攪拌槽における粉粒体の混合*

東 稔 節 治**・大 竹 伝 雄**

大阪大学基礎工学部 化学工学科

1. 緒 言

これまで攪拌槽における粒子層の混合特性ならびに熱移動特性について二、三の結果を報告した^{2,4)}。このとき羽根形状として櫛形一段羽根を用いたとき、層内の粒子混合ならびに熱移動機構は一様として解析され^{2,3)}、櫛形多段羽根を用いたとき、層内の熱移動機構は羽根挿入部分 (I) と羽根-槽壁間部分 (II) とで異なるものとして解析された⁴⁾。このことは、一段羽根では羽根挿入部分 (I) の粒子層は羽根翼全体で押し出されて混合されるために、粒子混合機構が層内で一様となるが、多段羽根では羽根翼間隙の粒子層は翼部分で十分に混合されないために、粒子混合機構が羽根挿入部分 (I) と羽根-槽壁間部分 (II) にて異なるものと考えられる。

本研究は羽根形状として翼間隙を主に变化させたときの粒子層の混合特性について考察し、翼間隙のない一段羽根と翼間隙の存在する多段羽根による混合機構の相互関係を説明することを目的とする。前報²⁾と同様混合過程を拡散過程に類似とし、粒子層を部分 (I) と部分 (II) とに分けて混合機構を解析し、二種粉粒体の実測濃度分布から混合係数を算出した。得られた混合係数と操作因子との関係を整理したが、一段羽根と多段羽根の相互関係が翼間隙部分の大きさを考慮することによって求められた。

2. 混 合 理 論

2-1 基礎式と解式

粒子層における攪拌時の混合過程を前報²⁾と同様に拡散過程に類似とし、層内の羽根挿入部と羽根-槽壁間部において混合機構が異なるものとして、Fig. 1 に示すごとくそれぞれを部分 (I)、部分 (II) と区別する。部分 (I)、部分 (II) における混合係数および着目粒子濃度をそれぞれ D_1, D_2 および C_1, C_2 とする。軸方向混合が無視できるとすれば、部分 (I)、部分 (II) の微小厚さ dr における物質収支から次の基礎式をえる。

$$0 \leq r \leq R_f \text{ にて, } D_1 \left(\frac{\partial^2 C_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C_1}{\partial r} \right) = \frac{\partial C_1}{\partial \theta} \quad (1)$$

$$R_f \leq r \leq R_0 \text{ にて, } D_2 \left(\frac{\partial^2 C_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C_2}{\partial r} \right) = \frac{\partial C_2}{\partial \theta} \quad (2)$$

ここに R_f, R_0 は部分 (I) の層半径、攪拌槽半径とする。

次の初期、境界条件、すなわち：

i) 時間 $\theta=0$ において着目粒子が初濃度 C_0 一定で半径 R_i まで装入されるとして、装入半径 R_i が部分 (I) の半径 R_f よりも小さいとき

$$0 \leq r < R_i \text{ にて, } C_1 = C_0, \quad R_i \leq r < R_f \text{ にて, } C_1 = 0 \quad (3)$$

$$R_f \leq r \leq R_0 \text{ にて, } C_2 = C_0 \quad (4)$$

ii) 中心軸 $r=0$ にて対称性から $\partial C_1 / \partial r = 0$ (5)

iii) 壁部 $r=R_0$ にては物質移動がないとして

$$\partial C_2 / \partial r = 0 \quad (6)$$

iv) 部分 (I) と部分 (II) との境界面 $r=R_f$ にて物質移動速度が等しいことから

$$C_1 = C_2, \quad D_1 \frac{\partial C_1}{\partial r} = D_2 \frac{\partial C_2}{\partial r} \quad (7)$$

v) 混合時間が無限大 $\theta=\infty$ にて濃度が層内均一となり、装入時の見かけ平均濃度 C_m になるとすれば

$$C_1 = C_2 = C_m \quad (8)$$

のもとで (1), (2) 両式をラプラス変換の方法¹⁾で解けば、濃度分布の解式として次の (9), (10) 両式をえる。

$$\frac{C_1 - C_m}{C_0} =$$

Fig. 1 Model for setting up the basic equation for the mixing process

* <Mixing of Granular Solids in the Cylindrical Tank with Paddle Agitators>
Received on September 30, 1965

