

沈降濃縮

工場操作シリーズ

NO. 13



化学工業社

81.171

485

13.

工場操作シリーズ

沈 降 濃 縮 編

—沈降分離と凝集沈殿操作—

11-06-67

株式会社 化学工業社

工場操作シリーズ 沈 降 濃 縮 編

—沈降分離と凝集沈殿操作—

—目 次—

1. 沈降濃縮理論とその動向	東京農工大学 吉野善弥	(1)
2. 凝集剤の選定		
2・1 凝集剤の種類と選定	工技院資源技試 野田道宏	(11)
2・2 有機性凝集剤	東京工業試験所 佐々木 莊吉	(22)
3. 沈降濃縮の選定と設計要領		
3・1 水平流型沈降装置	三菱化工機(株) 八木 弥三郎	(33)
3・2 アクセレータ	住原インフィルコ(株) 鈴木 英友	(39)
3・3 クリアレータ	栗田工業(株) 八木下 一 正	(45)
3・4 ドルコハイドロトリータ	三機工業(株) 中 嶋 鉄 男	(53)
3・5 千代田ハイアクアファイナ	千代田化工建設(株) 今 村 忠 夫	(58)
3・6 パルセータ	日本デグラモン(株) 和 田 守 雄	(67)
3・7 アクセツトラ	水道機工(株)	(73)
4. 操作の実際		
4・1 製鉄所廃水処理の概略	川崎製鉄(株) 中 村 春 三	(78)
4・2 石灰石洗浄廃水の処理	東京農工大学 吉野善弥 奥多摩工業(株) 安 間 信 之	(86)
4・3 紙・パルプ工場の廃液処理	名古屋パルプ(株) 岡 豊 吉	(93)
4・4 アルミナ製造工程における沈降濃縮操作	日本軽金属(株) 田 中 達 也	(105)
4・5 マグネシアクリンカー製造工程における 沈降濃縮ならびに凝集沈殿	東京農工大学 吉野善弥	(111)
4・6 水処理工程における沈降分離	東京農工大学 吉野善弥 三機工業(株) 野口尚孝・熊谷正彦	(115)
4・7 上水道における浄水プロセス	都水道局 小島 貞 男 玉川浄水管理事務所	(119)
4・8 工業用水処理	旭化成工業(株) 小 野 通 明	(127)
4・9 陽極酸化工場廃液	日軽アルミニウム工業(株) 杉 本 安次郎	(134)
(付) 関連データ		(139)

1. 沈降濃縮理論とその動向

1. はじめに

懸濁液中の固体粒子群の分離濃縮過程において起こる諸問題は、鉱業・化学工業などの生産部門ばかりではなく、都市上・下水ならびに産業用・廃水処理などの衛生工学部門にわたる広分野においても重要な研究課題となってきた。

とくに近年著しい産業規模の拡大化・都市人口の過密化などに伴って、『沈降濃縮操作』の対象とすべき懸濁液の組成ならびにその処理目的・条件なども多岐にわたって錯そうしてきたばかりでなく、しばしば極度に分離しにくいような懸濁液をも合理的に処理する必要性なども起こってきた。

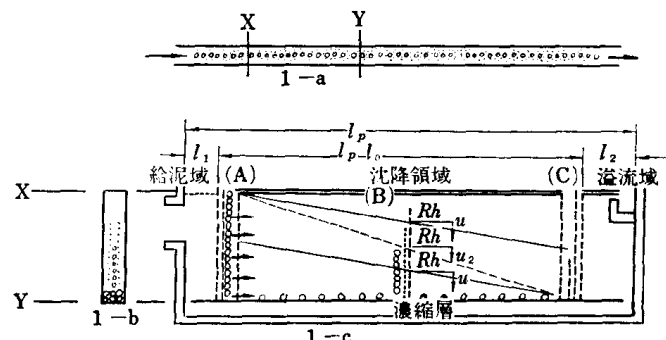
1・1 回分沈降濃縮と連続沈降濃縮

一般に懸濁中に分布している固体粒子群やエマルジョンなどを機械的に分離するためには、これらの懸濁質に流体に対する相対運動をとらせるとともに、なんらかの不連続な界面すなわち分離面を利用する必要がある。

いま、第1図・aのように、液相中に固体粒子群が一様に分布した懸濁液が流路内を連続的に流動している場合について考えれば、この流体内部における粒子濃度分布状態には、懸濁液の連続輸送を阻むほどの大きな変化が起こっていないのが普通である。

つぎに、このような状態の導管を2点X・Yで截断して、第1図・bのように断面Yの方を底部にして静置したとすれば、重力場において流体中の各固体粒子群は相対運動を起こすから、その粒子配列状態は不連続な界面X・Yなどの影響を受けて変化し、懸濁液内部には、それぞれの粒子径・粒子濃度あるいは粒子相互の分散・集合性などに応じた粒子配列状態すなわち粒子濃度分布状態が形成されてゆくことになる。

このような場合には、第1図・bのように、自由表面Xから生成する粒子配列の希薄化すなわち『澄清 Clarification』と、底面Yから生成する粒子配列の濃密化すなわち『濃縮 Thickening』とが同時に起こってくるわけで、このような現象は一般に『回分沈降濃縮』と呼ばれるものである。



第1図

これに対して、‘連続沈降濃縮’は、第1図・cのように、懸濁液の連続的な流れを、大容量な槽に貯留して、自由表面Xならびに槽底に形成された濃縮層Yなる界面によって、それぞれ、‘給泥濃度 w_0 から溢流濃度 w_e に至るものまでの粒子濃度変化すなわち連続清澄’と、‘給泥から排泥濃度 w_u にいたるまでの粒子濃度変化すなわち連続濃縮’とを同時に伴う連続的固液分離法であるから、これを解明してゆくためには、連続沈降濃縮槽あるいは凝集沈殿槽内において起こりうべき固液分離機構、いかえれば溢流濃度 w_e から排泥濃度 w_u にわたる粒子濃度の懸濁液内における固体粒子群の挙動について考究する必要がある。

