



Title	砂床型マッパ-における砂床伝導率の研究
Author(s)	田中, 康博; 吉田, 則信; 福岡, 醇一
Citation	北海道大學工學部研究報告, 103, 9-18
Issue Date	1981-02-27
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/41667">http://hdl.handle.net/2115/41667</a>
Type	bulletin (article)
File Information	103_9-18.pdf



[Instructions for use](#)

## 砂床型マッパーにおける砂床伝導率の研究

田中康博 吉田則信 福岡醇一

(昭和55年9月30日受理)

### Studies on conductivities of sandbeds in sandbed mappers

Yasuhiro TANAKA, Norinobu YOSHIDA, Jun-ichi FUKUOKA

(Received September 30, 1980)

#### Abstract

In order to analyse flow patterns in a sandbed mapper, a visual analog with Poissonian fields, conduction factors and hence conductivities of sandbeds were measured. Conduction factors of sandbeds made of small copper particles were well expressed by Reynolds number  $Re/2000$  in a range of  $6.49 \times 10^{-3} \sim 2.29$  of  $Re$ .

#### 1. ま え が き

静電界, 定常的電流の場, 定常的電流による磁界, 定常的熱伝導の場など, ラプラスあるいはポアソンの方程式を満足する, いわゆるポテンシャル場の解析法として, 1. 理論的手法, 2. 数値解析的手法, 3. 実験的手法が考えられる。これらの解析手法にはそれぞれ特徴があり, 与えられた問題に対して使い分ける事が重要である。また1と3, 2と3のように併用することが工学的に大きな意義をもつ。

フルイド・マッパー (Fluid Mapper) は, 流体の流れの場を利用して, 一般の2次元または軸対称3次元のポテンシャル場を解析しようとするもので, 上記の手法の中の実験的手法に属し, かつアナログ型で可視型の手法と言えるもので, かつての Hele-Shaw の装置にない種々の特徴を備えている。フルイド・マッパーには, 通常のフルイド・マッパー, 砂床型マッパー (Sandbed Mapper), 固定砂床型マッパー (Fixed Sandbed Mapper) の3種類があり, 初めのはラプラス場の解析に, 後の2者はポアソン場の解析に使用される<sup>1)</sup>。

本研究は砂床型マッパーに関するものである。砂床型マッパーは, 分布吹口 (または吸口) として, 砂床 (Sandbed), すなわち微小金属粒の充填層を用いるもので, ポアソン場の可視アナログとして使用され, 現在のところポアソン場の流線直視装置として唯一のものと考えられる。砂床型マッパーにおいては, 近接した2枚の平板 (上板はガラス板, 下板は石膏板) による細隙に水を流すが, 下板の一部もしくは全部に砂床を作り, 水を吹き出させ (または吸い込ませ) て, 分布吹口 (または吸口) とする。流線を着色して, 分布吹口 (吸口) に現われる極値点 (Kernel) から, 見かけ上, 発散 (集中) する流線図形を観測し, これを図式的に解析してポアソン場を解明する。

砂床の強さは, 砂床の上下にかかる圧力差と砂床の伝導率の積として表わされるが, 砂床面の

位置による圧力差の相違が微小にとどまり、事実上伝導率のみに比例するような条件が、通常の意味における砂床型マッパーの使用範囲と考えられる。このような言わば使用限界を調べるためには、砂床の伝導率を明確にすることが前提となり、本研究のねらいもここにあるわけである。金属球の充填層の伝導率については、化学工学の分野で多くの報告が見られるが、砂床型マッパーの操作条件であるレイノルズ数がおよそ1以下の範囲では、研究は比較的少ない<sup>2)</sup>。我々は、微小金属球として銅球を用い、水または石膏飽和水に対する伝導係数を、マッパーの操作条件を充分に含む広いレイノルズ数の範囲で測定し、かなり満足すべき結果を得たので御報告する次第である。

## 2. 砂床の伝導率と伝導係数

砂床は、図-1のように断面が  $l \times D$  (cm<sup>2</sup>)、厚さが  $d_s$  (cm) とし、内部に微小金属粒が充填され、厚さの方向に水の流れが形成される。いま、断面を通る流量を  $I$  (cm<sup>3</sup>/s)、砂床の中の平均流速を  $v$  (cm/s) とする。また、砂床の厚さ方向にかかる圧力差を  $P$  (dyne/cm<sup>2</sup>)、砂床の流れに対するコンダクタンスを  $G$  (cm<sup>5</sup>/dyne・s)、単位面積当りのコンダクタンスを  $g$  (cm<sup>5</sup>/dyne・s) とすれば、(1) 式したがって (2) 式が成立する。

