

# 温度密度差を利用した上向流懸濁液の固液分離

深川勝之\*・原田利男\*・村上定瞭\*  
竹内正美\*・中西 弘\*\*

## A Study on Solid-Liquid Separation by Density Difference with Temperature

Masayuki FUKAGAWA, Toshio HARADA, Sadaaki MURAKAMI,  
Masami TAKEUCHI, Hiroshi NAKANISHI

### Abstract

Solid-liquid of suspended solution was separated in upflow tower by density difference with temperature. Heater was setted in the way of the tower.

Kaolin (parts through  $44\mu\text{m}$ ) was used as the suspended solid.

The density of suspension was determined with calibration curve to the concentration of kaolin. The concentration was measured by optical degree at 540nm. This method was useful.

At upper part of heater, the heat transfer is convection, and lower part, it is only conduction.

The temperature difference was given by conduction and then the density of suspension changed gradually.

Thus the solid-liquid separation was promoted by temperature-density difference.

### 1. はじめに

固液分離はその重要さ故に、様々な方法が用いられている。なかでも、重力沈降法は古くから固液分離の有効な方法であり、様々な分野で数多く利用されている。しかし、重力沈降法は粒子が小さければ小さいほど外乱による影響を受けやすく、問題となることがしばしば見受けられる。

湖沼や沈殿池などで、堆積物や汚泥が太陽の輻射により、舞い上がる現象が時として観察される。これは微粒子が輻射熱を得て、粒子の密度が水よりも小さくなるためと考えられる。このように温度密度差が生じることにより、固液分離が困難になる。この現象は流体の上層部の密度を常に小さく保つことにより、防ぐことが可能である。そこで、逆に温度により密度差を強制的に作り出

すことにより、このような現象を防止し、さらには積極的に固液分離に利用できないかと考え、比較的フロックの大きな藍藻の連続培養に応用してみた。ヒーターを分離槽の上部にセットしたところ、目視では沈降分離は促進された。この結果から藍藻よりフロックの小さい活性汚泥の沈殿池や上向流式のリアクターなどの固液分離に対しても応用可能ではないかと考えられる。また、この種の研究は殆ど見受けられないこともあり、比較的沈降分離の困難なカオリンを用いて実験を試みた。

特に、上向流方式による固液分離は粒子の沈降方向と逆の方向の流れを持つため温度密度差による固液分離の問題は大変興味のあるところである。本稿では実験装置の不備から理論的結論と実験的結論との整合性を検討するまでには至らなかったが、基礎的知見が得られたので報告する。

\*宇部工業高等専門学校工業化学科

\*\*山口大学工学部

## 2. 温度勾配のある上向流中の粒子の沈降

### 2.1 温度勾配のない上向流中の粒子の沈降速度

流体中の粒子の沈降に関する運動方程式は

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(\rho_p - \rho_f)g}{\rho_p} - \frac{3}{4} \cdot \frac{C_R v^2}{D_p} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_p} \quad (1)$$

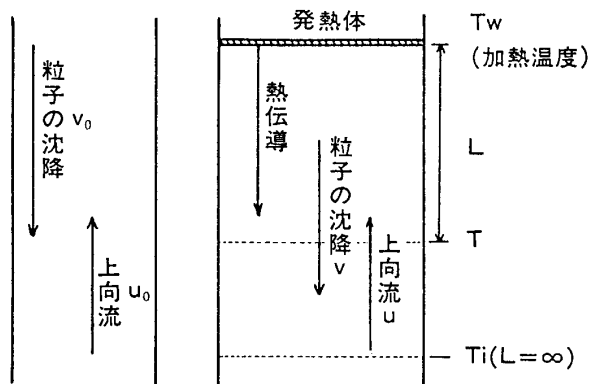
である。ここで、 $v$ ：粒子の沈降速度、 $\rho_p$ ：粒子の密度、 $\rho_f$ ：流体の密度、 $g$ ：重力の加速度、 $D_p$ ：粒子の直径、 $C_R$ ：抵抗係数である。 $C_R$ は微小粒子の場合、Stokesの法則に従うとしてよいので

