

## 多成分粒子充填層の充填率の推定

## ESTIMATION OF VOLUME FRACTION IN A MULTI-SPECIES BED

船水 尚行\*・高桑 哲男\*\*

By Naoyuki FUNAMIZU and Tetsuo TAKAKUWA

A model of estimating the volume fraction of a multi-species bed of particles was derived by extending the model for a two species bed. By the proposed model, the volume fraction of a bed can be computed with each diameter, mixing ratio and volume fraction of particles.

The validity of this model was verified by comparing computed volume fractions with experimental results of 3~6 different size glass beads and 2~8 different size sand particles mixtures.

## 1. はじめに

粒子充填層は汙過池、活性炭吸着層、生物汙過床などの固液分離装置や反応装置として広く用いられている。粒子の充填率はこれらの装置の設計・解析における重要な因子の1つである。充填率の推定法については従来より多くの研究が行われてきたが、主として均一粒子充填層を対象としており、充填粒子が粒径分布をもつ現実の装置には適用できない。粒径の異なる粒子の充填層の充填率については、Horsfield 充填<sup>1)</sup>に代表される最密充填理論、2種類の粒径の異なる粒子より成る2成分充填層を対象とした田中ら<sup>2)</sup>、岡崎ら<sup>3)</sup>の充填率推定法、3成分充填層を対象とした鈴木ら<sup>4)</sup>の方法がある。このうち、最密充填理論は、最密充填を与える粒径分布を計算するものであり、任意の粒径分布をもつ充填層には適用できない。田中ら、岡崎らの充填率の推定法は2成分充填層にのみ適用可能である。鈴木らの方法は3成分以上の多成分充填層にも適用可能であるが、充填率を過大に見積もる場合があるとされている<sup>4)</sup>。

本論文では、まず、岡崎らの2成分充填層の充填率推

定法を多成分充填層に適用できるように拡張し、次に、ガラス球（球形粒子）、砂粒子（不規則形状粒子）を用いた充填実験結果と比較する。

## 2. 充填モデル

## (1) 定義

粒径の異なる  $N$  種類の粒子より成る  $N$  成分充填層を考え、各成分の粒径を  $d_1, \dots, d_N$ , 存在割合を  $x_1, \dots, x_N$ , 充填層中の体積を  $V_1, \dots, V_N$  とする。充填層中の全粒子体積  $V_p$  および  $x_j$  ( $j=1, \dots, N$ ) は次式となる。

$$V_p = \sum_{j=1}^N V_j \dots \dots \dots (1)$$

$$x_j = V_j / V_p \dots \dots \dots (2)$$

一般に  $I$  成分充填層では  $I$  種の成分がある特定の存在割合のときに充填率が最大となる。この存在割合の組合せを  $I$  成分最大充填存在割合とよぶことにする。岡崎らは2成分充填層の充填率の推定に最大充填存在割合を利用したモデルを提案している。すなわち、2成分充填層を次の2つの層より成ると仮定して、充填率の計算をしている。

層1: 2つの成分が共存する層であり、各成分の存在割合が2成分最大充填存在割合に等しい。

層2: 2つの成分のうち、層1にすべてを充填できな

\* 正会員 工修 北海道大学助手 工学部衛生工学科  
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

\*\* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部衛生工学科 (同上)

かった成分より成る。

ここで、 $N$  成分充填層の充填率を推定するために、岡崎らのモデルを拡張し、 $N$  成分充填層が次の  $N$  種の層より成るとした多層充填モデルを考える。

層 1： $N$  種の成分より成る。各成分の存在割合は  $N$  成分最大充填存在割合に等しい。層 1 の充填率を  $\phi_{1,T}$  とする。

層 2： $N$  種の成分のうち、層 1 にすべてを充填できなかった  $N-1$  種の成分より成る。各成分の存在割合は  $N-1$  成分最大充填存在割合に等しい。層 2 の充填率を  $\phi_{2,T}$  とする。

層  $I$ ： $N$  種の成分のうち、層  $1 \sim I-1$  にすべてを充填できなかった  $M ( = N - I + 1 )$  種の成分より成る。各成分の存在割合は  $M$  成分最大充填存在割合に等しい。層  $I$  の充填率を  $\phi_{I,T}$  とする。

