

# 醸酵工業における滷過, 圧搾分離の諸問題

大阪大学工学部 永井史郎

## 1. 緒言

一般の化学工業において滷過をはじめとした沈降, 圧搾, 脱水などの固体・液体系における機械的分離操作は単位操作として応用されている分野が極めて広く, 非常に重要な部門を占めている. またとくに最近の顕著な傾『として, これらの分離操作系統の自動連続化, 装置自身の自動化の問題の開発が重要となってきた. 筆者の関与する醸酵においても培養菌体の分離滷過, 醸造もろみの滷過, 圧搾, 組織培養培地の滷過殺菌などスラリーの種類および処理の目的をそれぞれ異にし, 分離機構も異なっている操作が数多くふくまれている. 特に従来化学工業で取扱ってきたスラリーと醸酵工業におけるものは本質的に異なるものが多い. したがって化学工学の分野で最近とくに進歩したケーキ滷過に対する理論などもそのままの形では醸酵工業における操作に適応させることが困難な場合も生じてくる. また醸酵工業における固体・液体系の分離はいわゆる圧搾操作により高収率に搾出する場合が多く, しかもこれらの工程の管理は経験的に行なっている場合が多い. それは現在までのところ圧搾理論が確立されていないことが主な原因であると考えられる. かかる観点から筆者は醸酵工業における滷過, 圧搾に対し若干の検討を加えてきたので, その研究結果を中心とし最近この分野で問題となっている2, 3の話題について紹介することとする.

## 2. ケーキ滷過理論, 圧搾理論とその応用

機械的に固液を分離する場合, スラリーがどのような物性をもっているかを知ることは極めて重要である. 従来ケーキ滷過ではスラリー中の固形物が無機物であっても, 有機物であっても粒子径が比較的大きく粒子が沈降する場合が多く図1の模型が考えられる. 図1では流出滷液量に比例的に固形分が堆積し後述の(8)式が誘導できる.

一方圧搾に供されるスラリーは天然有機物を固形物と

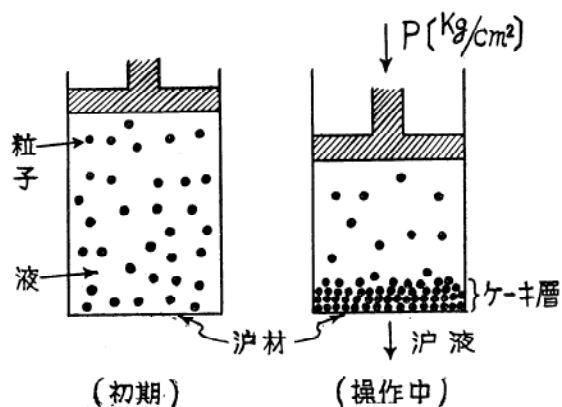


図1 ケーキ滷過模型

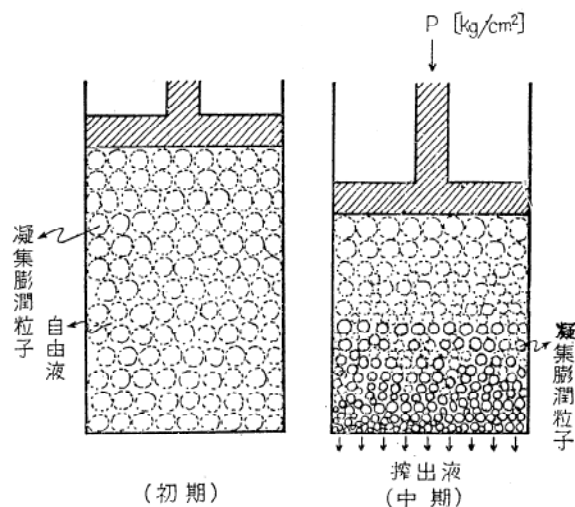


図2 圧搾模型

する場合が多く粒子が凝集, 膨潤している場合が多く固形物濃度が比較的小さいにもかかわらず, スラリーは泥状を呈する場合が多い. この状態を模型的に示したのが図2である. この場合固体粒子は分散した状態にあり搾出進行にともないケーキ滷過のように固形分が堆積する現象はなく, 圧搾層の底部における凝集・膨潤粒子の大きさは圧搾層上部のそれにくらべ小さくなり, 上部ほど連続的に空隙率が大きい状態である<sup>1)</sup>.

### 滷過理論とその応用

固体粒状層と流体間の相対的運動を考慮して誘導された

Kozeny Carman<sup>2), 3)</sup> 式は次式で示される。

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{K' g_0 P}{\mu L} \quad (1)$$

ここで

$$K' = \frac{\varepsilon^3}{k' S_0^2 (1-\varepsilon)^2} \quad (2)$$

(1)式において Ruth<sup>4), 5)</sup> は  $L/K'$  に相当する部分を滷過抵抗  $R$  として次式を設定した。

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{g_0 P}{\mu R} \quad (3)$$

ここで Ruth は滷過抵抗をケーキに基づく抵抗と滷材に基づく抵抗の和と考え、巧みに平均比抵抗  $\alpha$  の概念を導入した。

$$R = \alpha w + R_m \quad (4)$$

ここで  $w$  は滷過進行にともなって比例的に滷材に堆積する固形分量であり、比例定数  $\alpha$  を平均比抵抗と定義する。したがって(3), (4)式より次式が成立する。

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{g_0 P}{\mu(\alpha w + R_m)} \quad (5)$$

(5)式において滷過期間中平均比抵抗 および 滷材抵抗を一定とし、また滷材に堆積する固体量  $w$  は次の物質収支式で表わされる。

$$\frac{w}{s} = \rho v + m w \quad (6)$$

(5), (6)式より次式が成立する。

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{g_0 P}{\mu(\alpha \frac{\rho s}{1-m s} v + R_m)} \quad (7)$$

