1124 (1966)
 5) Gaertner, R.F. and J.A. Kent: *Ind. Eng. Chem.*, 50, 1223 (1958)
 6) Harris, P.R. and J.S. Dranoff: *A. I. Ch. E. Journal*, 11, 437 (1965)
 7) Huff, J.E. and C.A. Walker: *ibid.*, 8, 193 (1962)
 8) Luther, R. and G.S. Forbes: *J. Am. Chem. Soc.*, 31, 770 (1909)
 9) Padoa, M.: *Z. physik. Chem.*, 120, 202 (1926)
 10) Padoa, M. and N. Vita: *Gazz. chim. ital.*, 54, 147 (1924)
 11) Padoa, M. and N. Vita: *ibid.*, 56, 375 (1926)

12) Padoa, M. and N. Vita: *ibid.*, 56, 164 (1926)
 13) Padoa, M. and N. Vita: *ibid.*, 57, 187 (1927)
 14) Parker, C.A.: *Proc. Roy. Soc. (London)*, 220 A, 104 (1953)
 15) Shiotsuka, T. and H. Nishiumi: *Kagaku Kōgaku* 35, 1364 (1971)
 16) Shiotsuka, T. and H. Nishiumi: *ibid.*, 36, 300 (1972)
 17) Shiotsuka, T. and H. Nishiumi: *2nd Autumn Meeting of Chem. Engrs. Soc. of Japan*, Osaka (1968)
 18) Wegscheider, R.: *Z. physik. Chem.*, 103, 273 (1923)
 19) Ziolkowski, D., A.E. Cassano and J.M. Smith: *A. I. Ch. E. Journal*, 13, 1025 (1967)

孤立円筒によるエアロゾルの捕集効率*

——重力および慣性支配領域——

吉岡直哉**・江見準***
 金岡千嘉男**・安並正雄****

京都大学工学部 化学工学科**

緒 言

繊維充填層により粒径 1μ 前後のエアロゾル粒子を機械的に汙過分離するさい、通常捕集機構として慣性、拡散、さえぎりの三つのみを考慮する^{6,7)}。機械的捕集機構にはこれらのほかに重力があり、過去にRanz⁸⁾が重力による単一円筒捕集効率 η_0 を

$$\eta_0 = G = \frac{\rho_p d_p^2 g}{18 \mu v_0} = \frac{u_i}{v_0} \quad (1)$$

で簡単に表わした。ここで G は無次元の終末沈降速度である。いま、Eq.(1)にエアロゾル汉過の場合の通常の操作条件、 $d_p=1\mu$ 、 $\rho_p=1\text{g/cm}^3$ 、 $v_0=30\text{cm/sec}$ を適用し概略値を計算すると $\eta_0=1.01 \times 10^{-4}$ となる。この値は上記の三つの機構による理論効率あるいは汉過実験の効率最小値⁷⁾と比較し、効率のオーダーが一桁低いところにある。このような理由から粒径 1μ 前後のエアロゾル汉過の場合には、重力の影響は無視されるのが普通である。

しかしながら、これまでの繊維充填層汉過を粒径数 μ から 10μ 近辺まで、または金属粒子のように比重の大きいエアロゾルにまで広く適用しようとするとき、線速

度の小さい領域では、拡散よりもむしろ重力による捕集が支配的になることが予測される。

筆者らは以上のような観点から、まず重力とさえぎりを組み合わせた場合の効率を粒子の流れ関数を使って⁴⁾解析的に求め、さらに、線速度が大きくなると慣性効果が現われてくることに着目して、慣性、重力およびさえぎりを同時に考慮した孤立単一円筒捕集効率を、京大第2号電子計算機(K. D. C. II)を使って軌跡計算より求めた。そしてその結果を、単一円筒モデル実験結果と比較検討した。

1. 孤立単一円筒理論捕集効率

1.1 重力さえぎり捕集効率

円筒の軸方向が重力および流れの方向に直角である場合について考える。このうち、円筒無限前方の流れの方向が重力の方向と一致する場合(上下流)、重力に対して直角方向(水平流)のそれぞれについて解析する。また、重力捕集機構は遅い流れの場合にとくに有力となるから、ここでは円筒まわりの流れを粘性流($Re \leq 1$)とする。粒子の運動方程式は一般に次式で与えられる。

$$m \frac{d\vec{u}}{dt} = -(\vec{u} - \vec{v})/Z + m\vec{g} + \vec{F}_e \quad (2)$$

Eq.(2)において慣性項および重力以外の外力を無視し、流体抵抗がStokesの法則($Z=1/3\pi\mu d_p$)に従うとすると、粒子の x, y 方向速度成分は、座標軸をFigs. 1, 2のごとくとると

* <Collection Efficiency of Aerosol by an Isolated Cylinder —Gravity and Inertia Predominant Region—>
 Received on February 19, 1971

化学工学協会第34年会(東京, 1969年4月2日)にて研究発表

** Naoya Yoshioka (正会員) and Chikao Kanaoka (正会員)
 Dept. of Chem. Eng., Kyoto Univ., Kyoto, Japan

*** Hitoshi Emi (正会員) 金沢大学 Kanazawa Univ.

**** Masao Yasunami 大阪瓦斯(株) Osaka Gas Co., Ltd.

Fig. 1 Limiting particle trajectory (vertical flow)

Fig. 2 Limiting particle trajectory (horizontal flow)

上下流:

$$dx/dt = \partial\psi/\partial y + Zmg, \quad dy/dt = -\partial\psi/\partial x \quad (3)$$

水平流:

$$dx/dt = \partial\psi/\partial y, \quad dy/dt = -\partial\psi/\partial x - Zmg \quad (4)$$

ここで、 ψ は次式で定義される空気の流れ関数である。

$$v_x = \partial\psi/\partial y, \quad v_y = -\partial\psi/\partial x \quad (5)$$

