



Title	2成分粒子群の干渉沈降における層分離
Author(s)	船水, 尚行; 高桑, 哲男
Citation	北海道大學工學部研究報告, 128, 29-39
Issue Date	1985-10-31
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/41956">http://hdl.handle.net/2115/41956</a>
Type	bulletin (article)
File Information	128_29-40.pdf



[Instructions for use](#)

## 2成分粒子群の干渉沈降における層分離

船水 尚行 高桑 哲男

(昭和60年6月30日受理)

### Zone Separation in a Hindered Settling of a Two Species Suspension

Naoyuki FUNAMIZU and Tetsuo TAKAKUWA

(Received June 30, 1985)

#### Abstract

The zone separation patterns in a hindered settling of a two species suspension were classified into four cases. Three of the four patterns were realized in the experiment of glass beads and other particles and the stratified profiles coincided with the computational results. The theoretical analysis showed that the fourth pattern did not appear in the present experiment.

#### 1. はじめに

水処理工学の分野において、ろ過池の高容量化の一つの方策として複層ろ過池が提案されている。複層ろ過池はろ層上部が低密度・大粒子、下部が高密度・小粒子の層によって構成され、逆流洗浄後もこの逆粒度構成が維持されることが必要である。

ろ過池の逆流洗浄については篠原ら<sup>1),2)</sup>によって、洗浄効果を最適にする洗浄方法については検討されている。しかし、逆流洗浄後も逆粒度構成を維持するために必要なろ材の構成や洗浄方法についての検討は十分とはいえず、従来より用いられている砂とアンスラサイトを組合せた複層ろ過池について経験的な数値が与えられているだけである<sup>3)</sup>。より効率のよい懸濁物質の除去を行うために、砂とアンスラサイトの組合せだけでなく、任意の粒径、密度のろ材構成を検討するためには、逆流洗浄時に混合されたろ材が洗浄後の沈降過程で完全に分離して堆積する条件を見出すことが必要である。

そこで本論文では、複層ろ過池のろ材構成を検討するための基礎として先に報告<sup>4)</sup>した粒径と密度の異なる二種類の粒子より成る2成分粒子群の干渉沈降過程で現れる種々の沈降・堆積パターンの分類とその判別法を2成分粒子群の回分沈降実験結果との比較により詳細に検討し、この判別法を用いた2成分粒子群の構成と沈降・堆積パターンの関係の計算結果について述べる。

#### 2. 2成分粒子群の沈降・堆積パターンの判別法の概要<sup>4)</sup>

##### 2.1. 2成分粒子群の沈降・堆積パターン

2成分粒子群の高密度成分を成分h, 低密度成分を成分lとし、二者の密度を $\rho_h, \rho_l$  ( $\rho_h \geq \rho_l$ ), 粒径を $d_h, d_l$ とする。2成分粒子群の沈降・堆積パターンを二つの成分の分離状況で分類すると、

図-1のように四つのパターンが考えられる。図では層を構成する成分で名前を付け、たとえば成分  $h$  と  $l$  が共存する層を層  $(h, l)$  とした。なお、沈降終了後の堆積層は [ ] で囲んで区別した。また、各層間の境界面を分離面とよび、層  $(l)$  と層  $(h, l)$  の間での分離面を  $S_{(l),(h,l)}$  というように書くことにする。

図-1に示した各パターンが出現する条件は次のようになる。

(i) パターン 1 の出現条件

$$u_{(h,l),l} > u_{(h,l),h} > V_{(l),(l)} \quad (1)$$

ここで、 $u_{(h,l),h}$ 、 $u_{(h,l),l}$  はそれぞれ層  $(h, l)$  の成分  $h$ 、 $l$  の沈降管壁を基準とした沈降速度（みかけの沈降速度）である。また  $V_{(l),(l)}$  は成分  $l$  の堆積層の上昇速度すなわち分離面  $S_{(l),(l)}$  の進行速度である。

