水資源の保全を目指した地下水人工かん養の基礎研究*

(バイオフィルタに関する研究)

梅 宮 弘 道^{*1}, 鈴 木 淳^{*2}

Basic Study of Groundwater Recharge which Aim at Preservation of Water Resources (Study of Bio-Filter)

Hiromichi UMEMIYA and Atsushi SUZUKI

An experimental study has been made on the effect of bio-filter in a packed bed. By using a packed bed of glass beads in stead of aquifer, groundwater recharge was reappeared. Measurements were made on microorganism number density, COD, turbidity, iron concentration, and pH. Emphasis was placed on the removal effect of COD. The conclusions were as follows. 1) Bio-filter is formed at the upstream end of the packed bed. It is composed of general microorganism and iron bacteria. The number densities of microorganism and iron bacteria are increased with the passage of time and bio-filter is thickly formed. 2) Bio-filter is very useful to COD removal, because organism is consumed by oxidation with iron bacteria and iron. 3) Iron is removed by the physical filter effect of bio-filter and oxidation with iron bacteria. 4) Turbidity is removed by the physical filter effect of bio-filter. 5) Light is an effective system for COD removal. 6) Environmental temperature is usefulness to bio-filter formation and water purification.

Key Words: Groudwater Recharge, Bio-Filter, Microorganism, Iron Bacteria, Removal Rate, pH, Turbidity, Iron, COD

1. 緒 論

当研究室では自然エネルギーの有効利用を目指し、地下帯水層を利用した自然エネルギー蓄熱法に関する研究^{(1)~(3)}を行ってきた。その一環として図1のような施設を提案し、水資源の保全を目指した地下水人工かん養の研究^{(4)~(6)}を行っている。水資源の保全は自然エネルギー確保のための根本的な重要課題である。この地下水人工かん養施設は、まず井戸内にライトによる光を導入し、河川水や農業用水を帯水層に直接注入する。次に、これより井戸周りにバイオフィルタ(生物浄化層)を形成させ、地下水の汚染を未然に防止しながらのかん養を目指すものである。

本研究は、地下水人工かん養施設実現のための基礎研究であり、河川水浄化実験によりバイオフィルタに関する研究を進めてきた。バイオフィルタは、帯水層をモデル化したガラスビーズを用い、室内一次元モデルの充てん層に河川水を通水することで再現し、河川水浄化実験を行った。バイオフィルタによる浄化能力

の評価項目としては、(1)濁りおよび細菌数の指標となる濁度、(2)鉄量、(3)微生物活動の指標となる pH、(4)有機物汚れの指標となる COD を用いた。

本報告では、'95~'97 年にかけて行った全 9 回の河川水浄化実験より、バイオフィルタの生態、pH 変化、濁度・鉄量・COD 除去プロセスについて報告する。検証実験からは光照射および環境温度の効果を検証したのでここに報告する。

記 号 表

A: 充てん層断面積 cm^2
 COD: 化学的酸素要求量 mg/l
 Δh : 水頭差 cm
 I: 鉄量 mg/l

Fig. 1 Facilities for groundwater recharge

* 原稿受付 1998 年 3 月 30 日.

^{*1} 正員, 山形大学工学部(☎ 992-8510 米沢市城南 4-3-16).

^{*2} 山形大学工学部学生.

