

PAC・鉄系凝集剤を併用した pH 調整及び凝集沈澱による
濁質の処理性改善に関する基礎的検討

Basic Study on Improving the Treatability of Suspended Particles through pH-Adjustment
and Coagulation & Sedimentation with Both PACI and Fe-based Coagulants

北見工業大学工学部 フェロー 海老江 邦 雄 (Ebie Kunio)
同 上 ○学生員 安 藤 直 哉 (Naoya Ando)
同 上 学生員 田 村 繁 生 (Tamura Shigeo)
同 上 川 口 倫 由 (Kawaguchi Toshiyuki)
同 上 学生員 木 村 大 介 (Daisuke Kimura)

1 ま え が き

我が国が水道用水源に使用しているダム湖水や表流水は、主に非点源汚染の影響による窒素リンなどの濃度が高い場合が多い。そのような水源では、水温が高い夏から初冬にかけての晴天時には河床付着生物の活動に起因して、ときには pH が 9.5 を超えるほど異常に上昇し、それが濁質やフミン質などの適正な凝集沈澱処理にとって大きな障害となっている。

そうした pH 上昇時の対策としては、硫酸注入、炭酸ガス注入、強制曝気などの採用がオーソドックスと考えるが、多くの浄水場では凝集剤そのものが比較的強い酸性を示すことを利用して、またその方法が簡便であることから、凝集剤のみを多量注入して凝集の最適 pH への調整と濁質処理などとを同時に行う方法が多用されている。

しかしながら、我々が指摘しているように、我が国の急速混和槽における凝集剤注入後の攪拌強度及び継続時間は凝集剤にとって大幅に不足している。それゆえ、上述した凝集剤の多量注入による急速混和を行うと、沈澱処理水の STR 上昇を招き、それがろ過池損失水頭の急上昇による頻繁なる層洗浄、水道利用者の健康影響との関連が懸念されているアルミニウムのろ過水中への流出などにつながっている。

我々は、原水 pH の異常上昇対策として、酸による pH 調整が一番分かり易いと考えているが、水道利用者は浄水処理に硫酸などの薬品を投入することに対して、また水道事業者は取り扱い上の問題などから、必ずしも好意的でない。そうしたことから、何らかの代替方法を探索することが必要となっている。

本論では、pH 調整剤・凝集剤として 2 種類、即ち、ポリ塩化アルミニウム（以下、PAC と書く）及びポリシリカ鉄凝集剤（以下、PSI-025 などと書く）を併用して機

能させる方法が、PAC 単独の多量注入よりも有効であることを、三種類の濁質添加の模擬原水などを用いて基礎的に検討したものである。PAC と併用する PSI は、PAC よりもフミン質などの溶解性有機物処理に優れていることから、そうした原水を対象とする処理実験については、別個に検討しなければならないと考えている。

2 実 験

2. 1 実 験 装 置

実験には、写真 1 に掲げる回分式の凝集沈澱装置を用いた。同装置は、容量 8ℓ の矩形水槽（縦 200mm×横 20mm×高さ 300mm）と攪拌機（10～800rpm に設定可能、3 段の攪拌翼（1 段あたり 6 枚のブレード）とから成っている。最大の特徴は、通常のジャーテスターでは出すことができない大きな攪拌強度（最大 G 値 3,900s⁻¹ 程度）のもとで実験できる点にある。本論における G 値の算出においては、次の式 (1) を用いた。

$$G = \{C \cdot A \cdot v^3 / (2 \cdot \gamma \cdot V)\}^{0.5} \cdots \cdots (1)$$

ここで、C: 攪拌係数 (1.5 を採用)、A: 攪拌翼の面積 (m²)、v: 攪拌翼の周辺速度 (m/s)、γ: 動粘性係数 (m²/s)、V: 攪拌槽容量 (m³) を表わす。

2. 2 実験条件及び実験方法

表 1 に示す北見工業大学水道水（深井戸水、予め水温 20℃ に調整）を、1N-NaOH で pH9.00 に調整の後、表 2 の粒径分布を持つカオリン 5 mg/ℓ を加えて実験用原水とした。

