

(10) 多層ろ過池の逆流洗浄操作におけるろ材の分離成層条件

SEGREGATION CONDITIONS OF GRAINS IN BACKWASHING
OF MULTI-MEDIA WATER FILTERS

船 水 尚 行*・高 桑 哲 男*

Naoyuki FUNAMIZU*, Tetsuo TAKAKUWA*

ABSTRACT; The grains of binary or ternary-media water filters are cleansed by backwashing with water at a rate sufficient to fluidize the entire bed without mixing two or three kinds of filter media. Theoretical study which regards a backwashing of filters as a binary or ternary solid liquid fluidized bed shows that superficial velocity of backwashing water must be (1) greater than the minimum fluidization velocity of grain, (2) less than the terminal velocity, (3) less than the velocity at which bulk density of the heavier and smaller grain's layer is equal to that of the lighter and larger grain's layer and (4) less than the critical velocity at which mixing of different kinds of grains begins. In order to calculate the critical velocity, the model is developed on the basis of the force balance equations of each grain and validity of the model is confirmed by experimental results. The range of superficial velocity and diameters satisfying the segregation conditions of sand, anthracite and garnet are illustrated.

KEYWORDS; Backwashing of multi-media water filter, Segregation conditions of grains.

1. はじめに

ろ過池の高容量化の一つの方策としてろ過池の多層化がある。多層ろ過池は大粒径粒子をろ層上部に、小粒径粒子を下部に配した逆粒度構成となっており、逆流洗浄後もこの逆粒度構成が維持される必要がある。

多層ろ過池のろ材選定にあたっては、ろ過池の処理特性と逆流洗浄操作の2点から検討する必要があるが、ここでは逆流洗浄操作の観点から多層ろ過池のろ材構成条件について検討することとする。

多層ろ過池の逆流洗浄操作については篠原ら¹⁾によって、洗浄効果を最適にする洗浄方法が検討されている。しかし、逆流洗浄後のろ層構成を考慮したろ材の選定や洗浄方法についての検討は十分とはいえず、実際の場合では砂とアンスラサイトの複層ろ過池を経験的な数値²⁾に基づいて設計・操作していることが多い。

逆流洗浄後のろ層の成層状態は逆流洗浄時すなわちろ材の流動化過程における分離成層状態と逆流洗浄終了後のろ材の沈降・堆積過程の2つによって決定される。ろ材の流動化過程における分離成層は各粒子に働く重力、浮力、抗力のつりあいと循環流等による大域的な混合の2つの要因に支配されるが、まず第一段階として、(1)大域的な混合が卓越し、ろ材が流動化過程で完全に混合する場合と(2)均一な流動化が実現し、各粒子に働く力のつりあいによって分離成層が決定される場合の両理想的条件下で検討し、次いでこの基礎の上に実際のろ過池における逆流洗浄時の粒子の分離成層状態を解明していく必要があろう。上記(1)の場合にはろ材の沈降・堆積過程を取り扱う必要があり、その解析には筆者らの提案した多成分粒子群の回分沈降過程の計算法³⁾を応用することができる。一方、本研究で用いた実験装置では大域的な混合の効果が小さく、上記(2)の場合に相当する。このときは流動化過程の分離成層状態が沈降終了後も維持されるという実験結果が得られており、ろ層の成層状態は流動化過程におけるろ材の分離成層状態によって決められる。

* 北海道大学工学部衛生工学科 (Department of Sanitary Engineering, Hokkaido Univ.)

本論文では、各ろ材が流動化過程で完全に分離し、粒径の小さい順に下部より成層する条件（完全分離成層条件と呼ぶ）を示す。特に、従来の多成分固液流動層の解析において十分に検討されることのなかった粒径と密度の異なる粒子の混合開始条件を定式化し、実験結果との照合を行なう。また、従来より多層ろ過池のろ材として用いられている砂、アンスラサイト、ガーネット粒子について完全分離成層条件を試算した結果を報告する。

2. 固液流動層における粒子の分離成層

2.1 完全分離成層条件

いま、粒径と密度の異なる2種類の粒子を流動化する場合を考える。各粒子を成分1, 2とし、粒径、密度をそれぞれ d_1, d_2 ($d_1 < d_2$), ρ_1, ρ_2 ($\rho_1 > \rho_2$) とする。このような2種類の粒子の流動化現象の特徴は、空塔速度によって粒子の分離成層状態が変化することである^{4)~7)}。すなわち、空塔速度 u と各粒子の分離界面の高さの関係を模式的に示すとFig. 1 のようになり、 $u < u_c$ では二者が完全に分離し、 $u_c < u < u_m$ では下部に粒子1と2の混合層、上部に粒子2より成る層、 $u_m < u$ では下部に混合層、上部に粒子1より成る層ができる。このように、二者の粒子を完全に分離成層させるためには、混合開始速度 u_c 以下の空塔速度を設定する必要がある。

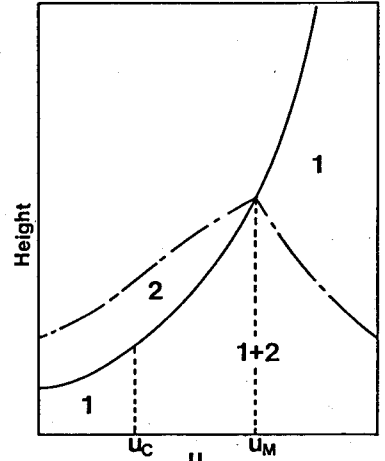


Fig.1 A simplified picture of stratification pattern of particles in a binary solid liquid fluidized bed.

