

液体中における微粒子の分離操作

著者	大友 涼子
雑誌名	理工学と技術 : 関西大学理工学会誌 = Engineering & technology
巻	24
ページ	31-34
発行年	2017-12-20
その他のタイトル	Separation of fine particles in a liquid
URL	http://hdl.handle.net/10112/12460

液体中における微粒子の分離操作

大友 涼子*

Separation of fine particles in a liquid

Ryoko OTOMO

1. はじめに

液体中における微粒子の操作・制御はさまざまな工学プロセスで行われている。例えば、塗装や製紙、電子デバイス等の製造において、微粒子懸濁液の均一なコーティングのために、懸濁液中での微粒子の分散・凝集挙動の制御が重要となる。環境分野における浄水・廃水や、食品業における飲料水の除菌では、微粒子と液体とを分離する必要がある。また、このようなプロセスで微粒子懸濁液を利用する際には懸濁液の輸送が必要となる場合も多いため、流れ中での微粒子の輸送特性を理解しなくてはならない。

多くの分野において、高精度・高効率な微粒子挙動の制御が期待されており、高度な技術が開発されてきた。こうした技術発展のためには液体中での微粒子のふるまいを理解することが必要不可欠であるが、特に流体の粘性の影響が大きなゆっくりとした現象を考える場合には、微粒子の挙動はきわめて複雑である。本稿では、液体中での微粒子のふるまいについて基礎的知見の一部を前半で示し、後半で微粒子制御の中で特に分離技術の例を紹介する。

2. 液体中における微粒子のふるまい

2.1 単一の微粒子のふるまい

単一の微粒子が流体中を運動する場合、微粒子の運動方程式は以下で表される。

$$F = \rho_p V \frac{du}{dt} \quad (1)$$

ここで、 $V[\text{m}^3]$ は粒子の体積、 $\rho_p[\text{kg}/\text{m}^3]$ は粒子密度、 $u[\text{m}/\text{s}]$ は粒子速度である。 $F[\text{N}]$ は粒子に作用する力であり、外力が作用しない場合には F は流体から粒子に作用する力（流体力）となる。図1(a)で示すような静止流体中での1方向の運動を考える場合、流体から粒子には以下のような抗力 F_D が作用する^[1]。

$$F_D = C_D A \left(\frac{1}{2} \rho_f u^2 \right) \quad (2)$$

ここで A は粒子の投影面積、 ρ_f は流体密度である。 C_D は抗力係数と呼ばれるもので、微粒子のサイズと形状、流体の種類、および微粒子と流体の相対速度によって決定される。特に流体の粘性の影響が大きなゆっくりとした現象の場合 ($Re_p = D_p u \rho_f / \mu < 0.3$ 、ただし、 $\mu[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ は流体粘度、 $D_p[\text{m}]$ は微粒子の直径)、球形微粒子の抗力係数は

$$C_D = \frac{24}{Re_p} = \frac{24\mu}{D_p u \rho_f} \quad (3)$$

となり、粒子に作用する抗力は

$$F_D = 3\pi\mu D_p u \quad (4)$$

となる^[1]。(4)式で示される単一の球形微粒子に作用する抗力はStokes抵抗と呼ばれる。

静止流体中を微粒子が自由沈降すると、初速ゼロで沈降し始めた微粒子は次第に加速し、最終的に加速度ゼロの定速運動に達する。この速度は終末速度と呼ばれる。単一の球形微粒子がゆっくりと沈降する場合、(1)式の左辺は(4)式のStokes抵抗および粒子に作用する重力からなり、右辺の加速度はゼロとなるため、終末速度は以下で表される。

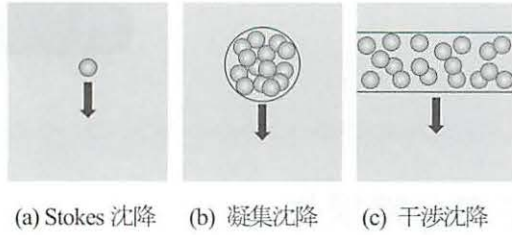


図1 液体中の微粒子沈降

$$u_{\text{Stokes}} = \frac{g(\rho_p - \rho_f)D_p^2}{18\mu} = \tau g \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \quad (5)$$

(5)式を Stokes の終末速度という。 $\tau = \rho_p D_p^2 / 18\mu$ は時間の次元をもち、緩和時間と呼ばれる^[1,2]。 τ が大きいほど終末速度に到達するまでに長い時間がかかる、つまり微粒子の流れへの追従性が低いことを表す。同じ流体中で異なる物性値をもつ微粒子が運動する場合、直径および密度の小さな微粒子ほど流れへの追従性が高い。

