

II-47

直接ろ過池における空気洗浄の効果に関する検討

北見工業大学 正会員 海老江 邦 雄
北見工業大学 学生員 飯 沼 真 治

1. ま え が き

直接ろ過池の洗浄法としては、逆洗を主洗浄、表洗または空洗を補助洗浄に設定した表洗・逆洗併用法、空洗・逆洗併用法などが一般に広く採用されてきた。本論で対象とする空洗は、連続注入される加圧空気に起因するろ層の攪乱を利用して抑留濁質を剝離排出する方法であり、巽¹⁾、Kawamura²⁾、橋原³⁾、Campら⁴⁾、Amirtharajah⁵⁾、Hewittら⁶⁾などによる研究がある。この洗浄法の特長として、(1) 強度が大きいのでろ層の清浄度を高めうる、(2) 洗浄排水量が少ないことなどが挙げられているが、空洗のメカニズムがいまだ明確になっていないこともあって、その効果に対する評価は必ずしも一定していない。

直接ろ過池を空洗すると、空気の圧入に伴い比較的高いピーク圧力(背圧)が瞬間的に発生し、濁質を高濃度に含んだ水をろ層上に押し上げる。しかしながら、15秒程度経過すると定常な微振動期への移行が観察される。本論では、空洗の本質と深く関わる「ピーク圧力」と「押し上げ水量」の動きならびに空洗による濁質排出はその初期の極めて短時間内に終了するという知見を含めた濁質排出の一般的傾向などについて報告したい。

2. 実験装置と実験条件

今回の実験は、(1) ピーク圧力、押し上げ水量の測定に関する実験、(2) 直接ろ過に続く空洗による濁質排出傾向に関する実験に大別される。これらの実験では、図1に示すろ過装置(ろ過筒は断面積50~51cm²の矩形で、長さ約1.4m。表洗、空洗、逆洗の各装置を付設している)ならびにこのろ過装置に組み込まれた図2に掲げる波形解析装置が使用された。(1)の実験条件は表1に掲げる通り。また、(2)については、最初にろ過筒に有効径0.71mm(均等係数1.38)の珪砂を60cm厚(空隙率44%)に充填し、ろ速240 m/日で18時間のろ過を行う。その後、予め設定しておいた条件で空洗を行った。空洗中、所定の時間間隔で砂上水の一部をろ過筒側部のピーcockから採水して濁度を測定した。また、残留濁質量を捉えるために、空洗後

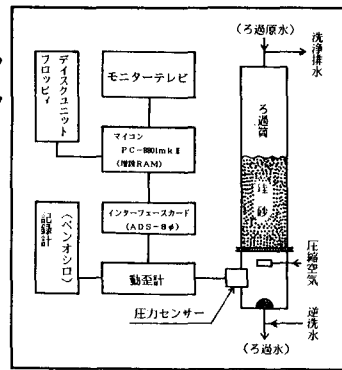


図2 波形解析装置

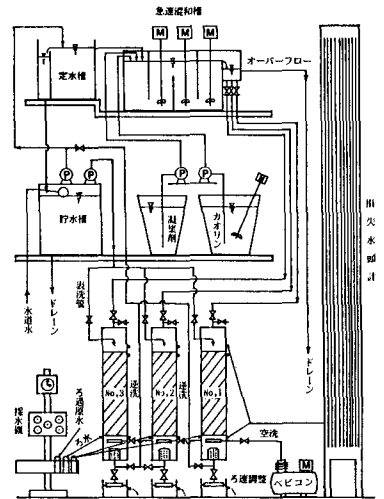


図1 ろ過装置の概要

表1 押し上げ水量、ピーク圧力に関する実験条件

項 目	実 験 条 件
珪砂の径	0.61, 0.71, 0.94 mm
ろ層厚さ	60, 58, 55.5 cm
空隙率	44.3, 42.4, 40.1 %
砂上水深	10, 30 cm
空洗強度	30, 50, 70 N/m ² ・時

表2 採砂の位置

NO	位 置	NO	位 置
	cm		cm
1	0~1	8	14~15
2	1~2	9	20~21
3	2~3	10	25~26
4	3~4	11	30~31
5	4~5	12	35~36
6	5~6	13	40~41
7	6~7	14	45~46
			50~51