化学工学協会・姫路大会 (昭和 37 年 9 月) において一部発表

** Setsuji Tone, Tautao Otake (Dept. of Chem. Eng., Faculty of Eng. Science, Osaka Univ., Toyonaka, Japan)

$$-\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sigma_n^2}{\sigma_n^2[(\alpha_{2n}/\alpha_{1n})^2-1] \cdot J_1^2(\alpha_{1n}\rho_j)-1} e^{-\alpha_{1n}^2 y_{e1}} \quad (9)$$

$$\frac{C_2-C_m}{C_0} =$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sigma_n \alpha_{2n} \rho_i \cdot J_1(\alpha_{1n}\rho_i) [Y_1(\alpha_{2n}) \cdot J_0(\alpha_{2n}\rho) - J_1(\alpha_{2n}) \cdot Y_0(\alpha_{2n}\rho)]}{\sigma_n^2[(\alpha_{2n}/\alpha_{1n})^2-1] \cdot J_1^2(\alpha_{1n}\rho_j)-1} e^{-\alpha_{2n}^2 y_{e2}} \quad (10)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} \rho &= r/R_0, \quad \rho_i = R_i/R_0, \quad \rho_j = R_j/R_0, \\ y_{e1} &= D_1\theta/R_0^2, \quad y_{e2} = D_2\theta/R_0^2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

であり

$$\sigma_n = \frac{J_1(\alpha_{2n})}{J_0(\alpha_{1n}\rho_j) \cdot J_1(\alpha_{2n}\rho_j) - (\alpha_{2n}/\alpha_{1n}) J_1(\alpha_{1n}\rho_j) \cdot J_0(\alpha_{2n}\rho_j)}$$

Fig. 2 The relationship between the first eigenvalues α_{11} and α_{21} calculated from Eq. (13)

Fig. 3 The graphical evaluation method of apparent diffusivities D_1 and D_2

$$= \frac{Y_1(\alpha_{2n})}{J_0(\alpha_{1n}\rho_j) \cdot Y_1(\alpha_{2n}\rho_j) - (\alpha_{2n}/\alpha_{1n}) \cdot J_1(\alpha_{1n}\rho_j) \cdot Y_0(\alpha_{2n}\rho_j)} \quad (12)$$

根 α_{1n} , α_{2n} は次式で与えられる。

$$\frac{\alpha_{1n} J_0(\alpha_{1n}\rho_j)}{J_1(\alpha_{1n}\rho_j)} = \frac{\alpha_{2n} [Y_0(\alpha_{2n}\rho_j) \cdot J_1(\alpha_{2n}) - Y_1(\alpha_{2n}) \cdot J_0(\alpha_{2n}\rho_j)]}{J_1(\alpha_{2n}) \cdot Y_1(\alpha_{2n}\rho_j) - J_1(\alpha_{2n}\rho_j) \cdot Y_1(\alpha_{2n})} \quad (13)$$

(13) 式において $n=1$, すなわち第 1 根 α_{11} , α_{21} を数値計算で求め、部分 (I) の半径比 $\rho_j = R_j/R_0$ をパラメータにして示すと Fig. 2 のごとくである。

解式 (9), (10) において、層内一様な混合機構とするとき、すなわち $D_1 = D_2$ のとき、Appendix に示されるように前報の楕円一段羽根を用いたときの解式²⁾と一致し、 $D_1 = \infty$, $D_2 = D$ とすれば、部分 (I) の濃度分布が均一として基礎式 (1), (2) から導出した解式と一致する。

2.2 混合係数の算出法

羽根挿入部 (I) の濃度分布式 (9) は $y_{e1} > 0.1$ になれば第一項に比し第二項以下が無視でき、 $\phi_{e1} = (C_1 - C_m)/C_0$ において両辺の対数をとれば (14) 式をえる。

$$\ln \phi_{e1} = \ln \zeta_1 \cdot J_0(\alpha_{11}\rho) - \frac{\alpha_{11} D_1}{R_0^2} \cdot \theta \quad (14)$$

ここに

$$\zeta_1 = -2\sigma_1^2 \cdot \rho_j J_1(\alpha_{11}\rho_i) / \rho_j^2 \cdot \alpha_{11} \{ \sigma_1^2 [(\alpha_{21}/\alpha_{11})^2 - 1] \cdot J_1^2(\alpha_{11}\rho_j) - 1 \} \quad (15)$$

