

る方式であるから或程度の抵抗が使用原料にあることを要求せらる。ことに SiO_2 量もその一つであるが利原鑛の品位である SiO_2 20% 前後も含有する鑛石は餘り適當でない。鑛石品位は高い程收得率の點から有利であるが上記の點を考察せねばならぬ。

4. 本方式の見掛けの還元率は 45~50% 程度であり眞の還元率について測定困難なり。最高 70% 程度であらう。

5. かゝる操業方式による塊鐵の品位の特徴としては P, S が大略に於て 0.2% と云ふ高値であり Mn が 0.01~0.02 と云ふ特殊なる成分であつてクルツプレ法によるルツペ中の不純物成分の程度とほぼ一致してゐる。之はルツペも相當なる酸性で操業してゐるし又本還元法に於ても 20% 程度の CaO を添加したるものすら相當酸性の方に傾いてゐることから當然なる結果である。Schackmann und Kring 兩氏の報告によれば例へば 1,525°C, $[P]=0.2\%$ (FeO)=10% なる滓に於て FeO の吸収する (P_2O_5) 即ち $(P_2O_5)_{FeO}$ の生成量は

$$\log(P_2O_5)_{FeO} - 0.05(P_2O_5)_{FeO} = \log \frac{[P](FeO)^8}{[Fe]} = -14.46$$

$$(P_2O_5)_{FeO} = 3.3 \times 10^{-15}\%$$

となり FeO が吸収する (P_2O_5) の量は 10^{-15} の次數と

なると云ふ。本還元爐に於ても反應溫度は 1,500°~1,800°C になり (FeO) も 10% 附近なりと思推せらるゝ (計算値参照) を以て $(P_2O_5)_{FeO}$ の生成の可能性もほぼ同量なることは推せられる。即ち塊鐵中に $[P]$ の大なる理であると思ふ。 Mn 量の僅少なることは同じ理由でこの反應方式に影響せらるゝところ大であるが原鑛石ことに利原鑛には殆ど 1.0% 以下 (MnO) であることにもよる。

いづれにもせよ Mn, P, S の特色は之を原料とする製鋼作業に大なる影響を及ぼすものであることは言を俟たない。

6. 然し本方式が採用する操作法を冶金的に検討せば爐壁の損傷を少くして、而も高品位の鐵、鋼 (低炭素) を製造するに便利であり、單時間に小單位の鐵量を還元せるものより逐次取り出し行く方法なるを以て、こゝに自ら生ずる特殊性を發見せずには居られない。この點からもかゝる直接鋼が次の之を原料とせる製鋼法及び鋼の質に及ぼす影響は注意に値する。

次報にこの塊鐵を原料として使用すべき工業的製産方式の點と之を用ひたる製鋼について述べるつもりである。

本研究に助力を願ひたる日本高周波城津研究所各位に深謝する次第である。

鑄物砂の基礎的研究 (I)¹⁾

(日本鐵鋼協會第 26 回講演大會講演昭. 16. 10. 東京)

河上益夫*

FUNDAMENTAL STUDIES ON THE FOUNDRY SAND (I)

Masuo Kawakami, Rigakuhakusi

SYNOPSIS:—The author's investigation was to cover the permeability, heat conductivity and other properties of the foundry sand, of which the present study concerned the permeability. It was presumed in the investigation that the sand layer consists of an aggregates of capillaries and each capillary is of the same diameter. (1) The diameter, (2) the length and the distributive density of the capillary were taken as the inner-structure constants of the sand layer. The author dealt with the method of determining the three constants and measured experimentally the inner-structure constants relating to each of sand layers discriminated by passing through a sieve and the binary layer of their systematic mixtures. Besides, the author measured the acrial permeability through each of the sand layers, comparatively studied on its relation to the inner-structure constant and referred to the permeability of an aggregate of the "perfect globules."

第一章 砂層の流體透過性

¹⁾ 東京工業大學々報 5(昭 11.99;7(昭 13)357 に發表の「流體透過物に関する研究」を綜括改編の上新に一部補足

* 東京工業大學

I. 緒 論

砂層は多孔質體の一種である。之を空氣又は水が通過する場合にそこに毛細管が多數に存在するものと考へるならば砂層の諸物理的現象は該毛細管構造の研究により正確に闡明される筈である。

従來此の多孔質體に關する方面の解決を企てたものはコロイド學の分野に多く見受けられる。それには2派がある。一は通過物構造を解剖學的に分析觀察するもの²⁾であり他は物理的性質を利用するものである。後者には液體上昇の高さ³⁾、其の上昇速度⁴⁾、蒸氣壓⁵⁾、氣體通過壓⁶⁾、2液界面の通過壓⁷⁾、液體の通過量と空隙率⁸⁾、通過量と電導度⁹⁾、通過する粒末又はコロイド粒子の大きさ¹⁰⁾等より構造を考察したものはあるが何れも缺點がある。

爰に於て著者は砂層に關して次に述ぶる如き内部構造論を提出した。

砂層は毛細管の集束體である。各毛細管は同形にして其の斷面は同徑圓である。毛細管の(1)半徑、(2)長さ並に(3)分布密度即ち單位斷面に於ける毛細管の箇數なる3種物性の數量を砂層の構造恒數と稱する。此の恒數に依りて砂層の空隙構造を數量的に表はすこととする。

該3種の物性は空隙構造を表はすに最も妥當である。此の構造論によれば極めて複雑なる多孔質體をも簡潔明瞭に且定量的に表現し得るのみならず總ての砂層を同一標準下に綜括統一することが出来る。而も此の3種の數量は後述するが如く極めて簡単に測定し得る。尤も斯くして決定せられた3種恒數を完全に具備するものは恐らく實在せぬであらうが、實在する砂層は此の3種恒數を正確に具備する所の理想體に正しく相應するものであると考へられる。

¹⁾ Schulze, K.: Kolloid. Z. 44 (1928) 120

²⁾ Schulze, K.: Kolloid Z. 37 (1925) 10, 42 (1927) 3
Bartell, F. E. & H. J. Osterhoff: J. phys. Chem. 32 (1928) 1553; A. W. Porter: Phil. Mag. 7. (1929) 624

³⁾ Lucas, R.: Kolloid Z. 23 (1918) 15

⁴⁾ Schulze K.: Kolloid Z., 36 (1925) 65; 39 (1926) 362; 49 (1929) 265; 50 (1930) 106; 51 (1930) 299

⁵⁾ Bechhold, H.: Zeits. phys. Chem. 60 (1907) 257; ibid., 64 (1908) 328; Einstein, A. & H. Mulsam: Deutsch med. Wochschr. 49 (1923) 1012

