

急速ろ過層の洗浄時における抑留物質の挙動について

北見大工学部 正会員 海老江 邦雄

1. まえがき

急速ろ過池の運転サイクルは、④原水に含まれる懸濁物質のろ過過程と、②閉塞したろ層を再生するための洗浄過程とから成る。急速ろ過池を合理的に設計・操作するためにはこれらの両過程を十分に理解することが大切であるが、ここでは、洗浄過程に焦点を絞って述べる。さらに、ろ層の洗浄では表面洗浄（固定式または回転式）と逆流洗浄の併用が一般的であるが、後の実験結果からも明らかとなるように、洗浄本来の機能の観点から判断して主役と考えられる逆流洗浄のみの場合について述べることにする。

急速ろ過池の洗浄については、既に、翼¹⁾をはじめ、寺島²⁾、平賀³⁾、藤田⁴⁾、Baylis⁵⁾、Camp⁶⁾らによる多数の研究が報告されている。しかしながら、これらの諸文献を検討したところ、例えば、“水流のせん断力”が卓越するという説と“ろ材相互の衝突摩擦力”が卓越するという説が併存しているなど、洗浄機構の最も基本的部分についてすらいまだ統一の見解を欠いている状況にあることを知った。

ここでは、洗浄過程に新しくろ過の場合と同様の2段階説を適用し、さらに、従来の解析で用いられなかったろ層の微視的観察結果を加味することにより、洗浄機構をより良く解明することを目的とする。

2. 2段階説の適用と各段階の作用因子

懸濁物質のろ過過程は、図-1に示すO'Melia & Crappsにより提唱された輸送段階と付着段階とからなる2段階説で説明されている。筆者はこの2段階説を前提としてろ過過程における懸濁物質の微視的な諸挙動を解析することにより、その有効性を実証してきた。懸濁（抑留）物質の挙動がろ過過程と全く逆となる洗浄過程に対しても、図-1に示すように、基本的には同種の2段階説の適用が可能である。その場合、ろ過過程では第1段目が輸送段階、第2段目が付着段階であるのに対し、洗浄過程の第1段目はろ材表面から抑留物質を引き離す剝離段階であり、第2段目は空隙水中に舞い戻った懸濁物質を流動層外に運び出す輸送段階ということになる。

洗浄過程の剝離段階における作用因子は、^{よこ}外的因子として、従来、単に洗浄の要因としてのみ扱われてきた“水流のせん断力”と“ろ材相互の衝突摩擦力”が、また、内的因子としてろ材表面に対する抑留物質の付着力が考えられる。剝離の発生がこれら外的因子と内的因子の相対的な力関係に依存していることは論をまたない。これら個々の作用力を定量的に評価することが最もオーソドックスな方法であろうが現在のところ不可能である。しかしながら、外的因子が内的因子より大きいことは、洗浄終了時に残留する抑留物質量が後述するように微量であることから明らかである。したがって、最も重要なことは外的因子のどちらが卓越しているかといった相対的なウェイトの評価であろう。

輸送段階の因子としては、“空隙内上昇流速・懸濁物質の沉降速度比”と“流動層の単位空隙径・懸濁物質径比”とが考えられる。しかしながら、通常採用される逆流条件の範囲におけるこれらの値は1より相当大きくなることが予想され、一部の懸濁粒子を除き殆ど障害とならないようである。輸送段階で考慮すべきは、流動層に固有の循環運動に由来する懸濁物質の内部持ち込みであろう。

洗浄過程を以上のように総体として把握した上で、問題点解明のために次に述べる実験を行なった。

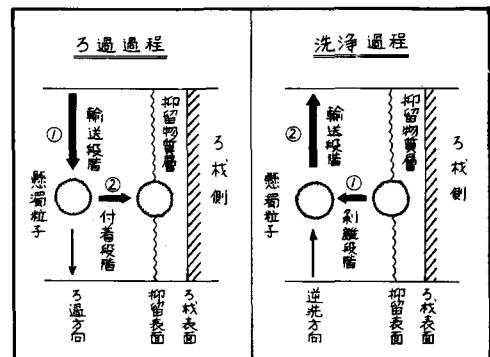


図-1 2段階モデル

3. 実験装置と実験条件

今回の実験では、図-2と3に示す直接ろ過法採用の2種類の小型ろ過装置を使用した。

このうち、図-2の装置は主として実体顕微鏡を通した洗浄時の抑留物質のマクロな挙動の確認や剝離段階の卓越因子評価のための剝離流出量の定量に、また、図-3の装置は洗浄開始後の経時の抑留物質質量分布といった洗浄過程のマクロな検討用資料の収集に用いられた。実験の諸条件については右の表-