実測濃度から ϕ_{e1} を求め時間 θ に対して片対数紙上に点綴し、 $\ln \phi_{e1}$ 対 θ が直線で近似できる範囲において、Fig. 3 に示すように半径比 $\rho = \rho_1$, $\rho = \rho_2$ にて漸近線をひき、 ϕ_{e1} 軸との交点をそれぞれ λ_1 , λ_2 とする。いま $\rho_1 = 0$, すなわち中心軸として $\lambda_0 = \lambda_2/\lambda_1$ とすれば

$$J_0(\alpha_{11}\rho_2) = \lambda_0 \quad (16)$$

を得、(16) 式から根 α_{11} が求まる。一方漸近線の勾配から $\alpha_{11}^2 D_1/R_0^2$ が求まり、これから混合係数 D_1 が算出できる。

根 α_{21} は根 α_{11} と ρ_j の値を用いて Fig. 2 から求め、部分 (II) の混合係数 D_2 は解式をえるときの条件として与えられる次の関係式

$$\alpha_{11}^2 D_1 = \alpha_{21}^2 D_2 \quad (17)$$

に根 α_{11} , α_{21} の値とさきの D_1 の値を代入することによって算出できる。

3. 実験装置と操作

攪拌槽は前報²⁾と同形式のもので、槽径を変化させるために四種類の円筒槽を採用した。羽根は、先に攪拌槽の熱移動実験に使用されたものと同一形式⁴⁾で、楕円形

段羽根 A 型 (45° 斜翼), B 型 (直角翼) および 櫛形一段羽根 C 型を用いた。粉粒体として豊浦砂-食塩系, 豊浦砂-重クロム酸カリウム系を採用し, 使用前に所定の粒度範囲に篩分けたが, その物性値を Table 1 に示した。着目粒子に食塩, 重クロム酸カリウムを採用した。

操作として前報²⁾に準じて着目粒子を撹拌槽の中心軸に同心円筒状に半径 R_i となるように装入し, その周囲に砂を装入して羽根を回転させて粒子層を混合した。その後一定時間ごとに羽根回転を停止し, 半径方向に 4~5 点試料を採取した。各試料を秤量後試料中の着目粉体の量を滴定分析法*により求め, 濃度を重量分率であたえた。このようにして各時間に対する半径方向濃度分布を求めた。試料採取量は 160mg 前後であり, 採取量による影きは小さいとして無視した。なお混合の操作条件の範囲を Table 2 に示した。

Table 1 Physical properties of solid particles used

a) Toyoura sand-Sodium chloride system

Tyler mesh	D_p [mm]	Yoyoura sand ρ_s [g/cc]	Sodium chloride ρ_b [g/cc]	ρ_s [g/cc]	ρ_b [g/cc]
20-32	0.664	2.61	1.39	2.16	1.19
32-42	0.423	2.61	1.38	2.16	1.17
42-60	0.298	2.61	1.40	2.16	1.11
60-80	0.211	2.61	1.41	2.16	1.11

b) Toyoura sand-Potassium bichromate system

Tyler mesh	D_p [mm]	Yoyoura sand ρ_s [g/cc]	Potassium bichromate ρ_b [g/cc]	ρ_s [g/cc]	ρ_b [g/cc]
20-32	0.664	2.61	1.39	2.64	1.32
32-42	0.423	2.61	1.38	2.64	1.30
42-60	0.298	2.61	1.40	2.64	1.29
60-80	0.211	2.61	1.41	2.64	1.26

Table 2 Various factors in experimental condition

Tank diameter $D_T=25, 12, 10, 8$ cm
 Single paddle impeller, type C (flat blade):
 Diameter of impeller $D_i=4, 8, 12, 16$ cm
 Length of impeller $L_i=10-26$ cm
 Multiple paddle impellers, types A (45° pitched blade) and B (flat blade):
 Diameter of impeller $D_i=8, 12, 14, 16, 18$ cm
 Width of blade $W_i=1, 1.8, 2.5$ cm
 Distance between blades $H_i=4$ cm
 Rotational speed $N=7-60$ r.p.m.
 Radius of marked solid particles charged $R_i=1-8$ cm

