

固体流束曲線を用いた連続シックナーの解析

その他（別言語等） のタイトル	Analysis of Continuous Thickener Using Solid Flux-Concentration Curve
著者	小幡 英二, 渡辺 治夫
雑誌名	室蘭工業大学研究報告. 理工編
巻	9
号	2
ページ	423-432
発行年	1977-12-10
URL	http://hdl.handle.net/10258/3662

固体流束曲線を用いた連続シックナーの解析

小 幡 英 二・渡 辺 治 夫

Analysis of Continuous Thickener Using Solid Flux-Concentration Curve

Eiji Obata and Haruo Watanabe

Abstract

In this paper a continuous thickener operation at steady state was treated. Batch settling curves were classified into three types by initial concentration. At each concentration range, operating conditions, concentration distributions and area of thickener were observed experimentally and compared with the predicted values from solid flux-concentration curve.

The design of thickener area must be distinguished in feed slurry concentration whether it belongs to free settling of type I or hindered settling of types II and III. When feed concentration decreases below a certain limit, the suspended particles will be lost in the overflow without the change of feed solid flux. At steady state operation, underflow concentration was found to be independent of the depth of thickener.

緒 言

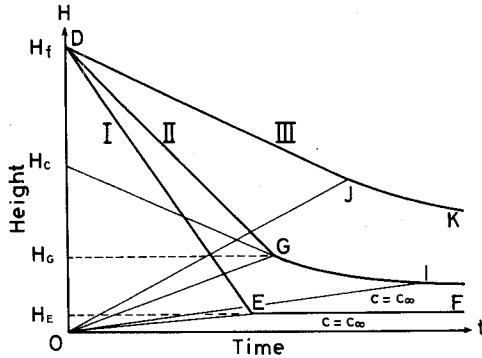
スラリーから固体を分離濃縮する連続シックナーの設計には所要面積と所要槽高の決定が含まれる。所要面積は回分沈降曲線¹⁾、もしくは固体流束(固体濃度と沈降速度の積)曲線を用いて決定される^{2,3,4)}。槽高決定法の確定した理論は確立されていないようである。連続シックナーの操作については固体流束曲線を用いる研究^{4,5)}がいくつか報告されているが、いずれも供給濃度の影響については言及していない。

本報では、供給濃度を3種のタイプに分類し、回分沈降曲線と固体流束曲線の関係を明らかにするとともに、連続シックナーの操作条件、所要面積、および定常操作において予測されるシックナー槽内濃度分布について実験結果と比較する。

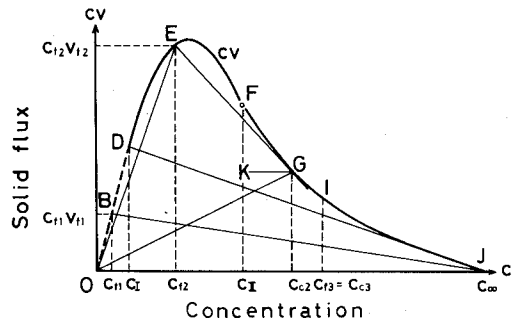
1. 回分沈降曲線と固体流束曲線

容器中のスラリーを攪拌静置とすると粒子は沈降し容器底に堆積して濃縮スラッジを形成する。ある濃度以上では沈降の途中で粒子けん濁層と清澄層の間に明瞭な界面が認められ、この沈降界面高さと時間をプロットしたものを回分沈降曲線と呼ぶ。回分沈降曲線は初濃度により3種のタイプにわけられる¹⁾。

図-1で定速沈降DEの終了とともに最終スラッジが形成されることを示すDEFをI類沈



図一 3種類の回分沈降曲線



図二 固体流束曲線

降と呼ぶ。この領域のスラリーは希薄でスラリー中の各粒子は自由沈降し、均一粒子群（単分散）では定速沈降界面が認められるが、分布のある粒子群（多分散）では明瞭な沈降界面が認められない。定速沈降DGの終了後、点Gで不連続に減速沈降に移行するDGIをII類沈降と呼ぶ。一般工業スラリーの多くはこの領域に属し、界面沈降速度が濃度のみの関数となることから、干渉沈降とも呼ばれる。スラッジ濃縮等の濃厚スラリーの沈降曲線は定速沈降DJの終了のち連続的に減速沈降へ移行するDJKのようになり、これをIII類沈降、あるいは圧密沈降と呼ぶ。