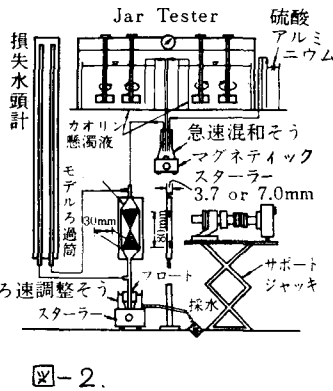


図-2.

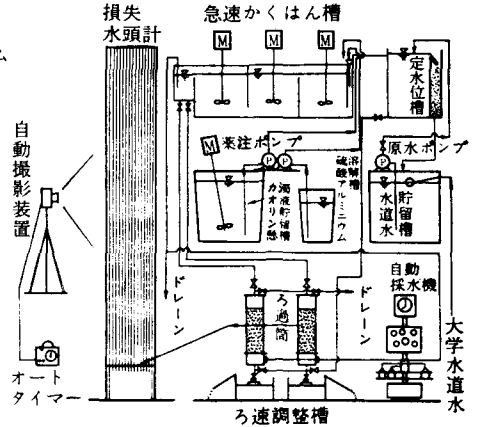


図-3.

表-1 1に掲げた通りである。

4. 実験および結果と考察

4-1. 剝離段階の卓越因子

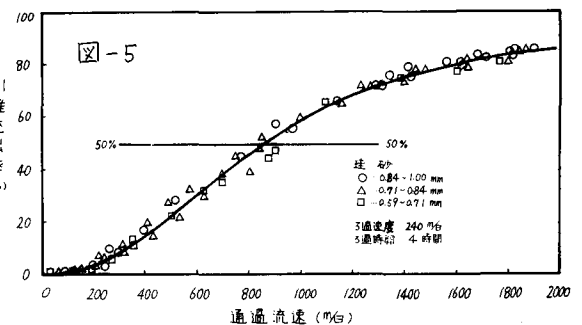
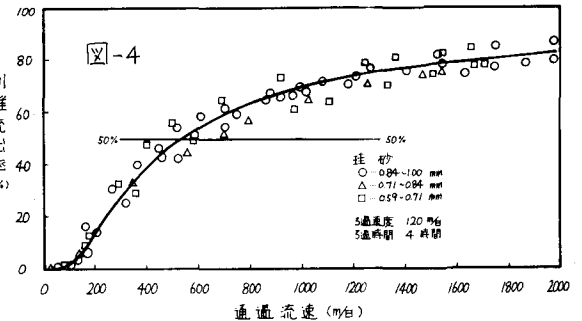
逆流洗浄中の流動層では“水流のせん断力”と“ろ材相互の衝突摩擦力”の両因子が抑留物質の剝離に同時に作用するため、どちらが卓越するかを判定することはできない。しかしながら、流動層内の水流のせん断力は固定層における等空隙内流のせん断力にほぼ等しいと考えられるから、流動層と固定層との間で相互に等価の水流条件に変換できるよう資料を用意しておけば、“ろ材相互の衝突摩擦力”の作用しない固定層の“水流のせん断力”の効果を流動層の場合に変換して評価することが可能となる。

図-4と5は、図-2の装置による4時間のろ過終了後、固定層のまま5分間ごとに次第に高速となるようにろ層に清浄水を通過させ、その際の剝離流出量をもとに描いた剝離流出率・通過流速（空筒速度）曲線である（ここでは、輸送段階の影響を排除するために、観察による剝離懸濁物質の流出時間（30~60秒）に対して十分長い時間をとっている）。

