

1. 緒言

本研究では、チーズの製造工程において、チーズホエーからクロスフロー限外濾過によりタンパク質成分を分離、濃縮するプロセスを想定した圧縮性ケーキ層を生じるクロスフロー限外濾過プロセスを対象としている。本研究では、このプロセスにおいて、濾過の進行過程や固体粒子の挙動について検討し、濾過抵抗増加の支配的要因に基づく透過過程のモデル化を行ってきた。本発表では、このモデルによって得られた知見に基づき、モデル中のパラメータと操作条件の関係を検討し、その相関関係を用いてクロスフロー限外濾過操作の透過過程をモデルによる計算から予測する手法を構築することを目的とした。

2. 透過過程のモデル化

2.1. 濾過抵抗増加の支配的要因

本研究では、圧縮性ケーキ層を生じるクロスフロー限外濾過の透過過程において、濾過の進行過程や懸濁粒子、ケーキ層の挙動について検討した。その結果、本研究では、濾過抵抗を決定する支配的な因子は透過過程初期においては細孔閉塞およびごく薄いケーキ層の抵抗、それ以降においては圧縮性ケーキ層の抵抗であると考え、それぞれの過程を表すモデルを適用することを考えた。

2.2. 細孔閉塞モデル

透過過程初期に細孔閉塞およびごく薄いケーキ層により抵抗が支配的になる領域においては、Hoらによる細孔閉塞モデルが提案されている[1]。このモデルでは、全透過流量が未閉塞細孔を通過する透過流量と、閉塞されている細孔を通過する透過流量の和で表すことができるとしており、この全透過流量 Q_p は次式で表される。

$$Q_p = Q_a \left[\exp\left(-\frac{\alpha \Delta P C_b t}{\mu R_m}\right) + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2fR'\Delta P C_b t}{\mu R_m^2}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha \Delta P C_b t}{\mu R_m}\right) \right] \right] \quad (1)$$

この式における α と fR' をパラメータとし、操作条件によって値を変えらることにより Q_p の経時変化を推算する。

2.3. 圧縮降伏応力モデル

透過過程中、後期に圧縮性ケーキ層による抵抗が支配的になる領域においては、クロスフロー濾過についての圧縮降伏応力モデルが提案されている[2]。このモデルでは、ケーキ層体積に関する物質収支式が原液の流動から生じる剪断応力によるケーキ層の除去量を考慮に入れて次式で表される。

$$\int_0^t \phi_0 dz + \frac{\phi_0}{1-\phi_0} \Delta V_t - v \cdot \Delta t = \int_0^{t-t_1} \phi dz \quad (2)$$

この式における v をパラメータとし、操作条件によって値を変えることにより、濾過時間 t と濾液体積 V の関係を推算する。

2.4. モデルによる推算結果

本研究では、Whey Protein Concentration(WPC)懸濁液を試験流体とし、原液体積分率 ϕ_0 を0.1、濾過圧力 ΔP を180-220kPa、クロスフロー流速 u_f を3.0-6.0cm/sと設定した条件においてクロスフロー限外濾過実験を行い、ここまでで述べたモデルによる推算結果との比較を行った。モデルによる推算においては、 α 、 fR' 、 v をパラメータとしたフィッティングを行い、また、初期とそれ以降のモデルが切り替わる移行時刻 t_1 をモデルのフィッティングにより決定することにより、2つのモデルを組み合わせ、透過過程全体の推算を行った。その結果、モデルと実験結果が良好に一致し、本モデルにより、透過過程全体が良好に推算できることが示された。

3. モデルによる透過過程の予測

ここまでで述べたモデルを用いて、クロスフロー限外濾過実験の結果をパラメータフィッティングによらず予測することを考えた。そのためには、モデル中のパラメータである α 、 fR' 、 v 、 t_1 を操作条件

などから予め決定し、計算を行う必要がある。そこで、本研究では、操作条件やパラメータに関する無次元数を定義することにより、透過過程の現象についての検討を行い、それらの相関式を導いた。

まず、クロスフロー限外濾過の流動と透過の関係を特徴付ける無次元数として、膜に水平な方向と垂直な方向の懸濁粒子の移動流束の比を表した N_c を次式で定義した。

$$N_c = \frac{(1-\phi_0)\mu_f}{J_0} \quad (3)$$

この N_c を基本の無次元数として、パラメータを含む無次元数との比較を行う。

細孔閉塞係数 α に関する無次元数 N_α は、細孔閉塞速度の代表値と膜面剪断速度の代表値の比として次式で定義した。

$$N_\alpha = \frac{\alpha \rho \phi_0 J_0 d}{2(1-\phi_0)\mu_f} \quad (4)$$

ケーキ成長係数 fR' に関する無次元数 $N_{R'}$ は、ケーキ成長速度の代表値と膜面剪断速度の代表値の比として次式で定義した。

$$N_{R'} = \frac{fR'\rho\phi_0 J_0 d}{2(1-\phi_0)\mu_f R_m} \quad (5)$$

ケーキ層除去速度 v に関する無次元数 N_v は、除去量と透過に関する比として次式で定義した。

$$N_v = \frac{(1-\phi_0)v}{\phi_0 J_t} \quad (6)$$

移行に関する無次元数は、モデルの移行の決定の要因が移行時刻における透過流束 J_t で代表されると考え、無次元数 N_j を次式で定義した。

$$N_j = \frac{\phi_0 J_t}{(1-\phi_0)J_0} \quad (7)$$

前章のモデルによる推算から得られたパラメータの値などから計算された N_c と式(4)-(7)の無次元数について以下の相関式を得た。

$$N_\alpha = 0.191 \times N_c^{-0.467} \quad (8)$$

$$N_{R'} = 2.93 \times 10^2 \times N_c^{-1.24} \quad (9)$$

$$N_v = 0.873 \times N_c^{0.00339} \quad (10)$$

$$N_j = 1.06 \times 10^{-4} \times N_c^{0.608} \quad (11)$$

これらの無次元数と相関式からパラメータの値を決定し、モデルによる計算を行う。新たに設定した条件において、モデルにより透過過程を予測した結果と実験結果との比較を Fig.1 に示す。この結果より、本研究のモデルとパラメータに関する無次元数およびそれらの相関式を用いた透過過程の予測が可能であることが示された。

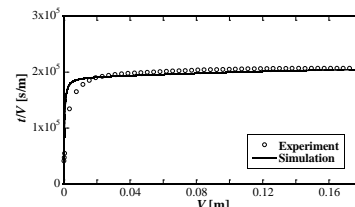


Fig.1 予測結果と実験結果の比較($\phi_0=0.05$, $\Delta P=200$ kPa, $u_f=6.0$ cm/s)

参考文献

- [1] Ho et al, "A combined pore blockage and cake filtration model for protein fouling during microfiltration," *J. Colloid & Interface Sci.*, **232**, 389-399 (2000).
- [2] K. Karasu et al., "A model for cross-flow ultrafiltration of dairy whey based on the rheology of the compressible cake," *J. Membr. Sci.*, **341**, 252-260 (2009).

*E-mail: yoshika@chemeng.titech.ac.jp