⁶⁾ Erbe: Kolloid. Z. 63 (1933) 277; Pisa: ibid, 139

⁷⁾ Bartell, F. E. & H. J. Osterhof: J. phys. Chem. 32 (1928) 1553; Pickard, J. A.: 'Filters & Filtration' (1929) 45

⁸⁾ Marshall, C. E.: J. Soc. Chem. Ind., 32 (1929) 373 T

⁹⁾ Bechhold, H.: Zeits. phys. Chem., 60 (1907) 257; Pickard: 'Filters & Filtration' 45; Freundlich; 'Kapillar Chemie' (1922) 1085

II. 構造恒數の決定

砂層を構成する毛細管の半徑、長さ及び分布密度なる3種の構造恒數を決定せんが爲に著者は次の2方法を提案した。

第1方法 此の方法は液體の通過量速度、電導度及び最小通過時間を測定して構造恒數を決定するに在る。今或砂層をとり其の毛細管の半徑を $r\text{ cm}$ 、その長さを $l\text{ cm}$ 、又毛細管數を n 本とし、是に就きて次の3種の測定を行ふものとする。

1. **通過量速度の測定** 或る液體を用ひて通過量速度を測定すれば夫は Poiseuille の定律に依り次式で表はされる。

$$q = n\pi r^4 P / 8\eta l \quad \text{或は} \quad nr^4/l = 8\eta q / \pi P \quad \dots (1)$$

式中 q は通過量速度即ち單位時間に就ての通過量、 P は液體の靜水壓、 η は液體の粘性係數である。然らば(1)式に於て左邊は未知であるが右邊は測定し得らるゝ數量である。

2. **電導度の測定** 砂層に比電導度 k の電解質溶液を浸潤せしめたる場合の電導度を L とせば次式が成立する。

$$L = n\pi r^2 k / l \quad \text{或は} \quad nr^2/l = L / \pi k \quad \dots (2)$$

(2)式に於て左邊は未知であるが、右邊は測定し得らるゝ數値である。

3. **最速通過時間の測定** 毛細管内の流動が靜流状態であるならば管軸よりの距離 $a\text{ cm}$ に於ける速度 u は次の如く表はされる。 $u = (P/4\eta)(r^2 - a^2)$ 。管軸に於ける速度を u_0 とせば $a=0$ の場合の u である故に $u_0 = (P/4\eta)r^2$ 即ち流速は管軸に於て最大である。1本の毛細管に就ての單位時間に於ける流量を q_1 とせば Poiseuille の式より $q_1 = \pi r^4 P / 8\eta l$ を得、 q_1 を毛細管の斷面積 πr^2 で割れば平均速度 u_m を得る。即ち $u_m = q_1 / \pi r^2 = r^2 P / 8\eta l$ 従つて $u_0 = 2u_m$ として最高速度を以て毛細管を通過する時間を最速通過時間と稱し θ (秒)を以て表はす。この最速通過時間の決定は色素を用ひて肉眼に依つて直接に觀測するか或は電解質溶液を用ひて電導度の變化より求める等の方法があるが本實驗では色素を用ひる方法を採用した。

$$u_0 = l/\theta \quad \therefore r^2/l^2 = 4\eta/P\theta \quad \dots (3)$$

従つて(3)式に於て左邊は未知であるが右邊は測定し得らるゝ値である。

以上の如くにして3種の實驗を行ひ(1),(2)及び(3)の3式を求めるならば之等より毛細管の半徑 r 、長さ l 及び

毛細管の分布密度 n を算出することが出来る。

第2方法 第1方法の電導度の代りに電気滲透を測る。其の他は第1方法と同様である。

4. 電気滲透の測定 電気滲透は次式で表はされる。

$$nr^2/l = 4\eta Q/\zeta DE \dots\dots\dots(4)$$

式中 ζ は電気2重層の電位差であつて電気脈動或は流動電圧より求められる。D は透電恒数, E は電圧, Q は電気滲透量。(4) 式の左邊は未知, 右邊は既知である。此の(4) 式と前の(1) 及び(3) 式より第1方法と同様にして r, l 及び n を求める事が出来る。

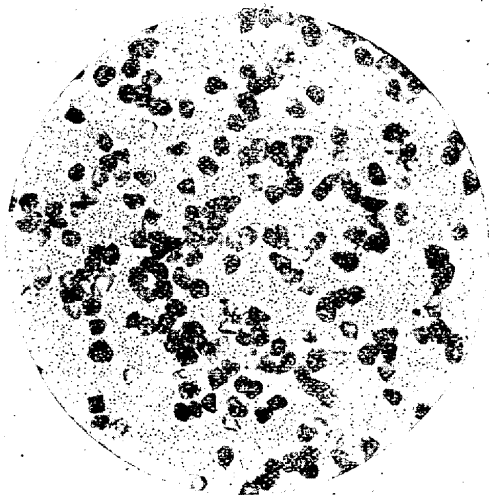
III. 單純砂層の構造恒数決定

1. 試料及び實驗裝置

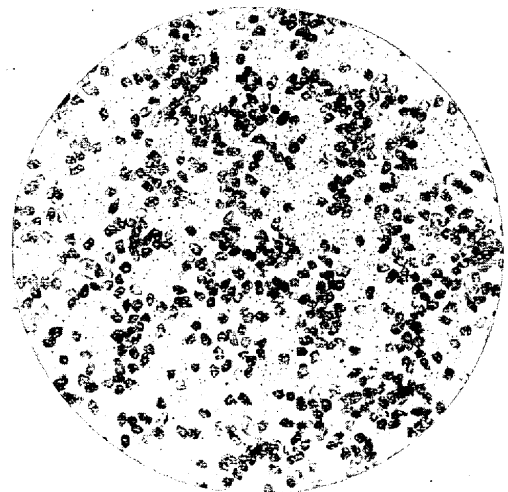
試料は海岸より採取せる清淨なものである。之を Taylor 篩に依りて A=20~30メツシ, B=30~40メツシ, C=40~50メツシ, D=50~60メツシ, E=60~70メツシ,

