回分沈降曲線による連続シックナーの非定常操作の解析

—— 臨界負荷から未負荷操作への場合 ——

小 幡 英 二・渡 辺 治 夫

室蘭工業大学 化学工学科*

連続シックナーの非定常操作の図的解析法を沈降に関する Kynch の理論およびシックナー面積の設計に関する Talmage-Fitch の手法をもとに開発した。本報の解析により供給固体流束の減少あるいは排泥速度の増加する過渡状態におけるシックナーの変動因子、すなわち槽内濃度分布、濃度不連続面の移動、および排泥濃度の変化を予測することができた。本法により予測された値と沈降性炭酸カルシウムスラリーによる実験結果とはよく一致した。本解析の考え方は連続シックナーの動的挙動に関しより多くの識見を与えるものである。

緒 言

連続シックナーの操作は経験にたよるところが多く、給排泥量の一時的な変動に対して、定量的な取り扱いができないのが現状である。シックナーにおいて、定常状態の操作条件を急激に別の条件に変更した場合その平衡状態はこわれ、槽内濃度分布が時間的に変化する過程を経て新しい安定状態に落ち着く。このような操作条件の変化に対する過渡現象を定量的に解析することはシックナーの設計、操作に重要な問題である。このシックナー非定常操作に関し固体流束曲線を用いた 2~3 の研究がある^{1,2,7)}。

著者らは、回分沈降曲線と固体流束曲線が密接な関係にあることに注目し、回分沈降曲線によるシックナー定常操作の解析について報告した⁴⁾。また、供給条件が定常で、排泥を間欠的に行う半連続シックナーは無排泥時にスラッジの堆積がすすみ、排泥時に堆積スラッジを排出するという明らかな非定常操作であるが長時間の操作を考えればスラッジの堆積、排出という一つのサイクルが繰り返されている定常操作とみなせることについても報告した⁵⁾。

本報は回分沈降曲線に Kynch²⁾ と Talmage-Fitch⁸⁾ の手法を応用し、供給固体流束（供給固体負荷量）が減少する操作、すなわち供給量、あるいは供給濃度が減少する場合と、一定供給条件のもとに排泥量が増加する場合の槽内濃度分布の時間的な変化に関し図的解析を試み、炭酸カルシウムスラリーによる実験結果と比較検討するものである。

1. 連続シックナーの非定常操作

連続シックナーの流量収支および固体収支は流量を $Q[\text{m}^3/\text{sec}]$ 、濃度を $c[\text{kg}/\text{m}^3]$ とし、供給に f 、排泥に u 、

溢流に o の添字をつけて次のように表される。

$$Q_f = Q_u + Q_o \quad [\text{m}^3/\text{sec}] \quad (1)$$

$$c_f Q_f = c_u Q_u + c_o Q_o \quad [\text{kg}/\text{sec}] \quad (2)$$

面積 $A[\text{m}^2]$ のシックナーにおいて溢流が清澄で操作されているなら $c_o = 0$ で、Eq. (2) は $c_f Q_f = c_u Q_u$ となり、供給面下の任意の面の固体流束収支は c 層の静水中の沈降による下降固体流束 $cv(c)$ に、 c 層の排泥による下降固体流束 cQ_u/A を加えたものが供給および排泥固体流束に等しいことから次式で表される。

$$c\{v(c) + (Q_u/A)\} = c_f Q_f/A = c_u Q_u/A \quad [\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}] \quad (3)$$

ここで $v(c) [\text{m}/\text{sec}]$ は静止流体中における濃度 c の粒子群沈降速度で濃度 c のみの関数である。

シックナーの操作因子は供給スラリー濃度 c_f 、供給量 Q_f および排泥量 Q_u であり、排泥濃度 c_u は先の 3 者とシックナー面積 A により決定される。したがって、溢流清澄の条件で処理できるシックナー最大固体処理量は槽面積 A および排泥量 Q_u を与えたとき議論されるものである。排泥速度 Q_u/A 一定のもとに固体処理量を最大にする操作を臨界負荷操作と名づけた⁴⁾。