ここで、二者の粒子を完全に分離し、粒子1（小粒径、高密度粒子）を下部に、粒子2（大粒径、低密度粒子）を上部に成層させるために必要な条件を整理すると①流動化開始条件、②非流出条件、③成層条件、④非混合条件の4条件があげられる。このうち流動化開始条件と非流出条件は安定した流動状態を得るために必要であり、粒子1, 2の流動化開始速度をそれぞれ u_{01}, u_{02} 、単粒子沈降速度を u_{t1}, u_{t2} とすれば、流動化開始条件は

$$u > \text{Max} \{u_{01}, u_{02}\} \quad (1)$$

非流出条件は

$$u < \text{Min} \{u_{t1}, u_{t2}\} \quad (2)$$

となる。各粒子の流動化開始速度は従来より多数提案されている推算式のうち適当な式により計算することができる。成層条件と非混合条件は逆粒度構成を維持したまま二者の粒子を完全に分離成層させる条件であり、成層条件は

$$\rho_{b1} > \rho_{b2} \quad (3)$$

となる。ここで ρ_{b1}, ρ_{b2} はそれぞれ粒子1, 2より成る層の密度であり、

$$\left. \begin{aligned} \rho_{b1} &= \rho_1 f_1 + \rho_f (1 - f_1) \\ \rho_{b2} &= \rho_2 f_2 + \rho_f (1 - f_2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

と表現される。 f_1, f_2 はそれぞれ粒子1, 2より成る層の体積濃度、 ρ_f は流体の密度である。この成層条件は「流動層全体の重心位置が最低となるように粒子が成層する」という重心位置最低モデルにより得られたものである^{8), 9)}。式(3)の条件を空塔速度で表現すると

$$u < u_b \quad (5)$$

となる。ここで u_b は $\rho_{b1} = \rho_{b2}$ となる空塔速度であり、粒子1, 2をそれぞれ単独で流動化した時の空塔

速度と体積濃度の関係（濃度式）により計算される。非混合条件は、粒子1と2が混合開始する空塔速度を u_c とすれば

$$u < u_c \quad (6)$$

となる。混合開始空塔速度 u_c の推算式はCampら¹⁰⁾により提案されてはいるものの、十分なものとはなっていないので、次節であらためて検討する。

2.2 混合開始空塔速度の推算式

Fig.2のように、粒子2が粒子1より成る層へ入り、層(1+2)を形成する場合を考える。層(1+2)において、粒子2に働く力は重力 F_G 、浮力 F_B 、抗力 F_D の3つであり、 F_G 、 F_B はそれぞれ

$$F_G = (\pi/6) d_2^3 \rho_2 g \quad (7)$$

$$F_B = (\pi/6) d_2^3 \rho_{b,1+2} g \quad (8)$$

と表現される。ここで g は重力加速度、 $\rho_{b,1+2}$ は層(1+2)の密度で

$$\rho_{b,1+2} = \rho_1 f_{1+2,1} + \rho_2 f_{1+2,2} + \rho_f (1 - f_{1+2,1} - f_{1+2,2}) \quad (9)$$

と表現される。 $f_{1+2,1}$, $f_{1+2,2}$ はそれぞれ層(1+2)の粒子1, 2の体積濃

度である。また抗力 F_D は2成分固液流動層の混合層濃度式¹¹⁾により、粒径の異なる粒子が共存する効果を考慮した粒子2の体積濃度 f_2^* すなわち

$$f_2^* = f_{1+2,2} + (d_2/d_1)^{1/3} f_{1+2,1} \quad (10)$$

と、粒子2を単独で流動化したときの抗力係数 C_{D2}^* を用いて

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_f \left[\frac{u}{1 - f_2^*} \right]^2 \cdot \frac{\pi}{4} d_2^2 C_{D2}^* \quad (11)$$

と表現される。よって粒子2についての力の釣合の式は

$$\frac{\pi}{6} d_2^3 (\rho_2 - \rho_{b,1+2}) g = \frac{1}{2} \rho_f \left[\frac{u}{1 - f_2^*} \right]^2 \cdot \frac{\pi}{4} d_2^2 C_{D2}^* \quad (12)$$

