前塩素処理した緩速ろ過池モデルの 砂層における抑留物質の深度分布

Depth Distribution of Suspended Matter in the Sand Layer of Slow Sand Filter Model Treated by Chlorination

山本満寿夫、山下昌輝、中本信忠

信州大学繊維学部応用生物科学科/〒386-8567 上田市常田3-15-1

MASUO YAMAMOTO, MASAKI YAMASHITA, and NOBUTADA NAKAMOTO
Department of Applied Biology, Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University
/3-15-1, Tokita, Ueda, Nagano 386-8567, Japan

Abstract

The research was carried out to appreciate a slow sand filtration treatment by an investigation of suspended matter distribution in sand beds. The chlorination treatment was given to sand beds. The core-sampler to take suspended matter was inserted in slow sand filter model beds during the filter operation. The following results were obtained.

Normalized head loss value was increased at a chlorination treatment model than at a non-chlorination model (control model) after about 35 days of filter run. From the depth distribution of the suspended solid (SS), a model with chlorination treatment retained large amount of suspended matter than a model treated by non-chlorination. And suspended matter was mainly retained at the extremely thin layer at the sand column of a control model.

Small animals increased in the upper sand layer of a control, but were not existed in a model chlorination treatment.

Measurement of particles in filtered water by a particle counter were decreased at a control model accompany with filter run.

Key words : slow sand filter, chlorination treatment model, suspended matter distribution

1. はじめに

緩速ろ過処理法は砂による篩い分け・吸着という物理的作用と共に、砂層表面と砂層内に繁殖した微小動物、バクテリア等の従属栄養生物により水中の不純物を捕捉し無機化する生物作用が重要な役割を担う浄化方法¹⁻⁶⁾である。

東京都水道局砧上浄水所⁷⁾では、ろ過池内で鞭毛藻類や糸状藻類の繁殖が著しかった。鞭毛藻類が繁殖した場合しばしばろ過水中に藻類が漏出し、ろ過水の濁度を上

昇させることがあった。そこでろ過池内へ次亜塩素酸ナトリウムを散布して藻類繁殖を抑制した時期があった。

また、大阪市水道局等の試験⁸⁻⁹⁾でも、ろ過池内で繁殖する藻類を防止する目的で前塩素処理の実験が行われた。

長野県上田市水道局¹⁰⁻¹¹⁾においても1960年代まで前塩素処理をして緩速ろ過処理をしていた。その結果、水道水に異臭味が生じて問題になった。その後のトリハロメタン騒ぎで前塩素処理を中止したら異臭味騒ぎがなくなった。また、沖縄県宮古島水道企業団の袖山浄水場¹¹⁾では1959年の創設当時から前塩素処理をして緩速ろ過処理

をしてきたが、最近、前塩素処理を中止したら水の味が良くなったと評判になった。前塩素処理が砂層内の生物の働きを抑制するが、緩速ろ過池がろ過閉塞し易くなることについては検討がされていない。

そこで、本実験では河川表流水を取水する上田市水道局染屋浄水場内に緩速ろ過池モデルを設置して、前塩素処理をしたときのろ過池砂層における抑留物質の深度分布について検討を行った。

2. 方法

2.1 ろ過池モデルおよび実験期間

実験は、家庭用のプラスチック浴槽を用いたろ過池モデルに、染屋浄水場の沈殿水を引き入れて行った(Fig. 1)。ろ過池モデル¹²は塩素添加区と塩素添加しない対照区の二つのモデルを設置した。ろ過面積は 0.42m^2 で、塩ビ管を二つ割りにした中にろ過砂を詰めた砂層コラム¹³（直径5cm、長さ15cm）をモデル内に設置した。