ここでは定常臨界負荷操作から定常未負荷操作に移行する過渡現象を次の 3 者について検討する。

- 1) 臨界負荷操作から供給量 Q_f 減少による未負荷操作への移行。
- 2) 臨界負荷操作から排泥量 Q_u 増加による未負荷操作への移行。
- 3) 臨界負荷操作から供給濃度 c_f 減少による未負荷操作への移行。

槽面積あたりの固体負荷量が減少する非定常操作としては溢流に固体の一部が逸出する過負荷操作から臨界負荷操作へ、あるいは過負荷操作から直ちに未負荷操作へなどいくつかの場合が考えられるが、いずれも上記 3 者に還元されることが知られる。

* 〒050 室蘭市水元町 27-1

2. 臨界負荷操作から供給量を減少, $Q_f > Q_f'$

面積 A のシックナーに濃度 c_f のスラリーが供給面高さ H_f から流量 Q_f で供給され、槽底部 ($H=0$) から濃度 c_u のスラッジが流量 Q_u で排泥され、溢流面高さ H_o から清澄な溢流 ($c_o=0$) が流量 Q_o で排出されている定常臨界負荷操作を考える。理想的なシックナーにおいて臨界負荷操作の槽内濃度分布は操作方法により Fig. 1 に示す5者の場合が考えられる^{1,3,9)}。未負荷操作から臨界負荷操作へ移行させると I, II, III が、過負荷操作から臨界負荷操作へ移行させると V, IV, III となる。ここでは簡単のために操作条件を変える前のシックナーは供給面上が清澄で供給面下が臨界濃度 c_c で均一な III の場合とする。この状態から c_f , Q_u をそのままにして供給量 Q_f を急激に Q_f' に減少させると槽面積あたりの固体負荷が減少し、最終的には定常未負荷操作に移る。ここに到達するまでの過渡状態を調べてみる。

定常臨界負荷操作時の供給面下では Eq. (3) より次式が成立している。

$$c_c\{v(c_c) + (Q_u/A)\} = c_f Q_f / A = c_u Q_u / A \quad (4)$$

Q_f を Q_f' に減少させると Eq. (1) の容積収支は

$$Q_f' = Q_u + Q_o'$$

で、 $Q_f' < Q_f$, $Q_o' < Q_o$ となり供給面直下 (H_f 面) には

$$c_1'\{v(c_1') + (Q_u/A)\} = c_f Q_f' / A \quad (5)$$

となるような c_1' の濃度層が形成される。槽内に臨界濃度 c_c 層が存在する間は排泥濃度 c_u は変化しない。

Eqs. (4), (5) を満足する濃度層 c_c と c_1' により形成される濃度不連続面の伝播速度 U [m/sec] を求める方法を次に示す⁹⁾。

スラリー全体が排泥速度 Q_u/A で均一に下降しており乱れない場合の不連続面における固体流動収支を考える。Fig. 2 で下向き速度を正にとると、不連続面に入る粒子の不連続面に対する相対速度は $\{v(c_1') + (Q_u/A) - U\}$ であり、不連続面を出る粒子の不連続面に対する速度は $\{v(c_c) + (Q_u/A) - U\}$ であるから次式が成立する。

$$c_1'\{v(c_1') + (Q_u/A) - U\} = c_c\{v(c_c) + (Q_u/A) - U\}$$

$$\therefore U = \frac{c_1'v(c_1') - c_c v(c_c)}{c_1' - c_c} + \frac{Q_u}{A} \quad (6)$$

Eq. (6) は Eqs. (4), (5) より Eq. (7) となる。

$$U = \frac{(c_f Q_f / A) - (c_f Q_f' / A)}{c_c - c_1'} \quad (7)$$

c_1' 層と c_c 層の不連続面が速度 U で下降し、槽底に達すると c_c 層は消滅し、排泥濃度 c_u は新しく $c_f Q_f' = c_u' Q_u$ を満足する排泥濃度 c_u' ($c_u' < c_u$) になる。新しい定常未負荷操作に至る所要時間は H_f / U [sec] である。

c_c , c_u , c_1' , c_u' および U は Figs. 3, 4 のように求められる。Fig. 3 において定常臨界負荷操作の供給量 Q_f , 排

