Literature cited

- 1) Barker, P.E. & M.F. Self: *Chem. Eng. Sci.*, **17**, 541 (1962)
- 2) Danckwerts, P.V.: *ibid.*, **2**, 1 (1953)
- 3) Eguchi, W. & S. Nagata: *Chem. Eng. (Japan)*, **24**, 142 (1960)
- 4) Gilbert, T.J.: *Chem. Eng. Sci.*, **10**, 243 (1959)
- 5) Hotta, K., H. Ozoe & K. Iinoya: Paper presented at Okayama Meeting of Chem. Eng. Soc. Japan (1965)
- 6) Hougen, J.O. & R.A. Walsh: *Chem. Eng. Prog.*, **57**, No. 3, 69 (1961)
- 7) Inoue, I. & K. Sato: *Chem. Eng. (Japan)*, **29**, 518 (1965)
- 8) Inoue, I. & Tonooka, Y.: *Rikagaku Kenkyusho Hokoku*, **49**, 317 (1964)
- 9) Miyauchi, T., Imai, H. & K. Kubo: *Chem. Eng. (Japan)*, **30**, 643 (1966)
- 10) Otto, R.E. & L.E. Stout: *Chem. Eng. Symp. Series*, **57**, No. 36, 69 (1961)

静電容量による粉体流量の測定*

中島裕夫**・後藤圭司***

田中達夫**

北海道大学工学部 合成化学工学科

緒言

各種の粉体プロセスを自動化するためには粉体の瞬間流量を連続的に精度よく測定することが必要である。従来粉体の瞬間流量の測定については、ベルトスケール式、

傾斜樋式など2, 3の方法が提案されている¹⁻⁵⁾。しかし前者は装置が大型となるし、かなり積算されたものを測定している、また後者は粉体の物性値による影響の算定が困難であり、微小流量における精度が期待できない、などの問題が残されており十分満足なものとはいえない。そこで著者らは平行極板間に粉体を落下させその静電容量の変化から連続的に瞬間流量を求める装置を試作しその静特性を検討したのでここに報告する。

1. 測定原理および実験装置

Fig. 1 に示す平行極板間に粉体を落下させたとき、流量 F と極板間の滞留量 H との関係は落下速度を v とすると、次式で表わすことができる。

$$H = \int_{s_1}^{s_2} \frac{F}{v} ds \quad (1)$$

$$F = \frac{H}{\int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{v} ds} \quad (2)$$

ここで落下速度の計算式をきめるために、滞留量と流量の関係を Fig. 2 に示す装置によって求めた。すなわち④によって落下粉体の流れを極板の長さと同じ長さで切断し、捕集された粉体の重量から滞留量を求めた。流量は傾斜樋式流量計⑥によって一定であることを確かめながら30秒間のサンプリングから求めた。この測定結果と、自由落下の式を v に適用して求めた滞留量と流量の関係を比較したところ、Fig. 3 に示す結果をえた。こ

- ① Hopper
- ② Gate
- ③ Vibratory feeder
- ④ Electrodes (365 × 40 × 1 t, distance 19)
- ⑤ Shield

Fig. 1 Experimental apparatus for flow rate measurement

* <Measurement of Particles Flow Rate by the Electrostatic Capacity Method>

Received on June 18, 1966

昭和41年4月 化学工学協会第31年会にて講演

** Hiroo Nakajima, Tatsuo Tanaka (Dept. of Chem. Proc. Eng., Hokkaido Univ., Sapporo, Japan)

*** Keishi Gotoh (名古屋大学工学部工学科 Dept. of Chem. Eng., Nagoya Univ., Nagoya, Japan)

れからわかるように両者は良く一致しており、本実験範囲においては粉体の落下速度は自由落下の式を用いて計算してよいことがわかった。したがって、 $v=\sqrt{2gs}$ として(2)式はつぎようになる。

$$F = \frac{H}{\sqrt{\frac{2}{g}(\sqrt{S_1} - \sqrt{S_2})}} \quad (3)$$

つぎに極板間の滞留量が H のとき粉体の充てん率を $(1-\varphi)$ とすれば

$$H = \rho_s A d (1 - \varphi) \quad (4)$$

ただし ρ_s は粉体の真密度、 A, d はそれぞれ電極板の対向面積および間隙である。一方、誘電率 ϵ_s の球形粒子が誘電率 ϵ_0 の媒質中に分散している場合、総括的な誘電率は $\epsilon_0=1$ 、 $(1-\varphi) \ll 1$ のとき Rayleigh の式からつぎようになる¹⁾。

$$\epsilon_{ov} = \frac{(\epsilon_s + 2) + 2(\epsilon_s - 1)(1 - \varphi)}{(\epsilon_s + 2) - (\epsilon_s - 1)(1 - \varphi)} \quad (5)$$

