



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	透過法による粒度測定について
Author(s)	中島, 耀二; 田中, 達夫
Citation	北海道大學工學部研究報告, 60, 1-10
Issue Date	1971-03-27
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41047
Type	departmental bulletin paper
File Information	60_1-10.pdf



透過法による粒度測定について

中島 耀二* 田中 達夫*

(昭和 45 年 9 月 30 受理)

Discussions on the Permeability Test for Size Measurement

Yoji NAKAJIMA Tatsuo TANAKA

Abstract

The Kozeny-Carman equation derived from Kozeny's permeation model is the basic equation for determining the fineness of powders from the permeability test. This paper deals with some discussions on the validity of Kozeny's model, particularly on the physical meaning of the Kozeny constant, K , appearing in the basic equation. It was revealed that the constant, K , originates from many sources and not from a single source, depending upon the packing structure; in other words, K does not necessarily change even when the packing structure changes. This information may explain the apparent contradiction in which K is virtually constant regardless of the packing structure when the powder bed is isotropic. Hence Kozeny's model was revealed to be reasonable as a macroscopic model.

As may be inferred from Kozeny's model, the specific surface area based on particle volume is the average surface area of the envelopes which cover particles smoothly divided by the average volume of the envelopes. As a natural consequence of this suggestion, the concept of effective particle density was introduced and experimentally examined. The results indicate that the concept, and hence the suggestion as to the meaning of the specific surface area, are reasonable.

1. 緒 言

透過法は簡便で再現性も案外に優れているうえ測定者の個人差が殆んど出ないので、比較的細かい粉体の比表面積測定に広く利用されている。周知のように透過法は、粉体充填層内を透過する流体の流れを簡単なモデルに置きかえて誘導された半経験的な Kozeny-Carman 式を基礎にしているが、その中に含まれている実験定数 (Kozeny 定数) の物理的な意味はあまり明瞭でない。そこで本報では Kozeny-Carman 式をできるだけ健全な形で導びき、Kozeny 定数の理論的な意味をある程度明らかにし、Kozeny の透過モデルの妥当性を検討する。つぎに透過法で測定される比表面積とはどんな意味をもつのかをモデル的に推論する。さらにその推論過程から必然的に想定される粒子の実効密度の概念を説明し、実効密度が実在することを実験的に確認することによって推論の妥当性を検証する。

* 合成化学工学科 工業化学計測講座

2. Kozeny-Carman 式の誘導

図-1-A のような断面積が A 、長さが L の粉体充填層に差圧 ΔP を与えて、流体を透過させたときの流体の容積流量 Q は次式で示すことができる。

$$Q = \frac{1}{K} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{A \Delta P}{\mu L S_v} \quad (1)$$

上式が有名な Kozeny-Carman 式であって、 K が Kozeny 定数と呼ばれる実験定数、 ε が充填層の空間率、 μ が流体の粘度、 $S_v [\text{cm}^2/\text{cm}^3]$ は粒子単位体積あたりの表面積（以下では単に比表面積と記す）である。なお $6/S_v$ を比表面積平均径 D_s と定義して S_v のかわりに使うことも多い。

本章では (1) 式を少し厳密に誘導し、実験定数 K の意味を検討する。まず図 1-B に示したような直径 d の円管群が N 本平行に貫通している物体を

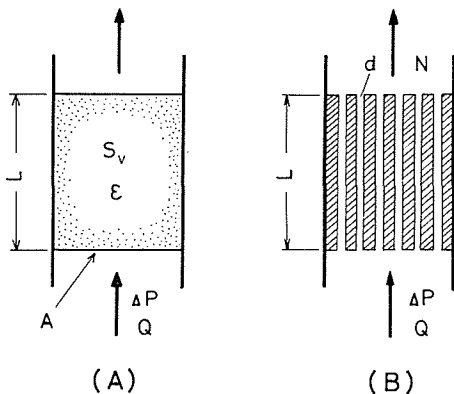


図-1 粉体充填層の簡単な模型

考える。この円管を通して流体が層流で透過しているならば、Poiseuille の式を用いて

$$Q = N \frac{\pi}{128} \frac{\Delta P d^4}{\mu L} \quad (2)$$

と書ける。Kozeny は流路の直径 d のかわりに (4) 式で定義される相当直径 d_h を、また実際の流路の平均長さ L_a を用いれば上式は粉体充填層に適用できると考えた。すなわち