表 1 北見工業大学水道水水質（深井戸水）

項 目	測定値
pH	(-)
濁度	(mg/ℓ)
電気伝導度	(μ S/cm)
アルカリ度	(mg/ℓ)
硬度	(mg/ℓ)
蒸発残留物	(mg/ℓ)
塩素イオン	(mg/ℓ)
KMnO ₄ 消費量	(mg/ℓ)
全鉄	(mg/ℓ)
マンガン	(mg/ℓ)

表 2 カオリン懸濁水 1mg/ℓ 中の粒子数

粒子径 (μ m)	個数 (個/ml)	割合 (%)
1～3	20,583	76.73
3～7	5,288	19.71
7～10	684	2.55
10～15	237	0.88
15～20	21	0.08
20～30	10	0.04
30～	3	0.01



写真 1 凝集沈澱実験装置

その原水に PAC、塩化第二鉄(以下 FeCl_3)、及び PSI-025、-050 及び-100 (Si に対する Fe のモル比が 0.25、0.50 及び 1) をそれぞれ所定量注入した。また、攪拌条件としては、浄水場で一般に採用される急速攪拌 (G_R 値 150s^{-1} 、 T_R 値 2min)、緩速攪拌 (G_S 値 20s^{-1} 、 T_S 値 20min)を採用した。その後、20min 間の沈澱の後、上澄水の濁度については濁度・色度計 (日本電色工業製、WA2000N)で、吸引時間比 STR(Suction Time Ratio)(無次元)については、写真2に示すように、直径 47mm のメンブランフィルター



写真2 吸引ろ過装置

(平均孔径 0.45 μm 、多孔度 78%、ADVANTEC 製)を吸引ろ過装置(減圧容器、減圧用フィルターホルダー、吸引ポンプ、到達真空度: 26.7kPa)に装着して、試料水 500ml及び同量の蒸留水の吸引時間を測定し、それらの比から STR の値を算出した。なお、STR とは沈澱処理水が含む凝集剤残留量及びろ過池損失水頭との相関が高く、我々は凝集沈澱の処理性指標として採用すべきことを提唱している。更に、pH 滴定曲線の測定にあたっては、0.1N-HCl 及び 0.1N-NaOH を使用した。

し、それらの比から STR の値を算出した。なお、STR とは沈澱処理水が含む凝集剤残留量及びろ過池損失水頭との相関が高く、我々は凝集沈澱の処理性指標として採用すべきことを提唱している。更に、pH 滴定曲線の測定にあたっては、0.1N-HCl 及び 0.1N-NaOH を使用した。

3 実験の結果及び考察

3.1 原水が持っている pH 緩衝能の測定

図1は、(1)本学水道水、(2)北見市広郷浄水場原水、(3)北見市留辺蘂浄水場原水、及び(4)厚岸町浄水場原水のpH滴定曲線である。また、表3は、それらpH滴定曲線の領域A～Eにおける傾き(pH/ml)、即ち、緩衝能の大小についてまとめたものである。

それらを見ると、いずれの原水においても、pH4 以下及び pH9 以上で勾配は小さく緩衝能が大きい。それに対し、pH7～9 における滴定曲線の傾きは非常に大きく、その間における緩衝能は極端に小さい。したがって、富栄養化水域では短時間の生物活動によって簡単に pH が大幅に上昇してしまうことが分かる。しかしながら、原水(2)及び(3)の pH7～9 間におけるように、緩衝能が極めて小さいものから、原水(1)では pH5.5～6.5 辺り、(2)では pH6～7 辺りにおけるように、緩衝能が幾分大きい領域までである。そうした各曲線の勾配の僅かな大小は、水源水域における pH 上昇の程度に深く関わるであろう。すなわち、例えば、pH 滴定曲線の勾配が大きい場合には、原水 pH が容易に上昇すると同時に、上昇分の pH を下げて適正な凝集を行う際に必要となる凝集剤量は僅かで済むが、勾配が小さい場合には、逆に、多くの凝集剤が必要になってしまう。