(ii) パターン 2 の出現条件

$$u_{(h,l),h} > u_{(h,l),l} > V_{(h),(h)} \quad (2)$$

(iii) パターン 3 の出現条件

$$u_{(h,l),h} > V_{(h),(h)} > u_{(h,l),l} \quad (3)$$

(iv) パターン 4 の出現条件

$$u_{(h,l),l} > V_{(l),(l)} > u_{(h,l),h} \quad (4)$$

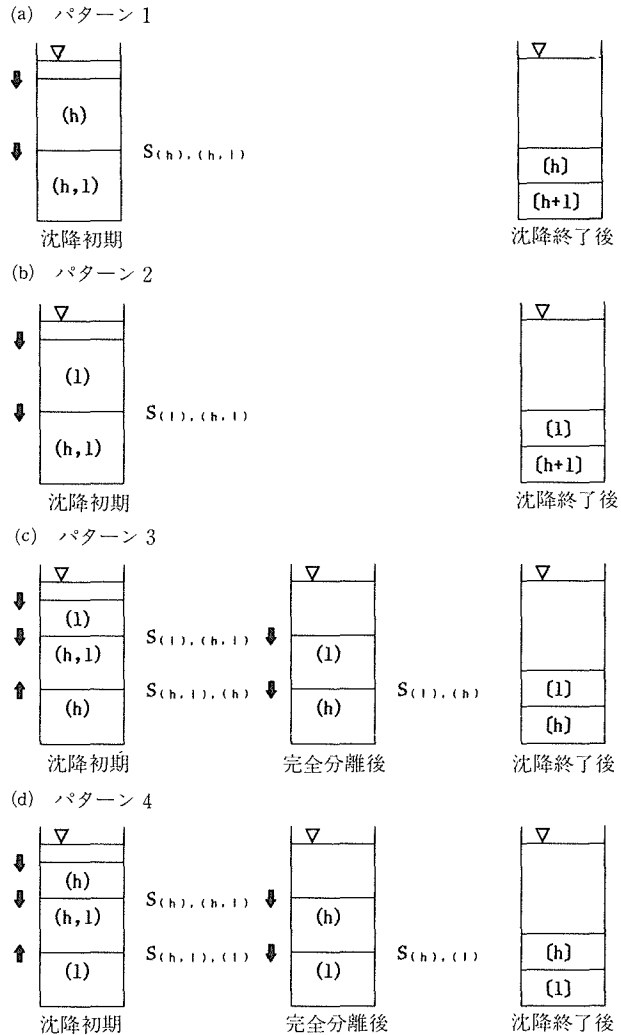


図-1 2成分粒子群の沈降・堆積パターン

## 2.2 沈降・堆積パターンの判別手順

### ① 初期データ

成分  $h, l$  の粒径、密度および沈降開始時の濃度  $\phi_{(h,l),h}$ 、 $\phi_{(h,l),l}$ 、単独で堆積したときの濃度  $\phi_{Sh}$ 、 $\phi_{Sl}$  ならびに懸濁媒体の密度  $\rho_f$ 、粘度  $\mu_f$  を与える。

### ② $u_{(h,l),h}$ 、 $u_{(h,l),l}$ の計算

初期データを多成分粒子群の沈降速度式<sup>5)</sup>に代入して、 $u_{(h,l),h}$ 、 $u_{(h,l),l}$  を計算する。

### ③ 沈降・堆積パターンの判定

(i)  $u_{(h,l),l} > u_{(h,l),h} > 0$  の場合：パターン 1 となる。

(ii)  $u_{(h,l),h} > u_{(h,l),l} > 0$  の場合：パターン 2 となる。

(iii)  $u_{(h,l),l} > 0 > u_{(h,l),h}$  の場合：

○次式により層  $(l)$  の濃度  $\phi_{(l),l}$  とその関数であるみかけの沈降速度  $u_{(l),l}$  を計算する。

$$\phi_{(l),l}(u_{(l),l} - u_{(h),h}) = \phi_{(h),l}(u_{(h),l} - u_{(h),h}) \quad (5)$$

○次に  $V_{(l),[l]}$  を計算する。

$$V_{(l),[l]} = \frac{-\phi_{(l),l} u_{(l),l}}{\phi_{Sl} - \phi_{(l),l}} \quad (6)$$

○  $u_{(h),l} > u_{(h),h} > V_{(l),[l]}$  のときパターン 1 となる。

○  $u_{(h),l} > V_{(l),[l]} > u_{(h),h}$  のときパターン 4 となる。

(iv)  $u_{(h),h} > 0 > u_{(h),l}$  の場合：

○次式により層 (h) の濃度  $\phi_{(h),h}$  とその関数であるみかけの沈降速度  $u_{(h),h}$  を計算する。

$$\phi_{(h),h}(u_{(h),h} - u_{(h),l}) = \phi_{(h),l}(u_{(h),h} - u_{(h),l}) \quad (7)$$

○次に  $V_{(h),[h]}$  を計算する。

$$V_{(h),[h]} = \frac{-\phi_{(h),h} u_{(h),h}}{\phi_{Sh} - \phi_{(h),h}} \quad (8)$$

○  $u_{(h),h} > u_{(h),l} > V_{(h),[h]}$  のときパターン 2 となる。

○  $u_{(h),h} > V_{(h),[h]} > u_{(h),l}$  のときパターン 3 となる。

### 3. 回分沈降実験

#### 3.1 実験方法

2章で示した沈降・堆積パターンの妥当性を検討するために2成分粒子群の回分沈降実験を行った。実験にはふるいわけにより粒径をそろえた11種類の粒子を用い、各2種類を混合したものを2成分粒子群とした。表-1に実験に用いた粒子の平均径、密度を示す。なお、これらの粒子群が単独で堆積したときの濃度は約0.60と一定であった。懸濁媒体としては水道水ならびにグリセリン水溶液を用い、各粒子の懸濁媒体中の有効密度を調整した。回分沈降実験は内径約5 cm、長さ1 mのアクリル製沈降管を用い、所定の初期濃度になるように粒子群を一様に懸濁させ、沈降・堆積のパターンを観察した。

表-1 実験に用いた粒子

記号	平均径 ( $\mu\text{m}$ )	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	材質
A 400	407	1.172	メタクリル樹脂
A 500	496	1.179	
A 560	561	1.177	
A 600	608	1.180	
A 740	737	1.179	
A 850	849	1.157	
P 1200	1200	1.029	ABS樹脂
G 80	87	2.479	ガラス
G 130	134	2.479	
G 170	170	2.481	
G 370	378	2.561	

#### 3.2 実験結果と考察

(1) 沈降・堆積パターンと粒子群の組成の関係 A 600 (成分 l) と G 80 (成分 h) を等体積で混合した粒子群をグリセリン水溶液中で沈降させたときの沈降・堆積パターンの観察結果を写真-1に示す。粒子群の初期全濃度  $\phi_T$  が 0.1 の場合には A 600 の沈降速度が G 80 より大きく、パターン 1 が観察された (写真-1(a))。初期全濃度が 0.2 では A 600 と G 80 の沈降速度の大小関係が逆転し、パターン 2 となっている (写真-1(b))。初期全濃度が 0.3 では A 600 が底面より上昇し、パターン 3 が出現している (写真-1(c))。A 600 と G 80 を 5 とおりの混合比で混合し