さて、任意の通過流速 V （図-4と5の横軸）に対する空隙内流速 v は、剝離流出量定量時の損失水頭 H 、別途に測定した清浄ろ層の損失水頭 H_0 、および既知の初期空隙率 $P_0 = 44\%$ を(1)式に代入して ϕ （ろ層の単位体積中にある抑留物質の体積）を求めると、 $v = V / (P_0 - \phi)$ で与えられる。

表-1

	図-3の装置	図-2の装置
ろ過筒	前面のみ透明アクリル板、残りの部分はステンレス。寸法：幅 30° ×奥行 7° ×長さ 1° mm	透明アクリル板製。寸法：幅 30° ×奥行 8° ×長さ 200° mm
ろ材とろ層	珪砂2種を厚さ 60° mm（空隙率44%）に充填	珪砂3種とガラス玉を厚さ 80° mm（空隙率44%）に充填。ガラス玉と珪砂の単層
ろ速調整槽	水道水にカオリン 20° mgと硫酸アルミニウム 6.54 または 19.62° mgを加えて急速混和したもの	水道水にカオリン 40° mgと硫酸アルミニウム 40° mgを加えて急速混和したもの
ろ速とろ過時間	240° mg、18時間	120° mg、 240° mg、4時間
洗浄に用いた実験	移動率25%で逆流洗浄、ろ層内抑留物質質量分布の測定	通過流速の上昇による剝離流出量の定量、実体顕微鏡による層内の拡大観察



$$\frac{H}{H_0} = \frac{(1-P_0+0)^2}{(1-P_0)^2} \cdot \frac{P_0^3}{(P_0-0)^3} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{0}{3(1-P_0)} + \frac{1}{4}} + \frac{0}{3(1-P_0)} + \frac{1}{2}\right)} \quad (1) \text{式}$$

一方、流動層の空隙内流速は、任意の膨張率について、図-6から得られる。表-2は、以上の図・式を用いて、水道施設基準書に掲げられている最適逆洗条件（膨張率30%）における“水流のせん断力”のみによる剝離流出率である。

表-2から、標準ろ速（120%）でろ過された抑留物質については、直ちに“水流のせん断力”が卓越すると判断できよう。それに対して、ろ速240%でろ過された抑留物質については、高ろ速によって抑留物質が密実となりせん断抵抗が大きくなったためか、ろ径径の小さい方では剝離流出率が50%に達せず、直ちに卓越因子を定めることはできない。しかしながら、写真-1でも認められるように、高い通過流速後に残留する抑留物質は主として隣接ろ径の接点部や特定の空隙を閉塞する状態で存在している。それらの多くは単にろ層が流動化しさえすれば容易に剝離流出すると考えられ、“水流のせん断力”の実際の効果は表-2の値より大幅に大きくなると推測される。

以上のことから、ろ速120~240%では、剝離段階の卓越因子は“水流のせん断力”であると結論づけられよう。

4-2. 水流のせん断力による剝離時間と

ろ径相互の衝突摩擦に関わる抑留物質質量

図-2に見られるろ過筒の断面中央部に、円断面のガラス棒および流れの上流面に珪砂とガラス玉を接着させたガラス

棒をそれぞれ水平に据え付け、4時間ろ過の直後に逆洗時空隙内流速に相当する高流速で清浄水を通過させて観察してみた。結果の一部を写真-2へ5に示す。これらの写真からも、先の実験結果と同様に“水流のせん断力”が卓越する状況が認められよう。剝離時間に関しては、通過流速の上昇とともに、瞬間的に最終剝離量の殆んどが剝離することが認められ、固定層の場合と同様であった。通過流速を固定して時間の経過に伴う観察を続けていても、不安定な付着状態の抑留物質が間欠的に顕微鏡視野から流出するのみで、その量は極めて微量であった。このことは、逆洗時においても、水流条件が設定されれば、瞬間的に抑留物質の剝離が終了して平衡状態