なお、使用したろ過砂は有効径 $0.32\sim 0.36\text{mm}$ で標準ろ砂（粒径 $0.30\sim 0.45\text{mm}$ ¹⁴）の範囲内である。二つのモデルに各8本から10本の砂層コラムを10cm間隔で埋込んで、ろ過継続中にほぼ10日間隔で2本ずつ砂層コラムを取り上げて、砂層内の抑留物質と微小動物の深度分布について調査を行った。調査は塩素処理をしないろ過池を対照モデルとし、次亜塩素酸ナトリウムで前塩素処理をしたろ過池を前塩素処理モデルとした。添加した塩素濃度は谷本⁸⁾、近藤¹⁵⁾らに準拠して未ろ水の濃度が 0.5mg/l 前後になるようにした。調査は1997年9月10日～10月24日の45日間に行った。

2.2 分析方法

採取した塩ビ管中の砂層は深度別に切断した後に既報¹²⁻¹⁴⁾と同じ処理を行って浮遊物質（suspended solid、以下SSと略す）、全有機炭素（total organic carbon、以下TOCと略す）、クロロフィル（chlorophyll *a*、以下Chl. *a*と略す）を分析した。実験はダブルでおこない2本の値を平均した。

砂層内の微小動物についてはユスリカ類、貧毛類、線虫類の個体数を計数した。また、両池の浄化能をみるために、微粒子カウンター¹⁶⁾により粒子径 $2\sim 10\mu\text{m}$ の微粒子数を測定した。

3. 結果

3.1 ろ過池流入懸濁物質と標準化損失水頭

調査期間中の流入水濁度をろ過池使用日数でFig. 2に示した。調査開始から9日間ほど悪天候が続き、着水井で濁度12度を越えると凝集剤（PAC）が注入されたためにモデルへの流入濁度は極端に低かった。その後、濁度は平均4度前後で推移した。

また、標準化損失水頭¹⁷⁾（Normalized Head Loss、以下NHLと略す）と使用日数の関係についてFig. 3に示した。標準化損失水頭とは、英国で用いられている標準ろ過速度の 20cm/h （ 4.8m/d ）でろ過した場合の損失水頭に換算して表わした数値である。その結果、ろ過池使用初期、悪天候が続いたために対照モデルの藻類の発育が遅れた。ろ過池使用20日間くらいまでは、対照モデルに比べて前塩素処理モデルの方がややNHLが高く推移した。25日以降になると対照モデルよりも前塩素処理

Fig. 1 The flow of the water from the river

Fig. 2 Turbidity change in inflow water of slow sand filter models during the filter run (days) from September 10 to October 24 in 1997

Fig. 3 Normalized head loss change (NHL) of slow sand filters with non-chlorination model (white square) and a pre-chlorination model plant (black square) during filter run from September 10 to October 24

モデルの NHL が明らかに高くなる傾向を示し、43日目では約130mm 近くまで上昇し、対照モデルとの差が5～6 倍にもなった。このことから、前塩素処理モデルの方が対照モデルに比べてろ過閉塞し易いことを示していた。

3. 2 前塩素処理モデルと対照モデルの SS の深度分布

乾燥砂 (g) 当たりの SS の深度分布を Fig. 4-1 に示した。SS は前塩素処理モデル、対照モデル共に上層から約 2～3 cm 深の間に値が減少した。砂層表層の抑留量はろ過池使用初期は両者あまり差はみられないが、30 日目になると表層から約 2 cm 深間に前塩素処理モデルの方が多量の懸濁物質が抑留された。表層における抑留量は、前塩素処理区で平均13.9mg/g であるのに対して対照区では8.07mg/g であった。45 日目でも前塩素処理区の平均が19.4mg/g、対照区が15.8mg/g と差が明確であった。しかし、約 2 cm 以深については両区共に平均 3 mg/g 前後で顕著な差がなかった。以上、前塩素処理