E-mail: umemiya@dipfr.dip.yz.yamagata-u.ac.jp

Table 1 Experimental condition

Name	Symbol[unit]	Value						
Length of pipe	L[cm]	50						
Section area of pipe	A[cm ²]	$\pi \cdot 3.5^2$						
Viscosity of water at 0 °C	η s[μ Pa·s]	1791.4						
		'95/ 2/ 7 ~	'96/ 4/ 9 ~	'96/ 7/ 16 ~	'95/ 8/ 1 ~	96/10/17 ~	'95/11/20 ~	'95/12/20 ~
Filling rate	n[-]	0.641	0.628	0.625	0.657	0.638	0.640	0.620
Time for experiment	t[hour]	482.5	480	481	480	480.5	480	444
Time for charging water								
$\Delta h=10$	t_{10} [hour]	0 ~ 194	0 ~ 97.5	0 ~ 288.5	0 ~ 288	0 ~ 192.5	0 ~ 97	0 ~ 96
$\Delta h=20$	t_{20} [hour]	194 ~ 482.5	97.5 ~ 480	288.5 ~ 481	288 ~ 480	192.5 ~ 480.5	97 ~ 480	96 ~ 444
Ave. temperature								
River water	θ_r [°C]	2.5	5.6	21.1	19.4	10.8	4.5	1.6
Inlet water	θ_i [°C]	2.8	6.0	21.7	20.4	11.0	5.1	1.8
Outlet water	θ_o [°C]	5.6	8.1	24.0	22.4	13.1	7.8	4.8
Indoor	θ_e [°C]	7.6	10.7	25.4	24.5	13.4	8.9	6.4
Ave. value of inlet water								
Turbidity	T _i [mg/l]	18.06	42.13	20.60	27.14	29.46	50.67	37.59
Iron	I _i [mg/l]	0.49	0.90	0.49	0.65	0.64	1.24	0.96
pH	pH _i [-]	7.12	6.95	6.77	6.86	5.87	6.72	6.71
COD	COD _i [mg/l]	2.77	4.88	4.54	3.78	3.58	4.51	3.23

L: 充てん層長さ cm

n: 充てん率

t: 時間 h

T: 濁度 mg/l

 η : 粘性率 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ θ : 温度 °C

添 字

c: 冷水

e: 実験室

i: 入口

o: 出口

r: 河川

s: 基準

t: 水槽

w: 温水

2. 河川水浄化実験

2.1 実験方法 図2に実験装置の概略図を示す。当研究室脇の堀立川という自然河川を注入水とした。この川は生活排水が流れ込む県内でも有数の水質汚染の進んだ河川であるので、これより十分な浄化作用が得られれば他の河川への適用が可能と考える。この河川水をポンプでくみ上げ2台のオーバフロータンクに揚水し大きな浮遊物などを取り除き、ある程度水質を安定させて使用する。その後室内に取り込んだ河川水は、ガラスビーズを詰めた充てん層へ水頭差 Δh を与えて通水する。ガラスビーズは平均粒径 1.8 mm で、コンクリートパイププレートを用いて均一に充てん層内に充てんする。充てん層上部にはハロゲンランプ(注水面面上部 40 cm, 420 W)を設置し、通水中照射し続

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

ける。さらに充てん層の外側には横方向からの光進入および外気温の影響を和らげるために断熱材を巻き付ける。実験開始後は、所定の時間に入口水と出口水を採水して、濁度・鉄量・pH・CODについて水質検査をする。また、充てん層表面と入口側から 10 cm おきに取付けた採取窓から充てん物および付着物を採取し微生物観察をする。

2.2 実験条件 実験は'95~'96年にかけ、春季の4月、夏季の7, 8月、秋季の10月、冬季の11, 12, 2月の計7回行った。実験条件を表1に示す。温度に関して、河川水と室温は季節の影響を受けており、充てん層入口と出口水温はそれぞれ河川水と室温に近づく傾向がある。水質に関して、注入水は自然河川を利用しているので実際には時々刻々の水質変動があり、実験ごとの平均水質に差が見られる。特に、濁度は降雨などの影響で極端に変動する。それに対し pH は年間を通してほぼ中性を保っている。水中に溶存する汚れの指標でもある鉄量と COD にも差が見られる。以上の実験条件をふまえて河川水の浄化効果を検証してゆく。

2・3 実験結果 記号は図5～14に対応する。

- Spring('96.4.9～)
- Winter'95.2.7～
- ▲— Summer('95.8.1～)
- Winter'95.11.20～
- △— Summer('96.7.16～)
- Winter'95.12.20～
- ◇— Autumn'96.10.17～

2・3・1 微生物に関して バイオフィルタ(生物浄化層)に生息する微生物の調査を行った。実験開始から所定の時間(96 h)ごとに充てん層採取窓から充てん物および付着物を採取して水で適量に希釈した後、透過形微分干渉顕微鏡を用いて観察する。微生物数の算出にはビュルケルチュルク氏二重計算盤を用いた。観察された微生物は、(1)原生動物:PROTOZOA(2)けい藻植物:BACILLARIOPHYTA(3)緑藻植物:CHLOROPHYTA(4)らん藻植物:CYANOPHYTAの4種類に分類した。

