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

Depth Distribution of Suspended Matter in the Sand Layer of Slow Sand Filters that Take the Surface River Water

山本満寿夫、中本信忠

信州大学繊維学部応用生物科学科/〒386上田市常田3-15-1

MASUO YAMAMOTO and NOBUTADA NAKAMOTO

Department of Applied Biology, Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University
/ 3-15-1, Tokita, Ueda, 386

Abstract

This research was carried out to appreciate a slow sand filtration treatment by an investigation of suspended matter distribution in sand beds. The following results were obtained.

- 1) Most of the suspended matter was trapped in the upper layer of the sand bed and the remainder, which had penetrated through the surface mud, was also retained in several centimeters depth from the surface.
- 2) Vertical profiles of suspended matter in the sand bed in long filter run was similar as those in the normal filter run.
- 3) From the vertical profiles of Chlorophyll/Total Organic Carbon ratio and that of Pheophytin/Total Organic Carbon ratio, there was shown that the algal matter could be entered into the deeper layer at Ishifune water works than Someya ones.
- 4) The decrease rate order of the suspended matter in the sand bed was Chlorophyll>Pheophytin>Total Organic Carbon. It could be considered that the decomposition rate in the sand layer varied with the different substance.

Key words : slow sand filter, sand bed, suspended matter, distribution

1. はじめに

英国から緩速ろ過処理法が1883年に日本に持ち込まれて以来、1940年代までの日本では大部分の浄水場は緩速ろ過処理で給水をしていた。その後、日本経済の急速な発展と共に、効率的かつ多量に水道水を造ることができる物理・化学的処理法の急速ろ過処理法が普及してきた。また、緩速ろ過処理法は濁質の多い原水、水質汚濁の著しい原水処理には向かないとされ¹⁾、濁質除去に優れ、

化学的に有機汚濁物質を酸化分解する急速ろ過処理法が新設の施設では採用されてきた。1960年代以降は水源の水質汚濁が著しくなり、急速ろ過処理では水道水の異臭味が取り除けないので問題になってきた。米国では塩素処理により原水中の腐植物質と反応し、発ガン物質が生成されることを Hariss が1974年に発表して以来、高度処理および旧来の生物処理の緩速ろ過処理法が見直されてきた²⁻¹²⁾。日本でも原水悪化に対し高度処理で良質の水道水を造る研究が盛んになった。しかし、旧来の緩速

ろ過処理の研究はほとんどなされていない。

筆者の研究室では緩速ろ過池での藻類被膜の形成はろ過閉塞防止に役立つとし、藻類被膜の生態に関する研究を中心に行ってきた¹¹⁻¹⁹⁾。河川表流水を取水する上田市染屋浄水場の緩速ろ過池では5月から11月の間、ろ床で糸状藻類が盛んに繁殖し、真綿状の藻類被膜を形成する。藻類被膜は光合成により生産された気泡の浮力により砂層表面より剥離浮上し、剥離浮上した藻類被膜は越流管から流出する。砂層表面の剥離面には再び糸状藻類が繁殖する。これらの一連の現象が絶えずおこり、この期間のろ過池は糸状藻類の連続培養系となる (Fig. 1)。しかし、砂層表面での剥離現象は流入懸濁物質を容易に砂層内へ侵入させるとの懸念がされた。そこで、緩速ろ過池における藻類被膜の剥離現象と砂層内への懸濁物質等の侵入の関係について調べ、砂層表層で捕捉され分解することを流入懸濁物質、クロロフィル量、過マンガン酸カリウム消費量で確かめてきた²⁰⁻²²⁾。

しかしながら、砂層中の砂粒に付着している抑留物質を過マンガン酸カリ消費量で有機物量として正確に把握するのは困難であった。そこで、この抑留物質を全有機炭素計を用い再検討した。本報は藻類被膜が発達し、剥離浮上現象が著しい緩速ろ過池で、砂層内への懸濁物質の侵入状況を全有機炭素 (TOC) を指標として捕捉および浄化作用について調べたものである。

