

II-72

寒冷地における天然着色水の直接ろ過に関する検討

北見工業大学 正 員 海老江 邦 雄
同 学生員 李 富 生
同 同 渋谷 真 祐
同 同 安 出 卓 司
同 同 笠 原 伸 介

1. ま え が き

直接ろ過法は伝統的な沈澱・ろ過プロセスと異なり、ろ過が固液分離の中心となる水の浄化法である。従来の研究によると、直接ろ過法は、特に低濁原水の場合、凝集剤使用量と汚泥発生量を減少させ、ろ過継続時間を増大させるなど、多くの利点をもつと指摘されている。しかしながら、北海道で広範に見られる低水温、低濁度、高色度原水を対象にした直接ろ過の効果に関する検討例はほとんどない。

著者らは、このたび北見市広郷浄水場にパイロットスケールの実験プラントを設置して、典型的な低温（今回の実験期間においては $2.1\sim 8.6^{\circ}\text{C}$ ）、低濁、高色度の河川表流水を対象に、直接ろ過の処理性と適用性についての検討を開始した。高色度原水処理における最適pH領域は 5.5 付近にあると指摘されているが、今回は原水のpHを何ら調節せずに、どの程度の処理効果が得られるかについて検討した結果を報告したい。

2. 実験装置と実験方法など

図1に実験に用いた直接ろ過装置を示す。ろ過筒（断面は矩形で 49.6 cm^2 、長さ 1.3 m ）には珪砂（有効径 0.6 mm 、均等係数 1.5 以下、比重 2.62 ）を 60 cm の厚さに充填し、空隙率は 44.3% に調整した。本浄水場の原水の夏期および冬期の水質については表1に掲げた。実験ではこうした原水または沈澱水に所定量のポリ塩化アルミニウム（PAC）を注入し、急速混和した後（回転数 150 rpm で 5 分）、直ちにろ過筒に導き、ろ速 120 または 240 m/d で 20 時間（原水の場合）、 27.5 時間（沈澱水の場合）のろ過を行った。ただし損失水頭の発生が急速な場合には、損失水頭が 2.5 m に達した時点で運転を打ち切った。

実験においては、経時の損失水頭、水温、原水とろ過水の濁度、色度（光電分光光度計による）、 KMnO_4 消費量、アルミニウム濃度（オキシ法による）および原水のpHを測定した。アルミニウム濃度については、ろ過水と、孔径 0.1 および $0.6\text{ }\mu\text{m}$ のフィルターによるろ液について測定した。また、ろ過後のろ層の洗浄については、空洗と逆洗との両方を採用した。空洗は強度 $36\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ で 2 分間、その後逆洗については 60 cm/min の速度で 8 分間行った。

他方、PAC、硫酸アルミニウム（バンド）それぞれの凝集効果をろ過に先立って把握するために、次の手順でジャーテストを行った。原水の 1 リッターをビーカーにとり、凝集

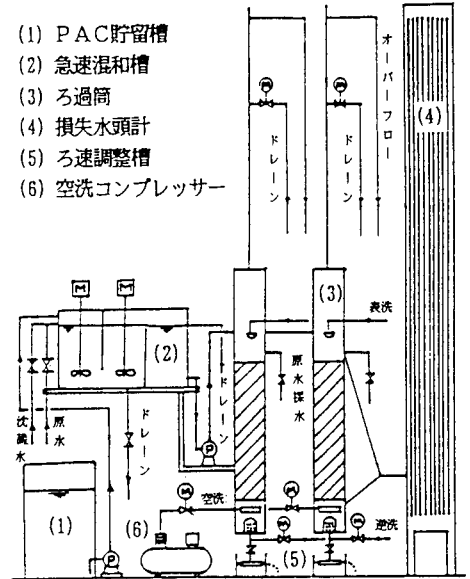


図1 実験装置の概要

剤を所定量注入して急速攪拌(180rpm)を5分間行い、その後0.9 μ mのフィルターでろ過し、ろ液の濁度と色度を測定した(原水の色度流出率が約80%になるフィルターを使用)。