F=70~80メツシ, G=80~90メツシ, H=90~100メツシの8種に篩別して實驗に供した。各試料の擴大寫眞を第1圖に掲げた。

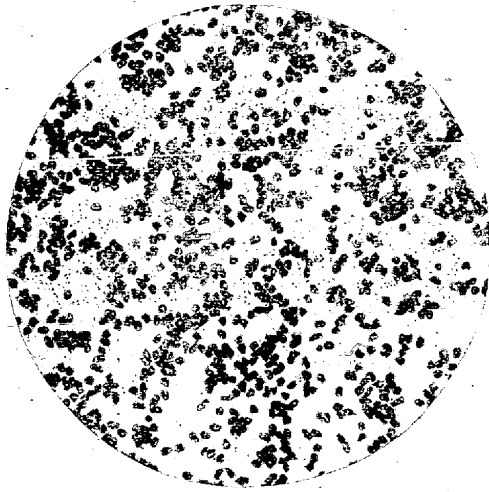
之等各種の砂に就きて先づ第1に水の通過量速度の測定を第2圖の裝置で行つた。裝置の主體は 25°C の恒溫槽中に保つた。圖中 A は直徑 3.90cm, 長さ 25cm のガラス管で其の下端に金網と布片とを重ね合せて張り付けた。A に試料を入れる。A の上部に皿型の Over flow B を設けた。水は長き銅製蛇管を通過して 25°C に調整され濾紙を通過して夾雜物除去の後, C を經て B に出で A 内の試料を通過し Over flow D に至り之よりメスフラスコ E 中に落下する。試料の砂は豫め熱湯中に於て充分に煮沸し更に真空下に於て吸着ガスの排除を行つた。實驗に使用した水は 10° 前後のものであつた。之をその儘使用すれば恒溫槽中で 25° に加熱される時に溶解ガスが泡出し之が試料粒子の表面並に裝置の諸部分に簇生して測定を妨げる。よつて



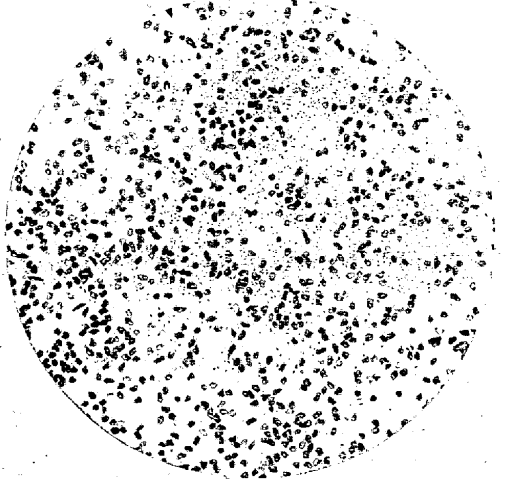
B x4



D x4



F x4



H x4

第 1 圖

使用水は豫め 70°~80° に加熱し水流ポンプにより減壓沸騰せしむる事 30mm にして溶解ガスの排除を完全ならしめて後使用した。

水が Over flow B より流下し試料を経て Over flow D に至るまでの流動は B D 兩 Over flow 間の水頭差に相當する靜水壓に歸因する。今兩水頭の差を $p\text{ cm}$ とせば (1) 式に於ける靜水壓 $P=hp$ であり P を $c.g.s.$ 單位で表せば $k=980$ となる。便宜上是より以後は水頭差 $p\text{ cm}$ を以て靜水壓を表示することとする。此の靜水壓 p は B, D 兩 Over flow 間の諸抵抗に比例して配分せらるべきものである故に試料中の通過抵抗を R_a とし試料以外の B, D 間の全抵抗を R_b とし R_a 及び R_b に配分せらるべき靜水壓を夫々 p_a 及び p_b とせば通過量速度 q は次の関係をもつことになる。

$$q = p_a/R_a = p_b/R_b = (p_a + p_b)/(R_a + R_b) = p/(R_a + R_b)$$

装置の通過抵抗 R_b は僅少であつて試料の抵抗 R_a に比すれば一般に無視し得る程度のものである。例へば 20~30 メツシの砂層で厚さ 5 cm のものは本研究を通じて通過抵抗の小さいものゝ一つである。此の通過抵抗は $R_a = 2.75$ であつて次の豫備實驗 1 より求めらるゝ如く装置の抵抗は $R_b = 0.086$ である。されば一般に R_b は無視して差支ない。爰に於て本研究を通じて上式を次の如く變形して用ひることとした。

$$q = p/R_a$$

通過量速度の本格的測定に先立ち先づ次の 7 種の豫備實驗を行つた。

2. 豫備實驗

豫備實驗 1. 装置の通過抵抗測定。通過器内に試料を置かぬ場合の水の通過量を測り装置の抵抗を求めた。第 2 圖に於ける B, D 兩水頭差を種々に變へて求めた比抵抗 R_b は 0.086 であつた。

豫備實驗 2. 多孔質體には液體の通過に伴ひ通過抵抗の變化するものと然らざるものがある。前者を壓縮體 (Compressible substance) と呼び、後者を抗縮體 (Incompressible substance) と呼ぶ。濾紙や布類の如き多孔質體は水の通過に伴ひて漸次に壓縮し抵抗を増加するものである。隨つて

壓縮體に屬する。之に反し砂層は次の實驗結果が示す如く水の通過全量の多寡に關せずその通過抵抗は終始不變であるにより抗縮體に屬する。

40~50 メツシ及び 80~90 メツシの砂層に就て 3h 連続して水の通過を行ひ通過量速度を測り、次で一晝夜放置後更に測つてみた。その結果は第 1 表に示す如くである。

第 1 表 實驗溫度 25°

砂の種類 メツシ	厚さ d(cm)	靜水壓 p(cm)	受器 容量 V(cc)	通過時間 θ (s) (觀測時)					
				0mn	30mn	60mn	120mn	180mn	24h
C.40~50	20	20	100	72.2	72.2	72.0	71.9	71.8	71.4
G.80~90	10	20	50	58.4	58.1	58.0	58.0	57.7	57.8

此の結果に依れば水の通過量速度は終始不變であることが分る。即ち水の通過抵抗は水の通過全量或は時間の経過に無關係に一定であると云ひ得る。水道の濾層に於けるが如く砂粒に汚泥或は藻類が附着する場合は本實驗と大いに趣を異にすることは云ふまでもない。

豫備實驗 3. 砂を A 器内に納め下方より水を吹き上げてみる。之によつて砂層を攪亂することが出来る。そして自然の沈定を待つて通過量速度を測定した。攪亂を幾回行つても砂層の厚さには殆ど變化なく通過量速度は殆ど變化しない。又之等は水の通過量の多寡に依つても變化しない。されば水中に於ては砂層は常に一定の厚さに沈定するものであり該厚さ並に沈定状態は水の通過によつて影響をうけぬことが分つた。