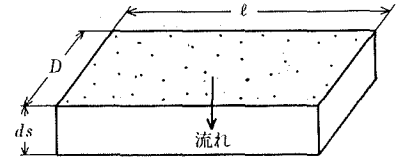


図-1 砂床

$$I = v l D, \quad I = G P = g l D P \quad (1)$$

$$P g = v \quad \text{あるいは} \quad P = v / g \quad (2)$$

ここに導かれた単位面積当りのコンダクタンス  $g$  を、砂床の伝導率と呼ぶことにする。

一方、砂床にかかる圧力差  $P$  を、速度水頭を基準とする考え方で表わせば、(3) 式を得る。

$$P = (1/g_0)(d_s/d_k)(\rho v^2/2) \quad (3)$$

ここで、 $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>) は流れの密度、 $d_k$  (cm) は砂床に充填される微小金属球の直径を示し、 $g_0$  (無次元) は摩擦係数の逆数で、ここでは砂床の伝導係数と呼ぶことにする。いま、(3) 式を (4) 式のレイノルズ数  $Re$  (無次元) を用いて書き直せば、(5) 式となる。

$$Re = v d_k / \nu \quad (4)$$

$$P = (1/g_0)(1000 \mu d_s / d_k^2)(Re/2000)v \quad (5)$$

ただし、 $\mu$  (dyne・s/cm<sup>2</sup>) を粘性係数として、 $\nu = \mu/\rho$  (cm<sup>2</sup>/s) は動粘性係数である。(2) 式と (5) 式を比較すれば、砂床の伝導率  $g$  は (6) 式で表わされる。

$$g = g_0 g_L (2000/Re), \quad g_L = d_k^2 / 1000 \mu d_s \quad (6)$$

伝導係数  $g_0$  は、一般にレイノルズ数  $Re$  の関数として (7) 式で与えられる。

$$g_0 = f(Re) \quad (7)$$

(7) 式の関数形を実測によって求めれば、砂床の伝導率は (6) 式から算出される。もし、伝導係数が (8) 式で表わされれば、伝導率は (9) 式で与えられる。

$$g_0 = Re/2000 \quad (8)$$

$$g = g_L \quad (9)$$

なお、(6) 式の  $g_L$  とダルシーの法則における透過係数の関係は次のようになる。ダルシーの法則で、外力(重力)の有するポテンシャルを無視して、1次元流に対する流速を求めれば、(10) 式となり、したがってこの場合の伝導率は (11) 式で与えられる。

$$v = (k/\mu d_s) P \quad (10)$$

$$g = k / \mu d_s \quad (11)$$

ただし、 $k(\text{cm}^2)$  は透過係数である。したがって、透過係数として (12) 式の関係があれば、このときの伝導率が  $g_L$  となる。

$$k = d_k^2 / 1000 \quad (12)$$

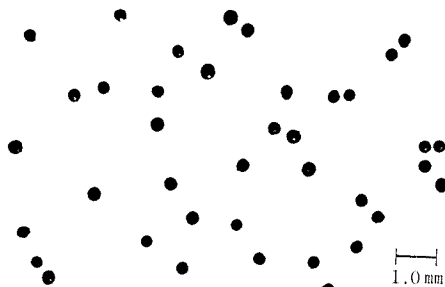
### 3. 微小金属球とその分級

本研究では微小金属球として、フクダ球体銅粉（福田金属箔粉工業製，写真-1 参照）を用い、粒径範囲は、48~120 mesh，20~60 mesh，8~20 mesh のものを，それぞれ 5~6 kg 程度用意した。

分級方法としては，簡便で迅速な方法であるふるい分け法を採用した<sup>3)</sup>。使用したふるい（三田村理研工業製）の規格を表-1 に示す。ふるいの振とうには，ふるい架数が7個で，振とう時間（0~60 min）と振とう強さ（偏心運動の振幅 0~3 mm）を調節し得る電磁式振とう機（Retsch製）を使用した。

まず，表-2 に微小銅球のふるい粒子径の分布状態を示す。球体銅粉としては，粒径範囲の最も小さい 48~120 mesh についてのものである。振とう機にふるいを5段装架し（No. 52~No. 100），上段より一定量（約 200 g）の銅粉を装入して振とうを開始し，一定時間毎に各ふるいの網上残留値を測定した。これによれば，銅粉は比較的狭い範囲のふるいに集中し，時間経過とともに上段は減少し，下段は増加する。たとえば，時間120分においては，No. 60~No. 100の網上（粒径 0.149~0.297 mm の範囲）に 15.2%~31.7%の分布で，全体として 96%以上が集中する。時間が経過すればこの分布は変化するが，たとえば，時間300分の分布に対して，+15.2%（No. 60）~-12.3%（No. 100）の状態にある。