層  $N$ ： $N$  種の成分のうち、層  $1 \sim N-1$  にすべてを充填できなかった 1 種の成分より成る。層  $N$  の充填率  $\phi_{N,T}$  は層  $N$  中の成分の単独充填時の充填率に等しい。

いま、Fig. 1 のように層  $I ( = 1, \dots, N )$  の構成成分が  $I, \dots, N ( I = 1, \dots, N )$  である場合について、各層の充填率、各成分の存在割合、体積を Table 1 のように書くことにする。Table 1 中の各層  $I$  の各成分  $j$  の体積  $V_{I,j}$  と充填層全体の成分  $j$  の体積  $V_j$  の間には次の関係が成り立つ。

$$V_j = \sum_{I=1}^N V_{I,j} \dots\dots\dots (3)$$

Fig. 1 の多層充填モデルによって  $N$  成分充填層の充填率  $\phi_T$  を計算するためには次の 3 つの手順が必要である。

- ① Table 1 中の各層の充填率、各成分の存在割合を用いて  $\phi_T$  を表現する。
- ② Table 1 中の各層の各成分の存在割合を計算する。
- ③ Table 1 中の各層の充填率を計算する。

以下の節で各項を説明する。

(2)  $N$  成分充填層の充填率  $\phi_T$  の表現

層  $I$  の空隙の体積を  $\tilde{V}_I$  とすると、

$$\tilde{V}_I = \frac{1 - \phi_{I,T}}{\phi_{I,T}} \sum_{j=1}^N V_{I,j} \dots\dots\dots (4)$$

zone N	Species N
zone N-1	N-1, N
.....	
zone I	I, ..., N
.....	
zone 2	2, ..., N
zone 1	1, ..., N

Fig. 1 Schematic representation of the multi-bed model.

となり、全空隙の体積  $\tilde{V}_T$  は次式で表現される。

$$\begin{aligned} \tilde{V}_T &= \sum_{I=1}^N \tilde{V}_I \\ &= \sum_{I=1}^N \left\{ \frac{1}{\phi_{I,T}} \sum_{j=1}^N V_{I,j} - \sum_{j=1}^N V_{I,j} \right\} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで、

$$\sum_{I=1}^N \sum_{j=1}^N V_{I,j} = \sum_{j=1}^N \sum_{I=1}^N V_{I,j} = \sum_{j=1}^N V_j = V_p \dots\dots\dots (6)$$

となるので、 $\tilde{V}_T$  は

$$\tilde{V}_T = \sum_{I=1}^N \frac{1}{\phi_{I,T}} \sum_{j=1}^N V_{I,j} - V_p \dots\dots\dots (7)$$

となる。式 (7) を用いると、 $N$  成分充填層の充填率  $\phi_T$  は次式で表現される。

$$\phi_T = \frac{V_p}{V_p + \tilde{V}_T} = \frac{V_p}{V_p + \sum_{I=1}^N \frac{1}{\phi_{I,T}} \sum_{j=1}^N V_{I,j}} \dots\dots\dots (8)$$

次に式 (8) 中の分母の計算を行う。式 (8) 中の分母は

$$\begin{aligned} \sum_{I=1}^N \frac{1}{\phi_{I,T}} \sum_{j=1}^N V_{I,j} &= \sum_{j=1}^N \sum_{I=1}^N \frac{1}{\phi_{I,T}} V_{I,j} \\ &= \sum_{j=1}^N \sum_{I=1}^N \frac{1}{\phi_{I,T}} \cdot \frac{x_{I,j}}{x_{I,I}} V_{I,j} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

となり、 $V_{I,j}$  を  $V_j ( j = 1, \dots, N )$  で表現できれば、 $\phi_T$  が Table 1 の各層の充填率  $\phi_{I,T}$  と各成分の存在割合  $x_{I,j} ( j = I, \dots, N )$  を用いて計算できることになる。式 (3) を成分  $I$  について書くと

$$V_I = \sum_{k=1}^I V_{k,I} = \sum_{k=1}^I \frac{x_{k,I}}{x_{k,k}} V_{k,k} \dots\dots\dots (10)$$

Table 1 Volume fractions and mixing ratios in each zone.