3.2 凝集剤注入に伴う原水pH低下及び凝集沈澱処理

凝集剤の原液が持つ原水pHの低下能を調べるために、図1で一番pH緩衝能が大きかった原水(1)を用いて次の

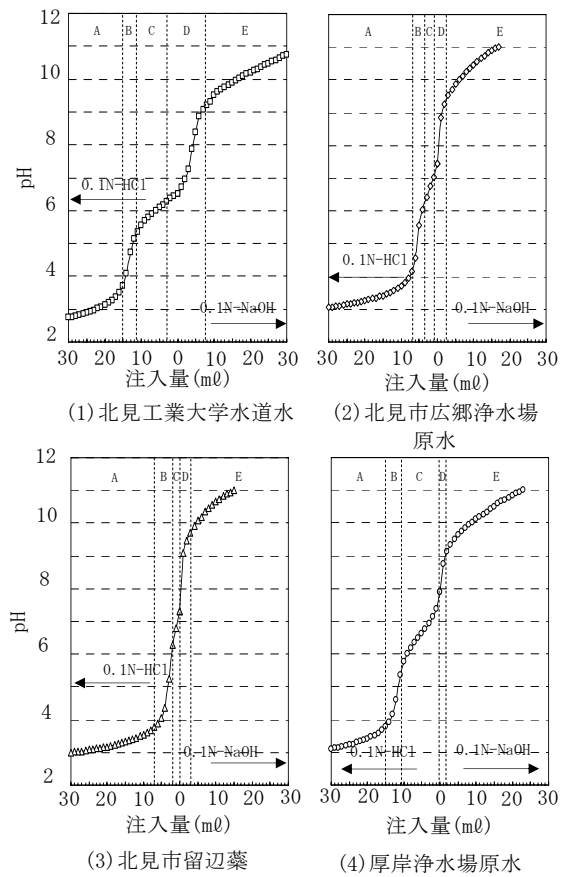


図1 pH 滴定曲線

表3 pH 領域別の滴定曲線の傾き (pH/ml) ($\times 10^{-2}$)

原水	区 間				
	A	B	C	D	E
(1)	4.9 2.7～3.4	34.2 3.9～5.2	12.7 5.2～6.9	41.3 6.9～9.1	6.9 9.1～11.0
(2)	4.2 3.1～4.0	55.8 4.0～5.8	36.0 5.8～7.4	85.4 7.4～9.3	11.6 9.3～11.0
(3)	3.6 3.0～3.8	56.7 3.8～6.3	40.4 6.3～7.3	85.9 7.3～9.6	11.1 9.6～11.0
(4)	4.9 3.1～3.9	42.9 3.8～5.8	17.4 5.8～7.2	46.5 7.2～9.3	8.5 9.3～11.0

注) 二段目の数値は、pH 領域を表す。

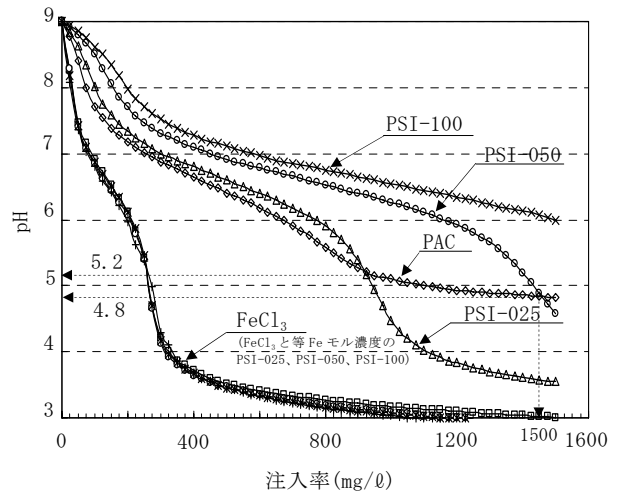


図2 凝集剤の注入に伴う原水の pH 推移曲線

実験を行った。即ち、その1ℓをpH9.0に上昇させた後、表4に掲げるpHを持つ凝集剤原液を25mℓ/ℓ刻みで注入してpHを低下させた。図2はそれらの実験結果を示している。同図から、PAC及びPSI-025によるpH低下傾向は、pH9.0からpH5.2付近まで非常に類似している。それに対し、PSI-050、-100を使用した場合には、注入率の上昇に伴うpH低下幅がモル比の大きなPSIの場合ほどPACよりも小さい。