回分沈降における濃度 c [kg/m³] と定速沈降速度 v [m/sec] の関係を求め、 cv を c にたいしプロットすると図一2の固体流束 (cv) 曲線を得る。図一2で最終スラッジ濃度 c_{∞} より固体流束曲線への接線と固体流束曲線との交点をD、固体流束曲線の変曲点をFとし、D、Fに対応する濃度をそれぞれ c_I, c_{II} とすると、回分沈降試験の初濃度 c_f が $0 < c_f \leq c_I$ のときをI類沈降、 $c_I < c_f \leq c_{II}$ のときをII類沈降、 $c_{II} < c_f \leq c_{\infty}$ のときをIII類沈降と分類することができる。

連続シックナーの設計と操作は、供給固体量のほかに供給スラリーの沈降類別により違ったものとなる。

2. 固体流束曲線と連続シックナー操作

図一3の連続シックナーにおいて、沈降層濃度 c のスラリーの静水中における粒子沈降速度を v とすれば、全下降固体流束は c 層の沈降による下降固体流束 cv と排泥による下降固体流束 $c_u Q_u/A$ との和となり、これが排泥固体流束 $c_u Q_u/A$ に等しくなればならないから、固体流束収支として(1)式が成立する。

$$c(v + Q_u/A) = c_u Q_u/A \tag{1}$$

連続シックナーの定常操作状態では、沈降層は任意の高さにおいて(1)式を満足する均一濃度を示す。

同様に、溢流層においては沈降による下降固体流束 cv と溢流による上昇固体流束 cQ_o/A の差が溢流固体流束 $c_o Q_o/A$ に等しいから、固体流束収支として(2)式が成立する。

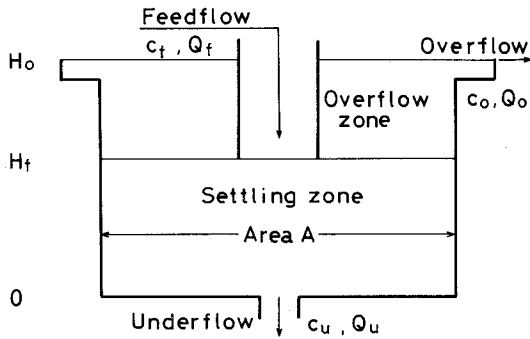


図-3 連続シクナー

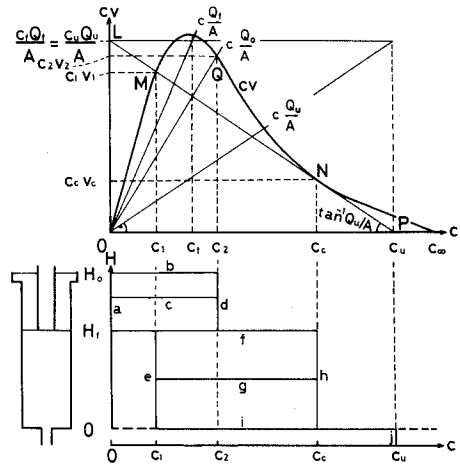


図-4 固体流束曲線と臨界負荷操作の理論槽内濃度分布

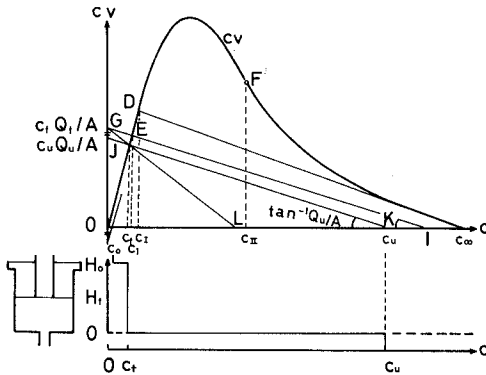


図-5 連続シクナー操作の作図法と理論槽内濃度分布 (I類沈降)