2. 懸濁液の清澄

一般に、固液分離操作の対象となるような懸濁固形物の多くは微細粒子群で、その組成、密度あるいは粒度などが全く一様であるとして考える場合はむしろ限られた条件下にあり、普通は多少とも粒度分布あるいは分散 Deflocculation・集合 Flocculation などの傾向をも有するから、それぞれの与えられた固液分離条件に応じて、複雑な沈降分離現象を呈するという事も少なくない。

いま、懸濁液の清澄現象について粒子群の分散、集合をもいれて考察すれば、次のようになる。一般に、懸濁液内における固体粒子群の沈降速度 v は、それぞれの粒度、粒子濃度などに応じて

$$v = v_t \cdot \varphi(w) = [4gx(\rho_s - \rho) / 3\rho C_R] \cdot \varphi(w) \quad (1)$$

ただし、抵抗係数 C_R はレイノルズ数 Re の関数で、

$$Re < 0.4; C_R = 24/Re, v_t = [g(\rho_s - \rho) / 18\mu] \cdot x^2 = C_s \cdot x^2 \text{ (Stokes Law)} \quad (2)$$

$$30 < Re < 500; C_R = 10/\sqrt{Re}, v_t = \left[\frac{4}{225} \cdot \frac{(\rho_s - \rho)^2}{\mu\rho} \cdot g^2 \right]^{1/3} \cdot x \\ = C_A \cdot x \text{ (Allen's Law)} \quad (3)$$

$$500 < Re < 10^5; C_R = 0.44, v_t = \left[\frac{3g(\rho_s - \rho)}{\rho} \right]^{1/2} \cdot x^{1/2} \\ = C_N \cdot x^{1/2} \text{ (Newton's Law)} \quad (4)$$

ここで、粒子濃度 w にもとづく補正項 $\varphi(w)$ は、一般に空間率関数 $\phi(\varepsilon)$ とは逆数関係にあり、Robinson, Egolf, Steinour, Richardson, Shannon および筆者らの研究などもあり、重要な研究対象ともなってきた。

次式は、Steinour らが、ガラスの球形粒子群およびタピオカ澱粉粒子の濃厚懸濁液について回分沈降試験を行なって求めた関係である。

$$\varphi(w) \simeq \frac{1}{\phi(\varepsilon)} = \varepsilon^2 \cdot 10^{-1.82(1-\varepsilon)} \quad (5)$$

しかしながら、沈降濃縮過程における懸濁液の挙動については、上記のごとき粒子濃度の沈降速度に及ぼす影響ばかりではなく、懸濁粒子群の物性変化とくに分散、集合現象などに伴う挙動の変化をも考慮にいれなければならないような場合も少なくない。

第2図は、懸濁液中の粒子濃度とその集合性とは、懸濁液の沈降状態に及ぼす影響について例示

したものであるが、図の左右両軸においてそれぞれ完全分散状態ならびに完全集合状態を表わすものとすれば、このような左右両極端の間に相当する懸濁固形物は、沈降過程において多少ともその2次的性質を変動するような不安定な懸濁質すなわち部分集合状態の懸濁質を構成していることになる。

一般に沈降分離の対象となるような懸濁液の固液分離特性は、このように与えられた条件に応じて著しく異なってくることが少なくないから、それぞれの条件に応じた工学的解析法ならびに装置設計法などが必要であるということは容易に予測しうるところである。

とくに近年、凝集剤としての高分子化合物や、連続固液分離装置とくに凝集沈殿装置などに関する研究開発も多方面で行なわれるようになり、従来の固液分離プロセスをも大幅に改変するほどの成果をあげている分野も少なくないので、このような事態に対応できるだけの基礎的解析力ならびに研究開発能力などもまた望まれてきたようである。

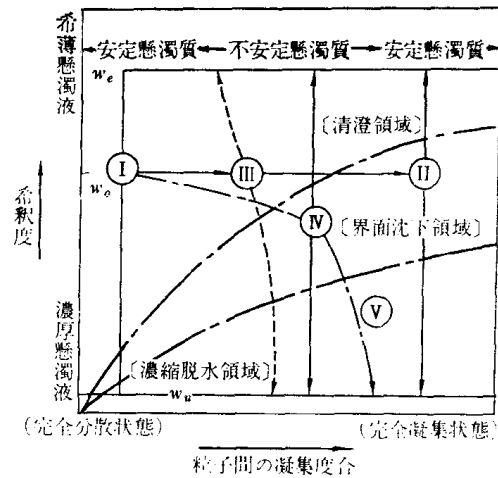
一般的な例として、次に、第3図のごとき沈降速度分布（図中Ⅰ）を有する懸濁液の沈降について、つぎのごとき諸種の条件において考えることにする。

2・1 前処理工程のない場合 —— 懸濁質の物性変化が起こらない場合

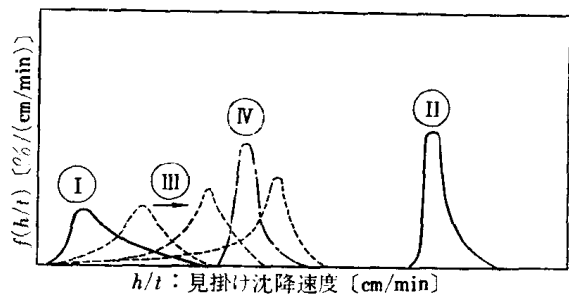
まず、固体粒子群が第3図Ⅰのごとき速度分布のまま挙動する場合について考える。

すなわち、懸濁液中の懸濁質が第3図・Ⅰのように広い速度分布を有し、第2図中の実線Ⅰのごとき固液分離過程をとる場合には、回分沈降試験を行なって求められる懸濁液内の粒子濃度分布状態から、次式によって算出して得られる固体粒子除去率 F_T すなわち