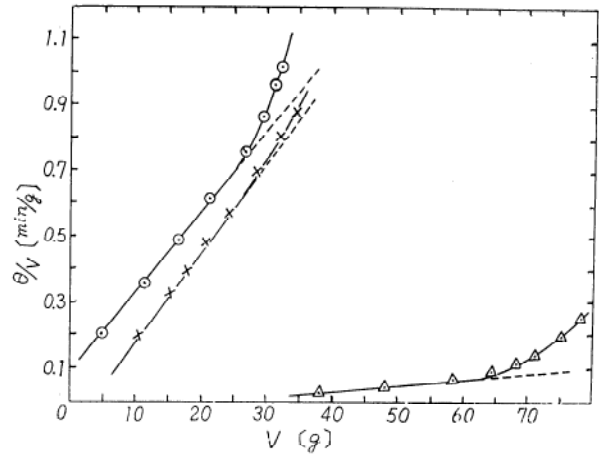
(7)式を積分すれば

$$k_1 v + k_2 = \frac{\theta}{v} \quad (8)$$

$$k_1 = \frac{s \alpha \rho \mu}{2 g_0 P (1 - m s)}$$

$$k_2 = \frac{R_m \mu}{g_0 P}$$

(8)式は回分恒圧滷過において  $v$  と  $\theta/v$  を実験値より計算すれば直線関係がえられ、勾配より比抵抗、切片より滷材抵抗が求まり滷過特性が定まる。醤油もろみ、*Endomyces* 培養液、でんぷん粕の固液分離過程にケーキ滷過方程式を適用すれば図3の結果をうる。図3で判ることは加圧初期一定期間直線として図解できるが暫時直線部よりはずれ弯曲することを示す。このことはケーキ滷過方程式のみでは上述のごとき、醸酵もろみ、菌体、食品らの脱水工程を十分に解析できないことを示し、圧搾理論の適用によらなければならないことを示唆している。



- : *Endomyces* 培養液 ( $s=0.173$ )  
 $Z=3.98$  [g/cm<sup>2</sup>],  $P=5.6$  [Kg/cm<sup>2</sup>]
- × : 醤油もろみ ( $S=0.075$ )  
 $Z=4.55$  [g/cm<sup>2</sup>],  $P=10.0$  [Kg/cm<sup>2</sup>]
- △ : でんぷん粕 ( $s=0.113$ )  
 $Z=4.72$  [g/cm<sup>2</sup>],  $P=5.6$  [Kg/cm<sup>2</sup>]

図3 ケーキ滷過方程式による解析例

### 圧搾理論とその応用

圧縮性泥状スラリーの固液分離過程では、滷材の抵抗はケーキの第一層に含まれると考えてよく、そのような場合(4)式は次式で表わされる。

$$R = \alpha w \quad (9)$$

したがって(3), (9)式より

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{g_0 P}{\mu \alpha w} \quad (10)$$

(1), (2), (10)式を比較して  $\alpha$  は次のごとき物性因子で表わされる。

$$\alpha = \frac{(1-\varepsilon)k'S_0^2}{\varepsilon^3 \rho s} \quad (11)$$

(11)式は粒子層の物理的性質を表わしており、比抵抗が粒子の物性と空隙率で表わされることを示す。ここで  $S_0$  は充填粒子比表面積 [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> solid] であるので粒子形状、粒子配列、粒径らによってかわり  $k'$  は Kozeny 定数 ( $\approx 5$ ) で粒子形状、空隙率、粒子配列、粒径らによって与えられる。非圧縮性ケーキ層における流体運動においては(11)式中空隙率  $\varepsilon$  ははぶ一定とみなせることから透過実験によって  $S_0$  を推定することも可能となり、このような場合には(11)式の  $\alpha$  は一定とみなされ Ruth の滷過方程式(8)式が成立する。しかし圧縮性を有するケーキ層においては(11)式中  $\varepsilon$ ,  $k'$ ,  $S_0$  がすべてケーキ層内で経時的に変化することである。したがって  $\alpha$  は当然これらの要因によって変化すると考えられる。

一般にケーキ層内の空隙率とケーキの湿乾質量比  $m$  の間には次式が成立する。

$$m = \frac{\rho\varepsilon + \rho_s(1-\varepsilon)}{\rho_s(1-\varepsilon)} \quad (12)$$

(11) 式中の  $1-\varepsilon/\varepsilon^3$  に (12) 式を代入して

$$\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} = \frac{\rho}{\rho_s} \frac{1}{m-1+\rho/\rho_s} \left\{ 1 + \frac{\rho}{m-1} \right\}^3 \quad (13)$$

したがって比抵抗  $\alpha$  は次式で示される。

$$\alpha = \frac{\rho}{\rho_s^2} \frac{1}{m-1+\frac{\rho}{\rho_s}} \left\{ 1 + \frac{\rho}{m-1} \right\}^3 k' S_0^2 \quad (14)$$

前述のごとく  $k' S_0^2$  の項は  $m$  の関数であり  $\left\{ 1 + \frac{\rho/\rho_s}{m-1} \right\}^3$  の項と併せて次式を設定する。

$$\frac{\rho k' S_0^2}{\rho_s^2} \left\{ 1 + \frac{\rho}{m-1} \right\}^3 = \alpha_0 \quad (15)$$

したがって

$$\alpha = \frac{1}{m-1+\rho/\rho_s} \alpha_0 \quad (16)$$

$\alpha_0$  を圧搾における平均比抵抗と定義すれば、 $\alpha_0$  も  $\alpha$  同様ケーキ層の物性因子、空隙率であらわされる。なお (16) 式で  $m$  の一次分数式を残したのは、上述のごとく圧搾過程においては  $dv/d\theta$  の経時的減少が  $m$  の減少に比例的であることが基本的であり、実用的な式を誘導する手段として残しておく。以上ケーキ滲過と圧搾の重要な相異点は前者において  $\alpha$  がほぼ一定とみなせることに對し後者は経時的に  $\alpha_0$  が変化することである。(10)、(16) 式より次式をうる。