$$C_R = 24/R_e, \quad R_e = D_p v \rho_f / \mu \quad (2)$$

である。ここに、 $R_e$ ：粒子近傍の流体レイノルズ数、 $\mu$ ：流体の粘度である。極めて速やかに終末速度に達するとすれば、 $dv/dt=0$ であるから(1)式は

$$v = \{g(\rho_p - \rho_f)D_p^2\} / (18\mu) \quad (3)$$

となる。今、上向流速を  $u$  とすれば、温度勾配のない場合は図1(A)のように粒子の沈降速度は  $(u-v)$  である。



(A)温度勾配のない場合 (B)温度勾配のある場合

図1 上向流懸濁液中の粒子沈降

### 2.2 温度勾配のある上向流中の粒子の沈降速度

図1(B)のように上向流体の途中に流れの方向に対して直角に発熱体を置くと、上方については対流伝熱により温度勾配が生じるが、下方に対しては層流であれば伝導伝熱のみにより温度勾配を生じる。したがって半無限固体中の非定常熱伝導と同様の取り扱いが可能と考えられる。

今、発熱体の温度が一定に保たれた時の時間  $t$  における温度分布は、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial L^2} \quad (4)$$

$$[I.C.] \quad t = 0, \quad L \geq 0 : T = T_i$$

$$[B.C.I.] \quad t > 0, \quad L = 0 : T = T_w$$

$$[B.C.II.] \quad L = \infty : T = T_i$$

である。<sup>1)</sup>ここで、 $T$ ：温度、 $\alpha$ ：温度係数、 $L$ ：発熱体からの距離、 $T_i$ ：系の最初の温度、 $T_w$ ：発熱体の温度である。

無次元温度  $\phi_T \equiv (T - T_i) / (T_w - T_i)$  を用いて(4)式を変換すると、

$$\frac{\partial \phi_T}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 \phi_T}{\partial L^2} \quad (5)$$

$$[I.C.] \quad t \leq 0, \quad L \geq 0 : \phi_T = 0$$

$$[B.C.I.] \quad t > 0, \quad L = 0 : \phi_T = 1$$

$$[B.C.II.] \quad L = \infty : \phi_T = 0$$

したがって、

$$\phi_T \equiv \frac{T - T_i}{T_w - T_i} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{L}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (6)$$

したがって、断面を通過する熱流束は

$$q_L \Big|_{L=0} = -k \frac{\partial T}{\partial L} \Big|_{L=0} = \frac{k}{\sqrt{\pi \alpha t}} (T_w - T_i) \quad (7)$$

定常伝熱では発熱体から距離  $L$  下方で次式が成立する。

$$q = k \cdot A (T_w - T_i) / L \quad (8)$$

ここで、 $q$ ：流体の伝熱量、 $k$ ：流体の熱伝導度、 $A$ ：伝熱面積、 $T_L$ ：発熱体からの距離  $L$  における流体の温度である。

$q$  は(7)式により与えられる。 $q$  は時間  $t$  で一定であるから、(8)式より距離  $L$  における温度  $T_L$  を知ることができる。

流速  $u$  を熱移動速度に対して適当に選択することにより、温度勾配を一定に保つことができる。本実験では発熱体は温水であるから流体及び粒子に対する輻射伝熱は考えなくてよい。

このような温度勾配中を粒子を含む流体が通過するとき(3)式のうち最も影響を受けるのは流体の密度、粘度である。粒子の密度はそれほど影響されないとすれば粒子の沈降速度は  $(v_0 - u_0)$  から  $(v - u)$  に変化する。ここで、 $v_0, u_0$  は温度勾配のない場合の粒子の沈降速度および流体の上昇速度であり、 $v, u$  は温度勾配のあるときの速度である。両者の関係は、

