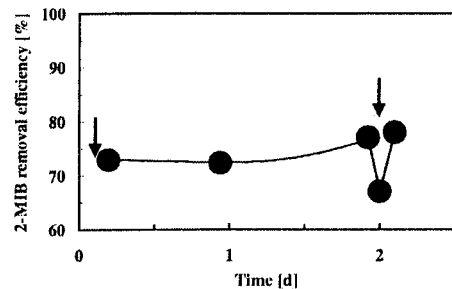


Fig.10 Effect of backwashing on the removal of 2-MIB

↓ ; Backwashing started, LV : 180m/d

2-MIB 除去率変化は極めて緩やかであり、洗浄による 2-MIB 除去率低下は 10%程度であったことから、洗浄によって排出される汚泥の 2-MIB 除去への寄与はさほど大きくないと推察された。また、Fig.11 に

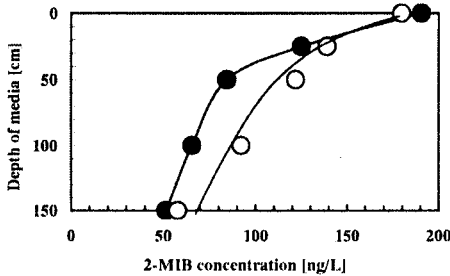


Fig.11 Concentration profiles of 2-MIB along the depth of the media in the column
● ; Before backwashing, ○ ; After backwashing

示した結果からすれば、2-MIB の除去に対しては、生物接触ろ過塔内充填ろ層厚み 150cm のうちで、ろ層上部 50cm 以内の部分が最も大きく貢献している。従って、Fig.10 に示した結果と併せて考えると、洗浄によって 2-MIB 除去率のわずかな低下がもたらされるのは、ろ層上部 50cm 以内の部分が洗浄によってわずかにダメージを受けることによるのではないかと見られる。

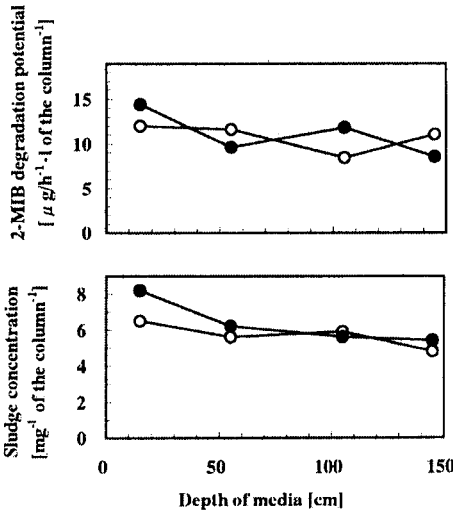


Fig.12 Profiles of sludge concentration and 2-MIB degradation potential along the depth of the media in the column
● ; Before backwashing, ○ ; After backwashing

いっぽう、琵琶湖水を対象とした実験において、

洗浄前後におけるろ過塔内の汚泥の状況について調べた。ろ層深さ方向のろ材付着汚泥濃度と 2-MIB 分解能を Fig.12 に示す。

ろ過塔の 2-MIB 分解能 P は次のように定義した。

$$P = \frac{C_R \cdot v \cdot N_2}{t \cdot N_1} \quad (4)$$

ここで、

P = 生物付着ろ材の 2-MIB 分解能 ($\mu\text{g}/\text{h}/\text{L}$ -ろ層)

C_R = 生物付着汚泥と滅菌ろ材との 2-MIB 濃度差 ($\mu\text{g}/\text{L}$)

v = L 型チューブ内の液量 (L)

t = 反応時間 (h)

N_1 = L 型チューブ内のろ材の個数 (n)

N_2 = ろ層単位容積当たりのろ材の個数 (n/L)

ろ層上部において、洗浄前のろ層単位体積当たりのろ材付着汚泥濃度は、洗浄後のそれに比べて高い傾向がみられたが、ろ層の中央部から下部においては、洗浄前後でのろ材付着汚泥濃度の大きな違いは見られず、濃度は 4500~6000mg/L 程度であった。また、ろ層単位体積当たりの 2-MIB 分解能については、洗浄前後で大きな変化はみられず、8~14 $\mu\text{g}/\text{h}/\text{L}$ ろ層の範囲であった。