* ... 砂表面からの深さ
採砂は全て1cm間隔

ろ過筒内の水を慎重に抜き、表2に示すろ層各部から1cm厚さ分の珪砂を採取した。それらに付着している濁質量については、ジャーテスターを用いて剥離させて定量した。

3. 空洗に伴う「ピーク圧力」などの動き

空洗開始後のろ層内圧力の動きの例を図3に示す。同図で見られるように、空洗開始直後に一瞬ろ層内に大きな圧力が発生するが、ピーク到達の後は速やかに低下して行き、15秒程度でほぼ一定の微振動が継続して観測される定常状態に移行する。各条件におけるピーク圧力とその出現時間の測定結果を図4と5にそれぞれ掲げた。図4でピーク圧力の動きを見ると、ろ材径の小さいほど、空隙率の低いほど、また空洗強度が大きいほど、大きなピーク圧力を示している。したがって、径0.61mmの珪砂の場合には、空隙率40.1%，空洗強度70Nm³/m²・hr時に最大のピーク圧力0.43kg/cm²が発生したが、空隙率が上昇した44.3%ではいずれの珪砂の場合も0.1kg/cm²程度である。表3は、ろ層空隙率、空洗強度、砂の径、砂上水深を主因子に選定して、ピーク圧力の変動に与えるこれら因子の効果を四元配置法によって分散分析した結果である。ピーク圧力の変動に対する各因子の寄与率は、空隙率が57.53%と最も大きく、つづいて空洗強度、砂の径の順となった。しかしながら、後述のように、濁質の排出に大きく影響する砂上水深の効果はF検定の段階で有意とならなかった。それに対し、2因子交互作用の効果(P*D, P*A, A*D)は有意となり、なかでもP*Dの寄与率は6.36%にも達した。

こうしたピーク圧力の出現時間の動きを図5で見ると、いずれの条件でも出現時間はほぼ空洗開始から0.4~1.2秒の範囲に入っているが、全体的傾向としては空洗強度の低下、空隙率の減少とともに遅くなっている。また、珪砂の径が大きくなると出現時間は早まる傾向にある。また、定常状態に移行後の平均圧力は、空洗強度の上昇、砂の径の増加とともに高まる傾向となった。さらに、定常時における平均振幅はほぼ一定値(3.5g/cm²)をとった。

4. 空洗による「押し上げ水量」などの動き

空洗の開始と同時に連続的にろ層内に加圧空気が供給される。それに伴い、3で述べたピーク圧力が発生すると同時に濁質を高濃度に含んだろ層内水(進入した加圧空気の体積に相当する)がろ層上へ押し上げられる。この「押し上げ水量」は次のようにして測定された。