図3,4に微生物の顕微鏡写真を示す。図3に示すけい藻植物(フナガタケイソウ)は淡水に広く出現する普通種⁽⁷⁾である。図4に示す鉄細菌(ガリオネラ, レプトスリックス)は鉄を含む水に検出される普通種⁽⁸⁾であり集団をなして鉄コロイドを形成する。これら鉄細菌の特徴的な生態は溶存鉄の酸化沈積作用であり、鉄や有機物の除去能力があるといわれている。図5～9には微生物が数多く観察された充てん層入口近傍($L=0$ cm)の微生物数経時変化、実験終了時における種類別の充てん層内微生物最終分布を示す。微生物数の増加は、水温が低い冬季に比べ、水温が高く一般に微生物活動が活発化する夏季に行った実験のほうが多い。注入水に含まれる数に依存しているといえる。ま

た、けい藻植物が他の種類に比べ著しく多く、原生動物とともに運動性を有することから充てん層深部にまで生息することが確認された。

以上より、バイオフィルタの形成過程を推測すると、河川水に含まれる微生物は充てん層入口近傍でそのほ

Fig. 5 Time variation of Microorganism number

Fig. 6 Last distribution of PROTOZOA

Fig. 7 Last distribution of BACILLARIOPHYTA

Fig. 8 Last distribution of CHLOROPHYTA

Fig. 9 Last distribution of CYANOPHYTA

Fig. 3 BACILLARIOPHYTA

Fig. 4 Iron bacteria & Ferric colloid

とんどが捕獲され、時間経過に伴ってバイオフィルタを密に形成してゆく。

2・3・2 透水係数に関して 図10に各実験の透水係数経時変化を示す。透水係数とは目づまりの指標であり、充てん層内では時間経過に伴って目づまりが進行する。充てん層を通過する流量を測定して算出する。透水係数 $K[\text{cm/s}]$ は、流量 $Q[\text{s}^{-1}]$ 、充てん層長さ $L[\text{cm}]$ 、充てん層断面積 $A[\text{cm}^2]$ 、水頭差 $\Delta h[\text{cm}]$ 、水の粘性率 $\eta[\mu\text{Pa}\cdot\text{s}]$ を用いて次式で表される。

$$K = (Q \times L) / (A \times \Delta h) \times (\eta_r) / (\eta_s)$$

水の流れやすさは温度の関数である粘性率により変化するので、熱電対を設置し2minごとの温度測定より補正を加えた。

図10よりどの実験においても透水係数は実験開始直後から急激に低下し、初期透水係数の約1/100以下まで低下すると安定してくる傾向がある。これは、充てん層内の目づまりが実験初期において急速に進行してゆくことを示している。データのばらつきは、水頭差 Δh をつける際に生じるわずかな衝撃や注入水量変化による、充てん層内目づまりの崩壊が原因である。

2・3・3 pHに関して pH(水素イオン H^+ 濃度)は、所定の時間に充てん層の入口側・出口側からそれぞれ採水し、ガラス電極pH計を用いて測定した。両者がどれほど変化(pHの上昇)しているのかを、pH変化: $\Delta\text{pH}[-]$ とし次式で算出する。

$$\Delta\text{pH} = (\text{pH}_0) - (\text{pH}_i)$$

図11に透水係数に対するpH変化を示す。透水係数の低下に伴って、pHが上昇(アルカリ側にpH変化)する傾向が見られる。このようなpH変化の原因に、菌数(微生物数)の増加が挙げられる。微生物の増

殖に際しては、代謝産物の生成によって環境のpHが変わる⁽⁸⁾ことが多い。原生動物はアンモニアを排泄するので、pHが上昇する。藻類では二酸化炭素が消費され OH^- イオンが生成される反応が進むので、pHが上昇する。また、図4に示した鉄細菌による溶存鉄の酸化沈殿作用⁽⁸⁾からもpHの上昇が考えられる。鉄細菌の有する鉄に対する酸化沈殿能力とは、溶存する鉄(Fe^{2+})やその他の有機物を栄養源とし、体の内外に不溶性の鉄(Fe^{3+})として沈積する作用である。その反応式を次式に示す。