$$c(Q_0/A - v) = c_0 Q_0/A \quad (2)$$

溢流が清澄では $c_0 = 0$ であるから $c_u Q_u = c_f Q_f$ となり、図-4の固体流束曲線上に任意の濃度における供給固体流束 $c Q_f/A$ 、溢流固体流束 $c Q_0/A$ 、排泥固体流束 $c Q_u/A$ を操作線として表わすことができる。溢流が清澄の条件で排泥量が与えられれば、(1)式の右辺の排泥濃度 c_u を最大とする操作にたいし(3)式が成立する。

$$d(cv) / dc = -Q_u/A \quad (3)$$

この条件が成立するシクナー操作を臨界負荷操作と呼ぶ。(3)式を満足する直線は図-4のLNで、この傾きの符号をかえた値が排泥速度 Q_u/A を表わす。LNと固体流束曲線の交点M、および接点Nの濃度 c_1 、 c_c は(1)式を満足する沈降層濃度であり、LNとc軸の交点Pは(1)式の排泥濃度 c_u を表わす。溢流固体流束 $c Q_0/A$ と固体流束曲線の交点Qの濃度 c_2 は $c_0 = 0$ のとき(2)式を満足する溢流層濃度である。したがって、図-4より定常操作されている連続シクナーの槽内濃度分布はつぎの5個のうちいずれかに属することが認められる。

1. 沈降層が均一濃度である場合 (負荷を増加したとき) -afeij-
2. 沈降層内に濃度不連続面がある場合 -afeghij-
3. 沈降層が均一濃度である場合 (負荷を減少したとき) -afhij-
4. 溢流層内に濃度不連続面がある場合 -acdfhij-
5. 溢流層が均一濃度である場合 (溢流は清澄である) -abdfhij-

3. I類沈降濃度域（低濃度域）

この濃度域は図一2で初濃度 c_f が $0 < c_f \leq c_1$ ときわめて希薄のときであり、回分沈降曲線は図一1のDEFで示される。図一2の固体流束曲線で、初濃度 c_{f1} の単分散試料の回分沈降を考えると、その自由沈降速度はOBの傾きに等しく、容器底に形成されるスラッジ層濃度は c_∞ であり、その上昇速度はBJの傾きで表わされる。図一1の回分沈降曲線と図一2の固体流束曲線の対応はつぎようになる。

$$\angle DEH_E \equiv \angle BOJ, \angle EOt \equiv \angle BJO$$

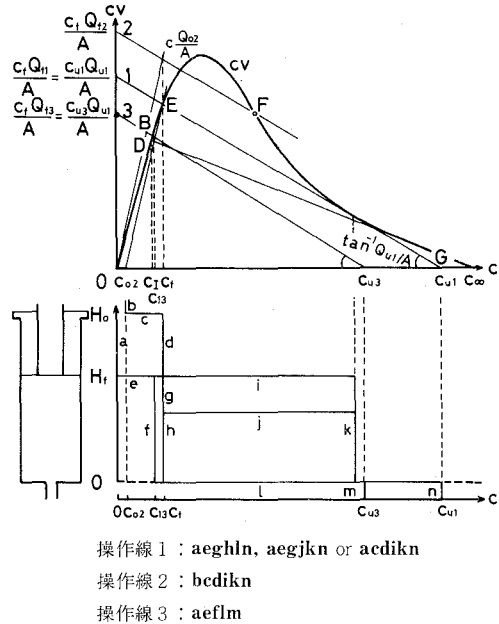
図一5で供給濃度 c_f が $c_f < c_1$ のとき、連続シックナーの排泥濃度は排泥速度により任意に設定できる。槽面積 A [m²] の連続シックナーで供給濃度 c_f 、供給量 Q_f 、排泥量 Q_u 、すなわち供給固体流束が $c_f Q_f / A$ で、排泥速度 Q_u / A が操作線GIの傾きとなる場合を考えてみる。図一5で供給濃度 c_f の供給面における下降固体流束は供給スラリーの回分沈降速度を v_f として(1)式より

$$c_f (v_f + Q_u / A) = c_u Q_u / A = OJ < c_f Q_f / A = OG \tag{4}$$

となり、 $(c_f Q_f - c_u Q_u) / A = JG$ の固体流束が溢流口から逸出する。操作線GIを満足する沈降層濃度は、直線GIと固体流束曲線の交点Eに対応する濃度 c_1 であるが、 $c_f Q_f / A < c_1 Q_f / A$ の条件により c_1 の沈降層濃度は存在できず直線JKを満足する沈降層濃度 c_f となることが知られる。