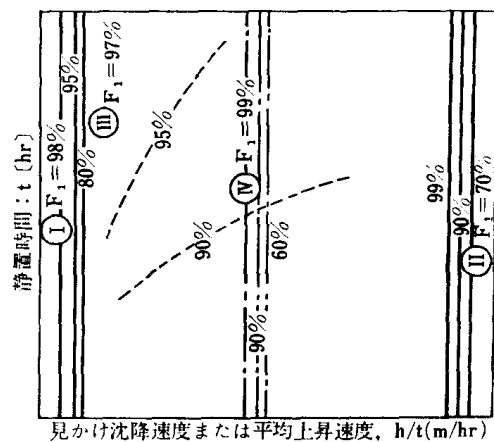
$$F_T = \left(1 - \frac{\bar{w}}{w_f}\right) \times 100 = \left[1 - \frac{1}{h} \int_0^h \frac{w}{w_f} \cdot dh\right] \times 100\% \quad (6)$$



第2図



第3図



第4図

をパラメーターとした“沈降速度（理想的条件としては沈降槽内における平均上昇速度 $R_0 = q_0/A_T$ に相当すると考えてもよい）と沈降時間（理想的条件においては沈降槽の沈降分離層部における平均滞留時間 $t_L = V_0/q_0$ に相当すると考えてもよい）との関係”は、第4図の実線Ⅰのように、沈降速度が支配的となる。

したがって、このような懸濁液を処理する沈降槽内における粒子回収率 $F_{T\sigma}$ は、面積効率 η_s を考慮にいれれば、一般に次式で与えられる。

$$F_{T\sigma} = (100 - D_L) + \frac{1}{q_0/(u_s \cdot A_T)} \int_0^{D_L} \frac{h}{t} \cdot dD$$

$$= (100 - D_L) + \frac{\eta_s}{R_0} \int_0^{D_L} \frac{h}{t} \cdot dD \quad (7)$$

すなわち、このような沈降槽の設計に際しては、槽内流動状態の影響 ($\eta_s \leq 1.0$) をも考慮にいれた沈降面積 A_T を与えさえすればよいことになり、沈降槽内における清澄層部 (Clarification zone) の深さ $h_L (= H_T - h_f)$ をあまり問題にしなくてもよいことになる。

上式から、沈降槽の沈降面積 A_T を求めれば

$$A_T = \frac{q_0 \{F_{T\sigma} - (100 - D_L)\}}{\eta_s \int_0^{D_L} \frac{h}{t} \cdot dD} = \frac{q_f \cdot y (w_L - y w_0)}{\eta_s \int_0^{w_L} \frac{h}{t} \cdot dw} \quad (8)$$

なる関係が得られるから、粒子群の沈降速度が非常に小さい方に分布している場合には、所期の粒子除去率すなわち、

$$F_T = \left[1 - \frac{q_0 \cdot w_0}{q_f \cdot w_f} \right] \times 100 = \left[1 - y \frac{w_0}{w_f} \right] \times 100 [\%] \quad (9)$$

に到達するためには膨大な沈降面積を要することになる。

したがって、このように懸濁液中の粒子群の沈降速度が小さい場合には、分離面としての沈降面積を増加する手段として、多段型の沈降分離槽 (Tray Thickener) や、槽内に分離面としての斜流板や浮標などを入れた形の沈降槽（宇野式などはこの範疇に入る）の適用などが考えられるわけであるが、このことについては、次項以下で述べる手法との“建設費 (Erection cost) ならびに維持費 (Running cost)”などをも含めた総合的比較検討を行なう必要がある。

2.2 凝集剤添加と凝集沈降

2.2.1 完全集合させた場合

前項の懸濁液に非常に強力な凝集剤を添加して十分な集合条件を与えることによって、第3図中の実線Ⅱのごとき沈降速度分布を有し、第2図中の実線Ⅱのごとき固液分離過程をとるような比較的に安定な凝集体 (Flocs) を形成せしめ得る場合について考えれば、平均上昇速度と滞留時間との関係は第4図中の実線Ⅱのようになり、この場合の沈降分離槽は、前項と同様に、(8)式において

$$\frac{h}{t} = \left[\frac{h}{t} \right]_f = R_f, \quad D_L \doteq 1.00, \quad F_T \doteq 1.00$$

とおける条件下では、

$$A_T = \frac{q_e}{\eta_s \cdot \left[\frac{h}{t} \right]_f} = \frac{q_e}{\eta_s R_f} \quad (10)$$

となり、これは、Coe らが均質性凝集懸濁液に近い青化泥漿について求めた式を、一般的に誘導してきたことになる。

すなわち、このような均質性スラリーを処理すべき沈降槽については、(10)式によって算出した沈降面積 A_T を与えるか、Coe らがシックナーについて導いた設計式

$$A_u = \frac{F_f - D_u}{24 R_f \cdot \rho} \sim A_T / w_f \cdot q_f \quad (11)$$

によって算出された数値に、面積効率 η_s を考慮にいれてやればよいことがわかる。

この場合のように、前項 2・1 に比べて、凝集体としての沈降速度が非常に大きい方に分布している場合には、所要の沈降面積は著しく小さくてよいことにもなるが、実際には、分離装置としての建設費の節減効果と薬品添加にもとづく維持費の増大とについて比較検討してゆく必要がある。

2・2・2 不完全に集合させた場合

これに対して、与えられた懸濁液 2・1 に不十分な凝集条件を与えた場合には、懸濁液中の固形物については、その分離過程において多少とも分散・集合などが進行するものと覚悟して検討を進めて行かなければならないことがしばしばである。

すなわち、このような部分集合状態の懸濁質の速度分布は、第 3 図中の点線群Ⅲのように時間経過すなわち固液分離過程において移行し、第 2 図中の点線群Ⅲのごとき沈降分離過程をとる場合が多いから、この場合の粒子除去率は、もはや前項のように沈降速度のみでなく、滞留時間によっても左右される（第 4 図点線Ⅲ参照）から、この場合の沈降槽の設計に当っては、(10)式によって算出される沈降面積と、次式によって算出されるような清澄層の深さ h_L とを与えてやらなければならない。

沈降槽内における清澄層容積 V_O は、

$$V_O = \frac{q_e \cdot t_a}{\eta_T} \quad (12)$$

したがって、槽内における清澄層の深さ h_L は、(10)、(12)式より、

$$h_L = \frac{V_O}{A_T} = \frac{R_e \cdot t_a}{\eta_T} = \frac{R_f \cdot \eta_s \cdot t_a}{\eta_T} \quad (13)$$