この結果、水の中の水素イオン H^+ が減少してpHの上昇を招く。

以上より、充てん層内でバイオフィルタ形成してゆく微生物の生態活動がpH変化に影響を及ぼしているといえる。つまり、バイオフィルタ内における微生物活動の指標としてpHの上昇(アルカリ側にpH変化)が確認された。

2・3・4 濁度除去に関して 図12に各実験の透水係数に対する濁度除去率を示す。測定は濁度吸光度法⁽⁹⁾により電位差計を用いた。充てん層通過後の水質は通過前に比べ向上する。その浄化効果を数量化した除去率 R は水質 $S[\text{mg/l}]$ を用いて次式より求まる。

$$R = (S_i - S_o) / S_i$$

それぞれに引いた直線は、対数近似(最小二乗法)を示す。実験開始初期には除去率は低いものの、透水係数が安定してくると約84%と高い除去率を示す。この傾向は各実験で同様に見られることから、年間を通じて濁度除去は物理的汜過作用(充てん層内目づまりの

Fig. 10 Time variation of permeability

Fig. 11 Permeability vs. pH variation

Fig. 12 Permeability vs. Removal rate of Turbidity

Fig. 13 Permeability vs. Removal rate of Iron

進行)によるものといえる。

2・3・5 鉄量除去に関して 図13に各実験の透水係数に対する鉄量除去率を示す。測定はフェナイトリン法で行った。実験開始初期には除去率は低く、透水係数が安定してくると約82%と高い除去率を示す。鉄量除去は濁度除去と同様の物理的濾過作用に加え、生物的浄化作用(鉄細菌による鉄分除去効果)が考えられる。

これまでの研究の成果⁽⁴⁾として、充てん層内に鉄細菌で構成される鉄コロイドフィルタを形成させることで0.1 μm 程度の粒子や細菌に対して捕獲能力があることがわかっている。本実験の充てん層内にも鉄コロイドフィルタ存在するので、鉄細菌の大きさから目づまりが進行する充てん層内に鉄細菌は確実に捕獲されていることになる。捕獲された鉄細菌は溶存鉄の酸化沈殿を繰返し、バイオフィルタに生息し続ける。

以上より鉄量除去過程は、まず酸化鉄を有する鉄細菌がバイオフィルタに捕獲されることにより鉄量は除去される。さらに鉄細菌が酸化沈殿を繰返すことで、溶存鉄は消費または沈積され鉄量濃度は減少している。

2・3・6 COD除去に関して 図14に各実験の透水係数に対するCOD除去率を示す。COD(化学的酸素要求量)とは有機物汚れの指標となり、過マンガン酸カリウム酸性法⁽⁹⁾により測定した。実験開始初期には除去率は低いが、透水係数が安定してくると約

Fig. 14 Permeability vs. Removal rate of COD

Fig. 15 Schematic of experimental apparatus

61%と高い除去率を示す。特に、冬季は充てん層内に捕獲された微生物が少ないにもかかわらず除去率が高くなる傾向が見られる。これは注入水鉄量濃度の差がバイオフィルタ内で鉄コロイドの形成に影響を及ぼしていると考えられる。つまり注入水鉄量濃度が高ければ鉄細菌による鉄コロイドフィルタの形成が促進されCOD除去能力が上がると考えられる。原生動物や藻類よりも鉄細菌の生態活動がCOD除去に関与しているといえる。鉄細菌は鉄除去に加えて有機物に対しても除去能力があることが確認された。

以上よりCOD除去過程は、生物的浄化作用(鉄細菌による浄化)により最も効果が得られる。鉄細菌が有機物や鉄を栄養源とし鉄の酸化沈殿作用を行い、それにより有機物が消費されCOD濃度は減少する。

3. 光照射の影響

緒論でも述べたように、当研究室が提案している地下水人工かん養施設にはライトによる光を導入する。ここではその光の効果を検証すべく、光を照射する場合としない場合とで比較実験を行った。