2. 調査対象

調査は長野県上田市水道局染屋浄水場および石舟浄水場でろ過池砂層表面の汚泥削り取りをする落水時に行った。

2. 1 染屋浄水場

染屋浄水場は、大正12年(1923年)に標高500mの位置に建設され、760m²の緩速ろ過池が13池あり、計画給水人口は75,000人、給水量は56,000m³/日である。水源は主に菅平高原から流出する神川の表流水を取水している。

2. 2 石舟浄水場

石舟浄水場は、昭和46年(1971年)に小県郡真田町石舟地区、標高720mの位置に建設された。760m²のろ過池が5池あり、計画給水人口は26,000人、給水量は8,700m³/日である。水源は染屋浄水場と同じ神川で、取水地点は約4キロ上流である。この水源は富栄養化した菅平ダム湖の影響を受けやすい。

2. 3 流入水とろ過砂

染屋、石舟両浄水場の流入水の水質とろ過砂について Table. 1 に示した。両浄水場の標高差は220mあり、石舟浄水場の方が原水水温は年平均で1℃ほど低く、濁度、色度、アンモニア態窒素濃度は染屋浄水場よりやや高く、

Fig.1 Schematic diagram of a slow sand filtration

Table 1 Inflow water qualities and sand medium specifications of Someya and Ishifune purification plants.

Water Works			Someya		Ishifune	
			Min - Max	Avg	Min - Max	Avg
Water	Temperature	℃	0.0-22.5	10.3	0.0-19.0	9.2
	Turbidity	mg / l	0.65-6.00	1.85	0.01-15.8	2.52
	Color		0.97-30.8	8.79	1.86-12.5	11.6
	Cl	mg / l		10.86		7.83
	NH ₄ - N	mg / l		0.04		0.11
	NO ₃ - N	mg / l		0.85		0.65
	NO ₂ - N	mg / l		0.001		0.009
	SO ₄	mg / l		16.4		8.13
	Specific Gravity	g / cm ³		2.65		2.64
	Ignition Loss	g / Kg		2.4		3.3
Sand	HCl Soluble Matter	g / Kg		1.7		1.8
	Effective Size	mm		0.36		0.32
	Uniformity Coefficient			2.70		268
	Min - Max Size	mm	0.18-1.90		0.16-1.92	

反対に硝酸態窒素、硫酸イオンは低い。

ろ過砂は長野県科町犀川産および飯田市天竜川産で、水道用ろ材試験方法²³⁾によると両者はほぼ同一のもので標準ろ砂の粒径0.31-0.45 mm範囲内である。また、両浄水場で調査したろ過池水深は130 cm から140 cmで、ろ過速度は一日当たり3 mから5 m、ろ過池使用日数は25日前後で両者はほぼ同じ条件である。

3. 方法

3. 1 試料採取方法

染屋浄水場において、1995年4月から7月の間、砂層採取器^{17,24)}を用いて6池で8本の柱状試料を、石舟浄水場では、同年5月から7月の間、4池6本の柱状試料を採取した。本浄水場での落水は通常ろ過層の表面より約20 cmまでであるので、その間の柱状試料を採取した。試料を深度別に切断して以下の方法で分析を行った。

3. 2 分析方法

切断した柱状試料は蒸留水で三回に分けて洗砂し、洗砂液を粉碎器により細粉し、蒸留水で希釈し、全炭素(TC)、無機炭素(IC)をTOCメーター(島津 TOC 500)で測定した。全有機炭素量(TOC)は全炭素量(TC)から無機炭素量(IC)を差し引いた値で、粒子状有機炭素(POC)と溶存有機炭素(DOC)の含量である。また洗砂液中の抑留物質をガラス繊維ろ紙(TOYO GA100)でろ過し、上水試験方法によりクロロフィルa(Chl)、フエオファイチ