* 食塩は 0.05N 硝酸銀水溶液で過マンガン酸カリ水溶液を指示薬として滴定し, 重クロム酸カリウムは 0.03N チオ硫酸ナトリウム水溶液で塩酸酸性としてデンプンを指示薬として用い, 沃化カリウムを過剰に加えて滴定した。

4. 実験結果

槽径を変化させたとき, 櫛形一段羽根による実測濃度分布は中心軸に対して左右対称の形となり, 前報と同様に層内で混合係数が一定として取り扱えた。櫛形多段羽根による実測濃度分布について図示すると, 着目粒子の装入半径 R_i が羽根半径 R_j よりも小さい場合が Fig. 4-A であり, $R_i=R_j$ の場合には Fig. 4-B となる。Fig. 4-A に従えば, 混合時間がある程度経過しても羽根挿入部 (I) における濃度分布は相当あり, 混合時間が長くなるに従い, 部分 (I) の濃度分布は羽根-槽壁間部分 (II) における濃度分布に比較してやや平坦とはなるが, 部分 (I) では濃度分布が存在するものとして取り扱い

Fig. 4 The observed concentration profiles by use of multiple impellers (type A and B)

うる。このことは Fig. 4-B においても同様にみとめられ、層内の混合係数を部分 (I)、部分 (II) とに区別して求めることができる。

実測濃度分布から 2・2 に記述した算出法に従い、部分 (I) ならびに部分 (II) における混合係数 D_1 , D_2 を算出し、その代表値を Table 3 に示した。なお櫛形一段羽根においては $D_1=D_2$ としてとり扱え、多段羽根においては A 型 (45° 斜翼) についてえられた混合係数はその羽根翼の正射影幅に等しい B 型 (直角翼) についてえられた混合係数の値にほぼ近いことが確かめられた。

5. 整 理

前報³⁾ において固定層の理論を拡張して、混合係数が羽根径 D_i 、回転速度 N について次式で表示できた。

$$D = \alpha_m \cdot D_i^2 N \quad (18)$$

ここに α_m : 比例係数

(18) 式は層内の混合が一樣として解析できる一段羽根の混合係数に対して適用できた。層内の混合機構が部分 (I)、部分 (II) にてことなる多段羽根の混合係数へ (18) 式を拡張して適用しえるものとすれば次の関係

Fig. 5 $D/D_i^2 N$ vs. D_p/D_T (by type C of single impeller)

式をえる。

$$D_1 = \alpha_{m1} \cdot D_i^2 N, \quad D_2 = \alpha_{m2} \cdot D_i^2 N \quad (19)$$

ここに α_{m1} , α_{m2} : 比例係数

いま $\phi_1 = \alpha_{m1}/\alpha_m$, $\phi_2 = \alpha_{m2}/\alpha_m$ なる係数を導入すれば、(19) 式から

$$D_1 = \phi_1 \cdot D, \quad D_2 = \phi_2 \cdot D \quad (20)$$

ここに ϕ_1 , ϕ_2 は羽根翼間隙の影響を含む係数であり、一段羽根の混合係数に対する多段羽根の混合係数の比を意味しており、一段羽根のとき $\phi_1 = \phi_2 = 1$ となる。

一段羽根について、前報²⁾ でえた混合係数の値と本実験によってえられた値とをあわせて、 $\alpha_m = D/D_i^2 N$ と D_p/D_T をプロットすれば、Fig. 5 となり、結果として次式で整理できた。

$$D = 2.80 \times 10^{-2} \cdot (D_p/D_T)^{1/2} \cdot D_i^2 N \quad (21)$$

多段羽根については、求めた混合係数 D_1 , D_2 と (21) 式から計算した D の値を (20) 式へ入れて、それぞれ係数 ϕ_1 , ϕ_2 を算出した。 ϕ_1 , ϕ_2 には操作因子として翼幅 W_i 、羽根段間隔 H_i 、羽根径 D_i および槽径 D_T の大きさが関係し、翼間隙の大きさを考慮する無次元項 $(H_i - W_i)/W_i$ と槽径に対する羽根径比 D_i/D_T によって整理しえるものと考え、 ϕ_1 , ϕ_2 について $(H_i - W_i)/W_i$ および D_i/D_T との関係それぞれ Fig. 6, Fig. 7 にプロットした。これらの結果から、次式をえた。

$$\left. \begin{aligned} \log \frac{1}{\phi_1} &= 0.36 \left(\frac{H_i}{W_i} - 1 \right)^{1/5} \cdot \left(\frac{D_i}{D_T} \right)^{1/4} \\ \log \frac{1}{\phi_2} &= 0.90 \left(\frac{H_i}{W_i} - 1 \right)^{1/5} \cdot \left(\frac{D_i}{D_T} \right)^{1/4} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