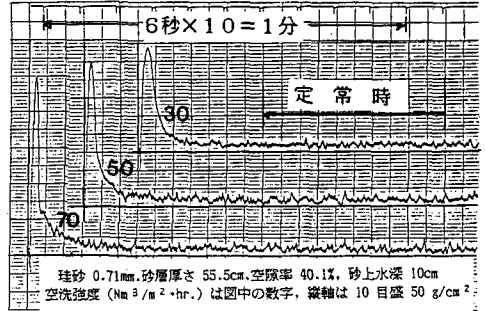


図3 空洗時のろ層圧力の動き

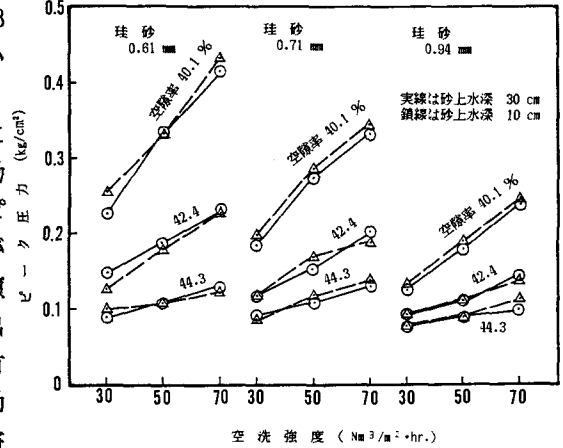


図4 ピーク圧力の動き

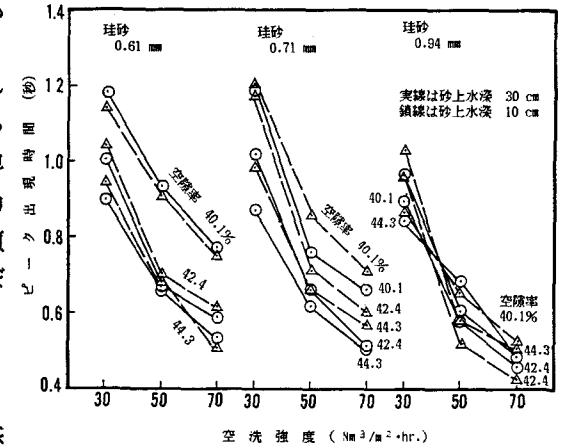


図5 ピーク出現時間の動き

(1) 空洗前のろ過筒内水面（基準水位）

(H_0) を確認の後、所定量の空気をろ層に供給する。

(2) ピーク圧力発生後、ろ層の振動が定常に落ちついたところで平均水位 (H_1) と珪砂層支持金網裏に溜った空気層厚さ (H_2) を測定する。

(3) 送気を停止し、砂上水の気泡が抜ける瞬間の水位 (H_3) をできるだけ速やかに、かつ正確に測定する。

(4) 種々の実験条件で得られた H_0 から H_3 を基に、押し上げ水量 (= $A (H_3 - H_0)$)、砂層内空気量 (= $A (H_3 - H_2 - H_0)$) および砂上水中の空気量 (= $A (H_1 - H_3)$) を算出する。ただし、ここで A はろ過筒断面積である。

これらの結果をまとめて図6と7に掲げた。また、空洗強度、砂の径、砂上水深を主因子とする三元配置法によって押し上げ水量の変動に関する分散分析および各因子の寄与率を計算して表4に示した。同表で見られるように、押し上げ水量の変動に対しては空洗強度の寄与率が91.47%と他の因子に比較して極めて高い値を示した。また、図6と7では、空洗強度が30から70 $\text{Nm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{時}$ へと大きくなるに伴い、押し上げ水量は空隙内水量の20から30% (50~80 l/m^2) に増加している。それに対し、図6のろ層内空気量は20~30 l/m^2 程度であるから、押し上げ水量に占める砂層支持金網裏空気量の比率が相当高いことがわかる。また、押し上げ水量の変動にたいする砂の径の効果は有意ではあったが小さく、径が0.61から0.94mmへ増大しても押し上げ水量の増加は数 l/m^2 程度であった。さらに、砂上水深の寄与率は僅か0.96%であることから、後述するように濁質排出率に10~15%の差を発生させた原因はピーク圧力や押し上げ水量に関係ないことが分かった。

表3 空洗直後の「ピーク圧力」に関する分散分析

因子	自由度	変動	分散	分散比	F検定	純効果	寄与率%
P	2	232,891	116,446	1,600	**	232,748	57.53
A	2	64,457	32,229	443	**	64,314	15.90
D	2	56,321	28,160	387	**	56,178	13.88
H	1	127.5	127.5	1.8		—	—
P*D	4	25,997	6,499	89	**	25,711	6.36
P*A	4	19,499	4,875	67	**	19,213	4.75
A*D	4	2,886	722	9.9	**	2,600	0.64
H*P	2	330.1	165	2.3		—	—
H*A	2	0.4	0.2	0.0		—	—
H*D	2	7.4	3.7	0.1		—	—
誤差 e	28(35)	2,037.6	72.8			3,790	0.94
総変動	53	404,554				404,554	100.00

*……因子 Pは砂層の空隙率を、P*D, P*A, H*P は交互作用を表す。その他は表4と同じ。

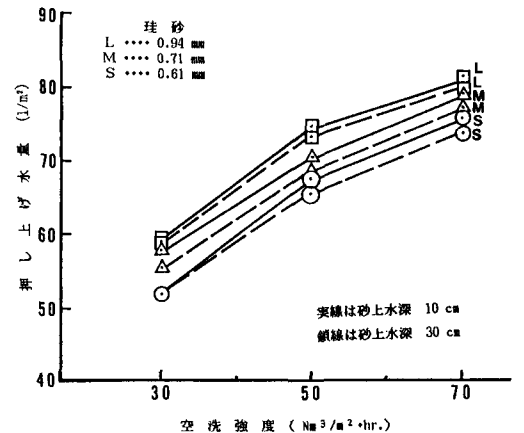
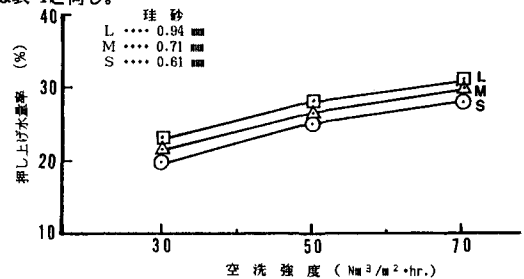