Zone	Component	Volume of each species	Mixing ratios	Volume fraction
1	1, ..., N	$V_{1,1}, \dots, V_{1,N}$	$x_{1,1}, \dots, x_{1,N}$	$\phi_{1,T}$
2	2, ..., N	$V_{2,2}, \dots, V_{2,N}$	$x_{2,2}, \dots, x_{2,N}$	$\phi_{2,T}$
.....	.....	.....	.....	.....
I	I, ..., N	$V_{I,I}, \dots, V_{I,N}$	$x_{I,I}, \dots, x_{I,N}$	$\phi_{I,T}$
.....	.....	.....	.....	.....
N	N	$V_{N,N}$	$x_{N,N}$	$\phi_{N,T}$

となる。式 (10) を  $V_{i,j}$  について解くと

$$\left. \begin{aligned} V_{i,j} &= V_i - \sum_{k=1}^{j-1} \frac{x_{i,k}}{x_{k,k}} V_{k,k} & (I \geq 2) \\ V_{i,1} &= V_i & (I=1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

を得る。式 (11) を用いると容易に  $V_{1,1}, V_{2,2}, \dots, V_{I,I}$  の順に  $V_j (j=1, \dots, N)$  との関係が計算され、 $V_{i,j}$  と  $V_j (j=1, \dots, N)$  との関係は次のように表現することができる。

$$\left. \begin{aligned} V_{i,j} &= V_i + \sum_{k=1}^{j-1} H_{i,k} V_k & (I \geq 2) \\ V_{i,1} &= V_i & (I=1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

式 (12) 中の  $H_{i,k}$  は  $x_{m,n} (m=1, \dots, I-1, n=2, \dots, I)$  のみで定まる係数である。

式 (12) を式 (9) に代入して式 (8) の分母を表わし、式 (2) を用いて整理すると、次のように  $\phi_r$  が求められる。

$$\phi_r = \frac{1}{\sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^j \frac{1}{\phi_{l,r}} \frac{x_{l,j}}{x_{l,l}} \cdot F_l} \dots\dots\dots(13)$$

ここで、

$$F_1 = x_1 \quad (I=1) \dots\dots\dots(14)$$

$$F_I = x_I + \sum_{k=1}^{I-1} H_{I,k} x_k \quad (I \geq 2) \dots\dots\dots(15)$$

(3) 層  $I$  の成分  $j$  の存在割合  $x_{i,j}$  の計算

岡崎らは 2 成分最大充鎮存在割合  $x_{1,1}, x_{1,2} (=1-x_{1,1})$  の計算法を二者の粒径  $d_1, d_2 (d_1 > d_2)$  の比  $r (=d_2/d_1)$  の値によって式 (16)~(18) のように与えている。

(イ)  $r=0$  の場合

$$x_{1,1} = \frac{\phi_{s,1}}{\phi_{s,1} + \phi_{s,2} - \phi_{s,1} \phi_{s,2}} = z_0 \dots\dots\dots(16)$$

ここで  $\phi_{s,1}, \phi_{s,2}$  は成分 1, 2 を単独で充鎮したときの充鎮率である。式 (16) は  $r=0$  すなわち  $d_1 \gg d_2$  の場合を考え、成分 1 の作る空隙をすべて成分 2 が利用できるとして得られている。

(ロ)  $r=1$  の場合

$$r=1 \text{ すなわち } d_2 \text{ が限りなく } d_1 \text{ に近づく場合を考え} \\ x_{1,1} = 0.5 = z_1 \dots\dots\dots(17)$$

としている。

(ハ)  $0 < r < 1$  の場合

$$x_{1,1} \text{ は近似的に } r \text{ の一次式で与えられるとして} \\ x_{1,1} = (1-r)z_0 + rz_1 \dots\dots\dots(18)$$