また極板間が空気だけのときからの静電容量の変化量は、

$$\Delta C = \frac{10}{9} \times \frac{A}{4\pi d} (\epsilon_{ov} - 1) \quad (6)$$

したがって(3)~(6)式から粉体流量はつぎようになる。

$$F = \rho_s \cdot \frac{\epsilon_s + 2}{\epsilon_s - 1} \cdot \frac{Ad}{\sqrt{\frac{2}{g}(\sqrt{S_2} - \sqrt{S_1})}} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta C + \frac{5A}{6\pi d}}$$

$$= \rho_s \cdot \frac{\epsilon_s + 2}{\epsilon_s - 1} \cdot \frac{Ad}{\sqrt{\frac{2}{g}(\sqrt{S_2} - \sqrt{S_1})}} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta C + 3C} \quad (7)$$

ここで C は極板間が空気だけのときの静電容量である。いま ΔC が $3C$ に比べて十分小さいところでは(7)式は次式のように表わすことができる。

$$F \approx K_1 K_2 \Delta C \quad (8)$$

$$K_1 = \rho_s \cdot \frac{\epsilon_s + 2}{\epsilon_s - 1}$$

$$K_2 = \frac{6}{5} \cdot \frac{\pi d^2}{\sqrt{\frac{2}{g}(\sqrt{S_2} - \sqrt{S_1})}}$$

ここで K_1, K_2 はそれぞれ粉体の物性値および装置の寸法によって定まる定数である。すなわち流量 F と静電容量変化 ΔC はほぼ直線関係にあって、静電容量を測定することによって流量を求めることができる。実験装置は Fig. 1 に示したものである。すなわち平行極板は周囲を接地した金属板によってかこまれ、静電的に遮蔽されている。そして極板間に粉体が落下し静電容量が空気の場合から変化したとき、静電容量計はその変化量 ΔC のみが測定できるようになっている。

Fig. 2 Experimental apparatus for hold up measurement

Fig. 3 Comparison of Eq.(8) with experimental results

2. 実験結果および考察

2.1 端効果の影響

平行極板における電気力線の通路は Fig. 4 のように両側にふくらむのでこの端効果の影響を受けて静電容量は一般に極板部のみに対する値より大きくなる²⁾。そこ

Fig. 4
End effect due to line
of electric force

2.2 流量検定

粉体流量 F とそのときの静電容量変化 ΔC の関係を前節の (8) 式から計算で求めたものと実測したものとを比較したところ Fig. 5 に示す結果をえた。すなわち計算結果と実測結果はかなりよく一致しており本装置はほぼ満足できる測定精度をもつと考えられる。本実験においてはかなり粗い粉体を使用したので粉体が極板へ付着するための影響はみられなかったが、微粉を扱う場合はこの影響がかなり問題になると思われる。したがってそのようなときは極板間隔を広げたり、極板を振動させることによってこれを防止する必要があると考える。また水の誘電率 (80) は他の一般のそれ (2~10) と比較して著しく大きく、電解質をわずかに溶解しても大きな電導性を示すため、粉体に含まれる水分はその粉体の電気的な物性に大きな影響を与える。この影響の程度を定量的に算定するためにはモデルによる理論的な考察が必要であるが、これについては次の機会にゆずる。なお極板の設計の目安としてはまず落下粉体流の断面積から粉体になるべく極板に接触しないで極板間に一様に分散して落下するように、極板の幅と間隔を大まかに定めることができる。つぎに極板の長さは、粉体の落下速度に自由落下の式が適用できる範囲でできるだけ長くすれば、

でこの端効果の影響を調べるため、幅 2.5cm、厚さ 0.3cm の塩化ビニル製の棒を 2 本用意し、一方を極板の長さ等に等しく、他方は十分な長さをもつようにした。これらの棒を極板間に挿入してその静電容量を比較したところ、後者は前者の 1.076 倍であった。したがって本実験に使用した極板の長さは実際は 36.5cm であるが端効果を考慮して、見掛け上 36.5×1.076 cm とすればよいことになる。