以上の結果を合わせれば、一段羽根ならびに多段羽根の混合係数は次式で表示できる。

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= 2.80 \times 10^{-2} \cdot (D_p/D_T)^{1/2} \cdot \phi_1 \cdot D_i^2 N \\ D_2 &= 2.80 \times 10^{-2} \cdot (D_p/D_T)^{1/2} \cdot \phi_2 \cdot D_i^2 N \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

ここに $H_i = W_i$ のとき一段羽根としてとり扱え、 $D_1 = D_2 = D$ となる。

(23) 式から操作条件に対する D_1 , D_2 を算出し、(9)、(10) 両式に代入して計算した濃度分布と実測値とを比較すると、Fig. 4-A, Fig. 4-B に示されるように一致

Table 3 Typical values of the evaluated apparent diffusivities

Run	impeller type	D_p [mm]	D_T [cm]	D_i [cm]	R_i [cm]	W_i [cm]	H_i [cm]	N [r.p.m.]	D_1 [cm ² /min]	D_2 [cm ² /min]
243	A	0.423	25	16	5	1.8	4	13	3.12	0.758
245	A	0.664	25	16	5	1.8	4	25	5.30	1.60
249	A	0.423	25	16	8	1	4	25	4.33	1.18
250	A	0.664	25	16	8	1	4	7	1.80	0.326
261	B	0.664	25	18	5	1.8	4	7	1.85	0.343
263	B	0.423	25	18	5	1.8	4	7	1.65	0.252
271	C	0.423	12	4.2	2.5	—	—	25	0.974	0.974
272	C	0.423	10	4.2	2.5	—	—	25	0.965	0.965
274	C	0.423	8	4.2	1.0	—	—	25	0.940	0.940
278	C	0.295	10	10	2.5	—	—	20	1.58	1.58
279	C	0.211	10	10	2.5	—	—	32	2.35	2.35

は良好であり、(23) 式が実験式として適用できる。

6. 考 察

粒子層の混合過程において櫛形一段羽根を用いるとき、混合係数は層内で一定となり、多段羽根を用いるときには、羽根挿入部分 (I) と羽根-槽壁間部分 (II) における混合係数が異なるものとしてとり扱えた。このことについて考察するために、Fig. 8 に示されるモデルを適用する。櫛形多段羽根による混合において、部分 (I) で羽根翼に直接当たる部分の粒子は半径方向に平均移動速度 v_p で押し出されるが、羽根翼間隙部分では粒子は主に円周方向に移動し、一部分の粒子が半径方向に円周方向の速度 v_{c1} に比例する速度で押し出されるものと考えられる。一方部分 (II) においては、部分 (I) から押し出される速度 v_p とともに部分 (I) の円周速度 v_{c1} によって部分 (II) に惹起される円周速度 v_{c2} に比例する速度によって混合が行なわれると考える。部分 (I)、部分 (II) における、見かけの半径方向平均移動速度 v_{r1} 、 v_{r2} はそれぞれ、次式で表示しえる。

$$\left. \begin{aligned} v_{r1} &= (W_i/H_i) \cdot v_p + (W_i/H_i - 1) \kappa_1 \cdot v_{c1} \\ v_{r2} &= (W_i/H_i) \cdot v_p + (W_i/H_i - 1) \kappa_2 \cdot v_{c2} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

ここに κ_1 、 κ_2 ：比例係数

いま部分 (I)、部分 (II) における粒子の平均拡散距離 l_1 、 l_2 とし、粒子の平均拡散時間 θ_f が部分 (I)、部分 (II) において等しいと考えると、次式が成立する。

$$\theta_f = l_1/v_{r1} = l_2/v_{r2} \quad (25)$$

一段羽根においては、 $H_i = W_i$ となるから (24) 式にて $v_{r1} = v_{r2} = v_p$ となり、一方 (25) 式から $l_1 = l_2 = l_p$ となる。これから混合係数は $D_1 = D_2 = D$ とおくことができ*、層内の混合機構が一樣として取り扱える。