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{g_c P(m-1+\frac{\rho}{\rho_s})}{\mu \alpha_0 w} \quad (17)$$

ここで (17) 式中の  $P$  は一般に液圧を意味する。滲過操作では一般に操作圧力を表面液圧とみなせるが圧搾操作では実質固体と液部分の圧力の和として考える必要がある。

$$P_s + P_t = P \quad (18)$$

したがって圧搾層表面では次式が成立し

$$P\varepsilon_t + P(1-\varepsilon_t) = P \quad (19)$$

圧搾層表面液圧として  $P\varepsilon_t$  を考える必要がある。ここで  $P\varepsilon_t$  を近似的に  $P\varepsilon$  とすれば有効液圧として (17) 式中の  $P$  を  $P\varepsilon$  として修正すれば次式をうる。

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{g_c P\varepsilon(m-1+\frac{\rho}{\rho_s})}{\mu \alpha_0 w} \quad (20)$$

(20) 式の  $\varepsilon$  は (12) 式より  $m$  に置きかえると

$$\varepsilon(m-1+\frac{\rho}{\rho_s}) = m-1 \quad (21)$$

(20)、(21) 式より

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{g_c \cdot P(m-1)}{\mu \alpha_0 w} \quad (22)$$

(22) 式はケーキ滲過方程式に対応する圧搾基礎方程式であり、圧搾過程では式中  $w$  は一定とみなされ、分子項にケーキの湿乾質量比  $m$  の挿入したことが圧搾基礎式の特徴であり  $m$  については圧搾の基本現象として次式が成立する。

$$m = m_0 - \frac{\rho}{w} v \quad (23)$$

(22)、(23) 式より (24) 式をうる。

$$\begin{aligned} \frac{dv}{d\theta} &= \frac{g_c P(m_0-1-\frac{\rho}{w}v)}{\mu \alpha_0 w} \\ &= \frac{g_c P \rho}{\mu \alpha_0 w^2} \left( \frac{m_0-1}{\rho} - v \right) \end{aligned} \quad (24)$$

ここで

$$\frac{m_0-1}{\rho} = v_T \quad (25)$$

(24)、(25) より次式をうる。

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{g_c P \rho}{\mu \alpha_0 w^2 Z^2} (v_T - v) \quad (26)$$

$\alpha_0$  は (15) 式に示すごとく圧搾層内の物性因子を含んだ値であるが、微小時間内ではほぼ一定とみなしそのような一定期間について (26) 式を積分すれば (27) 式をうる<sup>7), 7), 8)</sup>。

$$\ln\left(1 - \frac{v}{v_T}\right) = -\frac{g_c P \rho}{\mu \alpha_0 w^2 Z^2} \left(\frac{\theta}{Z^2}\right) = K \left(\frac{\theta}{Z^2}\right) \quad (27)$$

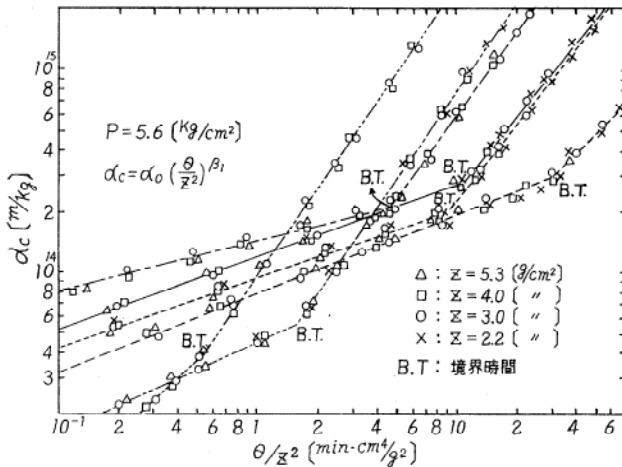
(27) 式の勾配  $K$  より順次  $\alpha_0$  を求めることが可能である<sup>7), 8)</sup>。また (27) 式では任意の時間を出発点として逐次  $\alpha_0$  を推定することも可能である<sup>7), 8), 9)</sup>。恒圧回分圧搾において (27) 式に準じて実験解析を行なえば比抵抗  $\alpha_0$  は次の実験式でまとめられる。図 4 にその一例を示す。

$$\alpha_0 = \alpha_0 \left(\frac{\theta}{Z^2}\right)^{\beta_1} \quad (28)$$

図 4 において比抵抗  $\alpha_0$  はいずれの場合においても圧搾第 1 段および圧搾第 2 段に分割されることを示す<sup>10)</sup>。この圧搾第 1 段は主として自由液の移動の段階であり、圧搾第 2 段では残存自由液、附着液、組織液等の滲透的液移動が中心であると考えられる。

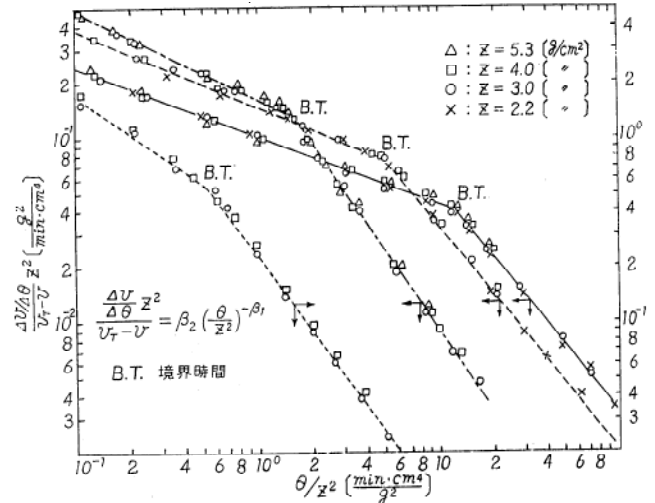
### 圧搾計算法

恒圧回分圧搾過程では (28) 式を (26) 式に代入して (29) 式をうる。



- : 醤油もろみ (s=0.051)
- : " (s=0.078)
- ..... : " (s=0.086)
- - - : " (s=0.134)
- : Endomyces 培養液 (s=0.173)
- ... - : でんぶん粕 (s=0.113)

