湿式層流分級装置

Wet Classifier with Laminar Flow

山本 元種*, 趙 毅*, 中村 徳子*, 渡辺 信義*,
Motokazu YAMAMOTO*, Yi ZHAO*, Noriko NAKAMURA*, Nobuyoshi WATANABE*

A wet classifier with laminar flow was fabricated based on the principle that the settling location of a particle depends on its diameter. The fabricated classifier produced a sharper particle size distribution profiles with respect to diameter than those obtained using conventional classifiers for particles with diameters ranging from $0.5\mu\text{m}$ to $5\mu\text{m}$. In this paper, the major characteristics of the wet classifier with laminar flow are discussed, theoretical calculations for the design of the system are done, and the calculated results are compared with the experimental results.

Key Words : Wet Classifier, Particle Settling, Flow Regulator, Laminar Flow, Particle Size Distribution

1. 緒 言

各種粉体の分級装置については、その粉体の物性、粒径、その他の条件に適合した多くの分級装置が開発され、実用されている¹⁾。しかし、粒径が $10\mu\text{m}$ 以下の分級装置は多くはない。乾式分級装置では微細粒子の凝集が起り、見かけの粒径が大きい粒子として分級されるので、実用上微細粒子が迷い込むことによる分級精度の低下があった。一方、湿式分級装置では、粒子の分散が比較的容易で、しかも水中の沈降速度が遅いので、精密な分級の可能性がある。最近、電子産業分野で粒径が小さく、非常に分級精度の高い粉体が必要されるようになった。結果として、乾燥などの処理工程に経費がかかっても、精度の高い湿式分級技術を用いて高品質の粉体を得ることが優先される時代となった。

ここに紹介する湿式の層流分級装置は、水平流ひ別法としてよく知られており、特に斬新な原理に基づく装置ではないが、原理に忠実に分級条件が実現出来るように、装置の各部分の改良を積み重ね、粒径が5から $0.5\mu\text{m}$ の分級範囲において、任意の粒径の粉体を従来よ

り高い分級精度で得ることが出来た。

実例として、研磨用アルミナ(WA)粉体を用い理論計算と実験結果の比較検討を行い、また本分級装置で得た粒子と従来の沈降槽で分級した粒子の粒径分布を比較し、所期の目的を達したことを確認した。なお、アルミナ粉体以外の粉体についても実験し、アルミナ粉体とほぼ同様の結果を得たが、ここでは省略した。

2. 原 理

一般に湿式分級装置としては、水ひ、沈降槽、スパイラル分級器、液体サイクロン等がある。これらは被分級粉体と水を混合し、粉体粒子の沈降速度差を利用するものであるが、水流を層流とすることに留意されていなかった。

Fig. 1は、本研究で試作した層流分級装置を示す。この装置には、次に述べる二つの特色がある。まず第一に粉体粒子が沈降を始める初期条件を明確にするため、被分級粉体と水を混合する部分と、粉体粒子が沈降する水の部分とに分けたことである。第二に、水の部分を層流にして、沈降する粉体粒子の軌跡が乱れないようにすることである。すなわち、水平方向に移動する搬送水を層流とし、その中に被分級粉体を、粒子同志の相互作用が無視できる程度に水で薄めて注入するのである。密度が同じ粒子であれば、粒径の差異によって沈降速度が異なり、沈降しながら層流によって

1996年 3月 16日受付

* 日本マイクロコーティング(株)リサーチセンター

(〒196 東京都昭島市武蔵野 3-4-1)

TEL 0425-43-4711

Research Center, Nihon Micro Coating Co., Ltd

(3-4-1 Musashino, Akishima-shi, Tokyo 196)

Fig. 1 Schematic diagram of laminar flow classifier

搬送される場所が異なることを利用する分級原理である。

2. 1 注入口の厚さを考慮した沈降理論

直径が D 、密度 ρ の球形の粒子が、粘性係数が μ の静止流体中で重力により沈降する運動を考える。また、Reynolds数は2より小さく、Stokes領域であるとする。垂直下方の座標軸を Z とし、粒子が時間 $t=0$ において、初速度 $dZ/dt=0$ で、 $Z=0$ から沈降を始め、粒子の速度 v が次第に増加して終末速度 v_T になるが、それまでの経過時間 t と沈降距離 Z の関係は、粉体関係の多くの書物に求められており²⁾、一般論としては次式で与えられる。

$$Z = v_T t \left[1 - \frac{\rho D^2}{18\mu} \{1 - \exp(-\frac{18\mu t}{\rho D^2})\} \right] \quad (1)$$