2.2 複数の微粒子のふるまい

流体中の微粒子濃度が高い場合、微粒子同士は互いに影響を及ぼしながら運動するため、その挙動は複雑になる。一例として、流体中で外力によって移動する3つの微粒子の挙動について、筆者らによる計算結果を図2に示す ($Re_p \ll 1$)。図2より、初期に一列に並んでいた微粒子は、互いに相対位置を変化させながら複雑な挙動を示すことがわかる。また、初期状態において粒子1と2の間隔に対する粒子2と3の間隔を α とし、 α の条件が異なる(a)と(b)とを比較すると、初期位置がわずかに違うことで、その後の粒子挙動が大きく異なることも見てとれる。

図1(b)で示すように複数の微粒子が液体中の一部の領域に集まると、個々の粒子としてではなく、微粒子群としての挙動が観察される^[3]。このように微粒子が集合体として液体中を沈降する現象を凝集沈降という。凝集沈降では、微粒子同士が接触していないにもかかわらず、あたかも大きな一つの粒子塊のようにふるまうため、沈降速度は単一粒子の場合よりも大きくなる((5)式より、粒子径が大きいほど沈降速度は速くなる)。

図1(c)のように多くの微粒子が層を成して沈降する場合、その移動速度は単一粒子の沈降や凝集沈降の場合と大きく異なる。このような沈降現象を干渉沈降という。単一微粒子の沈降速度 u_{Stokes} に対する微粒子層全体の平均沈降速度 U の比は Hindered settling function と呼ばれる^[4]。

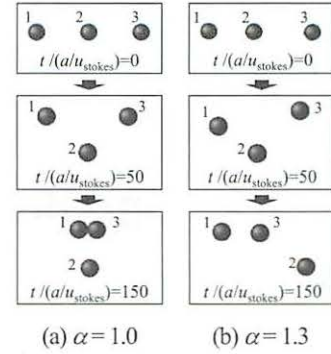


図2 3つの微粒子の運動

$$f(\phi) = \frac{U}{u_{\text{Stokes}}} \quad (6)$$

Hindered settling function $f(\phi)$ は微粒子の体積率 ϕ の関数であるが、厳密には微粒子の並び方によっても異なる。微粒子が1つの大きな塊のようにふるまう凝集沈降とは異なり、干渉沈降では各々の粒子と周囲の流体との間に相互作用が生じる。このため、干渉沈降速度は単一粒子の沈降速度よりも小さくなり、 $0 < f(\phi) < 1$ となる。

2.3 微粒子層中の透過流動

干渉沈降における微粒子と流体の相対運動は、視点を変えると、流体が微粒子層を透過する現象と流体力学的に等価である。微粒子層中の透過流動では、その流量 Q と圧力損失と Δp は以下の Darcy の式で表される^[1]。

$$\frac{Q}{A} = k \frac{\Delta p}{\mu L} \quad (7)$$

ここで A [m^2] は流れに直角な微粒子層断面積、 L [m] は微粒子層厚さである。 k [m^2] は透過率と呼ばれ、微粒子層の物性によって決まる定数である。 k の値が大きいほど流体が流れやすいことを表す。例えば、微粒子層の体積率が大きな場合 ($\phi > 0.3$) には、空隙部分を均一な形状の通路の集合体と考え、通路のねじれを考慮することによって透過率は次のように表される^[5]。

$$k = \frac{D_p^2 (1 - \phi)^3}{180\phi^2} \quad (8)$$

(8)式は Kozeny-Carman 式と呼ばれる。(7)式の透過率と(6)式の Hindered settling function には、

$$k = \frac{2}{9\phi} f(\phi) \quad (9)$$

という関係がある^[6]。

3. 微粒子分離技術

微粒子の分離技術として、本稿では沈降分離、ろ過、

および近年化学工学やバイオ工学などへの応用が期待されている Microfluidics に基づく微粒子分離技術を紹介する。その他にも、液体のみを通過される容器を用いて圧縮脱水する圧搾や、遠心力を利用する遠心分離などさまざまな分離技術が確立されている。

3.1 沈降分離

液体中に懸濁した微粒子を沈降現象により分離する方法を、沈降分離という。沈降分離は、微粒子と液体の分離する場合だけでなく、沈降速度の違いを利用して密度やサイズの異なる微粒子同士を分離する場合にも用いられる。