3. 結果と考察

3-1 ジャーテスト

低温、低濁、高色度原水に対するPACとバンドの凝集効果については、これまで明らかにされていない。図2は、原水の水温5.5℃およびpH7付近におけるこれら両凝集剤による色度と濁度の除去パターン(原水のろ液基準)を示している。いずれの凝集剤を用いた場合にも、注入量の増加とともに、色度と濁度の除去率が上昇している。0.9 μ mフィルターでろ過した原水を基準にすると、PAC注入率30mg/lでは色度は85.0%、濁度は95.0%、バンド注入率32mg/lではそれぞれ78.1%と83.8%まで除去率が高まっている。ただし、フィルターによるろ過前の原水を基準として色度と濁度の除去率を求めると、PAC注入率30mg/lでは87.7%と98.5%、バンド注入率32mg/lでは82.1%と95.0%になっている。いずれにしてもPACを用いた方が色度の除去率は約10%、濁度の除去率は約15%、それぞれ高まっている。さらにいずれの凝集剤を用いた場合にも、濁質は色度成分より凝集し易く、高い除去率が得られている。

図3は、凝集剤の注入率をアルミニウム濃度に換算して濁度と色度の除去率の動き(原水のろ液基準)を示したものである(厳密にはこの場合、横軸のAl濃度は、元来原水に含まれていた約0.04mg/lのAlと凝集剤に由来するAlとの合計量である)。この図においては、同一のAl濃度では、PACを用いた場合の濁度、色度の除去率が著しく高い。また、濁度と色度の除去率を比べてみると、濁度の除去率が色度より高いが、その挙動は相互に非常に類似している。さらに、Al注入率の増加に伴う濁度と色度の除去率の動きについては、Al濃度が低い場合には、濃度の増加とともに最初は緩慢に増加しているが、一定の濃度(PACの場合は約0.45mg/l、バンドの場合は約1mg/l)を超えると濁度と色度の除去率は急に上昇し、その後除去率の増加は再び緩慢になる傾向が認められた。これは、おそらく所定の凝集剤注入率で形成されるフロックのゼーター電位は全ての粒子が同一になるのではなく、ある幅内で分散しながら上昇することと最適凝集領域のゼーター電位との相対的な関係に依っているものと推測される。

3-2 直接ろ過実験

(1) 濁度、色度除去率の動き

表2は、PAC注入率を変えろ過実験(ろ速120m/d)における原水条件および濁度と色度の除去率の動きを示している。これらの実験では、原水pHを調整していないので、その変動幅はpH6.9~7.7、また、水温については2.1~8.6℃であった。最初に、PACを注入していない実験における濁度、色度の平均除去率はそれぞれ27.3%と5.3%であったのに対し、PACをそれぞれ4, 8, 12mg/l注入した場合のこれらの除去率は、全体的には上昇しているがその勾配は非常に小さく、ジャーテストの結果と類似している。さらにPAC注

表1 北見広郷浄水場原水水质平均値(変動幅)

項目	夏期(6~10月)	冬期(12~3月)
水温(℃)	15.3(5.0~25.5)	1.8(0.3~8.0)
pH	7.1(6.6~8.5)	7.0(6.8~8.6)
濁度(度)	20.1(1.0~800.0)	5.1(0.0~780.0)
色度(度)	15.9(5.0~560.0)	12.4(3.0~144.0)
KMnO ₄ 消費量(mg/l)	11.3(5.1~48.7)	7.6(4.1~18.0)

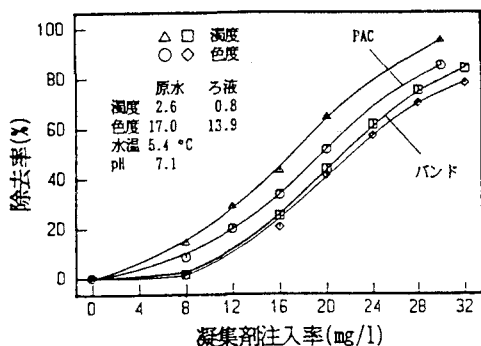


図2 PACとバンドの凝集効果(原水のろ液基準)