図4 比抵抗と操作時間, 初期仕込みスラリーとの関係



- : 醤油もろみ s=0.078 P=10.0 [Kg/cm^2]
- - - : 醤油もろみ s=0.075 P=10.0 [Kg/cm^2]
- : Endomyces 培養液 s=0.173 P=5.6 [Kg/cm^2]
- ... - : でんぶん粕 s=0.113 P=5.6 [Kg/cm^2]

図5 比流出速度と時間, 初期仕込みスラリー量の関係

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{g_c \rho (v_T - v)}{\mu s^2 Z^2 \alpha_c \left(\frac{\theta}{Z^2}\right)^{\beta_1}} \quad (29)$$

定数項を整理すれば次式が成立する。

$$\frac{\frac{dv}{d\theta}}{v_T - v} Z^2 = \beta_2 \left(\frac{\theta}{Z^2}\right)^{-\beta_1} \quad (30)$$

(30)式の左辺  $(dv/d\theta)/v_T - v$  [1/sec] は, 比流出速度 (specific flow rate) を示し,  $\beta_1, \beta_2$  が一定値をとる場

合には, 比流速対時間の関係を両対数紙上点綴すれば直線関係がえられることを示す。なお圧力の影響を調べるには, (30)式で同一回分量に対し操作圧力を変えれば  $\beta_1, \beta_2$  が圧力の関数となり非恒圧過程における解析ができる。(30)式に準じて各スラリーに対する比流速対時間を点綴すれば図5のごとくなり両対数紙上直線的に図解できる。圧搾第1段, 第2段の境界時点は図4の比抵抗の場合とほぼ一致する。図5中の  $\beta_1, \beta_2$  の値を表1に示す。

次に(30)式で  $\beta_1, \beta_2$  が定まれ

ば積分して収率  $v/v_T$  を求めることができる。すなわち圧搾第1段では初期条件  $\theta=0, v=0$  とすれば積分して次式をうる。

$$\frac{v}{v_T} = 1 - \exp\left\{-\frac{\beta_2}{1-\beta_1} \left(\frac{\theta}{Z^2}\right)^{1-\beta_1}\right\} \quad (31)$$

また圧搾第2段では初期条件  $\theta=\theta_1, v=v_1$  とすれば

表1 各種スラリーの  $\beta_1, \beta_2$  の値

段階 $\beta_1, \beta_2$ スラリーの種類	圧搾第1段		圧搾第2段	
	$\beta_1$ [ - ]	$\beta_2$ [ $\frac{g^2}{min \cdot m^4}$ ]	$\beta_1$ [ - ]	$\beta_2$ [ $\frac{g^2}{min \cdot m^4}$ ]
醤油もろみ s=0.078, P=10 [Kg/cm <sup>2</sup> ]	0.37	0.10	1.23	0.83
醤油もろみ s=0.075, P=10 [Kg/cm <sup>2</sup> ]	0.42	0.15	1.20	0.54
Endomyces 培養液 s=0.173, P=5.6 [Kg/cm <sup>2</sup> ]	0.47	0.16	1.50	0.27
でんぶん粕 s=0.113, P=5.6 [Kg/cm <sup>2</sup> ]	0.88	0.36	1.34	0.23

同様に積分して次式をうる。

$$\frac{v}{v_T} = 1 - \left(1 - \frac{v_1}{v_T}\right) \exp\left[-\frac{\beta_2}{1-\beta_1} \left\{\left(\frac{\theta}{Z^2}\right)^{1-\beta_1} - \left(\frac{\theta_1}{Z^2}\right)^{1-\beta_1}\right\}\right] \quad (32)$$

(31), (32)式で判明することは圧搾過程の全工程を通じて同一収率に達する時間は  $Z^2$  に比例して大きくなることを示し、このような現象は圧搾機構の特徴と考えられる。

また圧搾第1段内の一定期間 Ruth 滲過方程式による解析の可能なことを述べたが<sup>(10), (11)</sup>, 滲過方程式の成立する期間も収率は  $\theta/Z^2$  の関数として表わされることを次に示す。すなわち滲材の抵抗を無視した場合, (8)式より次式をうる。

$$v^2 = k_1 \theta \quad (33)$$

両辺を  $v^2 v_T$  で徐し, さらに  $v_T = ((1-s)Z)$  なる関係を使えば次式をうる。

$$\frac{v}{v_T} = k_2 \left(\frac{\theta}{Z^2}\right)^{0.5} \quad (34)$$

(34)式は(31)式で  $\beta_1 = 0.5$  とすれば加圧初期期間 ( $\theta$  が小さい間) 近似的に成立し Ruth の成立することが理解できる。

さて(31), (32)式より圧搾収率  $v/v_T$  を計算し, 実験値と比較すれば図6の結果をうる。図上実験値と計算値はよく一致し, (30)式による圧搾解析法が成立することを示