$$Q = N \frac{\pi}{128} \frac{\Delta P d_h^4}{\mu L_a} \quad (3)$$

$$d_h = \frac{4 \times (\text{流路の断面積})}{\text{流路の浸辺長}} \quad (4)$$

この仮定は、もし相当直径を用いるならば円管の抵抗係数がそのまま円管以外の流路に使用できる¹⁾ という経験則に基づいている。しかし今問題にしている層流に対しては、この経験則が成立しないことが多いので、(3) 式は次式で表現する方が合理的である。

$$Q = N \frac{\pi}{128 k_f} \frac{\Delta P d_h^4}{\mu L_a} \quad (5)$$

ここで k_f は流路の横断面の形状に関する補正係数である。さらに実際の流路の断面は流路に沿って形状も面積も変化するから、上式の k_f および d_h は流路の距離 l について平均化した k_{fa} および d_{ha} を用いなければならない。

$$Q = N \frac{\pi}{128 k_{fa}} \frac{\Delta P d_{ha}^4}{\mu L_a} \quad (6)$$

ここで

$$d_{ha}^4 = \int_0^{L_a} d_h^4 dl / L_a \quad (7)$$

$$k_{fa} = d_{ha}^4 \int_0^{L_a} \frac{k_f}{d_h^4} dl / L_a \quad (8)$$

ただし (7), (8) 式の平均化の積分は 1 本の代表的な流路について行なうものとする。

つぎに流路の平均体積を V_a 、壁の平均表面積を S_a とすればそれぞれ次式になる。

$$V_c = k_v \pi d_{ha}^2 L_a / 4 \quad (9)$$

$$S_c = k_s \pi d_{ha} L_a \quad (10)$$

なお k_s と k_v は d_{ha} が d_h の l についての 4 乗平均であるから、流路の横断面が円形で、しかもその面積が l に沿って変化しない場合にだけ 1 になるが、一般的にはいずれも 1 ではなく流路の形状に関係する。(9) 式を (10) 式で除して整理すると

$$d_{ha} = 4 \left(\frac{k_v}{k_s} \right) \left(\frac{V_c}{S_c} \right) \quad (11)$$

さて充填層内の空間の全体積は流路の総体積 NV_c に一致するであろうし、充填粒子の全表面積は流路の壁の全面積 NS_c に等しいはずであるから、充填層の全体積を V_B とすれば、

$$V_B \varepsilon = NV_c \quad (12)$$

$$S_v (1 - \varepsilon) V_B = NS_c \quad (13)$$

これらを (11) 式に代入して次式がえられる。

$$d_{ha} = \frac{4 k_s \varepsilon}{k_v (1 - \varepsilon) S_v} \quad (14)$$

また流路の本数は (9), (12) 式を用いて

$$N = \frac{V_B \varepsilon}{V_c} = \frac{4 V_B \varepsilon}{k_v \pi d_{ha}^2 L_a} = \frac{4 A \varepsilon L}{k_v \pi d_{ha}^2 L_a} \quad (15)$$

最後に (14), (15) 式を (6) 式に代入すると Kozeny-Carman 式がえられる。

$$Q = \frac{k_s^2}{2 k_{fa} k_v^3} \left(\frac{L}{L_a} \right)^2 \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \frac{A \Delta P}{\mu L S_v^2} = \frac{1}{K} \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \frac{A \Delta P}{\mu L S_v^2} \quad (16)$$

ただし

$$K = \frac{2 k_{fa} k_v^3}{k_s^2} \left(\frac{L_a}{L} \right)^2 \quad (17)$$

Kozeny-Carman 式は、通常、流路の断面の形状が円形で、その半径は流路に沿って変化しないという暗黙の仮定のもとに誘導される。その場合には

$$K = 2 \left(\frac{L_c}{L} \right)^2 \quad (18)$$

と書かれるが、 L_c の中には種々の補正係数がしわよせされており、流路の実長ではないことに注意を要する。

粉体充填層内の流路の断面積は流路に沿って変化するから、そこを流れる流体は加速や減速を受ける。したがって、上記の誘導過程では考慮しなかったが、厳密に言えば Poiseuille の式に対する補正係数 k_{fa} は流体の流速の影響を受けることも考えられる。事実、同一の充填層について ΔP を変化して S_v を測定すると異なった結果がえられる。これは明らかに k_{fa} が流速に依存することを示している。しかし測定結果の差異は ΔP が過大でないかぎりわずかであって、流体の加減速の影響は無視できる。