となる。粒子の混合開始状態は $f_{1+2,2} = 0$ で式(12)の関係が満たされる状態と考えることができるので、式(10)~(12)に $f_{1+2,2} = 0$ を代入して整理すると

$$\frac{\pi}{6} d_2^3 \{ (\rho_2 - \rho_f) - f_{1+2,1} (\rho_1 - \rho_f) \} g = \frac{1}{2} \rho_f \left[\frac{u_c}{1 - (d_2/d_1)^{1/3} f_{1+2,1}} \right]^2 \cdot \frac{\pi}{4} d_2^2 C_{D2}^* \quad (13)$$

となる。粒子2の場合と同様に粒子1について力の釣合の式をたてると

$$\frac{\pi}{6} d_1^3 (\rho_1 - \rho_f) (1 - f_{1+2,1}) g = \frac{1}{2} \rho_f \left[\frac{u_c}{1 - f_{1+2,1}} \right]^2 \cdot \frac{\pi}{4} d_1^2 C_{D1}^* \quad (14)$$

を得る。

式(13), (14)中の C_{D1}^* , C_{D2}^* は各粒子を単独で流動化させた場合の抗力係数であり、既往の均一粒子群に対する濃度式^{12,16)}を変形することにより求めることができる。たとえばRichardson・Zaki式¹²⁾、すなわち

$$u/u_t = (1 - f)^n \quad (15)$$

を用いる場合には

$$C_D^* = (1 - f)^{3-2n} C_{D0} \quad (16)$$

と表現される。ここで C_{D0} は単粒子自由沈降時の抗力係数である。また、筆者らは C_D^* について次の実験式を提案している¹⁶⁾。

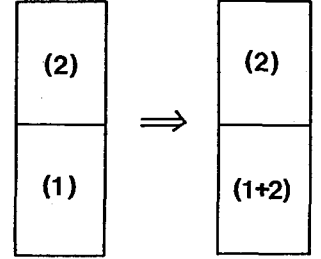


Fig.2 Formation of mixed layer of particles 1 and 2.

$$\left. \begin{aligned} C_D^* &= 24 / Re_f^* & (Re_f^* \leq 1) \\ C_D^* &= 22.222 / Re_f^* + 1.778 & (1 < Re_f^* \leq 10) \\ C_D^* &= 12.65 / Re_f^{*0.5} & (10 < Re_f^*) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

ここで Re_f^* は濃度を考慮したレイノルズ数

$$Re_f^* = \frac{u_d \rho_f}{\mu_f} \{ (1.47 - 0.521 \log Re_0) (0.55 - f) + 0.05 \} \quad (18)$$

であり、 μ_f は流体の粘度、 Re_0 は単粒子自由沈降時のレイノルズ数である。いずれの濃度式を用いる場合にも、式(13)、(14)を連立して解くことにより混合開始空塔速度 u_c を計算することができる。

3. 実験

実験筒は内径 5 cm、高さ 2 m の透明アクリル樹脂製円管であり、整流板には厚さ 5 mm の焼結金属板を用いた。流動化には札幌市水道水を循環使用し、流量調節バルブにより空塔速度を変化させた。実験装置の概要を Fig. 3 に示す。実験粒子はガラス球、粒状活性炭、アクリル樹脂球の 3 種類であり、各粒子を JIS 標準ふるいで粒径をそろえた上、前もって流動化させたときの圧力勾配が一定であ

Table 1 Particle used

Mark	Sieve range (μm)	Diameter (μm)			Density (g/cm^3)	Material
		Mean	Max	Min		
G90	88~105	92	98	83	2.473	Glass
G150A	149~177	145	152	131	2.465	
G150B	149~177	145	151	143	2.476	
G190	177~210	190	196	180	2.480	
C270	295~350	271	297	243	1.436*	Carbon
C350	350~420	352	374	316	1.418*	
C540	500~590	543	555	523	1.386*	
C750	710~840	750	782	700	1.398*	
A520	500~590	522	549	507	1.178	Plastic
A810	710~840	812	835	777	1.176	

*Mean density of activated carbon impregnated with water

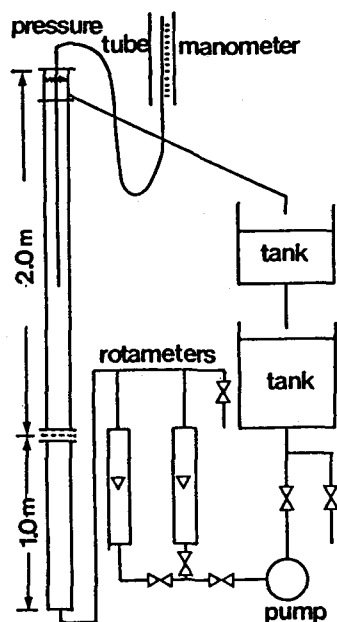


Fig. 3 Schematic diagram of apparatus.