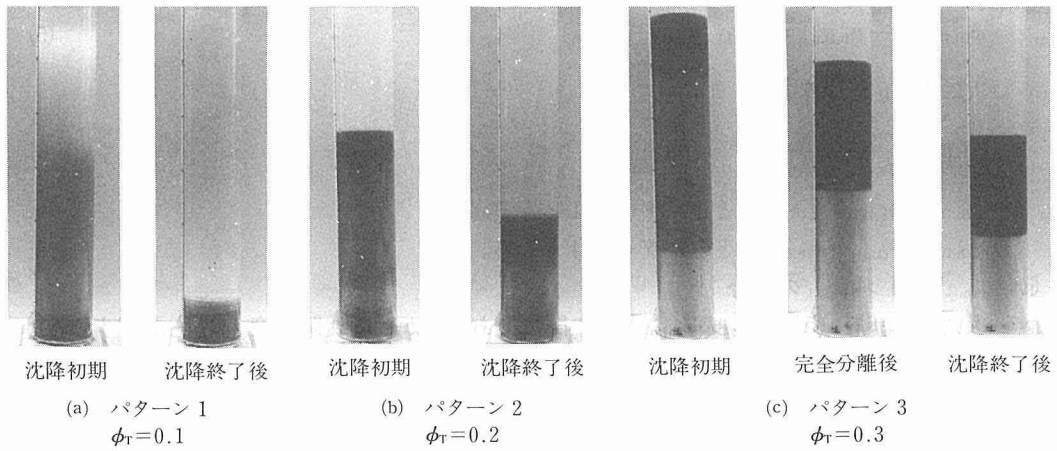


写真-1 2成分粒子群の沈降・堆積パターン (成分 A 600, G 80;  $\phi_{(h,0),h} : \phi_{(h,0),l} = 1 : 1$ )

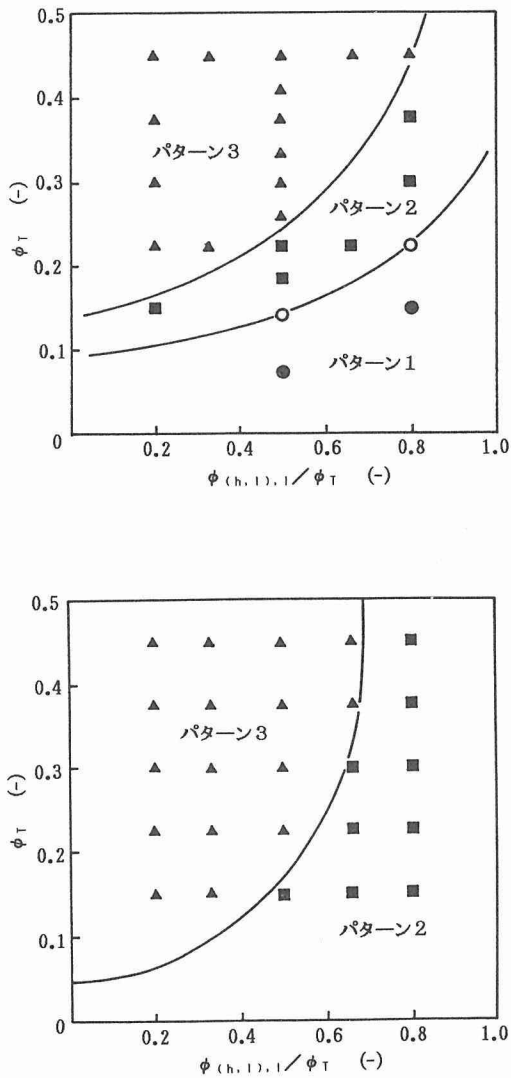


図-2 各沈降パターンの出現領域-存在割合の効果1  
(構成成分 A 600, G 80;  
 $\rho_f = 1.043 \text{ g/cm}^3, \mu_f = 0.001769 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )

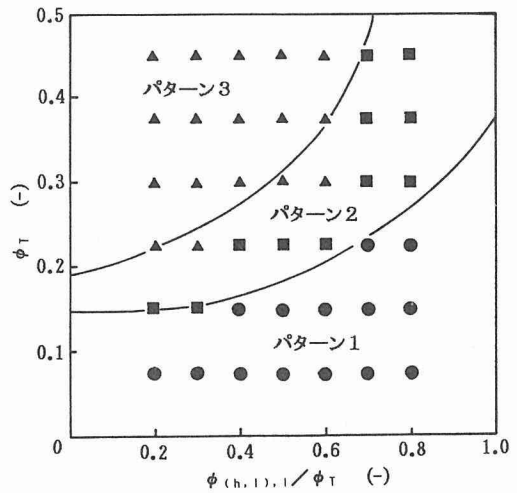


図-3 各沈降パターンの出現領域-存在割合の効果2  
(構成成分 A 740, G 80;  $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3,$   
 $\mu_f = 0.0012 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )

図-4 各沈降パターンの出現領域-存在割合の効果3  
(構成成分 P 1200, G 170;  
 $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3, \mu_f = 0.0012 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )

た場合の沈降・堆積パターンの観察結果を整理すると図-2のようになる。図の縦軸は初期全濃度  $\phi_T$ 、横軸はA 600の存在割合 ( $=\phi_{(h),1}/\phi_T$ ) である。パターン1が現れた場合は●印, パターン2の場合は■印, パターン3の場合は▲印で示してある。また○印は二者の沈降速度がほぼ一致し, 分離が生じない場合である。図より初期全濃度の増加とともに沈降・堆積パターンが1→2→3と移行することがわかる。