3. Kozeny-Carman 式の妥当性

前章に述べた誘導過程からわかるように、 K に関する 4 つの量 (L_a/L , k_{fa} , k_v , k_s) は流路の形状の影響を受けるから、 K は粉体層の充填構造によって変化するはずである。ところが、Carman²⁾ が種々の粉体の不規則充填について実験したところ、意外にも充填構造に殆んど無関係に $K=5$ になることがわかった。これについては多数の研究者が追試しており、よく充填した

粉体層に対してはこの値が妥当なものとして現在では広く認められている。筆者らも K が充填構造にあまり関係しないことを確認するために、つぎのような実験を行なった。

粒子の体積基準の比表面積がそれぞれ S_{vA} , S_{vB} の 2 種の粉体 A, B を混合したときの比表面積は S_v の定義から

$$S_{vM} = (1 - m_B) S_{vA} + m_B S_{vB} \quad (19)$$

となる。ここで m_B は粉体 B の容積分率である。上式を (1) 式に代入し、変形すると

$$\left\{ \frac{A \Delta P}{QL} \right\}^{1/2} = R^{1/2} = (K \mu)^{1/2} \cdot \phi(\varepsilon) \left\{ (1 - m_B) S_{vA} + m_B S_{vB} \right\} \quad (20)$$

ただし R は比抵抗であって透過率 $(QL/A \Delta P)$ の逆数、また空間率関数 $\phi(\varepsilon)$ は

$$\phi(\varepsilon) = (1 - \varepsilon)/\varepsilon^{3/2} \quad (21)$$

一般に、充填層を形成する粒子の粒度分布が変化すれば充填構造も変化する。そこでもし K が充填構造の影響を受けないならば、(20) 式からわかるように、 ε を一定に保ち m_B を変化して比抵抗 R を測定した場合には、 $R^{1/2}$ と m_B の間に直線関係が成立するはずである。図-2 は平均粒子径の比が約 4 対 1 の 2 種のガラス球についての測定結果であるが、これからわかるように $R^{1/2}$ と m_B には直線的な関係があり、 K は充填構造の影響を殆んど受けないと言える。

さて (17) 式の k_{fa} , k_v , k_s , L_d/L は明らかに独立な無次元量である。それにもかかわらず K が充填構造に本来無関係な量であるならば、前章で述べた解析は無意味であり、解析に用いた Kozeny の透過モデルは否定されなければならない。Martin ら³⁾ は均一径の球形粒子を規則的に充填して、広範な透過実験を行なっている。その結果から判断すると、例えば立方格子充填のような、流体の流れに対してほぼ等方的な性格の充填構造については層流域で $K=5$ になるが*、正斜方充填のように著しく非等方的なものでは、流体を流す方向によって K はまちまちの値をとっている。したがって K は本質的には (17) 式で示されるように充填構造に依存する係数であるが、不規則充填のような等方的な充填構造に対しては $K=5$ として実用上支障ないと解釈すべきである。

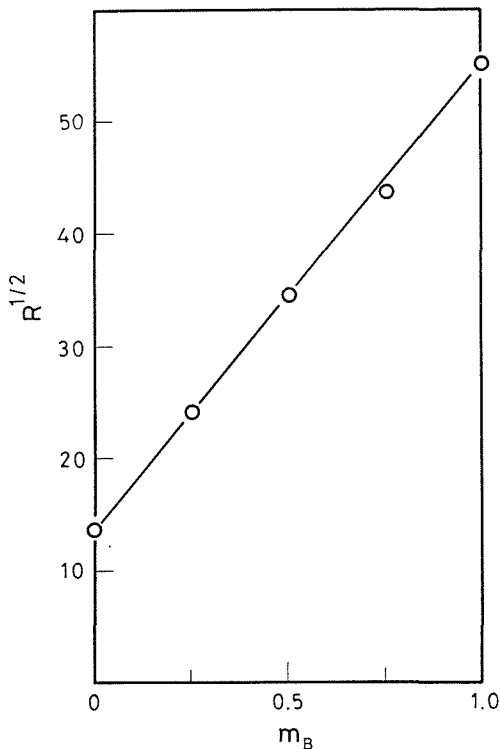


図-2 粒径の異なるガラス球についての $R^{1/2}$ と m_B の関係

Batel⁴⁾ は前述のモデルとは異なった透過モデルを提案しているが、Löttsch⁵⁾ による追試によれば、むしろ Kozeny のモデルの方が系をよく記述していると報告されているし、上記の検討