る部分を抜き取って調製した。調製した粒子のふるいの範囲と密度を Table 1 に示す。密度の測定はピクノメータを用いた。なお、多孔性粒子である活性炭については丹保らの方法¹⁷⁾によって水中のみかけの密度として測定した。

実験では、流量調節バルブにより空塔速度を変化させた上で、粒子界面の動きが止まった定常状態において、各層厚、静水圧分布の測定ならびに目視観察による粒子の混合の有無の判定を行ない、5 回の測定結果の平均値を混合開始速度とした。また、粒子の混合開始速度の測定実験に先立ち、各粒子を単独で流動化させたときの空塔速度と層高の関係及び静水圧分布を測定し、静水圧分布を 3~5 の直線部分で近似し、直線部分の傾き式(17)、(18)を用いた濃度式より各粒子の粒径分布を求めた¹⁸⁾。Table 1 に各粒子の平均径、最大径及び最小径を示す。

4. 実験結果

はじめに、粒径と密度の異なる 2 種類の粒子を流動化した場合の層膨張の例として、G150B(200 cm^3) と

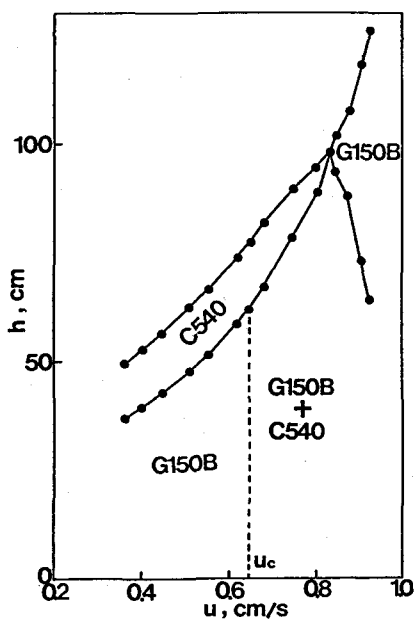


Fig. 4 Observed bed expansion ;
G150B/C540.

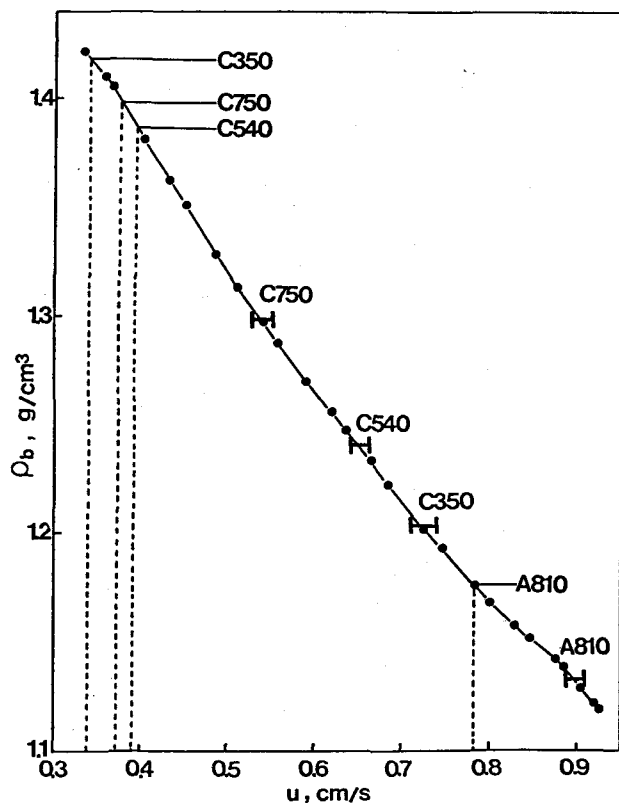


Fig. 6 Comparison of the observed velocities at which mixing begins with the Camp's model predictions (effect of diameter and density of lighter particle).

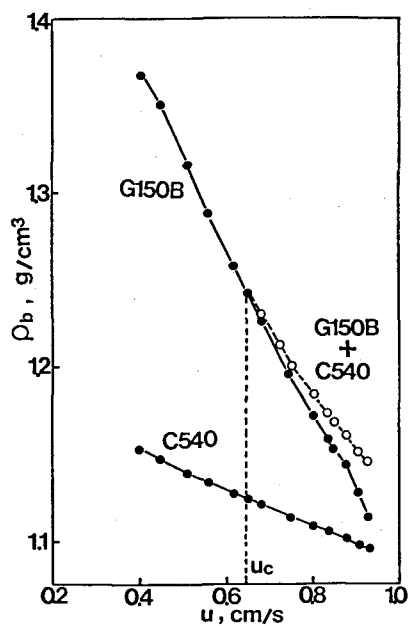


Fig. 5 Relationship between superficial velocity and bulk density of C540, G150B and mixed layer.