溢流濃度 c_o は物質収支より、 $c_o = (c_f Q_f - c_u Q_u) / Q_o$ であり、溢流層濃度 c_2 は(2)式を満足することから、 $c(Q_o / A - v) = (c_f Q_f - c_u Q_u) / A = c_o Q_o / A$ より $c = c_2 = c_f$ であることが知られる。したがって、直線GIで示される連続シックナーの定常操作における操作線は直線JKとなり、排泥濃度は c_u 、沈降層濃度は c_f 、溢流層濃度は c_o 、溢流濃度は c_o となる。全供給固体流束を処理して清澄溢流を得るには排泥速度を直線GLの傾きとしなければならない。

処理スラリー（供給）濃度がI類沈降濃度域の場合には、けん濁粒子の単分散、あるいは多分散にかかわらず粒子は自由沈降するから、固体粒子の完全捕集の条件より最小粒子の自由沈降速度を v_{min} として、シックナー所要面積 A は次式より求められる。



図一6 連続シックナー操作の作図法と理論槽内濃度分布（II類沈降）

$$Q_o/A = (Q_f - Q_u)/A = v_{min} \quad (5)$$

(5)式は粒子間の凝集、干渉を考慮していないので、供給濃度が大きいⅡ類、あるいはⅢ類沈降域では適用できないことになる。

4. Ⅱ類沈降濃度域 (中濃度域)

この濃度域は初濃度が図一2の c_1 と c_{II} の間にあるときで、回分沈降曲線は図一1の DGI で示される。一般に定速沈降終了点Gを臨界点と呼び、この時の清澄界面直下の濃度 c_c を臨界濃度と呼ぶ。

初濃度を図一2のEに対応する c_{f2} とすると、定速沈降速度はOEの傾きであり、臨界濃度はEより固体流束曲線へ引いた接線の接点Gの濃度 c_{c2} となり、その沈降速度はOGの傾きとなる。回分沈降試験における臨界濃度の上昇速度、すなわち図一1のOGの傾きは図一2でEGの傾きの符号をかえたものとなる。図一1の回分沈降曲線と図一2の固体流束曲線の対応はつぎのようになる。

$$\angle DGH_G \equiv \angle EOJ, \quad \angle GOt \equiv \angle EGK, \quad \angle H_cGH_c \equiv \angle GOJ$$

Ⅱ類回分沈降における臨界濃度は初濃度の増大とともに減少する傾向にあり、初濃度が固体流束曲線の変曲点の濃度 c_{II} に達すると、初濃度と臨界濃度は一致する。

供給濃度 c_f が図一2の $c_1 < c_f \leq c_{II}$ のとき、連続シックナーで清澄な溢流を得る条件から供給固体流束がきまれば最大排泥濃度は決定され、最大排泥濃度以下の任意の排泥濃度が排泥速度によりきまることが認められる。操作線が固体流束曲線に接する操作(図一6の直線1および図一7の直線3)を臨界負荷操作といい、排泥速度一定のもとで供給固体流束を増加させるか、あるいは供給固体流束を変えずに排泥速度を減少させると溢流は濁り出す。

図一6で供給濃度 c_f のスラリーを溢流清澄の条件で処理する最適操作、すなわち処理固体量が大きく、排泥濃度が大きい操作は点Eをとおり固体流束曲線に接する直線1で求められる。このとき $\tan \angle EGO = Q_{u1}/A$ であり、排泥濃度は c_{u1} である。供給濃度、排泥速度一定のもとで供給量を Q_{f1} から Q_{f2} に増加させると、排泥濃度は変わらず溢流中に単位時間にあたり $c_f (Q_{f2} - Q_{f1})$ の固体粒子が逸出する。この場合の溢流濃度 c_{o2} は次式より求められる。