* 立方格子充填と菱面格子充填では流路の実長は明らかに異なるにもかかわらず、いずれの充填でも $K=5$ になる。したがって K の内容を (18) 式の如く相当長さという単独のパラメータで表現することは誤解を生じ易く不適当であり、理論的な立場からいえば (17) 式のように表わさなければならない。

からわかるように、Kozeny のモデルは実験定数 K の意味を考察するには不十分ではあるが、粉体充填層の流体の透過率と充填粒子の比表面積および空間率の関係を矛盾なく説明する極めて卓越したモデルであるといえる。そこで以下では Kozeny のモデルを全面的に認め、透過法で測定される比表面積 S_v の意味について推論し、これに関連して実効密度の概念を提案する。

4. S_v の意味と実効密度⁶⁾

Kozeny の透過モデルでは、粉体充填層内を屈曲した円管群が貫通しており、その中を流体が層流状態で流動するとみなしている。また (12), (13) 式からわかるように、円管群の総体積は充填層の空間の体積に等しく、それらの管壁は粒子の表面に一致すると考えている。したがって、もし充填粒子の表面にしわや亀裂などがあれば、上記のモデルの管壁に凹凸があるものとして考察することができよう。つまり粒子表面の微視的な構造が透過率測定にどのような影響を与えるかという問題を、管の内面あらさの問題に置きかえてしまうわけである。一般に、管内の流動の抵抗係数は Reynolds 数と表面あらさの関数であるが、透過法で問題にしている層流域では、管壁の突起などがあたかも滑らかに膜でおおわれたようになり、表面あらさは抵抗係数に殆んど関係しないことがよく知られている⁷⁾。この事実を上記のモデルにあてはめると、粒子の表面にしわや亀裂があろうとなかろうと流体の透過率には殆んど差が現われないと考えられる。すなわち、(13) 式で問題にしている粒子の総表面積 $S_v(1-\varepsilon)V_B$ は、粒子の物理的な意味での表面積ではなく、もっと巨視的な流体力学的な意味での表面積、つまり充填層を構成する 1 つ 1 つの粒子を薄い膜で滑らかに包囲したときのその膜の総面積であると言えよう。したがって透過法で測定できる比表面積 S_v は、粒子を滑らかに包囲する包絡面の面積の個数平均を、包絡面がかこむ体積の個数平均で除したものであると解釈できる。

さて、以上の推論が正しいならば、上記の仮想的な膜と固体粒子の間には、事実上流体の流れに関与しない空間（死水領域と呼ぶ）が存在することになる。したがって透過法で空間率の計算に用いる粒子の密度は、粒子の固体としては密度ではなく、粒子の質量を粒子のまわりに生ずる死水領域の体積も含めた粒子の体積で除した実効的なものでなければならない。このような粒子密度を便宜的に実効密度と呼ぶことにする。

ここで混合粉体層の透過実験について考察する。いまある測定者が A, B 2 成分の混合粉体の比抵抗 R を測定しようとして、 W_A [g] の A 粉体と W_B [g] の B 粉体をよく混合し、体積 V_B の充填層を形成したとする。このとき実験者はそれぞれの粉体の密度を ρ'_A, ρ'_B と考えて空間率 ε' と容積混合率 m'_B を計算したならば

$$(1-\varepsilon') = (W_A/\rho'_A + W_B/\rho'_B)/V_B \quad (22)$$

$$m'_B = (W_B/\rho'_B)/(W_A/\rho'_A + W_B/\rho'_B) \quad (23)$$

となるであろう。しかし粒子の実効密度がそれぞれ ρ_{Ae}, ρ_{Be} であるならば、実効的な空間率 ε と混合率 m_B は次式で計算すべきである。

$$(1-\varepsilon) = (W_A/\rho_{Ae} + W_B/\rho_{Be})/V_B \quad (24)$$

$$m_B = (W_B/\rho_{Be})/(W_A/\rho_{Ae} + W_B/\rho_{Be}) \quad (25)$$

(22)~(25) 式を用いて (20) 式の ε と m_B を消去すると

$$\left\{ R(m_B) \right\}^{1/2} = \frac{(1-\varepsilon') \{ C_A + m'_B (C_B - C_A) \} (K\mu)^{1/2}}{[1 - (1-\varepsilon') \{ C_A + m'_B (C_B - C_A) \}]^{3/2}} \left\{ S_{vA} + \frac{m'_B C_B (S_{vB} - S_{vA})}{C_A + m'_B (C_B - C_A)} \right\} \quad (26)$$