ンa(Pheo)を分析した。別に柱状試料の乾燥重量を求め、測定結果は乾燥砂の重量当りで表わした。

4. 結果と考察

4. 1 砂層内の全有機炭素の深度分布

全有機炭素(TOC)を層別に分けて分析した結果をFig. 2に示した。

砂層内の全有機炭素(TOC)は0-0.5 cm層で染屋浄水場が11.6 mg/gに対して石舟浄水場が8.12 mg/gで、砂層表面には汚泥物質が大量にあり、標準偏差が大きいのが両者で大差はない。第2層の0.5-2 cm層では共に1.25 mg/gで標準偏差は小さくなった。さらに下の4-6 cm層を第2層のTOCと減少率で比べると、染屋浄水場で76.7%、石舟浄水場が70.9%であった。また、4-6 cm層から下層の15 cm層までは両者共に平均0.23 mg/gで推移し、15 cm層の減少率は両者共およそ87%となり、減少の割合は深度の増加に従って漸減した。

以上の結果、TOCは表層から次の第2層の間で急激に減少し、第4層の4-5 cm層以深の減少が小さくなったことから、大部分の懸濁物質は砂層の極上部で抑留されることが判明した。

4. 2 砂層内のChlおよびPheoの深度分布

砂層内のTOC、Chl、Pheoの深度分布を片対数図でFig. 3、Fig. 4に示した。

両浄水場で、1995年7月にろ過継続日数が通常(○印)

Fig. 2 Vertical profiles of Total Organic Carbon (TOC) per dry sand (SAND) in the upper sand column at Someya and Ishifune water works. Horizontal bar shows the standard deviation.

Fig. 3 Vertical profiles of TOC per dry SAND, Chlorophyll a (Chl)/SAND and Pheophytin a (Pheo)/SAND in logarithmic scale in upper sand columns at Someya purification plants. Open circles show values operated by ordinary filter run (25 days) and closed circles show values operated by long filter run (50 days).

Fig. 4 Vertical profiles of TOC per dry SAND, Chlorophyll a (Chl)/SAND and Pheophytin a (Pheo)/SAND in logarithmic scale in upper sand columns at Ishifune water works. Open circles show values operated by ordinary filter run (25 days) and closed circles show values operated by long filter run (50 days).

より2倍の50日前後使用したろ過池(●印)があり、ろ過継続の違いを調査比較した。試料は深度4 cm層までを8層に細断し、それ以深は1 cm毎に切断して分析した。その結果、両浄水場間にTOC、Chl、Pheoの深度分布に差がみられた。すなわち、染屋浄水場では表層より約1 cmの間で急激に減少するが、石舟浄水場では約4 cm層まで減少傾向を示し、表層数cm層で両者顕著な差がみられた。特にTOCの減少は表層のみで大きい、それに比べて、Chl、Pheoの減少は全層を通して大きい傾向を示した。

両浄水場砂層内の抑留物質の減少率を、上層の0.5–1.0 cm層と下層の14–15 cm層について、ろ過砂に付着しているTOC、Chl、Pheoの平均値で比較した(Table. 2)。

その結果、染屋浄水場ではTOCの減少率が84.1%、Chlの減少率は96.0%と大きく、Pheoは92.2%であった。一方、石舟浄水場のTOCの減少率は88.3%、Chlが98.8%、Pheoが97.9%で、抑留物質の減少率は両浄水場ともChl、Pheo、TOC順に小さくなった。

Chlは生きの良い藻類体に多く含まれ、PheoはChlの

分解物である。また、TOCは分解残渣を含む全有機物を示している。これらの物質の減少率の違いは物質の生分解性の難易を示すと考えられ、砂層内で生物分解されやすい物質ほど減少率が高くなり、緩速ろ過処理の浄化作用が微生物および微小動物による分解作用に依存していることが示された。