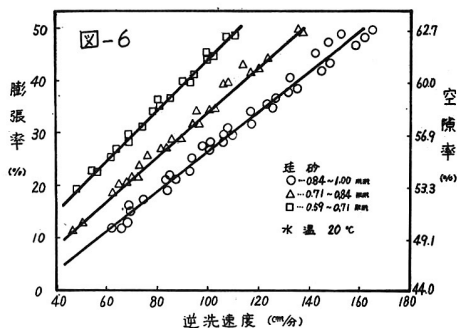


表-2		剝離流出率(%)	
珪砂(mm)	30%膨張時 逆洗速度 (cm/min)	空隙内流速 U (cm/min)	剝離流出率(%)
0.059~0.071	70.0	123.0	60
0.071~0.084	89.5	157.3	67
0.084~1.00	107.5	188.9	73

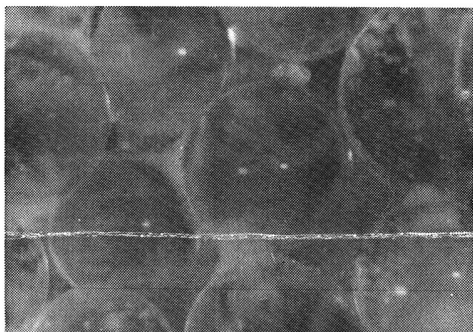


写真-1 通過流速2060%後の状態

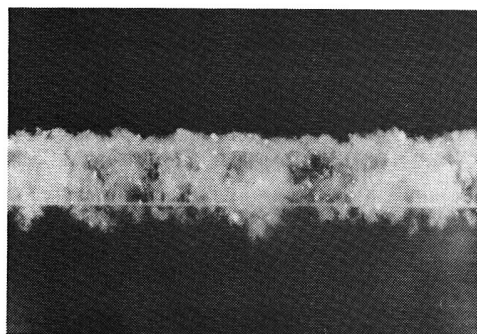


写真-2. ろ過4時間

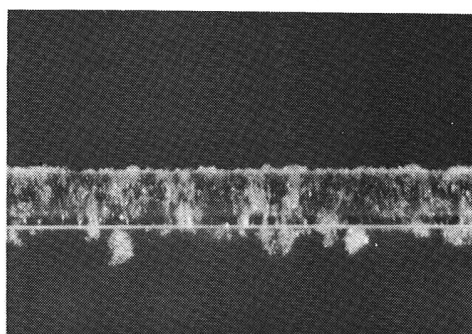


写真-3. 写真-2直後100%の通過流速

になることを示唆している。

さて、写真-3と5で見られる水流のせん断剥離後のろ枚上に残留する抑留物質は、大雑把に、逆流洗浄中に“ろ枚相互の衝突摩擦力”によって剥離される量と考えて支障なからう。このことは、逆洗終了後にろ層に残る抑留物質量が後述の実験結果からも分かるように、極微量であることからも理解できる。また、通過速度が速い（水流のせん断力の大きい）ほど残留量が減少するので（写真-5は3より少ない）、逆洗速度が上昇するほど洗浄過程における“ろ枚相互の衝突摩擦力”のウェイトは量的に減少することが予測される。しかしながら、逆洗速度を非常に高く維持したとしても、層流底層内で、しかも、ろ枚表面に直接堅固に付着する抑留物質までを“水流のせん断力”で剥離することは、実際問題として不可能であろう。洗浄終了後のろ層の清浄度を高めるといった意味で、“ろ枚相互の衝突摩擦力”の役割は重要であると考えらるべきである。

4-3. 洗浄の過程とその機構

図-7と8は、図-3の装置による18時間ろ過後と洗浄に伴うろ層内抑留物質の分布を、また、図-9と10は、図-7と8などをもとにろ層内抑留物質の残留率Rの推移を示している。従来、洗浄過程はトラフより流出する洗浄排水濁度の減衰傾向をもとに検討されてきたが、そうした方法では流動層表面とトラフ先端間にある水塊と流動層から流出してきた洗浄排水との混合が起り、実際の現象と測定値間にズレが避けられなかった。しかし、今回の方法では抑留物質の流出過程そのものを把握し得たと考えている。

図-9と10の4本の残留率曲線は、いずれも片対数グラフ上でほぼ直線となる特徴的な2部分を持っている。その1つは、洗浄過程の前半に認められる急速減衰部であり、他の1つは、後半に認められる緩慢減衰部である。これらの中には、勾配の橋渡し部ともいえる遷移領域の存在が認められる。いま、これら2部分を分離する遷移点を便宜上次のようにして決定し、それより前を急速減衰期、また、後を緩慢減衰期と呼ぶこととする。すなわち、個々の曲線上の急速減衰部と緩慢減衰部の直線部分を両方から延長して交叉させ、