ここで

$$C_A = \rho'_A / \rho_{Ae}, \quad C_B = \rho'_B / \rho_{Be} \quad (27)$$

(26) 式からわかるように、たとえ ε' を一定に保って実験を行なっても、 $C_A = C_B$ でないかぎり $R^{1/2}$ と m'_B の間には直線関係が成立しない。一般的には粒子の実効密度は未知な場合が多く、図-3 に示すような曲線になることはまれでない。この現象はみかけ上 (20) 式が成立しないことを示しており、透過法に対する疑問点として指摘されたことがあったが⁸⁾、(26) 式を考えれば当然のことであって透過法の反証にはならない。しかしもし粒子の実効密度を用いるならば (20) 式が成立するはずである。逆に (20) 式が成立するような実効密度が実在するならば実効密度の概念は正当化され、前記の推論も妥当なものと言うことができる。

つぎに実効密度の決定法について述べる。表面が滑らかで非多孔質の球形粒子では実効密度は固体密度に一致する。そこでそのような粒子を A 粉体として用いれば $C_A = 1$ の条件で実験することができ、(26) 式は次のようになる。

$$\left\{ R(m'_B) \right\}^{1/2} = \frac{(1-\varepsilon')(m'_B C_B - m'_B + 1)(K \mu)^{1/2}}{\{1 - (1-\varepsilon')(m'_B C_B - m'_B + 1)\}^{3/2}} \times \left\{ S_{vA} + \frac{m'_B C_B (S_{vB} - S_{vA})}{m'_B C_B - m'_B + 1} \right\} \quad (28)$$

さらに、 $m'_B = 0$ と 1 に対する $R^{1/2}$ の値を結ぶ直線 $L(m'_B)$ は (図 3 参照)、

$$L(m'_B) = (1-\varepsilon') \{1 - m'_B(1 - K_p)\} (K \mu)^{1/2} \varepsilon'^{-3/2} S_{vA} \quad (29)$$

ただし K_p は次式で定義される。

$$K_p = \frac{\{R(m'_B=1)\}^{1/2}}{\{R(m'_B=0)\}^{1/2}} = \frac{C_B \varepsilon'^{3/2}}{\{1 - C_B(1-\varepsilon')\}^{3/2}} \cdot \left(\frac{S_{vB}}{S_{vA}} \right) \quad (30)$$

(28) 式を (29) 式で除し、(30) 式を用いると

$$Y(m'_B) = \frac{\{R(m'_B)\}^{1/2}}{L(m'_B)} = \frac{\varepsilon'^{3/2} (1 - m'_B) + m'_B \{1 - C_B(1-\varepsilon')\}^{3/2} K_p}{\{1 - m'_B(1 - K_p)\} \{\varepsilon' + m'_B(1 - C_B)(1-\varepsilon')\}^{3/2}} \quad (31)$$

図 3 に示したように、 Y と K_p は実験結果から簡単に求まるし、 ε' と m'_B は (22)、(23) 式を用いて計算できる。そこでこれらの値を上式に代入し、試行錯誤法によって C_B を決定すれば (27) 式から B 粉体の実効密度 ρ_{Be} が計算できる。

実際の測定に便利のように、 $\varepsilon' = 0.4$ のときの Y と K_p の関係を C_B と m'_B をパラメータにして (31) 式から計算し、図-4~6 に示した。この図を利用して粒子の実効密度を求めるには次のような手順で実験すると簡単である。

まず第 1 成分 (A 粉体) として使用するための球形粒子を準備する。その粒子の実効密度は固体密度に等しいと考えて $\varepsilon = 0.4$ の充填層を形成し、 $R(m_B = 0)$ を測定する。この際 $\varepsilon = 0.4$ の粉