3・1 実験方法 図15に実験装置の概略図を示す。充てん層を2本並列に設置し、一方は充てん層内部への光の進入を遮るためにアルミニウムはくで覆う。ここで用いたライトは、太陽光に似せた植物光合成作用をもつハロゲンランプ(420 W)である。その他の実験方法および測定項目については2章と同様である。

3・2 実験条件 実験は河川水温が高く微生物が数多く捕獲される夏季の'96年7月16日～に行った。その実験条件を表2に示す。

Table 2 Experimental condition

Name	Symbol[unit]	Value
Length of pipe	L[cm]	50
Section area of pipe	A[cm ²]	$\pi \cdot 3.5^2$
Viscosity of water at 0 °C	η s[μ Pa·s]	1791.4
'96/ 7/ 16 ~		
		Light On Light Off
Filling rate	n[-]	0.625 0.623
Time for experiment	t[hour]	481
Time for charging water		
$\Delta h=10$	t_{10} [hour]	0 ~ 288.5
$\Delta h=20$	t_{20} [hour]	288.5 ~ 481
Ave. temperature		
River water	θ_r [°C]	21.1
Inlet water	θ_i [°C]	21.7 22.0
Outlet water	θ_o [°C]	24.0 24.1
Indoor	θ_c [°C]	25.4
Ave. value of inlet water		
Turbidity	T_i [mg/l]	20.60
Iron	I_i [mg/l]	0.49
pH	pH _i [-]	6.77
COD	COD _i [mg/l]	4.54

Fig. 16 Time variation of Permeability & Microorganism

Fig. 17 Permeability vs. pH variation

Fig. 18 Permeability vs. Removal rate of Turbidity & Iron

3.3 実験結果 光を照射する場合としない場合とで比較する。

3.3.1 微生物および透水係数に関して 図16にそれぞれの場合の透水係数および充てん層入口近傍 ($L=0$ cm) での微生物数の経時変化を示す。どちらの場合もこれまでと同様の傾向を示し、充てん層内における両者の目づまり具合および微生物数の増加傾向に差がないことを示している。時間経過に伴いバイオフィルタが形成されているのがわかる。また微生物の分類結果からは、入口近傍に生息する原生動物の数に2倍程度の差が見られた。光を照射した場合に数が減少したことから、ハロゲンランプによる光の照射は原生動物に対して殺菌作用があると思われる。

3.3.2 pHに関して 図17に透水係数に対するpH変化を示す。どちらの場合においても、透水係数が低下するにつれてアルカリ側にpH変化する傾向が見られる。やはり微生物増加による影響が現れている。両者に大きな違いがないようだが、光を照射しな

Fig. 19 Permeability vs. Removal rate of COD

Fig. 20 Schematic of experimental apparatus

かった場合(原生動物が殺菌作用を受けなかったと推測)にpH変化がわずかであるが強く見られた。

3.3.3 濁度、鉄量除去に関して 図18に透水係数に対する濁度、鉄量除去率を示す。透水係数の安定に伴い除去率が高くなる傾向が両者に見られる。物理的汙過作用による濁度除去は、光照射の有無にかかわらず0.8以上の高い値である。これに対し鉄量除去率は、光を照射したほうに5%の向上が確認された。この原因の一つに、光の照射が鉄量除去に関与する鉄バクテリアの活動を促したのではないかと考えられる。

3.3.4 COD除去に関して 図19に透水係数に対するCOD除去率を示す。ここでは光照射の影響が顕著に現れている。透水係数の低下に伴い除去率が高くなる傾向が、特に光を照射した場合に強く見られる。平均除去率で約14%の向上が確認された。光を導入することはCOD除去に有効であるといえる。

4. 環境温度の影響

生体反応の進行を律する因子の一つである温度環境を微生物の至適温度にすることで、微生物に与える影響および浄化効果の違いを検証した。

4.1 実験方法 図20に実験装置の概略図を示す。ここで用いた実験装置はそれまでの装置に改良を加え新しく製作したものである。改良点としては、充てん層の縮小化と断熱水槽による温度調整を可能にし