区では30 日目から45 日目の間に砂層上部の抑留量が対照区に比べて増加しているが、同時に NHL が上昇した時期とも一致した。

3. 3 前塩素処理モデルと対照モデルの TOC の深度分布

TOC の深度分布を Fig. 4-2 に示した。TOC は全般に SS と類似した深度分布を示し、ろ過池使用後半になると上層から約 2～3 cm 深間の減少が顕著であった。砂層上部の0～0.5cm 層の値を30 日目の前塩素処理モデル、対照モデルと比較すると1.7倍ほど前塩素処理モデルの方が TOC 量が多かったが、45 日目には前塩素処理モデルと対照モデルの比が0.7倍とやや対照モデルの方が高くなった。

3. 4 前塩素処理モデルと対照モデルの Chl. a の深度分布

砂層内に侵入し抑留されている藻類量を Chl. a を指標として Fig. 4-3 に示した。対照モデルでは、ろ過池

Fig. 4-1

Fig. 4-2

Fig. 4-3

Fig. 4 The depth distribution of the Suspended Solid (SS) per dry SAND (Fig. 4-1) and Total Organic Carbon (TOC/SAND) (Fig. 4-2), Chlorophyll a (Chl. a/SAND) (Fig. 4-3) in upper sand columns on different days at slow sand filters with non-chlorination model and a pre-chlorination model plant from September 10 to October 24

使用約20日目に砂層上に藻類が繁殖しはじめ藻類被膜が形成された。その後30日目、45日目には砂層上部2 cm くらいまで Chl. a が抑留されていた。それに対して前塩素処理モデルでは流入水に塩素添加されたことで藻類はほとんど繁殖せず、砂層内にも Chl. a はほとんど抑留されなかった。

3. 5 前塩素処理モデルと対照モデルの微小動物の深度別個体数

両ろ過池モデル砂層内の微小動物（ユスリカ類・貧毛類・線虫類）は前塩素処理モデルでは使用開始から45日目まで出現しなかった。一方、対照モデルも20日目まで微小動物は出現しなかったが、30日目に貧毛類が出現しはじめ、少数であるがユスリカ類も砂層上層で観察された。45日目にはユスリカ類・貧毛類の他に線虫類もみられた（Table 1）。これら微小動物は砂層上部0～3 cm の間に多く生息し、特に貧毛類の個体数が大幅に増加し、砂層0.5～1.0 cm 層では6.71匹/cm³が観察された。このことは、餌となる懸濁有機物質が砂層上部に多く抑留されているために、それを摂食する微小動物が多く存在したものと考えられた。

3. 6 前塩素処理モデルと対照モデルのろ過水中の微粒子数

両ろ過池モデルの浄化能をみるために、微粒子カウンターを使用して、ろ過池使用日数とろ過水中の微粒子の関係（Fig. 5）を調査した。その結果、対照モデルのろ過水中の2～3 μm 間の微粒子数は50～180 n/ml、それに対して前塩素処理モデルは50～250 n/ml で、微粒子数の幅が対照モデルよりもやや大きかった。また、3～5 μm 間の微粒子数は対照モデルで50～150 n/ml、前塩素

Table 1 Some animals number in upper sand columns of control model (without chlorination) on the 45 days of filter run

layer (cm)	Chironomus larva	Oligochaeta	Nematoda
0-0.25	0.26	3.3	1.45
0.25-0.75	0	6.71	0.91
0.75-1.5	0	3.59	0.07
1.5-2.0	0	1.56	0.14
2.0-2.5	0	0.2	0
2.5-5.0	0	0.17	0
5.0-7.0	0	0.06	0
7.0-9.0	0	0	0
9.0-11.0	0	0	0
11.0-13.0	0	0	0

(n/cm³)

Fig. 5 The relation between particle numbers per ml and particle size in filtered water with non-chlorination model and a pre-chlorination model plant. Particle numbers per ml are counted in the following size fraction, $2 \sim 3 \mu\text{m}$, $3 \sim 5 \mu\text{m}$, $5 \sim 7 \mu\text{m}$ and $7 \sim 10 \mu\text{m}$ in diameter. Vertical marks indicate each sampling day of filter run.