つぎに，表-3 に微小銅球のふるい分け継続時間について示す。表-2の実験において，上から2段目の No. 60（目開き 0.25 mm）のふるいに注目し，この網上残留値を30分毎に測定し



No.52 ( $d_k = 0.297 \sim 0.350 \text{ mm}$ )

写真-1 銅球形状

表-1 分析ふるいの規格

呼び番号	目開き (mm)
TYLER 9	2.000
TYLER 12	1.410
TYLER 20	0.840
ASTM 25	0.71
ASTM 30	0.59
ASTM 35	0.5
TYLER 42	0.350
ASTM 52	0.297
TYLER 60	0.250
ASTM 70	0.21
ASTM 80	0.177
ASTM 100	0.149

(内径 200 mm, 深さ 60 mm)

表-2 微小銅球のふるい粒子径の分布（上段：網上重量 (g)・下段カッコ内：重量パーセント）

ふるい番号	No. 52	No. 60	No. 70	No. 80	No. 100	受け皿	計
目開き mm	(0.297)	(0.250)	(0.21)	(0.177)	(0.149)		
時間 min							
30	0.025 (0.0%)	40.20 (20.1%)	64.70 (32.3%)	50.15 (25.1%)	39.33 (19.7%)	5.55 (2.8%)	199.96 (100%)
60	0.025 (0.0%)	35.30 (17.7%)	63.05 (31.5%)	52.03 (26.0%)	43.20 (21.6%)	6.30 (3.2%)	199.91 (100%)
120	0.025 (0.0%)	30.30 (15.2%)	63.35 (31.7%)	54.35 (27.2%)	44.95 (22.5%)	6.95 (3.5%)	199.93 (100%)
180	0.025 (0.0%)	28.20 (14.1%)	63.30 (31.7%)	55.03 (27.5%)	46.03 (23.0%)	7.30 (3.7%)	199.89 (100%)
240	0.025 (0.0%)	27.10 (13.6%)	62.93 (31.5%)	55.00 (27.5%)	47.20 (23.6%)	7.53 (3.8%)	199.79 (100%)
300	0.025 (0.0%)	26.30 (13.2%)	62.23 (31.2%)	52.23 (26.1%)	51.25 (25.7%)	7.73 (3.9%)	199.77 (100%)

試料：フクダ球体銅粉，48~120 mesh  
ふるい装入量：約 200 g

ふるい：No. 52~No. 100，架数 5 段  
電磁振とう機強さ：10（一定）

表-3 微小銅球のふるい分け継続時間

時間 (min)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
網上重量 (g)	40.20	35.30	32.00	30.30	29.13	28.20	27.63	27.10	26.68	26.30
網上重量 (%)	20.1	17.7	16.0	15.2	14.6	14.1	13.8	13.6	13.4	13.2
毎分通過量 (g/min)	5.327	0.163	0.110	0.057	0.039	0.031	0.019	0.018	0.014	0.013

試料：フクダ球体銅粉，48~120 mesh

ふるい：No. 52~No. 100，5 段中の 2 段目 No. 60（目開き 0.250 mm）に注目

装入量：約 200 g

ふるい振とう時間：各回 30 min

電磁振とう機強さ：10（一定）

表-4 ふるい分けされた微小銅球

ふるい番号	粒径範囲 (mm)	中央値 (mm)	重量 (g)	比率 (%)
100	0.149~0.177	0.163	1,499	9.2
80	0.177~0.21	0.1935	1,387	8.5
70	0.21 ~0.250	0.230	1,064	6.5
60	0.250~0.297	0.2735	2,134	13.1
52	0.297~0.350	0.3235	1,440	8.8
42	0.350~0.5	0.425	1,876	11.5
35	0.5 ~0.59	0.545	1,022	6.3
30	0.59 ~0.71	0.65	762	4.7
25	0.71 ~0.840	0.775	16.4	0.1
20	0.840~1.410	1.125	1,911	11.7
12	1.410~2.000	1.705	2,501	15.3
9	2.000~	—	718	4.4
計	0.149~	0.163~	16,330	100