以上の結果から、洗浄によるわずかな処理性能の低下は、洗浄前までにろ材間に抑留されていた硝化細菌や 2-MIB 分解菌が洗浄・流出したことによるのではないかと推察された。

しかしながら、処理性能の低下がすぐに回復し、洗浄前と変らぬ処理が行えるようになるのは、洗浄を行ってもはく離せずろ材表面に、あるいは Fig.3 に示したろ材の細孔部に有効な微生物が保持されていることによるものと推察された。また、洗浄による処理機能の低下がわずかであり、捕捉された SS もほぼ全て洗い出されていることから、Table3 で設定した洗浄条件も適正であったと思われる。

5 生物接触ろ過池設備の基本設計概要

5.1 池の構造・洗浄方式に係る設計諸元

我国においては、上水のかび臭除去を主目的とした生物接触ろ過池の実績が少ないことから、実験に

より、良好な処理性能が得られるろ過条件や洗浄方法等を検討するとともに、急速ろ過池の設計指針³⁾を参考にして、実設備の設計・操作条件の検討を行った。

1) 池の構造

急速ろ過池の構造は、ろ過水量の調節方式から、①流量制御型、②水位制御型、③自然平衡型の3方式に分類される。生物接触ろ過池においては、急速ろ過池におけるいずれの方式も適用可能であるが、高度浄水施設技術資料⁷⁾で推奨されているように、設備が単純で、維持管理が容易である③の自然平衡型を採用することにした。

2) 洗浄方式、条件

洗浄方式は非流動化方式とし、Table3に示す操作条件とした。洗浄頻度については、対象とする水源の流量、水温、水質、高濁度の発生頻度、藻類の発生状況等により異なってくるが、平常時は琵琶湖水の場合は、週1~2回、渡良瀬川表流水の場合は週2回に設定した。

3) 洗浄水の供給方式

実験では、洗浄水として原水を用いたが、高濁度が発生した場合、ろ過層への影響が大きいことを考慮して、実施設では処理水を用いることにした。また、自然平衡型ろ過池は、洗浄水の供給方式から、①自己逆流洗浄型と②逆流洗浄タンク保有型に大別されるが、ここでは、3.2で述べたように、逆流洗浄流速0.6m/minの時の損失水頭が0.5m程度であったことから、自己逆流洗浄が十分に可能であること、また、急速ろ過池で実績例の多いことから①自己逆流洗浄型を採用した。なお、逆流圧力は余裕をみて0.9mとした。

池の構造と洗浄水の供給方式から、自然平衡・自己逆流洗浄型のろ過池を採用した結果、逆洗ポンプや高架水槽が不要であり、ろ過流量制御が大幅に簡略化されること等の長所を生かしたシンプルな施設設計が可能となった。

4) 下部集水装置

均等な集水、逆流洗浄水の均等配分等を行うために信頼性の高い下部集水装置を設置する必要がある。下部集水装置としては、①有孔ブロック型、②ストレーナー型、③多孔管型、④多孔板型があり、最近では、空気水併用が可能な装置が開発されている。ここでは、実験で使用した①有孔ブロック型を採用し、空気の供給は、ろ過層下部に空気分配管を設置