Fig. 5 Comparison of Eq.(7) with experimental results

それだけ流量計の感度すなわち単位流量あたりの静電容量変化を増すことができる。

結 言

以上静電容量によって粉体の瞬間流量を測定するための装置を試作し、実験によってその静特性を求めた。その結果、本実験装置は被測定粉体の誘電率並びに装置の寸法 (極板の対向面積、間隔および位置) がわかれば、粉体の物性の違いによる面倒な検定なしに、微少流量においてもかなり精度よく瞬間流量を測定できることがわかった。なお本実験装置は流量制御の検出端としても使用可能であって十分実用に供しうるものと思われる。

終りに本研究に協力された徳永雄二君に謝意を表す。

Nomenclature

A : effective surface area of electrode [cm²]
 C : electro-static capacity of electrodes [pF]
 d : distance between the electrodes [cm]
 F : flow rate [g/sec]
 g : gravity acceleration [cm/sec²]
 H : hold up [g]
 K_1, K_2 : constants [—]
 S_1, S_2 : falling distances from the level of

feeder to the both ends of the electrodes [cm]
 v : velocity of particles [cm/sec]
 ϵ_s : dielectric constant of solid particles [—]
 ϵ_{ov} : overall dielectric constant for air suspended by particles [—]
 ρ_s : density of solid particles [g/cm³]
 φ : porosity [—]

Literature cited

- 1) Iinoya, K.: "Funtai-Kōgaku Handbook", p. 662, Asakura
- 2) Iinoya, K., et al.: *Kagaku Kōgaku (Chem. Eng., Japan)*, 29, [2], p. 88 (1965)
- 3) Iinoya, K.: *Keisoku to Seigyo*, 2, [11], p. 835 (1963)
- 4) Iwai, K.: *ibid.*, 2, [11], p. 871 (1963)
- 5) Kimura, N.: *Kagaku Kōgaku (Chem. Eng., Japan)*, 24, [7], p. 511 (1960)
- 6) Kohlrausch, F.: "Praktische Physik", Band 5 (translated by Kuwabara, G. "Jikkenbutsurigaku", Band 5, p. 133 Ome)
- 7) Matsushiro, S., et al.: "Kōgyōkeisokugijutsutaikei", Vol. 10, p. 278, Nikkan Kōgyō Shinbunsha
- 8) Oka, S. and Nakada, O.: "Kōtaiyūdentairon", p. 80, Iwanami

寄 書

瞬間的な局所物質移動速度の測定法*

平 田 彰**・城 塚 正**

早稲田大学応用化学科 化学工学分科

相変化に伴うエネルギー遷移を利用して、局所的位
置における瞬時（応答時間約 10 μ sec 程度）の物質移動速
度の測定手法を考案した。検討実験を行なった結果、今
後非定常現象、過渡現象の解析にも十分に適用可能と考
えられるので速報する。

測定法の原理 一般的に、物質と熱が同時に移動す
る場合を考える。まず、物質移動の伴わない場合と伴う
場合の物体表面における熱の出入は Fig. 1 のそれぞれ
a), b) で示される。これらの場合の物体表面における熱
収支を取り、両者を辺々相引けば

$$(q_c' - q_c) = (q_w' - q_w) + (q_r' - q_r) + (q_m + q_a) \quad (1)$$

伝導項 対流項 輻射項 拡散項

Eq.(1) は表面への伝熱速度に対する物質移動に起因
する減少効果を表わすことになる。さらに、今物質移動
速度の測定を目的とする場合には、 $q_w' - q_w \approx 0$, $q_r' - q_r$
 ≈ 0 の条件下で実験を実施すれば大変便利となる。この
場合には $q_c' - q_c$ を実測することにより、相変化に伴う
エネルギー遷移量 ΔH が既知であれば、物質移動速度
 $M = q_m / \Delta H$ が算出できることになる。

q_c' , q_c の測定法 固体表面より内部への伝導伝熱
速度 q_c' , q_c は熱絶縁性基盤上の薄膜抵抗温度計¹⁾ により
測定することができる。すなわち、固体中への熱伝導
が生ずると、基盤表面温度変化 (= 抵抗値変化)、したが
って抵抗体両端の電圧変化 $E(t)$ が生じ、これを検出
すればよい。これが実測されれば、半無限広がり固体

(a) without mass transfer (b) with mass transfer
Fig. 1 Heat balance on the surface