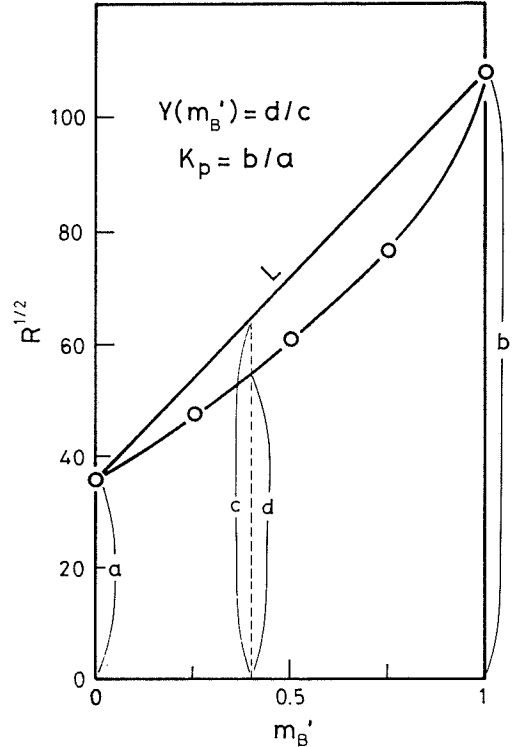


図-3 実効密度が不明な場合の $R^{1/2}$ と m'_B の関係

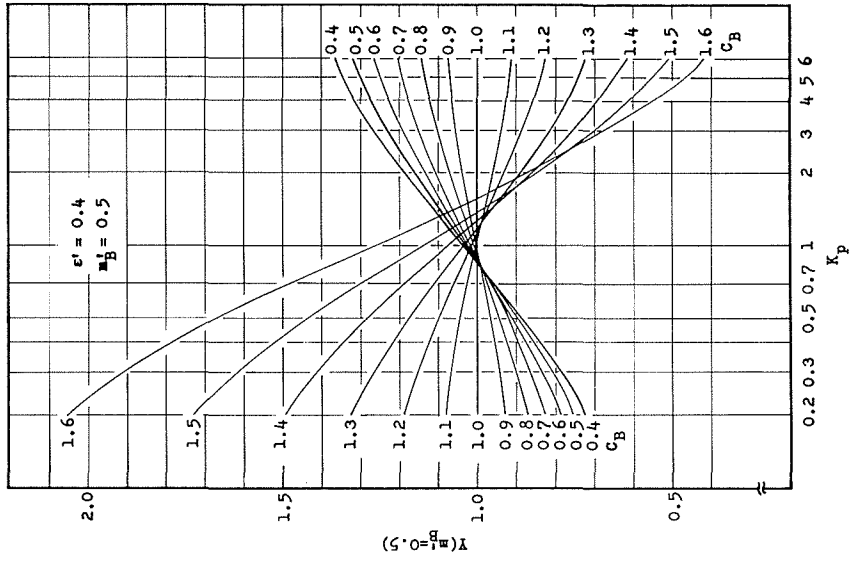


図-5 C_B の計算図表 ($\epsilon' = 0.4$, $m'_B = 0.5$)

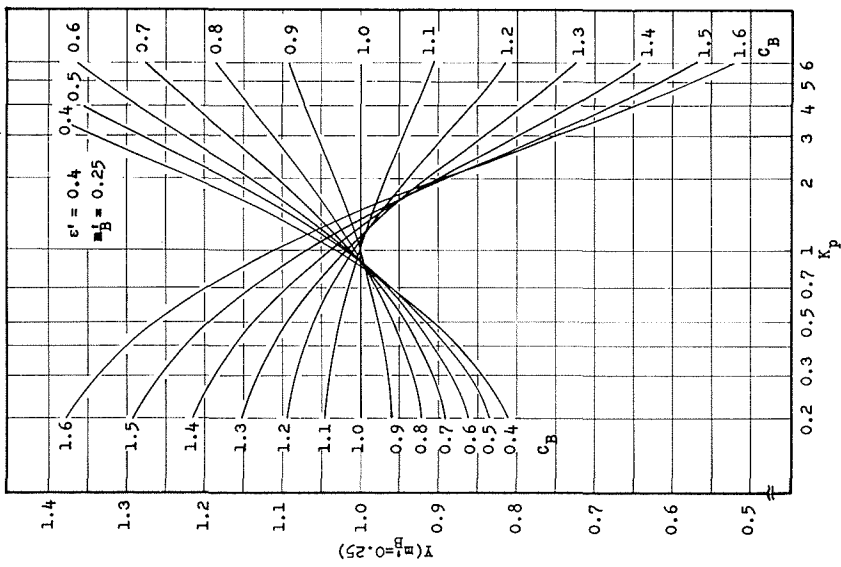


図-4 C_B の計算図表 ($\epsilon' = 0.4$, $m'_B = 0.25$)