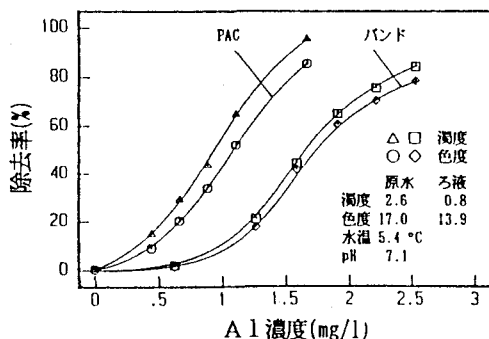


図3 PACとバンドの凝集効果(原水のろ液基準)

入率を16mg/l に上昇させると、PAC注入率の増分以上に、濁度と色度の除去率が急激に上昇（濁度除去率は76.7%、色度除去率は約40%）する結果となった。こうした傾向はジャーテストの結果からも認められた。このときの色度除去率が大幅変動(11.9～73.5%)しているのは、ろ過開始時には原水の pHが高く、凝集が極めて不十分であったが、その後徐々に pHが低下して除去率が高まったためと考えられる。すなわち、ろ過開始時にpHを7近くにまで調整しておけば、ろ過中の平均除去率は70%程度に維持できたものと推測される。その後のPAC注入率を30 mg/lに上昇させた実験においては、いずれの除去率も上昇しており、pHが若干高くなっても除去率の変動幅(53.4～80.1%)は狭く、pHによる影響は小さかった。

表2 原水水質とPAC注入率によるろ過水の水質

PAC mg/l	水温(℃)	pH	濁度〔平均値(変動幅)〕			色度〔平均値(変動幅)〕		
	原水	原水	原水	処理水	除去率(%)	原水	処理水	除去率(%)
0	5.1～8.1	7.0～7.2	6.6(3.7～12.1)	4.8(1.9～9.8)	27.3(19.0～48.6)	34.0(22.1～55.5)	32.2(19.8～53.0)	5.3(4.5～11.6)
4	5.6～8.6	7.0～7.1	2.9(2.4～3.2)	1.6(1.3～1.8)	44.8(25.0～51.9)	19.2(17.4～20.4)	17.5(15.9～18.1)	8.9(4.0～11.3)
8	7.0～8.1	7.0～7.2	4.1(3.2～4.9)	2.0(1.1～2.8)	51.2(42.9～65.6)	24.1(18.5～28.1)	21.0(15.6～23.3)	12.9(8.1～17.1)
12	6.2～8.3	6.9～7.2	4.4(3.0～6.0)	1.9(1.2～3.0)	56.8(50.0～64.7)	24.2(17.7～29.3)	21.3(16.4～25.5)	12.0(6.6～13.3)
16	2.1～4.9	7.0～7.7	3.0(2.4～4.9)	0.7(0.4～1.2)	76.7(58.6～91.5)	16.4(15.2～18.6)	9.9(4.3～14.6)	39.6(11.9～73.5)
20	2.8～7.3	7.1～7.7	2.6(2.2～3.3)	0.8(0.2～1.6)	69.2(51.5～91.7)	17.3(13.9～19.3)	11.1(4.5～16.6)	35.8(10.3～67.6)
30	3.0～4.7	7.0～7.6	2.8(2.0～5.3)	0.6(0.2～1.2)	78.6(52.4～92.3)	17.0(14.1～25.7)	5.1(3.1～6.8)	70.0(53.4～80.1)

なお、ろ速240m/dのろ過実験における濁度と色度の除去傾向については、凝集剤注入率30mg/lの場合には僅かに低下したが、それ以外の凝集剤注入率においては、ろ速 120 m/dの場合とほとんど変わらなかった。