て、各回の毎分通過量を求めた。たとえば、時間120分において、0.0567 g/minであるが、これは初期重量200 gに対して、0.0283%である。以上の実験により、この試料に対してはふるい継続時間を120分と定めた。他の粒径範囲の試料に対しても、同様の考え方で継続時間を定めた。

表—4に球体銅粉の全体についてのふるい分けの結果を示す。各ふるい上残留のもの粒径は、目開きの中央値を採用することとした。これによって、0.163~1.705 mmまで、砂床に使用する充分に広範囲の微小銅球を準備した。

#### 4. 砂床伝導係数の測定

(3) 式から砂床伝導係数は (13) 式で与えられ、またレイノルズ数は (14) 式で表わされる。

$$g_o = (\rho/2)(d_s/d_k)(v^2/P) \quad (13)$$

$$R_e = vd_k/\nu \quad (14)$$

水の密度  $\rho$ 、砂床厚さ  $d_s$ 、砂床の充填球の直径  $d_k$  を与え、砂床にかかる圧力差  $P$  と砂床中の平均流速  $v$  を測れば、伝導係数  $g_o$  が求められる。また、動粘性係数  $\nu$  を与えて、そのときのレイノルズ数  $R_e$  を求める。充填球直径の各種のものについて、圧力差を変化して、 $g_o = f(R_e)$  を求め得る。

##### 4.1 測定装置

砂床を図-2に示す。石膏板  $8\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 1.27\text{ cm}$  を4枚組み合わせて接合して外枠とし、中央に広さ  $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 、厚さ  $1.27\text{ cm}$  の孔を作り、この部分に前章の分級された微小銅球を充填して砂床とする。孔の下面に銅球を支える真鍮網 (120 mesh) とステンレス金網 (0.9 mm) を張る。砂床下部には小室を設け、水を流すためのゴム管と圧力測定用のゴム管をつける。

砂床の作製は次のように行なう。水槽 (広さ  $46\text{ cm} \times 36\text{ cm}$ 、深さ  $8\text{ cm}$ ) の中に石膏板の外枠を沈め、スポイトで孔の真鍮網の下に閉じ込められた気泡を完全に抜き取る。孔の部分に隙間が生じないように、針で静かにつきながら微小銅球を充填する。砂床の上面が石膏板上面と同じ高さになるように、時々ガラス板をかぶせて動かし、最上部の銅球が一様に動くようになった所で、充填を終える。水に浮き易い細かい銅球の場合は、親水剤 (写真用ドライウェル) を滴加しながら充填する。

装置の全体を図-3に示す。砂床はゴム管により流量計を経て受けタンクに連結される。受けタンクの高さを調節し、水槽と受けタンクの水位差を変え、これによって砂床中の流速や、砂床にかかる圧力差を変える。図のように砂床を吸口として動作させれば、受けタンクで水があふれるが、これをギアポンプによって送りタンクを経て水槽に還流させ、水槽の水位を常に一定に保つ。砂床のもう1つのゴム管を圧力計に結ぶ。水槽には熱電対を入れ、熱電温度計に結ぶ。圧力計は傾斜液柱計、流量計は差圧流量計で、いずれも内径  $0.39\text{ cm}$  のガラス管を用いた。温度計