次に水平方向に座標軸 X をとり、層流として搬送水が X 方向に一定の速度 v_c で流れている中へ、粒子が $X=0$ で $t=0$ に速度 v_c で X 方向に注入された場合の、 X 方向への移動距離は、

$$X = v_c t \quad (2)$$

Eqs.(1)および(2)から t を消去すると、粒子の軌跡の方程式が得られる。

$$Z = \frac{v_T X}{v_c} \left[1 - \frac{\rho D^2 v_c}{18\mu X} \{1 - \exp(-\frac{18\mu X}{\rho D^2 v_c})\} \right] \quad (3)$$

しかし、前述のようにStokesの抵抗法則が成立する場合、Eq. (1)の $(\rho D^2 / 18\mu) \{1 - \exp(-18\mu / \rho D^2)\}$ は、1に比べて十分小さいこと、および $v_T = g(\rho - \rho_w) D^2 / 18\mu$ の関

係を用いると、Eq. (1)は近似的に次式で与えられる。

$$Z \doteq v_T t = \frac{g(\rho - \rho_w) D^2 t}{18\mu} \quad (4)$$

ここに、 ρ_w は水の密度である。その結果、Eq. (3)は

$$Z \doteq \frac{v_T X}{v_c} = \frac{g(\rho - \rho_w) D^2 X}{18\mu v_c} \quad (5)$$

となる。Eq. (3)またはEq. (5)から Z 、 X 、 D の関係がわかる。ここで、水温 20°C 、水の密度 10^3 kg/m^3 、 20°C における水の粘性係数を $\mu = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、アルミナ(WA)の密度を $\rho = 3.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、沈降距離を $Z = 6 \text{ mm}$ 、搬送水速度を $v_c = 0.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ として、WAの粒子について粒径 D 対移動距離 X の関係を計算したのがFig. 2の曲線である。この曲線は、粒径の差異による粒子の分散(粒径分散)を示している。

Fig. 2 Relationship between WA particle diameter and distance moved, calculated under the following conditions : settling distance : 6mm, carrier water velocity : $0.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, density of WA : $3.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

Fig. 3 X, Z Coordinates with respect to inlet

また、Eq. (3)またはEq. (5)を沈降距離 Z 対移動距離 X との関係でみると、原点 O から出発した粒子の軌跡を表す。しかし、実際の装置では粒子の注入口に厚さがあり、注入口の上端から出発した粒子と下端から出発した粒子では、移動距離 X に差が出る。Fig. 3に示すように、注入口の上端 $Z=0$ から出発した粒子を Z_u で表し、注入口の下端から出発する粒子の軌跡を Z_L で表す。 $Z_t - Z_u = \Delta Z$ とすると、一般論として Z_L は次式で与えられる。

$$Z_L = \frac{v_T X}{v_c} \left[1 - \frac{\rho D^2 v_c}{18 \mu X} \times \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{18 \mu X}{\rho D^2 v_c}\right) \right\} \right] + \Delta Z \quad (6)$$

しかし、前述の条件ではEqs. (4), (5)は十分よい近似式であるので、Eq. (6)は

$$Z_L \doteq \frac{v_T X}{v_c} + \Delta Z \quad (7)$$

となる。これより、 X と D の関係は、

$$X \doteq \frac{18 \mu v_c Z}{g(\rho - \rho_w) D^2} \quad (8)$$

となり、計算は容易となる。

ここで ΔZ は注入口の厚さであり、沈降距離 Z が一定の場合、移動距離 X の位置における注入口の厚さ ΔZ によって生じる粒径分布の理論的な幅が求められることになる。Fig. 4は注入口の厚さ ΔZ が1mmの場合のWA粒子の粒径 D 対移動距離 X の関係であり、パラメーターは沈降距離でそれぞれ9, 6, 3mmである。図から、ある移動距離 X に沈降する粒子の粒径は一定ではなく、最大、最小粒径と粒径分布幅が求められる。

2.2 粒子の粒径分散と収束

Fig. 5はEqs. (3)および(4)から求めたWA粒子の沈降距離 Z 対移動距離 X の曲線である。ここで、搬送水の速度を 10^{-3} m/sとしたが、この分級装置を粒径 $1\mu\text{m}$ 程度の粉体の精密分級を目的とする場合は、搬送水の速度を 0.5×10^{-3} から 2×10^{-3} m/s程度で使用するから