Fig. 1 Various schematic concentration profiles in continuous thickener in critical-loading operation

Fig. 2 Propagation of a concentration discontinuity in continuous thickener

泥量 Q_u が与えられると $Q_f/A = \tan \alpha = H_f/t_c$ と $Q_u/A = \tan \beta$ の関係から操作点 P_c が $t = t_c$ 上に求まる。供給面下槽内濃度 c_c は操作点 P_c における接線の H 軸の交点 H_c に、排泥濃度 c_u は点 P_c の高さ H_u に対応する濃度となり Fig. 3 左の c_c , c_u に求められる。 Q_f を Q_f' に減少させると $Q_f'/A = \tan \alpha' = H_f/t'$ であり操作点は $t = t'$ 上の P' に求まる。操作点が回分沈降曲線の上方に求まることからこの操作は未負荷操作であることが知られる。定常未負荷操作の供給面下槽内濃度 c_1' はその沈降速度を $v(c_1') = v(c_f)$ と仮定すると Eq. (5) が $c_1'((H_1' - H_u')/t' + H_u'/t') = c_f H_f/t'$ となるから $c_1' = c_f H_f/H_1'$ に、排泥濃度 c_u' は H_u' に対応する濃度としてそれぞれ Fig. 3 左の c_1' , c_u' に求められる。このときの負荷率 Ψ は次式で表される⁹⁾。

$$\Psi = (Q_f)_{\text{actual}} / (Q_f)_{\text{critical}} = Q_f' / Q_f = H_u / H_u' < 1 \quad (8)$$

Eq. (7) は Fig. 3 において $Q_f/A = H_f/t_c$, $Q_f'/A = H_f/t'$ および $c_f H_f = c_c H_c = c_1' H_1'$ の関係を用いて次のように変形できる。

$$U = \frac{c_f \{(H_f/t_c) - (H_f/t')\}}{c_c - c_1'} = \frac{H_f h}{t_c} \cdot \frac{c_f}{(c_c - c_1')} = \frac{H_f h}{t_c} \cdot \frac{H_c H_1'}{H_f (H_1' - H_c)} \quad (9)$$

c_1' と c_c の濃度不連続面下降速度 U は Eq. (9) の第 4 項が高さ H と時間 t のみで表されるから、回分沈降曲線に h , H_c , H_1' , t_c を求めることにより算出される。あるいは、Fig. 3 のように求められた c_f , c_1' , c_u を用い

Fig. 3 Construction for concentration profiles of thickener response to step decrease in feed rate

Fig. 4 Construction for the propagation velocity of the \$c_1'-c_e\$ discontinuity

て Fig. 4 の作図から \$U\$ を求めることもできる。その方法を次に述べる。

Fig. 4 左で \$H=0\$ の高さに \$c=0\$ の \$Z\$ 点を設定したと同様に、\$H=H_f\$ に \$c=0\$ に対応する \$Z'\$ 点を決める。\$hZ'\$ の延長線と \$c=c_f\$ の交点を \$T\$ とすると \$c_f \equiv \overline{ST}\$, \$c_e - c_1' \equiv \overline{SV}\$ なる点 \$V\$ が決定される。\$VZ'\$ の延長線と \$H\$ 軸の交点を \$K\$ とすると、Eq. (9) の第 3 項は \$\triangle TSZ'\$ と \$\triangle Z'hH_f\$ および \$\triangle VSZ'\$ と \$\triangle Z'H_fK\$ が相似であることから \$c_f \cdot \overline{H_fh} = (c_e - c_1') \cdot \overline{H_fK}\$ の関係より Eq. (10) で表される。

$$U = \overline{H_fK} / t_c = \tan \angle LKM \quad (10)$$

Fig. 3 左に \$Q_f\$ を \$Q_f'\$ に減少させたとき (\$t=0\$) から不連続面が高さ \$H\$ (\$H < H_f\$) に至る過渡時間 \$t = (H_f - H)/U\$、および新しい未負荷定常状態に至る最終時間 \$t = H_f/U\$ のそれぞれの槽内濃度分布を二点鎖線 (abdefi)、一点鎖線 (abklfi) および実線 (abkmfn) で示した。