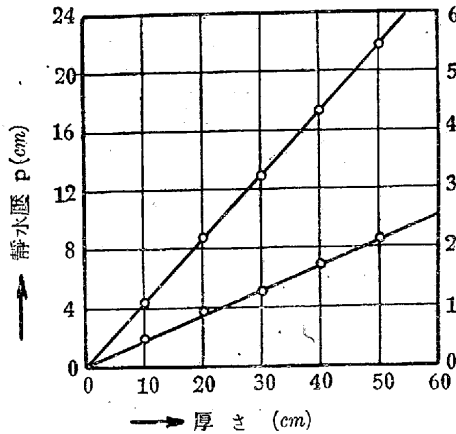
豫備實驗 4. 靜水壓と通過量の關係。水が砂層中を流動する場合に其が靜線流動 (Stationary flow 或は laminar flow) であるならば Poiseuille の定律が成立すべく、然らずして混亂流動 (Turbulent flow) であるならば此の定律より偏異する筈である。前記(1)式に示した Poiseuille の式を見るに n, r, l 及び η は水及び砂層に關して常に一定である故に通過量 q は靜水壓 p に比例せねばならぬ。此の比例關係が成立するや否やを検定せんために 20~30 メツシ及び 80~90 メツシの 2 種の砂層 5 cm に就て實驗を行

第 2 表 實驗溫度 25°

砂の種類 (メツシ)	厚さ d(cm)	靜水壓 p(cm)	受器容量 V(cc)	通過時間 θ (s)	通過量速度 q(cc/s)
A	10	10	250	57.6	4.34
		20	500	57.2	8.75
		30	500	39.5	12.86
		40	1,000	57.7	17.30
		50	1,000	45.6	21.93
G	10	10	25	57.8	0.432
		20	50	57.7	0.866
		30	50	39.0	1.28
		40	100	50.0	1.73
		50	100	45.7	2.19

つた。其の結果を第3表及び第3圖に示す。

此の結果に依れば最も粗大である所の 20~30メツシの砂に於ても通過量は静水圧に比例して静水圧が最高48cmに至るも尚 Poiseuilleの式に正しく従ふにより静線流動である。此の砂に



第3圖

比べれば他のメツシの砂は一層細かである故に少くとも静水圧 50cm 以内に於ては何れも静線流動である。

豫備実験 5. 砂層の厚さと通過量速度との関係。通過量速度 q は砂層の厚さに逆比例する。40~50メツシ及び 80~90メツシの砂層に就ての実験結果を第3表に示した。

他の条件が一定ならば $q \times d$ は常に一定であるべき筈である。従つて通過量速度 q は砂層の厚さ d に正確に逆比例することを知らる。

第3表 実験温度 25°

砂の種類 (メツシ)	厚さ d (cm)	静水圧 p (cm)	受器容量 V (cc)	通過時間 (5回平均) θ (s)	通過量速度 q (cc/s)	$q \times d$
C	5	20	250	44.9	5.56	27.8
	10	20	100	36.2	2.76	27.6
	80~90	15	100	54.0	1.58	27.7
	20	20	100	72.3	1.38	27.6
	25	20	50	45.0	1.11	27.8
G	5	40	200	57.7	3.46	17.3
	10	40	100	58.0	1.72	17.2
	80~90	15	100	87.7	1.14	17.8
	20	40	50	57.8	0.863	17.3
	25	40	50	72.2	0.692	17.3

豫備実験 6. 砂層の断面積と通過量速度との関係。通過量速度 q は砂層の断面積に比し通過器の壁質には無関係である。通過器 (第2圖 A) は一般には硝子管を用いたが壁質の影響を見ん爲に別にセメント製管及び黄銅管を用ひて見た。又此等の管径を種々に變へても見た。40~50メツシの砂に就ての結果を第4表に示す。之に依れば通過量速度 q を試料の断面積 A を以て割りたる商 q/A は断面積の大小或は管壁質の如何に全く無関係である。

豫備実験 7. 温度と通過量速度との関係。通過量速度は温度の上昇に伴つて増加する。それは水の粘度が變化する

ことに歸因する。Poiseuilleの式に依れば $q = n\pi r^4 P / 8\eta l$ である。この右項に於て温度に偏寄する數量は粘性係數 η のみである。温度の變化に伴つて通過量速度 q が變化するものであるならばそれは粘度 η の變化に歸因すべきであらう。此の點を確めんが爲に温度を 10°, 20°, 25°, 30° 及び 40° に保つて通過量速度を測つて見た。其の結果を第5表に示す。之に依れば q/η は温度に無関係である故に温度の變化によつて通過量速度 q の變化する原因は一に粘度に歸因する。

第4表 実験温度 25°

砂の種類 (メツシ)	通過器の種類	厚さ d (cm)	静水圧 p (cm)	受器容量 V (cc)	通過時間 θ (s)	通過量速度 q (cc/s)	q/A		
								直徑 D (cm)	断面積 A (cm ²)
硝子管		2.12	11.95	10	20	50	60.1	0.832	0.236
		3.90	11.95	10	20	100	35.7	2.80	0.234
		5.62	24.80	10	20	250	42.6	5.88	0.237
C		7.84	47.60	10	20	500	44.9	11.12	0.234
セメント管 40~50		2.84	6.33	10	20	100	67.6	1.48	0.234
		4.15	13.51	10	20	200	63.1	3.17	0.253
		7.44	43.5	10	20	500	48.9	10.21	0.253
黄銅管		3.21	8.08	10	20	100	52.6	1.903	0.236
		5.73	25.76	10	20	250	41.5	6.03	0.234
		8.35	54.70	10	20	500	38.9	12.85	0.235

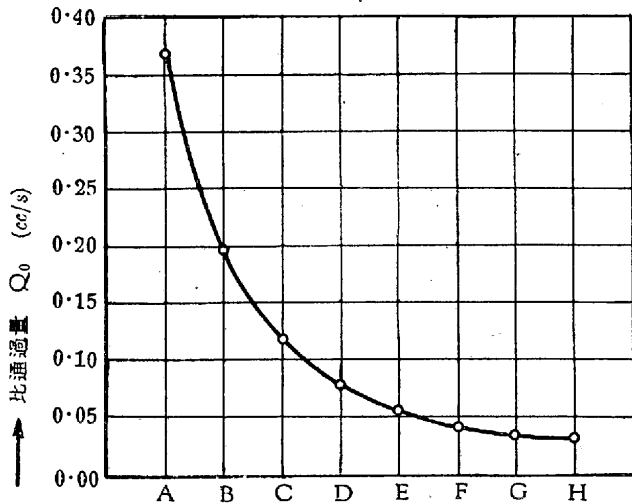
第5表

砂の種類 (メツシ)	厚さ d (cm)	静水圧 P (cm)	温度 t (°)	水の粘性係數 η	受器容量 V (cc)	通過時間 θ (s)	通過量速度 q (cc/s)	q/η
C	10	10	10	0.01306	50	52.4	0.954	0.01243
	10	10	15	0.01141	50	43.3	1.141	0.01237
	10	10	20	0.01005	100	80.9	1.240	0.01245
	10	10	25	0.00894	100	71.5	1.403	0.01251
	40~50	10	10	30	0.00802	100	63.3	1.579
40~50	10	10	35	0.00721	100	58.8	1.700	0.01224
	10	10	40	0.00721	100	52.1	1.920	0.01248