すなわち、この場合の沈降槽は、第 4 図のように、2・1 に対しては小なる沈降面積となるが維持費が大、2・2・1 に対しては大なる沈降面積となるが維持費が小となってくるわけであるが、上述したように、この場合の解析法は比較的むづかしく、そのうえ面積効率 η_s や槽内容積効率 η_T などの装置上の因子の影響が無視し得ないほど大きくなるから、このような場合には、給泥ならびに溢流機構などに対する装置設計上の配慮がとくに要求されるというようなことも少なくない。

しかも、実際の固液分離操作の対象となるような懸濁液は、一般に、2・1、2・2・1 のような両極端に相当する場合よりも、どちらかといえば、2・2・2 に近い部分集合状態に相当する条件下で与えら

れることが多いということを考えあわせれば、このような懸濁液中における微細粒子群の集合機構ならびにその分離現象に関する系統的研究が重要な意義を有するということは容易に首肯されよう

2.3 濃泥の循環効果

さらに、2.2.2のごとき懸濁液（粒子濃度 w_0 ）を沈降分離する場合に、その沈降濃縮槽の排泥のような濃厚懸濁液 Slurry の一部を、流入懸濁液中に循環流入せしめることによって、給泥としての粒子濃度 w_f を上げて第3図中の鎖線IVのごとき沈降速度分布がとれ、第2図中の実線IVのように比較的安定な界面を形成して固液分離するような条件を与えることができれば、槽内における固体粒子群の回収状態は第4図中の鎖線IVのごとき関係で表わされる。

したがって、このような場合の沈降槽は、クラリファイヤーとしての適用よりはシックナーとしての運転条件となるから、2.2.1 などと同様に(10)または(11)式によって算出される沈降面積を与えてやればよいことになる。

このようなくふうをすることによって、所要の沈降面積を、原液のままで固液分離する場合よりも縮少しうることが少なくないばかりでなく、清澄層容積や槽内流動の影響などに関する配慮があまり必要でないような比較的安定な操業をも期待しうる場合も少なくないようである。

このことは、懸濁液中の粒子群の集合速度が粒子相互間の衝突数の増加とともに促進されるといふ Smoluchoski や Whitlaw らの一般的原則や、筆者らが導いた実験式すなわち、

$$-dw/dt = k_c(w - w_\infty)^2 \quad (14)$$

$$\frac{1}{w - w_\infty} - \frac{1}{w_t - w_\infty} = k_c(t - t_i) \quad (15)$$

に对照しても首肯しうところであるが、さらに、このようなスラリー循環によって懸濁質の集合特性が第2図中の鎖線Vのように促進されるような場合には、沈降分離装置に関する設計上のいっそうの改善ならびに開発が期待できよう。

以上のことは、‘凝集沈殿槽における接触効果たとえばスラリー循環の効果’などについても同時に考察したことになるが、一般に、市販の凝集沈殿装置は、いずれも同一の槽内において、供給懸濁液中の微細粒子群と既成スラリー中の凝集体 (Flocs) との接触効果を高能率に行なうことによって、固液分離に要する沈降面積ならびに容積などをできるだけ縮小しようという装置設計上の努力が払われているものが多い。

したがって、それぞれの凝集沈殿装置設計上の因子と上述のごとき懸濁液調製上の因子との関係は、それだけにいっそう複雑となってくるわけで、これを、定量的な形で与えることは容易ではなく、今後の研究に俟たねばならない点も少なくない。

3. 沈降槽ならびに凝集沈殿槽内に起こる流動状態

沈降濃縮槽や凝集沈殿槽内で、供給懸濁液中の固体粒子群を効率よく沈降分離するためには、槽内流動の乱れの防止（面積効率 η_s の増大）や容積効率 η_T などをも考慮にいれて、適当な沈降面積、槽の深さなどを決定しなければならない。

一般に、沈降槽内に起こる流動は、それぞれの固液分離条件に応じて著しく異なった現象を呈することが多く一概には論ずることができないほどであるが、これに関連する主要な因子として考えられるものをあげれば次のとおりである。

3.1 沈降槽の型式と構造

i) 沈降槽を長方形 Rectangular, 正方形 Squarex, あるいは円形のいずれとするか、また、それぞれに設けられる給泥あるいは集泥機構にもとづく影響

ii) 槽長 l_p または槽半径 r_p と、沈降槽の深さ H_T (濃縮層の深さ h_c が無視できないときは、 $h_L = H_T - h_c$ を採るべきである) との関係が異なれば、同形の沈降槽で同一の給泥条件でも、

$$\text{角型沈降槽} : R_c/R_h = H_T/l_p (= h_L/l_p) \quad (16)$$

$$\text{円型沈降槽} : R_c/R_h = 2H_T/r_p (= 2h_L/r_p) \quad (17)$$

$$\text{見掛け滞留時間} : t_L = H_T/R_c (= h_L/R_c) \quad (18)$$

なる関係式からもわかるように、槽内における流動状態は操作条件によっても変わってくる。

Ingersoll は、槽底部における沈積粒子に対する洗滌効果が、槽内における粒子除去率に対して影響を及ぼすことを考えて、沈降速度 v_t なる沈積粒子が洗滌されないための条件として

$$\{(\tau_0 g_c / \rho)^{1/2} / v_t\} < 1 \sim 1/2 \quad (19)$$

この関係を、(16)、(17) 式などと関連させれば、沈降槽内における清澄層の深さ h_L の設定のための一つの限界が与えられよう。

2.2 給泥機構

i) 給泥樋 (Feed Launder) の形状、断面積ならびにその構造

ii) 給泥だめの型式・構造

沈降槽内に起こる流動状態は、流入懸濁液の有する運動エネルギーに応じて、局所的な流れや循環流 (Return Flow) などをも呈しやすいから、給泥部においてまずその運動量を分散せしめることが必要で、これについては、Morill や Hubbel および Fitch らの研究報告もある。