3. 臨界負荷操作から排泥量を増加、\$Q_u < Q_u'\$

供給面上が清澄で、供給面下が臨界濃度 \$c_e\$ で均一な定常臨界負荷操作されている状態から \$c_f, Q_f\$ を変えずに排泥量を \$Q_u\$ から \$Q_u'\$ に急激に増加させると槽面積あ

Fig. 5 Construction for concentration profiles of thickener response to step increase in underflow rate

りの固体処理量が \$c_f Q_f / A\$ を上回り、最終的には定常未負荷操作となる。

\$Q_u\$ を \$Q_u'\$ に増加させると供給面直下には臨界負荷操作時の Eq. (4) に代わって Eq. (11) を満足する濃度層 \$c_1'\$ が形成される。

$$c_1' \{v(c_1') + (Q_u' / A)\} = c_f Q_f / A \quad (11)$$

新たに形成された \$c_1'\$ 層と \$c_e\$ 層の濃度不連続面下降速度 \$U\$ は Eq. (6) と同様に次式で表される。

$$U = \frac{c_1' v(c_1') - c_e v(c_e)}{c_1' - c_e} + \frac{Q_u'}{A} \quad (12)$$

\$Q_u\$ を \$Q_u'\$ に増加させると、直ちに排泥濃度 \$c_u\$ は Eq. (13) を満足する排泥濃度 \$c_{uc}'\$ に変化し、\$c_1'\$ 層と \$c_e\$ 層の濃度不連続面が槽底に達し供給面下濃度が \$c_1'\$ になると \$c_{uc}'\$ は Eq. (14) を満足する定常未負荷操作の排泥濃度 \$c_u'\$ になる。未負荷操作に至る所要時間は \$H_f / U\$ である。

$$c_e \{v(c_e) + (Q_u' / A)\} = c_{uc}' Q_u' / A \quad (13)$$

$$c_1' \{v(c_1') + (Q_u' / A)\} = c_u' Q_u' / A \quad (14)$$

Eqs. (11)~(14) を満足する \$c_1'\$, \$U\$, \$c_{uc}'\$ および \$c_u'\$ の求め方を Fig. 5 に示す。

Fig. 5 において \$Q_u\$ を \$Q_u'\$ に増加させたときの操作点は \$P'\$ に求まり、回分沈降曲線の上に位置することから未負荷操作となることが知られる。

\$c_1'\$, \$c_u'\$ は 2. と同様に \$H_f'\$, \$H_u'\$ に対応する濃度として Fig. 5 左の \$c_1'\$, \$c_u'\$ に求められる。Eq. (13) を満足する排泥濃度 \$c_{uc}'\$ は \$v(c_e)\$ が \$H_c P_e\$ の傾きで、\$Q_u' / A\$ が \$j P'\$ の傾きで表されることがから両直線の交点 (\$t_{uc}', H_{uc}'\$) の高さ \$H_{uc}'\$ に対応する濃度となる。\$c_1'\$ 層と \$c_e\$ 層の濃度不連続面下降速度 \$U\$ は Eqs. (11)~(13) および Fig. 4 の幾何学的関係より次式で表される。

$$U = \frac{c_{uc}' Q_u' / A - c_f Q_f / A}{c_e - c_1'} = \frac{c_f (H_f / t_{uc}' - H_f / t_c)}{c_e - c_1'} \\ = \frac{\overline{H_f h}}{t_{uc}'} \cdot \frac{c_f}{c_e - c_1'} \quad (15)$$