図6 押し上げ水量および押し上げ水量率の動き

表4 空洗による「押し上げ水量」に関する分散分析

因子	自由度	変動	分散	分散比	F検定	純効果	寄与率%
A	2	135,587	67,794	971.95	**	135,397	91.47
D	2	9,779	4,890	70.10	**	9,589	6.48
H	1	1,513	1,513	21.69	**	1,418	0.96
A*D	4	415	104	1.49		—	—
A*H	2	144	72	1.03		—	—
D*H	2	304	152	2.18		—	—
誤差 e	4(12)	279	70			1,617	1.09
総変動	17	148,021				148,021	100.00

*……因子 Aは空洗強度、Dは珪砂の径、Hは砂上水深を、また、A*D, A*H, D*Hは交互作用を表す。誤差の自由度(12)は寄与率計算時の値。

5. 空洗による濁質の排出過程と排出率

空洗の経過に伴いろ層内から砂上水中へ排出される濁質量の動きの例を図8と9に示した。空洗による濁質排出に関しては、次の2点が注目される。その1つは、いずれの条件においても、空洗によって最終的に砂上水中に排出される濁質の殆んどが空

洗開始直後に排出されている点である。この空洗開始直後の状況については3, 4で述べたように、ろ層内へ加圧空気が進入してろ層が瞬間的なピーク圧力を発生すると同時に空隙内水を急激に上方へ押し上げる時期と重なっている。したがって、ろ層内抑留物質はピーク圧力発生の際に強くせん断・剥離されて、ろ層内を急速に上昇する流れによって短時間の内にろ層外に排出されるという空洗現象の本質が理解される。もう1点は、一旦砂上に排出された濁質の一部がろ層内に舞い戻るためか、濁質量が空洗時間の経過とともに徐々に減少する傾向が認められたことである。この濁質の舞い戻り現象の存在を明らかにするために、砂上水を着色して長時間の空洗を行い、空洗の経過に伴ってろ層内水を採水した。その結果、徐々にろ層内水が着色し、空洗中も濁質の一部が舞い戻ることを確認した。これらの結果から、空洗効果の大部分は開始直後の短時間内に成就されるので、従来よりも短い空洗時間の設定が推奨される。

図10と11は、一定の空洗経過後におけるろ層内残留濁質量の測定に基づいてその分布の動きを示したものである。全体的な傾向としては、空洗時間の経過とともにろ層の上層部の残留濁質濃度が減少し、それに伴って濁質が徐々に下層方向に拡散されて行く様子が認められる。他方、逆洗後の成層化ろ層と空洗 ($50\text{Nm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{時}$) 後のろ層 (有効径はいずれも 0.71mm) のそれぞれ数ヶ所から採砂して顕微鏡法で粒径を測定して比較したところ、空洗後のろ層は砂層表面から25~30cm程度の深さまでほぼ均一に混合していた。このように、空洗では、時間の経過とともにろ層の混合が進行し、それに伴って濁質が深層へ輸送されることとなる。こうしたことを避ける上からも適切な洗浄時間を設定することが大切である。

また、表5は、空洗強度 $50\text{Nm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{時}$ における濁質排出率の動きを示したものである。同表では、空洗だけで50%を越え80%に迫る濁質排出率を達成しており、量的な観点から判断して、空洗は直接ろ過池の補助洗浄と言うよりは主洗浄とみなしうる効果を發揮している。さらに排出率の動きについては、ろ過段階におけるPAC注入率の低い方が、また砂上水深の大きい方が、いずれも高い排出率を示した。PAC注入率が低いほど排出率が高まったのは、PAC注入率が低いほどブロックは体積が小さく、表層部抑留の傾向を取るためと考えられる。また、砂