次にA 740 (成分l) とG 80 (成分h) を7とおりの混合比で混合した粒子群を水道水中で沈降させた場合の結果を図-3に示す。この場合にも初期全濃度の増加により沈降・堆積パターンが1→2→3と変化している。また, 低密度成分であるA 740の存在割合が増加するとパターン3が出現しにくくなることわかる。

次にP 1200 とG 170 を5とおりの混合比で混合した粒子群を水道水中で沈降させた場合の結果を図-4に示す。この場合にはパターン2, 3が出現している。図-2, 3の場合には低密度成分の単粒子沈降速度が高密度成分より大きいため, パターン1が現れたが, 図-4に示した粒子群では高密度成分の単粒子沈降速度が低密度成分より大きいため, パターン1は出現しないことになる。

(2) 粒子群を構成する二つの成分の粒径比と沈降・堆積パターンの関係 A 600にG 80, G 130, G 170, G 370をそれぞれ等体積で混合した粒子群をグリセリン水溶液中で沈降させた場合の結果を図-5に示す。図の縦軸は初期全濃度  $\phi_T$ 、横軸は高密度成分であるガラス粒子の粒径に対するA 600の粒径比 ( $=d_l/d_h$ ) である。図中の記号は図-2と同じ意味である。図-6にはP 1200にG 80, G 130, G 170, G 370をそれぞれ等体積で混合した粒子群を水道水中で沈降させた場合の結果, 図-7にはG 80にA 400, A 500, A 560, A 740をそれぞれ等体積で混合した粒子群を用いた場合の結果を示す。図-5~7より, 粒径比約3以下では出現するパターンの内容が大きく変化していることがわかる。

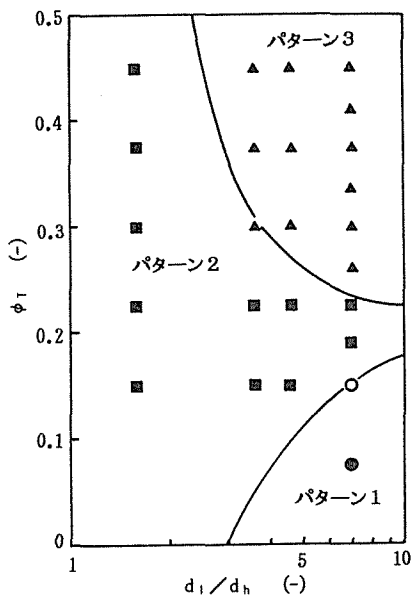


図-5 各沈降パターンの出現領域—粒径比の効果1  
 ( $\phi_{(h),1} : \phi_{(h),h} = 1 : 1, \rho_l = 1.043 \text{ g/cm}^3,$   
 $\mu_l = 0.001769 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

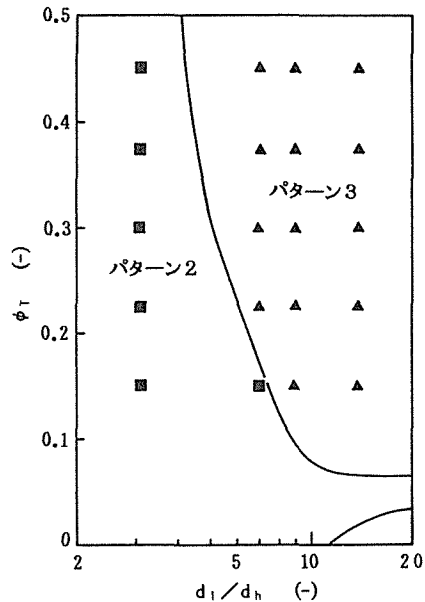


図-6 各沈降パターンの出現領域—粒径比の効果2  
 ( $\phi_{(h),1} : \phi_{(h),h} = 1 : 1, \rho_l = 1.0 \text{ g/cm}^3,$   
 $\mu_l = 0.0012 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

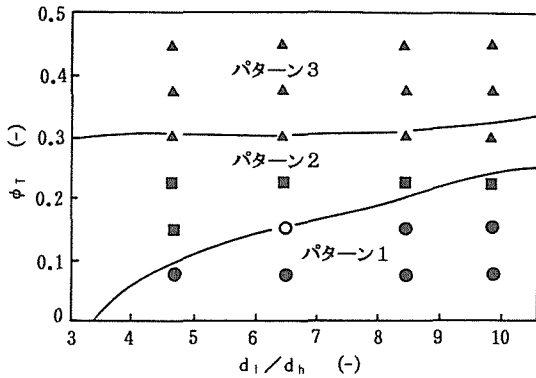


図-7 各沈降パターンの出現領域—粒径比の効果3  
 ( $\phi_{(h),l} : \phi_{(h),h} = 1 : 1$ ,  $\rho_l = 1.0 \text{ g/cm}^3$ ,  
 $\mu_l = 0.0012 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )

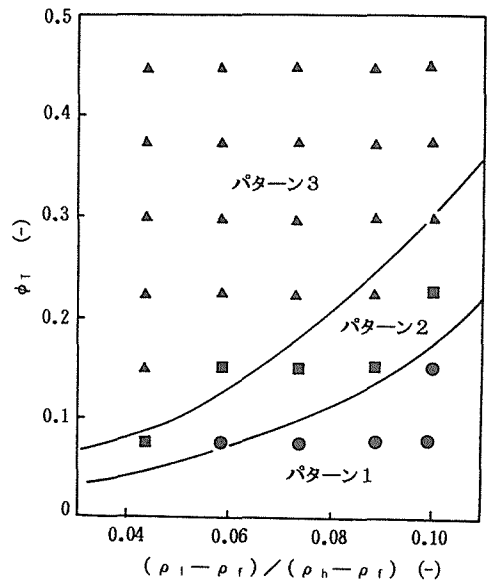


図-8 各沈降パターンの出現領域—有効密度比効果  
 ( $\phi_{(h),l} : \phi_{(h),h} = 1 : 1$ ,  $d_1/d_h = 9.8$ )

(3) 粒子群を構成する二つの成分の有効密度比と沈降・堆積パターンの関係 A 850 と G 80 を等体積で混合した粒子群を密度の異なるグリセリン水溶液中で沈降させた場合の結果を図-8 に示す。図の縦軸は初期全濃度  $\phi_r$ 、横軸は高密度成分 (G 80) の懸濁媒体中の有効密度に対する低密度成分 (A 850) の有効密度の比 ( $= (\rho_l - \rho_r) / (\rho_h - \rho_r)$ ) である。図より、有効密度比が小さいほど、低濃度からパターン3が出現していることがわかる。

(4) 沈降・堆積パターンの判別法の適用結果 2章で示した沈降・堆積パターンの判別法を(1)~(3)項に示した各粒子群に適用し、各沈降・堆積パターンが出現する領域分けを行い、各領域の境界を図-2~8中に実線で示す。これらの結果より、沈降・堆積パターンの判別法はほぼ妥当なものであるといえよう。

(5) パターン4の出現の可能性について (1)~(3)項で示したように本実験では沈降・堆積パターン4が観察されなかった。以下に、パターン4すなわち沈降初期に底面より高密度成分hが上昇し、沈降終了後底面より層 [l]、層 [h] の順に堆積層が形成されるパターンの出現の可能性について検討する。

パターン4が出現するためには、二つの成分が共存する層 (h, l) で成分hのみかけの沈降速度  $u_{(h),h}$  が負となり、かつ、その絶対値が成分lの堆積層 [l] の上昇速度  $V_{(l),[l]}$  の絶対値よりも大きくなる必要がある。

そこで、まず成分hのみかけの沈降速度が負となる条件について検討する。成分hのみかけの沈降速度は成分h, lの周囲流体を基準とした沈降速度(絶対沈降速度)  $U_{(h),h}$ ,  $U_{(h),l}$  と各成分の濃度  $\phi_{(h),h}$ ,  $\phi_{(h),l}$  を用いて

$$u_{(h),h} = U_{(h),h} - \phi_{(h),h} U_{(h),h} - \phi_{(h),l} U_{(h),l} \tag{9}$$

と書くことができ<sup>5)</sup>,  $u_{(h),h}$  が負となるための条件は

$$U_{(h),h} < \frac{\phi_{(h),l}}{1 - \phi_{(h),h}} U_{(h),l} \tag{10}$$

となる。さて、成分 h の沈降の駆動力 (=重力-浮力)  $F_{Dh}$  は

$$F_{Dh} = -\frac{\pi}{6} d_h^3 (\rho_h - \rho_f) g (1 - K_h \phi_T) \quad (11)$$

となり<sup>5)</sup>、ここで

$$K_h = 1 - \frac{\rho_h - \rho_f}{\rho_h - \rho_f} \cdot \frac{\phi_{(h),l}}{\phi_T} \quad (12)$$

の関係が常に成り立つので、 $0 < K_h < 1$  となり、沈降の駆動力  $F_{Dh}$  は負とはならない。すなわち、成分 h の絶対沈降速度は負とはならない。そこで式(10)の両辺を  $U_{(h),h}$  で除して整理すると

$$\frac{U_{(h),l}}{U_{(h),h}} > \frac{1 - \phi_{(h),h}}{\phi_{(h),l}} \quad (13)$$

を得る。式(13)を用いて、成分 h のみかけの沈降速度が負となる領域を初期全濃度  $\phi_T$  ごとに計算すると図-9 のようになる。図の横軸は成分 h の存在割合である。各初期全濃度について、図中の実線よりも  $U_{(h),l}/U_{(h),h}$  の値が大きいときに成分 h のみかけの沈降速度が負となることを示している。図より、ある初期全濃度では成分 h の存在割合が小さいほど、ある存在割合では全濃度が高いほど、絶対沈降速度の比が小さい領域から、成分 h のみかけの沈降速度が負となることがわかる。

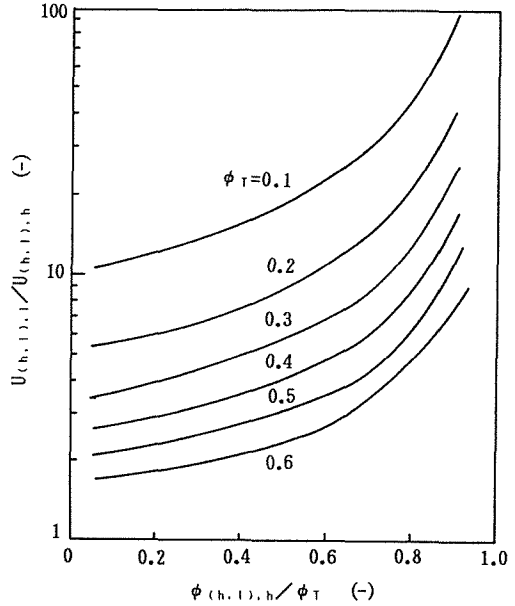


図-9 成分 h のみかけの沈降速度が負となる領域

次に、成分 l の堆積層の上昇速度  $V_{(l),l}$  と  $u_{(h),h}$  の関係を検討する。 $V_{(l),l}$  の値は式(5), (6)を用いて計算すべきであるが、ここでは層 (h, l) 中の成分 l がそのまま堆積するとした次式によって計算可能と仮定する。

$$V_{(l),l} \doteq -\frac{\phi_{(h),l} u_{(h),l}}{\phi_{S1} - \phi_{(h),l}} \quad (14)$$