Eq. (15) は $\overline{H_f K} / \overline{H_f h} = c_f / (c_c - c_1')$ なる点 K を回分沈降曲線の H 軸上に求めることにより, Fig. 4 と同様に $U = \overline{H_f K} / t_{uc}'$ として作図される。

Fig. 5 左に Q_u を Q_u' に増加させる直前の時間 $t=0$ と, 濃度不連続面が高さ H ($H < H_f$) にいたる時間 $t = (H_f - H)/U$, および新しい定常状態になった時間 $t = H_f/U$ のそれぞれの濃度分布を二点鎖線 (abdefi), 一点鎖線 (ablmfg) および実線 (ablnk) で示した。

4. 臨界負荷操作から供給濃度を減少, $c_f > c_f'$

供給面が清澄で, 供給面が臨界濃度 c_c で均一な定常臨界負荷操作から Q_f, Q_u を変えずに供給濃度を c_f から c_f' に減少させたときの過渡状態を考える。

c_f を c_f' に減少させると供給面直下には c_c 層に代わって次式を満足する濃度層 c_1' が形成される。

$$c_1' \{v(c_1') + (Q_u/A)\} = c_f' Q_f/A \quad (16)$$

ここで Eqs. (5), (16) を比較すると, 新たに形成された c_1' 層は $c_f Q_f' = c_f' Q_f$ のとき両式中で等しくなる。

したがって供給量 Q_f の減少, あるいは供給濃度 c_f の減少の際供給面直下に形成される c_1' 層と c_c 層の濃度不連続面下降速度 U は Eq. (7) と等しく次式で表される。

$$U = \frac{c_f Q_f/A - c_f' Q_f/A}{c_c - c_1'} \quad (17)$$

排泥速度 Q_u/A が一定であるから, 槽内に c_c 層が存在する間は排泥濃度 c_u は変化しない。 c_1' 層と c_c 層の不連続面が Eq. (17) の速度 U で下降し, 槽底に達すると排泥濃度 c_u は新しく $c_f' Q_f = c_u' Q_u$ を満足する排泥濃度 $c_u' (c_u' < c_u)$ になる。これに要する時間は H_f/U である。

次に c_c, c_u, c_1', c_u' および U の求め方を Fig. 6 によって説明する。

定常臨界負荷操作の操作点 P_c は 3. と同様に $Q_f/A = \tan \alpha$, $Q_u/A = \tan \beta$ より濃度 c_f の回分沈降曲線上に求まる。このときの槽内濃度 c_c および排泥濃度 c_u はそれぞれ H_c, H_u に対応する濃度として Fig. 6 左の RS 上に求められる。供給濃度が c_f から c_f' にかかわることにより c_f と c_f' の 2 本の回分沈降曲線が必要になるが, 流量収支が一定であるから操作点 P' は P_c に等しい。なお, c_f' の回分沈降曲線は定速沈降区間の測定で充分である。初高 H_f に対応する供給濃度 c_f を Fig. 6 左の RS 上の点 T に求めると, 新たな供給濃度 c_f' は $c_f'/c_f = \overline{RT'}/\overline{RT}$ を満足する点 T' に作図される。

c_1', c_u' は操作点 $P' (=P_c)$ が c_f' の回分沈降曲線の上方に位置することから, 定常末負荷操作の解析同様 $c_f' H_f = c_1' H_1' = c_u' H_u'$ の関係を利用して Fig. 6 左の R'S' 上にそれぞれ求められる。 c_1' 層と c_c 層の濃度不

Fig. 6 Construction for concentration profiles of thickener response to step decrease in feed concentration

連続面下降速度 U は Eq. (17) より次式で表される。

$$U = \frac{(c_f Q_f/A)(1 - (c_f'/c_f))}{c_c - c_1'} = \frac{\overline{H_f h}}{t_c} \cdot \frac{c_f}{c_c - c_1'} \quad (18)$$