3. 水の通過本実験

以上の7種の豫備実験に依つて通過量速度に對する諸条件の影響を知りたるを以て各メツシの砂に就て本格的の實驗を行つた。砂層の厚さ d を 5, 10, 15, 20cm とし静水圧 p を 10, 20, 30, 40cm とし Over flow (第2圖 D) よりの溢出水が受器 (E) の一定容積 V cc を充滿するに要する時間即ち該容積に相當する水が砂層を通過するに要する時間を同一条件下に5回宛測定し其の平均値 θ を求め之より通過量速度 q_0 即ち 1s に通過する水の量を求めた。此の通過量速度 q は或る厚さ d cm 並に或る断面積 A cm² の砂層を静水圧 p cm の許に 1s に通過する水の量である。然るに豫備実験 4, 5 及び 6 に依れば通過量速度は静水圧並に砂層の断面積に比例し砂層の厚さに逆比例する事を知るに依り諸条件下の測定値より計算によりて單位断面

並に單位厚さの通過層を單位靜水壓下に通過する處の水の量を算出し得る。之を比通過量と名付け Q_0 を以て表はした。この Q_0 を第4圖に示した。 Q_0 の逆数を比通過抵抗と呼び R_0 を以て表した。同種の砂ならば條件を種々に變じても比通過量は變化しない。従つて Q_0 を知れば種々の條件下に於ける水の通過量速度を計算により簡単に求め得る。例へば厚さ $d\text{cm}$ 、斷面積 $A\text{cm}^2$ の砂層を溫度 $t^\circ\text{C}$ の水が靜水壓 $p\text{cm}$ の許に透過するならば通過量速度 q_t 即ち



第4圖

1s に此の通過層を通過する水の量は次式に依つて算出することが出来る。

$$q_t = (Q_0 A p / d) \times (\eta_{25} / \eta_t)$$

式中 η_{25} 及び η_t は 25° 及び t° に於ける水の粘性係數である。

4. 電導度の測定

乾燥砂を 1N 鹽化カリ液に浸した後、液と共に通過器(第2圖A)に移し其の上下兩面に白金板を當て 25° に於て電導度を測定した。鹽化カリ液は使用に先立つて眞空に保ち溶解空氣を完全に排除し鹽化カリ液を幾回も新しく取換へて測つた。又砂層の厚さを 5, 10, 15, 20cm と變へて見た。測定結果の例を第6表に示した。此の結果によれば

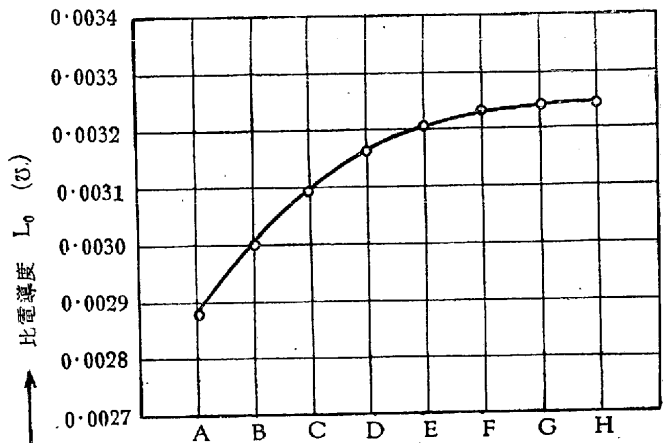
第6表 實驗溫度 25°

砂の種類 (メツシ)	厚さ $d(\text{cm})$	電氣抵抗 $W(\Omega/\text{cm}^2)$	比抵抗 $W_0(\Omega/\text{m}^2)$	比抵抗の平均 $W_0(\Omega/\text{cm}^2)$	比電導度 $L_0(\sigma)$
A 20~30	5	14.50	34.65	34.80	0.0288
	10	29.23	34.93		
	15	43.77	34.88		
	20	58.07	34.72		
D 50~60	5	13.31	31.83	31.78	0.0316
	10	26.62	31.80		
	15	39.71	31.63		
	20	53.40	31.89		

ば電氣抵抗は砂層の厚さに比例する。砂層の下面と白金極とは布片を以て距てられて居るが布片の抵抗は無視して差

第7表

砂の種類 (メツシ)	比電導度 $L_0(\sigma)$	砂の種類 (メツシ)	比電導度 $L_0(\sigma)$
A20~30	0.0288	E60~70	0.0320
B30~40	0.0300	F70~80	0.0323
C40~50	0.0309	G80~90	0.0325
D50~60	0.0316	H90~100	0.0326



第5圖

支ない事が分る。各種の砂の比電氣抵抗 W_0 或は比電導度 L_0 を第7表並に第5圖に示した。

5. 最速通過時間の決定

已に2に記したやうに液體が毛細管中を通過する際の流速は管斷面内の部分に依つて異なる。管軸に於て最大であり管壁に近づくに従つて減少し遂に壁に於て零になる。管の中心軸に於ける最高速度は管斷面の平均流速の正に2倍である。かくて液體が毛細管を通過する時間は中心軸に於て最小である。此の最小時間を求めんには種々の方法があるが最も簡便なる方法は色素を流して肉眼的に觀測するか或は電解質溶液を流して電氣抵抗の變化より求むるか靜電容量の變化より求むるか等である。本實驗に於ては色素による方法を採用した。エオシンの 0.1% 液を造り置き通過量速度測定に於けるが如く水をし置きエオシン液をピペットにとりて砂の直上に持ち來たして注下する。エオシン液が流下して砂の上面に接した瞬間から砂層の下面に現はれるまでの時間を觀測する。

此の時間は最高線速度を以て毛細管中を通過するに要せられるもので之を θ で表はし最速通過時間と呼ぶことにする。最速通過時間を以て毛細管の長さを割れば最高線速度が得られるが今は時間の測定だけにとどめる。此の測定は通過量速度測定の時と同時に行つた。第8表には 20~30