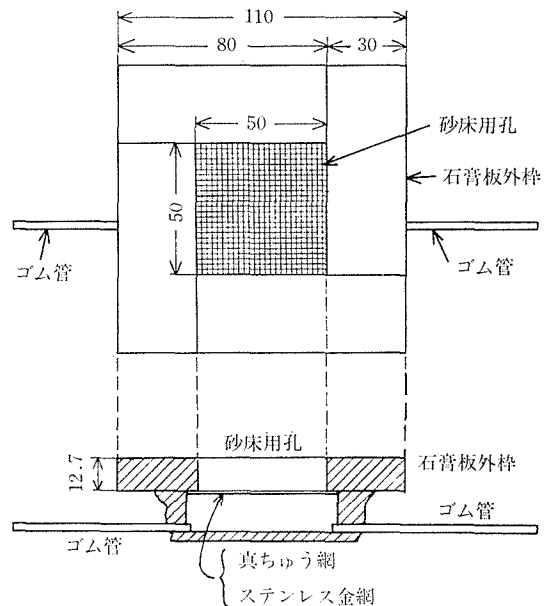


図-2 砂床形状

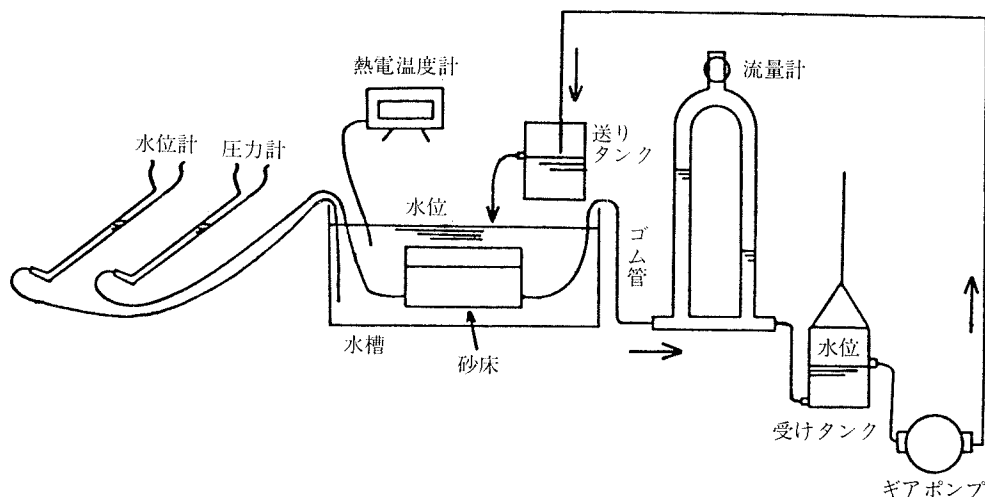


図-3 測定装置のブロックダイアグラム

は、銅—コンスタンタン熱電対を用いたデジタル表示計である。水は石膏飽和水を使用する。一般に、砂床は石膏板の一部に作られ、その場合には、流水による石膏板の浸蝕を防ぐため、石膏飽和水を用いるためである。

#### 4.2 測定方法

(1) 圧力差の測定 砂床にかかる圧力差  $P(\text{dyne/cm}^2)$  は、(15) 式で求める。

$$P = \Delta l \cdot (\text{縮小率}) \cdot \rho g, \quad (15)$$

ただし、 $\rho(\text{g/cm}^3)$  は水の密度、 $g(\text{cm/s}^2)$  は重力加速度である。 $\Delta l(\text{cm})$  は傾斜液柱計において、受けタンクにより水位差を加える前後の読みの差である。縮小率は、液柱計の傾斜によるもので、予め求めておく。一定容積  $V(\text{cm}^3)$  の水を水槽に入れ、その時の液柱計の読みの変化を  $\Delta l_0(\text{cm})$  とすれば、縮小率は、 $V/F_l \cdot \Delta l_0$  となる。ただし、 $F_l(\text{cm}^2)$  は水槽の面積である。

受けタンクを下げて水位差を加えれば、傾斜液柱計の示度は次第に低下し、通常は比較的短時間で一定値に落ち着き、 $\Delta l$  が求められる。しかし実験によれば、図-4のようにこの示度は、初め短時間は急に降下するが、以後は時間経過に比例して、引き続いて緩やかに降下することが分った。砂床を取り出して水洗して調べたところ、かなりの沈澱物が生じており、金属工学科石川達雄教授によれば、この沈澱物は、流水によって生じた酸化銅であることが分った。これによって、図-4において、初めの示度  $l_0$  から直線部分に平行に引いた破線の上の部分は、主として酸化銅による目詰まりによる砂床の抵抗の増加によるもので、これを除いた  $\Delta l$  が砂床の本来の抵抗によるものであると考えた。

したがって、 $\Delta l$  は (16) 式によって求めることとした。

$$\Delta l = l_0 - (l_1 t_2 - l_2 t_1) / (t_2 - t_1) \quad (16)$$

ただし、 $l_0$  は初めの示度、 $l_1$ 、 $l_2$  は直線部分において、それぞれ時間  $t_1$ 、 $t_2$  における示度である。

(2) 平均流速の測定 流量計は流量の範囲に応じて数種類のものを用意する。それぞれについて、液柱の読みの差と基準温度 ( $20^\circ\text{C}$ ) における流量の間の校正曲線を求めておく。流水の温度  $\theta^\circ\text{C}$  における流量  $I_\theta(\text{cm}^3/\text{s})$  は、曲線から求めた  $I_{20}(\text{cm}^3/\text{s})$  から、次の (17) 式によって求める。

$$I_\theta = I_{20} / \varphi_\theta, \quad \varphi_\theta = \nu_\theta / \nu_{20} \quad (17)$$

