

(第11回) 2015年度・研究助成報告

研究題目	非ニュートン流体-粒子系混合物の遠心脱水操作：粒子層内せん断速度分布を考慮した解析
研究期間	2015年4月1日～2016(2017)年3月31日
研究機関・所属 研究者名	大阪府立大学・大学院工学研究科 物質・化学系専攻 化学工学分野 田中孝徳

1. 2015(2016)年度研究成果の概要

遠心分離操作は湿式の粉体プロセスとして古くから用いられているものの、その理論的な研究には未検討な項目が多く、経験に基づく設計・運転がなされている。本研究では非ニュートン性流体が関わる遠心分離操作を取扱い、その基礎的知見を得ることを目的として実施した。はじめに、非ニュートン流体-粒子系における粒子の沈降において、低濃度域では凝集体を形成していることを考慮して干渉沈降速度式を新たに導いた。干渉沈降が起っていると考えられる領域で理論と実験結果に一致が見られた。また、べき乗則非ニュートン流体-粒子系の遠心脱液において、粒子層内のメニスカスが移動しながら脱液が進行する時の脱液速度式を提案した。最終平均飽和度の粒子層厚さおよび遠心効果依存性を近似することで、数値計算を行い実験結果と比較した。

2. 助成期間内での研究成果の概要

1. はじめに

食品、医薬品、ファインケミカル等の粉体製造プロセスにおいて、濾過・遠心分離・圧搾などの湿式機械的分離操作が用いられている。例えば、コーンスターチの製造ではトウモロコシ原料を湿式粉碎した後、液体サイクロンにて分級・精製、次いで、遠心脱水機により水分が除去される。遠心分離操作は湿式の粉体プロセスとして古くから用いられているものの、その理論的な研究には未検討な項目が多く、経験に基づく設計・運転がなされている。特に、多糖類水溶液などを代表とする非ニュートン性の媒体に粒子が懸濁した固液混合物のレオロジー特性を考慮した遠心分離の検討はこれまでにほとんど実施されていない。特に、その圧密挙動に関する報告例は皆無である。なお、食品工業・高分子工業では媒体が非ニュートン流体である場合があり、例えば、海藻からポリサッカライドを回収する際の液は著しく非ニュートン性を帯びる。本研究ではべき乗則非ニュートン流体を用

いた固液系を対象に沈降実験から干渉沈降における凝集体の形成について検討した。また、遠心脱液実験から回転数が脱液速度に与える影響を非ニュートン性を考慮して検討した。

2. 実験方法

様々な濃度のスラリーを調整し、懸濁液の界面高さの経時変化を測定した。分散媒として 1.5 wt%カルボキシメチルセルロースナトリウム (CMC) 水溶液を、懸濁粒子としてガラスビーズ ($\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$, 公称径 90~106 μm) を使用した。

分散媒にポリアクリル酸ナトリウム (SPA)水溶液、懸濁粒子にガラスビーズ ($\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$, 公称径 63~75 μm) を用いて、遠心脱液試験を行い、遠心管内試料質量および粒子層高さの経時変化を測定した。固体量 10 g, 回転数 1000, 2000, 3000 rpm の条件下で遠心脱液実験を行った。測定結果から平均飽和度 S_{av} の値を計算した。

3. 結果および考察

3.1 べき乗則流体中の干渉 (界面) 沈降

非凝集性粒子の干渉沈降における界面沈降速度は Richardson らの実験式により求めることができる。

$$v = v_t \varepsilon_0^z \quad (1)$$

ここで、 v は粒子の界面沈降速度、 v_t は単一粒子の終末沈降速度、 ε_0 は初期空隙率、 z は実験定数である。この式は非ニュートン流体を用いた場合にも適用できることが報告されており、 z の値は、流動挙動指数 n および粒子直径 D_p と沈降管径 D で決まる。各初期空隙率と沈降初速度の関係を実験的に求め、その相関関係から実験定数 z は 4.80 であることを決定した。

さらに、本研究では、Michaels らの研究に倣い、非ニュートン流体中における凝集体の干渉沈降に関する速度式を導いた。

$$v_i = \left\{ \frac{g D_f^{n+1} (\rho_p - \rho) (1 - \varepsilon_{if})^{1-zn}}{18KF(n)} \right\}^{1/zn} (\varepsilon_0 - \varepsilon_{if}) \quad (2)$$

