

## 粉体技術者のための粉体入門講座 41

### スラリー徒然草-6

#### An Essay about Slurry-6

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

### 5. スラリーの流動特性 (続き)

前回<sup>1)</sup>は流動挙動の分類と成形プロセスにおいて流動特性を評価する意味について説明したので、今回は流動特性の評価法から始める。

ひずみ速度とせん断応力が比例する水のようなニュートン流体では、流動特性=粘度でよいが、スラリーでは多くの場合ひずみ速度とせん断応力が比例しないので、流動特性=粘度とはならない。

したがって、スラリーの流動特性は、ひずみ速度とせん断応力の関係である流動曲線によって評価しなければならない。

一般に、ある特性の評価法は一つではなく複数の評価法があり、目的に応じてそれぞれ使用されているが、特性を正確に評価するためには、その特性を定義している物理量をできるだけ直接に測定する評価法が良い。

流動特性の評価では、図-6.1 に示す回転粘度計がその条件を満たしている。

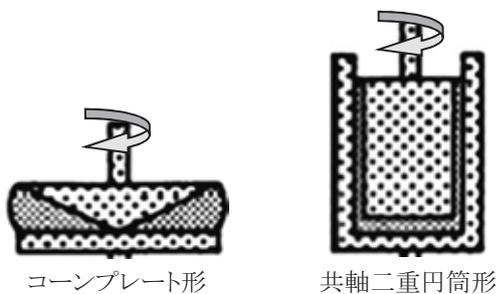


図-6.1 回転粘度計

コーンプレート型では、試料を円錐と平板で挟み、円錐を一定速度で回転させてその時の回転トルクを測定する。

円錐の周速度は半径に比例するが、円錐と平板間の間隔も半径に比例するので、ひずみ速度は半径によらず一定となる。せん断応力は回転トルクから計算される。

共軸二重回転円筒型では、試料を内筒と外筒の間に入れて、内筒あるいは外筒を一定速度で回転させてその時の回転トルクを測定する。

このタイプでは、ひずみ速度が半径の影響を受けるため、外筒半径は内筒半径の1.1倍以下とJIS Z 8803に定められている。

安価で取り扱いやすいことで、単一円筒型回転粘度計 (B型粘度計) が広く使われている。

B型粘度計では、粘度標準液を用いて装置を校正したのち、試料中に単一円筒を入れ一定速度で回転させるときのトルクから、その回転速度における見かけ粘度を測定している。

B型粘度計では、測定対象はニュートン流体であることを前提としているため、非ニュートン流体の試料を測定すると、誤った測定結果を示す<sup>2)</sup>。

その一例を以下に示す。図-6.2<sup>2)</sup>は高純度アルミナ (粒子径0.48 $\mu$ m) スラリーの流動曲線で、いずれのスラリー濃度においてもひずみ速度の増加と共に見かけ粘度が低下するせん断流動化 (シェアシンニング) が見られるだけでなく、降伏値も存在している。

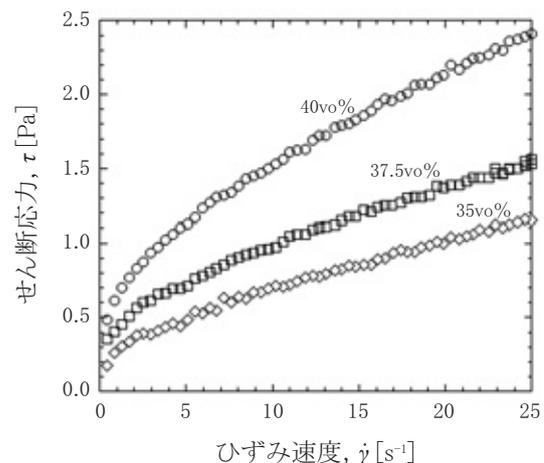


図-6.2 高純度アルミナ (0.48 $\mu$ m) の流動曲線 (共軸二重円筒型回転粘度計)

図-6.3<sup>2)</sup>は、図-6.2 で用いたスラリーの見かけ粘度をB型粘度計で回転数を変えて測定し、B型粘度計で想定したひずみ速度における見かけ粘度を図-6.2 から読み取り、比較したものである。

図-6.3 から明らかな通り、B型粘度計の測定値は回転粘度計の測定値の約2倍になっている。この差異はせん断流動化の度合いと降伏値の大きさに依存している。

したがって、B型粘度計の測定値を用いてスラリーを評価したり現象を考察することは避けた方がよく、B型粘度計の使用はスラリーや工程の管理程度にとどめておくべきである。