に関する一次元非定常熱伝導方程式を、固体表面温度が
時間的に任意に変化する場合 $T(0, t) = f(t)$ について解
くことにより、抵抗体両端の電圧の経時変化 $E(t)$ より、
伝導伝熱速度 $q_c(t)$ および表面温度変化 $T_w(t)$ を
次式により算出することができる。

$$q_c, q_c'(t) = \frac{c_f}{2\sqrt{\pi} E_{f0}} \left\{ \frac{\sqrt{(\rho c_p k)_b}}{\alpha} \right\} \left\{ \frac{2E(t)}{\sqrt{t}} + \int_0^t \frac{E(t) - E(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}} d\tau \right\} \quad (2)$$

$$T_w(t) = \frac{c_f E(t)}{E_{f0} \alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi} \sqrt{(\rho c_p k)_b}} \int_0^t \frac{q(\tau)}{(t-\tau)^{1/2}} d\tau \quad (3)$$

もし、表面における伝熱速度が時間的に一定である場
合、Eq.(2), (3) は次式のように簡単化される。

$$q_c, q_c' = \frac{\sqrt{\pi} c_f}{2E_{f0}} \frac{\sqrt{(\rho c_p k)_b}}{\alpha} \left(\frac{E(t)}{\sqrt{t}} \right) \quad (2')$$

$$T_w(t) = \frac{2q_c}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{(\rho c_p k)_b}} \quad (3')$$

すなわち、電圧変化 $E(t)$ 、表面温度変化 $T_w(t)$ は時
間の平方根に比例して変化することになる。

なおここで、 $\sqrt{(\rho c_p k)_b} / \alpha$ は薄膜抵抗温度計の特性に
よって定まる定数で、この値は抵抗体をブリッジ回路の
一辺に挿入し、既知の電気的熱量を抵抗体に与えること

* <A New Method of Measuring Instantaneous and Local Mass Transfer Rate>

Received on December 9, 1966

昭和 41 年 10 月 化学工学協会東北大会にて一部発表

** Akira Hirata & Tadashi Shirotaka (Chemical Engineer-
ing Course, Department of Applied Chemistry, Waseda
University, Tokyo, Japan)

三成分系の気液平衡の測定——イソプロピルアルコール-水-イソプロピルエーテル系——（頼実正弘・吉村尚真・山本武則，化学工学，31，451～457（1967）） 3成分系の気液平衡関係を推算によって求める研究の一つとして，大気圧下でイソプロピルアルコール-水-イソプロピルエーテル系と，この系を構成する三つの2成分系の気液平衡を測定した。推算は Kogan と Margules の方法で試みたところ，実測値とよく一致した。この系はイソプロピルエーテルをエンツレーナとし，共沸蒸留によって純粋なイソプロピルアルコールを製造する場合に必要である。

ガス系流動層における気泡による粒子の運動（桐栄良三・松野隆一・長井良昭，化学工学，31，457～463（1967））

二次元流動層に吹込んだ単一気泡によって粒子がどのように動くか調べ，気泡が層内に完全に通過した後を示される drift line を一般的な一つの曲線として求めた。この結果は粒子の運動が完全流体中で気泡（円柱あるいは球）が動く場合の完全流体の運動におきかえられとし，さらに気泡中心より下方，気泡半径の約2倍の所に仮想の壁があってそれが気泡と同一の速度で気泡と共に上昇するというモデルによってかなりよく説明できた。

湿った粒子層における液状水移動の径路係数（大谷茂盛・前田四郎，化学工学，31，469～473（1967））

湿った粒子層における液状水移動の径路係数を前報（化学工学，28，362（1964））でみちびいた理論式における総括の補正項， $1/\alpha$ ，として定義し，その物理的意味を説明した。この径路係数を求めるための装置を試作し，測定を行なった結果， $1/\alpha$ は層内間隙の屈曲による許りではなく，粒子表面と水との結合力によっても影響を受け，したがって，径路係数は粒子層の種類や含水率によって変わることがわかった。

蒸発冷却器に関する実験的研究（水科篤郎・伊藤竜象・宮下 尚，化学工学，31，469～473（1967））

本研究は蒸発冷却器の設計を目的としておこなわれたものである。蒸発冷却器の各移動係数，すなわちプロセス流体-冷却管内流体間の伝熱係数： h_{L1} ，冷却管外壁-冷却水間の伝熱係数： h_{w1} ，冷却水-空気流間の総括物質移動容量係数 h_{oga} をそれぞれ実験的に求め，それらに關与する各操作因子の影響を示す実験式を得た。