ここで、 g は重力加速度、 D_f は凝集体直径、 ρ_p は粒子密度、 ρ は液密度、 ε_{if} は凝集体内部空隙率、 K は粘ちよう度係数、 $F(n)$ は摩擦係数の補正因子である。(2)式において、予め決定した実験定数 z を考慮し、 $v^{1/4.80}$ 対 ε_0 の相関関係を図 1 に示す。

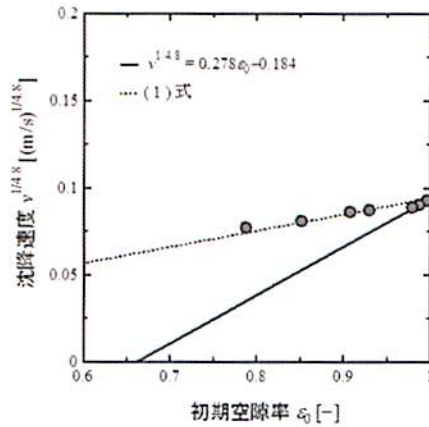


図1 1.5 wt%CMC 水溶液／ガラスビーズ系の重力沈降実験

図中の実線は低濃度領域 ($\epsilon_0 > 0.97$) のプロットに対する近似直線である. 点線は単一粒子の終末沈降速度および ϵ_0 の値から(1)式を用いて計算を行った結果である. (2)式を用いて近似直線の勾配と切片より $D_f = 180 \mu\text{m}$, $\epsilon_{if} = 0.662$ が得られた. D_f が1次粒子径より大きいので低濃度領域 ($\epsilon_0 > 0.97$) では複数個の1次粒子が凝集体を形成し沈降していると思われる. 一方, 高濃度領域 ($\epsilon_0 < 0.97$) では, 実験結果が(1)式から得られた値と一致しており, この領域では粒子同士が接触しておらず, 個々に沈降しているものと考えられる. べき乗則非ニュートン流体／粒子系での沈降挙動の推察および, 凝集体の干渉沈降速度式を提案することができた.

3.2 べき乗則流体／固体系の遠心脱液

遠心場における非圧縮性粒子層内の液体にかかる力を図2に示す.

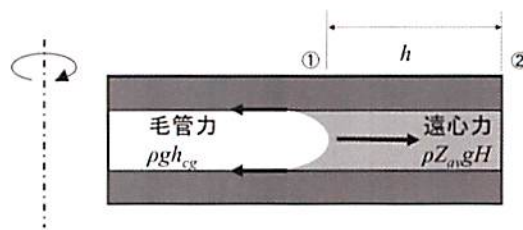


図2 遠心場での粒子層内液の模式図

Fig. 1 中の h_{cg} は重力場での相当飽和域高さ, h は粒子層内での液面高さ, H は粒子層厚さ, Z_{av} は遠心効果で角速度の2乗に比例する. Fig. 1 中の①, ②面での機械的エネルギー収支および, 非ニュートン流体の流動によって消費される粘性消散エネルギーより遠心場における非圧縮性粒子層からの脱液速度は

$$u = -H\varepsilon \frac{dS_{av}}{d\theta}$$

$$= \left\{ \frac{1}{K\rho_p\gamma(1-\varepsilon)} \left(\rho Z_{av}g - \rho g \frac{h_{cg}}{h} \right) \right\}^{1/n} \quad (3)$$

で表される。ここで、 ε は粒子層空隙率、 γ はべき乗則流体における部分流動比抵抗、 S_{av} は平均飽和度、 θ は脱液時間である。また、脱水推進力と毛管力との釣り合いを考慮すると、最終平均飽和度 S_{∞} は

$$S_{av\infty} = S_{\infty} + (1 - S_{\infty}) \frac{h_{cg}}{Z_{av}H} \quad (4)$$

と表される。よって、メニスカスの移動のみが生じる場合には相当飽和域高さ h_{cg} と最終平均飽和度 S_{∞} は、回転数と仕込み量に依存しない値になる。したがって、実験から得られた $S_{av\infty}$, Z_{av} , H の値から、 $S_{av\infty}$ 対 $1/Z_{av}H$ のプロットは直線をなすことが予想される。その直線の傾きと切片から h_{cg} と S_{∞} の値は算出できる(図3)。