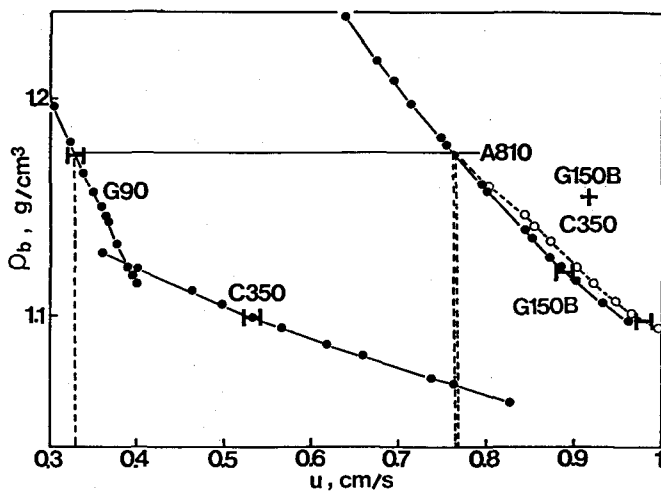


Fig. 7 Comparison of the observed velocities at which mixing begins with the Camp's model predictions (effect of diameter and density of heavier particle).

C540(100 μ m)を流動化させた場合の空塔速度と各粒子の分離界面の高さの関係の実測結果をFig. 4に示す。この場合には、混合開始空塔速度 u_c は約0.64cm/sであり、これ以下の空塔速度ではG150BとC540は完全に分離している。また、G150B層、C540層及びG150B + C540層の密度と空塔速度の関係はFig. 5に示す通りであり、混合開始速度 u_c 以下ではG150B層の密度がC540層よりも高く、G150B層が下部に、また u_c 以上の空塔速度ではG150B + C540層の密度が最も高く、G150B + C540層が下部に成層していることに対応している。

次に、下部に成層する粒子をG150Bに固定し、上層の大粒径・低密度粒子を変化させた場合の混合開始速度の測定結果をFig. 6に示す。Fig. 7には上層の大粒径・低密度粒子をA810に固定し、下層の小粒径・高密度粒子を変化させた場合の結果を示す。これらの図において混合開始速度は測定結果の最大値と最小値の範囲で示している。また、図中の●印は下層の密度 ρ_b の測定結果である。Fig. 7の○印は、G150BとC350の混合層が下層にあるときの測定結果である。

Camp¹⁰⁾は下層の層密度 ρ_b と上層の粒子の密度 ρ_u が等しくなった状態で粒子の混合が開始するとして

$$\rho_b = \rho_u \quad (19)$$

の混合開始条件を提案している。このCampらの混合開始条件により各粒子の混合開始空塔速度を求めるとFig. 6, 7中の破線のようになり、混合開始空塔速度を過小に見積もることがわかる。また、Fig. 6のC750, C540, C350の混合開始空塔速度の大小関係より、下層の粒子を固定した場合、上層が同程度の密度の粒子であれば粒径の大きい粒子ほど混合開始空塔速度が小さくなるのがわかる。逆に上層の粒子を固定した場合 (Fig. 7) のG90とG150Bの混合開始空塔速度の比較より、下層粒子が小さいほど混合開始空塔速度が小さくなるのがわかる。

最後に、2章で示した混合開始空塔速度の推算式 (式(13), (14)) を用いて求めた混合開始空塔速度の計算値 $u_{c,cal}$ と実測値 $u_{c,ob}$ を比較した結果をFig. 8に示す。混合開始空塔速度の計算では抗力係数の表現として式(17), (18)を用いた。また、上層粒子の粒径はTable 1中の最大径、下層の粒子について最小径を用いた。また、下層が2種類の粒子の混合層の場合には、粒径分布を考慮した混合濃度の計算法¹⁸⁾により、混合層上部の各粒子の体積濃度を計算した結果を用いた。Fig. 8より2章で提案した混合開始空塔速度の推算式による計算結果は実測値よりやや大きい値を見積もる場合があるものの実測値をよく表現しているといえる。