メツシ及び 60~70メツシの 2 種の砂層につき同一条件下に 5 回の測定を行つた平均値 θ を例示した。前記の (3) 式を書き換へれば

$$P\theta/l^2 = 4\eta/r^2 \dots\dots\dots (5)$$

となる。(5) 式に於て P は静水圧, θ は最速通過時間即ち最高線速度を以て砂層を通過するに要する時間, l は毛細管の長さ, η は水の粘性係数, r は毛細管の半径である。r 及び η は P 又は l に依つて變化する事なき故に (5) の右邊は砂の種類のみによつて定まるべき恒數である。今砂層の厚さが 1cm の時の毛細管の長さを l_0 , 静水圧 1cm の p を p_0 , その時の通過時間を θ_0 とせば上述の理由によつて

$$p\theta/l^2 = p_0\theta_0/l_0^2 = \text{恒數} \dots\dots\dots (6)$$

毛細管の長さ l は砂層の厚さ d に比例すべきであり p=1cm, d=1cm の時に $\theta = \theta_0$ である故に

$$p\theta/d^2 = \theta_0 = \text{恒數} \dots\dots\dots (7)$$

即ち $p\theta/d^2$ は恒數であつてそれは丁度砂層の厚さ d が 1cm で静水圧が 1cm の時に最高線速度を以て毛細管を通過する時間 θ_0 に等しいことになる。此の θ_0 を標準最速通過時間と呼ぶこととし之を第 9 表に掲げた。第 8 表に掲げた實驗結果に依れば p 及び d を種々に變へても $p\theta/d^2$ は常に恒數である事が實證される。即ち (7) 式が成立する事が分る。

第 8 表 實驗溫度 25°

砂の種類 (メツシ)	厚さ d(cm)	静水圧 p(cm)	通過時間 θ (s)	$P\theta/d^2 = \theta_0$	θ_0 の平均
A 20~30	10	10	8'35	0'835	0'832
	15	10	18'84	0'837	
	15	20	9'51	0'841	
	20	10	33'41	0'835	
	20	20	16'54	0'827	
E 60~70	20	30	10'98	0'826	5'76
	5	10	14'35	5'75	
	10	10	56'77	5'68	
	10	20	28'83	5'77	
	15	30	43'12	5'75	
	20	40	58'33	5'83	

第 9 表

砂の種類 (メツシ)	標準最速通過時間 θ_0 (s)	砂の種類 (メツシ)	標準最速通過時間 θ_0 (s)
A20~30	0'832	E60~70	5'76
B30~40	1'55	F70~80	7'06
C40~50	2'77	G80~90	9'00
D50~60	4'33	H90~100	11'21

6) 總括及び構造恒數の計算

抑も本研究は次の假定に立脚して居る。砂層は毛細管の集束體でありそれは一定の半径 r, 長さ l 並に分布密度 n をもつものであると云ふ。此の 3 種の數値を構造恒數と名

づけた。本研究は此の構造恒數の決定を第 1 の目的とするが以上の諸實驗に依り砂層の諸性質をも併せて知ることが出來た。今構造恒數を決定せん爲に以上の諸實驗結果を總括して見る。それには砂層の標準體として單位立方體をとり標準狀態として静水圧 1cm, 溫度 25° をえらぶ。此の場合の通過量速度は比通過量 Q_0 であり其の逆數は比通過抵抗 R_0 である。又之を最高線速度を以て通過する時間を標準最速通過時間と名づけ θ_0 で表はすこと前記の如くである。該標準體に 1N 鹽化カリ液を充滿したる際の電氣傳導度或は抵抗を比電導度又は比電氣抵抗と呼び L_0 或は W_0 を以て表す。以上の標準體に就て標準条件下の數値があれば如何なる場合の數値をも容易に算出することが出來ること既述の如くである。第 10 表には之等の標準數値及び之より算出したる構造恒數を納めた。

第 10 表

砂の種類 (メツシ)	比通過量 Q_0 (cc/s)	比通過抵抗 R_0	比電導度 L_0 (Ω)	比電氣抵抗 W_0 (Ω)	標準最速通過時間 θ_0 (s/cm)	構造恒數		
						半径 r(cm)	比長 l/d	密度 n(本/cm ²)
A.20-30	0'364	2'75	0'00281	34'80	0'832	0'0102	1'54	1220
B.30-40	0'192	5'25	0'00299	33'40	1'550	0'00724	1'49	2410
C.40-50	0'1157	8'65	0'00308	32'42	2'77	0'00552	1'53	4400
D.50-60	0'0754	13'27	0'00316	31'78	4'33	0'00443	1'53	7000
E.60-70	0'0578	17'60	0'00320	31'24	5'76	0'00383	1'53	9450
F.70-80	0'0435	23'00	0'00323	30'98	7'40	0'00332	1'51	12200
G.80-90	0'0361	27'75	0'00324	30'78	9'04	0'00302	1'50	15300
H.90-100	0'0308	32'50	0'00325	30'66	11'10	0'00278	1'53	18400

前記の (1), (2) 及び (3) 式を用ひ諸恒數を計算する例を次に示して見る。

(1) 式 $nr^4/l = 8\eta Q/P\pi$ に於て粘性係数 η は 25° の値 0'00894 を用ひ静水圧は水頭差 1cm である故に $P = 981$ dyne/cm² とした, 従つて (1) 式 $nr^4/l = 8 \times 0'00894 \times Q_0 / (981 \times 3'141)$

(2) 式 $nr^2/l = L/\pi k$ に於て k は 25° に於ける 1N 鹽化カリ液の比電導度 0'11180 を用ひた, 従つて (2) $nr^2/l = L_0 / (3'1416 \times 0'11180)$

(3) 式 $r^2/l^2 = 4\eta/P\theta = 4 \times 0'00894$

以上の 3 式より算出される處の 3 恒數の中 n は 1cm² 中に存在する毛細管の數であり l は通過體の厚さ, d=1cm に就ての毛細管の長さである。之は l/d として表し得べく毛細管の屈曲度を表現するものである。