4. 3 Chl/TOC比、Pheo/TOC比、Chl/(Pheo+Chl)比

両浄水場とも河川表流水を取水しているためにろ過池砂層表面には河川由来の付着藻類やろ過池で繁殖した藻類がいる^{14,25)}。これらの藻類の砂層内へ侵入度合あるいは分解程度についてChl/TOC比、Pheo/TOC比、Chl/(Pheo+Chl)比(Fig. 5)を対数目盛で示した。■印は染屋浄水場、□印は石舟浄水場砂層の値を示した。

Chl/TOC比は染屋砂層で約1 cm層までに急激に減少し、それ以深は漸減状態で推移した。それに対して、石舟浄水場は表層から約4 cm層までChl/TOC比が高く、活性の良い藻類由来の物質が多いことが考えられた。約4 cm間のChl/TOC比は染屋浄水場よりも数倍から10倍と顕著に高く、それ以深もやや高い比で推移した。このことから両者は、砂層上層における抑留物質の分解率は

Table 2 Standing stock of various adhered suspended matters per dry sand in the upper sand layer

Works	Layer	0.5–1.0 cm		15 cm		Decreased rate %
		*mg/g	μg/g	*mg/g	μg/g	
Someya	TOC*	1.45		0.23		84.1
	Chlorophyll a	4.50		0.18		96.0
	Pheophytin a	1.66		0.13		92.2
Ishifune	TOC*	1.97		0.23		88.3
	Chlorophyll a	18.4		0.23		98.8
	Pheophytin a	4.69		0.10		97.9

Fig. 5 Vertical profiles of Chl/TOC, Pheo/TOC and Chl/(Pheo+Chl) in upper sand columns in logarithmic scale at Someya (black square) and Ishifune (open square) water works.

ほぼ同じでも藻類体の侵入度合が明かに異なることが示された。また4 cm以深でも多少分解が行われていると考えられた。

Pheo/TOC比はChl/TOC比と比較して上層の減少がやや少なかったが、藻類体の分解物の侵入度合はやはり石舟浄水場の砂層の方が高かった。そして、両浄水場共にChl/(Pheo + Chl)比が上層約4-5 cm層までほぼ同じ値で変化し減少傾向を示すことから、砂層内での両者の分解率は同程度と考えられた。また、砂層の深度が増すに伴って比が小さくなる傾向を示すことから、砂層深部でも分解作用が行われていると考えられた。

岩瀬²⁰⁻²²⁾らは、ろ過池で藻類が盛んに繁殖し、砂層表面の藻類被膜が剥離しても、河川由来およびろ過池で繁殖した藻類由来の懸濁物質は、砂層上部の2-3 cm以深へはほとんど侵入しないことを指摘しているが、本研究では、ろ過池砂層内の抑留物質の分解、侵入度合が浄水場によって異なることが判明した。また、ろ過継続日数が長くなっても砂層内の抑留物質の侵入度合、分解度合はあまり変わらないことが分かった。

5. 摘 要

緩速ろ過池砂層内における抑留物質の深度分布を調査して、砂層内における抑留物質の浄化作用について評価した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 懸濁物質は砂層上部の表層でほとんど捕捉されるが、砂層内に侵入した懸濁物質も砂層上層で抑留された。ろ過継続日数が通常の倍でも抑留物質の侵入度合は変わりがなかった。
- 2) 砂層内での抑留物質の減少率は、クロロフィルa>フエオフィチンa>全有機炭素の順であった。このことから、抑留物質に対する分解能が物質によって異なることが考えられた。
- 3) 藻類体の砂層内への侵入度合は、染屋浄水場よりも石舟浄水場の方が高かった。このことから、浄水場によってろ過池砂層内の懸濁物質の侵入程度が異なることが判明した。