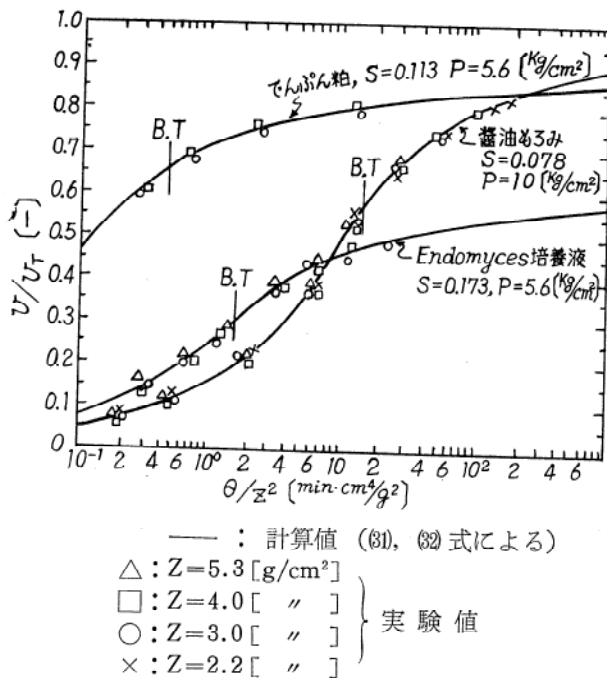


図6 収率と時間, 初期仕込みスラリー量の関係および実験値と計算値の比較

す。したがってこの解析法によって長期の圧搾過程における流出流量の推定も可能であり, 圧搾基礎微分方程式(22)式は圧搾過程における流体流動機構を適確と表わしていると考えられる。

### 3. 最適化に対する2, 3の考察

滲過操作に対する最適化については専門図書に数多く述べられているのでここでは省略し, 圧搾操作におけるこれらの問題を2, 3考察する。

一般に圧搾工程では初期仕込みスラリー量, 操作圧力と時間の関係を知ることは極めて重要である。先づ第1の問題点である初期スラリー仕込み量と圧搾収率については圧搾計算法の章で述べたが, 圧搾の全工程に対し収率は  $\theta/Z^2$  の関数で表わされる。したがって回分式の場合には装置の組立て洗滌らの時間を考慮しなければならないが, 連続的に圧搾を行なう場合には, 仕込みスラリー量  $Z$  を小さくする方がよく, またそれらの最適化に対する  $Z$  および  $\theta$  は(31), (32)式を用い検討することができる。第2の問題点である圧力の影響を次に述べる。現在行なわれている圧搾操作では順次加圧するいわゆる非恒圧の方法が用いられている場合が多い。図4, 図5より判るごとく, スラリーの種類により圧搾第1段, 第2段の境界時点は異なる。また全てのスラリーについて圧搾第2段に入れば比流出速度は極めて小さくなることを示す。したがって圧搾工程ではこの境界点を知ることが極めて重要であり, 第2段では更に加圧し比流出速度を増大さす必要がある。この場合の圧力の効果については(30)式で解析し,  $\beta_1, \beta_2$  の項に圧力の因子が挿入することになる。なお圧搾第1段においても順次加圧する方法が考えられるが, 一般に圧搾に供せられるスラリーは圧縮性(醤油もろみでは圧縮指数 0.94~0.97)であり, 比較的低压で充分であると考えられる。したがって

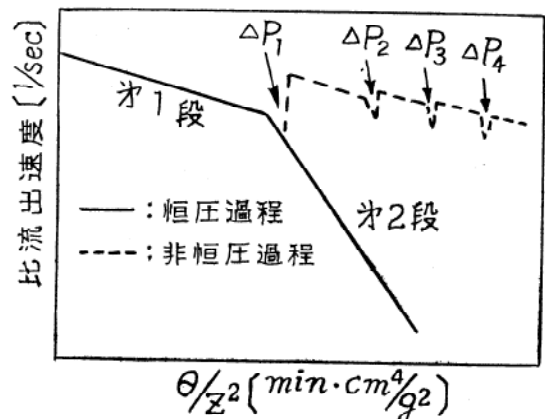


図7 非恒圧圧搾の模型

圧搾第2段以後において順次加圧し非恒圧に対する解析を行なう必要があり、諸条件の検討は圧搾計算法(30)式を用いればよい。模型化すれば図7のごとく表わされる。

#### 4. 圧搾層内部における流速分布

筆者らの圧搾理論は前述のごとく滲過理論に圧縮性を加味した解析を行ない誘導したものである。これらの誘導にあたっては圧搾層内の空隙率、圧搾層の湿乾質量比が経時的に変化することが基本概念であった。ここではこのような圧搾層内の物性因子について述べるものである<sup>1)</sup>。圧縮性粒状層内の流速分布について白戸<sup>12)~15)</sup>、Tiller<sup>12) 15)</sup>はケーキ滲過の場合につき近似的に内部特性を推定する方法を公表している。しかし、これらの方法を圧搾機構に対し直接応用するには2、3の問題がある<sup>2)</sup>。そこで圧縮性粒状層内の流量と空隙率間の基礎的な物質収支式を利用して、実験結果より圧搾層内の流速を推定することを試みた。一般にケーキの微小薄層内の空隙容積は  $\epsilon_x \cdot A dx$  で表わされる。したがって単位滲材面積当りの圧搾層の全空隙容積は次式で表わされる。

$$\frac{\text{空隙容積}}{\text{単位滲材面積}} = \int_0^L \epsilon_x dx \quad (35)$$

したがって圧搾層の底部より任意の距離までに含まれる空隙容積は

$$v_x = \int_0^x \epsilon_x dx \quad (36)$$

また圧搾層内の流量と空隙率との間の物質収支より次式が成立する。

$$\begin{aligned} & (\text{圧搾層の底部より } x \text{ の距離にある面に流入する液量}) - (\text{圧搾層の底部より流出する液量}) = (\text{圧搾層の底部より } x \text{ の距離までの空隙容積の変化量}) \end{aligned} \quad (37)$$