表4 蒸留水で100に倍希釈した凝集剤原液のpH値

凝集剤	PAC	FeCl ₃	PSI-025	PSI-050	PSI-100
pH	4.4	2.3	2.6	2.7	2.8

注) 凝集剤は1g/100mℓに蒸留水で希釈し測定した(蒸留水のpHはpH5.50)。

表5 目標のpH達成に要した注入率と処理性

目標 pH	凝集剤	注入率 (mg/ℓ)	濁度 (mg/ℓ)	STR (-)
7.0	PAC	220	0.09	3.4
	FeCl ₃	80	0.39	3.6
	PSI-025	280	0.50	5.7
	PSI-050	450	0.82	14.2
	PSI-100	520	3.98	102.2
6.5	PAC	400	0.07	2.6
	FeCl ₃	150	0.39	2.8
	PSI-025	470	0.41	3.4
	PSI-050	680	0.60	5.2
	PSI-100	830	2.52	19.6
6.0	PAC	600	0.05	4.0
	FeCl ₃	200	0.38	2.6
	PSI-025	640	0.31	3.3
	PSI-050	980	0.37	3.8
	PSI-100	1210	1.05	5.3

そのことは、それらがPACよりもpH低下能が小さいことを意味する。しかしながら、PSI-025、-050及び-100の注入量をFeの注入量に換算してプロットすると、FeCl₃の場合を含めて、全てのpH滴定曲線は重なって推移した。図2中の左下の滴定曲線群がそれである。

表5は、カオリン濁度5mg/ℓ及びpH9.0に調整した原水(1)を凝集剤のみで目標のpH7.0、6.5及び6.0に低下させた後、凝集沈澱処理した結果である。同表から、PACではpH6.5において、鉄系の凝集剤の場合にはpH6.0で、凝集沈澱処理水の濁度及びSTRが低くなっている。しかしながら、こうした凝集剤のみの方法では注入率が高過ぎとなり、大量の汚泥発生につながる。また、PSI-050、-100の場合には、pH7.0におけるSTRが14.2及び102.2と著しく大きくなる点が問題である。

3.3 pH緩衝能が大きい原水のpH上昇時における処理

図1及び表3の(1)及び(4)のように、pH緩衝能が大きい原水の処理性改善実験を行った。表6は、PACのみを用いた凝集沈澱実験で、目標の処理水濁度0.5mg/ℓを達成したときのPAC注入率、処理水のSTR及びpHを示している。それらの実験のように、原水のpHが高く緩衝能が大きい場合には必要なPAC注入量は多く、それに伴って処理水のSTRは9.9と高くなった。

そこで、目標の濁度0.5mg/ℓを達成すると同時にSTR

表6 処理水濁度0.5mg/ℓを達成するに要したPAC注入率と処理水水質

凝集剤	注入率 (mg/ℓ)	濁度 (mg/ℓ)	STR (-)	pH
PAC	50	0.49	9.9	8.1

表7 処理水濁度0.5mg/ℓを達成するに要したPAC注入率と処理水水質

1N-HCl (mℓ)	PAC (mg/ℓ)	濁度 (mg/ℓ)	STR (-)	pH
1.5	40	0.46	6.2	7.6
4.5	30	0.46	4.1	7.0

表8 PAC30mg/ℓ(固定)のもとでPSI-025注入率を変化させた場合における処理水水質

PSI-025 (mg/ℓ)	濁度 (mg/ℓ)	STR (-)	pH
0	2.55	11.6	8.4
10	1.52 40.0	9.9 15.0	8.3
20	0.96 62.3	8.7 25.3	8.1
30	0.78 69.3	8.3 28.3	8.0
40	0.70 72.7	8.5 26.6	7.9
50	0.64 74.9	8.5 26.9	7.9

注) 二段目の数値は、PSI-025 0mg/ℓ(PAC単独注入率30mg/ℓ)を基準としたそれぞれの測定項目の改善率(%)。

表9 PAC20mg/ℓ(固定)においてPSI-025注入率変化による処理水水質

1N-HCl (mℓ)	PSI-025 (mg/ℓ)	濁度 (mg/ℓ)	STR (-)	pH
1.5	0	3.07	9.0	8.0
	10	3.07 14.1	10.7 -18.4	8.0
	20	1.89 47.1	9.1 -1.3	7.9
	30	1.08 69.8	8.1 9.9	7.9
	40	0.69 80.7	7.5 16.9	7.8
	50	0.46 87.1	5.9 34.4	7.5
4.5	0	2.50	5.6	7.1
	10	1.56 37.6	5.2 7.5	7.0
	20	0.76 69.6	4.3 24.6	6.94
	30	0.53 78.6	4.2 25.0	6.9
	40	0.47 81.0	4.2 25.2	6.9
	50	0.42 83.3	4.1 26.5	6.9