これらのろ過実験で得られた KMnO_4 消費量の減少率と色度成分の除去率との挙動は類似しており、それらの関係は図4に掲げた通りである。

(2) 損失水頭発生量の動き

表3は、上述の実験に伴う損失水頭の動きを示している。PAC注入率が12mg/lまでは、総損失水頭の上昇勾配は小さく、濁度と色度の除去率の傾向と類似している。凝集剤の注入率をこれ以上増すと、損失水頭が急に上昇し、特に注入率30mg/lの場合には、ろ速120m/dでは20時間で、ろ速240m/dでは9時間で設定値250cm付近になり、ろ過を打ち切った。PAC注入率16、20mg/lの場合には、240m/dのろ速では約16時間後にこの設定値に達した。したがって、今回のように原水pHを制御せずに低濁、高色度の原水を直接ろ過する場合には、ろ速120m/dの方が望ましいと考えられる。損失水頭発生量の表層(0～7.5cm)と全層の割合からみると、PAC注入率を増すと、形成されるフロック径が大きくなると同時にフロック量が増加するため、表層における損失水頭の発生割合は高くなり、120m/dの場合は240m/dの場合より上昇勾配が大きい。このことは、ろ速120m/dではフロックが表層部で抑留されるが、240m/dではフロックをろ層内に押し込む推進力が大きくなるので、フロックがろ層の深い部分まで輸送されることとなり、ろ層空隙が有効に利用されることを示している。

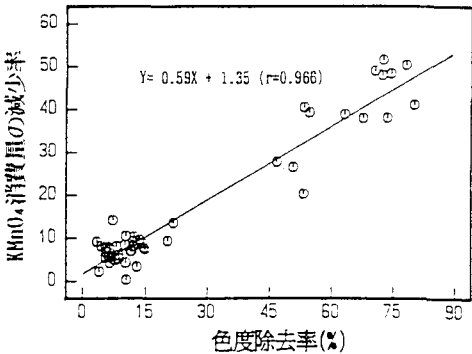


図4 色度除去率と KMnO_4 消費量の減少率との関係

表3 PAC注入率による損失水頭の動き

PAC mg/l	ろ過速度 120m/d				ろ過速度 240m/d			
	ろ 過 時間(hr.)	表 層 7.5cm	全 層 60cm	表層/ 全層(%)	ろ 過 時間(hr.)	表 層 7.5cm	全 層 60cm	表層/ 全層(%)
0	20.0	11.5	25.5	45.1	20.0	26.0	55.0	47.3
4	20.0	16.0	29.5	54.2	20.0	33.0	61.0	54.1
8	20.0	24.0	37.5	64.0	20.0	55.0	87.5	62.9
12	20.0	27.0	41.0	65.9	20.0	67.0	102.5	65.4
16	20.0	69.5	104.0	66.8	16.0	153.5	244.5	62.8
20	20.0	94.5	127.0	74.4	16.0	158.0	245.5	64.4
30	20.0	173.5	247.0	70.2	9.0	147.5	251.5	58.7

(3) アルミニウム流出率の動き

表4は、濁度、色度およびアルミニウムの流出率の動きを示している。PAC注入率が増加すると、濁度、色度と同様にA1の流出率が全体的に小さくなり、海老江らが指摘しているように、これら各成分のろ層内部における動きも非常に類似したものとなる。原水のpHが7.7付近にまで高くなった場合には、PAC注入率30mg/lを除くその他の注入率において、A1の流出率は濁度と色度の流出率に随伴して高くなっている。また、ろ過開始から30分後においては、pH7付近でも濁度、色度、A1の流出率が高くなった。これはろ過初期におけるろ層の未熟成に関連する初期漏出と考えられる。さらに、流出A1の粒径を見ると、ろ過初期における原水のpHが比較的低いため、0.1μm以下の溶解性A1の割合は低く、0.1~0.6μmおよび0.6μm以上のA1の割合は高いのに対し、ろ過が進行してpHが7.6と7.7になった場合、溶解性A1の割合が高くなり、濁質と色度成分とと一緒に流出している。凝集剤注入率16mg/l以上でろ速120m/dの場合には、ろ過16時間を経過して安定期に入ると、A1の流出率は濁質と色度成分と同様に低下している。PAC注入率30mg/lでろ速240m/dの場合には、ろ過8時間を経過すると、濁度と色度の漏出に伴って0.6μm以上の不溶化水酸化アルミニウムも流出した。これはろ過終期におけるろ層の劣化（終期漏出）に関連するものと推測される。

