

重力によるケーキろ過過程の解析

九州工業大学大学院 学生員 ○上妻 佳奈恵  
九州工業大学工学部 正会員 藤崎 一裕

1. はじめに

本研究は粒子懸濁槽内に設置したケーキろ過を調べたものである。粒子懸濁槽側壁の底部にろ過装置を取り付けて、静水圧によりケーキろ過を行う方法について検討した。

この装置におけるろ過現象の概略を把握するため、現象の数値シミュレーションを行った。理論解析には粒子および流体に関する保存則と Darcy 則が用いられている。基礎式の数値解は室内実験の結果をよく再現し、モデルの有用性が確認された。また、基礎式の無次元表示により、現象に影響を及ぼす要因についても考察した。

2. 実験装置と方法

実験装置の概略を図1に示す。ろ液はポンプPにより槽A内に定量供給されている。B部からは air が流入している。この気泡噴流によって、ろ布表面Cにケーキの厚さLが一定に保たれている。

気泡を含む懸濁液は、C部に蓄積されたろ過ケーキ面上を高速で上昇するため、部分的にクロスフローろ過に近い状況となる。ろ過圧力は静水圧で、図1に示されているように、A槽の水面高さHとろ液排出口の高さ $h_d$ との差により設定される。

この装置を用いて、砂の濃度、水頭差、流入空気量の条件を変え、時間の経過にともなう累積ろ液量と水深の上昇過程を測定した。

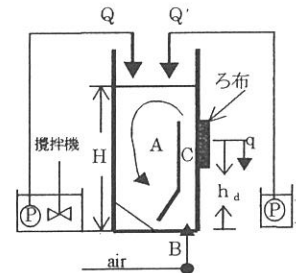


図1 実験装置

3. 理論解析

ケーキ内の流動に関しては Darcy の式を用いる。

$$u = \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \cdot \frac{\Delta P}{\mu \cdot S_v^2 \cdot L \cdot k} = \frac{1}{A} \left( \frac{dV}{dt} \right) \tag{1}$$

$u$  はケーキ内のろ液の流速で、 $\epsilon_c$  はろ過ケーキの空隙率、 $k$  は透水係数、 $\mu$  は粘性係数、 $\Delta P$  はろ過圧力、 $L$  はケーキ厚さである。また、ケーキ厚さ  $L$  の成長過程は粒子の保存則から次式で与えられる。

$$\frac{dL}{dt} (\epsilon_s - \epsilon_c) = v_p (1 - \epsilon_s) \tag{2}$$

$t$  はろ過時間、 $1 - \epsilon_s$  は懸濁液の濃度で、 $v_p$  は懸濁粒子の懸濁液内での流動速度である。ケーキろ過圧力  $\Delta P$  は懸濁液の静水圧であるから、次式であたえられる。

$$\Delta P = (\rho_p - \rho_l)(1 - \epsilon_s)(H - h_d)g \tag{3}$$

ここで、 $h_d$  はろ液排出口の高さ (図1参照)、 $g$  は重力加速度である。また、ケーキ厚さの上限  $L$  は気泡噴流の強度、つまりケーキ表面の (クロスフロー) 上昇流速  $v_j$  により規定されるものとする。

また、透水係数  $k$  に関しては (4) 式の Kozeny-Carman の関係式を用いた。

$$k = \frac{1}{5S_v^2} \frac{\epsilon_c^3}{(1 - \epsilon_c)^2} \quad , \quad S_v = 6/D_p \tag{4}$$

$D_p$  および  $S_v$  はそれぞれケーキ構成粒子の平均径および体積基準の比表面積である。

なお、単位面積あたりのろ液量  $q$  の変化を表す式は次の (5) 式のようなになる。

$$\frac{q}{a} = \int_0^t u dt = - \int_0^t \frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{L} dt \quad (5)$$