次にこの方法を層  $I$  の各成分の存在割合の計算に拡張する。層  $I$  においては  $M (=N-I+1)$  種類の粒子が共存するので、各成分を粒径の大きい順に 1, 2, ...,  $M$  とする。これらの粒径の大小関係を表現する  $M-1$  個の粒径比を  $r_{1,2} (=d_2/d_1), r_{2,3} (=d_3/d_2) \dots, r_{M-1,M} (=d_M/d_{M-1})$  とすると、 $r_{1,2}, r_{2,3}, \dots, r_{M-1,M}$  の値が 0 または 1 の場合には以下のように各成分の存在割合  $x_{i,j}$  が計

算される。なお、多成分粒子群では  $r_{i,j+1}=0 (j=1, \dots, M-1)$  となることは考えにくいだが、本研究では 2 成分粒子群を対象とした岡崎らのモデルを多成分粒子群に拡張するため  $r_{j,j+1}=0$  という場合を想定した。

$r_{j,j+1}=0 (j=1, \dots, M-1)$  の場合には

$$x_{i,j} : x_{i,j+1} \\ = \frac{\phi_{s,j}}{\phi_{s,j} + \phi_{s,j+1} - \phi_{s,j} \phi_{s,j+1}} \\ : 1 - \frac{\phi_{s,j}}{\phi_{s,j} + \phi_{s,j+1} - \phi_{s,j} \phi_{s,j+1}} \dots\dots\dots(19)$$

$r_{j,j+1}=1 (j=1, \dots, M-1)$  の場合には

$$x_{i,j} : x_{i,j+1} = 1 : 1 = 0.5 : 1 - 0.5 \dots\dots\dots(20)$$

となる。ここで  $\phi_{s,j} (j=1, \dots, M)$  は成分  $j$  を単独で充鎮したときの充鎮率である。いま式 (19), (20) を一括して

$$x_{i,j} : x_{i,j+1} = R_j : 1 - R_j \dots\dots\dots(21)$$

$$R_j = \begin{cases} 0.5 & (r_{j,j+1}=1 \text{ の場合}) \\ \frac{\phi_{s,j}}{\phi_{s,j} + \phi_{s,j+1} - \phi_{s,j} \phi_{s,j+1}} & \dots\dots\dots(22) \end{cases}$$

( $r_{j,j+1}=0$  の場合)

と表わせば、各成分の存在割合の間には Table 2 のような関係が成り立つ。Table 2 の各成分の存在割合間の関係を整理すると

$$x_{i,1} : x_{i,2} : x_{i,3} : \dots : x_{i,j} : \dots : x_{i,M} \\ = R_1 : 1 - R_2 : \frac{(1-R_1)(1-R_2)}{R_2} : \dots \\ : \frac{(1-R_1) \dots (1-R_{j-1})}{R_2 \dots R_{j-1}} : \dots : \frac{(1-R_1) \dots (1-R_{M-1})}{R_2 \dots R_{M-1}} \dots\dots\dots(23)$$

となる。式 (23) より粒径比  $r_{1,2}, r_{2,3}, \dots, r_{M-1,M}$  が 0 または 1 となる場合の各成分の存在割合は次式となる。

$$x_{i,1} = R_1 / T \dots\dots\dots(24)$$

$$x_{i,2} = (1 - R_1) / T \dots\dots\dots(25)$$

$$x_{i,j} = \frac{(1-R_1) \prod_{k=2}^{j-1} (1-R_k) / R_k}{T} \dots\dots\dots(26)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} T &= 1 + \sum_{j=3}^M (1-R_1) \prod_{k=2}^{j-1} (1-R_k) / R_k \\ T &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(27)$$

Table 2 Mixing ratios in zone I.

$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	$x_{1,3}$	.....	$x_{1,j}$	$x_{1,j+1}$	.....	$x_{1,M-1}$	$x_{1,M}$
$R_1 : (1-R_1)$								
$R_2 : (1-R_2)$								
.....								
$R_j : (1-R_j)$								
.....								
$R_{M-1} : (1-R_{M-1})$								

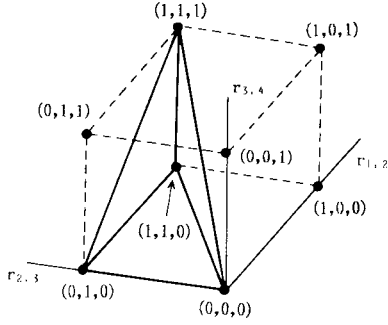


Fig.2 Domain in which the relation  $1 > r_{2,3} > r_{1,2} > r_{3,4} > 0$  holds.