多段羽根では (24) 式において常に $v_{c1} < v_{c2}$ と考えられるから、部分 (I) の混合係数は部分 (II) の混合係数よりも大きくなり、部分 (I) と部分 (II) とでは混合機構が異なるものと考えられる。

7. 結 言

攪拌槽において櫛形一段羽根および多段羽根を用いて粒子層の混合を行ない、混合過程を拡散過程に類似として、二種粉粒体の実測濃度分布から混合係数を算出した。羽根形状として櫛形一段羽根を用いたとき、混合係数は層内一樣として解析でき、櫛形多段羽根を用いたとき

* 前報⁷⁾でとり扱ったように、混合係数 D は Random Walk Theory に従って $D = \frac{1}{2} \cdot l_p v_p$ となる。ここに l_p ：粒子の平均拡散距離、 v_p ：粒子の平均拡散速度。

Fig. 6 $\log 1/\phi_1$ and $\log 1/\phi_2$ vs. $(H_i - W_i)/W_i$

Fig. 7 $\frac{\log 1/\phi_1}{((H_i - W_i)/W_i)^{1/5}}$ and $\frac{\log 1/\phi_2}{((H_i - W_i)/W_i)^{1/5}}$ vs. D_i/D_T

Fig. 8 Model for mean velocity of diffusing particles caused by mixing

には、混合係数は羽根挿入部 (I) と羽根-槽壁部 (II) にて異なるものとしてとり扱えた。算出した混合係数について操作因子として翼間隙の大きさを考慮した無次元項を導入して、一段羽根ならびに多段羽根ともに適用しえる実験式として (22) 式、(23) 式をえた。

Appendix

1. 層内の混合係数が一定で、 $D_1=D_2=D$ のときの濃度分布式

このとき (12) 式において

$$\alpha_{1n}=\alpha_{2n}=\alpha_n, \quad \sigma_n=\rho_j/J_0(\alpha_n) \quad (\text{a-1})$$

となり、濃度分布式 (9), (10) は次式となる。

$$\frac{C_1-C_m}{C_0} = \frac{C_2-C_m}{C_0} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\rho_j \cdot J_1(\alpha_n \rho_j)}{\alpha_n \cdot J_0^2(\alpha_n)} \cdot J_0(\alpha_n \rho) \cdot e^{-\alpha_n^2 \frac{D\theta}{R_0^2}} \quad (\text{a-2})$$

ここに根 α_n は (13) 式から導かれる次式から求まる。

$$J_1(\alpha_n)=0 \quad (\text{a-3})$$

(a-2) 式は前報の解式²⁾と一致する。

2. 部分 (I) の混合係数が無限大、すなわち $D_1=\infty$ のときの濃度分布式

このとき (12) 式において

$$\alpha_{1n}=0, \quad \alpha_{2n}=\alpha_n, \quad D_2=D \quad \left. \begin{aligned} \xi_n &= \frac{\sigma_n \alpha_n \rho_j}{2} = \frac{J_1(\alpha_n)}{(2/\rho_j \alpha_n) \cdot J_1(\alpha_n \rho_j) - J_0(\alpha_n \rho_j)} \end{aligned} \right\} \quad (\text{a-4})$$

となり、濃度分布式 (9), (10) は次式となる。

$$\frac{C_1-C_m}{C_0} = - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\rho_i}{\rho_j} \right)^2 \cdot \frac{4 \xi_n^2}{(\alpha_n \rho_j)^2 (\xi_n^2 - 1)} \cdot e^{-\alpha_n^2 D \theta / R_0^2} \quad (\text{a-5})$$

$$\frac{C_2-C_m}{C_0} = \pi \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\rho_i}{\rho_j} \right)^2 \cdot \frac{\xi_n [Y_1(\alpha_n) \cdot J_0(\alpha_n \rho) - J_1(\alpha_n) \cdot Y_0(\alpha_n \rho)]}{\xi_n^2 - 1} \cdot e^{-\alpha_n^2 D \theta / R_0^2} \quad (\text{a-6})$$

ここに根 α_n は (13) 式から導かれる次式により求まる。

$$\frac{J_1(\alpha_n)}{Y_1(\alpha_n \rho_j) - (\alpha_n \rho_j / 2) \cdot Y_0(\alpha_n \rho_j)} = \frac{Y_1(\alpha_n)}{J_1(\alpha_n \rho_j) - (\alpha_n \rho_j / 2) \cdot J_0(\alpha_n \rho_j)} \quad (\text{a-7})$$