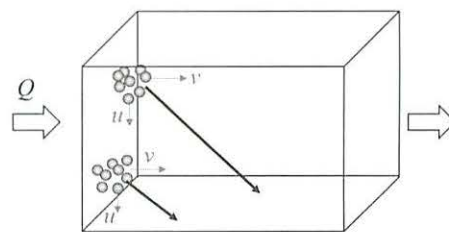
沈降分離プロセスの多くは連続式であり、図 3 (a) の模式図で示す通り、沈降槽に微粒子懸濁液を一定流量で連続的に流し、出口に到達するまでに微粒子を沈降させることで液体と分離する方法が一般的である。液体の清澄化を目的として使用される装置はクラリファイヤーと呼ばれる。

クラリファイヤーとしくみはほぼ同じであるが、逆に微粒子の沈殿濃縮のために用いられる装置をシックナーという。シックナーも連続式が一般的であり、図 3 (b) で示すように底面部が逆円錐形状である円筒形の槽からなる。給液口から流入した微粒子懸濁液が円周方向に広がるとともに、微粒子は沈降する。槽底部に堆積した微粒子は自重により濃縮され、レーキの回転によって中心部に集められてポンプで輸送される。

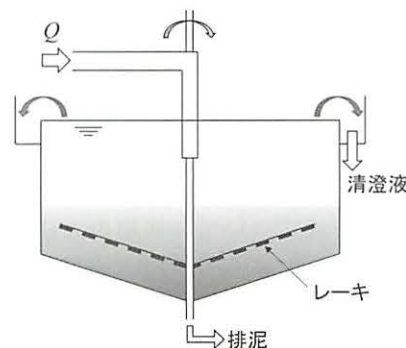
沈降分離はきわめてシンプルな分離方法であることから安価で自動化が容易というメリットがあり、浄水処理や廃水処理など多くのプロセスで利用されている。しかし、ろ過などの他の操作に比べて、得られる上澄み液の清澄度が低いことや、特に密度の小さな微粒子は沈降速度が遅いため処理に時間がかかるといったデメリットもある。このような場合には、(5) 式で示した通り微粒子のサイズを大きくすれば沈降速度を向上させることができるため、高分子の添加によって予め微粒子を凝集させておくなどの前処理が必要となる。沈降分離では多くの場合、凝集操作や遠心分離、ろ過などと組み合わせた方法により分離操作が行われている。

3.2 ろ過

液体中に含まれる不溶性物質をろ材により捕捉し、分離する方法をろ過という。ろ材として、繊維を織ってつくられた織布、繊維を織らずに絡み合わせて接合接着した不織繊維、およびセラミック・プラスチック・金属などの粉末を成形した多孔質体などが用いられる。また、近年では分離膜を用いたろ過も広く利用



(a) 重力沈降槽の模式図



(b) シックナー

図 3 沈降分離のための装置^[7]

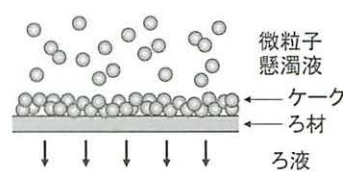


図 4 ろ過^[7]

されている。

ろ過では、沈降よりも含液率の低い固体(微粒子塊)を回収することができるため、清澄度の高い液体を得ることができる。しかし、ろ材が必要であるため、装置が複雑化する傾向にある。ろ材の目が細かいほど微細な粒子の捕捉が可能となるが、ろ材の体積率が大きく空隙が少ないほど流体の透過率が低下(ろ過速度が低下)するため注意が必要である。また、捕捉された微粒子がろ材面上に層(ろ過ケーキと呼ばれる)を形成することによっても、透過率の低下や目詰まりを引き起こす場合がある。ろ過ケーキの形成および剥離は、ろ材の形状や表面の状態によって決まるため、その選定が重要となる。

イオン交換膜のように捕捉対象の物質に応じた機能を有し、孔径が数 nm ~ 数 μm 程度の範囲で精密に制御された膜を分離膜と呼ぶ。分離膜を用いたろ過を膜ろ過という。ろ過は薬剤の使用や極端な加熱の必要がないため、古くから食品工業において利用されてきた。特に近年は優れた分離膜の開発により、膜ろ過がしばしば行われており、飲料の除菌などに用いられてい

る^[7]。

3.3 Microfluidics 分野における分離技術の発展

mm 以下のスケールをもつ系において、流体のふるまいや制御を取り扱う学問はマイクロ流体力学 (Microfluidics) と呼ばれる。マイクロ加工技術の発展に伴い、微細で精密な構造を有するマイクロ流路を利用した微粒子および細胞の分離技術が注目されており、Microfluidics の知識に基づいたさまざまな方法が提案されている^[8]。分離方法は大きく2つに分類され、1つは外力場を利用した能動的な分離、もう1つは純粹に流体との相互作用のみを利用した受動的な分離である。