たことである。充てん層は5本並列に断熱水槽内に設置する。断熱水槽は、研究室にある容積100 m³の貯湯槽からの循環水により一定温度に保たれる。河川水は分配して5本の充てん層にそれぞれ通水する。充てん層上部10 cmには、これまでのハロゲンランプに換えて植物育成用蛍光灯(40 W×2)を設置した。微生物観察は実験開始から所定の時間(72 h)ごとに充てん層を1本ずつ取り外し、解体後に充てん物および付着物を採取して行った。その他の実験方法および測定項目については2章と同様である。

4・2 実験条件 実験条件を表3に示す。実験は河川水温が低く水質変動が少ない冬季から早春にかけて、'97年1月19日～'97年3月13日～の2回行った。実験期間(河川水注入時間)は、充てん層の縮小化に伴いこれまでの3/4程度に短縮した。水頭差 Δh の調整は充てん層内目づまりの崩壊を抑えるために5 cm ずつ与えた。バイオフィルタが形成される充てん層を前者は温水での断熱を、後者は冷水での断熱を行った。ここで注目すべき点は、(1)真冬の1月に実施した実験は、河川水温が約1°Cの低温時において、断熱水槽内を約26°Cに保って行った温水断熱実験である。夏場のような暖かい温度環境による微生物活動の活発化を期待した。(2)早春の3月に実施した実験は、河川水温と断熱水槽内を約5°Cとほぼ同じ温度に保って行った冷水断熱実験である。低温環境における前実験との比較実験とした。

Table 3 Experimental condition

Name	Symbol[unit]	Value	
Length of pipe	L[cm]	20	
Section area of pipe	A[cm ²]	$\pi \cdot 2.5^2$	
Viscosity of water at 0 ℃	η s[μ Pa·s]	1791.4	
		'97/1/19 ~	'97/3/13 ~
Filling rate : No-1	n ₁ [-]	0.57	0.57
: No-2	n ₂ [-]	0.57	0.59
: No-3	n ₃ [-]	0.58	0.58
: No-4	n ₄ [-]	0.58	0.57
: No-5	n ₅ [-]	0.57	0.57
Time for charging water			
Δ h=5	t _{s5} [hour]	0 ~ 72	
Δ h=10	t _{s10} [hour]	72 ~ 144	
Δ h=15	t _{s15} [hour]	144 ~ 216	
Δ h=20	t _{s20} [hour]	216 ~ 288	
Δ h=25	t _{s25} [hour]	288 ~ 360	
Ave. temperature			
River water	θ_r [℃]	1.3	4.9
Inlet water	θ_i [℃]	1.7	5.3
Outlet water	θ_o [℃]	16.4	5.2
Indoor	θ_e [℃]	6.2	6.9
Water jacket	θ_w [℃]	26.1	4.6
Ave. value of inlet water			
Turbidity	T _i [mg/l]	30.05	34.70
Iron	I _i [mg/l]	0.79	0.54
pH	pH _i [-]	6.32	6.62
COD	COD _i [mg/l]	4.29	2.98

4・3 実験結果 温水で断熱した場合と冷水で断熱した場合とを比較する。

4・3・1 微生物および透水係数に関して 図21にそれぞれの場合の透水係数および充てん層入口近傍($L=0$ cm)での微生物数の経時変化を示す。どちらの場合もこれまでと同様の傾向を示し、時間経過に伴い充てん層内で目づまりが進行し微生物数は増加している。バイオフィルタが形成されているのがわかる。

ここで微生物の増加傾向は温水断熱したほうが冷水断熱に比べて顕著である。微生物の分類結果によると、温水断熱においてけい藻植物が最も増加していた。年間を通して数多く観察されるけい藻植物は環境温度に影響を受けて増加したものと思われる。

4・3・2 pHに関して 図22に透水係数に対するpH変化を示す。どちらの場合においても、透水係数が低下するにつれてアルカリ側にpH変化する傾向が見られる。やはり微生物数増加による影響が現れてい