体層が形成できないことがあるが、 $m_B=0$ のときには空間率が実効的なものであるから(21)式の $\phi(\varepsilon)$ を用いて $\varepsilon=0.4$ の R の値に換算すればよい。ただし実効的な空間率がわからないときにはこのような換算をしてはならない。つぎに実効密度を測定しようとする粉体を W_B [g](任意)とり、充填むらがないようにできるだけ密につめ、充填層の体積 V_B を測定する。 ρ'_B は任意の値を用いてよいから、この充填層の仮想的な空間率 ε'_B が0.4であるとしてB粉体の仮想密度 ρ'_B を計算する。 $(\rho'_B=W_B/0.6V_B)$ この後、純B粉体の比抵抗 $R(m_B=1)$ を測定し、 $R(m_B=0)$ と $R(m_B=1)$ から K_p を計算する。さらに上記のようにして定めた ρ'_B を用い、 $\varepsilon'=0.4$ での $R(m'_B)$ を $m'_B=0.25, 0.50, 0.75$ のそれぞれについて測定する。なお与えられた ε' と m'_B を満足する体積 V_B の充填層を形成するためにはA粉体(球形)とB粉体をそれぞれ

$$W_A = (1-m'_B) V_B (1-\varepsilon') \rho_{Ae} \quad [\text{g}]$$

$$W_B = m'_B V_B (1-\varepsilon') \rho'_B \quad [\text{g}]$$

ずつ採取し、よく混合してから体積 V_B の

充填管にむらなくつめればよい。最後に実験結果を図3のようにプロットし、それぞれの m'_B に対する Y を求めれば図4~6を用いて C_B を読み取ることができ、(27)式から ρ_{Be} が計算できる。

このようにしてそれぞれの m'_B に対して定められた ρ_{Be} が m'_B によって大きくばらつくならば、実効密度の概念は根拠のないものである。図3はガラス球と五酸化バナジウムの混合物についてえられた結果であるが、この図から五酸化バナジウムの実効密度を求めてみると $m'_B=0.25, 0.50, 0.75$ に対してそれぞれ1.16, 1.17, 1.13[g/cc]になり殆んど差がない。このことは実効密度の概念の妥当性を示す根拠になろう。表-1にいくつかの物質の実効密度と真密度を示しておく。

表-1 粒子の実効密度と真密度

物 質 名	実効密度	真 密 度	
五酸化バナジウム	1.16	3.90	(不定形多孔質)
アルミナ	2.4	3.94	(不定形多孔質)
フライアッシュ	2.05	2.1	(球形+破砕物)
重曹	2.16	2.2	(四角柱状)
食塩(30 μ)	1.9	2.17	(破砕物)
食塩(80 μ)	1.7	2.17	(破砕物)
カルサイト	2.6	2.7	(破砕物)
硫黄	1.5	不明	(不定形多孔質)

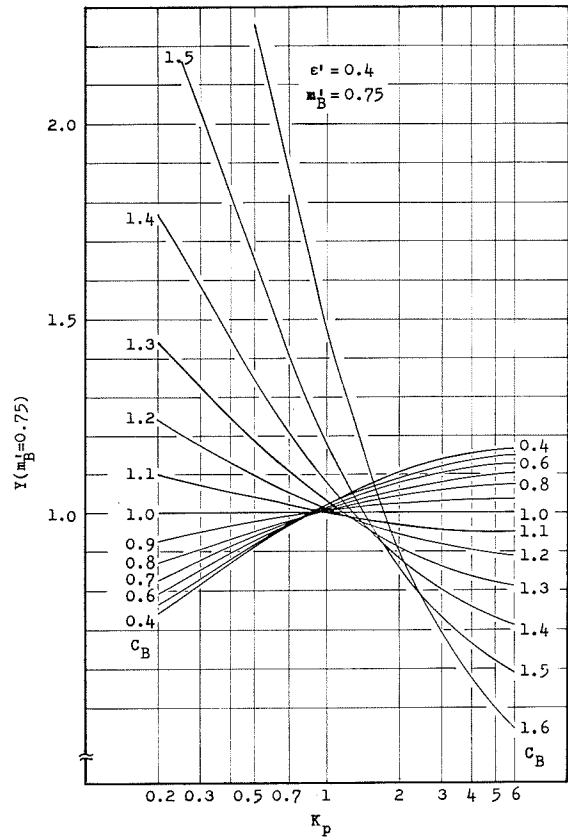


図-6 C_B の計算図表 ($\varepsilon'=0.4$, $m'_B=0.75$)

なお実効密度は物質が同じでも粒子の形状が異なれば異なる値をとるから、表に示した数値自体にはあまり意味がない。しかし食塩のように非多孔質の物質でも実効密度が真密度よりかなり小さくなりうることは興味深い。