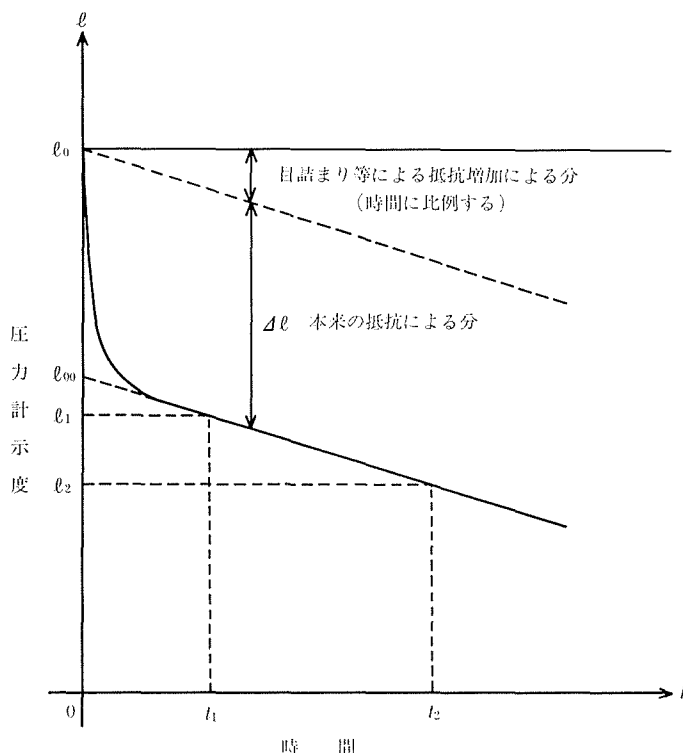


図-4 圧力計示度の時間変化

ここで、 $\nu_\theta$  は温度  $\theta^\circ\text{C}$  における水の動粘性係数で、次式で求めた。

$$\nu_\theta = 1.78 \times 10^{-2} / (2.21 \times 10^{-4} \theta^2 + 3.36 \times 10^{-2} \theta + 1) \quad (\text{cm}^2/\text{s})$$

したがって、砂床の中の平均流速  $v(\text{cm}/\text{s})$  は、(18) 式から求める。

$$v = I_0 / F_s \quad (18)$$

ただし、 $F_s(\text{cm}^2)$  は砂床の断面積である。なお、上記の温度補正は  $0.1^\circ\text{C}$  まで行なった。

## 5. 測定結果と考察

### 5.1 砂床の伝導係数の測定例

まず、ある条件の砂床伝導係数の測定結果の一例を述べる。

微小銅球は、ふるい番号、T-60 と A-70 の間のもので、目開きの中央値として、 $d_k = (0.21 + 0.25)/2 = 0.23 \text{ mm}$  とする。水槽と受けタンクにある水位差を与え、砂床に水を流す。傾斜液柱計の示度の変化を測り、(16) 式において、初めの値  $l_0 = 169.2 \text{ mm}$ 、直線部分については、 $t_1 = 10 \text{ min}$  において  $l_1 = 123.2 \text{ mm}$ 、 $t_2 = 30 \text{ min}$  において  $l_2 = 112.0 \text{ mm}$  を得た。したがって、 $\Delta l = 40.40 \text{ mm}$  である。また、縮小率  $= 0.09741$ 、 $\rho = 0.998 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、 $g_r = 980 \text{ cm}/\text{s}^2$  とすれば、圧力差は (15) 式により次のように求められる。

$$P = 4.04 \times 0.09741 \times 0.998 \times 980 = 384.9 \text{ dyne}/\text{cm}^2$$

次に、流量計の読みの差  $80.2 \text{ mm}$  に対して、較正曲線より  $I_{20} = 0.413 \text{ cm}^3/\text{s}$  を得た。この時の水温は  $21.2^\circ\text{C}$  であるので、 $\varphi_\theta = 0.9717$  である。また砂床断面積は  $F_s = 5 \times 5 = 25 \text{ cm}^2$  であるので、砂床の中の平均流速は、(17)、(18) 式から次のように求められる。



$$v=0.413/0.9717 \times 25=0.01700 \text{ cm/s}$$

したがって、この砂床の伝導係数は、砂床の厚さを  $d_s=1.27 \text{ cm}$  として、(13) 式から次のように算出される。

$$g_o=(0.998/2)(1.27/0.023)(0.01700^2/384.9)=2.069 \times 10^{-5}$$

一方、この場合のレイノルズ数を求めれば、動粘性係数は、 $\nu(21.2^\circ\text{C})=0.009825 \text{ cm}^2/\text{s}$  であるから、次の様に算出される。