Fig. 21 Time variation of Permeability & Microorganism

Fig. 22 Permeability vs. pH variation

Fig. 23 Permeability vs. Removal rate of Turbidity, Iron, COD

る。特に温水断熱した場合(けい藻植物の増加が見られた)に pH 変化が強く見られる。

4・3・3 濁度, 鉄量, COD に関して 図 23 に透水係数に対する濁度, 鉄量, COD 除去率を示す。どの除去率についても, これまでと同様の傾向である。温水断熱と冷水断熱との比較から, 濁度除去は温水断熱のほうが 8% 向上している。濁度は物理的汜過作用により除去されている。図 21 に示す充てん層内目づまり具合のわずかな差が原因に考えられる。次に鉄量と COD 除去について, 両者ともに平均除去率は鉄量で 80~82%, COD で 64~66% であり, これまでの平均的な値である。温水断熱の効果は 2~3% にすぎない。この原因として, 環境温度を夏場に近づけることで微生物は増加したが, その数は図 5 と比較すると実験期間つまり河川水注入時間が短く十分に増加しなかったことが考えられる。また鉄量および COD 除去に最も関与する鉄細菌について, 温水断熱のほうが注入水鉄量濃度が高かったことを考慮すれば, 除去効果に差が生じるはずである。これにも実験期間が短かったため充てん層内でバイオフィルタの形成が十分に促進されずに浄化効果に差が現れなかったと推測する。

5. 結 論

地下水人工かん養施設実現のための基礎研究として, 室内一次元モデル実験装置内で形成されるバイオフィルタ(生物浄化層)に関して, 河川水浄化実験と検証実験を行いその生態と浄化効果を検証した。微生物調査および水質調査により次のような結論が得られた。

(1) バイオフィルタは充てん層内入口近傍で形成され, その構成のほとんどが一般的な微生物類および鉄細菌類である。その数は時間経過に伴って増加してバイオフィルタは密に形成されてゆく。

(2) COD 除去に関して, 生物的浄化作用(鉄細菌による浄化)により最も効果が得られる。鉄細菌が有機

機物や鉄を栄養源とし鉄の酸化沈殿作用を行い, それにより有機物が消費され COD 濃度は減少する。平均除去率は 61% であった。

(3) 鉄量除去に関して, 物理的汜過作用(充てん層内目づまりの進行)および生物的浄化作用(鉄細菌による浄化)によりその効果が得られる。溶存鉄は鉄細菌により消費または沈積され鉄量濃度は減少する。平均除去率は 82% であった。

(4) 濁度除去に関して, 物理的汜過作用によりその効果が得られる。目づまりが進行して透水係数が低下すれば年間を通して安定した高い除去が可能である。平均除去率は 84% であった。

(5) ハロゲンランプによる光の導入は COD 除去に有用であり, 除去率に 14% の向上があった。

(6) 環境温度を上げることで微生物は増加したが, バイオフィルタの形成が十分促進されずに河川水浄化能力に大差が見られなかった。

なお, 本研究の一部は文部省科学研究費(国際学術研究)07044118, ゼネラル石油平成 7 年度研究助成金および三機工業(株)研究助成金による。明記して深謝する。

文 献

- (1) 梅宮弘道・宮沢隆亀, 冷凍, 57-651(1982), 3-11.
- (2) 梅宮弘道・鴨脇勲, 機論, 54-497, B(1988), 178-184.
- (3) 梅宮弘道・佐々木春人, 機論, 54-507, B(1988), 3272-3277.
- (4) 郡司進, 地下帯水層蓄熱の基礎研究: バイオフィルタ効果, 山形大学修論, (1993), 1633.
- (5) 塗計次, 廃材利用木炭とバイオフィルタによる河川水浄化, 山形大学修論, (1993), 1944.
- (6) 野竹孝範, バイオフィルタによる河川水浄化, 山形大学修論, (1996), 2284.
- (7) 水野葦彦, 日本淡水プランクトン図鑑, (1990), 1-181, 保育社.
- (8) 小島貞男・須藤隆一・千原光雄, 環境微生物図鑑, (1995), 55, 講談社.
- (9) 日本分析化学会北海道支部, 水の分析第 3 版, (1981), 157-240, 化学同人.