し池内に空気を分散することにした。

5.2 実施設の処理フロー

生物接触ろ過施設の鳥瞰図をFig.13に、凝集沈殿・急速ろ過処理システムの前段に設置した場合の処理フローをFig.14にそれぞれ示した。浄水処理におい

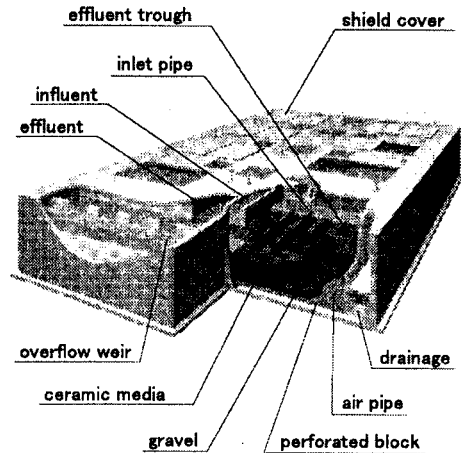


Fig.13 View of a biological filter plant of commercial scale

ては、生物接触ろ過法は、通常、Fig.14に示すように、通常の凝集沈殿・急速ろ過処理システムの前処理として位置付けられているが、一部の河川表流水で見られるように、原水濁度の変動が激しくろ過の閉塞の恐れがある場合には、凝集沈殿処理の後段に生物接触ろ過を行う処理フローも考えられる。なお、ここでは、生物接触ろ過の洗浄排水は、後段の凝集沈殿池や急速ろ過池からの排水と一括して処理することにした。また、計測制御設備については、急速ろ過池に準じて、流量計、pH計、DO計、濁度計および導電率計等を設置することにした。

浄水量約50000m³/日の生物接触ろ過施設の設計諸元の一例をTable4に示した。この例は、大津市企業局膳所浄水場で稼働している実施設の概略仕様²¹⁾であり、既設の粉末活性炭注入設備との組み合わせにより、生物学的浄化機能と物理化学的機能とを併せて、処理効果をあげている²²⁾。

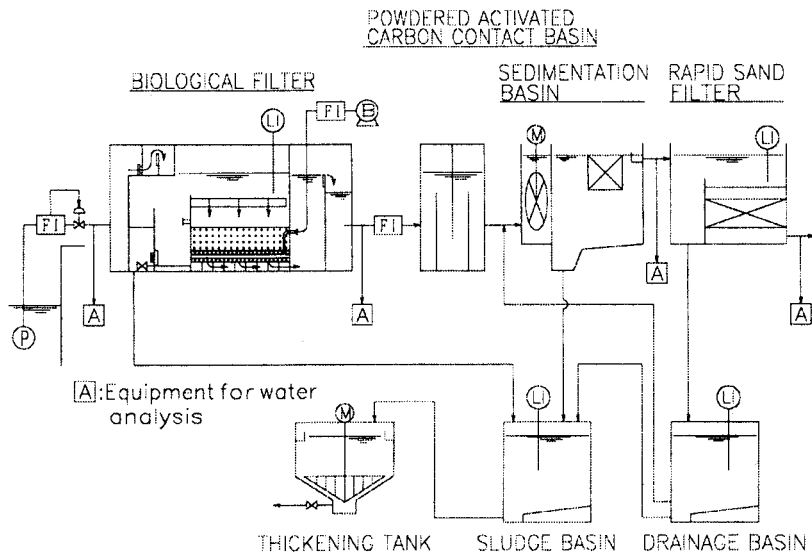


Fig.14 Flow sheet of purification plant with biological filter

Tab.4 Specification of the biological filter
(Zeze plant in Otsu)

| | |
|---------------------------|------------------------------------------|
| Filter capacity | 49500m ³ /d |
| Flow | down flow by gravity |
| Filtration rate | 168m/d |
| Number of basin | 8 |
| Size / basin | 3.9 m× 9.5m (37m ²) |
| Depth of packed media | 1.5m |
| Packed media | |
| material | porous granular ceramic |
| size | 3~5mm |
| apparent specific density | 1.8~2.8 |
| specific surface area | 1500~2000m ² / m ³ |
| Backwashing | |
| method | interfilter-washing system |
| flow rate of air | 0.8m / min |
| flow rate of water | 0.6m / min |

6 まとめ

上水の高度処理において、かび臭を除去対象とした生物接触ろ過施設の実施例は少なく、設計操作条件も明らかでなかった。本研究では、新たに開発した多孔質セラミックろ材を用いた生物接触ろ過実験により、最適な洗浄方法や設計条件について検討した。