(i) 上下流 運動方程式 Eq.(3) を変形し

$$\left. \begin{aligned} dx/dt &= (\partial/\partial y)(\psi + Zmg) = \partial\psi/\partial y \\ dy/dt &= -(\partial/\partial x)(\psi + Zmg) = -\partial\psi/\partial x \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで

$$\varphi = \psi + Zmg \quad (7)$$

で定義される φ を導入すると、 φ は Eq.(6) より

$$(dx/dt)(\partial\varphi/\partial x) + (dy/dt)(\partial\varphi/\partial y) = 0 \quad (8)$$

なる関係を満足している。すなわち、 φ は粒子に関して流体の流れ関数 ψ と同じ性質を有しているため、 φ を粒子の流れ関数と呼ぶ。さて、Eq.(7) を無次元化すると

$$\bar{\varphi} + G\bar{y} = \bar{\varphi} \quad (9)$$

ここで G は Eq.(1) における同一のものでこれを重力パラメータと呼ぶ。Eq.(9) の $\bar{\varphi}$ には円筒まわりの粘性流に関する Lamb の式²⁾

$$\bar{\varphi} = \frac{\bar{y}}{2(2 - \ln Re)} \left\{ \frac{1}{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} - 1 + \ln(\bar{x}^2 + \bar{y}^2) \right\} \quad (10)$$

を適用する。したがって、Eq.(10) を Eq.(9) に代入す

ると $\bar{\varphi}$ のある値に対し、いくつかの点 $(\bar{x}, \bar{y})$ が定まるから、これらの点を結んでえられる曲線が粒子軌跡となる。さて、単一円筒の効率を求めるには、このようにしてえられる無数の粒子軌跡から限界粒子軌跡を見い出さねばならない。Fig. 1 において、無次元半径 R (さきよりパラメータ) なる大きさの粒子は点 $P(x_P, y_P)$ において円筒に接するから

$$(d\bar{r}/d\bar{t})_P = (d\bar{x}/d\bar{t})_P \cos \theta_P + (d\bar{y}/d\bar{t})_P \sin \theta_P = 0 \quad (11)$$

上式に Eq.(3) を無次元化した式

$$d\bar{x}/d\bar{t} = \partial\bar{\varphi}/\partial\bar{y} + G, \quad d\bar{y}/d\bar{t} = -\partial\bar{\varphi}/\partial\bar{x} \quad (3')$$

および

$$\cos \theta_P = \bar{x}_P / (\bar{x}_P^2 + \bar{y}_P^2), \quad \sin \theta_P = \bar{y}_P / (\bar{x}_P^2 + \bar{y}_P^2) \quad (12)$$

を代入して整理すると

$$\frac{\bar{x}_P}{2(2 - \ln Re)} \left\{ \frac{1}{(1+R)^2} - 1 + \ln(1+R)^2 + G \right\} = (13)$$

ここで、

$$(1+R)^2 = \bar{x}_P^2 + \bar{y}_P^2$$

Eq.(13) の中かっこ内は $R \geq 0$, $G > 0$ に対して正となるから

$$\bar{x}_P = 0 \quad (14)$$

でなければならない。すなわち、限界粒子はつねに y 軸上の点 $P_1(0, 1+R)$ または $P_2(0, -1-R)$ で捕えられることになる。

いま、限界軌跡粒子が円筒無限前方の点 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ を通るとし、その点での粒子の流れ関数を $\bar{\varphi}_{lim}$ 、空気の流れ関数を $\bar{\psi}_{lim}$ とすると、Eq.(9) より

$$\bar{\psi}_{lim} + G\bar{y}_0 = \bar{\varphi}_{lim} \quad (15)$$

また、流れ関数は流量を表わすことより

$$\bar{\psi}_{lim} = \bar{y}_0 \quad (16)$$

一方、限界軌跡粒子が円筒と衝突する点 $P(0, 1+R)$ では Eq.(9) より

$$\bar{\varphi}_P + G(1+R) = \bar{\varphi}_{lim} \quad (17)$$

ここで $\bar{\varphi}_P$ は点 P における $\bar{\varphi}$ であり Eq.(10) より

$$\bar{\varphi}_P = \frac{1+R}{2(2 - \ln Re)} \left\{ \frac{1}{(1+R)^2} - 1 + \ln(1+R)^2 \right\} \quad (18)$$

ゆえに Eqs.(17), (18) より

$$\bar{\varphi}_{lim} = \frac{1+R}{2(2 - \ln Re)} \left\{ \frac{1}{(1+R)^2} - 1 + \ln(1+R)^2 \right\} + G(1+R) \quad (19)$$

単一円筒の効率は、円筒無限前方における捕集に有効な流れ断面積を通過する粒子量の円筒投影面積を通過する粒子量に対する比で定義されるが、いまの場合、粒子濃度が均一であれば空気流量の比でおきかえられるから、 η_{01} は Eqs.(15), (16), (19) より次式のごとく Re , G , R の関数として求められる。

$$\eta_{01} = 2\psi_{lim}/v_0 d_f = \bar{\psi}_{lim} = \bar{y}_0$$

Table 1 Theoretical collection efficiencies of an isolated cylinder due to combined gravitational settling and interception (η_{GI}) and settling only (η_G)