Eq. (18) は $c_f'/c_f = \overline{h j} / \overline{H_f j}$ なる点 h を求め, 次に $\overline{H_f K} / \overline{H_f h} = c_f / (c_c - c_1')$ なる点 K を求めることにより Fig. 4 で求めたと同様に $U = \overline{H_f K} / t_c$ として決定される。

供給濃度 c_f を c_f' に減少させたときの時間を $t=0$ とすると, c_1' 層と c_c 層の不連続面が槽底に達する時間 $t = H_f/U$ までの槽内濃度分布の挙動は 2. の Q_f を Q_f' に減少したときの過渡状態と同様に $t=0$ で二点鎖線 (abdefi), $t = (H_f - H)/U$ で一点鎖線 (abklfi) および $t = H_f/U$ で実線 (abkmfn) となる。

以上述べた 3 者の非定常操作はいずれも槽面積あたりの固体負荷量が減少する場合であり, 槽内濃度および排泥濃度の変化は段階的に進行した。一方, ここでは述べなかった排泥速度が減少する場合のようにすべての濃度変化が連続的に進行することもある。

5. 実験結果および考察

実験に使用したスラリーは沈降性炭酸カルシウム-水道水スラリーで, シックナー面積は 165.1 cm^2 で他の寸法は Fig. 7 に併記した。濃度測定口は槽底より 5 cm 間隔に設けられており, 図中の $H=5, 10, \dots, 30 \text{ cm}$ 以外の濃度測定値は槽頂部より細管を用いて直接スラリーを取り出し測定したものである。なお, 実験装置, 実験方法および実験試料の詳細は前報⁹⁾に述べた。

Fig. 7 は臨界負荷操作の排泥速度を一定にしたまま供給量を減少させて未負荷操作にさせた例である。供給スラリー濃度 0.062 g/cm^3 , 供給量 $186 \text{ cm}^3/\text{min}$, 排泥量 $42 \text{ cm}^3/\text{min}$ の操作 (操作点 P , 負荷率 $\Psi=1.01$) から

Fig. 7 Predicted and observed concentration profiles of thickener response to step decrease in feed rate

Fig. 8 Predicted and observed concentration profiles of thickener response to step increase in underflow rate

供給量を 161 cm³/min に減少させた場合 (操作点 P' , $\Psi=0.87$) の過渡現象を考察する。

Fig. 7 左に示した時間 t は定常操作から供給量を Q_f' に減少させたときを $t=0$ とした。 $t=0$ の槽内濃度分布をみると、操作点 P が回分沈降曲線のわずかな下方に求められるにもかかわらず臨界濃度 c_c と Eq. (19) を満足する供給面下槽内濃度 c_1 の濃度不連続面が $H=10\sim15$ cm に認められることから、操作点 P の操作は供給面下に濃度不連続面をもつ臨界負荷操作と考えられ、次式が成立している。

$$c_c\{v(c_c) + (Q_u/A)\} = c_1\{v(c_1) + (Q_u/A)\} = c_f Q_f / A = c_u Q_u / A \quad (19)$$

操作点 P に 2. の解析を適用すると臨界濃度は H_c に対応する $c_c = 0.086$ g/cm³ に、供給面下槽内濃度は $H_1 = H_f$ に対応する $c_1 = c_f$ に、排泥濃度は $c_u = 0.275$ g/cm³ (H_u に対応) に求められる。供給量を減少すると同時に供給面 ($H = 20$ cm) 直下には Eq. (5) を満足する $c_1' = 0.055$ g/cm³ (H_1' に対応) 濃度層が生成し、供給面下に存在した c_1 層とで新たな濃度不連続面を形成する。