粒径比  $r_{j,j+1}$  が  $0 < r_{j,j+1} < 1$  となる一般の場合には式 (24)~(27) によって計算される  $2^{M-1}$  組の計算値のうち  $M$  組の値の線形近似によって各成分の存在割合を求めることにする。  $2^{M-1}$  組から  $M$  組を選択する方法は粒径比の大小関係に基づいて次のように行う。

はじめに  $M=4$ ,  $1 > r_{2,3} > r_{1,2} > r_{3,4} > 0$  の場合を例にとって説明する。  $r_{1,2}$ ,  $r_{2,3}$ ,  $r_{3,4}$  を変数とした三次元空間内で  $1 > r_{2,3} > r_{1,2} > r_{3,4} > 0$  となる領域は Fig. 2 中の実線で囲まれた部分となる。 よって式 (24)~(27) によって計算される 8 組の計算値から 4 組選択するには、  $(r_{1,2}, r_{2,3}, r_{3,4})$  の値が  $(0, 1, 0)$ ,  $(1, 1, 0)$ ,  $(1, 1, 1)$ ,  $(0, 0, 0)$  となる点の計算値を選ばばよいことになる。 ここで、点  $(0, 1, 0)$  は  $r_{2,3}$  が一番大きいこと、点  $(1, 1, 0)$  は  $r_{1,2}$  が 2 番目に大きいことに対応している。

一般に  $M$  種類の粒子が共存し、粒径比の大小関係が  $r_{k,k+1} \geq r_{l,l+1} \geq \dots \geq r_{m,m+1} \geq r_{n,n+1}$  ( $k, l, \dots, m, n=1, \dots, M-1$ ) であるとすると、粒径比の一番大きい  $r_{k,k+1}$  に対応して  $r_{k,k+1}=1$  と  $r_{l,l+1}=0$  ( $i=1, \dots, M-1, i \neq k$ ) の場合の式 (24)~(27) による各成分の存在割合の計算値  $w_{k,j}$  ( $j=1, \dots, M$ )、次に  $r_{l,l+1}$  に対応して  $r_{k,k+1}=r_{l,l+1}=1$  と  $r_{i,i+1}=0$  ( $i=1, \dots, M-1, i \neq l \neq k$ ) の場合の各成分の存在割合  $w_{l,j}$  ( $j=1, \dots, M$ )、以下、同様にして  $M-2$  番目の  $r_{m,m+1}$  に対応して  $r_{i,i+1}=1$  ( $i=1, \dots, M-1, i \neq n$ )、  $r_{n,n+1}=0$  の場合の各成分の存在割合  $w_{m,j}$  ( $j=1, \dots, M$ )、最後に  $r_{i,i+1}=1$  ( $i=1, \dots, M-1$ ) の場合の  $w_{n,j}$  と  $r_{i,i+1}=0$  ( $i=1, \dots, M-1$ ) の場合の  $w_{0,j}$  ( $j=1, \dots, M$ )

Table 3 Diameter ratios for computation of mixing ratios in zone I.

Mixing ratios ( $j=1, \dots, M$ )	Diameter ratios								
	$r_{1,2}$	$\dots$	$r_{k,k+1}$	$\dots$	$r_{m,m+1}$	$\dots$	$r_{n,n+1}$	$\dots$	$r_{M-1,M}$
$w_{0,j}$	0	$\dots$	0	$\dots$	0	$\dots$	0	$\dots$	0
$w_{k,j}$	0	$\dots$	1	$\dots$	0	$\dots$	0	$\dots$	0
$w_{l,j}$	0	$\dots$	1	$\dots$	1	$\dots$	0	$\dots$	0
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$w_{m,j}$	1	$\dots$	1	$\dots$	1	$\dots$	1	$\dots$	0
$w_{n,j}$	1	$\dots$	1	$\dots$	1	$\dots$	1	$\dots$	1

