

粉体技術者のための粉体入門講座 42

スラリー徒然草-7

An Essay about Slurry-7

JHGS 株式会社こな椿ラボ、名古屋大学名誉教授 椿 淳一郎

JunIchiro TSUBAKI

6. 粒子の沈降挙動

地上でスラリーを操作する限り、液中に分散した液より密度の高い粒子は必ず沈降する。

水中で指につまんだ粒子を放すと、粒子は速度を増しながら沈んでいくが、速度が上がるにつれ流体抵抗も増してくるので、抵抗が重力と等しくなると、**終末沈降速度**と呼ばれる一定の速度で沈んでいく。

速度がゼロから終末沈降速度に達するまでの時間は、数 μm の粒子であればミリ秒のオーダーなので、実際には常に終末沈降速度で沈降しているとしてかまわない。

直径が x [m] で密度が ρ_p [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] の球粒子が、密度が ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] で粘度が μ [$\text{Pa}\cdot\text{s}$] のニュートン流体中を沈降するときの終末沈降速度 u_t [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] は次のストークス式で求められる。

$$u_t = \frac{(\rho_p - \rho) x^2 g}{18\mu} \quad (7-1)$$

g [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] は重力加速度である。この式は最大 $30\mu\text{m}$ 程度の粒子まで適用できる。

水中で1hの間に沈降する距離をおおざっぱに言うと、 $1\mu\text{m}$ 粒子では数 mm で $0.1\mu\text{m}$ 粒子では数十 μm ぐらいである。

ストークス式は1個の粒子が他の粒子から干渉されることなく、ノビノビと**自由沈降**しているときに成り立つ式である。

他人様を気にしながらの沈降は**干渉沈降**と呼ばれ、その沈降速度 u_h [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] はスラリー体積濃度 ϕ [-] の関数となる。

$$u_h = u_t (1 - \phi)^n \quad (7-2)$$

べき数 n は実験によって決められる。 $n=4.65$ のリチャードソン・ザキ式がよく用いられるが、アルミナ研磨剤を用いた我々の実験¹⁾では、 $n=7.61$ とすると現象をよく説明できた。

式 (7-2) を図示すると図-7.1 になるが、スラリー濃度が20vol%までに粒子の沈降速度は半分以下に落ちており、粒子はかなり他人様を気にしながら沈降していることがわかる。

粒子の沈降の様子をもう少し立ち入って見てみる。

粒子全てが同じ大きさである**単分散粒子**では、粒子の大きさが同じなので沈降速度も同じになり、他人様を追い抜いたり衝突することもなく静かに沈降し堆積する。

しかし我々が工業材料として使う粒子・粉体は単分散からはほど遠く、最大と最小の粒子径が2桁違うこともめずらしくない。

粒子の大きさが違えば、ストークス式から沈降速度は粒子径比の2乗違うので、当然粒子同士の衝突(追突)がおきる。沈降の勢いである運動量は質量×速度であるから、粒子径比の5乗違うことになる

正面衝突ではなく追突とはいえ、桁違いの勢いを持つ相手にぶつかられたら、きっとむち打ち程度ではすまないに違いない。

こんな激しい追突事故が、どのくらい起きるのか、教授会の時間を「有効」に使って計算²⁾してみた。

粒子径は対数正規分布で表されるとして計算した。図-7.2 に示す比較的狭い分布でも、10vol%のスラリーでは、一度衝突して次にまた衝突するまでの平均沈降距離は粒子1個分である。また平均粒子径 $1\mu\text{m}$ 、粒子密度 $3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の場合、1個の粒子は1.5秒に1回衝突を繰り返している。

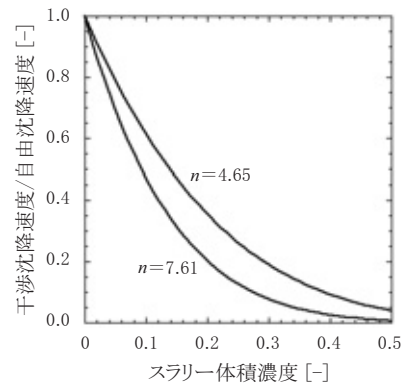


図-7.1 干渉沈降速度

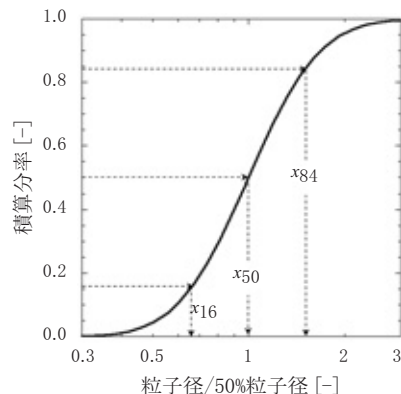


図-7.2 計算に用いた粒子径分布
(幾何標準偏差 = $x_{84}/x_{50} = x_{50}/x_{16} = 1.5$)

衝突の“しょ”の字もない平穏な単分散粒子の沈降とは違い、粒子の大きさに差がある場合は、頻繁に衝突を繰り返す厳しい沈降挙動である。

差がなければ平穏で、差がひらくほど厳しさを増す。粒の世も人の世も同じらしい。

粒子間に反発力が働いていれば、粒子は衝突を繰り返しても凝集することなく沈降し堆積する。

粒子間に引力が働いている場合はどうか。これだけ頻繁に衝突を繰り返しているのだから、引力が強ければ瞬く間に凝集構造を形成することは想像に難くない。

ということは、沈降挙動を観察すれば粒子の凝集分散状態を評価できるということである。

それで、粒子間引力を分散剤であるポリカルボン酸アンモニウム (PCA) 添加量で変えて、粒子径0.48 μm アルミナ粒子の沈降挙動を図-7.3³⁾、7.4³⁾のように観察してみた。