注) 二段目の数値は、PSI-025 0mg/ℓ(PAC単独注入20mg/ℓのみ)を基準としたそれぞれの各水質の項目の改善率(%)。

をも低下させるために、原水に1N-HClを1.5mℓ及び4.5mℓ注入してpHを下げた後に凝集沈澱処理を行った。その結果を表7で見ると、pHが最適の6.5に近づくにつれて、必要なPAC注入率が低下すると同時にSTRも低下している。

ついで、PAC注入率を下げる目的で、1N-HClの代わりにPSI-025を用いてpHを低下させる実験を行なった。表8はPAC注入率を30mg/ℓに固定して、PSI-025注入率を上昇させた際の処理結果である。濁度及びSTRは、PSI-025注入率の上昇に伴って低下したが、PSI-025注入率50mg/ℓの場合にも、処理水の濁度は0.64mg/ℓと目標値を超えており、STRもいまだ8.5と高い。そのような結果となった理由は、原水のpH緩衝能が大きく、処理水pHが最適化されていなかったためである。

そこで、1N-HClを1.5mℓ及び4.5mℓ注入して原水のpHをある程度下げた後に、PAC注入率を前述の実験よりも低い20mg/ℓに下げ、同時注入するPSI-025の注入率を上昇させて処理した結果を表9に掲げた。このように、pHを最適凝集域に近づけるにつれて、目標の処理水濁度達成に必要なPAC及びPSI-025注入率は低下し、同時にSTRをも低く抑える。

以上のように、pH緩衝能が大きい高pH原水の場合には、凝集剤注入率を下げるために、補助的に酸注入を考えるべきである。その後に、PSI-025との併用によってPAC注入率の抑制を図り、アルミニウム濃度の低下や凝集沈澱の処理性を改善すべきであろう。

3.3 pH緩衝能が小さい原水のpH上昇時における処理

原水(1)とpH緩衝能がほぼ皆無の蒸留水とを1:1(原水a)及び1:3(原水b)に混合させてpH緩衝能が小さい2種類の原水を模擬的に調整した。それらを用いて、図1及び表3の原水(2)及び(3)のように、pH緩衝能が小さい原水の処理性を検討した。なお、表10は、それら模擬原水のpH滴定曲線における各領域の勾配を示している。また、表11は、PACのみを用いた凝集沈澱実験で目標の処理水濁度を達成したPAC注入率とその注入率におけるSTR及びpHとである。必要なPACの注入率は、原水aでは40mg/ℓ、原水bでは30mg/ℓとなり、無希釈の原水(1)の場合に必要な50mg/ℓよりも低下した。

表10 pH領域別の滴定曲線の傾き(pH/mℓ)($\times 10^{-2}$)

原水	区間				
	A	B	C	D	E
a	2.6 3.0~3.5	58.3 3.5~5.4	24.3 5.4~6.6	61.7 6.6~9.1	7.8 9.1~11.0
b	3.7 2.9~3.9	62.9 3.9~5.8	42.9 5.8~6.5	70.3 6.5~9.7	6.5 9.7~11.4

注) 二段目の数値は、pH領域を表す。

表11 処理水濁度0.5mg/ℓを達成するに要したPAC注入率と処理水水質

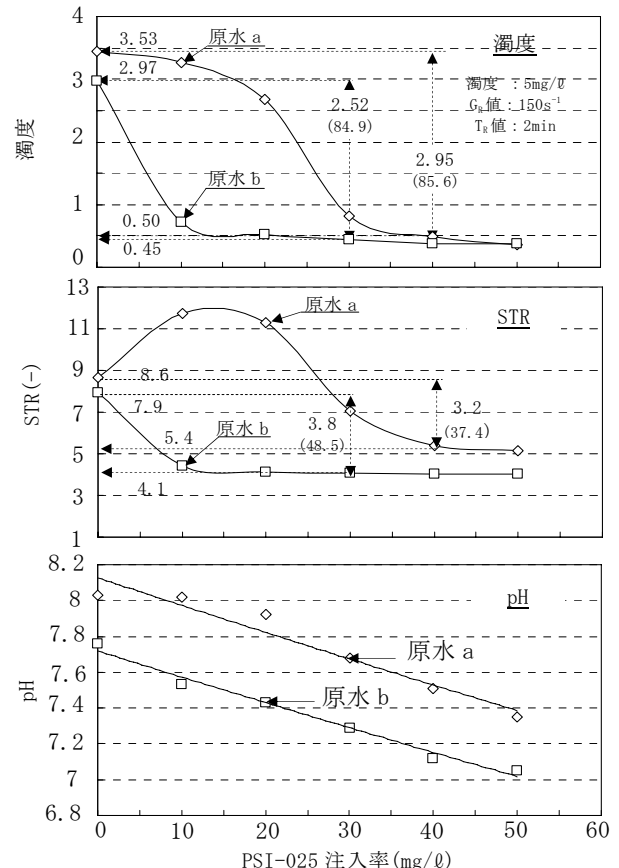
原水	PAC (mg/ℓ)	濁度 (mg/ℓ)	STR (-)	pH
a	40	0.31	5.1	7.6
b	30	0.45	4.1	7.3