謝辞：本研究を行うにあたり調査に協力、資料等をご提供いただいた上田市水道局に感謝いたします。

【引用文献】

- 1) 日本水道協会:水道施設設計指針・解説(1990)
- 2) Huisman, L. and W. E. Wood. : Slow sand filtration, WHO, Geneva., 122pp (1974)
- 3) Graham, N. J. D.(ed) : Slow sand filtration-Recent developments in water treatment technology. Ellis Horwood Ltd., 416pp(1983)
- 4) Collins, M. R., T. T. Eighmy, J. M. Fenstermacher and S. K. Spanos. : Modifications to the slow sand filtration process for improved removals of trihalomethane precursors. AWWA Res. Found., 267pp(1989)
- 5) Eighmy, T. T., M. R. Collins, J. P. Malley, Jr., J. Royceand and D. Morgan. : Biologically enhanced slow sand filtration for removal of natural organic matter. AWWA Res. Found., 164pp (1993)
- 6) Hendricks, D.(ed.): Manual of design for slow sand filtration. AWWA Res. Found., 247pp(1991)
- 7) Huisman, L. : Slow sand filtration for community water supply in developing countries. A selected and annotated bibliography., 50pp. IRC. Hague (1977)
- 8) IRC : Slow sand filtration, guide for training of caretakers., 54pp. IRC. Hague.(1990)
- 9) Visscher, J. T., R. Paramasivam, A. Raman and H. A. Heijnen : Slow sand filtration for community Water Supply, planning, design, construction, operation and maintenance., 149pp. IRC. Hague (1987)
- 10) Visscher, J. T., S. Veenstra and A. Figee : Slow sand filtration, manual for caretakers., 69pp. IRC. Hague.(1980)
- 11) 中本信忠：アメリカ水道界の緩速ろ過処理に対する再評価、水道協会雑誌、56(5)：18-22(1995)
- 12) Nakamoto, N., M. Yamamoto, M. Sakai, K. Nozaki, N. Iwase, M. Yasuda, T. Kitada and K. Hirabayashi : Role of filamentous diatom as an automatic purifier in a slow sand filter. 139-148p, in Graham, N. and R. Collins (eds) : Advances in slow sand and alternative biological filtration. 461pp. John Wiley & sons.(1996)
- 13) 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)
- 14) 中本信忠、江連小百合：緩速ろ過池ろ床藻類の繁殖過程および季節変化、水道協会雑誌、57(8)：17-37(1989)
- 15) 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)
- 16) 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)
- 17) 中本信忠、坂井正：緩速ろ過池の藻類の役割－緩速ろ過池における糸状藻類繁殖とろ過閉塞、245-252、土木学会衛生工学委員会編、環境微生物工学研究法、417pp、技報堂出版(1983)
 - 18) Sakai, M. and N. Nakamoto : Role of filamentous algae in a slow sand filter. Verh. Internat. Verein. Limnol. 25 : 1993-1995 (1994)
 - 19) Nakamoto, N. and M. Sakai : Primary production by harvest method in a pond of a slow sand filter. Verh. Internat. Verein. Limnol. 25 : 1996-1998 (1994)
 - 20) 岩瀬範泰：緩速ろ過処理法の浄化作用に関する研究、信州大学大学院工学研究科学位論文(修士)(1993)
 - 21) 岩瀬範泰、木崎 豊、坂井 正、中本信忠：緩速ろ過池水深と砂層内汚泥量の関係、日本陸水学会甲信越支部会会報、18 : 47(1992)
 - 22) 岩瀬範泰、坂井 正、中本信忠：緩速ろ過池における藻類被膜の剥離とろ過水の懸濁物質、日本陸水学会甲信越支部会会報、19 : 37.(1993)
 - 23) 日本水道協会衛生常設調査委員会：水道用濾材試験方法、JWWA A103(1988)
 - 24) 中本信忠：緩速ろ過池における藻類被膜の採取道具の試作、水道協会雑誌57(10) : 17-19. (1988)
 - 25) 野崎健太郎、水島恵理、坂井正、中本信忠：緩速ろ過池における珪藻*Fragilaria capucina*の春期の増殖、日本陸水学会第59回大会講演要旨集、B18. (1994)
(受付 1996. 3 .18)
(受理 1996. 4 .24)