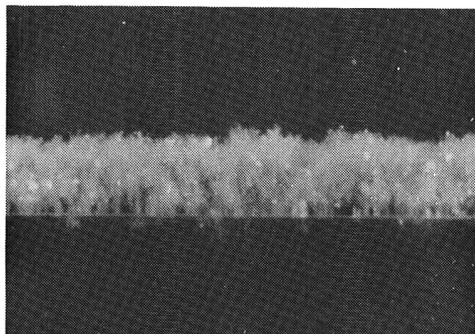


写真-4. ろ過4時間

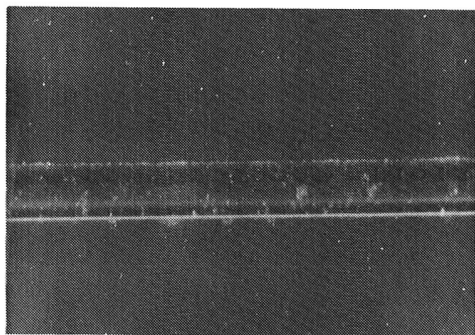
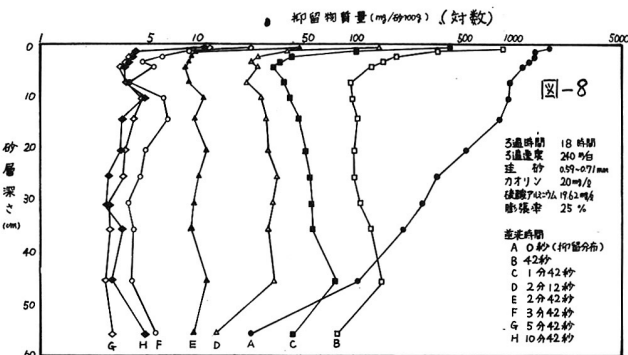
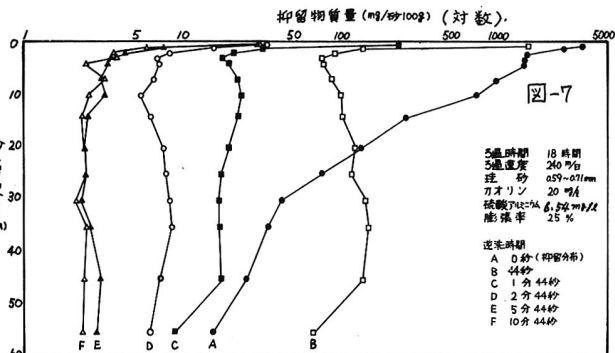


写真-5. 写真-4直後200%の通過流速



その交角の2等分線と残留率曲線との交点を遷移点と設定した。表-3は、各実験条件における残留率曲線の2時期の勾配K（関数 $R = 100 \times 10^{-Kt}$ ）を合てはめる。ただし、 R = 残留率、 t = 時間(分)、遷移点までの逆洗時間、および、遷移点における残留率を示している。