前述のようにもし空間率や混合率を粒子の実効密度を用いて計算したならば(20)式が成立するはずである。そこで複雑な粒子形状をしたアルミナや五酸化バナジウムの混合粉体について透過実験を行なったところ図7に示すような結果がえられた。この実験では粒子の実効密度を有効数字2桁で丸めて使用したため、まだ多少の曲率がみられるが、いずれの測定結果についても $R^{1/2}$ と m_B の間にはよい直線関係があり、(20)式が成立していることがわかる。したがって実効密度の概念には根拠があり、前章の S_v の意味に関する推論も妥当なものと認めることができる。

5. 結 言

本報では、まず Kozeny-Carman 式を比較的厳密に透導して実験定数 K の意味について検討し、従来、相当長さ L_e としてあいまいに表現されている項には多数の因子が複雑にからみ合っていることを指摘した。つまり、充填層内の流路の実長が変化したにもかかわらず K が変化しないという場合も起りうるのである。一方、不規則充填に対しては $K \approx 5$ になることがよく知られているし、Martin らの詳細な実験結果も、 K は本質的には充填構造に依存するものの、流体抵抗が等方的な充填層に対しては $K=5$ と考えて実用上支障ないことを示している。したがって等方的な充填構造では、(17)式の各因子が充填構造の変化を互に打ち消し合うように変化すると解釈すれば Kozeny の透過モデルには矛盾がないことになる。なおなぜ打ち消し合うかについてはもっと微視的な考察が必要であり、Kozeny のモデルからは説明できない。

つぎに Kozeny のモデルを用い、透過法によって測定される比表面積 S_v の意味を推論した。その結果によれば、 S_v は粒子の表面を滑らかにおおう包絡面の面積の個数平均を包絡面がかこむ体積の個数平均で除したものと考えられる。この意味からいえば、透過法の測定結果を表面積の尺度である比表面積で表現するよりも、むしろ粒子の大きさの尺度である比表面積平均径 ($6/S_v$) で表現する方が概念としては合理的であろう。

最後にこの推論過程から導びかれた実効密度の決定法を述べ、この概念の妥当性を実験的に検証することによって、上記の推論の正当性を間接的に示した。

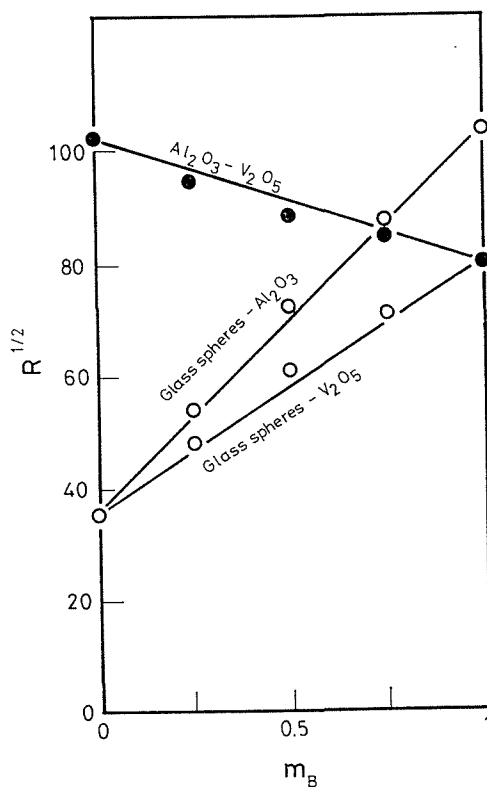


図7 実効密度を用いた場合の $R^{1/2}$ と m_B の関係

参 考 文 献

- 1) H. Schlichting: Boundary Layer Theory, 4th ed., (1960), p. 517, McGraw-Hill.
- 2) P. C. Carman: Trans. Instn. Chem. Engrs., 15 (1937), 150.
- 3) J. J. Martin, W. L. McCabe and C. C. Monrad: Chem. Eng. Prog., 47 (1951), 2, 91.
- 4) W. Batel: Chem. Ing. Tech., 31 (1959), 6, 388.
- 5) P. Löttsch: Chem. Tech., 17 (1965), 7, 414.
- 6) 安戸, 中島, 田中: Powder Tech., 2 (1968/69), 320.
- 7) H. Schlichting: Boundary Layer Theory, 4th ed., (1960), p. 519, McGraw-Hill.
- 8) B. H. Kaye: Powder Tech., 1 (1967), 11.