c_1' 層と c_1 層の不連続面下降速度 U は Eq. (6) と同様に

$$U = \frac{c_1' v(c_1') - c_1 v(c_1)}{c_1' - c_1} + \frac{Q_u}{A} \quad (20)$$

が成立し、 $v(c_f) = v(c_1) = v(c_1')$ の仮定より

$$U = v(c_f) + (Q_u/A) = 0.877 + (42/165.1) = 1.13 \text{ cm/min}$$

が知られる。したがって、 $t=0$ での c_1 層と c_c 層の不連続面高さを $H=12.5$ cm とすると、供給量減少から $(H_f - H)/U = (20 - 12.5)/1.13 = 6.6$ min 後に c_1 層は消滅し、 c_1 層と c_c 層の不連続面は新たな c_1' 層と c_c 層の不連続面になる。この間 c_1 層と c_c 層の不連続面の位置は変わらない。 c_1' 層と c_c 層の不連続面下降速度 U' は Eqs. (6), (7) で表され Eq. (10) より Fig. 7 右の $\tan \angle LKM = 0.30$ cm/min で示される。 c_1' 層と c_c 層の不連続面が $H/U' = 12.5/0.30 = 41.7$ min を経過した後には槽底に達すると排泥濃度 c_u は操作点 P' の高さに対応する新たな排泥濃度 $c_u' = 0.238$ g/cm³ に急激に変わる。供給量を減少させてから新たな定常操作にいたる時間は $6.6 + 41.7 = 48.3$ min である。

Fig. 7 左の槽内濃度分布の時間的推移を観察すると c_1' 層と c_c 層の不連続面は $t=25$ 分で $H=8\sim10$ cm, $t=40$ 分で $H=4.5$ cm に認められるのに対し、予測される高さは $t=0$ の濃度不連続面高さを $H=12.5$ cm とするとそれぞれ $H=7.0$ cm, 2.5 cm に求まる。この差異は実測された供給面下槽内濃度 $c_1' = 0.034$ g/cm³ が予測濃度 $c_1' = 0.055$ g/cm³ より小さいことから知られるように $v(c_1') = v(c_f)$ としたことによると考えられる。

Fig. 8 は臨界負荷に近い未負荷操作を供給条件一定のもとに排泥量を増加させた例である。供給スラリー濃度 0.065 g/cm³、供給量 180 cm³/min、排泥量 49 cm³/min の操作 (操作点 P , $\Psi=0.96$) から排泥量を 65 cm³/min に増加させた場合 (操作点 P' , $\Psi=0.87$) の過渡現象を考察する。

排泥量を変える前の供給面下槽内濃度は H_1 に対応する $c_1 = 0.062$ g/cm³ であり、排泥濃度は H_u に対応する $c_u = 0.239$ g/cm³ である。排泥量を Q_u' に増加させると同時に供給面直下には Eq. (11) で表される $c_1' = 0.057$ g/cm³ (H_1' に対応) が生成し、 c_1' 層と c_1 層の不連続面が Eq. (20) と同様に次式で下降する。

$$U = \frac{c_1' v(c_1') - c_1 v(c_1)}{c_1' - c_1} + \frac{Q_u'}{A} \approx v(c_f) + \frac{Q_u'}{A} = 0.857 + (65/165.1) = 1.25 \text{ cm/min}$$

c_1' 層が槽底に達するには $H_f/U = 20/1.25 = 16.0$ min を要する。排泥濃度は c_u から、排泥量を増加させると同時に

$$c_1\{v(c_1) + (Q_u'/A)\} = c_u^* Q_u' / A$$

を満足する過渡的排泥濃度 $c_u^* = 0.195$ g/cm³ (H_u^* に対

応)に変わり、 c_1' 層が槽底に達する16分後には $c_u' = 0.180 \text{ g/cm}^3$ (H_u' に対応) となって新たな定常未負荷操作となる。

Fig. 8 左に排泥量を増加させたとき ($t=0$) から41分後にいたる過渡槽内濃度分布を示した。 $t=0$, 41分の供給面下槽内濃度はそれぞれ H_1 および H_1' に対応する $c_1=0.062$, $c_1'=0.057 \text{ g/cm}^3$ と予測されるが、実測された平均濃度は 0.055 , 0.044 g/cm^3 であった。これは $v(c_1)=v(c_1')=v(c_f)$ の仮定より c_1 , c_1' を予測しているためである。