3.3 給泥懸濁液の特性とくに密度流れ (Density Current)

沈降槽に供給された懸濁液は、槽内における流動過程において、給泥機構とくに前項の給泥だめのいかんなどの与えられた条件下で沈降可能な粒子群を失いながら移動すると考えられるから、沈降槽内には溢流粒子濃度 w_o から排泥粒子濃度 w_u に至るまでの粒子濃度分布状態が構成され、給泥は、これより希薄な清澄層内を流下して、その下方 (普通は同一粒子濃度の層近傍) に広がって流動してゆくことになると思われる。

このような懸濁液の密度差にもとづいて生ずる下降速度 R_d (Density Current) を、筆者らは次のように表わし、実験的にも検証してきた。

$$\begin{aligned} R_d &= \lambda \cdot \{2g(h_L - h_f)(\rho_f - \rho_o)/\rho_f\}^{1/2} \\ &= \lambda \cdot \left\{2g(h_L - h_L) \cdot \frac{(w_f - w)(1 - \rho_s)}{1 + w_f(1 - 1/\rho_s)}\right\}^{1/2} = \lambda \cdot R_{d0} \end{aligned} \quad (20)$$

上式は、供給懸濁液と槽内に形成される清澄層との密度差 $(\rho_f - \rho_o)$ ならびに清澄層の深さ h_L と

給泥だめの深さ h_f との差が、槽内に起こる流動状態に著しい影響を及ぼしうることを示している。

近年、この密度差を利用した分離装置とくに凝集沈殿装置（たとえば、千代田化工建設（株）の Hi Aqua Finer など）も研究開発され、操業実績などもあげているようである。

3.4 流入速度ならびに溢流速度

Dobbins および Camp らは、槽内流れの乱流混合係数 (Mixing Coefficient) と粒子除去率との関係などについて報告しているが、実際の装置設計にそのまま適用できる段階に達しているとはいえないようである。

溢流速度の影響については、Kalinski らが、槽周壁部における溢出速度 ($q_e/\pi^2 r_p h_L$) を槽内における平均上昇速度 ($q_e/\pi r_p^2$) より小さくとるようにしなければならないとしている。

このことは、清澄層部の深さ h_L を (r_p/π) より大きく採ればよいことを示しており、

$$h_L \geq r_p/\pi \quad (21)$$

沈降槽内における清澄層の深さの設定ならびに溢流機構の設計（上記の関係は、槽周壁だけに溢流溝が設けられた場合について導かれたものであるが、槽周壁部だけで (21) 式の条件が満たされない場合には、さらに槽内中央部に溢流溝を設けるか、放射状に溢流溝を設置すべきであることを示している）に際して、1つの基準となり得る。

4. 濃 縮 脱 水

沈降槽内において、濃縮層 Thickening Zone の泥漿が所期の排泥粒子濃度に達するためには、一定の濃縮脱水時間を与えるようにしなければならない。

したがって、装置的には、一定容積の濃泥が槽内に滞留することになるから、これに必要な濃縮層容積 V_t をとっておかなければならない。

この決定については、Coe らをはじめとして Mishler, Deane ならびに Roberts らの方法もあるが、これらはいずれも懸濁液の界面の沈下状態から求めた方法で、濃縮層内に濃度勾配のある一般の場合には必ずしも妥当とは云えないようである。

一方、圧密論から誘導された川島氏らの関係式もあるが、これらがそのまま実装置の設計に役立つためには、さらに粒子相互の集合性などをも考慮に入れてゆく必要があろう。

したがって、ここでは、Roberts らの決定方法を述べておくことにする。

濃厚懸濁液の界面沈下試験結果 Thickening Test から算出した濃縮脱水速度 ($-dD/dt$) が次式を大略満足する場合

$$-dD/dt = k_t(D - D_\infty) \quad (22)$$

濃縮層の深さ h_t は、

$$h_t = \frac{V_t}{A_T} = \frac{V_u}{A_T} \cdot T = \frac{t_u}{A_T} (w_f \cdot q_f \cdot F_T) \left(D_\infty + \frac{1}{\rho_s} + \frac{D_o - D_u}{k_t \cdot t_u} \right) \quad (23)$$

しかしながら、上式の関係は、Coe らの提議した均質凝集性懸濁液のように懸濁固形物が強度に集合しているような懸濁液については、比較的に成立することもあるが、一般的には必ずしも成

立するといえ難いから、筆者らは、濃縮層底部における粒子濃度の時間的变化 $w=\phi(t)$ を実験的に測定して、

$$V_t = V_u \cdot (24 \cdot w_f \cdot q_f \cdot F_T) = (24 \cdot w_f \cdot q_f \cdot F_T) \int_{0w}^{t_u} \frac{1}{w} \cdot dt \quad (24)$$

$$h_t = \frac{V_t}{A_T} = V_u \cdot \frac{24 \cdot w_f \cdot q_f}{A_T} \cdot F_T = V_u \frac{24}{A_T} \cdot w_u \cdot q_u = \frac{24 \cdot w_f \cdot q_f F_T}{A_T} \int_{0w}^{t_u} \frac{1}{w} \cdot dt \quad (25)$$

なる関係から算出する方がより一般的であるとした。

さらに、実際の沈降槽では、集泥楨 (Rake) などによる濃縮促進効果 Rake Action (これは、レーキの緩攪拌を受けて濃縮層内の懸濁質が再配列を起こしてさらに濃厚泥漿となる) などによって、排泥濃度も影響されるから、装置設計に当っては、濃泥の集泥機構・排泥の輸送特性ならびに沈降槽の建設費などをも考慮にいて、濃縮層の深さを一定限度内におさえるような装置全体に対する検討も必要となってくる。