つぎに、PAC注入率を20mg/ℓに固定し、同時にPSI-025を注入した場合の処理水濁度などの処理状況を図3に掲げた。処理水の濁度は、いずれの原水の場合にもPSI-025注入率の上昇に伴って低下している。目標の処理水濁度を達成するために必要なPSI-025の注入率は、原水aの場合には40mg/ℓ原水bの場合には30mg/ℓとなり、無希釈原水(1)の場合より注入率は低下している。また、それらのPSI-025注入率を採用した場合のSTRは、原水aでは5.4、原水bでは4.1となり、表11に示すPAC単独注入時のSTRと同程度にまで低下した。

このように、pH緩衝能が小さい原水が高pHになっている場合には、酸を使用せずにPACとPSI-025とを併用するだけで、低いPAC注入率で凝集沈澱の処理性を高めることができる。

4 ま と め

藻類などの河床付着生物の活動に起因してpHが上昇した原水を処理するには、最初に、その原水のpH滴定曲



注) カッコ内はPSI-025の0mg/ℓ(PAC単独注入率20mg/ℓ)を基準とした改善率(%)。

図3 PSI-025注入率の上昇に伴う処理性

線から、pH緩衝能の大きさ、緩衝能が大きなpH領域などの特性を把握しておくことが大切である。また、調整に必要なpH領域における緩衝能が小さい原水の場合には、PACとPSI-025とを併用するだけで、pH調整とともに低いPAC注入率のもとで良好な凝集沈澱処理を行うことができる。それに対し、調整に必要なpH領域で緩衝能が大きい原水の場合には、凝集剤注入率が高くなり、特にSTRの低下困難、汚泥の大量発生につながるの、必要最小限の酸によるpH調整の後、PACとPSI-025とを併用すれば、低いPAC注入率のもとで十分満足できる凝集沈澱処理を行うことができる。

今回の報告は、回分式実験結果のみであったが、施設への適用に際しては、連続流式の実験装置による実証実験を、また、フミン質を含む原水についても、行うことが必要であろう。

《 文 献 》

- 1) K. Ebie, N. Yamada, I. H. Jang, T. Kawaguchi, S. Higuchi: Improving Particle Separation Efficiency in Direct Filtration of Low Turbidity source Water, Proceedings of X III IWA-ASPAC Regional Conference in Cebu, Philippines, pp. 329-336 (2003.10.)
- 2) 海老江 邦雄・東 義洋: 鉄系凝集剤による濁質処理の効率化に関する基礎的研究、水道協会雑誌、第826号、pp. 2-13、2003.7.
- 3) K. Ebie and Y. Azuma: Reducing turbidity and coagulant residue in treated water through optimization of rapid mix conditions, Water Science and Technology: Water Supply, Vol. 2, No. 5-6, pp. 103-110, IWA-Publishing, 2002.
- 4) 浄水技術ガイドライン2000: 水道技術センター
- 5) 丹保 憲仁: 水処理における凝集機構の基礎的研究(I)~(IV)、水道協会雑誌、第361号、第363号、第365号、第367号、昭和39.10.、昭和39.12.、昭和40.2.、昭和40.4.
- 6) 丹保 憲仁・有賀 卓・庵谷 晃: 冬季の藻類活動による河川水pHの変動-大雪山麓の忠別川における高pHの出現-、水道協会雑誌、第602号、pp. 20~28、1984.