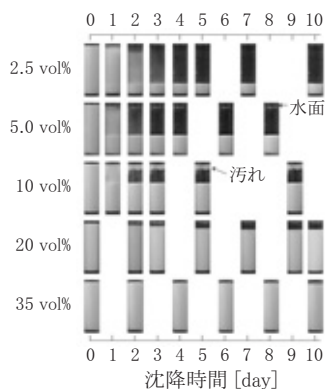


図-7.3 アルミナ粒子の沈降挙動 (PCA 添加量 1.6 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{Al}_2\text{O}_3$)

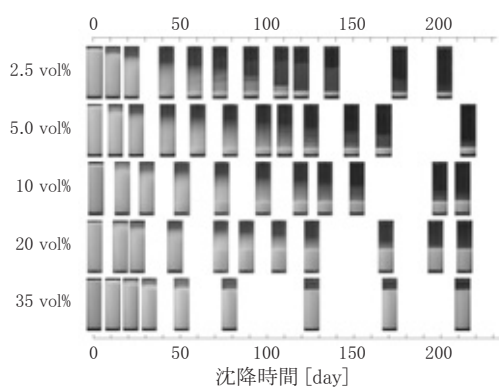


図-7.4 アルミナ粒子の沈降挙動 (PCA 添加量 3.6 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{Al}_2\text{O}_3$)

両図を見比べて先ず気付くのは、沈降継続時間である。図-7.3では1週間程度で沈降を終了しているが、図-7.4では半年過ぎても粒子の沈降はまだ続いている。

沈降が早く終わるのは粒子が速く落ちるからで、粒子が速く落ちるのは粒子が凝集しているからなので、沈降過程の観察から粒子の凝集分散状態を知ることができる。

もう少し詳しく観察してみると、粒子の沈降は静かに降り積もる雪のような単純な挙動でないことがわかる。

図-7.3で2.5vol%の沈降開始後100日あたりの写真を見ると縞模様が見える。印刷で縞模様が見えなければ、5.0vol%の70日あたりの写真を見て

もらえば、沈降管の中は粒子のない清澄層と堆積層だけではなく、もう一層モヤモヤした層があるのがわかりいただけと思う。

このような沈降挙動は成相沈降とよばれ、縞模様は粒子衝突による凝集により形成されることを、コンピュータシミュレーションで確認⁴⁾している。

それに対して図-7.3の20、35vol%、図-7.4の35vol%写真にはモヤモヤ層がなく、清澄層と粒子層の2層だけ写っている。

このような沈降挙動は集合沈降とよばれ、スラリー濃度がだいたい20vol%より高く、粒子間引力がゲル化するほど強くないときに表れる沈降挙動である。

なぜ20vol%なのか?これも教授会の時間を「有効」に使って計算²⁾してみた。

単分散球形粒子を仮定して、最近接粒子の位置がスラリー濃度によりどう変わるかモデル計算してみると、15vol%あたりでどの粒子にも他の粒子が2個接触することがわかった。

粒子1個あたりの接触粒子数(配位数)が2個以上になれば、全ての粒子はつながり一つの集合体を形成することになる。

この状態で粒子間に強い引力が働いていれば、瞬時にゲル化するが、引力が弱ければ集合体に変形するような感じで粒子は沈降する。

このようにスラリー濃度と粒子間引力によって、粒子は自由沈降、成相沈降、集合沈降と沈降挙動を変える。

沈降試験でもう一つ重要、というより成形体の密度を推定するのに最も重要な情報は、堆積層の充填率である。

例えば20vol%スラリーの堆積層を図-7.3と7.4で比べてみると、図-7.4の方が堆積層は薄いので充填率が高いことがわかる。

紙数も尽きたので、堆積層の充填率については次回お話することにする。

引用文献

- 1) 佐藤根 大士、西馬 一樹、飯村 健次、鈴木 道隆、森 隆昌、椿 淳一郎：“静水圧測定法を用いた濃厚スラリーの粒子径分布測定-初期濃度の影響”、粉体工学会誌、48、p.456-463 (2011)
- 2) J.Tsubaki：“Geometrical analysis of Particle System Dispersed in Liquid”, *J. Chin. Inst. Chem. Engrs.*, 35, p.47-54 (2004)
- 3) 木口 崇彦、稲嶺 育恵、佐藤根 大士、森 隆昌、椿 淳一郎：“分散剤の添加量が粒子沈降挙動に及ぼす影響”、粉体工学会誌、47、p.616-622 (2010)
- 4) 杉本 理充、廣瀬 仁嗣、森 英利、椿 淳一郎：“液中分散粒子の沈降界面形成過程の解析”、粉体工学会誌、38、p.11-17 (2001)



つばき じゅんいちろう
椿 淳一郎
JHGS (株)こな椿ラボ 主宰
名古屋大学名誉教授

〒509-0135 各務原市鷺沼羽場町5-72
TEL: 058-370-4538 FAX: 058-370-4538
E-mail: tsubaki@jhgs.jp
HP: http://www.jhgs.jp/lab/