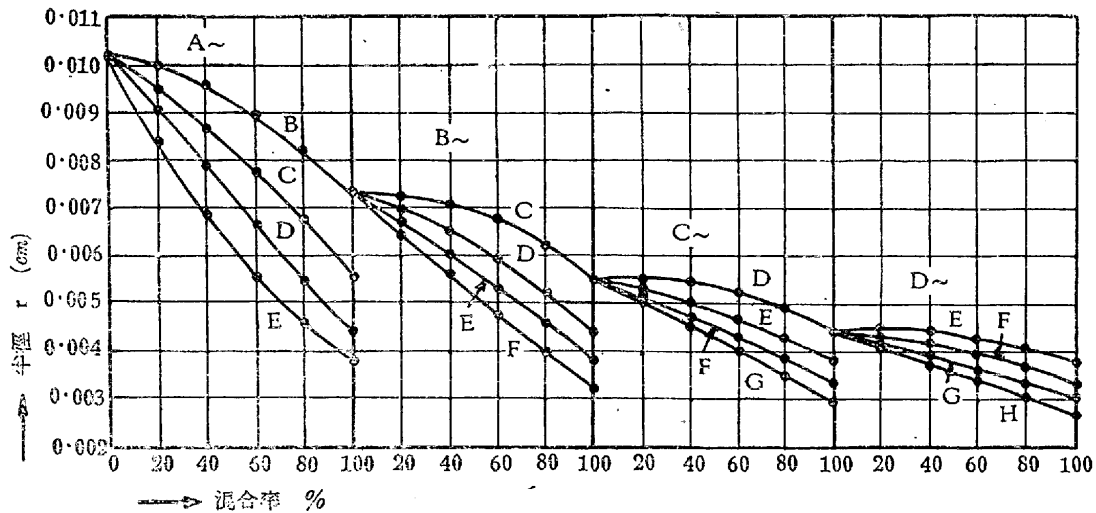
構造恒數を見れば砂粒が細小なるに伴ひ毛細管の半径 r は減少し同時に單位斷面に分布する毛細管數 n が増加する。しかし屈曲度 l/d の殆ど變化なきは砂粒が相似形的關係を有するによる。

IV. 混合砂層

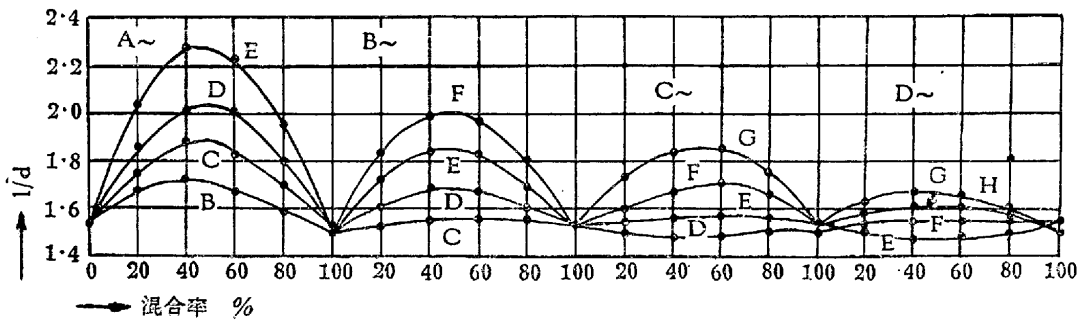
混合砂層は各メツシの單純砂を2種類宛混合したものである。混合の割合は重量比で 20, 40, 60 及び 80% とした。本研究に使用の砂に就ては重量比は容積比に等しい。此の混合物に就て通過量速度、電導度及び最速通過時間を測定した。測定方法は前記の單純砂の場合と全く同様である。之より得た比通過量 Q_0 、比電導度 I_0 及び標準最速通過

時間 θ_0 の3基準數値より構造恒數の算出を行ひ第 6, 7, 8 圖に圖示した。

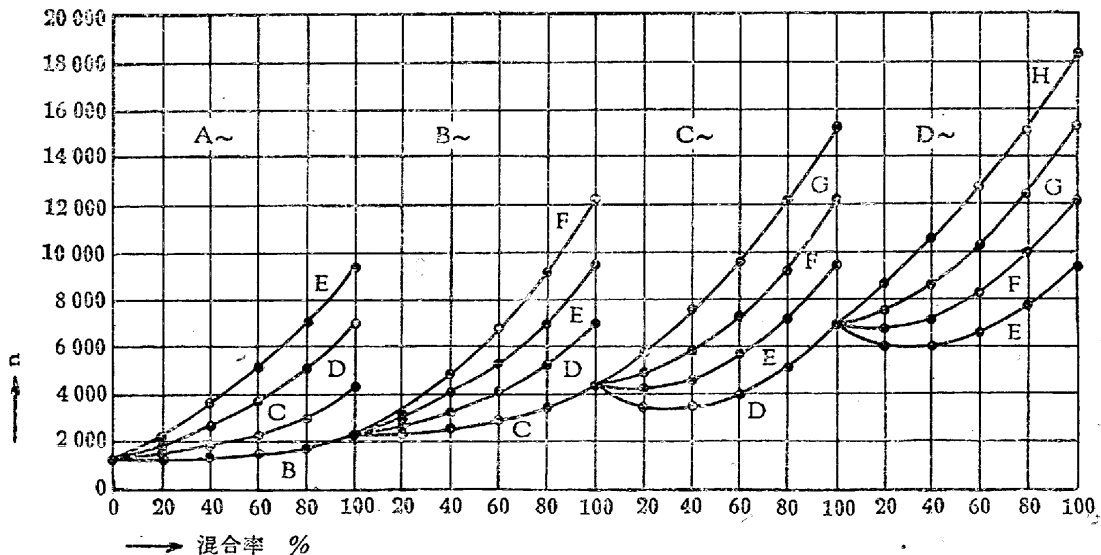
混合砂層の毛細管の半徑は第 6 圖より明かなる如く混合砂粒徑の大きさの差異の小なる場合は毛細管徑が平均値より大きく差異の増大に伴ひ平均値に接近し或は更に平均値より小にあらはれる。之は粒の大きさの差異が少い場合は相互に粒子間を押しひろげ又その差異が大になれば小徑粒が大徑粒の空隙を充實する傾向を有する爲に上の結果が生