$$c_{o2} (Q_{f2} - Q_{u1}) = c_{o2} Q_{o2} = c_f (Q_{f2} - Q_{f1}) \quad (6)$$

このように、溢流中に固体粒子が逸出する操作を過負荷操作と呼ぶ(図一6直線2)。

供給速度、排泥速度が一定のもとで、供給量を Q_{f3} に減少させると操作線は直線3となり、排泥濃度は c_{u1} から c_{u3} に減少し、沈降層濃度は直線3と固体流束曲線の交点Bに対応する濃度 c_{13} となる。このように操作線が固体流束曲線の下方に位置し、かつ沈降層濃度が供給濃度より小さくなる操作を未負荷操作と呼ぶ。

各操作線のシックナー槽内濃度分布を図一6に示す。ただし沈降層濃度と臨界濃度の濃度不

連続面jは任意の高さに停止することができる。

II類沈降濃度域のスラリーにたいするシックナー所要面積は(1)式の左辺、すなわちシックナー供給面下の沈降層における下降固体流束を最小にする濃度を求め、それに対応する面積となる。

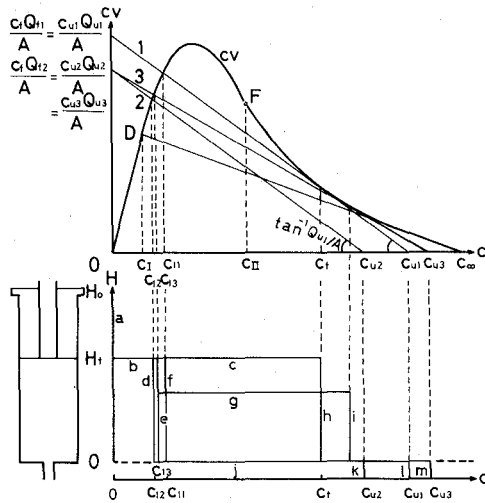
$$[cv+c(Q_u/A)]_{min}=c_f Q_f/A=c_u Q_u/A \tag{7}$$

上式の左辺が最小値となるのは $d(cv)/dc = -Q_u/A$ のときであり、(7)式を満足する濃度は図-4より c_1 および c_c である。図-4において c_u から固体流束曲線に引いた接線MNの傾きが $\tan^{-1}(Q_u/A)$ となるから、 Q_u が与えられれば溢流清澄の条件をみたす所要面積 A が求められる。あるいはMNと縦軸との交点Lは $c_f Q_f/A$ であるから、 c_f, Q_f を与えれば A が求められる。これが吉岡の方法であり、(7)式より求めるのが Coe and Clevenger の方法²⁾ であり、基本的には両者の所要面積が同一であることが認められる。ただしこのとき $c_f \geq c_1$ でなければならない。

5. III類沈降濃度域 (高濃度域)

この濃度域は図-2で初濃度 c_{f3} が c_{II} と c_{∞} の間に存在する場合である。図-1のDJKに示したように、この濃度域の回分沈降曲線は定速沈降から連続的に減速沈降に移行し、初濃度と臨界濃度は等しいものとなる。このことはシックナー供給濃度がII類沈降濃度域に存在するか、III類沈降濃度域に存在するかにより槽内濃度分布が著しく異なることを意味する。初濃度 c_f が

$c_{II} < c_f \leq c_{\infty}$ の場合のシックナー操作は工業的に利用されることは少ないが、固体流束曲線の性質を理解するのに重要である。



操作線 1 : abfjl or abfghl
 操作線 2 : abdj
 操作線 3 : abejm or abegim

図-7 連続シックナー操作の作図法と理論槽内濃度分布 (III類沈降)