(a-5), (a-6) 式は基礎式 (1), (2) において $D_1=\infty$ として解いた解式と一致する。

Nomenclature

C : concentration of marked solid particles in the mixture [wt. %]
 C_m : concentration of marked solid particles in the mixture at the perfectly mixed state [wt. %]
 C_0 : initial concentration of marked solid particles [wt. %]
 D : apparent diffusivity [m^2/hr]
 D_1 : apparent diffusivity in section I within the bed [m^2/hr]
 D_2 : apparent diffusivity in section II within the bed [m^2/hr]
 D_i : diameter of impeller [m]
 D_p : representative diameter of solid particles [m]
 D_T : diameter of tank [m]
 H_i : distance between blades of impeller [m]
 J_0 : zeroth-order Bessel function of the first kind [—]
 J_1 : first-order Bessel function of the first kind [—]
 N : rotational speed of impeller [r.p.hr]

r : radial distance [m]
 R_i : radius of marked solid particles charged [m]
 R_j : radius of impeller [m]
 R_0 : radius of tank [m]
 v_r : mean velocity of diffusing particles caused by mixing [m/hr]
 W_i : width of impeller [m]
 Y_0 : zeroth-order Bessel function of the second kind [—]
 Y_1 : first-order Bessel function of the second kind [—]
 α_1, α_2 : eigenvalues defined by Eq. (13) [—]
 ρ : radial distance-to-tank radius ratio [—]
 ρ_i : radius of marked solid particles charged-to-tank radius ratio [—]
 ρ_j : impeller radius-to-tank radius ratio [—]
 ρ_s : apparent density of solid particle [kg/m^3]
 ρ_s : true density of solid particles [kg/m^3]
 θ : time [hr]

Literature cited

- 1) Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger: "Conduction of Heat in Solids," Second Edition, p. 368, Oxford (1959)
- 2) Otake, T., H. Kitaoka and S. Tone: *Chem. Eng. (Japan)*, 25, 178 (1961)
- 3) Otake, T. and S. Tone: *Chem. Eng. (Japan)*, 25, 56 (1961)
- 4) Shimizu, T., S. Tone and T. Otake: *Chem. Eng. (Japan)*, 25, 885 (1961)

棚段塔の液側物質移動係数について（浅野康一・藤田重文，化学工学，30，403～408（1966）） 多孔板塔および泡鐘塔における液側物質移動抵抗の実測値と，すでに著者らがそれぞれの塔について求めておいた接触面積に関する一般の相関とから，液側物質移動係数を算出し，その一般的な関係を求めた。この関係を液側移動単位数に換算し，既往の結果と比較したところ，これら既往の結果と良い一致を示すのみならず，はるかに広範囲において適用できることを知った。

乱流域の搅拌槽自由表面におけるガス吸収について（片岡広・宮内照勝・化学工学，30，409～414（1966）） ガス吸収の真の機構を解明するため，大きさの異なる搅拌槽を用い乱流域の自由液表面からのガス吸収速度について実験的に研究した。液境膜容量係数は蒸留水中への純炭酸ガスの物理吸収から求めた。自由表面の接触面積は一次反応を伴う吸収によって求め，液側物質移動係数を算出した。実験データは次式により良く相関された。

$$(k_L D_i / D_L) = 0.0303 (D_i^3 n \rho / \mu)^{1/3} (\mu / \rho D_L)^{1/3} (D_i^3 n^2 / \rho g)^{1/3}$$

この半実験式は，Levich の理論に搅拌槽の乱流域における流体力学的性質を導入して修正した式である。乱流域の搅拌槽自由表面からのガス吸収の実験結果は Levich の理論によって説明することができた。

スリットバーナーを用いるナフサ熱分解装置の研究（橋本亮輔・福島平次・国井大蔵，化学工学，30，415～421（1966）） サンドイッチ状スリットバーナーをナフサ熱分解装置に応用し，バーナーの安定性，利点および熱分解生成物分布について実験を行なった。バーナー表面温度 500～700°C，ガス噴出速度 3～10 m/sec にて安定した燃焼が確かめられ，又反応室温度抑制のための水蒸気量が少なくてすみ，反応室内の熱量の節減すなわち熱供給量の節減が可能である。アセチレン，エチレン収率は，工業装置よりも無損失の大きい実験装置で 30～47% が得られた。