の合計  $M$  組の各成分の存在割合を選ぶ。 以上の手順で使用された各粒径比の値を整理して Table 3 に示す。

Table 3 の  $M$  組の各成分の存在割合を用いて層 I の成分  $j$  の存在割合を線形近似すると

$$x_{i,j} = (1 - r_{k,k+1})w_{0,j} + (r_{k,k+1} - r_{l,l+1})w_{k,j} + \dots + (r_{m,m+1} - r_{n,n+1})w_{m,j} + r_{n,n+1} w_{n,j} \dots (28)$$

となる。

(4) 層 I の充填率  $\phi_{I,T}$  の計算

層 I の  $M (= N - I + 1)$  種類の粒子を粒径の大きい順に  $1, 2, \dots, M$  とする。 仮に成分  $j$  ( $= 1, \dots, M$ ) だけを単独で充填したときの空隙の体積  $V_{B,j}$  は

$$V_{B,j} = \frac{1 - \phi_{S,j}}{\phi_{S,j}} V_{I,j} \dots (29)$$

となる。 この空隙を成分  $j$  よりも粒径の小さい粒子が利用できるとする。

まず、成分  $j+1$  が  $V_{B,j}$  を利用率  $\eta_{j,j+1}$  で利用するとし、このときの利用率  $\eta_{j,j+1}$  は岡崎らが 2 成分充填層の充填率の推定に用いた次式で表現可能とする。

$$\eta_{j,j+1} = \left( \frac{1 - r_{j,j+1}}{1 + r_{j,j+1}} \right)^{1.5} \dots (30)$$

次に、成分  $j+1$  が利用できなかった空隙の体積  $V_{B,j} \times (1 - \eta_{j,j+1})$  の成分  $j+2$  による利用を考える。 この空隙の利用率は成分  $j, j+1, j+2$  の三者の関係によって定まるとすべきであるが、ここでは 3. で示す実験結果をある程度表現できた  $\eta_{j+1,j+2}$  を採用することとした。 この計算を成分  $M$  まで行くと、成分  $j$  の空隙の体積  $V_{B,j}$  の他成分による利用は Table 4 のようにまとめられる。

以上より、成分  $j$  の空隙のうち利用されないで残る空隙の体積  $\tilde{V}_{I,j}$  は

$$\tilde{V}_{I,j} = \frac{1 - \phi_{S,j}}{\phi_{S,j}} V_{I,j} \left\{ 1 - \eta_{j,j+1} - \sum_{k=j+2}^M \eta_{k-1,k} \prod_{n=j+2}^k (1 - \eta_{n-2,n-1}) \right\} \quad (j=1, \dots, M-1) \dots (31)$$

$$\tilde{V}_{I,M} = \frac{1 - \phi_{S,M}}{\phi_{S,M}} V_{I,M} \dots (32)$$

Table 4 Occupied void volumes of species  $j$  by smaller species.

Species	Void volumes occupied by species $j+1 \sim M$
j+1	$V_{B,j} \eta_{j,j+1}$
j+2	$V_{B,j} \eta_{j+1,j+2} (1 - \eta_{j,j+1})$
.....	.....
k	$V_{B,j} \eta_{k,k+1} \prod_{n=j+2}^k (1 - \eta_{n-2,n-1})$
.....	.....
M	$V_{B,j} \eta_{M-1,M} \prod_{n=j+2}^M (1 - \eta_{n-2,n-1})$

と計算される。よって層 I の充填率  $\phi_{I,T}$  は

$$\phi_{I,T} = \frac{\sum_{j=1}^M V_{I,j}}{\sum_{j=1}^M V_{I,j} + \sum_{j=1}^M \tilde{V}_{I,j}} = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{j=1}^M \tilde{V}_{I,j}}{\sum_{j=1}^M V_{I,j}}} \dots (33)$$

となり、 $\tilde{V}_{I,j} / \sum_{k=1}^M V_{I,k} = X_j$  とおくと、 $\phi_{I,T}$  は次式となる。

$$\phi_{I,T} = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^M X_j} \dots (34)$$