表4 濁度、色度およびアルミニウムの流出率

PAC mg/l	項目	ろ過時間(hr.) (ろ速120m/d)				ろ過時間(hr.) (ろ速240m/d)			
		0.5	4.0	8.0	16.0	0.5	4.0	8.0	16.0
12	pH	7.0		7.2	7.0	7.0		7.2	7.0
	濁度	43.6		50.0	43.2	43.6		50.0	40.5
	色度	94.0		87.0	87.8	94.5		85.3	84.0
	A1(d)	98.7		88.8	81.0	99.0		95.0	83.3
	A1(d ₁)	28.6		31.0	22.1	23.4		28.9	31.4
	A1(d ₂)	68.8		57.7	75.0	64.9		71.1	61.4
	A1(d ₃)	2.6		11.3	2.9	11.7		0.0	7.2
16	pH	7.2	7.7		7.1	7.2	7.7		7.1
	濁度	24.5	41.4		14.8	24.5	41.4		18.5
	色度	88.0	85.5		26.5	86.7	84.2		28.4
	A1(d)	76.0	91.0		17.0	81.0	93.0		21.0
	A1(d ₁)	7.9	13.2		17.6	9.9	15.1		19.0
	A1(d ₂)	81.6	81.3		64.7	77.8	77.4		61.9
	A1(d ₃)	10.5	5.5		17.6	12.3	7.5		19.1
20	pH	7.4	7.7		7.1	7.4	7.7		7.1
	濁度	43.3	41.9		9.1	46.7	41.9		9.1
	色度	89.7	85.5		36.8	89.1	85.5		34.2
	A1(d)	78.8	84.1		12.4	91.8	94.7		18.8
	A1(d ₁)	19.4	40.6		71.4	9.0	31.1		12.5
	A1(d ₂)	74.8	58.0		14.3	82.7	30.4		53.1
	A1(d ₃)	8.0	1.4		14.3	8.3	38.5		34.4
30	pH	7.2	7.6	7.1		7.2	7.6	7.1	
	濁度	7.7	9.5	12.0		3.8	23.8	36.0	
	色度	29.6	22.0	19.9		26.3	40.9	54.5	
	A1(d)	8.9	6.7	5.0		10.0	21.7	30.8	
	A1(d ₁)	25.0	33.3	33.3		11.1	7.7	5.5	
	A1(d ₂)	62.5	58.3	22.2		55.6	35.9	18.2	
	A1(d ₃)	12.5	8.3	44.5		33.4	56.4	76.3	
30 ¹⁾	pH	7.1	7.1	7.1	7.0	7.1	7.1	7.1	7.0
	濁度	2.4	2.5	4.3	4.5	2.4	2.5	4.3	4.5
	A1(d)	24.5	20.5	13.2	2.3	24.1	19.1	14.1	13.2
	流出率 (%)	10.0	5.6	1.7	2.2	13.9	6.1	1.9	2.7

以上のことから、A1のろ層内部における抑留挙動は濁質と色度成分の除去と連動していること、ろ過中であってもpHが変動すると流出水中の溶解性および不溶性A1の割合が変動することなどが明らかになった。流出水中の全A1量については、ろ速120m/dの場合には直接ろ過と伝統的な沈澱・ろ過プロセス（表4の一番下のデータ群）とはほとんど変化しない結果が得られた。

図5は一連のろ過におけるA1、濁度、色度の除去率についてプロットしたものである。今回の実験で得られた濁度除去率または色度除去率とA1除去率の関係を最小二乗法を用いて回帰直線を求めたところ、次のようになった。