$$(v_0 - u_0) - (v - u) \begin{matrix} \leq 0 \\ \geq 0 \end{matrix} \quad (9)$$

である。

このことは、流入水の温度に対する発熱体の温度および流入水の流速を選ぶことにより、固液分離を促進させる条件が存在することを示す。

流体が水の場合、熱伝導度は  $0 \sim 60^\circ\text{C}$  の範囲では直線

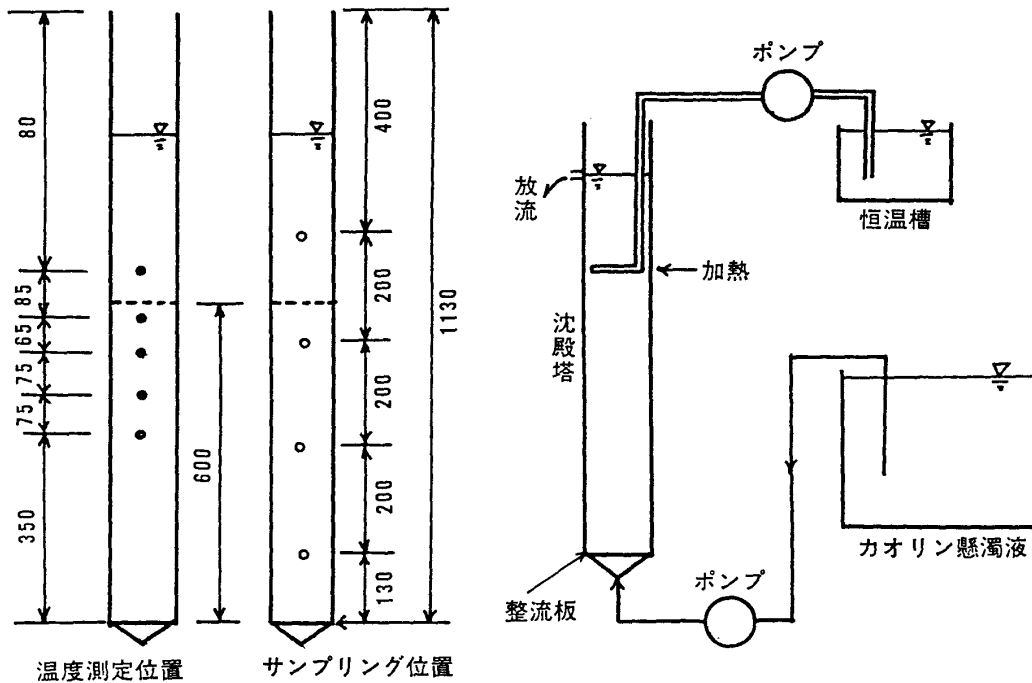


図2 実験装置の概略図

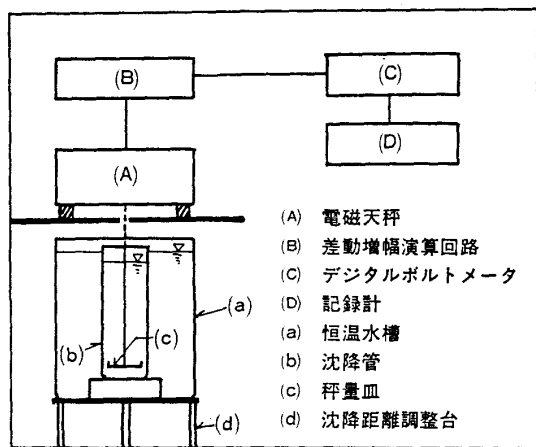


図3 粒度分布測定装置の略図

で近似でき、次式で表わされる<sup>2)</sup>。

$$k = 0.09T + 0.29 \quad (10)$$

### 3. 実験装置および方法

#### 3-1 実験装置および方法

実験装置の概略を図2に示す。内径7.5cm、高さ113cmの亚克力製円筒の下部から整流板を経て、試料溶液が流入し、オーバーフローにより流出する。オーバーフローの位置は整流板から90cmの所である。円筒の途中（整流

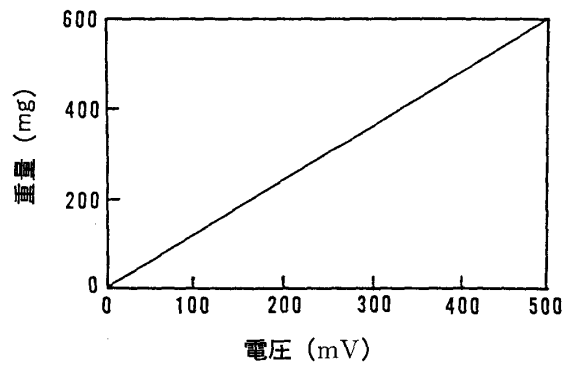


図4 沈降天秤法における電圧と重量の関係

板から60cmの位置)に銅管を螺旋状に巻き、加熱源として一定温度の温水を通した。懸濁液はチューブポンプで流量を制御した。実験は室温で行ったため、冬期には温水管や円筒本体からの放熱が大きく、発熱体からの熱流束を知ることはできなかった。懸濁粒子としてカオリンを使用した。