ここで、

$$X_j = \frac{1 - \phi_{s,j}}{\phi_{s,j}} x_{I,j} \left\{ 1 - \eta_{j,j+1} - \sum_{k=j+2}^M \eta_{k-1,k} \prod_{n=j+2}^k (1 - \eta_{n-2,n-1}) \right\} \quad (j=1, \dots, M-1) \dots (35)$$

$$X_M = \frac{1 - \phi_{s,M}}{\phi_{s,M}} x_{I,M} \dots (36)$$

### 3. 多層充填モデルによる計算値と実験結果の比較

#### 2. で示した多成分充填層の充填率の推定法の妥当性

を検討するために充填実験を行った。実験にはふるい分けによって粒度をそろえたガラス球（球形粒子）、砂粒子（不規則形状粒子）を用いた。Table 5 にこれらの粒径範囲ならびに幾何平均径を示す。充填筒には内径約 5 cm、長さ 30 cm のアクリル管を用いた。粒子の充填方法は鈴木らの方法<sup>4)</sup> にならって、Table 5 の粒子を所定の組成となるように混合した多成分粒子群を 200 cm<sup>3</sup> 充填し、容器ごと約 2 cm の高さから、180 回自由落下さ

Table 5 Properties of particles used.

Mark	Sieve range ( $\mu\text{m}$ )	Geometrical mean diameter $d_g$ ( $\mu\text{m}$ )	Volume fraction $\phi_{s,i}$ (-)	Material
G920	1000 ~ 840	920	0.633	Glass beads
G770	840 ~ 710	770	0.630	
G460	500 ~ 420	460	0.629	
G380	420 ~ 350	380	0.625	
G180	210 ~ 149	180	0.627	
G80	105 ~ 74	88	0.621	
S1100	1190 ~ 1000	1100	0.589	
S920	1000 ~ 840	920	0.590	
S770	840 ~ 710	770	0.589	
S650	710 ~ 590	650	0.585	
S540	590 ~ 500	540	0.592	
S460	500 ~ 420	460	0.600	
S380	420 ~ 350	380	0.600	
S300	350 ~ 250	300	0.600	

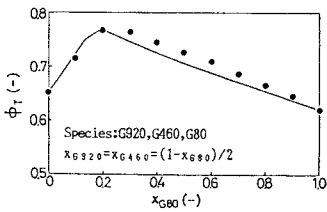


Fig. 3 Comparison between computed and experimental results-1.

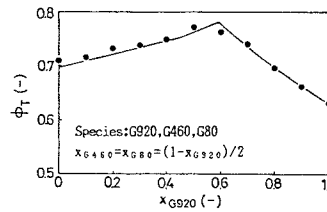


Fig. 4 Comparison between computed and experimental results-2.

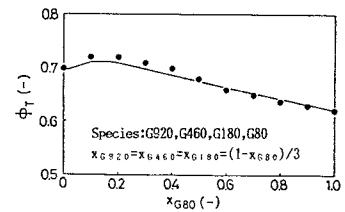


Fig. 5 Comparison between computed and experimental results-3.

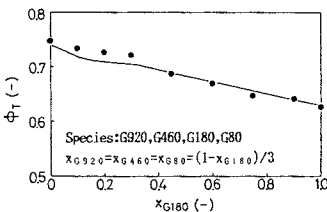


Fig. 6 Comparison between computed and experimental results-4.

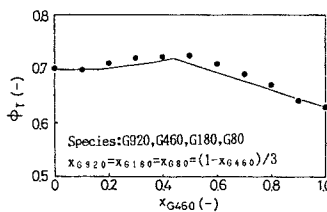


Fig. 7 Comparison between computed and experimental results-5.

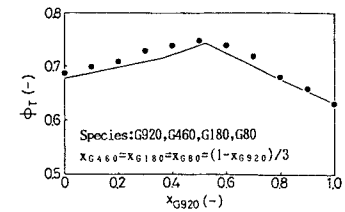


Fig. 8 Comparison between computed and experimental results-6.

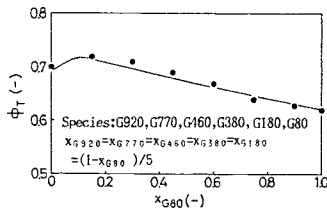


Fig. 9 Comparison between computed and experimental results-7.