濁度(Y₁)とA1(X)の関係：
$$Y_1 = 0.53X + 39.75 \quad \dots\dots (1)$$

色度(Y₂)とA1(X)の関係：
$$Y_2 = 0.79X + 1.36 \quad \dots\dots (2)$$

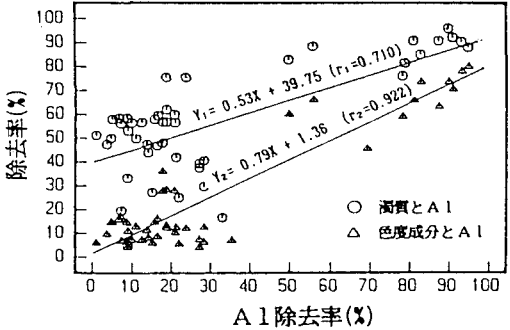


図5 A1、濁質および色度成分の除去率の関係

この図および式から、ろ過による濁質除去率はA1除去率より若干高く、色度成分の除去率は逆に低くなっており、ろ層内部におけるこれら三成分の除去率の関係が明らかになった。

(4) ろ過の経過に伴う各成分の動き

図6と7に、凝集剤注入率が高く(PAC注入率20と30mg/l)、濁度と色度の除去率が比較的高くなったろ過実験におけるろ過水濁度、色度、原水のpH、水温の経時変化を掲げた。これらの図では、PAC注入率が20mg/lの場合、ろ過開始時には、ろ過水濁度が2度以下であるのに対し、色度の除去率は非常に低い。その後、pHが上昇しても色度除去率には変化が認められないが、ろ過4時間以降、pHが徐々に低下すると、濁度と色度の除去率は高くなっている。このように、pHの変動によるろ過結果への影響が認められた。それに対してPAC注入率30mg/lの場合には、pHの変動による除去率への影響はほとんどなく、ろ過水の濁度と色度は低く抑えられていた。ろ速240m/dでは、多量のフロックがろ層に供給されるので除去率は上昇したが、短時間のうちに空隙が閉塞して、終期漏出を呈するに至った。

(5) 水温の影響

一般に水温の低下は、水の粘性を高めるため、フロック形成やろ層における固液分離にとって不利な状況になると考えられる。今回の実験においては、PAC注入率20mg/lにおいては、原水の水温が徐々に低下すると、120、240 m/dのいずれのろ速においてもろ過水の濁度と色度は低くなった。それに対し、注入率30mg/lの実験では、除去率の動きは逆の傾向となっている。しかしながらこれまでの実験データが少ないので、温度の影響については現在のところ良く分からない。したがって、ろ過中の温度変化と同時に季節による原水温度変化の影響については今後の検討課題にしたいと考えている。

4. ま と め

北見市広郷浄水場の原水(低温、低濁、高色度河川表流水)について、pH調節をせずに直接ろ過実験を行い、現在までのところ、以下のような知見が得られた。

- (1) 水温 5.5℃付近の低温、低濁、高色度水についてジャーテストを行い、ポリ塩化アルミニウムの凝集効果は硫酸アルミニウムより優れていることを明らかにした。
- (2) 凝集剤注入率の上昇に伴う濁質と色度成分の除去挙動は類似しているが、除去率については、濁質の方が、PACを用いた場合 10%程度、硫酸アルミニウムを用いた場合5%程度高かった。

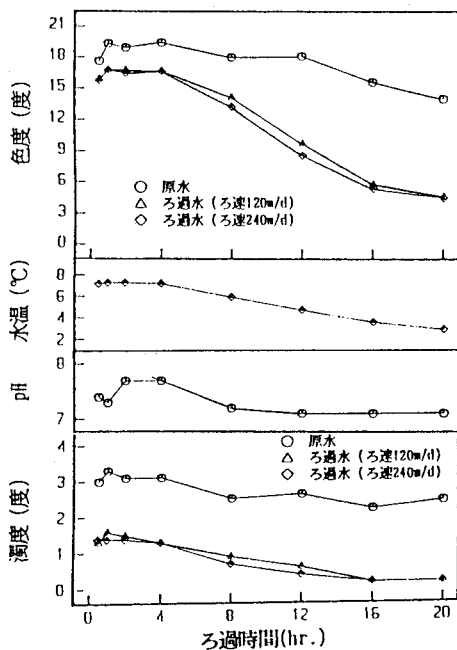


図6 ろ過の経過に伴う各成分の動き
(PAC注入率20mg/lの場合)