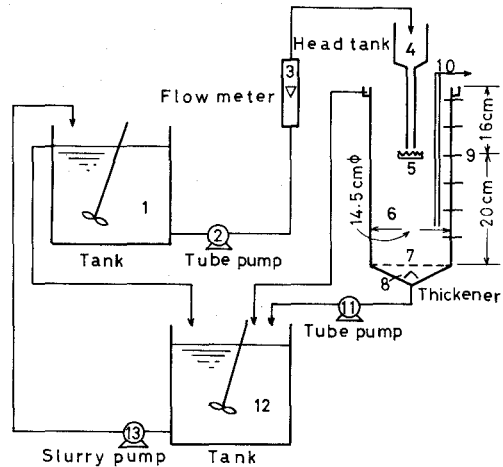


図-8 実験装置概略図

図一7において、初濃度を c_f 、供給量を Q_{f1} 、排泥量を Q_{u1} とすると操作線は直線1となり、固体流束曲線と接することから臨界負荷操作であることが知られる。III類沈降濃度域においては沈降層濃度は必ず供給濃度より小さく、供給濃度による制約はない。溢流清澄の条件で操作線1の(1)式を満足する沈降層濃度は c_{11} 、および c_f であり、排泥濃度は c_{u1} となる。操作線1より供給量を Q_{f2} に減少すると操作線は直線2となり、沈降層濃度は c_{12} 、排泥濃度は c_{u2} となる。

ここでふたたび操作線3のように排泥量を Q_{u3} に減少させると新たな臨界負荷操作となる。

各操作線におけるシックナー槽内濃度分布を図一7に示す。ただし濃度不連続面 g は沈降層の任意の高さである。

6. 実験装置および実験方法

図一8に装置の概要を示す。容量 50 ℓ のスラリー攪拌タンク 1, 12 で調製された沈降性炭酸カルシウム（商標ホワイトン P-40）スラリーは定量ポンプ 2 でフローメータ 3 から脈動防止のヘッドタンク 4 をへて供給スラリーを満たしたシックナー 6 へ供給される。供給面での全面均一分散のため、供給筒出口に三角形の切込みのついた底つき円筒 5 を設けた。シックナーはアクリル樹脂製（内径 14.5 cm、高さ 36.0 cm）で、排泥による下降流れを均一するため底部に直径 5 mm の孔 288 個を設けた多孔板（開孔率 0.34）7、排泥口部に短絡防止用分散板 8 を設けた。シックナーに 5 cm 間隔で設けたサンプリング孔 9 およびサンプリング管 10 より直接スラリーを取り出し乾燥法により槽内濃度を測定した。排泥量は定量ポンプ 11 で調整され、溢流とともに攪拌タンク 12 をへてスラリーポンプ 13 で供給タンク 1 に返送される。なお堆積スラッジの流動性が良好なため、レーキは使用していない。

7. 実験結果および考察

実験に使用した炭酸カルシウムスラリーの最終スラッジ濃度 c_{∞} は 48 時間放置後で 0.88 g/cm^3 である。解析に用いた固体流束曲線は高さ 30 cm のメスシリンダーで初濃度を変えた回分沈降試験より求めた。I 類沈降域の限界濃度 c_I は最終スラッジ濃度 c_{∞} から固体流束曲線への接線を求め、接線と固体流束曲線の交点より 0.022 g/cm^3 、II 類沈降域の限界濃度 c_{II} は固体流束曲線の変曲点より 0.107 g/cm^3 を得た。

表一1に供給濃度が小さいために槽内濃度に制約を受ける操作、および臨界負荷、未負荷、過負荷の各操作について、それぞれ供給面高さを変えた実験例を示す。表中の数値は定常操作時の平均値である。