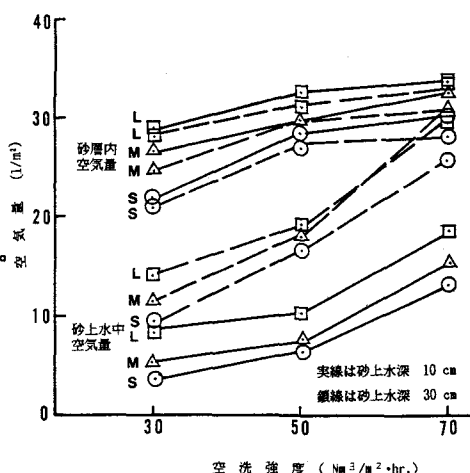


図7 空洗中の各部の空気量の動き

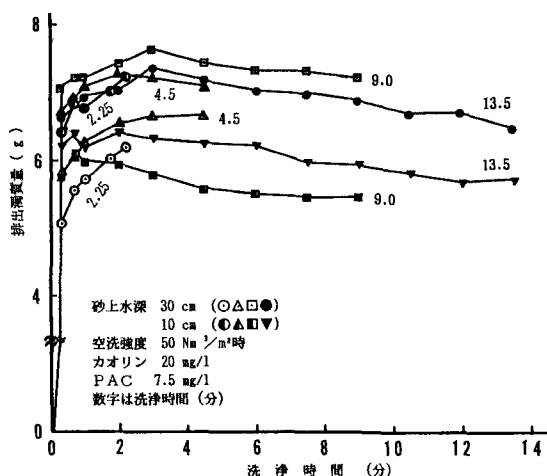


図8 排出濁質量の経時変化 (1)

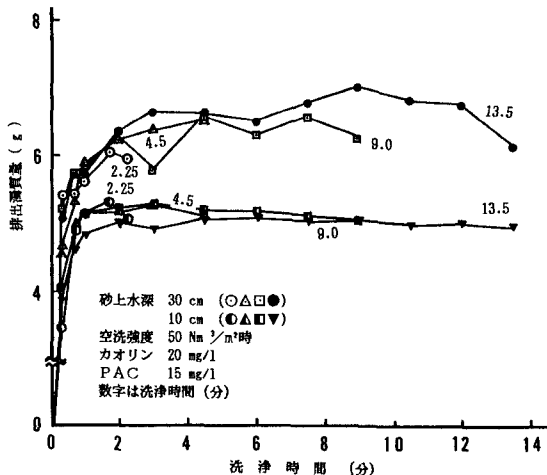


図9 排出濁質量の経時変化 (2)

上水深が大きいほど濁質排出率が高まったのは、砂上水深が大きかった分だけ濁質のせん断・剥離に作用する圧が高かったこと、および、砂上水深が大きいほど砂上水量が多いので濁質排出後の砂上水濃度が低くなり、ろ層内部への舞い戻り濁質量が少なかったことなどが原因と考えられる。

表6は、空気総量一定の下で行われた空洗強度の効果に関する実験結果である。空洗に先行して、カオリン20mg/lを含む原水にPAC15mg/l注入して240m³/日のろ速で18時間ろ過した。その後、砂上水深30cm、空気総量一定下で空洗強度を変えて空洗実験が行われた。空洗強度が大きくなると、図6に掲げたように、押し上げ水量が増加するため随伴して流出する抑留濁質が増加する。そのため、濁質排出率は次第に高まることとなる。表6でも、表5と同様に空洗時間の経過に伴い濁質排出率が低下する様子が認められる。

6. あとがき

本論では、直接ろ過池における空洗の効果に関する実験的検討を行い、空洗の基本的な諸現象およびその効果の程度を明らかにすることができた。主要な知見をまとめると以下のようである。

- (1) 空洗の開始に伴い、ピーク圧力が発生すると同時にろ層内水が急激にろ層上へ押し上げられる。
- (2) ピーク圧力の出現時間は、空洗開始から0.4～1.2秒後であり、空洗強度によって最も大きく影響される。また、ピーク圧力は0.1～0.45 kg/cm²で、珪砂の径が小さいほど、空隙率が小さいほど、空洗強度が大きいほど大きな値をとる。ピーク圧力の変動に対する寄与率は空隙率が57.5%と最大であった。
- (3) 押し上げ水量は、ろ層内水の20～30% (50～80 l/m²) 程度となり、空洗強度が大きいほど多くなる。

表5 空洗強度50Nm³/m²時における濁質排出率の動き

PAC 注入率 mg/l	砂上 水深 cm	空洗時間 分:秒	空洗後の 残留濁質量 mg	砂上水へ の排出量 mg	排出率 %
7.5	10	2:15	2,553	5,800	69.5
		13:30	2,784	5,736	67.3
	30	2:15	1,600	6,199	79.5
		13:30	1,873	6,496	77.6
15.0	10	2:15	3,550	5,095	58.9
		13:30	4,364	4,961	53.2
	30	2:15	1,943	6,701	77.5
		13:30	2,397	6,133	71.9