粘度、見かけ粘度の単位は、現在はSI単位系である [Pa $\cdot$ s] に統一されつつあるが、まだ一部 [P] (ポアズ) という単位も使われている。

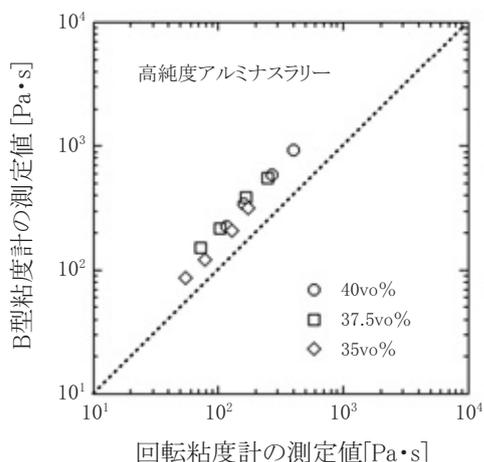


図-6.3 B型粘度計と回転粘度計の比較

水の粘度が0.01P=1cPであるためか、[cP]をセンチポアズではなくシーピーと読んで、一つの単位のように扱っている方々を少なからず見かけるが、1cP=1mPa·sと換算も容易なので、早くSI単位系に慣れていただきたいものである。

粒子の大きさやスラリー濃度は流動特性にどのように影響するのか。

ニュートン流動する希薄スラリーに対しては、相対性理論で有名なアインシュタインが理論的に導き出した次式が、粘度とスラリー濃度を関係づける式として有名である。

$$\mu = (1 + 2.5\phi)\mu_0 \quad (6.1)$$

ここで、 $\mu, \mu_0$ [Pa·s] はスラリーと分散媒の粘度、 $\phi$ [-] はスラリーの体積濃度であり、 $\phi < 0.1$ の範囲で成立するといわれている。

2.5 $\mu$ mのイースト菌から80 $\mu$ mのガラスビーズまでさまざまな大きさの粒子を試料とした実験により、 $\phi < 0.1$ の範囲でアインシュタイン式の成立が裏付けられている<sup>3)</sup>。

アインシュタイン式によれば、スラリー粘度はスラリー体積濃度だけで決まっており、本講座の第2回目に述べた「体積濃度で考えること」の重要性を示す好例である。

アインシュタイン式は、粒子が相互に影響を及ぼさない希薄なスラリーを想定しているが、濃度の高い実スラリーではどうだろうか。

粒子濃度が高くなれば、粒子が動ける空間が限定されるし、粒子の周りの流れも他の粒子によって乱されるので、アインシュタイン式は次第に成立しなくなる。

スラリー濃度が0.1を上回ると、スラリー粘度はアインシュタイン式で計算される値より大きくなり、0.6を超えると急激に増大する<sup>3)</sup>。

$\phi > 0.1$ ではアインシュタイン式をそのまま使えないが、式(6.1)を微分すると、スラリー濃度を $\Delta\phi$ 増加したときの粘度増加 $\Delta\mu$ を推算できるので、高濃度域でも活用されている。

天才が導き出した式はやはり違うと、感心させられる。

実スラリーでは粒子間に引力が働き、何らかの凝集構造を作るので、流動挙動はさらに複雑となり、天才アインシュタインの式でも歯が立たなくなる。

粒子間に引力が働かない場合は、式(6.1)に示すように、粒子の大きさは粘度に関与しないが、粒子間に引力が働くと、粒子の大きさはスラリーに大きな影響を及ぼす。

スラリー濃度が同じで、例えば粒子の大きさが半分になると、粒子個数は8倍に増えるので粒子接触点の総数も8倍になり凝集構造を作りやすくなる。

一般に粒子は小さくなるほど相対的に粒子間引力は強くなるので、流動挙動に及ぼす凝集構造の影響はより大きくなる。

図-6.2を見て、流動曲線が原点を通る直線にならない理由を考えてみる。

いずれの濃度でも降伏値を持っている。降伏値とは固体が“降伏”して流動化する最小応力なので、静置状態ではいずれのスラリーもゲル化(粒子が網目状につながる)していることがわかる。

降伏値を超えてせん断応力をかけていくと、ゲル構造は順次壊されていくので、流動しやすくなり見かけ粘度はそれに対応して小さくなっていく。

凝集構造を壊すに十分高いせん断応力(ひずみ速度)領域では、ニュートン流動を示すようになる。

せん断応力によって壊された凝集構造は、せん断応力を抜く(ひずみ速度を下げる)ことにより回復することがある。

したがって、ひずみ速度を下げながら測った流動曲線は、上げながら測定した流動曲線の下を通りループを描くことは珍しくない。

このような履歴現象はチクソトロピーと呼ばれ、ループの面積によって定量的に評価されている。

今回は粒子の沈降挙動を取り上げる予定である。

## 引用文献

- 1) 椿 淳一郎：“粉体技術者のための粉体入門講座40 スラリー徒然草-5”、粉体技術、4、p.158-159 (2013)
- 2) 浅井 一輝、一柳 正昭、佐藤根 大士、森 隆昌、椿 淳一郎、伊藤 葉子：“非ニュートン性が単一円筒型回転粘度計(B型粘度計)の測定結果に及ぼす影響について”、粉体工学会誌、46、p. 873-880 (2009)
- 3) R.J.Hunter: “Introduction to Modern Colloid Science”, Oxford Science Publications, p. 109-111 (1993)



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/