表-1 操作条件と槽内濃度

Run	H_f [cm]	c_f [g/l]	Q_f [$\frac{cm^3}{min}$]	Q_u [$\frac{cm^3}{min}$]	$C_{u es}$ [g/l]	$C_{u es}$ [g/l]	$C_{c es}$ [g/l]	$C_{1 es}$ [g/l]	$C_{2 es}$ [g/l]	$C_{H=5}$ [g/l]	$C_{H=15}$ [g/l]	$C_{H=25}$ [g/l]	$C_{H=35}$ [g/l]	$C_{o es}$ [g/l]	$C_{o ob}$ [g/l]
1*	34	34	390	39	330	272	-	34	34	27	25	25	25	1	3
2*	20	17	470	22	330	344	-	17	17	15	17	16	15	2	2
3*	20	62	340	100	210	185	-	62	62	67	65	60	57	1	17
4*	5	28	410	30	358	334	-	28	28	30	30	30	28	2	2
5**	30	109	175	84	227	218	110	-	0	108	108	108	0	0	0
6**	20	110	149	62	264	265	125	-	0	125	120	0	0	0	0
7**	20	63	228	44	325	283	138	-	0	153	142	30	0	0	0
8**	10	106	162	68	253	250	120	-	0	125	0	0	0	0	0
9**	5	119	135	58	277	270	123	-	0	123	0	0	0	0	0
10†	30	127	106	45	299	268	-	33	0	37	33	33	0	0	0
11†	20	116	144	75	223	223	-	43	0	40	35	0	0	0	0
12†	20	58	208	50	243	243	-	28	0	28	28	0	0	0	0
13†	20	45	220	45	220	225	-	23	0	25	23	0	0	0	0
14†	20	48	280	40	338	285	-	33	0	150	45	0	0	0	0
15†	20	56	270	66	230	230	-	35	0	76	60	10	0	0	0
16†	10	117	160	83	226	227	-	60	0	80	0	0	0	0	0
17†	5	65	234	91	167	163	-	33	0	32	0	0	0	0	0
18††	30	114	200	42	332	310	135	-	117	140	135	135	120	56	65
19††	20	107	173	46	310	285	132	-	110	140	140	113	113	33	37
20††	20	63	295	64	268	205	125	-	68	85	75	63	57	6	6
21††	20	66	315	80	240	232	118	-	68	85	77	67	65	7	7
22††	10	118	147	27	430	360	157	-	122	170	124	120	120	48	60
23††	5	55	286	30	410	342	150	-	65	150	70	72	72	13	27

es: estimated, ob: observed, *: $c_f < c_1$, **: 臨界負荷操作, †: 未負荷操作, ††: 過負荷操作, H: 槽高[cm]

実験開始時にシックナー供給面下を供給スラリーで満たし定常操作にいたる時間の短縮をはかっているが、定常操作には供給面高さ、負荷条件により3ないし6時間を要した。実験に使用したシックナー槽面積は165 cm²で一定であり、供給固体流束の増減は供給濃度、供給量で行った。

図-9のIMの操作線は供給濃度の制約を受け溢流中に粒子が逸出する場合である。操作条件は表-1のRun2に示した。供給固体流束0.0488 g/cm²・minを縦軸に、排泥速度0.133 cm/minを傾きにとると固体流束曲線との交点Bの濃度 $c_{11} = 0.020$ g/cm³は供給濃度0.017

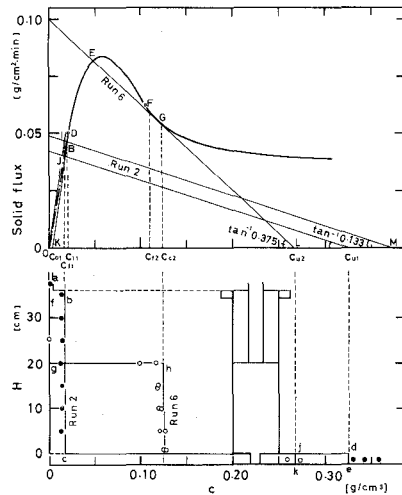


図-9 連続シックナー操作条件の決定法と実測槽内濃度分布 (Run2,6)

g/cm^3 より大きく(4)式の関係が成立し、IJに相当する固体流束が逸出する。

溢流濃度 c_{o1} は溢流速度がOIの傾きとなることから、点Jを通過してOIに平行な直線と横軸の交点Kの濃度として求められる。排泥濃度は c_{u1} で示され、シックナー槽内濃度分布は図一9のabcdeが予測される。点が実測値である。このような操作は供給濃度がI類沈降域に属することが多く、排泥濃度を自由に選択できる反面操作上に制約があることに留意しなければならない。