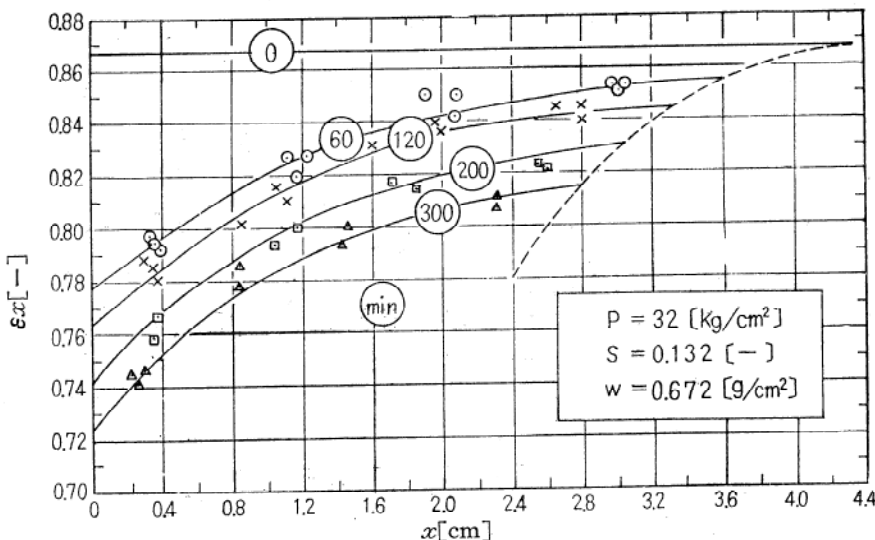


図8 圧搾層の底より  $x$  の位置における空隙率分布 (醤油もろみ)

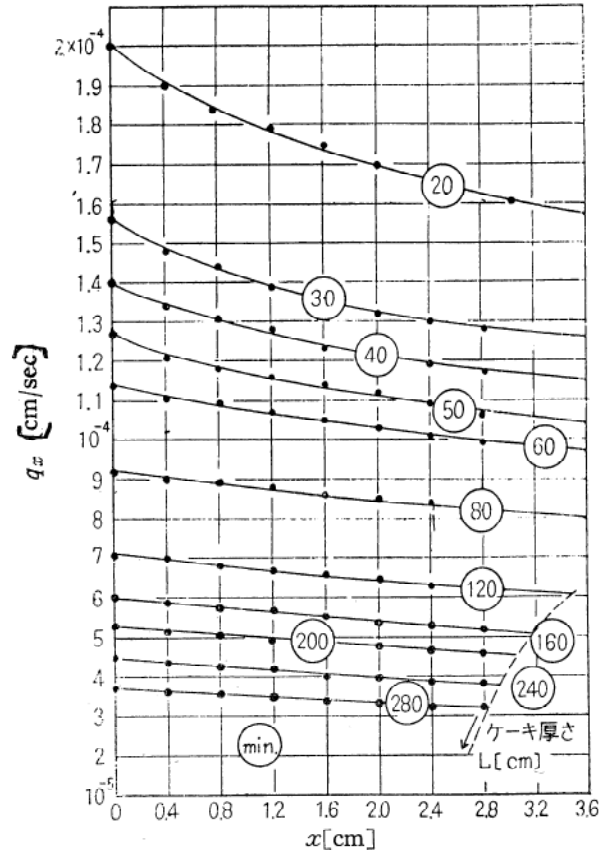


図9 圧搾層内部の流速分布, 醤油もろみ  
 $P=32$  [Kg/cm<sup>2</sup>],  $s=0.132$

したがって

$$q_x - q_0 = \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \int_0^x \epsilon_x dx \right] \quad (38)$$

(38)式より

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon_x}{\partial \theta} \quad (39)$$

(38)、(39)式の実験解析に対しては(38)式より近似的に次式を使用すればよい。

$$q_x - q_0 \approx \frac{\Delta}{\Delta \theta} \left[ \int_0^x \epsilon_x dx \right] \quad (40)$$

(40)式を実験解析するためには任意の時間における圧搾層内の空隙率を知る必要がある。その一例を図8に示す。図8において任意の距離  $x$  までの空隙容積を面積積分によって計算し、これらの値を各時間に対し点綴してえた曲線の勾配より近似的に(40)式の右辺が求まる。圧搾層底部からの流速  $q_0$  は実験値より計算できるので(40)式から  $q_x$  を求めることが可能となる。その結果を図9に示す。

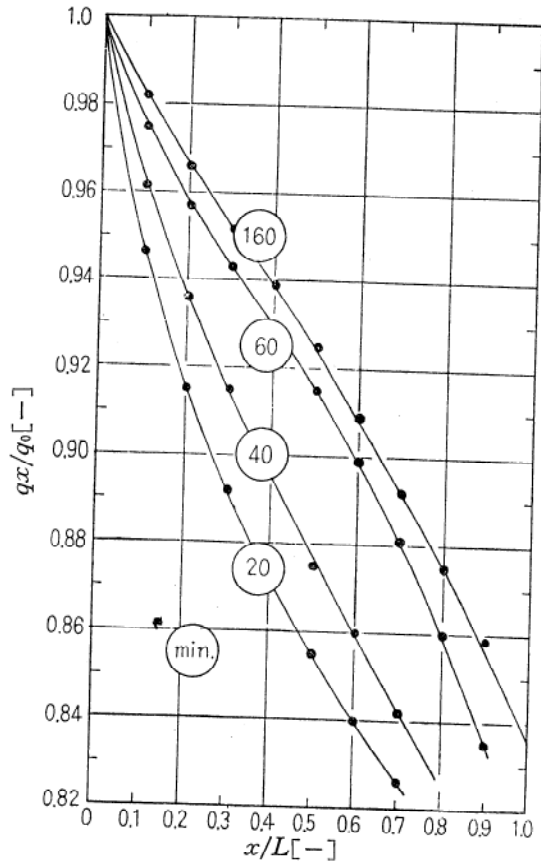


図10 圧搾層内部の流速分布, 醤油もろみ  
 $P=32 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}, s=0.132 \text{ [-]}$