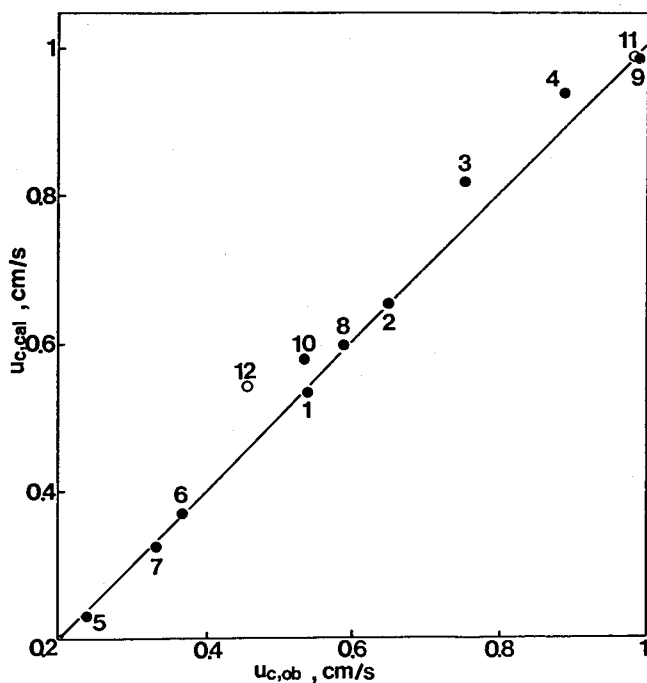


Fig. 8 Comparison of the experimental results with the model predictions(1.G150B+C750, 2.G150B+C540, 3.G150B+C350, 4.G150B+A810, 5.G90+C350, 6.G90+A550, 7.G90+A810, 8.G150A+C540, 9.G190+C750, 10.C350+A810, 11.G150B+C350+A810, 12.G90+C270+A810).

5. 砂、アンスラサイト、ガーネットろ材の完全分離成層条件の試算 多層ろ過池のろ材として現在よく用い

られているものに砂、アンスラサイト、ガーネットがあげられる。ここでは、これらのろ材について完全分離成層条件を試算してみる。試算の対象とした各ろ材の粒径、密度、形状係数、ろ層の空隙率は篠原¹⁾と藤田¹⁹⁾の値を参考にして、Table 2 のように設定する。また、試算においては水温を20℃とする。

Table 2 Properties of Granular Filter Particles

Material	Diameter (cm)	Density (g/dm ³)	Shape Factor (-)	Porosity (-)
Sand	0.07	2.63	0.8	0.5
Anthracite	0.14	1.50	0.7	0.55
Garnet	0.04	4.00	0.8	0.5

まず、完全分離成層条件のうち流動化開始条件における流動化開始速度 u_0 の推算には、適用可能なレイノルズ数範囲の広いErgunの圧力損失式を利用した次式²⁰⁾、

$$(1-\epsilon_0)g(\rho_p-\rho_f)=\frac{1-\epsilon_0}{\phi d\epsilon_0}\{150\frac{(1-\epsilon_0)\mu_f}{\phi d}u_0+1.75\rho_f u_0^2\} \quad (20)$$

を用いることにする。ここで ϕ はろ材の形状係数、 ρ_p はろ材の密度、 ϵ_0 はろ層の空隙率である。

非流出条件における単粒子自由沈降速度 u_t の推算には、篠原²¹⁾が砂、アンスラサイト、ガーネットを用いた実験により求めた単粒子自由沈降時のレイノルズ数 Re_0 と抗力係数 C_{D0} の関係

$$\left. \begin{aligned} C_{D0} &= 8.07Re_0^{-0.357} && (\text{砂}) \\ C_{D0} &= 14.35Re_0^{-0.414} && (\text{アンスラサイト}) \\ C_{D0} &= 13.88Re_0^{-0.472} && (\text{ガーネット}) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

を利用する。

成層条件の推算に必要な各ろ材の層膨張特性の表現には篠原²¹⁾が式(15)の濃度式を用いて実験結果を整理して得た、式(15)中の指数 n とレイノルズ数の関係

$$1/n = 0.181Re_0^{0.0962} \quad (22)$$

を用いる。

非混合条件における混合開始空塔速度の推算には式(13)、(14)、(16)を用い、式(16)中の指数 n は式(22)、 C_{D0} は式(21)で与えることにする。

Table 2 のろ材について完全分離成層条件を試算した結果をFig. 9 に示す。図中のS、A、Gはそれぞれ砂、アンスラサイト、ガーネットを意味する。各ろ材の流動化開始空塔速度 u_0 、単粒子自由沈降速度 u_t を図中の横軸上に示した。各ろ材を単独で流動化させた時の層の密度 ρ_0 を実線、層の膨張率 e を破線で示した。また、一点鎖線は砂とガーネットが混合開始する空塔速度 $u_{c,S+G}$ である。なお、Table 2 の砂とアンスラサイトでは流動化開始空塔速度 u_0 と単粒子自由沈降速度 u_t の範囲内では式(13)、(14)の関係を満たす u_c の値は存在せず、混合が生じないという結果が得られた。ろ材の逆流洗浄効果を考慮し、ろ材の膨張率の範囲を20~40%¹⁾にとるとすると、Table 2 のろ材については式(1)、(2)、(3)、(6)の完全分離成層条件がすべて満たされており、安定な成層状態を得ることが

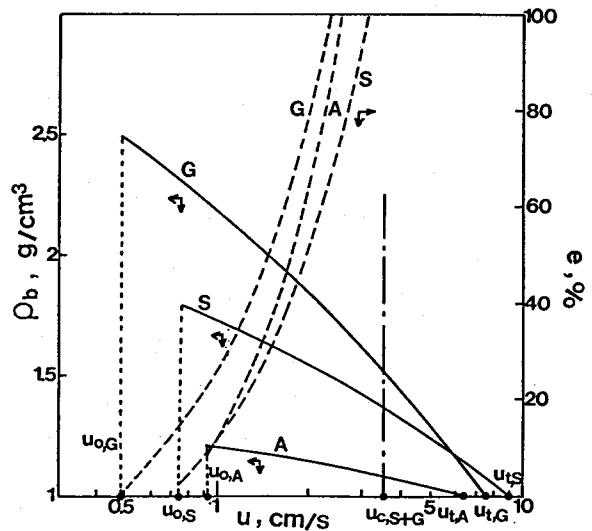


Fig. 9 Conditions of particles segregation calculated by the present model for the grains listed in Table 2.