Fig. 4 Relationship between WA diameter and distance moved when the width of the inlet is taken into consideration. Conditions: inlet width: 1mm, carrier water velocity: 1×10^{-3} m/s

Fig. 5 Relationship between WA particle diameter and settling distance. Conditions: inlet width: 1mm, carrier water velocity: 1×10^{-3} m/s

である。しかし、粒径が $2\mu\text{m}$ より大きい粒子を大量に分級することを目的とする場合は、搬送水速度を 50×10^{-3} m/sにしても分級可能である。図中のパラメーターは粒子の粒径であり、一つの粒径に対し注入口の上端と下端から出発した粒子の軌跡を示す二本の曲線が表されている。ここで注目すべきことは、粒径が異なる粒子については、沈降距離および移動距離の増加とともに、相互の粒子の間隔は離ればなれに分散する、いわゆる粒径分散を起こし、粒径が同じ粒子については、沈降距離および移動距離の増加とともに収束する傾向があることである。

2.3 整流装置

層流分級装置の重要な部分は、整流装置である。搬送水をFig. 1の溝に注入する部分で乱流が発生すると、その後方に大きく影響し、被分級粉体を注入しても沈降する粒子が上下に揺れて分級出来ない。また、被分級粉体を注入した直後の溝中でも乱流が発生しやすい。そこで、Fig. 6に示すような細い管を束ねた整

Fig. 6 Flow regulator consisting of a bundle of small-diameter tubes

流器を製作し、Fig. 1の溝の中にはめ込んだ結果、乱流は発生しなくなった。整流器のサイズは実験的に定めたもので、現在のところ、最適性に対する根拠はない。

2. 4 粒子取り出し口と可変溝底機構

実験的に粒度分布を調べる場合には、可変溝全体を水平にし、底に沈降した粒子を採集するが、多量に希望する粒径の粒子を採集する場合は、取り出し口から搬送水と共に粒子を取り出す。その際取り出し口の直後の可変溝底を上方に上げ、Fig. 1に示すように、溝の断面の底上げ面積を A とし、搬送水の流速を v_c とすると、取り出し口から毎秒取り出す水量 Q が $Q=A \times v_c$ になるように流量調節および底上げ調節を行う。

また、可変溝底機構により、装置全体を短くコンパクトにし、粒子径分布幅が従来より狭い粒子を任意の粒径で容易に採集することができる。Fig. 7は、この機構による分級採集の原理を示す。厚さ1mmの注入口から出発したWA粒子の軌跡は、Fig. 5と同様になる。いま沈降距離を6mmで一定とすると、粒径が $2\mu\text{m}$ より大きい粒子では、粒径分散と収束のための移動距離が1m以下になり、これは実際の値である。しかし、粒径が $1\mu\text{m}$ より小さい粒子では移動距離が5m以上になり、しかも粒径分散の幅が大きく、実際の値ではなくなる。したがって、Fig. 1に示すような可変溝底機構を使用して溝底を上げ、Fig. 7中に示すよう

Fig. 7 Changes in classification range due to changes in depth of the water channel. Conditions : inlet width : 1mm, carrier water velocity : $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

に、例えば沈降距離を3mmとすれば、粒径が $2\mu\text{m}$ より小さい粒子の分級が2m程度の長さの溝で可能となり、沈降距離2mmとすれば、 $1\mu\text{m}$ 以下の粒径の粒子の分級が原理的には可能となる。また前項2.2でも述べたように、粒径が $1 \sim 2\mu\text{m}$ の粒子を大量に分級し、しかも異常に大きい粒径の粒子を取り除くには、溝底を上げ、搬送速度を大きくするとよい。

3. 実験結果

実験装置はFig. 1に示したもので、断面が長方形で、縦・横それぞれ30mm、長さが2mの溝を使用した。粒子の移動距離は、注入口から搬送水流の方向に測定した距離とし、試料はその点を中心として上流および下流方向に各2mm範囲に沈降したものを採集した。Figs. 2および9の実験は、一部のデーターを除き、可変溝底1,2を水平にして行った。また、粒子数、粒子径および粒度分布の測定は、コールターカウンターを使用した。