図9より  $q_x/q_0$  対  $x/L$  の関係を求めれば図10をうる。図9, 10において圧搾層内の流速勾配は加圧初期では圧搾層の底部ほど大きく, 空隙率は圧搾層の底部ほど急速に小さくなることを示す。さらに時間が経過すれば流速勾配は圧搾層内を通じてほぼ一定となり, 次第に流速勾配は比較的圧搾層上部において大きくなり, このような期間を通じて空隙率は圧搾層を通じて次第に一定となっていくことが予想される。

### 5. 圧密論の滲過, 圧搾への適用

Ruth のケーキ滲過理論は, 土質力学における Darcy の透水理論と根本的に同一である。ただ比抵抗  $\alpha$  が透水係数  $k$  に代わるだけである。さて Darcy の透水理論から発展した Terzaghi, Peck の圧密論<sup>16), 17)</sup> とは粘土のような非常に圧縮性のある水の飽和した土層に荷重が加わるとこの層は圧縮され, 過剰水がこの層より流出するというものであり圧搾機構と極めてよく似た現象を取扱っている。しかしこれらの理論式は次のような重要な仮定のもとに誘導されたものである。すなわち (a) 透水係数は圧密層中のすべての点で, しかも圧密のすべての段階で同じである。また体積圧縮係数  $m_0 \text{ [cm}^2/\text{Kg]}$

も同様に仮定する。(b) 過剰水に鉛直線に沿ってのみ流動する。

基礎微分方程式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial p_x}{\partial \theta} = C_v \frac{\partial^2 p_x}{\partial x^2} \quad (41)$$

$$C_v = \frac{k g_0}{m_0 \mu}$$

(41) 式は熱および物質移動の拡散微分方程式である。 $C_v$  は圧搾機構における比抵抗  $\alpha_0$  に相当し  $C_v$  を一定とみなすことに (41) 式の適用限界があるが, 滲過機構のごとく比抵抗がほぼ一定とみなせる場合には (41) 式が成立し, 川島<sup>18)</sup> は污水处理における滲過機構に適用した結果を報告している。また白戸<sup>19), 20)</sup> らは圧搾機構への適用性を検討し圧密比が  $\theta/Z^2$  の関数で表わされ,  $C_v$  を滲過期間終了時の実験値から推定する方法を試みている<sup>20)</sup>。すなわち圧密比は圧搾収率と同等のものであり, (27) 式中の初期仕込みスラリー量  $Z$  を初期圧搾層厚さ  $L_0$  になおせば (27) 式は次式で表わされる。

$$\ln\left(1 - \frac{v}{v_T}\right) = K\left(\frac{\theta}{Z^2}\right) = K_1\left(\frac{\theta}{L_0^2}\right) \quad (42)$$

$$(\because Z = L_0 \rho_w)$$

したがって  $K_1 \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \right]$  は圧密係数  $C_v \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \right]$  と相似し

$$\alpha_0^{-1} \propto K_1 \propto C_v \quad (43)$$

(43) 式が成立し, 白戸らの圧密論からの解と筆者らの滲過理論からの解が相似することを示す。ただ (42) 式の解析において白戸らは前述のごとく滲過終了時の実験値から  $C_v$  を求める方法を取り, 筆者らは (42) 式の  $K$  を微小時間内一定とみなすことにより順次経時的に  $K$  を求め比抵抗を推定し<sup>7) 8) 9)</sup>, 前述のような圧搾解法を誘導した点が相異点と考えられる。また Kőrmendy<sup>22)</sup> も圧密論をリングパルプの圧搾に適用し, 圧密論の時間係数と収率の関係において収率が  $\theta/Z^2$  で表わされることを示している。

### 6. その他の話題および結語

滲過装置を用いて工業的に固液分離を行なう場合, Jahreis<sup>23)</sup> は Hermans-Bredée<sup>24), 25)</sup> による3様式の滲過模型のいずれかで解析することの必要性を述べている。Ruth の滲過方程式もこの中に含まれる。他の2式は完全閉塞型, 標準閉塞型であるが, 圧搾機構の解明には不適當である。しかし希薄溶液である組織培養用培地の滲過殺菌に Williams<sup>26)</sup> らは標準閉塞模型を適用し, seitz の滲過機で滲過した場合の解析によく適合することを報告している。培養液の菌体滲過について *S. gri-*

seus の場合について白土<sup>27)</sup>らがケーキ滷過式を適用してスラリーの温度、pH などの要因と滷過効率との相関について報告し、一定期間ケーキ滷過式が適用できることを述べているが、一部 Ruth 解法の成立しない場合も認めている。このような場合とか更に後半の分離操作には圧搾による解析が必要であり、前述の *Eudomyces* 培養液の滷過終了以後におけるスラリーは圧搾理論により解析できることから考えて、これら一連の分離操作には圧搾理論の適用が必要であると考えられる。またアルコール蒸留廃液(固形分約3%)の脱水分離について片岡<sup>28)</sup>らはケーキ滷過式を適用し、原液を篩分けした場合の比抵抗との相関およびスラリーの圧縮性を調べている。これら醗酵液は非ニュートン体流動を示すものが多いので滷過、圧搾機構の解明には当然これらのレオロジー的性質を加えて検討してゆくことが必要と考えられる。さらに、Brenner<sup>29)</sup>、白戸<sup>30)</sup>らが開発した非次元滷過に関する問題も重要である。従来の滷過理論は滷過によって生成するケーキの表面が滷材表面に平行で、滷液流れの方向が一方向のみであるような滷過に関する問題に限られていた。しかし大型の滷葉滷過機的设计には次元滷過の解析のみを基礎にしたものでは無理で、ケーキ形成を3次元で解析せんとする試みがなされた。これらの研究は直接滷過装置の機構、容量決定に結びつくものであり、工業滷過として大きな課題である。