たとえば、排泥濃度はポンプ輸送のできる限度内におさえないといけないし、沈降槽としての深さ H_T すなわち、

$$H_T = h_L + h_t = V_o/A_T + V_t/A_T \quad (26)$$

は、建設費ならびに建設地点などの関係から制約されるのは当然で、実際の装置設計基準としてとれる濃縮層の深さはせいぜい 1~1.5m までを限度とすべきであろう。

5. 集 泥 楨

集泥楨の作用は、沈降槽の連続運転の可否をも左右するもので、これについては、円形沈降槽に関する R.Chelminski の関係式などもあるが、この適用に際して必要な摩擦係数の測定法などに問題点が残っている上に、実際の運転始動時あるいは再開時にしばしば惹き起こす過負荷状態 Over Load に対しては安全装置 Safety Device などを取りつけて操業の安全をはからなければならぬといった現状であることや、筆者らとしても長期にわたる一連の試験検討中であることなどを考慮してここでは詳述を避けることにした。

使 用 記 号

A, A_T : それぞれの流れに垂直な断面積ならびに装置上の分離面積	[cm ² , m ²]
D, D_L : それぞれの粒子径ならびにまでの積算重量百分率	[%]
D_u, F_f : それぞれの沈降分離槽の排泥ならびに給泥の希釈度	[tons of liq/ton of solid]
g_c : 重量換算係数	[kg · m/kg · sec ²]
h, h_L : それぞれの自由表面からの深さ、ならびに清澄層の深さ	[cm, m]
q_o, q_f : それぞれの溢流ならびに給泥の流量	[m ³ /hr]
$R_o (=q_o/A_T)$: 見掛け平均上昇速度	[cm/sec, m/hr]
$R_f (=h/t_f)$: フロックあるいは界面の沈下速度	[m/hr]
t_o, t_i : それぞれ清澄に要する時間ならびに凝集の開始する時間	[min, hr]
$w, \bar{w}, w_o$: それぞれ懸濁液中の粒子濃度、平均粒子濃度、溢流中の粒子濃度	[kg/m ³ , g/l]
w_o, w_f : それぞれ原液中の粒子濃度、給泥としての懸濁液中の粒子濃度	[kg/m ³ , g/l]
w_i, w_{∞} : それぞれ凝集開始時における懸濁液中の粒子濃度ならびに無限時	

間後の粒子濃度	[kg/m ³ , g/l]
W : 固体粒子群の重量	[kg, g]
V, V_c : それぞれの流体の容積ならびに清澄層の容積	[cm ³ , m ³]
x : 粒子径	[cm, m]
$x(=q_s/q_f)$: 溢流の給泥に対する流量比	[—]
η_s, η_T : それぞれ沈降槽の面積効率ならびに清澄層の容積効率	[—]
ρ, ρ_s : それぞれ流体ならび固体の密度	[g/cc, kg/m ³]
ε : 空隙率	[—]
λ : 補正係数	[—]
t_u : 濃縮時間	[min, hr]

参 考 文 献

- 1) Camp, T. R : *Trans. Am. Soc. Civil Engrs.*, 111, 895.952 (1946)
- 2) Camp, T. R : *Sewage and Ind. Waste*, 25, 1 (1953)
- 3) Coe, H. S. & Clevenger, G. H. : *Trans. Am. Inst. Mining Engrs.*, 55, 356 (1916)
- 4) Commings, E. W. : *I. E. C.* 46, 1164 (1954)
- 5) Conway, R. A. et al.: *Chem. Eng.*, 18, 167 (1961)
- 6) Dobbins, W. A. : *Trans. Am. Soc. C. E.*, 109, 629 (1944)
- 7) Emmett, R. C., et al. : Am. I. Mining Engrs. Annual Meeting (1963)
- 8) Elliasen, R. : *Trans. Am. Soc. Civil Engrs.*, 111, 895 (1944)
- 9) Fair, G. M. : *Water Supply and Waste Water Disposal* (1959)
- 10) Fiedler, R. A. : *Sewage and Ind. Waste*, 31, 1016 (1959)
- 11) Fitch, E. B. : *Ibid.*, 28, 1 (1956), 29, 1123 (1957)
- 12) Fitch, E. B. : *Biological Treatment of Sewage and Ind. Waste*, 2, 159 (1957)
- 13) Fitch, E. B. : *J. Water Pollution Control Fed*, 32, 147 (1960)
- 14) Gaudin, A. M. : *Mining Eng.*, 11, 613 (1959)
- 15) Gould, R. H. : *Civil Eng.*, 13, 279 (1943)
- 16) Hazen, A. : *Trans. Am. Soc. Civil Engrs.*, 53, 45 (1904)
- 17) Hubbel, G. H. : *J. Am. Water Works Assoc.*, 30, 335 (1938)
- 18) Ingersol, A. C. : *Proc. Am. Soc. Civil Eng.* 81 (1955)
- 19) 城温三: 選研彙, 10, 209 (1955)
- 20) Kalinski, A. A. : *J. A. W. W. Assoc.*, 40, 113 (1948)
- 21) Kynch, G. J. : *Trans. Faraday Soc.*, 48, 161 (1952)
- 22) 川島晋: 水道協会誌, No.247, 9 (1958)
- 23) 河村勸: 同上, No.284, 8 (1968) No.292, 26 (1959), No.293, 13 (1950)
- 24) Michaels, A. S. : *I. & E. C., Fundamentals.* 1, 24 (1962)
- 25) Morill, A. B. : *J. A. W. W. Assoc.* 24, 1442 (1932)
- 26) 大山義年: 化学工学, II (1953)
- 27) 大山, 伊藤: 化学工学, 17, 492 (1953)
- 28) 大山, 吉野: 化学工学, 17, 103 (1953), 18, 314 (1954)
- 29) 大山, 吉野: 化学工学協会研究発表要旨, 名古屋 (1960), 浜松 (1962) 28年会 (1963)
- 30) Roberts, E. J. : *Mining. Eng.*, 8, 113 (1956) (92頁へ続く)

東京農工大学工学部 吉 野 善 彌

2. 凝 集 剤 の 選 定

2.1 凝 集 剤 の 種 類 と 選 定

1. 凝 結・凝 集

化学が原子・分子の変化から物質、変化をみる学問であるのにたいして、凝集や分散は分子より大きい粒子、すなわちコロイドや粗大分散粒子を対象とし、その集合・離散に関する性状や変化をみるものである。