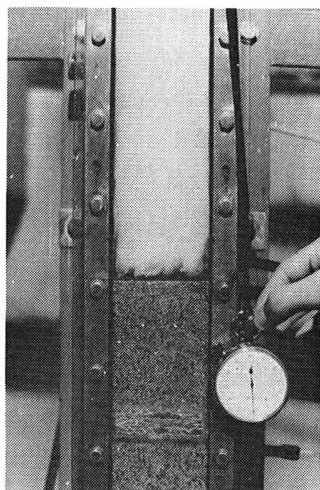
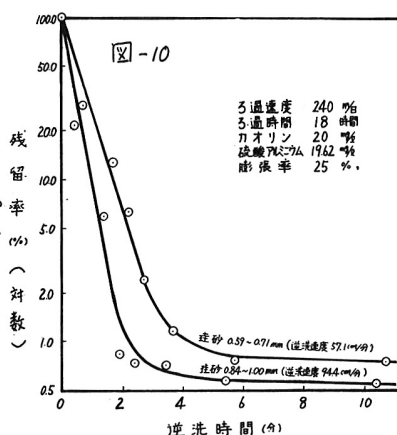
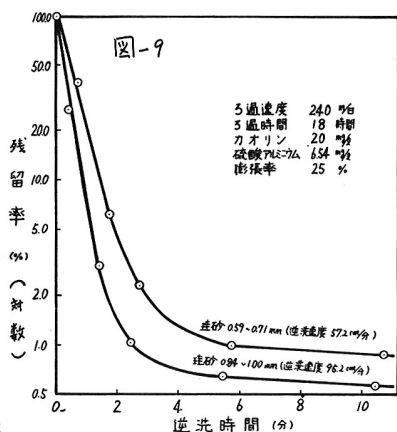
表-3	硫酸アルミニウム (mg/L)	勾配 K (1/分)		遷移点での 逆洗時間	遷移点における 残留率 (%)
		急速減衰期	緩慢減衰期		
0.84~1.00	19.62	9.95×10^{-1}	3.10×10^{-3}	2 : 40 秒	0.78
0.59~0.71	19.62	5.98×10^{-1}	4.46×10^{-3}	3 : 55	1.05
0.84~1.00	6.54	10.75×10^{-1}	1.16×10^{-2}	2 : 35	0.87
0.59~0.71	6.54	6.69×10^{-1}	1.03×10^{-2}	3 : 35	1.50

このような遷移点前後における残留率勾配の顕著な差異は、洗浄機構そのものの変化を示唆していると考えられる。さらに、流動層表面から流出する洗浄排水の肉眼観察からもこれに関連する現象が認められる。すなわち、洗浄開始から短時間（今回の25%膨張では30~60秒程度）見られる極めて高濁な排水の流出は、写真-6に示すように突然終了し、それまでと一線を画する低濁排水の流出に移行するからである。つぎに、これらの急速減衰期と緩慢減衰期について考察する。

(1) 急速減衰期-----表-3の遷移点の残留率から、洗浄の主たる時期であると言える。したがって、この時期の剥離段階の卓越因子は、洗浄全過程の剥離段階の卓越因子とも言えるが、4-1と4-2で述べた剥離流出量と剥離時間に関する結果が残留率曲線の急速減衰部の現象に一致していることから、“水流のせん断力”と考えられる。しかも、抑留物質の剥離の大部分が洗浄開始直後のろ層が所定の膨張率に達するまでの非定常時に起ることは、流動層表面で観察された高濁排水から低濁排水への急変（この時期における残留率は20~40%にすぎない）が大体この時間と一致していることから推測される。この非定常過程で剥離した抑留物質の大半は、輸送段階に移り、押し出し流れによって流出するのであろう。しかし、一部の懸濁物質は、その後急速に発達する流動層自身の循環運動によって内部に持ち込まれ、当初死領域であった部分から“水流のせん断力”によって剥離された懸濁物質や、徐々に“ろ材相互の衝突摩擦力”によって剥離された懸濁物質とともに流出することになる。この過程の流出が流動層の循環運動に大きく影響されている様子は、図-7と8で洗浄経過の抑留物質の分布がろ層の上部から下部へかけて、一様で、平行に左側に移動している様子からもうかがわれる。このように、流動層がほぼ一様濃度の懸濁物質を抱えながら片対数グラフ上で直線的に減少していることから、完全混合型モデルの流出で近似しようとする。

以上のことから、この時期は剥離段階では“水流のせん断力”が卓越し、写真-6 逆洗15分(膨張15%) 流動層の循環運動により、輸送段階が律速となった過程と考えられる。

(2) 緩慢減衰期-----この時期の当初に残留する1%前後（表-3）の抑留物質は、先の結果から推測して、層流底層にあってろ材表面と堅く結びついた、もはや“水流のせん断力”では剥離できない分量であろうと考えら



れる。したがって、抑留物質の剥離は“ろ材相互の衝突摩擦力”によって行われることとなり、残留率曲線が長い間徐々に減衰しているのは、この過程を表わしている。剥離段階の卓越因子は、完全に“ろ材相互の衝突摩擦力”に推移していると考えらるべきであろう。また、流動層の循環運動は急速減衰期と同様に起っているとはいえ、抑留物質の剥離に時間を要し、かつ、微量であることから、急速減衰期と異なり剥離段階が律速となってろ層の清浄化の仕上げを進行させているのであろう。