- 1) 非流動化洗浄方式（空気・水併用方式）を採用し、空気洗浄流速を 0.8m/min、空気・水洗浄および水逆洗時の逆流洗浄流速を 0.6m/min とした。
- 2) 空気洗浄、空気・水洗浄及び水逆洗に必要な洗浄時間は、4分、3分及び7分とした。
- 3) 高濁度水や藻類対策として、流入水の特性に応じた洗浄間隔を設定したタイマー制御による自動洗浄と、ろ層上面から水深が 1m 上昇した段階での自動洗浄とを併行して機能させることとした。
- 4) 以上の洗浄条件においては、洗浄後の処理性能に及ぼす影響は、ほとんど認められなかった。
- 5) 実施化においては自然平衡・自己逆流洗浄型のろ過池とし、下部集水装置には、有孔ブロック型を採用し、ろ層最下部に空気分配管を設置した。

現在、わが国の上水施設において、多孔質セラミックろ材を用いた生物接触ろ過施設として、処理能力が 49500m³/d のものと 32000m³/d のものの 2 施設が稼動している。

謝辞

本研究の計画および実施に際し、多大なるご助力を頂きました桐生市水道局の村上俊幸氏、斉藤陽一氏、および大津市企業局の寺内信夫氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 山本和夫, 滝沢智, 藤田賢二 (1994) 急速濾過・生物濾過・膜濾過, 技法堂出版, 174-237
- 2) 芳倉太郎 (1997) 生物膜法の上水・下水処理への適用, 水処理技術, 38(7), 1-10
- 3) 日本水道協会 (2000) 水道施設設計指針・解説
- 4) 水道技術研究センター (2000) 浄水技術ガイドライン
- 5) 日本水道協会 (1999) 生物起因の異臭味水対策の指針
- 6) 日本水道協会 (1989) 高度浄水施設導入ガイドライン
- 7) 日本水道協会 (1989) 高度浄水施設技術資料 (生物処理施設)
- 8) 水道浄水プロセス協会 (1996) 生物接触ろ過方式の技術資料
- 9) 井上定夫, 村上俊幸, 斉藤陽一, 伊藤公明, 淵上浩司 (1992) 河川水を対象とした生物接触ろ過法による臭気物質 2-メチルイソボルネオール除去, 第 43 回水道研究発表会講演集, 184-186
- 10) K. Egashira, K. Ito and Y. Yoshiy (1992) Removal of musty odor compound in drinking water by biological filter, Water Sci. Tech., 25, 307-314
- 11) A. Tanaka, T. Oritani, F. Uehara, A. Saito, H. Kishita, Y. Niizeki, H. Yokota and K. Fuchigami (1996) Biodegradation of a musty odour component, 2-methylisoborneol, Wat. Res. 30, No3, 759-761
- 12) 公開特許 09-220089, セラミック質微生物固定化担体
- 13) 日本水道協会 (1993) 上水試験方法, 東京.
- 14) 住友恒, 板倉淳, 淵上浩二 (1989) 高速砂利ろ過装置による臭気除去—上水臭気の生分解装置の開発研究 (1), 水道協会雑誌, 58(1), 2-8
- 15) 井出哲夫 (1997) 水処理工学—理論と応用—, 技法堂出版
- 16) 日本下水道事業団 (1988) 好気性ろ床法による下水の 2 次処理に関する技術調査報告書
- 17) 海老江 (1995) 急速ろ過池の洗浄における空洗・水逆洗併用法の効果, 水道協会雑誌, 64(6), 27-37
- 18) 小林博章 (1998) 粒状活性炭吸着池の設計とろ過・洗浄特性, 水道協会雑誌, 67 (12), 35-39
- 19) 井伊谷鋼一, 三輪茂雄 (1969) 化学工学通論 II, 朝倉書店
- 20) 藤田賢二 (1972) 急速ろ過池における洗浄に関する諸元の水理学的考察, 水道協会雑誌, 第 455 号, 2-31
- 21) 原田正光 (1991) 生物濾過法における濾層洗浄後の硝化特性, 研究紀要 第 27 号福島工業高等専門学校
- 22) 寺内信夫ほか (1995) 生物接触ろ過—実施設とパイロット実験—, 第 46 回水道研究発表会講演集, 114-115

(受付 2001. 1. 26)

(受理 2001. 3. 2)