処理モデルでは $30 \sim 160 \text{ n/ml}$ でやはり処理モデルの方がやや微粒子数の幅が大きかった。次の $5 \sim 7 \mu\text{m}$ 間の微粒子数は両者とも約 70 n/ml 以下で大差はなかったが、 $7 \sim 10 \mu\text{m}$ 間では対照モデルの方がやや微粒子数の幅が大きかった。一方、ろ過池使用日数と微粒子数についてみると、対照モデルでは使用日数が長くなると微粒子数が減少するのに対して、前塩素処理モデルでは逆に多くなる傾向がみられた。このことから、浄化能は前塩素処理モデルよりも対照モデルの方が良いことが示唆された。

4. 考察

ろ過池を長期間継続使用していると対照モデルに比べて前塩素処理モデルの標準化損失水頭 (NHL) が上昇した。その理由の一つとして、ろ過池使用後半からの砂層表層の懸濁物質 (SS) の堆積量の違いが考えられた。

前塩素処理モデルに比べて藻類の生育が旺盛な対照モデルは、光合成によって生産される酸素の気泡と共に糸状藻類被膜に捕捉された流入懸濁物質が剥離浮上して越流管から流出する。一方、藻類が生育しにくい前塩素処理モデルは、対照モデルのように流入懸濁物質を捕捉する糸状藻類の剥離浮上がないから、流入懸濁物質は砂層表層に堆積し易くなる。これはろ過池を遮光したときの懸濁物質の堆積機構¹²⁾とはほぼ同様ではないかと考えられた。しかし、ろ過池使用43日目の前塩素処理モデルと対照モデルの NHL の差が4～5倍になるのに、対照モデルでは依然として NHL 値が25mm前後で低く維持されており、NHL 値が上昇しない原因があるのではないかと考えた。

前塩素処理モデルは、砂層中にほとんど藻類の抑留がないばかりか、微小動物もほとんどみられなかった。それに対して対照モデルは、ろ過継続30日くらいから微小動物が増えはじめ、45日目には砂層上部の $0 \sim 5 \text{ cm}$ 層で数多く生息しているのがみられた。対照モデルはこの微小動物が活動することにより砂層中に水道 (路) ができて、ろ過閉塞を遅延していることが示唆された。その結果、ろ過水中の $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 間の細かな微粒子数が前塩素処理モデルに比べて半分以下と少なく、高い浄化能が維持されていることを示した。物理的にはろ過抵抗の高い前塩素処理モデルのろ過水の方が微粒子数が少ないはずであるが、結果が逆になったのは、対照モデルでは微小動物 (繊毛虫など) が微粒子を捕捉していること^{16, 17)}が推測された。

以上、緩速ろ過池の前塩素処理は、藻類の発達と微小動物の活動や細菌を抑制することになり、生物作用が抑制された結果、ろ過閉塞しやすい状況となつてろ過水にも悪影響を与えることが判明した。このことから、緩速ろ過処理法は生物が重要な役割を担っていることが再認識され、ろ過池管理には生物作用を阻害しないような配慮が必要であると考えられた。

5. 結論

前塩素処理した緩速ろ過池モデルと前塩素処理しない対照モデルの砂層に、ろ過砂を詰めた塩ビ管を挿入し、ろ過継続中に取り出して抑留物質の深度分布を調査した。また、微小動物の深度分布を測定した。その結果以下のことが明らかになった。

1) ろ過継続をしていくと、対照モデルに比べて前塩素

処理モデルの標準化損失水頭（NHL）が上昇した。

- 2) ろ過池使用後半、前塩素処理モデルは対照モデルよりも砂層の極表層における懸濁物質（SS）の抑留量が多かった。
- 3) 前塩素処理モデルの砂層では藻類量（Chl. *a*）の抑留はほとんどなかった。
- 4) 対照モデルでは砂層内の微小動物は使用日数が長くなると砂層上部で多くみられたが、前塩素処理モデルではほとんどみられなかった。
- 5) 対照モデルのろ過水中の微粒子数は使用日数が長くなると減少したが、前塩素処理モデルでは反対に多くなった。