能動的な分離について、初期の方法は回分式の Field Flow Fractionation (FFF) と呼ばれるものであったが、高分子やウイルスの分離など多用途で用いられ、同様の原理で連続式の方法 (図5) も提案された。異なるサイズをもつ微粒子の懸濁液をマイクロ流路中に流し、電気、熱、重力などによる外力場を印加する。外力と流体力を利用し、異なる性質をもつ微粒子ごとに挙動を変化させることで分離する。例えば重力場では、微粒子のサイズ、密度、および凝集性などの違いから、大きく沈降しながら流れる微粒子と、ほとんど沈降せずに流体に追従する微粒子とを分離することができる。図5のようなシステムの他にも、流体力はほとんど利用せずに、場を印加することで微粒子に作用する力のみを用いて分離する方法もあり、磁気、電気泳動、音響浮揚、光格子などが用いられている。

受動的な分離には、流路形状に工夫をすることで流れを変化させて微粒子を移動させる方法や、微粒子の流れへの追従性の違いを利用した方法などがある。例えば、流路内に障害物を置き、その間隔や位置関係を調整することで、サイズの異なる微粒子を分離させることができる。また、図6に示す通り、直線状の流路の側面に直交する支流を設けることで、支流への流れを利用して微粒子を流路壁面へ移動させ、最終的にサイズごとに分類する方法もある^[9]。このような技術は Hydrodynamic filtration と呼ばれ、血液中で赤血球と白血球を分離する際などに利用されている。その他にも、流路の断面積を変化させてサイズの異なる微粒子を分離させる方法、慣性または二次流れを利用する方法など数多く提案されている^[10]。

4. おわりに

液体中での微粒子の分離技術に関連して、流体と微粒子の相対運動についての基礎的知見を述べるとともに、沈降分離、ろ過、および Microfluidics を利用し

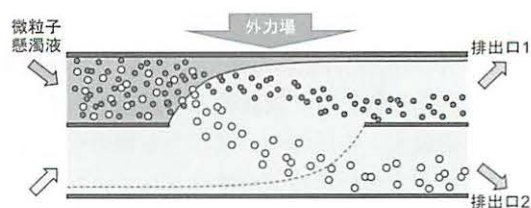


図5 Split flow thin (SPLITT) fractionation^[8]

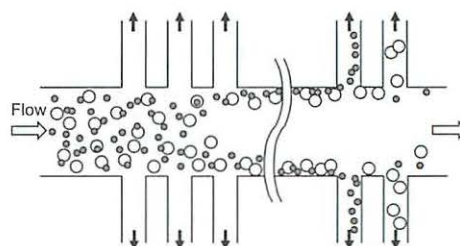


図6 Hydrodynamic filtration^[9]

た分離技術を紹介した。本稿では簡単な概要を紹介したが、高精度・高効率の分離のために、流体力学に基づき考案・実用化されたさまざまな工夫は非常に興味深い。特に Microfluidics を利用した分離技術は、マイクロ・ナノスケールのデバイス開発やバイオエンジニアリング分野における細胞操作など多くのプロセスで必要とされる技術であり、今後も大きな発展が期待される。

参考文献

- [1] 三輪茂雄, 『粉体工学通論』, 日刊工業新聞社 (2004).
- [2] 公益社団法人砥粒加工学会編, 『ものづくり高品位化のための微粒子技術』, 清水伸二監修 (2012).
- [3] Machu, G., Meile, W., Nitsche, L. C., Schaflinger, U., *J. Fluid Mech.*, **447**, 299-336 (2001).
- [4] Davis, R. H., Acrivos, A., *Ann. Rev. Mech.*, **17**, 91-118 (1985).
- [5] Carman, P. C., *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **15**, 150-166 (1937).
- [6] Neale, G. H., Nader, W. K., *AIChE J.*, **20**(3), 530-538 (1974).
- [7] 粉体工学会編, 『液相中の粒子分散・凝集と分離操作』, 日刊工業新聞社 (2010).
- [8] Lenshof, A., Laurell, T., *Chem. Soc. Rev.*, **39**, 1203-1217 (2010).
- [9] Yamada, M., Seki, M., *Lab Chip*, **5**, 1233-1239 (2005).
- [10] Di Carlo, D., Irimia, D., Tompkins, R. G., Toner, M., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **104**, 18892-18897 (2007).