よって、パターン 4 が出現するためには

$$-\frac{\phi_{(h),l} u_{(h),l}}{\phi_{S1} - \phi_{(h),l}} > u_{(h),h} \quad (15)$$

の関係が成り立つ必要がある。式(15)中の成分 h, l のみかけの沈降速度を絶対沈降速度を用いて書きかえ、整理すると

$$\frac{U_{(h),l}}{U_{(h),h}} < \frac{\phi_{(h),l} + \phi_{S1} \phi_{(h),h} - \phi_{S1}}{(1 - \phi_{S1}) \phi_{(h),l}} \quad (16)$$

となる。式(16)で  $U_{(h),l}/U_{(h),h}$  の値は正、右辺の分母も  $\phi_{S1}$  が 0.6 程度であるので正となり、式(16)の関係が成り立つためには少なくとも右辺の分子が正である必要がある。式(16)の右辺の分子を  $\phi_{(h),l} = \phi_T - \phi_{(h),h}$  の関係を用いて書きかえ、値が正となる条件を求めると

$$\phi_T > \phi_{(h),h} - \phi_{S1} \phi_{(h),h} + \phi_{S1} \quad (17)$$



となる。ここで、成分  $l$  の堆積層の濃度  $\phi_{sl}$  の値を  $0.6$  とおくと、式(17)は

$$\phi_T > 0.4 \phi_{(h,l),h} + 0.6 \tag{18}$$

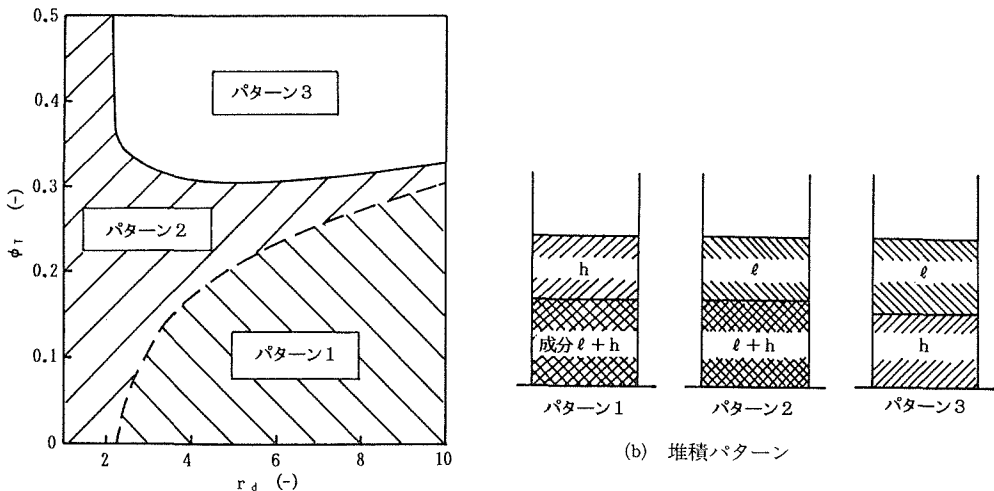
となる。式(18)の右辺の  $\phi_{(h,l),h}$  は成分  $h$  の濃度であり、 $0 \sim 0.6$  の範囲の値となる。よって式(18)の右辺は  $0.6 \sim 1.0$  の範囲となる。 $\phi_T$  は層  $(h, l)$  の全濃度であり  $0 \sim 0.6$  である。このことから式(18)が成り立たない、すなわち式(16)の関係が成立しないことになる。

以上により、成分  $h$  のみかけの沈降速度は負となり得ても、その絶対値は成分  $l$  の堆積層の上昇速度の絶対値より大きくなり得ず、結果として沈降・堆積パターン 4 は出現できないことになる。

#### 4. 沈降・堆積パターンと粒子群構成の関係

2成分粒子群の沈降・堆積パターンは粒子群を構成する各成分の性質（粒径、密度、沈降開始時の濃度）と懸濁媒体の密度、粘度によって決定される。そこで本章では、2章で示した沈降・堆積パターンの計算法を用いて水中における2成分粒子群の沈降・堆積パターンを検討してみる。懸濁媒体の密度は  $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$ 、粘度は  $\mu_f = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  と一定とし、成分  $h$  の粒径は  $d_h = 0.01 \text{ cm}$  または  $0.05 \text{ cm}$ 、密度は  $\rho_h = 2.65 \text{ g/cm}^3$  と固定する。成分  $l$  の粒径と密度はそれぞれ粒径比  $r_d (=d_l/d_h)$ 、有効密度比  $r_p (=(\rho_l - \rho_f)/(\rho_h - \rho_f))$  を変化させて与え、各成分の沈降開始時の濃度は全濃度  $\phi_T$  と成分  $h$  の存在割合  $\phi_h/\phi_T$  によって表現することにした。また  $r_d, r_p$  の値は複層ろ過池でみられる  $d_h < d_l, \rho_h > \rho_l$  の2成分粒子群を想定し、 $1 < r_d < 10, 0.01 < r_p < 1.0$  の範囲を対象とした。初期全濃度の範囲は  $0 < \phi_T < 0.5$  とした。これらの粒径、密度、濃度について2章で示した沈降・堆積のパターンの判別法によって、各沈降パターンが出現する領域を区分し、各領域の境界を求めた。