液体のなかにある粒子の分散をよくする薬剤が分散剤で、集合・接着（凝結および凝集とよばれる）させ、フロックを生成させる薬剤が凝結剤および凝集剤である。

凝結はコロイドがその表面電位（ ζ -Potential）を低下して相互に接着するのをいい、凝集は粗大分散粒子の接着によるフロック生成をいう。

第1表に分散系・接着（合一をふくむ）のための薬剤を示している。

第1表 分散系と分散・接着（合一）のための薬剤

分散媒	分散質	分 散 系	分散のための薬剤	接着合一のための薬剤
液 体	固 体	懸 濁 液	分 散 剤	凝結剤・凝集剤
	液 体	乳 濁 液 (エマルジョン)	乳 化 剤	凝結剤・凝集剤・エマルジョン解消剤
	(気 体)	(泡 沫)	(起 泡 剤)	(消 泡 剤)

2. 凝結剤・凝集剤の種類

凝結剤・凝集剤としては水溶性の各種の無機物、有機物が使用され、まれ固体微粉が使用されることがある。

無機物は一般に低分子の塩で、高分子系のものに活性ケイ酸（活性シリカ）がある。なお中性付近でのアルミニウム塩や鉄塩の作用は一種のオゴマーの生成と作用が考えられている。

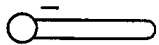
有機物は界面活性剤と高分子物質に大別される。もちろん低分子の一般有機塩も有効であるが、作用機構は無機の低分子電解質と同様に考えられ、価格の点、その他の理由からほとんど使用されない。界面活性剤の利用はイオン性のもので、それらは吸着活性でかなり有効であるが、作用機構は懸濁粒子の ζ -電位の低下を主とするものであり、無機電解質にくらべ価格の点で遜色があり一般的でない。有機物の凝結剤・凝集剤の主体をしめるのは水溶性高分子物質である。第1-1, 2, 3表に凝結剤・凝集剤の種類を類別して示している。

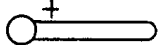
第2-1表 無 機 物

分 類	物 質
無 機 塩	硫酸アルミニウム 塩基性塩化アルミニウム アルミン酸ナトリウム 硫酸第二鉄 硫酸第一鉄 塩化第二鉄 塩化亜鉛
酸	硫 酸 塩 酸 二酸化炭素
ア ル カ リ	炭酸ナトリウム 水酸化ナトリウム 石 灰
金属 電 解 産 物	電解水酸化アルミニウム 電解水酸化鉄
固 体 微 粉	カオリン ベントナイト 酸性白土 フライ・アッシュ その他
そ の 他	活性ケイ酸

第2-2表 界面活性剤

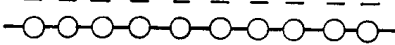
分 類	物 質
陰 イ オ ン 性	ラウリン酸ナトリウム ステアリン酸ナトリウム オレイン酸ナトリウム ドデシルベンゼンスルホン酸 ナトリウム ロジン酸ナトリウム その他
陽 イ オ ン 性	ドデシルアミン・アセテート オクタデルアミン・アセテート ロジンアミン・アセテート オクタデシル・トリメチル・アン モニウム・クロライド オクデシル・ジメチル・ベンジル ・アンモニウム・クロライド そ の 他

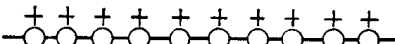
備考：陰イオン性界面活性剤 活性基  疎水基

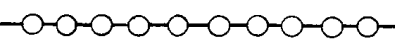
陽イオン性界面活性剤 活性基  疎水基

第2-3表 高 分 子 凝 集 剤

分 類		物 質
重 合 度	イ オ ン 性	
低 重 合 度 (分子量約 1,000~数万)	陰 イ オ ン 性	アルギン酸ナトリウム, C.M.C.-Na, その他
	陽 イ オ ン 性	水溶性アニリン樹脂塩酸塩, ポリチオ尿素酢酸塩, ポリエチレンイ ミン, ポリビリルベンジルトリメチルアンモニウムクロライド, そ の他
	非 イ オ ン 性	でんぶん, 水溶性尿素樹脂, その他
	両 性	ゼラチン, その他
高 重 合 度 (分子量数 十万~数百万)	陰 イ オ ン 性	ポリアクリル酸ナトリウム, マレイン酸共重合体塩, ポリアクリル アミド部分加水分解物塩, その他
	陽 イ オ ン 性	ポリビニルピリジン塩酸塩, ビニルピリジン共重合体塩, その他
	非 イ オ ン 性	ポリアクリルアミド, ポリオキシエチレン

備考：陰イオン性高分子凝集剤  —○—はイオン性または非

陽 〃  イオン性活性性 (親水基)

非 〃 

3. 作用機構

化学反応における原子・分子の相互作用（化学反応・分解）が主原子価によるものであるのに対して、粒子間の相互作用は粒子間の接近にともなって現われる反発力や引力が一般には ζ -電位や van der Waals 力や副原子価による場合が多い。しかし、イオン性分子コロイドの相互作用の場合のように主原子価による化学反応の一種とみることができる場合もある。

凝結剤・凝集剤の作用機構はそれらの種類と特長のほか、懸濁物の種類と表面の性質、懸濁物の粒度、濃度、および懸濁液の pH、溶解塩類、また温度、かきまぜ、その他の物理的作用の影響から考察されなければならない。

疎水性懸濁粒子にたいする凝結剤・凝集剤の凝結・凝集作用は

- (1) 凝結剤のイオン性による懸濁物の ζ -電位の低下
- (2) 凝集剤の吸着にもとづく架橋吸着

が考えられており、コロイドの凝結にはとくに ζ -電位の低下が、疎大分散粒子の凝集には架橋吸着が重要である。なお親水性懸濁物の場合には粒子の脱水も重要な要素で、また粒子の表面張力（疎水性・親水性）が重要な要素である場合もある。

3-1 懸濁物粒度と凝結剤・凝集剤の特性

懸濁物粒度と凝結剤・凝集剤の特性あいだには第3表に示すような関係が認められる。その理論はおもに粒子表面の ζ -電位の低下と架橋吸着の作用から解釈でき、薬剤を選定するにさいしては、この相関について懸濁液の性状（濁りぐあい）との関連から、まず考慮する必要がある。