ここで、 $a$ はろ布面積である。以上の式を連立させて、ろ過過程を解析した。なお、時間に関する数値積分には Runge-Kutta-Gill 法を用いた。また、ケーキ厚さ  $L$  は実際に測定することが困難であるため質量座標  $w$  を用いた。さらに式の無次元化を行うことで簡略化を図った。まずケーキ厚さ  $L$  を以下のように表す。

$$\frac{1}{L} = \frac{(1-\varepsilon) \cdot \rho_s}{w} \quad (6)$$

$w$ はろ液  $1[m^3]$  当たりの乾燥ケーキ質量 (ろ布単位面積当たり) である。ここで (1) 式に (4)、(6) 式を代入すると (7) 式のようになり、さらに整理すると (8) 式のようになる。

$$u = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{dp^2}{180} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \cdot (1-\varepsilon) \cdot \rho_s \cdot \frac{\Delta P}{w} \quad (7)$$

$$\frac{u}{w_0} = \frac{\varepsilon^3}{10(1-\varepsilon)} \cdot \frac{\rho_l}{\rho_s - \rho_l} \cdot \frac{H}{w/\rho_s}, \quad w_0 = \frac{(\rho_s - \rho_l)}{18\mu} \cdot d_p^2 \cdot g \quad (8)$$

ここで、(8) 式を  $\bar{u} = \Pi_1 \cdot \Pi_2 \cdot \Pi_3$  と表示すると、 $\Pi_1$  はケーキ空隙率、 $\Pi_2$  はケーキ密度、 $\Pi_3$  は無次元圧力勾配であり、それぞれ (9) 式のように表される。

$$\bar{u} = \frac{u}{w_0}, \quad \Pi_1 = \frac{\varepsilon^3}{10(1-\varepsilon)}, \quad \Pi_2 = \frac{\rho_l}{\rho_s - \rho_l}, \quad \Pi_3 = \frac{H}{w/\rho_s} = \frac{\text{ろ過圧力}}{\text{ケーキ質量}} = \frac{H}{(1-\varepsilon) \cdot L} \quad (9)$$

以上より、現象はこれら 3 つのパラメータで支配されることが分かる。

#### 4. 実験結果と考察

実験結果の 1 例を図 2 に示す。図 2 には、濃度 16.07%、平均粒子径  $8.55 \mu m$ 、空気量  $0.8 l/min$  の実験条件におけるろ液の時間的变化、懸濁槽の水深の上昇過程が示されている。プロットした点が実測値で、実線が数値解である。これらの図からろ過の進行に伴ってケーキが成長して、時間当たりのろ液量が減少する様子と、それに対応して粒子懸濁槽内の水深が上昇する様子が記されている。実験開始段階ではろ布+ケーキの抵抗が小さいためろ液流量がタンク内への供給水量を上回ってタンク内の水位が一次下降している。その後ケーキ厚の増大によるろ過抵抗の増加につれて徐々にタンク内水位が回復していく様子が明白に再現されている。他の実験結果や数値解との比較については講演発表時に示す。

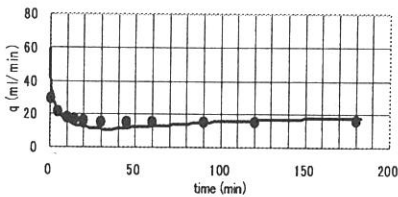


図 2-1 時間変化に伴う累積ろ液量

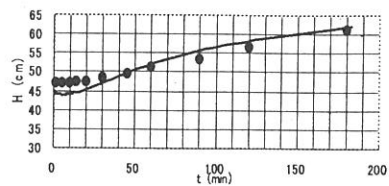


図 2-2 時間変化に伴う水深の上昇過程

#### 5. まとめ

粒子懸濁槽内の一部にろ過装置を付けて、懸濁水の静水圧によりケーキろ過を行う方法について検討した。ろ過ケーキの表面近傍に高速の攪拌流を起こして、クロスフローろ過に近い現象を生じさせた。粒子、流体の保存則と Darcy の法則を用いた数式モデルは、室内実験の結果をよく再現し、このモデルの有効性が確かめられた。また式の無次元化により式の簡略化が図れた。

[参考文献]

- 1) 井伊谷 敏一、三輪 茂雄：化学工学通論 II (1982)
- 2) 藤崎一裕、小野 信行：第 4 回日中ろ過分離国際会議論文集 p25-31、(2002) 杭州