Flow	Direction of flow	Point of contact $P(x_P, y_P)$ of limiting particles	η_{GI}	η_G
Viscous	Horizontal →○	$x_P = \pm \frac{1+R}{\sqrt{1+\{R^2/(2-\ln Re)\}^2}}$ $y_P = \pm \frac{1}{(2-\ln Re)G} \frac{R^2(1+R)}{\sqrt{1+\{R^2/(2-\ln Re)G\}^2}}$	$\frac{1+R}{\sqrt{1+G^2}} \left[\frac{R^2 \left\{ \frac{1}{(1+R)^2} - 1 + \ln(1+R)^2 \right\}}{2(2-\ln Re)^2 G} + G \right]$	$\frac{G}{\sqrt{1+G^2}}$
Viscous	Vertical ○↓	$x_P = 0$ $y_P = \pm(1+R)$	$\frac{1+R}{1+G} \left[\frac{1}{2(2-\ln Re)} \left\{ \frac{1}{(1+R)^2} - 1 + \ln(1+R)^2 \right\} + G \right]$	$\frac{G}{1+G}$
Potential	Horizontal →○	$x_P = \pm \frac{(1+R)^2 G}{\sqrt{(1+R)^4 G^2 + \{(1+R)^2 - 1\}^2}}$ $y_P = \pm \frac{\{(1+R)^2 - 1\}(1+R)}{\sqrt{(1+R)^4 G^2 + \{(1+R)^2 - 1\}^2}}$	$\frac{\sqrt{(1+R)^4 G^2 + \{(1+R)^2 - 1\}^2}}{(1+R)\sqrt{1+G^2}}$	$\frac{G}{\sqrt{1+G^2}}$
Potential	Vertical ○↓	$x_P = 0$ $y_P = \pm(1+R)$	$\frac{1}{1+G} \left\{ G(1+R) - \frac{1}{1+R} + (1+R) \right\}$	$\frac{G}{1+G}$

$$= \frac{1+R}{1+G} \left[\frac{1}{2(2-\ln Re)} \left\{ \frac{1}{(1+R)^2} - 1 + \ln(1+R)^2 \right\} + G \right] \quad (20)$$

上式において $R=0$ とすると重力のみによる効率 η_G となり次式で与えられる。

$$\eta_G = G/(1+G) \quad (21)$$

(ii) 水平流 水平流ではエアロゾルの流れ方向は重力の方向と直角となる。したがって、上下流の場合より計算はやや複雑となるが手順は全く同じなので要点のみを記す。この場合、Fig. 2 のように座標軸を選ぶと、Eq. (9) に対応する式として

$$\bar{\phi} + G\bar{x} = \bar{\phi} \quad (22)$$

が得られる。ここで $\bar{\phi}$ は上下流の場合と同様 Eq. (10) で与えられる。限界軌跡粒子が円筒と接触する点 $P_1(\bar{x}_{P_1}, \bar{y}_{P_1})$, $P_2(\bar{x}_{P_2}, \bar{y}_{P_2})$ は Eqs. (11), (4) を無次元化した式および Eq. (12) より

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_P &= \pm \frac{1+R}{\sqrt{1+\{R^2/(2-\ln Re)G\}^2}} \\ \bar{y}_P &= \pm \frac{1}{2-\ln Re} \frac{R^2(1+R)}{\sqrt{1+\{R^2/(2-\ln Re)G\}^2}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{複号同順}) \quad (23)$$

また、限界粒子軌跡は円筒の無限前方と考えられる点 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ および点 $P(\bar{x}_P, \bar{y}_P)$ で Eq. (22) を満足するから

$$\bar{\phi}_0 + G\bar{x}_0 = \bar{\phi}_{11m} \quad (24)$$

$$\bar{\phi}_P + G\bar{x}_P = \bar{\phi}_{11m} \quad (25)$$

ゆえに $\bar{\phi}_{11m}$ は Eqs. (23), (10), (25) より

$$\bar{\phi}_{11m} = \pm \frac{1}{\sqrt{1+\{R^2/(2-\ln Re)G\}^2}} \left[\frac{R^2 \{1/(1+R) - (1+R) + 2(1+R)\ln(1+R)\}}{2(2-\ln Re)^2 G} + G(1+R) \right] \quad (26)$$

単一円筒の効率は、上下流の場合は前述のように流体の

流量比で定義してよかったが、水平流では円筒に捕集される粒子が通過する円筒無限前方の流れ断面は、 $\bar{x}$ 軸よりかなり上方に位置している (Fig. 2)。ここでは流体は $\bar{x}$ 軸に平行、つまり断面に直角に流れているが、粒子は重力の影響を受けて円筒に向かってこの断面を通過するはずである。したがって粒子が通過する実際の断面積は、もとの断面積の $1/\sqrt{1+G^2}$ となる。このことを考慮に入れると、 η_{GI} は Eqs. (24), (26) より

$$\begin{aligned} \eta_{GI} &= \frac{\bar{\phi}_{01} - \bar{\phi}_{02}}{2} \frac{1}{\sqrt{1+G^2}} = \frac{\bar{\phi}_{11m1} - \bar{\phi}_{11m2}}{2} \frac{1}{\sqrt{1+G^2}} \\ &= \frac{1+R}{\sqrt{(1+G^2)[1+\{R^2/(2-\ln Re)G\}^2]} \\ &\quad \times \left[\frac{R^2 \{1/(1+R)^2 - 1 + 2\ln(1+R)\}}{2(2-\ln Re)^2 G} + G \right] \end{aligned} \quad (27)$$

ここで添字 1, 2 はそれぞれ上方、下方の流線を示す。上式において、 $R=0$ とすると重力のみの効率となり、次式で与えられる。

$$\eta_G = G/\sqrt{1+G^2} \quad (28)$$

(iii) 重力さえぎり理論効率のまとめ 以上、円筒まわりの流れを粘性流として計算をおこなったが、ポテンシャル流の場合も同様な方法で求められる。それらの結果をまとめて Table 1 に示す。これによると、重力のみによる効率 η_G は円筒まわりの速度分布に関係なく式の形は同じとなるが、上下流と水平流とは多少異なっている。

一方、重力にさえぎりを考慮すると式の形は複雑となり、 η_{GI} は明らかに流線の形に依存する。いま円筒まわりの流れが $Re=0.5$ の粘性流とし、水平流と上下流の効率を比較図示すると Fig. 3 (a), (b) のようになる。これによると、 η_{GI} の値は上下流の方が多少大きくなっているが、予想されるほど両者に大きな差異は認められない。なお、両図において $G=0$ としたときの η_{GI} はよく知られた Langmuir²⁾ のさえぎり効率 η_I と一致する。