3. 1 粒子の粒径分散

次に述べる実験条件で、WA粉末の分級を行った。すなわち、水温 20°C 、沈降距離 $Z=6\text{mm}$ 、搬送水速度 $v_c=0.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ である。Fig. 2の曲線は、WA粒子の粒径の差異による粒径分散を示している。ここで、ある一定の移動距離に沈降する粒子は、理論的にはある一定の粒径に限られることになり、もし、実験的に種々の粒径の粒子が沈降したとしても、それは別の原因によるものであり、その位置で採集される大多数の粒子が最頻粒子径、すなわち個数基準のモード径となることを予想させるのである。しかるに、個数基準のモード径の実験値は、Fig. 2中に丸印で示した曲線とは一致しない。しかし、丸印は傾向的には曲線に沿っており、しかも曲線より下方にある。これには、次に述べる様々な原因が考えられる。まず、理論が理想化された簡単なものである。次に注入口の問題がある。注入口の厚さは薄い方が理想的には良いが、実験的には注入口の厚さを絞ると粒径分布幅が狭くなるので、3, 2, 1, 0.5mmと絞った結果、1mmまでは絞った効果があったといえる程度で、水の表面張力、注入口と水との付着性の影響、その他粒子が必ずしも水平方向に向かって出発しないなどで、 $X=Z=0$ 、 $v=v_c$ といえる初期条件を十分に満足するとは考え難かった。最後に、重要と考えられる原因は、壁効果である。溝の横壁は、注入口の幅を15mmと狭くすることで逃げることはできたが、溝の底の影響は避けられない。搬送水は層流ではあるが、底の表面近くでは流速はかなり小

さいものと考えられる。なお、流速は、実験的には流量で測定した。また、Fig. 2中の黒丸は、沈降距離2mm、移動距離2m位置で採用した試料で、等価的な移動距離が3mである。以上を総合すれば、実験結果は計算から予想されるよりも、流速が小さい方へずれたと考えられる。理論は単純ではあるが、搬送水を層流とし、水で十分薄められたWA粒子を注入口から搬送水の速度で注入することで、理論に忠実になるようにした。このことにより、傾向的には実験結果が説明でき、また、分級結果が従来よりよいので、目的にか

なっていると言えよう。

3.2 粒子の粒度分布

Fig. 8にWA試料の分級結果を示す。前項3.1に述べたように、理論の結果は個数基準で与えられることになるので、粒度分布も個数基準を中心に記述するが、実用面では重量分布も多く用いられているので、Fig. 8(A)には個数基準、(B)には重量基準の粒度分布も示した。Fig. 8(A)の(a)は分級前のWA試料であり、(b), (c), (d)はそれぞれ注入口からの距離 X が0.5, 1, 1.5mの位置で分級して採集した試料の個数基

Fig. 8 Size distribution and SEM micrographs of WA particles.

A) Particle size distributions for samples with particle number frequency.

(a) Sample before classification, (b), (c) and (d) Classified at distances of 0.5, 1.0 and 1.5m, respectively.

B) Particle size distributions for samples with particle weight frequency.

(e) Before classification, (f), (g) and (h) Classified at distances of 0.5, 1.0 and 1.5m, respectively.

C) SEM of micrographs of samples (magnification: $\times 5000$).

(i), (j) and (k) Samples classified at distance of 0.5, 1.0 and 1.5m, respectively.

Conditions: settling distance: 6mm, inlet width: 1mm, carrier water velocity: $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

準の粒度分布である。Fig. 8(B)の(e)は(a)に対応する分級前試料、(f), (g), (h), はそれぞれ(b), (c), (d)に対応する試料の重量基準での粒度分布である。また、分級時の水温は 20°C , $v_c=10^{-3}\text{m/s}$, 沈降距離 $Z=6\text{mm}$, 注入口の厚さは 1mm , 幅は 15mm であった。Fig. 8(b), (c), (d)にそれぞれ対応する試料のSEM写真(倍率5000倍)を, Fig. 8(c)の(i), (j), (k)に示す。WA粉体を研磨剤としてみた場合, (i), (j), (k)は各粒度において, 異常に大きい粒子は見られず, 精密研磨に必要とされる分級精度であることがわかる。

粒径分布幅については, 前項2.1に述べているように, 理論的にはFig. 4に示される結果が予想されるはずである。しかし, 実験的には3.1項の後半に述べたように, 注入口から出発する粒子の速度, 方向が完全にそろえられないこと, 流速が溝の底面付近で遅くなり, しかも流速が幅を持つであろうことなどを考慮すると, 幅は非常に大きく広がると予想される。