謝辞：本研究を行うにあたり浄水場内での実験場所および資料を提供していただいた、上田市水道局に感謝いたします。また、微粒子計測器、WATER GRAB SAMPLER, MODEL WGS-267を貸与していただいた川鉄商事株式会社に感謝いたします。

引用文献

- 1) 厚生省環境衛生局水道環境部：水道維持管理指針、日本水道協会、1-655(1982)
- 2) 厚生省：水道施設設計指針・解説、日本水道協会、1-715(1990)
- 3) 中本信忠：緩速ろ過における糸状藻類の有用性、水道協会雑誌、55(3)、19-21(1986)
- 4) 中本信忠、坂井 正：緩速ろ過池における糸状珪藻とその連続培養の重要性、日本水処理生物学会誌、27(1)、33-38(1991)
- 5) 佐藤米司、福士憲一、丹保憲仁：緩速ろ過の生物化学的機能—砂ろ過の生物化学的機能の見直しに関する研究(1) 水道協会雑誌、61(12)、11-23(1992)
- 6) 住友 恒、赤沢尚文、奥村充司、尾崎正明、山本昌弘：緩速ろ過における生物分解能と定量化とその効率化の実験—生物分解による上水の高度処理に関する研究(2)一、水道協会雑誌、55(10)、22-29(1986)
- 7) 斎藤 滋、黒川正博、岸野 靖、小山美喜彦：緩速濾過に於ける遮光による藻類繁殖抑制実験について、日本水道協会関東支部水質研究発表会概要集、24-26(1994)
- 8) 谷本 清：大阪市上水道緩速濾過に於ける濾過前塩素消毒試験成績、水道協会雑誌、29、20-35(1935)
- 9) 田中利昭、黒川正博：緩速ろ過池における前塩素間欠注入による藻類制御、日本水道協会関東地方支部水質研究発表会概要集、16-18(1990)
- 10) 中本信忠、坂井 正：1973年の上田市水道水の異臭味問題と前塩素処理と緩速ろ過池の藻類被膜の発達、信州大学環境科学年報、第18巻、69-73(1996)
- 11) 中本信忠：現代に通用する古い技術の緩速ろ過処理(2)、水、40-15(No.575)、67-73(1998)
- 12) 山本満寿夫、大島 茂、中本信忠：緩速ろ過池モデルを遮光したときの砂層における抑留物質の深度分布、日本水処理生物学会誌、35(1)、29-36(1999)
- 13) 山本満寿夫、中本信忠：冬期の緩速ろ過池砂層における抑留物質の深度分布、日本水処理生物学会誌、33(3)、109-116(1997)
- 14) 山本満寿夫、中本信忠：河川表流水を水源とする緩速ろ過池砂層における抑留物質の深度分布、日本水処理生物学会誌、32(2)、123-129(1996)
- 15) 近藤正義：緩速濾過に於ける原水塩素消毒の爾後生物相に及ぼす影響、大阪市上水道の生物学的研究、第7篇、水道協会雑誌、34、14-23(1936)
- 16) 山本満寿夫、中本信忠：微粒子カウンターによる水道水中の微粒子数、日本水処理生物学会誌、34(2)、61-68(1998)
- 17) 中本信忠、坂井 正：緩速ろ過池のろ過閉塞指標としての標準化損失水頭と藻類、日本水処理生物学会誌、28(1)、7-16(1992)
- 18) 上野英世：緩速ろ過池の菌類に関する研究(Ⅰ)—緩速ろ過池内における硝化細菌の分布—水道協会雑誌、331、55-61(1962)
- 19) 上野英世：緩速ろ過池の菌類に関する研究(Ⅱ)—緩速ろ過池内における糸状菌類について—水道協会雑誌、333、49-54(1962)

(受付 2000. 2. 7)

(受理 2000. 3. 22)