Fig. 3 Theoretical settling-interception collection efficiency of an isolated cylinder

$$\eta_I = \frac{1}{2(2 - \ln Re)} \left\{ 2(1+R)\ln(1+R) - (1+R) + \frac{1}{1+R} \right\} \quad (29)$$

Table 1 の η_o は、いずれも Ranz の式 Eq.(1) と異なっているが G の小さいところでは両者はほぼ一致する。

1・2 慣性を加味した重力さえぎり捕集効率

重力、慣性の両捕集機構とはとも、粒径および粒子密度の大きい場合に有効に働くという点では共通しているが、重力は線速度の小さい場合に、慣性は線速度の大きい場合にそれぞれ支配的になるという点に根本的な相違がある。したがって、これら二つの機構のそれぞれが支配的になる速度範囲では、既報^{6,7)}の慣性さえぎり効率線図、または前述の重力さえぎり効率の計算結果に従えばよいが、両捕集機構が競合する中間的な速度領域では、慣性、重力、さえぎりの三者を同時に考慮に入れなければならない。

このような意味から、ここでは流れ方向を上下流として、重力と慣性を同時に考慮した粒子の運動方程式を解くことにより、重力慣性さえぎり効率 η_{ori} を求めてみる。以下に計算法の概略を説明する。

Eq.(2) において重力以外の外力を無視し、これを、Fig. 1 と同じ直交座標軸 $\bar{x}$, $\bar{y}$ 両成分に分解した無次元

Fig. 4 Theoretical settling-inertia-interception collection efficiency of an isolated cylinder

式をつくると、上下流の場合次式のような二階連立常微分方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} 2\Psi(d^2\bar{x}/d\bar{t}^2) + (d\bar{x}/d\bar{t}) - \bar{v}_x &= G \\ 2\Psi(d^2\bar{y}/d\bar{t}^2) + (d\bar{y}/d\bar{t}) - \bar{v}_y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

上式の $\bar{v}_x$, $\bar{v}_y$ には粘性流に関する Lamb の速度分布式^{2,6)} (Eqs. (5), (10) より計算できる) を適用し、Runge-Kutta-Merson の逐次計算法により電子計算機を使って粒子軌跡を求めた。計算の出発点は $Re=0.2, 0.5, 1.0$ のそれぞれに対し、 $\bar{x}_0 = -60, -20, -12$ とし $\bar{y}_0$ を適当にかえて計算する^{6,7)}。また、粒子速度の初期値としては、重力の方向を $\bar{x}$ 軸の正の方向にとっているから、出発点 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ において

$$(d\bar{x}/d\bar{t})_0 = 1+G, \quad (d\bar{y}/d\bar{t})_0 = 0 \quad (31)$$

を与える。計算はまず、 Re , Ψ および G に適当な値を与え、 $\bar{y}_0$ をいろいろ変化させて軌跡を描かせれば円筒に衝突しない軌跡につき η_{ori} と R の関係が求められる。つぎに、 G のみをかえて同様な計算をおこなう。このような計算を Re , Ψ のいろいろの値についておこなえば η_{ori} は

$$\eta_{ori} = \eta_{ori}(Re, \Psi, G, R) \quad (32)$$

のように 4 つのパラメータの関数として決定される。このようにして計算された結果の一例を Fig. 4 に示す。図において、 G を 0 に近づけると慣性さえぎり効率 η_{ri} ^{6,7)} に漸近し、また $\Psi=0$ の曲線は前述の η_{oi} と一致する。

最後に、重力と慣性を同時に考慮した本計算結果が、それぞれ別個に計算しそれを加え合わせた結果と一致するか否か、すなわち効率の加算性について調べてみる。Fig. 5 はさえぎりを無視 ($R=0$) したときの効率 η_{or} , η_o , η_r および $\eta_o + \eta_r$ を Re および Ψ を一定にして G に対して描いたものである。これによると $\eta_{or} > \eta_o + \eta_r$ となっている。Fuchs によれば、一般に全体の効率は、各々の機構による効率の単純な和より小さくなると述べている¹⁾ が、本計算では逆の結果となっている。この原因は定かでないが、効率を単純な和として表示する手法が、

本来論理性に欠けた 便宜的な 手段であることを 考えると、一致しないのはむしろ当然といえよう。

2. 実験的検証

2.1 実験装置および方法

装置のフローシートを Fig. 6 に示す。エアロゾルの発生には“Latex aerosol generator”を使用した*。粒子は粒径範囲が4~14μの Styrene Divinyl Benzene 共重合体である。発生方法はまず、試料懸濁液を圧縮空気により小球（直径約2mm）に吹きつけ、いくつかの水滴に細分化する。このさい、1個の水滴に2個以上の粒子が含まれることのないよう、あらかじめ懸濁液濃度を調整しておく。このような水滴を含む空気の流れに、図のように乾燥空気を送り込み粒子を包む水分のみを気化させると、ラテックス粒子の安定なエアロゾルが生成される。これを既報の装置⁷⁾ とほぼ同じ単一円筒モデル実験装置本体に導く。捕集体は長方形ダクト（30×50 mm）に張られた針金であるが、本発生器によるエアロゾル濃度がきわめて希薄なため、長時間通しても一本の針金に付着する粒子個数は少ない。このため針金5本を流れ方向に1.5 cm 間隔でダクトに張り、できるだけ数多くの粒子を数えられるようにした。また、粒子の再飛散防止のため針金表面にセロテープの粘着剤のベンゼン希薄溶液を塗布した。

針金表面に付着した粒子量については、光学顕微鏡に付属の落射照明装置で表面を照らし、倍率を150倍または600倍にして粒子個数を数えた。なお、測定粒子個数は150~200個であった。