本研究の装置は, 現在用いられている他の装置よりは, Fig. 8(b), (c), (d)に示すように, 粒径分布幅の狭い粒子が得られている。しかし, Fig. 4の理論的予想よりは大きく異なっている。3.1項の粒径分散の理論的予想が, 現実とかけ離れたものではなく, 実験結果に近いことが示されているので, 同じ理論である分布幅も傾向的には類似したものであるはずである。

いま, Fig. 4中の移動距離 1m におけるWA粒子の粒径分布幅の計算値を1とし, その他の移動距離における幅の比を計算したものが, Fig. 9の曲線である。一方, 移動距離 1m における個数基準の粒径分布幅の測定値 W_1 の半値幅($D_{75}-D_{25}$)を1とし, その他の移動距離における測定値の半値幅 W との比 W/W_1 をFig. 9の丸印で示してある。ただし, 実験も計算も注入口 1mm , 沈降距離 6mm , $v_c=1\times 10^{-3}\text{m/s}$ とした。図中の黒丸は, 沈降距離 2mm , 移動距離 2m の位置で採集した試料で, 等価的な 3m の移動距離である。

以上のように, Fig. 9に示す粒度分布の実験結果も, 理論的予想と傾向的には一致した。

3.3 実用上の問題点

実験データをとるには, 注入口から各移動距離の位置で, 粒径分布測定に必要な分量だけ試料を採集すればよいが, 実用上は長時間装置を作動しなくてはならない。一般の粉体装置では, 壁に粉体が付着しないような流速を選ばなくてはならないが, 本装置では搬送流の速度は層流にするためにあまり上げられないので, どうしても溝底に粉体粒子が付着する。しかし,

Fig. 9 Relationship between WA particle distribution width and distance moved. In the figure, the width W_1 at a distance of 1m in Fig. 4, which was obtained by calculation, was used as unity and the calculated distribution widths W at various distances are shown. The circles represent the ratios W/W_1 . Where, W_1 is measured width at a distance of 1m and W are measured ones at various distances. The solid circle represents measured value at equivalent distance. Conditions: settling distance: 6mm , carrier water velocity: $1\times 10^{-3}\text{m/s}$

付着によって流れの影響をより大きく受けるようになるためか, 大きな塊を生じて転んで流れるような現象は観察されなかった。粒子の付着と剥離が緩やかな平衡を保っているのかもしれない。

実用の分級では, 希望する粒径の粒子よりは大きい粒径の粒子がFig. 1の粗粉取り出し口の位置で採集できるように, 搬送水速度, 沈降距離, 可変溝底機構で溝底1の高さを調節する。すると, 非常に粗い粒子が粗粉取り出し口より手前で溝底に付着しても, また剥離しても必ず粗粉取り出し口で採集される。次に, 中粉取り出し口で, 希望する粒径の粒子よりは小さい粒径の粒子が, 微粉取り出し口の方へ流れていく高さに, 可変機構で溝底2の高さを調節する。このようにして, 希望する粒径の粒子を中粉取り出し口から採取する。以上の調節によって, 希望粒径の粒子を取り出すには, 多少の熟練を要するが, 微妙な調節は取り出し量を調節すればよいことを付け加えておく。

注入する水と粉体の混合・分散については, 実用ということを念頭にして, 分散剤などは使用せず, 水のみをWA粉体と攪拌機で十分攪拌して, 粒子の分散を行った。粒子の水中沈降については, 均一に分散された場合³⁾, 不均一に分散された場合⁴⁾, 壁が存在する場合⁵⁾など非常に多くの研究がある。しかし, 本研究の装置に直ちに適用するには問題もあり, 水とWA混合比を変化させて, 本装置による分級に適合する混合比を実験的に求めた。結果として, 水1リットルに対し,