3-2 凝結剤のイオン性とコロイドの ζ -電位の低下による凝結

安定な疎水性コロイドの場合、粒子の接近にともなって現われる斥力は粒子の表面荷電によるも

第3表 粒度と凝結剤・凝集剤の特性*

懸濁物 粒 度	低 分 子			高 分 子			
	無 機 塩		界 面 活 性 剤	低 度 重 合 体		高 度 重 合 体	
	反対イオン	反対イオン		反対イオン	非イオン (同イオン)	反対イオン	非イオン (同イオン)
粗 粒	×	×	×	△	△	○	○
細 粒	×・△	△	△	○	○	○	○
コロイド	○	○	×	○	×	○	×・△

符号：○有効 △部分的凝結または凝結しても沈降促進効力は小さい ×無効

備考：(1) 凝集剤はいずれも懸濁物へよく吸着されるものである

(2) 反対イオンは懸濁粒子の表面荷電と反対符号のイオンの意味で、同イオンは表面荷電と同符号のイオンの意味である

(3) 粗粒は大約1mm以下74 μ の粒度分をいい、細粒は大約74 μ 以下コロイド近くまでの粒度分をいう

(4) 粗粒にたいして高重合体が有効であるが、その効力は約1mm以上のいちじるしく粗い粒度にたいしては小さい

(5) 一般に重合度が大きいものほど凝集粒子の大きさは大きい

*〔野田、日化 82. 2611 (1961)〕

のであり、さらに接近した場合の引力は van der Waals 力である場合が多い。凝結剤は粒子の接近にともなって現われる、粒子の表面電位（同符号）による斥力を粒子の ζ -電位を低下させることによって、すなわち粒子を引力が作用するまで接近させるに必要なエネルギーを低下させ、ブラウン運動やかきまぜによる粒子の衝突を可能にし粒子間の引力による接着力を可能にする。

第4表に陰性コロイドに対する各種電解質の凝結価の比較の例を示している。

3.3 凝集剤の架橋吸着と粗大分散粒子の凝集

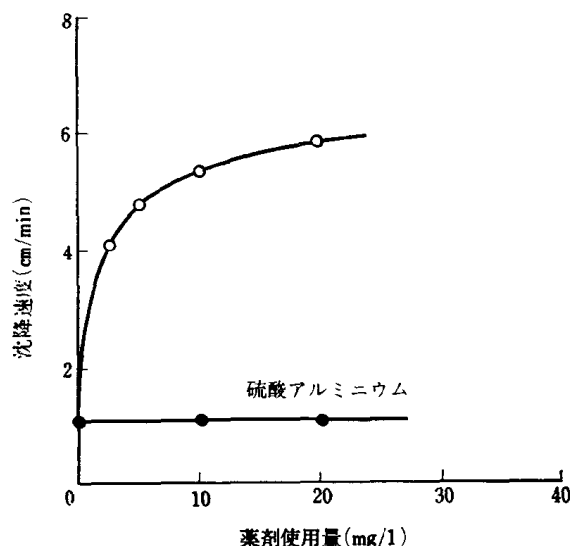
凝集剤の作用は粒子間の引力を凝集剤の吸着力を介してより大にし、安定なフロック生成が困難な粗大分散粒子をより大きな力で接着力させ、安定なフロックを生成させるものである。

第1図および第2図に粗大分散粒子に対する高分子凝集剤の効果の例を示している。

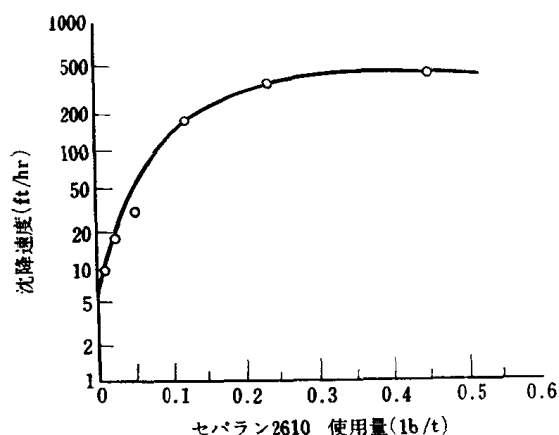
架橋吸着の強さは粒子と凝集剤の分子間力が関与し、凝集剤を吸着している粒子表面と吸着していない粒子表面の接着力できまり、模型的に第3図または第4図で解釈できる。

3.4 高分子凝集剤の重合度と凝集効果

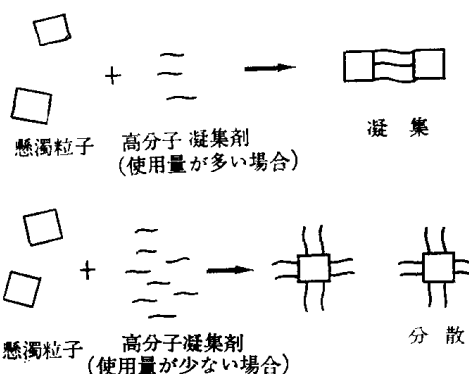
重合度の問題については、高分子凝集剤の重合度と架橋作用、多価電解質の重合度と凝結価、金



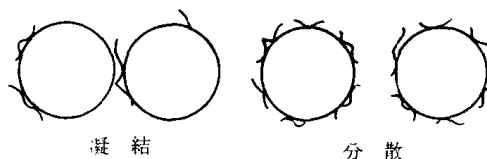
第1図 n -ブチルアミン-エピクロロヒドリン重縮合物によるカオリン懸濁液の沈降促進
* (野田, 工業用水, No. 29, 34(1961))



第2図 酸抽出ウラン酸懸濁液（濃度16%におけるセバラン2610使用量と沈降速度の関係



第3図 高分子凝集剤による凝集機構の模型的解釈*
* A.B. Michaels, *Ind. Eng. Chem.*, 46 1485 (1954)



第4図 高分子凝集剤による凝集機構の模型的解釈*
* (野田, 日化 82, 1161 (1961))