#### 3-2 カオリンの粒度分布及び濃度の測定

##### 3-2-1 カオリンの粒度分布

使用した市販カオリンは44 $\mu$ m通過のものであるが、粒度分布が不明のため、沈降天秤法で測定した。概略を図3に示す。天秤の最大秤量200g、感量0.1mgである。本装置は秤量皿に沈積する粒子の時間的沈積量を電磁天秤

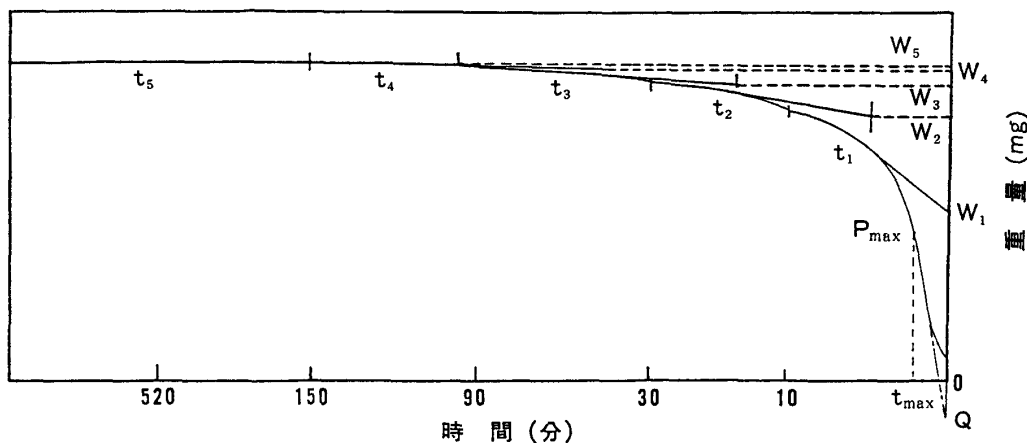


図5 カオリン懸濁液沈積曲線解析図

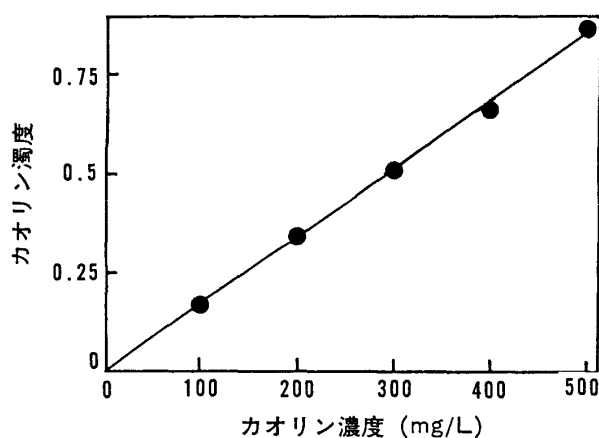


図6 カオリン濃度と濁度の関係 (540nm)

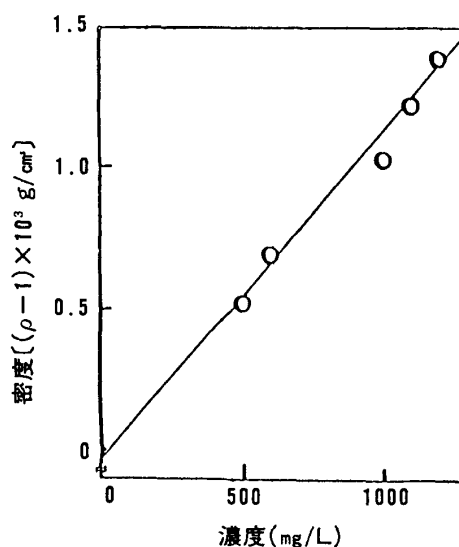


図7 カオリン濃度と密度の関係

で測定し、その変化量を電圧で取り出すようにしてある。この方法は応答速度が速く、滑らかな沈積曲線が得られる。電圧と質量の関係を検量線として、図4に示した。電圧はデジタルボルトメーターで測定した。得られた沈積曲線を図5に示す。また、図5の図上解析の結果を表1に示した。市販カオリンは $15\mu\text{m}$ 以上が85%を越えたが、サブミクロン微粒子も存在している。