水和物の脱水と造粒の同時操作について（吉田哲夫・田田浩次・山崎尉二，化学工学，31，474～478（1967））

造粒にみられる従来の研究は，おもに乾燥した粉体を原料とし，これに水，または溶液を添加して行なう造粒操作に関するものであるが，本報では，結晶水をもつ水化物を原料とし，これに加熱操作を加えることによって，融出する自己のもつ結晶水を結合媒体として造粒操作を行なうものであり，しかも造粒，乾燥の両操作を一つの装置で，連続的に行ない，操作条件，ならびにそれら条件の造粒物に及ぼす影響を考察した。

回転乾燥機内の保有率（篠原 久・広末英晴・嵩 鎮雄・明本精治・長田島一，化学工学，31，478～484（1967））

回転乾燥機内における材料の平均通過時間はその設計，および，操作上重要な因子である。そこで，これと関係の深い無風時および通風時の保有率について研究した。まず，機内における単一球形粒子の運動を解析し，さらに，振上板の形および数を考慮にいれた發生容量を定義した。ついで，無風時および通風時保有率の次元解析式を導き，各式の係数と指数とを実験により求めた。これらによれば既往の文献値をもおおよそ整理できる。

触媒内の有効拡散係数について（若尾法昭，舟木俊彦，化学工学，31，485～491（1967）） 本研究は反応系での触媒内有効拡散係数（ D_e^R ）と非反応の物理拡散係数での有効拡散係数（ D_e^D ）との本質的な相異について検討したものである。触媒が広い細孔分布を有するとき，反応系で有効な平均細孔半径より，非反応系のそれのほうが圧倒的に大きいことを明らかにし，また， $D_e^R < D_e^D$ なること，および細孔分布が分っているとき D_e^R ， D_e^D の推算法を提案し，また有効拡散係数の推算値と実測値との比較を示した。

イオン交換における液相拡散に関する解析——等価交換の場合——（片岡 健・前田尚利・佐藤真士・上山恒恒，化学工学，31，491～497（1967））

等価イオン交換における液相拡散を shallow bed あるいは single particle bed で行なった場合について，Nernst-Planck の式を用いて解析した。交換速度は電場の影響を受け，その影響の仕方は拡散係数比，平衡恒数に依って変化した。さらに非対イオンと対イオンの価数比の影響を明らかにした。

多孔板抽出段上の連続相流体の混合特性（城塚 正・村上昭彦，化学工学，31，497～504（1967））

段長30cmの多孔板抽出段上の連続相流体の混合特性をパルステスト法により解析した。指数関数を用いて変形した入出力パルスの平均，分散を用いて完全混合で1，ビストン流で0となる新しい混合度を定義した。この混合度を用いて解析した結果，実験条件の範囲内では混合特性に最も大きな影響を与えるのは二相分離界面高 H_0 であり，また分散相流量の大きいほどおよび連続相流量の小さいほど混合度が大きいことを明らかにし， $H_0=10\text{cm}$ のとき拡散モデルで近似できることを示した。

静電容量による粉体流量の測定（中島裕夫・後藤圭司・田中達夫，化学工学，31，504～507（1967））

粉体プロセスを自動化するためには粉体の瞬間流量を測定することがしばしば必要となる。従来この問題に関して2，3の方法が提案されているが本質的に改良すべき点がいくつか残されている。そこで本報では新しく静電容量によって粉体の瞬間流量を測定するための装置を試作し，その静特性を検討した。その結果本実験装置は装置の寸法並びに粉体の誘電率がわかれれば，粉体の物性の違いによる面倒な検定なしに，微小流量においてもかなり精度よく瞬間流量を測定できることがわかった。

瞬間的な局所物質移動速度の測定法（平田 彰・城塚 正，化学工学，31，507～508（1967））

相変化に基づくエネルギー遷移を利用して，局所的位置における瞬時の物質移動速度の測定手法を考案した。平板上の層流境界層における物質移動速度を本法により測定した結果，既往研究結果と非常によく一致した。本測定手法は今後，定常現象は勿論，非定常現象の解析にも有効な手段として適用できるものと考えられる。

実験データの数値微分について（日崎 司，化学工学，31，509～511（1967））

Spline 関数は数値微分にきわめて正確で有効な方法であり熱，物質の移動速度，あるいは化学反応速度の算出などに広く応用できる。

乳化重合系の無次元モデル化について（李 秀逸・豊岡 豊・井本立也，化学工学，31，511～512（1967））

Harkins の考え方をもとにして，活性粒子の定常仮定が重合初期より仮定できるものとして，乳化重合系の無次元化モデルを作った。ここで新しく定義した無次元パラメータは，瞬時数平均重合度の1/2に相当し，これを用いると，筆者らが先に提案した均一重合系の“モデル”と形式的に一致する。