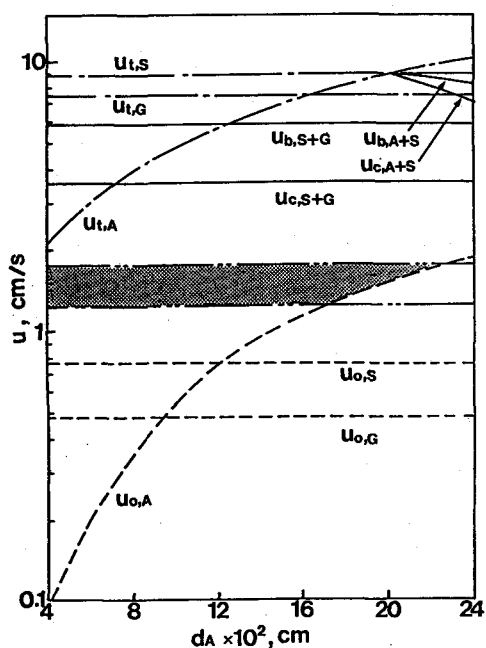


Fig. 10 Range of superficial velocity and anthracite diameter satisfying the segregation conditions.

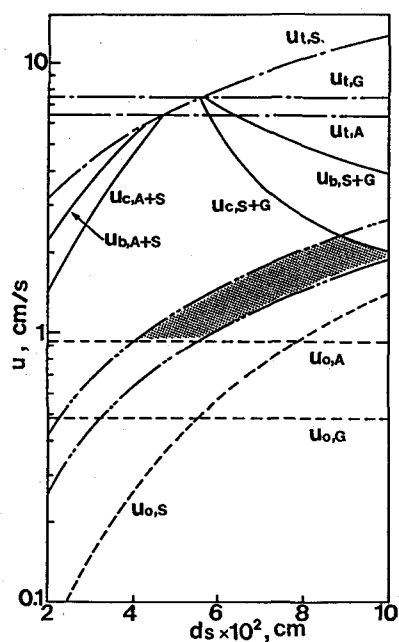


Fig. 11 Range of superficial velocity and sand diameter satisfying the segregation conditions.

できることがわかる。

次に、3つのろ材のうち、あるろ材の粒径を変化させた場合の試算結果をFig.10（アンスラサイトの粒径を変化させた場合）、Fig.11（砂）、Fig.12（ガーネット）に示す。これらの図中の記号はFig. 9の場合と同じである。ただし、完全分離成層条件に加えて、砂層の膨張率が20～40%となる範囲を2点鎖線で示してある。Fig.10よりアンスラサイトの粒径はアンスラサイトの流動化開始空塔速度 u_{0A} により制約を受け、粒径の上限は約0.2cm程度であることがわかる。砂の粒径を変化させた場合のFig.11によれば、砂の粒径の上限はガーネットとの混合条件により、下限はアンスラサイトの流動化開始空塔速度により制限されることがわかる。概略の粒径範囲は0.04cm～0.09cm程度と読みとれる。ガーネットの粒径を変化させたFig.12によれば、ガーネットの粒径の下限は砂との混合条件によっておよそ0.03cm程度であり、Table 2に示した通常のガーネットの粒径0.04cm程度との差が極めて小さいことがわかる。

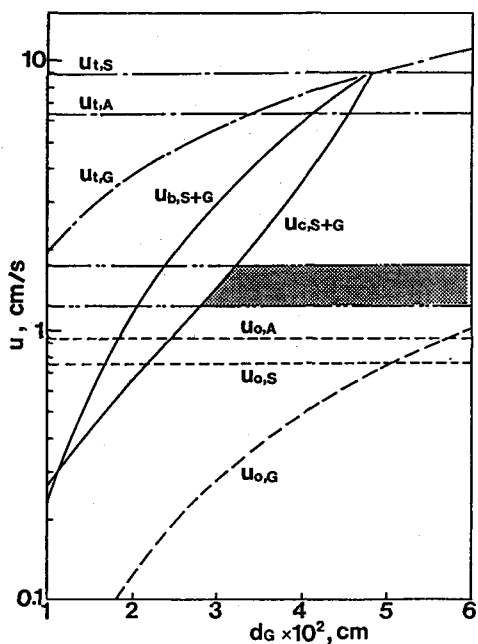


Fig. 12 Range of superficial velocity and garnet diameter satisfying the segregation conditions.