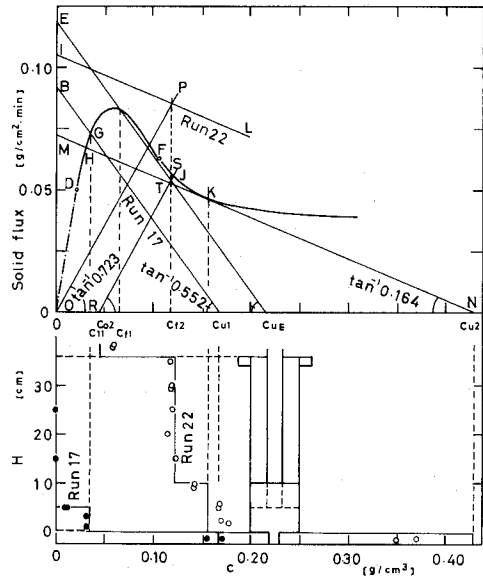
図一9のELの操作線は臨界負荷操作 **Run6** の例である。この供給濃度 c_{f2} はIII類沈降域に属するが、操作としては供給濃度がEからGの濃度範囲にあれば同様に解析できる。この操作の定常状態における槽内濃度分布は沈降層濃度が接点Gの臨界濃度 c_{c2} で溢流層が清澄の場合である。図一9のfghijkが予測される濃度分布であり、点が実測値である。

図一10は供給面高さ5cmと10cmの未負荷操作と過負荷操作の例である。それぞれの供給濃度は c_{f1} (II類沈降域)と c_{f2} (III類沈降域)で、ともに沈降層濃度である操作線と固体流束曲線の交点G、Hの濃度より大きく供給濃度の制約はない。

Run17の操作は未負荷操作であり、供給固体流束を点Bの $0.092 g/cm^2 \cdot min$ から点Eの $0.118 g/cm^2 \cdot min$ まで増加しても溢流清澄な操作となる。Run17の槽内濃度分布は沈降層濃度が c_{11} 、排泥濃度が c_{u1} で示される。供給固体流束を点Eに増加したときは沈降層濃度が c_{f1} 、排泥濃度が c_{uE} となる。

Run22の操作線は直線ILで示され、固体流束曲線の上方に位置することから過負荷操作となる。過剰固体流束は直線ILと直線MNの差で表わされる。溢流濃度 c_{o2} は溢流固体流束OPと平行で点Tを通るRSと横軸の交点の濃度、溢流層濃度はRSと固体流束曲線の交点Jの濃度、沈降層濃度は接点Kの濃度、排泥濃度は点Nの濃度 c_{u2} となる。図一10にそれぞれの槽内濃度分布の予測値を実線、実測値を点で示す。

供給面高さを変えた実験より、シックナー槽高は濃縮には直接関与せず、操作時における供給固体流束の変動、あるいは排泥装置の停止による固体粒子の槽外への逸出に要する時間に深く関係するものと考えられる。これは非定常操作のシックナー解析に属する問題で今後の検討が必要であろう。



図一10 連続シックナー操作条件の決定法と実測槽内濃度分布 (Run17,22)

結 言

連続シックナーは処理固体量が同じでも供給濃度により操作条件が異なり、設計上留意すべきことが認められた。ここでは供給濃度を回分沈降曲線の形により3つの領域に分類した。

固体流束曲線を用いる連続シックナーの解析は操作条件や所要面積の決定の有力な手法であり、供給濃度が小さいために操作条件に制約を受ける場合にも適用できること、および定常操作においてはシックナー槽高を必要としないことが認められた。

〔謝辞〕 本研究の実験に協力された西村政俊、工藤倫昭、真鍋耕一各氏に感謝する。

(昭和52年5月19日受理)

使 用 記 号

A = 槽面積 [m^2], c = 固体濃度 [kg/m^3], H = 槽高 [m], t = 時間 [sec], v = 粒子群沈降速度 [m/sec], Q = 体積流量 [m^3/sec]

〔添字〕 c = 臨界, f = 供給, o = 溢流, u = 排泥, 1 = 沈降層, 2 = 溢流層

文 献

- 1) Kynch, J. G. : Trans. Faraday Soc., **48**, 166 (1952)
- 2) Coe, H. S. and G. H. Cleverger : Trans. Am. Inst. Min. Engrs., **55**, 356 (1916)
- 3) 小幡英二, 渡辺治夫 : 化学工学, **39**, 443 (1975)
- 4) 渡辺治夫, 小幡英二 : 粉体工学研究会誌, **12**, 447, 519 (1975)
- 5) Jernqvist, Å. S. H. : Svensk Papperstiding, **68**, 506, 545, 578 (1965), **69**, 395 (1966)