粒子濃度の測定にはインパクターを使用した。すなわち、粘着液を塗布した衝突板上に粒子が200個程度捕集されるよう、一定時間（30 sec~1 min）本体から真空ポンプで吸引し個数を数えた。一方、インパクターを通過する空気流量は、あらかじめ検定されたインパクター前後の差圧マノメーターより求め、これより個数濃度を決定した。

孤立単一円筒の実験効率率は以上の測定量より次式で計算できる。

$$\eta_{exp} = \frac{N}{n v_0 d \rho t} \tag{33}$$

なお、供試エアロゾルはかなり広い粒径分布を持っているので、厳密には部分分離効率を求めて、それぞれの粒径範囲の粒子について理論効率と比較すべきである。しかし、針金に付着した粒子の粒径分布を求めることが、実際には容易でなく、ここでは止むをえず全体の個数平均径でデータをまとめることにした。

実験は上下流についてのみおこない、おもに線速度

* 本発生器は京都大学、井伊谷研究室で試作された。

Fig. 5 Comparison of the total efficiency with the simple summing of the partial efficiencies under the consideration of both gravitational settling and inertia

Fig. 6 Schematic diagram of apparatus

Table 2 Experimental conditions and physical properties

Kind of aerosol: styrene divinyl benzene copolymer latex particles
Average diameter of particles ($d_{p,av}$): 7.45 μ
Standard deviation (σ): 2.3 μ
Density of particle (ρ_p): 1.05 g/cm ³
Concentration of aerosol (n): 0.1~0.5 number/cm ³
Diameter of wires (d_f): 85.0 μ (nichrome), 42.0 μ (copper)
Cross sectional area of duct: 15.0 cm ²
Average linear velocity in duct (v_0): 0.3~50 cm/sec
Number of particles deposited on wire: 0.1~20 number/mm-wire length
Reynolds number (Re): 0.01~3
Settling parameter (G): 0.001~0.5
Inertial parameter (Ψ): 0.01~3

と針金直径を変化させた。おもな実験条件はまとめて Table 2 に示す。

(a) $d_f = 42.0 \mu$

(b) $d_f = 85.0 \mu$

Fig. 7 Comparison of the experimental collection efficiencies with the calculated ones

2・2 実験結果および考察

実験効率を、円筒への接近速度に対して示すと Fig. 7 (a), (b) のようになる。実線および破線は同一条件での理論線である。図中、 η_{GTI} 曲線は前述の重力、慣性およびさえぎりを同時に考慮してえられた効率曲線で、直接実験データと比較されるべきものである。速度の大きいところでは慣性が、小さいところでは重力がそれぞれ支配的になるということは、 η_{TI} および η_{GI} の曲線の傾向からも明らかである。いま、これらを加算し $\eta_{TI} + \eta_{GI}$ を作ると図の点線のようになり、 η_{GTI} 曲線とはほぼ一致している。したがってこの図で見える限り $\eta_{TI} + \eta_{GI}$ で近似的に全体の理論効率を表示しても差し支えない。しかしながら理論的には、両曲線を重力および慣性が無視できる範囲で比較すると η_{GTI} は η_{TI} に、 $\eta_{TI} + \eta_{GI}$ は $2\eta_{TI}$ になるから、このような操作条件下で η_{GTI} を $\eta_{TI} + \eta_{GI}$ で置きかえるのに無理がある。一方、さえぎりを重力または慣性のいずれか一方のみに考慮して加算された効率、 $\eta_{TI} + \eta_G$ または $\eta_{GI} + \eta_T$ は、比較するまでもなく明らかに η_{GTI} の方が大きく、Fig. 5 の結論と一致する。したがって、全体の効率をそれぞれの機構による効率の単純な和で表示するにしても、どのような組み合わせの和をとるべきかに問題がある。

さて、Fig. 7 の実験データは、単一円筒の効率の定義に立ち戻ってはいるが、測定法が原始的で、しかも多分散エアロゾルの平均径を使って比較しているにもかかわらず、

らず、 η_{GTI} 曲線の傾向と比較的よく一致している。速度を横軸にとったときの曲線の傾向は、粒径 1μ 前後のエアロゾルの逕過効率曲線の傾向⁷⁾と類似しているが、線速度が小さくなるにつれて効率が上昇するのは、前者では重力効果によるのに対して、後者は拡散効果によるものであることを明確に区別して考えねばならない。すなわち、粒径が小さい場合、拡散による捕集が支配的であるが、粒径が大きくなるに従い重力効果が拡散効果と同程度となり、ついには本実験のように粒径が数 μ 以上になると重力が捕集の主要因子となる。

結 論

粒径が数 μ から 10μ 近辺の比較的大きいエアロゾル粒子、または金属粒子のように比重の大きい粒子を繊維充填層で逕過するさいに、重力による捕集機構が有力となることに着目し、単一円筒の重力さえぎり理論捕集効率を解析的に求め、Table 1 のような結果を得た。さらに、粒径が大きい場合には線速度を上げると慣性効果もまた有力になることを考慮し、重力とさえぎりに慣性を加味した効率を、逐次計算法により求めた。

単一円筒モデルによる実験結果は、上記理論の正当性を十分に裏付けているものと思われるが、繊維充填層による実測値が皆無で、今後、データを集積し、さらにくわしく検討していかなければならない。

Nomenclature

d_f, d_p = diameters of fiber and particle	[cm][μ]	m	= mass of an aerosol particle	[g]
F_e = external force	[dyne]	n	= concentration of aerosol	[number/cm ³]
g = acceleration of gravity	[cm/sec ²]	N	= number of particles collected by a cylinder of length l	[number]
G = gravitational settling parameter ($= \rho_p d_p^2 g / 18 \mu v_0$)	[-]	R	= interception parameter ($= d_p / d_f$)	[-]
l = length of wire	[cm]	r	= dimensionless polar coordinate	[-]