6. お わ り に

多層ろ過池のろ材選定条件の一つである逆流洗浄後の逆粒度構成の維持について、多層ろ過池の逆流洗浄操作を粒径と密度の異なる多成分粒子群の流動化現象ととらえ、各ろ材が流動化の過程で完全に分離成層する条件について検討し、以下の知見を得た。

- (1) 流動化過程における粒子の完全分離成層条件として①流動化開始条件、②非流出条件、③成層条件、④非混合条件をあげ、それぞれの具体的計算手順を示した。
- (2) 非混合条件を計算するために必要な粒子の混合開始空塔速度の推算式を提案し、ガラス球、活性炭球、アクリル樹脂球を用いた実験によりその妥当性を示した。
- (3) 現在よく用いられている砂、アンスラサイト、ガーネットのろ材について完全分離成層条件を試算し、各ろ材について分離成層可能な粒径範囲の概略値を求めた。その結果、アンスラサイトでは粒径の上限值約0.2cm程度、砂ではおよそ0.04～0.09cm程度、ガーネットでは粒径の下限值約0.03cm程度が得られた。

おわりに、本研究の実験にあたり当時の大学院学生上野直樹氏のご協力を得た。また、本研究の一部は文部省科学研究費一般研究Cの援助によるものである。ここに記して謝意を表する。

〔参 考 文 献〕

- 1) 篠原紀, 山本由忠: 急速ろ過池の水洗浄効果に関する基礎的研究, 水道協会雑誌, 第548号, pp.22-34, 昭和55年
- 2) 建設省土木研究所: 下水2次処理水の急速ろ過に関する設計資料, 土木研究所資料第1521号, 昭和54年
- 3) 船水尚行, 高桑哲男: 多成分粒子群の回分沈降過程, 衛生工学研究論文集, Vol.22, pp.61-72, 1986
- 4) G. Van Duijn and K. Rietema; Segregation of liquid-fluidized solid, Chem.Eng.Sci., Vol.37, No.5, pp.727-733, 1982
- 5) H. Moritomi, T. Iwase and T. Chiba; A comprehensive interpretation of solid layer inversion in liquid fluidized beds, Chem. Eng. Sci., Vol.37, No.12, pp.1751-1757, 1982
- 6) N. Epstein and B. P. LeClair; Liquid fluidization of binary particle mixtures - II Bed inversion, Chem. Eng. Sci., Vol.40, No.8, pp.1517-1526, 1985
- 7) L. G. Gibilaro, et al.; A predictive model for the equilibrium composition and inversion of binary-solid liquid fluidized beds, Chem. Eng. Sci., Vol.41, No.2, pp.379-386, 1986
- 8) 船水尚行, 高桑哲男: 2成分系固液流動層の成層化に関する一考察, 化学工学協会第52年会研究発表講演要旨集, p.260, 1987
- 9) 船水尚行, 高桑哲男: 2成分系固液流動層の成層現象のモデル化, 化学工学協会第20回秋季大会研究発表講演要旨集, p.622, 1987
- 10) T. R. Camp, et al.: Backwashing of granular water filters, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol.97, SA6, pp.903-926, 1971
- 11) 船水尚行, 高桑啓男: 2成分固液流動層の混合層濃度式, 北海道大学工学部研究報告, 第141号, pp.19-26, 1988
- 12) J. F. Richardson and W. N. Zaki; Sedimentation and fluidisation part I, Trans. Instn. Chem. Engers., Vol.32, pp.35-53, 1954
- 13) E. Barnea and J. Mizrahi; A generalized approach to the fluid dynamics of particulate systems, part I, The Chem. Eng. J., Vol.5, pp.171-189, 1973

- 14) L. G. Gibilaro, et al. ; Generalized friction factor and drag coefficient correlations for fluid-particle interactions, Chem. Eng. Sci., Vol.40, No.10, pp.1817-1823, 1985
- 15) K. Rietema ; Science and technology of dispersed two-phase systems, I and II, Chem. Eng. Sci., Vol.37, No.8, pp.1125-1150, 1982
- 16) 高桑哲男, 船水尚行 ; 固液流動層濃度式の検討, 第39回全国水道研究発表会講演集, 1988
- 17) 丹保憲仁ら : 活性炭吸着プロセスの動力学 (I), 水道協会雑誌, 第496号, pp.8-24, 昭和51年
- 18) 船水尚行, 高桑哲男 : 粒径分布を考慮した 2 成分固液流動層混合層濃度の計算, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集第 2 部, 1988
- 19) 藤田賢二 : 急速ろ過池における逆流洗浄に関する諸元の水理学的考察, 水道協会雑誌, 第455号, pp.2-31, 昭和47年
- 20) 鞭巖ら : 流動層の反応工学, p.18, 培風館, 昭和59年
- 21) 篠原紀 : 粒状層の膨張式に関する実験的研究, 水道協会雑誌, 第601号, pp.21-34, 昭和59年