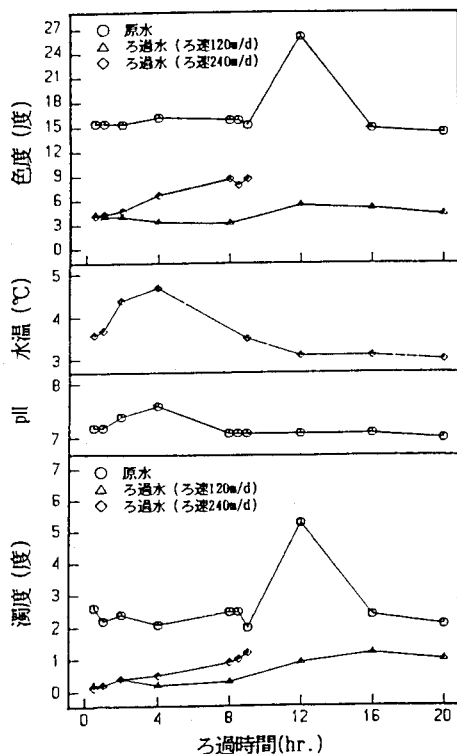


図7 ろ過の経過に伴う各成分の動き
(PAC注入率30mg/lの場合)

(3) ろ過における濁質、色度成分およびアルミニウムの挙動は、ジャーテストの結果と非常に類似していることが明らかになった。

(4) 原水pHを調節せずにPACを30mg/l注入して、ろ速120m/dで直接ろ過したところ、濁度は平均で80%弱、色度は平均で70%と比較的高い除去率を達成できたが、損失水頭の発生量が多く、直接ろ過には適当とは考えられない。

(5) アルミニウム流出率および流出アルミニウムの粒径分布は、pHまたろ過時間とともに変化することが分かった。また、Alの除去は濁質と色度成分に随伴する挙動を示した。さらに、これら三成分について除去率の高いものから順に並べると、濁質、Al、色度成分となった。

今後は、原水のpHを最適領域の5.5付近にまで低下させた一連の実験を行うことを考えている。さらに、夏場の水温の高い時期におけるデータを集めて比較することにより水温差が濁質や色度成分のろ過に及ぼす効果についても検討することを考えている。それらの結果については、次の機会に報告したい。

5. あ と が き

最後に、実験に協力いただいた北見市広郷浄水場の高畑 征夫係長と萩下 隆係員および北見工業大学土木工学科上下水道工学研究室の輪島 秀則技官と4年生の黒田 昌紀君に対し心から感謝したい。

【 文 献 】

- 1) 海老江 邦雄, 渋谷真祐, 安出卓司 : 残留アルミニウム濃度に及ぼす直接砂ろ過因子の影響, 土木学会北海道支部論文報告集, pp.609-613 (1991)
- 2) 海老江 邦雄, 天野重己, 伊藤雅喜 : カオリン, フミン酸の2成分を含む原水の直接ろ過に関する研究, 水道協会雑誌, 第672号, pp.27-38 (1990.9)
- 3) 亀井 翼, 松井佳彦, 丹保憲仁, 丹治雅人 : フミン質とアルミニウムの凝集形態, 土木学会第47回年次学術講演会, pp.868-869 (1992.9)
- 4) 丹保憲仁, 小笠原 紘一 : 浄水の技術, 技報堂出版
- 5) 穂積 準, 吉田英樹 : 無機及び高分子凝集剤によるフルボ酸の凝集, 土木学会北海道支部論文報告集, pp.591-594 (1991)
- 6) K.Ebie and S.Amano : The 2nd Proceedings of IAWQ/IWSA Joint Specialized Conference on Control of Organic Material by Coagulation and Floc Separation Processes in Geneva, Switzerland, p.41 (Sept.1992)
- 7) Wagner, E.G. and Hudson, H.E : Low Dosage High Rate Direct Filtration, Jour. AWWA, Vol.74, pp.256-261 (1982)
- 8) W. R. Hutchison : High-Rate Direct Filtration, Jour. AWWA, Vol.68, pp.292-298 (1976)
- 9) Narkis, N. and Rebhun, M : The Mechanism of Flocculation Processes in the Presence of Humic Substances, Jour. AWWA, Vol.65, pp.101-108 (1975)