Re	= Reynolds number ($=\rho d_f v_0/\mu$)	[—]	$\bar{\varphi}$	= dimensionless stream function of particle ($=2\varphi/v_0 d_f$)	[—]
$t, \bar{t}$	= time and dimensionless time ($=2v_0 t/d_f$)	[sec][—]	ϕ	= stream function of fluid	[cm ³ /sec]
u	= velocity of aerosol particle	[cm/sec]	$\bar{\phi}$	= dimensionless stream function of fluid ($=2\phi/v_0 d_f$)	[—]
u_t	= terminal settling velocity of particle	[cm/sec]	Ψ	= inertial parameter ($=\rho_p d_p^2 v_0/18 \mu d_f$)	[—]
v	= velocity of fluid	[cm/sec]			
v_0	= unidirectional velocity of the fluid far upstream of cylinder, or average velocity in duct	[cm/sec]			
$\bar{v}_x, \bar{v}_y$	= dimensionless velocity components of fluid ($=v_x/v_0, v_y/v_0$)	[—]			
$\bar{x}, \bar{y}$	= dimensionless position coordinates ($=2x/d_f, 2y/d_f$)	[—]			
Z	= mobility of aerosol particle ($=1/3 \pi \mu d_p$)	[cm/sec/dyne]			
η	= collection efficiency of an isolated cylinder	[—]			
θ	= polar coordinate	[deg]			
μ	= viscosity of fluid	[g/cm·sec]			
ρ, ρ_p	= densities of fluid and particle	[g/cm ³]			
φ	= stream function of particle	[cm ³ /sec]			

<Subscripts>

0	= at initial position (x_0, y_0)
P	= at the point P(x_P, y_P)
lim	= along the limiting particle trajectory
exp	= experimental
G	= gravitational settling
I	= interception
T	= inertia
GI	= combined settling and interception
TI	= combined inertia and interception
GTI	= combined settling, inertia and interception

Literature cited

- 1) Davies, C.N.: "Aerosol Science", p. 243, Academic Press (1966)
- 2) Lamb, H.: "Hydrodynamics", 6th Ed., p. 614, McGraw-Hill (1932)
- 3) Langmuir, I.: *OSRD Report*, No. 865, 44 (1942)
- 4) Natanson, G.L.: *Proc. Acad. Sci., USSR (Phys. Chem. Sect.)*, 112, 95 (1957)
- 5) Ranz, W.E. and J.B. Wong: *Ind. Eng. Chem.*, 44, 1371 (1952)
- 6) Yoshioka, N., H. Emi and M. Fukushima: *Kagaku Kōgaku*, 31, 157 (1967)
- 7) Yoshioka, N., H. Emi, H. Matsumura and M. Yasunami: *ibid.*, 33, 381 (1969)
- 8) Yoshioka, N., H. Emi and H. Sone: *ibid.*, 31, 1011 (1967)

湿潤粒子層の引張強度（綱川 浩・青木隆一，化学工学，36，281～286（1972））

液橋の強度に関する近似計算を球-球 および円すい突起-平面間の最狭部で行ない，これらの結果を基礎にして，それぞれ球粒子および不規則形状粒子層の引張強度を考察した結果，実験値とよく一致する半理論式を得た。この式は二つの因子を含み，これらは実験的に決定された。このうちの一つは充てん層の空隙率とまた他の一つは粒子の円形度とそれぞれ関連された。

これらの因子を用いて，

- （1）空隙率一定における引張強度と液量
- （2）液量一定における引張強度と空隙率

の関係が計算できる。

多重効用缶の均等最小面積条件について（吉福功美，化学工学，36，287～293（1972））

N 段の離散のプロセスにおける最適操作問題へのアプローチとして提起された均等最適条件問題の一例として，順流式多重効用缶の伝熱面積についての均等最小面積条件を求めた。この均等最小面積条件下での操作は最適操作である。

この条件を求めるために最適配分問題に関する一変換公式を適用し，これを総括伝熱係数についての式で表わした。更に最小面積からの偏差を表わす尺度を定義し，幾つかの文献からその数値例を示した。

連続向流式移動層によるイオン交換について（前川美之・堀尾正毅・鞭 巖，36，293～299（1972））

向流式移動層における軸方向の濃度分布を表わす理論式を，液の逆混合，流体境界内拡散および粒内拡散を考慮してイオン交換プロセスの場合について導出した。その式に基づいて，濃度分布に及ぼす無次元因子の影響を推算した。

本研究では， $\text{Na}^+\text{-H}^+$ 交換の実験を行なった。濃度分布の計算結果と実測値との間に満足な一致が得られた。本報において提出した式は，イオン交換移動層の操作条件の決定や装置の設計に有用となる。

光化学反応装置の設計因子——光吸収関数の指数モデル——（城塚 正・西海英雄，化学工学，36，300～306（1972））

光吸収能力を濃度の関数として表現した光吸収関数は，Beer 則に従わないものも多い。そこで新しく Beer 則を含む光吸収関数の指数モデルを考え，平行光線入射型回分系反応器を用い，反応速度が光吸収速度に比例するトリオギザレート鉄（Ⅲ）カリウムの光還元反応で実験したところ，実験値は指数モデルによる計算値と一致し，光吸収関数の指数モデルが有用であることが示された。

光化学反応装置の設計因子——多色光による光反応——（城塚 正・西海英雄，化学工学，36，307～313（1972））

多色光による光反応の解析法として，多色光による光反応を一種の並発反応と考える Model I，単色光による光反応と近似する Model II，各単色光による結果をただ加えさせる Model III の3種をとりあげ，理論的な検討を加えた。365，405，436 $\text{m}\mu$ から成る多色光の平行光線が入射する完全混合回分系反応器を用い，トリオギザレート鉄（Ⅲ）カリウムの光還元反応を行なったところ，実験値は，Model I に基づく計算値と広い範囲にわたって一致した。