### 3-2-2 カオリン濃度の測定

カオリン溶液の濃度は濁度(O.D.:波長540nm)により測定した。

検量線を図6に示す。表1のように粒径にバラツキはあるものよい直線性が得られ、カオリン濃度の測定に濁度による方法が適していることが分かった。本実験に必要な物性値は懸濁液の密度であるが、濃度から密度を知する方法を採用した。図7に懸濁液の濃度と密度との関係

表1 カオリンの粒径分布

粒度分布( $\mu\text{m}$ )	$\Sigma W$	W	R(%)	f(%/log $\sqrt{2}$ )
48.8~31.1	354.8	354.8	59.4	59.4
31.1~15.6	512.8	158.0	85.8	26.4
15.6~11.0	565.0	52.3	94.5	8.7
11.0~5.50	589.3	24.3	98.6	4.1
5.50~3.89	595.4	6.1	99.6	1.0
3.89~	597.8	2.4	100.0	0.4

を示す。密度はあらかじめ調整されたカオリン懸濁液をピクノメータにより、 $20^\circ\text{C}$ で測定したものである。この関係から濁度を測定することにより濃度と密度を知ることができる。なお、実際の測定においては温度差は考慮に入れておらず、正確ではないが、解析上は問題なかつ

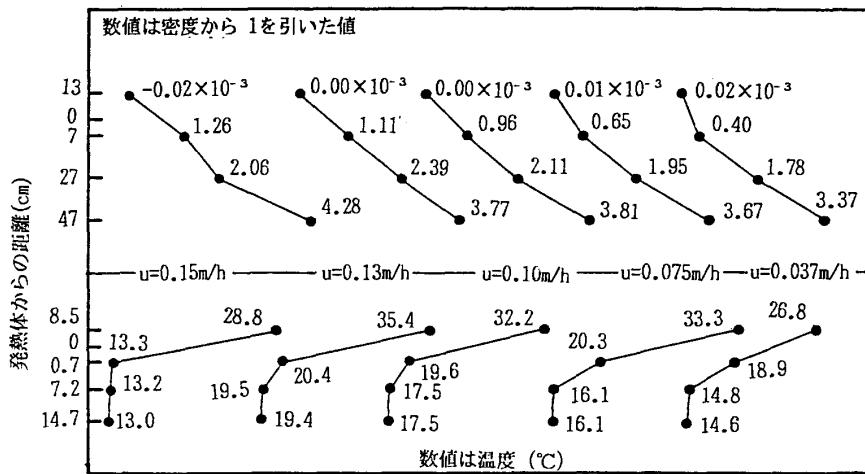


図8 上向流懸濁液の密度および温度勾配

た。

4. 結果および考察

上向流に対して流れの途中に発熱体を挿入し、加熱した場合の密度勾配と温度勾配を図8に示す。発熱体下方0.7cmから7.2cmにかけて温度の下がり方は大きいですが、以降は極めて緩やかに下降する。発熱体より上の対流部の温度と比較すると、流速の増大にともない温度差は大きくなる。このことは層流であっても流速により、速度(距離Lで一定温度に達する時間)が影響を受けていることを示す。伝熱速度を知ることにより、各流速における距離Lの温度が決定できるはずであるが、本実験では熱流束を測定するには装置が不十分であった。このため、発熱体からの伝熱量を求めることができなかつたので、各位置における熱流束を実験的に決定するには至らなかつた。密度は大旨直線的に変化しているが、流速が小さくなると発熱体の上下で変化が大きくなっている。これは発熱体上下で固液分離が促進されているためと考えられる。