シックナーの最大固体処理量は槽面積、排泥量 (排泥濃度) および供給スラリーの回分沈降曲線が与えられれば直ちに決定される。ここでは槽面積あたりの固体処理量が減少する。あるいは濃縮倍率が減少する非定常操作に限定して考察した。溢流が濁る過負荷操作から固体負荷量を減少させる操作については言及しなかったが同様の解析が可能である。これについては臨界負荷操作から過負荷操作への場合の非定常操作の解析として述べる予定である。

結 言

回分沈降曲線を用いて、定常操作されているシックナーの供給条件あるいは排泥条件を負荷の小さい操作へ変化させたときの過渡現象を定量的に解析し、槽内濃度分布の推移より実験的検証を行った。

操作条件の変更によって生ずる供給面下槽内濃度、排泥濃度の変化、および槽内濃度不連続面の移動速度を回分沈降曲線上に予測し、シックナー深さと濃度不連続面下降速度の関係から新たな定常操作にいたる最終時間を求めここに至る過渡現象が炭酸カルシウムスラリーによる実験結果とほぼ一致することを認めた。

【謝 辞】 実験にご協力いただいた村田郁也、蝦名克律の各氏に謝意を表します。

Nomenclature

A	= cross-sectional area of thickener	[m ²]
c	= solid concentration	[kg/m ³]
H	= height	[m]
Q	= volumetric flow rate	[m ³ /sec]
t	= time	[sec]
U	= downward velocity of a discontinuity in concentration	[m/sec]
v	= settling velocity of solid particles	[m/sec]
Ψ	= loading ratio defined by Eq. (8)	[—]
<Subscripts>		
c	= critical	
f	= feed	
o	= overflow	
u	= underflow	
1	= below the feed inlet of thickener	
2	= above the feed inlet of thickener	
<Superscripts>		
'	= corresponded to new operating point P'	
*	= transient	

Literature cited

- 1) Jernqvist, Å. S. H.: *Svensk Papperstidning*, **68**, 578 (1956), **69**, 395 (1966)
- 2) Kynch, G. J.: *Trans. Faraday Soc.*, **48**, 166 (1952)
- 3) Obata, E. and H. Watanabe: *Memoirs of the Muroran Institute of Technology*, **9**, 423 (1977)
- 4) Obata, E. and H. Watanabe: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **4**, 400 (1978)
- 5) Obata, E. and Watanabe: *J. Chem. Eng. Japan*, **12**, 307 (1979)
- 6) Robins, W. H. M.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **42**, 158 (1964)
- 7) Straumann, R.: *Chem-Ing-Tech.*, **40**, 383 (1968)
- 8) Talmage, W. P. and E. B. Fitch: *Ind. Eng. Chem.*, **47**, 38 (1955)
- 9) Watanabe, H. and E. Obata: *J. Res. Assoc. Powder Tech. (Japan)*, **12**, 447, 519 (1975)

(1979 年 5 月 28 日受理; 化学工学協会北海道大会 (室蘭, 1975 年 7 月) にて一部発表)

Analysis of Continuous Thickener in Non-Steady State Using a Batch Settling Curve

—The case of critical-load to underload transient—

Eiji Obata and Haruo Watanabe

Dept. of Chem. Eng., Muroran Inst. of Tech., Muroran 050

A graphical analysis for non-steady state operation of continuous thickeners was developed on the basis of the Kyuch theory for the sedimentation of suspension and the Talmage and Fitch technique for the design of thickener area. The analysis in this paper could predict the response of various parameters, that is, the concentration profiles in thickener, the movement of a concentration discontinuity, and the concentration response of the underflow of the thickener for the transient conditions decreasing in the feed solids flux or increasing the

underflow rate. Satisfactory agreement was found between the values predicted by this analysis and the experimental results for precipitated calcium carbonate suspension. The concepts incorporated into the analysis provide a greater insight into the dynamics of continuous thickeners.