孤立円筒によるエアロゾルの捕集効率——重力および慣性支配領域——（吉岡直哉・江見 準・金岡千嘉男・安並正雄，化学工学，36，313～319（1972））

サブミクロンエアロゾルの繊維充填層通過過程で，重力捕集機構は通常無視されるが，数 μ 以上または比重の大きい粒子に対しては，速度の遅い領域で拡散よりも有力となる。以上の理由から孤立円筒の重力さえぎり捕集効率を粒子の流れ関数を使って導き，さらに重力，慣性，さえぎりを同時に考慮した効率を数値的に求めた。エアロゾル流れに針金を置いて実験を行なった結果，実験効率は上記理論値とかなりよく一致した。

<化学工学データ>

プロピオン酸+水+ n -ヘキサン系とプロピオン酸+水+シクロヘキサン系の液液平衡（井口昭洋・布施憲司，化学工学，36，320～322（1972））

プロピオン酸+水+ n -ヘキサン系とプロピオン酸+水+シクロヘキサン系の 25°C の液液平衡を測定し，溶解度曲線とタイラインのデータを得た。プレイトポイントは Treybal の方法と次のプロットによる方法とで求めたところ，ほぼ一致した。

$$\log x_w: \frac{y_w - x_w}{x_w}$$

x_w : 炭化水素相中の酸の重量分率

y_w : 水相中の酸の重量分率

酢酸 n -ブチル-ベンゼン-水系の液液平衡（諸戸定正・渡辺昭，化学工学，36，323～325（1972））

溶媒抽出法により硝酸分解法湿式リン酸の精製を行なうための基礎的研究の1部として，酢酸 n -ブチル-ベンゼン-水の系について液液平衡を 25°C で測定した。この系の平衡データを三角図表に示し，また対応線データは Othmer-Tobias プロットによって検討した。

<寄書>

多孔質触媒物質系における気体の拡散現象に関する研究——充填層におけるガス dispersion について——（三谷雅肆・浜井専蔵，化学工学，36，326～327（1972））

吸着を伴う条件の下で， $\text{He-C}_2\text{H}_6$ 系 ($\text{Sc}=2.4$) の充填層軸方向混合について検討した。 Re と Pe の関係を $0.1 < Re < 4$ で求めた結果，軸方向混合は従来予測されてきたよりも高い Re まで分子拡散支配となり，de Ligny の式により説明することができた。また，軸方向混合に及ぼす物質移動の影響は認められなかった。

光化学反応装置の設計因子——混合と光吸収速度の数学的モデル——（城塚 正・西海英雄，化学工学，36，328～330（1972））

前報では光反応装置の重要な因子である光吸収速度 Q に対し，3種の数学的モデルを考えたが，ここでは前報と同じ反応系で反応器を変え，さらに混合条件をも考慮し，各モデルの有効性について検討した。その結果，光強度分布が反応中変化しないとしたモデルは完全混合において存在しないこと，混合の光反応効果に与える影響はないこと，また各モデルの適用限界は前報と同じであることが示された。

光吸収関数の測定——指数モデル——（城塚 正・西海英雄，化学工学，36，330～331（1972））

Beer の法則は，ある物質の光吸収係数が濃度に比例する関数として表しているが，この法則は常に成り立つとは限らず，光反応装置の研究をするためには，もっと広い領域に適用できる μ の表現法が必要となる。そこで分光器により，16種の光吸収係（関）数を測定し， μ は Beer 則をも含めた指数モデルで表現できることを見出した。

Liquid-Liquid Equilibria of the System *n*-Butyl Acetate-Benzene-Water, S. Moroto, A. Watanabe (Govt. Ind. Res. Inst., Nagoya)
Kagaku Kōgaku, 36, 323~325 (1972)

To obtain the fundamental data for the process of separation of phosphoric acid by solvent extraction after the nitric acid acidulation of phosphate rock, ternary liquid-liquid equilibria of the system *n*-butyl acetate-benzene-water were measured at 25°C.

By using of triangular phase diagram and Othmer-Tobias plot using tie-line data of this system were presented.

<Short Communications>

Research on Gaseous Diffusion Phenomena in Various Porous Catalysts—Axial Dispersion in Packed Bed—, M. Mitani and S. Hamai (Kōgakuin Univ.)

Kagaku Kōgaku, 36, 326~327 (1972)

Axial dispersion in some catalyst beds, where in mass transfer between solid and fluid exists, has been measured for the flow of helium, traced by step input of ethane. *Re-Pe* relationships obtained in the range of *Re* from 0.1 to 4 were expressed by the formula developed by de Ligny. The constants in the formula has been determined. The results indicate that axial dispersion is molecular diffusion controlled up to *Re*=1.

Design Factors of Photochemical Reactors—Mixing and Models to Absorption Rate of Radiation Energy—, T. Shiotsuka and H. Nishiumi (Waseda Univ.)

Kagaku Kōgaku, 36, 328~330 (1972)

Three models to absorption rate of radiation energy *Q* presented in the previous paper are studied in a perfectly mixed and not mixed, batch, parallel beam photochemical reactor, in case of the reaction whose rate is proportional to *Q*. The experimental results obtained from the photoreduction of potassium trioxalate (III) ferrate in a perfectly mixed reactor agreed well with calculated values of Case I, and other models (Case II, III) (for small optical thickness). Calculated results are as follows; in case of perfect mixing the equation of Case II in which intensity profile is not changed throughout reaction can not be set up; mixing has no influence on conversion; Case II and Case III, can be used over the same region presented in the previous paper.

Measurement of Absorption Function—Power Model—, T. Shiotsuka and H. Nishiumi (Waseda Univ.)