はじめに、 $d_h = 0.01 \text{ cm}, r_p = 0.2, \phi_h/\phi_T = 0.8$  とした場合の計算結果を図-10(a)に示す。図中の破線はパターン1と2の境界、実線はパターン2と3の境界である。破線と実線によって  $\phi_T - r_d$  平面が三つの領域にわけられる。これら三つの領域における堆積パターンを図-10(b)に示した。図-10(a)の場合には  $r_d > \text{約} 2.2$ 、かつ、 $\phi_T > \text{約} 0.3$  のときにパターン3となり、二つの成分がほぼ完全に分離することがわかる。



(a) 沈降・堆積パターンと粒子群の性質の関係

図-10 沈降・堆積パターンと粒子群の性質の関係 ( $d_h = 0.01 \text{ cm}, r_p = 0.2, \phi_h/\phi_T = 0.8$ )

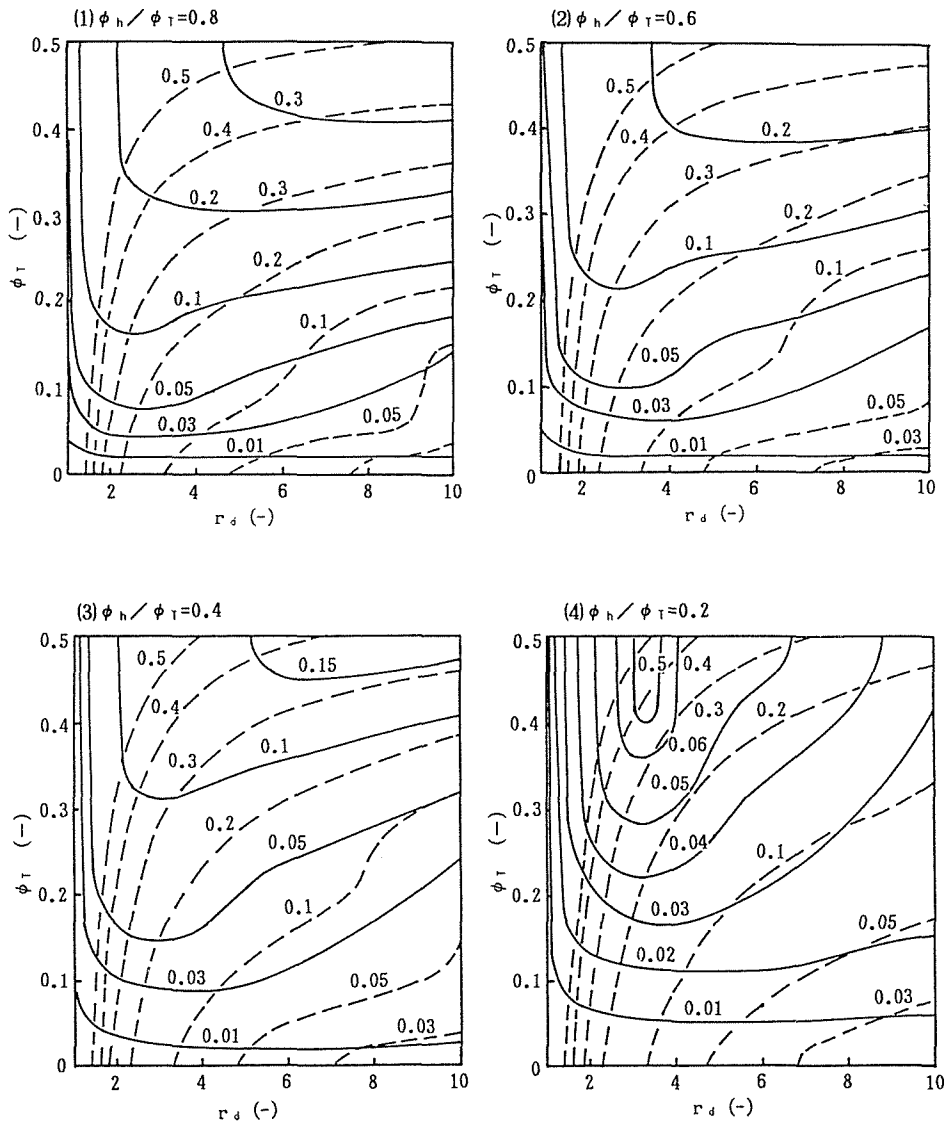


図-11 沈降・堆積パターンと粒子群の性質の関係— $d_h=0.01$  cm

図中のパラメータは  $r_p$  の値を示す。実線と破線で区分された領域と堆積パターンの関係は図-10 と同じ

次に、 $d_h=0.01$  cm,  $0.05$  cm とし、 $r_p$  と  $\phi_h/\phi_t$  を変化させた場合の計算結果をそれぞれ図-11, 12 に示す。図では  $r_p$  をパラメータとし、4 とおりの  $\phi_h/\phi_t$  について示してある。図-11, 12 より、有効密度比の値が小さくなるほど、低濃度域において広い粒径比の範囲で二つの成分が完全に分離することがわかる。また、成分 h すなわち密度の大きい成分の存在割合が小さいほど、二つの成分が完全に分離するための有効密度比の値が小さくなり、同じ有効密度比でも濃度範囲が狭くなっている。図-11 と 12 を比較すると、 $d_h=0.05$  cm の場合には、二つの成分が完全に分離するための有効密度比の値が小さく、初期全濃度は高くなっており、完全分離可能な領域が狭くなっている。この違いは主として沈降の流れ領域の違いによるものであり、図-12 のほうがレイノルズ数が大きくなっている。