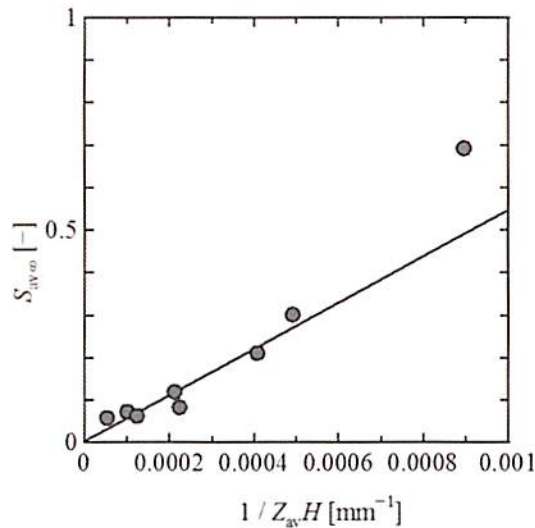


図3 0.4wt%SPA 水溶液/ガラスビーズ系の遠心脱水実験における最終飽和度

近似直線を引き、(4)式に基づく最終平均飽和度 S_{∞} の近似式と相当飽和域高さ h_{cg} の値を得た。得られた値を用いて(3)式の数値計算を行い、実験結果との比較を行った一例を図4に示す。

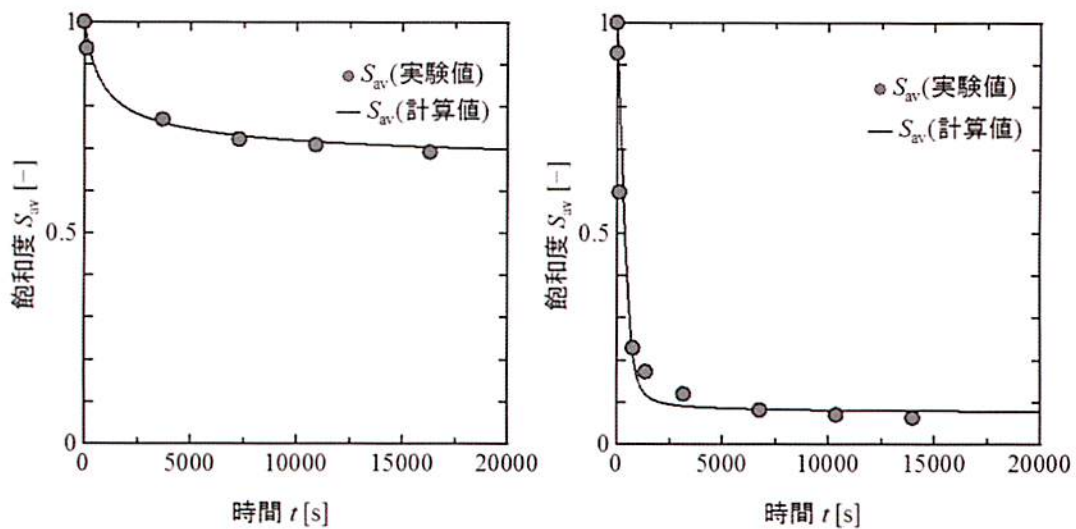


図4 遠心脱液試験における飽和度の経時変化（左：1000 rpm，右：2000 rpm）

実験結果と計算値が概ね一致したことから、提案した脱液速度式は実験の範囲内では妥当であったと考えている。

4. まとめと今後の展望

非ニュートン流体-粒子系における粒子の沈降において、低濃度域では凝集体を形成していることを考慮して干渉沈降速度式を新たに導いた。また、べき乗則非ニュートン流体／粒子系の遠心脱液において、粒子層内のメニスカスが移動しながら脱液が進行する時の脱液速度式を提案できた。今回の研究機関内では粒子層内せん断速度分布を考慮した理論までの展開には至らなかった。今後は研究分野をさらに発展させ、高精度な粒子流体系分離プロセスの構築を目指したい。

最後に、本研究助成に対しまして、粉体工学情報センターの関係各位に心より感謝申し上げます。

3. 研究発表

田中孝徳, 伊藤賢一, 加藤弘樹, 藤原健司, 岩田政司, “電場下における固液混合物内の液流動とその推進力”, 濾過分離シンポジウム 2015, 東京 (2015.11), 201.

Takayuki Shimo, Takanori Tanaka, Mohammed Saedi Jami, Masashi Iwata, “Expression of Non-Newtonian Fluid-Solid Mixture”, 12th World Filtration Congress, Taipei (2016.4), PL-08.

岩田政司, 下隆之, 田中孝徳, “べき乗則非ニュートン流体／固体系混合物の圧密メカニズム”, 分離技術会年会 2016, 津田沼 (2016.5), S6-3.

田中孝徳, 廉岡裕人, 藤原怜子, 宮島匠, 岩田政司, “粉末添加型の複合凝集剤によるコロイド懸濁液の清澄化機構”, 分離技術会年会 2016, 津田沼 (2016.5), S6-4.