Kagaku Kōgaku, 36, 330~331 (1972)

Spectrophotometric measurements on inorganic salts dissolved in water or 0.1N sulfuric acid were made to test the validity of Beer's law. Experimental results showed that absorptivity of radiation energy of a substance could be expressed as a power function of concentration whose power was between 3.0 and 0.60 including Beer's law. The new power model is expected more applicable than Beer's law in the study of photochemical reactors.

Design Factors of Photochemical Reactors—Photochemical Reactions Caused by Polychromatic Light—, T. Shiotsuka and H. Nishiumi (Waseda Univ.)

Kagaku Kōgaku, 36, 307~313 (1972)

Three models for photochemical reactions caused by polychromatic light were studied: side reactions (Model I), an approximation by monochromatic light (Model II) and addition of photochemical effects caused by monochromatic light (Model III). Photoreduction of potassium trioxalate ferrate whose reaction rate was proportional to the absorption rate of radiation was used to check the validity of these models. Studying the reaction in a batch reactor for the polychromatic light composed of 365, 405 and 436 mμ, the experimental values agreed well with the calculated values based on Model I. The theoretical relationship between Model I and other models were discussed.

Collection Efficiency of Aerosol by an Isolated Cylinder—Gravity and Inertia Predominant Region—, N. Yoshioka, H. Emi, C. Kanaoka and M. Yasunami (Kyoto Univ.)

Kagaku Kōgaku, 36, 313~319 (1972)

The mechanism of gravitational settling has been generally neglected in the theoretical treatment of filtration process of submicron aerosols, owing to their small values of settling velocity. However, for particles of a few-microns in diameter or relatively high density, it becomes predominant in comparison with diffusion mechanism in low velocity region.

For this reason, the collection efficiency of an isolated cylinder due to combined settling and interception was derived analytically using the stream function of particles, and that due to combined settling, inertia and interception was also calculated numerically as the function of settling parameter, inertial parameter, interception parameter and Reynolds number.

Experimental collection efficiencies of an isolated wire exposed to the aerosol stream, were in fairly good agreement with the above theoretical ones.

<Chemical Engineering Data>

Liquid-Liquid Equilibria of the Systems Propionic Acid+Water+*n*-Hexane and Propionic Acid+Water+Cyclohexane, A. Iguchi (Musashi Inst. of Tech.) and K. Fuse (Tokyo Inst. of Tech.)

Kagaku Kōgaku, 36, 320~322 (1972)

Solubility and distribution curves were determined for the systems propionic acid+water+*n*-hexane and propionic acid+water+cyclohexane at 25°C.

The plait point was located by the method of Treybal, Weber and Daley and estimated by extrapolation of the following plots;

$$\log x_w: (y_w - x_w)/x_w$$

where x_w is wt. fraction of propionic acid in hydrocarbon layer and y_w is wt. fraction of propionic acid in water layer.

The both estimated values at plait point were in almost agreement respectively for the two systems.

Tensile Strength of Wet Granular Materials, H. Tsunakawa and R. Aoki (Yokohama National Univ.)
Kagaku Kōgaku, 36, 281~286 (1972)

The approximate calculations of the forces at the narrowest portion of the liquid bridge between two spheres of equal size or the conical apex and the flat plate were performed. On the basis of these results, the tensile strength of the wet granular materials of spherical and irregular shapes has been considered. Consequently the semi-theoretical equation which agreed fairly well with the experimental values was obtained. This equation includes two factors which were determined experimentally. One of which has been correlated with the void fraction of the packed bed and the other with the degree of circularity of the particle. Using these factors, it becomes possible to estimate the correlations in following two cases.

- (1) the tensile strength and the liquid volume at the constant void fraction
- (2) the tensile strength and the void fraction at the constant liquid volume

On the Equi-Minimum Area Condition of Multiple Effect Evaporators, I. Yoshifuku (Kagoshima Univ.)
Kagaku Kōgaku, 36, 287~293 (1972)

As an example of the equi-optimum problem which is an approach to the optimum operation problem in a *N*-stage discrete process, the condition of equi-minimum heat transfer area in a forward multiple-effect evaporators has been investigated. The operation under the condition is an optimum operation.

Applying a conversion formula about the optimum allotment problem reported previously, the equi-minimum area condition can derive the formula with respect to overall heat transfer coefficient. An index which shows the deviation from minimum area is defined and its numerical values are evaluated for a few example.

Ion Exchange by Continuous-Countercurrent Moving Bed, Y. Maekawa (Mitsubishi Kasei Kogyo Co.), M. Horio and I. Muchi (Nagoya Univ.)
Kagaku Kōgaku, 36, 293~299 (1972)

Theoretical equations expressing the longitudinal distributions of concentration in countercurrent moving bed have been derived for the case of ion-exchange process by taking account of the back mixing of liquid, the diffusion in liquid film and the intraparticle diffusion. The effects of the dimensionless factors on the distribution of concentration have been evaluated on the basis of the equations.

Experiments of Na⁺-H⁺ ion exchange have been conducted in this work. Calculated results on the distributions of concentration have been in good agreement with the observed data. The equations proposed in this report may be applicable to the determination of the operating conditions of the ion-exchange moving bed and to the design of the equipment.

Design Factors of Photochemical Reactors—Power Model of an Absorption Function—, T. Shiotsuka and H. Nishiumi (Waseda Univ.)
Kagaku Kōgaku, 36, 300~306 (1972)

A new power model including Beer's law is developed for a simple photochemical reaction. The absorption of radiation for potassium trioxalateferrate (III) could be expressed by Beer's law at 365 mμ and by the new model at 436 mμ whose power is 0.88. The reaction rate of photoreduction of the substance is proportional to absorption rate of radiation. Studying the reaction in a batch reactor at 365 and 436 mμ respectively, the experimental values agreed very well with the calculated values based on the new model. These results indicate that the new power model is more applicable than Beer's law.