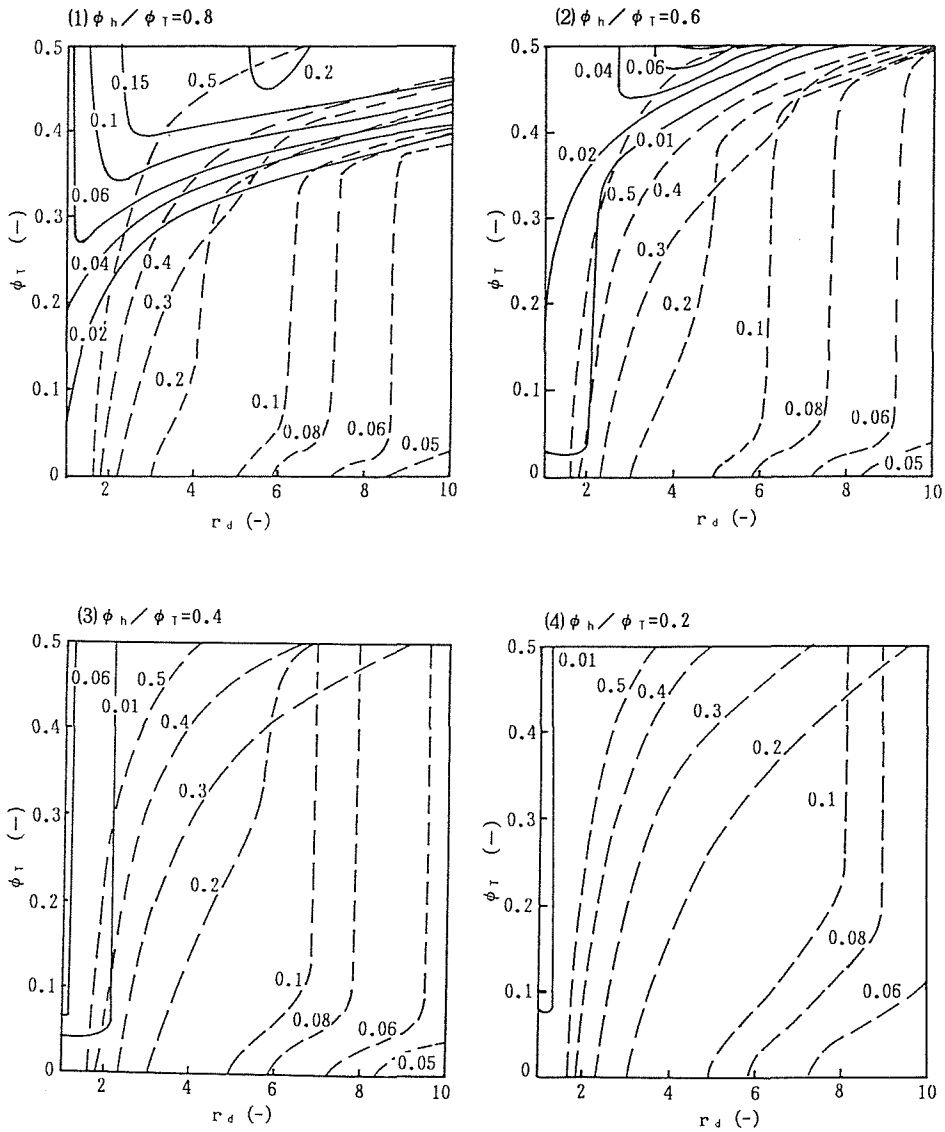


図-12 沈降・堆積パターンと粒子群の性質の関係— $d_h=0.05$  cm

図中のパラメータは  $r_p$  の値を示す。実線と破線で区分された領域と堆積パターンの関係は図-10 と同じ

## 5. おわりに

本論文で得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 2成分粒子群の沈降・堆積パターンを四つに分類し、各パターンの判別法を示した。
- (2) 11種類の粒子を用いた2成分粒子群の回分沈降実験により、本計算法の妥当性を確認した。
- (3) 四つの沈降・堆積パターンのうち、底面より低密度成分より成る層、高密度成分より成る層の順に堆積するパターンは出現できないことを明らかにした。
- (4) 沈降過程において、二つの成分を完全に分離して堆積させるための条件について検討し、
  - ①両者の有効密度比が小さいほど、低濃度域から広い粒径比の範囲で分離が可能となること、

②密度の大きな成分の存在割合が大きいほど、広い有効密度比、粒径比の範囲で分離が可能となることを示した。

本研究の実験では本学大学院学生小古井久雄君の協力を得た。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研究, 水道協会雑誌, 第 548 号, p. 22~34, 昭和 55 年
- 2) 篠原紀, 山本由忠, 時岡重行: 急速ろ過池の空気洗浄に関する実験的研究(II), 水道協会雑誌, 第 557 号, p. 9~24, 昭和 56 年
- 3) 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
- 4) 船水尚行, 高桑哲男: 2 成分粒子群の沈降・堆積パターンの計算法, 水道協会雑誌, 第 612 号, p. 2~11, 昭和 60 年
- 5) 船水尚行, 高桑哲男: 粒径・密度分布をもつ粒子群の干渉沈降, 水道協会雑誌, 第 609 号, p. 2~12, 昭和 60 年