$$R_e=0.01700 \times 0.023/0.009825=3.980 \times 10^{-2}$$

これより、 $R_e/2000=1.990 \times 10^{-5}$  となるが、伝導係数  $g_o$  の値は、かなりこれに近い値であることが分る。

## 5.2 $g_o=f(R_e)$ と諸考察

表-4 に示された微小銅球において、粒径範囲の中央値が、 $0.163 \sim 1.705 \text{ mm}$  の中で、10種類の試料を選んで砂床を作製した。また、水槽と受けタンクの水位差を、数 cm から約 87 cm まで調節し、砂床の中の平均流速をおよそ  $0.0021 \sim 0.13 \text{ cm/s}$  の範囲で変化して実験を行なった。前節に述べたように、各実験において砂床の伝導係数とレイノルズ数を求め、その結果を一括して、図-5 に示した。

これによれば、レイノルズ数  $R_e=6.49 \times 10^{-3} \sim 2.29$ 、伝導係数  $g_o=3.38 \times 10^{-6} \sim 1.06 \times 10^{-3}$

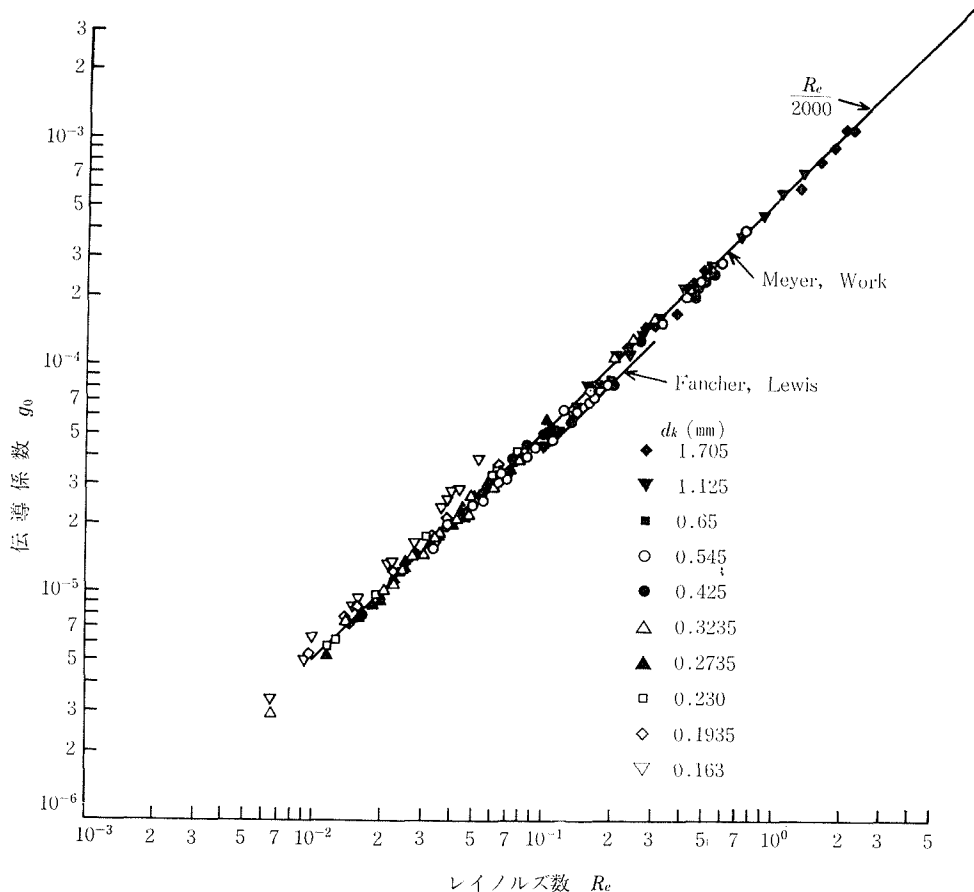


図-5 砂床伝導係数の測定結果

の範囲で、次の (19) 式がかなりよく満足されていることが確かめられた。

$$g_0 = R_e/2000 \quad (19)$$

この結果は、これまでの研究結果、たとえば、Fancher, Lewis が、直径 1 mm の鉛球を用い、油の流れに対して、レイノルズ数 0.1~0.3 の範囲で行なった測定結果や、Meyer, Work が、直径 1.4 mm の鉛球を用い、油の流れに対して、レイノルズ数 0.01~5 の範囲で行なった測定結果などとかなりよく符合している<sup>2)</sup>。