粒径5 μm 以下の粉体が $2.5 \times 10^{-3}\text{kg}$ 以下なら分級に差し支えないことが判明した。

最後に、処理量を推定しなくてはならない。試作した装置は、データーをとるための不要な部分もある。例えば、可変溝底などは、目標が確定すれば溝の中に適当な厚さの板を取り付けばよい。このように簡素化した構造の溝を100本並列に並べても、幅は3m程度であり、溝の長さが2m程度であるので、これをユニットにして何段か重ねても広いスペースは不要である。溝数1000本の装置で、少なく見積っても0.5kgの粉体を6時間で処理可能となる。ダイヤモンド粒子などは、この程度の処理量で目的は達せられる。また、分級精度が従来品よりは少しよい程度で、しかも異常に大きい粒子は確実に取り除きたいという目的に対しては、搬送水の流速を $50 \times 10^{-3}\text{m/s}$ 程度に上げてでも分級が可能である。この場合、溝100本の装置で6時間処理すると約4kgの粉体が処理できる。精密研磨用WA粉末では、この程度で実用になる。**Fig. 10**は実用に近い例として、搬送水の流速を $25 \times 10^{-3}\text{m/s}$ 、沈降距離を6mm、移動距離1.5mで採集したWA粒子の重量基準による粒度分布を示す。図中の(a)は分級前、(b)は分級後である。横軸の粒子径は、等間隔でないこと

Fig. 10 Particle size distributions and measured values for an increased treatment quantity of particles (a) before and (b) after classification. Conditions : carrier water of velocity ; $1 \times 10^{-3}\text{m/s}$, settling distance ; 6mm, distance from the inlet ; 1.5m (The scale on the horizontal axis is not linear.)

に注意しなくてはならない。水と共に得られた粒子は、沈降層で上澄みを取り除き、遠心分離器で分離後、乾燥して最終的な希望粒径の分級粒子を得ることができる。

4. 結 言

(1)層流分級装置の試作の目的は、粒径5 μm から0.5 μm の範囲で、粒子径分布幅が従来より狭い粒子を得ることである。**Fig. 11**に一例を示すように、非常に狭い粒径分布幅の粒子を得ることができた。Fig. 11(a)は従来の沈降槽によって分級されたWA#7000の個数基準による粒度分布であり、図(b)は本装置によって、比較的多量に分級分離したWA粉体の個数基準による粒度分布である。両者を数値的に比較するためには、次式による指標が一般的に知られている⁶⁾。

$$WD = (D_{90} - D_{10}) / D_{50} \quad (9)$$

Fig. 11 Comparison of results obtained using a conventional classifier and those obtained using the new classifier. (a) Particle size distribution of WA #7000 obtained using conventional classifier. (b) Particle size distribution obtained using the classifier in this study. Conditions : settling distance ; 6mm, carrier water of velocity ; $1 \times 10^{-3}\text{m/s}$, distance moved ; 1m

図(a)は $WD=1.44$ であり, (b)は $WD=0.81$ であって, 本装置の結果は, 従来の粒径分布幅の56%で非常に狭い粉体が得られたので, 所期の目的を達成したといえる。

(2)この層流分級装置の基本的な特性である粒子の

粒径分散および粒径分布幅は, 簡単な理論計算の結果と傾向的に一致する。

(3)実用の装置開発には, 粉体処理量を増やすため溝の構造を簡単にし, 束ねてユニット化するなどの改良が期待される。

Nomenclature

A : interception area	(m^2)	X : distance moved of particle	(m)
D : particle diameter	(μm)	Z : settling distance	(mm)
Q : take out quantity of water per second	(m^3/s)	ΔZ : inlet thickness	(mm)
t : elapsed time	(s)	μ : coefficient of viscosity of water	($Pa \cdot s$)
v_c : velocity of carrier water	(m/s)	ρ : particle density	(kg/m^3)
v_T : terminal velocity	(m/s)	ρ_w : water density	(kg/m^3)
W : width of particle diameter distribution	(-)		

References

- 1) Ed. by Soc. of Powder Technol., Japan : "Funtai Kogaku Binran", p. 53, Nikkan Kogyo Shinbunsha(1986)
- 2) Miwa S. : "Funtai Kogaku Tsuuron", p. 59, Nikkan Kogyo Shinbunsha(1981)
- 3) Steinour, H. : "Rate of Sedimentation", *I. E. C.*, **36**, 618(1944)
- 4) Ed. by Soc. of Powder Technol., Japan : "Funtai Kogaku Binran", p. 340, Nikkan Kogyo Shinbunsha(1986)
- 5) Lorentz, A. : "Low Reynolds Number Hydrodynamics Englewood Cliffs", Prentice-Hall (1965)
- 6) Inaba, K. and Matsumoto, K : *J. Soc. Powder Technol.*, Japan, **32**, 722(1995)