水平曲線流路内気流中における固体粒子の運動状態（高方郎・菅沼彰，化学工学，30，424～426（1966）） 曲線流路内で遠心力を受けて沈降する粒子は流路外周壁で不規則に反弾した後遠心力に逆って飛行し，その一部は再び流路内周壁に衝突する。この場合の内周壁衝突率は前報で提案した無次元数 S に遠心力効果を加えた無次元流路寸法，

$$S(R, Y) = (1/K_1) \exp(K_2 Y / R) (18 \mu Y / D_p^2 \rho_s V)$$

で整理できる。この関係は風力分級器や分離器の粗粒除去率と装置寸法との関係を解明する端緒になると思う。

流通式回転円筒内の粒子の挙動——二成分粒子混合物の分離と排出速度の変動——（杉本益規・遠藤一夫・田中彦夫，30，427～432（1966）） 流通式回転円筒を通過する異径二成分粒子混合物の排出速度の変動の算出を試みた。大小粒子間の分離帯は次の 2 条件下で形成されると仮定した。1) 小粒子の大きさが大粒子群の 1 空隙孔の大きさよりも小さく，2) 小粒子の全容積が大粒子群の全空隙容積よりも大なる時。混合された粒子（川砂でその粒径比は 0.45, 0.32, 0.22）は円筒内へ連続供給され，出口で排出速度変動を測定した。その結果は球形粒子の六方系粗充填の際の臨界混合比 0.147，臨界粒径比 0.528 を用いて算出した結果とよく一致した。

粒子層の重力脱水過程における膜流れ（山口賢治・井上一郎，化学工学，30，433～438（1966）） 膜流れ率速の重力脱水過程における含液率の時間的な変化について，無次元変数による関係を導き，ガラス球および硅砂を用いた実験によってこれを確かめた。次に，この関係を拡張して層内の膜流れ域内に存在する液量を表わす関係を求め，これを用いた解析の結果が毛管流れ率速の領域でも適用できることを確かめた。

搅拌槽における粉粒体の混合（東稔節治・大竹伝雄，化学工学，30，439～444（1966）） 3 つの形式の攪拌羽根，すなわち，A, B, C 型を用いて，あらたに混合実験をおこなった。二組の固体粒子，すなわち豊浦砂-塩塩（20～80 メッシュ），豊浦砂-重クロム酸カリウム（20～80 メッシュ）について粉粒体の濃度分布を測定した。

混合機構について解析するため，層を二つの部分に分け，基礎微分式を式 (1), (2) としてたてた。積分して，粒子濃度分布の解式を式 (9), (10) としてえた。これを用いて，実測濃度分布から混合係数を算出した。この値と先にえた値とを合せて操作因子との関係を整理し，部分 (I) および (II) の混合係数に対する関係式 (22), (23) をえた。式 (22), (23) と組合せて式 (9), (10) から計算した濃度分布は Fig. 4-A, 4-B に示すごとく，実測値と良好な一致にある。

タービン型搅拌羽根の消費動力に対する邪電板の影響（竹田邦彦・星野照彦，化学工学，30，445～450（1966）） 前報に引続いて，バツフルの形状と消費動力の関係を実験的にしらべ，(1) バツフルの幅の変化にともなう，消費動力および吐出流量の変化を比較した結果，動力消費が吐出流量に関連をもつことをたしかめ，また消費動力とバツフルの幅の変化を関連づけた。(2) バツフルと壁面のすき間によって消費動力が減少すること，および(3) 二次循環流路の抵抗の増加により消費動力が減少することをたしかめ，前報の推論を裏付けた。

液々向流型充填層における分散相の離合集散（駒沢勲・久谷真一・樺田栄一・大竹伝雄，化学工学，30，450～451（1966）） 液々向流型充填層における分散相としての個々の液滴の濃度を測定する検出器（Fig. 1 参照）を考案した。この検出器を用いて残余濃度曲線として液滴各個の濃度変化を求めたところ，時間が経過するに伴ない液滴各個の濃度がトレーサ濃度へ漸近的に変化することが見出された（Fig. 2 参照）。この結果，分散相の流れ方向混合は液滴間の離合集散に基づく液滴成分の交換によって生じることが明らかにされた。