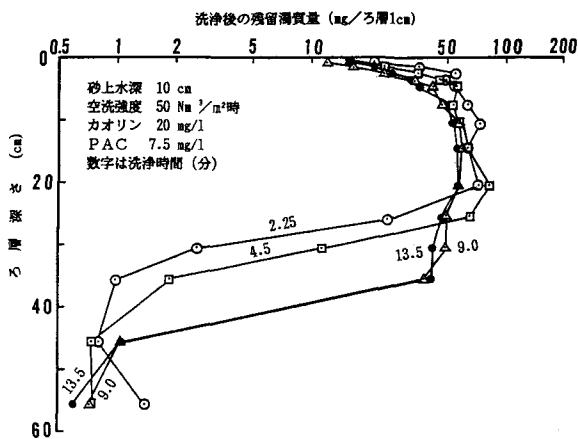


図10 ろ層内残留濁質量分布の動き (1)

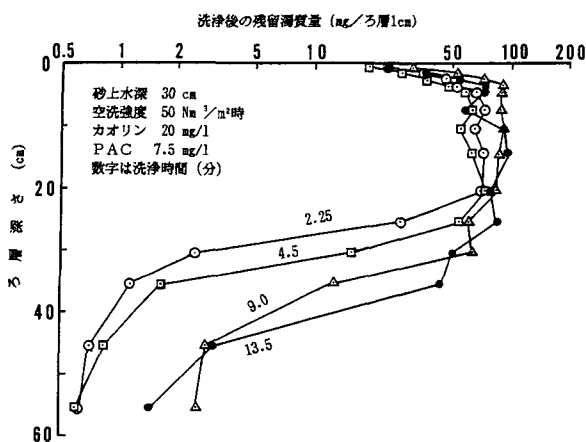


図11 ろ層内残留濁質量分布の動き (2)

影響される。また、ピーク圧力は0.1～0.45 kg/cm²で、珪砂の径が小さいほど、空隙率が小さいほど、空洗強度が大きいほど大きな値をとる。ピーク圧力の変動に対する寄与率は空隙率が57.5%と最大であった。

(3) 押し上げ水量は、ろ層内水の20～30% (50～80 l/m²) 程度となり、空洗強度が大きいほど多くなる。

表6 空気総量一定 (3.75Nm³/m²) 下における空洗強度と濁質排出率

空洗強度 Nm ³ /m ² 時	時 間 分:秒	排出率 %	時 間 分:秒	排出率 %
30	7:30	66.8	15:00	64.9
50	4:30	76.0	9:00	73.5
70	3:13	80.6	6:26	78.3

*カオリン20mg/l, PAC15mg/lの原水が対象。砂上水深30cmの場合。

また、空洗強度の寄与率が91.5%を占めた。

(4) 空洗によるろ層内濁質の排出は押し上げ水に随伴して起こり、その大部分は空洗開始直後に排出される。空洗時間が長くなると、濁質の一部がろ層に舞い戻る、また、ろ層内残留濁質は次第に下層部に拡散して行く、などの濁質排出率を低下させる二次的現象が起こるので、空洗時間を適切に設定することが重要である。

(5) 空洗による濁質排出率は、今回の実験範囲で50~80%が得られた。濁質排出率は、ろ過の際のPAC注入率が低いほど、砂上水深が深いほど、空洗強度が強いほど高まることが確認された。

最後に、本研究の遂行にあたっては、北見工業大学土木工学科上下水道工学研究室の学生に協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

【 参 考 文 献 】

- 1) 巽 巖：急速ろ過槽の空気洗浄の効果について，水处理技術，Vol.2，No.7，1961
- 2) S.Kawamura：Design and Operation of High Rate Filtration Part 3，JAWWA，Dec. 1975
- 3) 篠 原 紀 ほか：急速ろ過池の空気洗浄に関する実験的研究（1），水道協会雑誌，No.556，Jan.1981
- 4) T.R.Camp，D.Graver & G.F.Conklin：Backwashing of Granular Water Filters，ASCE，J. of Sanitary Engineering，Dec.1971
- 5) A.Amirtharajar：Fundamentals and Theory of Air Scour，ASCE，J.of Environmental Engineering，Vol.110，No.3，June 1984
- 6) S.R.Hewitt & A.Amirtharajar：Air Dynamics Through Filter Media During Air Scour，ASCE，J. of Environmental Engineering，Vol.110，No.3，June 1984