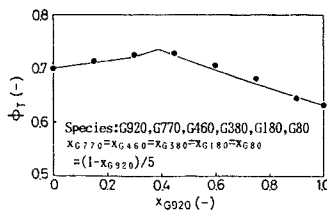


Fig. 10 Comparison between computed and experimental results-8.

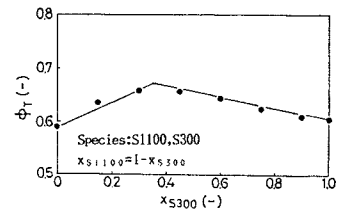


Fig. 11 Comparison between computed and experimental results-9.

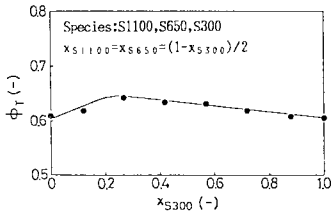


Fig. 12 Comparison between computed and experimental results-10.

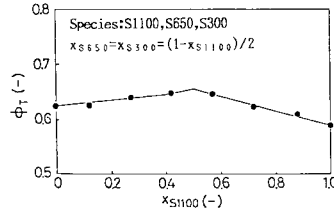


Fig. 13 Comparison between computed and experimental results-11.

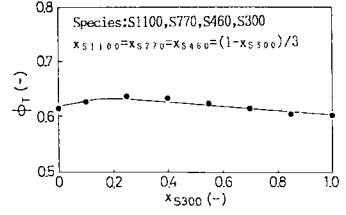


Fig. 14 Comparison between computed and experimental results-12.

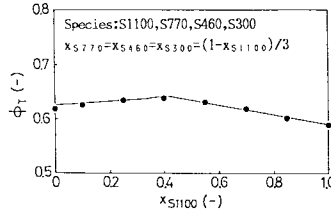


Fig. 15 Comparison between computed and experimental results-13.

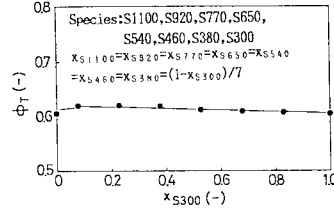


Fig. 16 Comparison between computed and experimental results-14.

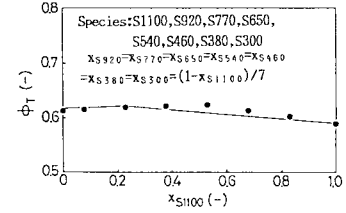


Fig. 17 Comparison between computed and experimental results-15.

せた。

多成分粒子群を用いた充填実験に先立ち、各粒子を単独で充填した場合の充填率を測定し、充填率の計算のための基礎データを得た。Table 5 に測定結果を示す。

ガラス球を用いた多成分充填層について、多層充填モデルによる計算値と実測値の比較結果を Fig. 3～10 に示す。図中の実線は計算結果である。計算値は実測値より小さな値を示す場合もあるが、両者はほぼ一致しているといえる。

Fig. 11～17 には砂粒子の充填層についての比較結果を示す。計算値と実測値はよく一致している。

#### 4. おわりに

多成分充填層の充填率の推定のために、2成分充填層に適合する岡崎らのモデルを拡張した多層充填モデルを提案した。本モデルは多層充填層の充填率を充填層を構

成する各成分の粒径、存在割合、単独充填時の充填率から推定するものである。本モデルによる計算結果は粒径の異なる3～6種類のガラス球、2～8種類の砂粒子より成る充填層の充填率の測定結果と一致し、本法の妥当性が確認された。

#### 参考文献

- 1) 三輪茂男：粉体工学通論，日刊工業新聞社，pp. 39～42，1981年。
- 2) 田中善之助ほか：2成分系粒子群における充填率の変化について，粉体工学会誌，Vol. 19，No. 8，pp. 457～461，1982年。
- 3) 岡崎守男ほか：異径粒子充填層の空隙率，化学工学協会第49年会講演要旨集，I 104，p. 314，1984年。
- 4) 鈴木道隆ほか：3成分球形粒子ランダム充填層の空隙率の推定，化学工学論文集，第10巻，第6号，1984年。  
(1985. 5. 9・受付)