さて、今回の方法で実験を行なうに当たり、注意を要する諸点について考察をする。

砂床に結ばれた傾斜液柱計の示度は、前に述べたように、砂床を吸口として水を流せば、時間経過とともに次第に降下するが、数 10 分後に水を止めても初めの示度にもどらない。ポンプによる水の還流を十分に定常状態にし、流路の途中の漏れを注意深く止めてもそうなることが、水槽に別個に入れた傾斜液柱計によって確かめられ、水槽水面からの蒸発による液面の低下によるものと考えられた。したがって、(16) 式による傾斜液柱計の示度の変化  $\Delta l$  を求めるに当たり、基準となる  $l_0$  は、水を流す前後の値の平均値を採用した。

粒径範囲の小さい微小銅球を用いた砂床の場合は、前に述べた酸化銅による目詰まりの影響が著しく、特に流速の大きいときは、急速に現われる。このため図-4 に示した傾斜圧力計の示度の時間変化において、直線部分が短縮し、以後は時間経過に対して上方に凸の曲線を描いて急速に降下する。このため、直線部分の傾斜が過大に評価され、(16) 式の  $\Delta l$ 、したがって (15) 式の  $P$  が小さくなり、(13) 式による伝導係数  $g_0$  が大きく評価される。図-5 において、粒径の最小のもの (No. 100,  $d_k=0.163$  mm) についての伝導係数の値が、 $R_e/2000$  の直線よりかなり上に出ているのは、主としてこの原因によるものと思われる。なおこのように酸化銅による目詰まりの著しい砂床をマップーとして使用し得るかという懸念もあるが、マップーとしての操作時間は通常 1~2 min の短時間であるので、大きな支障はないものと考えられる。

つぎに、粒径範囲の大きい微小銅球を用いた砂床の場合は、目詰まりの影響は少ないが、伝導係数、したがって伝導率が大きく、圧力差が小さい。これは流速の小さい場合に特にそうである。たとえば、傾斜圧力計の傾斜角を小さくし、拡大率を 20 倍程度にとっても示度の変化幅が 10 mm 以下となることもある。このような場合には、圧力測定の誤差が大きくなり、伝導係数のばらつきも著しく大きくなるので、除外せざるを得なかった。

## 6. あとがき

砂床型マップーはポアソン場の可視アナログとして用いるもので、その動作を解析するためには、砂床の単位面積当りのコンダクタンスとしての砂床伝導率の概念が不可欠であり、またこの概念と流体力学で用いられる摩擦係数 (本研究ではこれの逆数を伝導係数と呼んだ) とを関係づけること、さらに広い範囲の微小金属粒で作られた砂床について、これらを実測することが重要である。我々は、これらの諸点について研究を続けてきたが、今回は、微小銅球の伝導係数を測定し、ほぼ満足し得る結果を得た。

本研究では、砂床の動作領域を充分に含む広い粒度範囲の微小銅球を用意し、これを電磁式振とう機を用いて入念にふるい分けをし、10 段階の砂床を作製した。水流の還流状態、流路の漏れ、水槽水面の変動など流路条件を吟味し、また圧力、流量の測定、温度補正などに充分注意した。その結果、レイノルズ数の範囲、 $R_e=6.49 \times 10^{-3} \sim 2.29$  において、砂床の伝導係数が、 $R_e/2000$  をかなりよく満足することを確かめた。

終りに、ご教示をいただいた、本学機械工学科有江幹男教授、金属工学科石川達雄教授に厚く

御礼を申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) A. D. Moore: "Fields from fluid flow mappers", J. App. Phys., **20** (1949), 790., "Soap-film and sandbed-mapper techniques", J. App. Mech., **17** (1950), 291.  
福岡醇一: フルイド・マップの基礎と応用, 第1報, 応用電気研究所彙報, **10** (1958), 139., フルイド・マップとその応用, 静電気学会誌, **2** (1978), 224.
- 2) G. H. Fancher, J. A. Lewis: "Flow of simple fluids through porous materials", Ind. Engng. Chem., **25** (1933), 1139.  
W. G. Meyer, L. T. Work: "Flow of fluids through beds of packed solids", Trans. Amer. Inst. Chem. Engrs., **33** (1937), 13.  
G. Kling: "Druckverlust von Kugelschüttungen", z. VDI, **84** (1940), 85.
- 3) 粉体工学研究会: 粒度測定技術, 日刊工業新聞社, 東京, 昭 50.