図9に温度勾配のある場合とない場合の差を示した。流速と密度勾配の関係で示したものである。この時の密度は13~20℃の範囲で同一とみなしており厳密には正確ではなく、最大0.0010g/cm<sup>3</sup>の誤差を含むが、全体の傾向を否定するものではない。温度勾配がある場合には各測定位置において、温度勾配のない場合よりも懸濁液の密度は小さくなっており、分離が優れていることが分かる。この傾向は流速の小さいところでは小さいが、流速の増大につれて分離能も大きくなっている。したがってこの

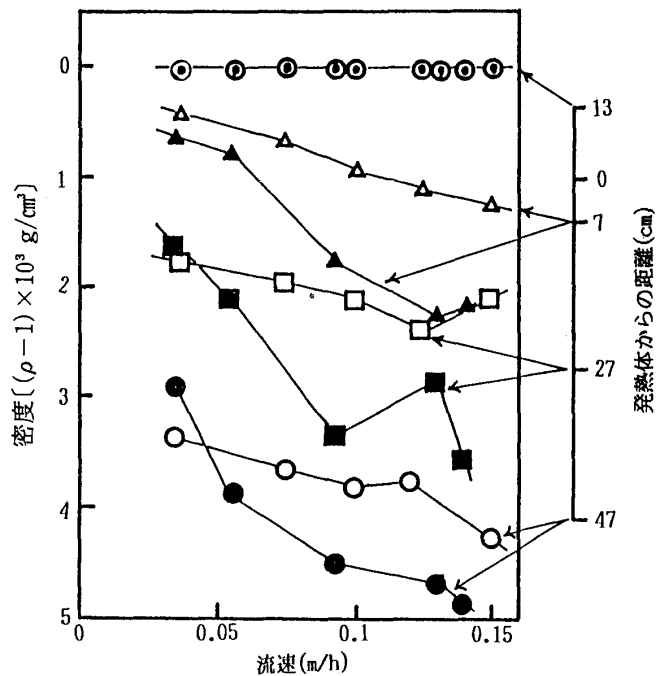


図9 流速によるカオリン懸濁液の密度変化  
下向きに目盛っている。発熱体より上ではほぼ1.0であったので、●にしてある。白抜きは温度勾配のある場合、黒抜きは温度勾配のない場合

密度差が分離性能の尺度になると考えてよい。

カオリン濃度が2,000mg/Lに調整された試料溶液では発熱体上部の濃度は5~30mg/Lであった。また、この濃度は対流のためほぼ均一であった。これはカオリン粒子径の小さい部分の上昇によるものと考えられる。粒径分布から5.5μm以下の粒子が丁度これに相当しており、本実験条件の範囲ではこの大きさ以下の粒子については分離できなかったことを示すものである。

発熱体より 7 cm 下方で300~1,000, 2cm 下方で1,500~2,000, 47cm下方で3,000~3,7000mg/L という濃度勾配であり, いわゆる, 粒子の流出を防ぐことはできても, 十分な濃縮には至っていない。しかし, 本実験は試料溶液の送込方法, 熱伝導方法, 装置など必ずしも十分ではなかった。このため, 早急な結論はだせない。

## 5. ま と め

上向流で沈降分離を試みた。その結果, 強制的に温度差をつけることにより, 自然沈降よりも沈降速度を速くすることが可能であることが分かった。しかし, 結果は思ったより不十分であった。これは装置が十分でなかったこと, 密度の測定が厳密でなかったことも挙げられるであろう。

本方法は流体の流れの方向が水平方向である場合にはさらに有効であると考えられるが, 今回の実験結果は上

向流の場合でも条件を整えることで微細粒子の固液分離を可能にすることを示唆する。特に, 僅かな温度差, 僅かな密度差で固液分離が促進されるとすれば, ヒートポンプの利用も考えられ, 有用であると思われる。しかし基本的には Stokes の法則に従っているため, 線速度が小さ過ぎる点で応用しようとする目的によっては限界があり, 現在のところ不十分である。

本実験結果は重力沈降法に改良を加えることが可能であるという点で有益であると考えられる。理論と実験結果の整合性をきちんとすることが必要である。

## 参考文献

- 1) 城塚, 平田, 村上: 化学技術者のための移動速度論, オーム社
- 2) 化学工学便覧: 改訂四版, p.62, 丸善  
(平成元年 9 月 25 日 受理)