## 使用記号

$C_v$  : 圧密係数 [ $\text{cm}^2/\text{sec}$ ]  
 $g_c$  : 重力換算係数 [ $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{Kg}\cdot\text{sec}^2$ ]  
 $k'$  : Kozeny 係数 [-]  
 $L$  : 圧搾層またはケーキ厚さ [ $\text{cm}$ ]  
 $L_0$  : 初期仕込みスラリーの厚さ [ $\text{cm}$ ]  
 $m_0$  : 初期スラリーの  $m$  の値 [-]  
 $m$  : ケーキの湿乾質量比 [-]  
 $m_v$  : 体積圧縮係数 [ $\text{cm}^3/\text{Kg}$ ]  
 $P$  : 操作圧力 [ $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ]  
 $P_x$  : ケーキの底より  $x$  の位置における液圧 [ $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ]  
 $P_s$  : ケーキの底より  $x$  の位置における固体圧縮圧力 [ $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ]  
 $q_x$  : ケーキ底より  $x$  の位置における流速 [ $\text{cm}/\text{sec}$ ]  
 $q_0$  : ケーキ底よりの流速 [ $\text{cm}/\text{sec}$ ]  
 $R$  : 滷過抵抗 [ $1/\text{cm}$ ]  
 $R_m$  : 滷材抵抗 [ $1/\text{cm}$ ]  
 $s$  : スラリーの固形分濃度 [-]  
 $S_0$  : 粒子の比表面積 [ $1/\text{cm}$ ]  
 $v$  : 流出液量 [ $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ]

$v_T$  : 初期スラリー中に含まれる全液量 [ $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ]  
 $v_x$  : ケーキの底より  $x$  までの空隙容積 [ $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ]  
 $w$  : 単位面積当りの固体量 [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]  
 $x$  : ケーキの底からの距離 [ $\text{cm}$ ]  
 $Z$  : 単位面積当りの初期スラリー量 [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]  
 $\alpha$  : 滷過平均比抵抗 [ $\text{m}/\text{kg}$ ]  
 $\alpha_c$  : 圧搾平均比抵抗 [ $\text{m}/\text{kg}$ ]  
 $\varepsilon$  : 平均空隙率 [-]  
 $\varepsilon_l$  : ケーキ表面における空隙率 [-]  
 $\varepsilon_x$  : ケーキの底より  $x$  の位置における空隙率 [-]  
 $\theta$  : 操作時間 [ $\text{min}$ ]  
 $\rho$  : 滷液密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]  
 $\rho_s$  : 固体密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]  
 $\rho_w$  : スラリー密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]  
 $\mu$  : 滷液密度 [ $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{sec}$ ]

## 文 献

- 1) 永井, 田口, 寺本: 醸工誌 42, 247 (1964)
- 2) P. C. Carman: Trans. Inst. Chem. Eng. (London) 16, 168 (1938)
- 3) *ibid*: Ind. Eng. Chem. 30, 1163 (1938)
- 4) B. F. Ruth: Ind. Eng. Chem. 25, 153 (1933)
- 5) *ibid*: *ibid*. 27, 708 (1935)
- 6) 永井, 太田, 田口, 寺本: 醸工誌 42, 527 (1964)
- 7) 永井, 五十嵐, 田口, 寺本: 生物化学工学シンポジウム (東京大学) (1963)
- 8) 永井, 五十嵐, 田口, 寺本: 醸工誌 41, 412 (1963)
- 9) 寺本, 永井: 醗酵協会誌, 投稿中
- 10) 永井, 田口, 寺本: 醸工誌, 42, 582 (1964)
- 11) 永井, 五十嵐, 田口, 寺本: 醸工誌, 41, 1 (1963)
- 12) F. M. Tjller, 白戸: 化学工学, 26, 925 (1962)
- 13) 白戸, 三分一: 化学工学 27, 472 (1963)
- 14) 白戸, 村瀬: 化学機械技術 第15集 (1963)
- 15) F. M. Tiller, M. Shirato: A. I. Ch. E. J 10, 61 (1964)
- 16) 最上: 土質力学基礎編 岩波書店版 (1958)
- 17) K. Terzaghi: "Theoretical soil Mechanics" John, Wiley & Sons New York (1956)
- 18) 川島: 第2回化学工学総合シンポジウム要旨集 (1963)
- 19) 白戸, 三分一, 加藤, 林: 化学工学協会東海大会要旨集 (1963)
- 20) 白戸, 加藤, 本村, 柴田: 化学工学協会四日市大会要旨集 (1964)
- 21) 永井, 八木, 田口, 寺本: 醸工誌 43, 266 (1965)
- 22) I. Körmeny: J. Food Science 29, 631 (1964)
- 23) C. A. Jahreis, T. Shriver: Chem. Eng 70, 237 (1963)
- 24) P. H. Hermans, H. C. Bredée: J. Soc. Chem. 55, 1 (1936)
- 25) H. P. Grace: A. I. Ch. E. J 2, 307 (1956)
- 26) F. D. William, B. H. Malcolm: J. Biochem. Microbio. Tech and Eng.:2, 93 (1960)
- 27) 白土, 江角: 醸工誌, 41 86 (1963)
- 28) 片岡, 樺野: 醸工誌, 43 43 (1965)
- 29) H. Brenner: A. I. Ch. E. J 7, 666 (1961)
- 30) 白戸, 村瀬: 第2回化学工学総合シンポジウム要旨集 (1963)