表-4. 残留アルミニウム(珪砂1kg当り)

ろ材の種類	使用珪砂のAl量(1)	未使用珪砂のAl量(2)	残留Al量(1)-(2)
本学実験用珪砂 0.59~0.71mm	7.9×10^{-3}	5.5×10^{-3}	2.4×10^{-3}
本学実験用珪砂 0.84~1.00mm	7.4×10^{-3}	3.4×10^{-3}	4.0×10^{-3}
北見市北浄水場ろ過砂 (有効径0.86mm 均等係数1.38)	9.3×10^{-3}	4.7×10^{-3}	4.6×10^{-3}

図-7~10の洗浄終了後に残留する抑留物質の平均値は、0.59~0.71mm珪砂で $2.3 \text{ mg}/100\text{g砂}$ 、0.84~1.00mm珪砂で $1.5 \text{ mg}/100\text{g砂}$ であった。そこで、これら抑留物質の残留状況を確認するため、洗浄終了後の珪砂を顕微鏡によって綿密に観察したところ、珪砂表面の凸部で認められなかったが、何ヶ所かの凹部の隅角部において確認することができた。先の平均値には、抑留物質量の測定の際にJar Testerに破壊された珪砂の微粒子が一部含まれていることは考えられる。しかしながら、かなり慎重に洗浄した後の珪砂にもろ過過程で付着した抑留物質が残留することは、表-4に示した凝集剤として加えた硫酸アルミニウム中のAl残留量の定量結果や、経験的に新ろ材よりも何回か使用したろ材のろ過効率の方が高いことから明らかである。これら洗浄後に残る抑留物質が、その量の多少によって、あるときは、後続のろ過効率の改善につながり、またあるときは、泥球生成の核となってろ過の弊害をひき起す原因となる。ろ過池の洗浄を、すなわち、緩慢減衰期をどこまで行なうかは、そうした操作上の要素を考慮して定めなければならない。

(表の値は、5回測定の前平均値である。)

5. あとがき

結果をまとめると次のようである。

- (1). 洗浄過程における懸濁物質の挙動に対し、剥離段階と輸送段階とからなる2段階説の適用を考えるべきである。
- (2). 洗浄全過程を通しての剥離段階の卓越因子は、剥離流出率の観点から水流のせん断力である。
- (3). 洗浄過程は、残留率の推移より見て急速減衰期と緩慢減衰期とに分離できる。
- (4). 急速減衰期の剥離段階の卓越因子は水流のせん断力であり、現象の律速となっているのは輸送段階である。
- (5). 緩慢減衰期の剥離段階の卓越因子はろ材相互の衝突摩擦力であり、現象の律速となっているのは剥離段階である。
- (6). 洗浄効率はろ材相互の衝突摩擦力の進行度合によって影響されると考えられる。

(参考文献)

- 1). 張 巖：急速ろ過槽の逆洗浄効果に関する研究 (I), (II), (III), 水道協会雑誌, 第314号, 第315号, 第316号。
- 2). 寺島 重雄：急速ろ過池におけるろ過砂の粒度および表面洗浄に関する研究 (北大, 工学学位論文) 1961.4.
- 3). 平賀 永井：急速ろ過池の洗浄効果について 水道協会雑誌, 第364号
- 4). 藤田 賢二：急速ろ過池における洗浄に関する諸元の水理学的考察 水道協会雑誌, 第455号
- 5). John R. Baylis: Nature and Effects of Filter Backwashing, J.A.W.W.A. Jan. 1959.
- 6). T.R. Camp: Backwashing of Granular Water Filters, Journal of Sa. En. Di., Proc. of the ASCE Dec. 1971.
- 7). 海老江 邦雄：急速ろ過層における抑留物質の挙動 (I), (II), (III), (IV) 水道協会雑誌, 第493号, 第498号, 第507号, 第508号。
- 8). 海老江 邦雄：急速ろ過層の逆流洗浄機構について, 第31回土木学会年講 (II) 1976.10.