第 6 圖



第 7 圖



第 8 圖

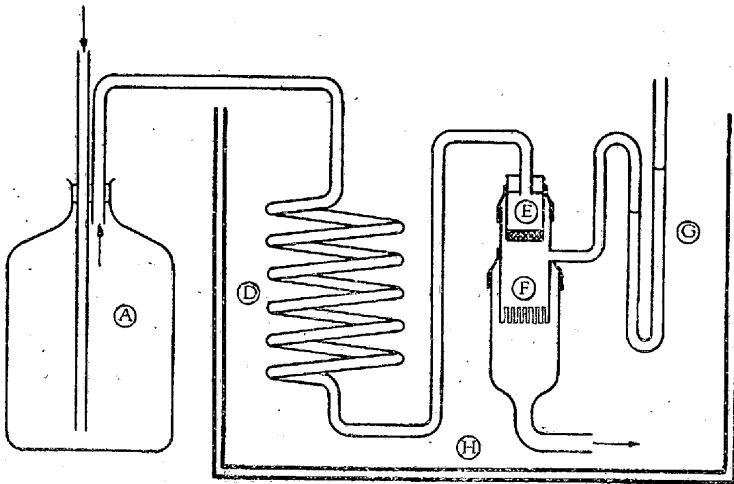
するものである。

毛細管の長さ l/d は第7圖に示さるゝ如く平均値より過大或は過小に現はれる。混合砂粒の径の差異が大なる程偏異も大きくなり混合率 50% 附近に極大又は極小がある。

毛細管の分布密度即ち單位断面に於ける毛細管數 n は第8圖に示さるゝ如く平均値より少くあらはれる。

V. 空氣の通過量速度

1. 實驗裝置



第9圖

砂層對する水の通過量速度は既に記した。此處では空氣の通過量速度についての測定結果を述べる。

實驗裝置の主要部分は第9圖に略示した如き構造のものである。約 10l 入の空氣貯溜槽 A に水道水を導き一定速度で水を送れば空氣は一定速度で貯溜槽を出て乾燥塔(圖に省略)を経て D に入る。D は内徑 2mm の銅製蛇管で恒溫槽 H 中に在る。恒溫槽 H は 25° に一定に保つた。乾燥塔は鹽化カルシウムを充填してある。空氣が此の塔で乾燥され銅製蛇管を通過する間に 25° になり次で E に入る。E は粗い砂粒の層で之を通過すれば混亂狀態の空氣流が靜流狀態となり砂層 F を通

過す。E と F 間の空隙に壓力計 G が接続されて居る。此の壓力計の示す壓力差は空氣流が通過體を通過するに要せられる壓力である。E 及び F は共に硝子管の底に木綿を張り更に其外側に金網を張つたものである。E の通過面積は 1cm^2 に選んだ。

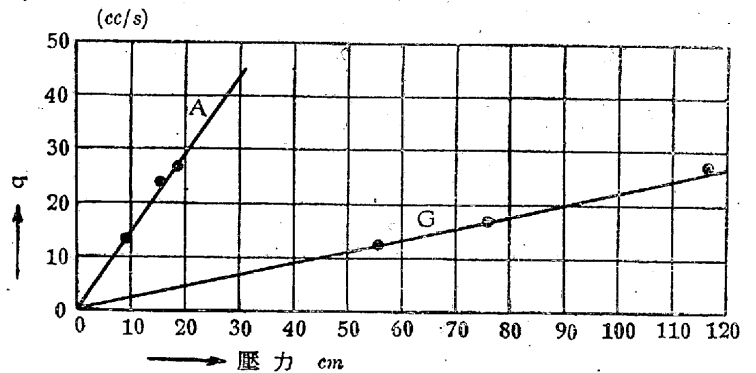
2. 單純砂層に関する測定

砂粒は前實驗⁶⁾に使用したものである。

空氣の壓力差と通過量速度との關係を先づ求めて見た。壓力差は壓力計の水柱高を cm で表はし之を P とした。

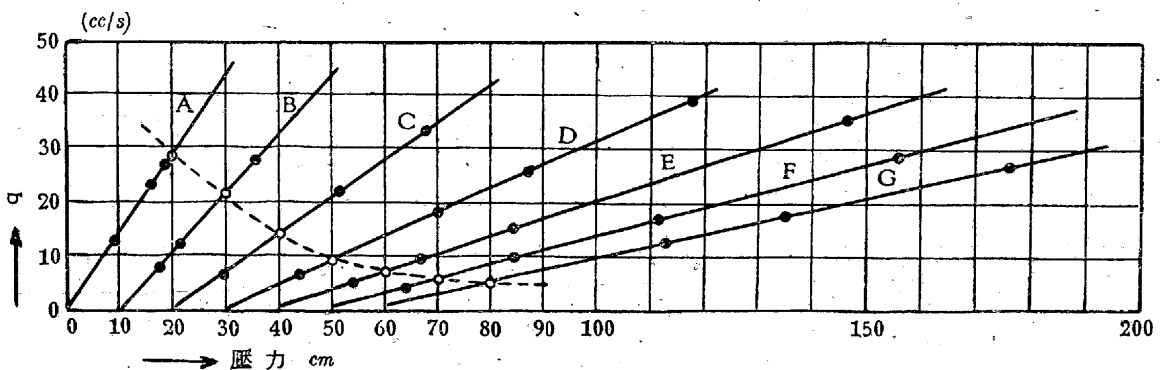
空氣の通過量速度を一般に $q(\text{cc/s})$ で表はせば q は砂の種類、空氣壓力 P 、砂層の厚さ d 及び砂層の通過面積 A によつて變る性質のものである。空氣の通過量速度が壓力差 P に如何なる關係を有するかを知らんがために最も粗い單純砂 A 及び最も細い G について豫備實驗を試みた。第 10 圖に於て縦軸に通過量速度 q を又横軸に壓力差 P をとつて測定値を記入した。壓力差を種々に變へて通過量速度を測定したが何れも一直線上に來ることが分つた。即ち砂層を空氣が通過する場合は此の實驗結果では通過速度と壓力差とが比例する。

即ち $q \propto P$ $q = kP$



第10圖

k は空氣の壓力差及び通過量速度に無關係の恒數である。通過抵抗を R と置けば



第11圖

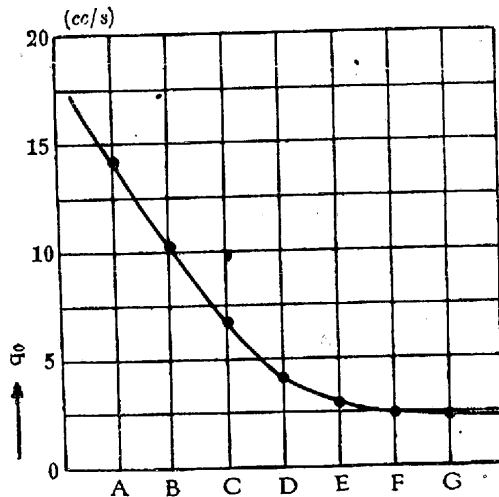
$$q = P/R \quad \text{従つて} \quad k = 1/R$$

故に空氣の通過抵抗 R は空氣の壓力差及び通過量速度には無關係である。

單純砂 A 乃至 G の 7 種に就ての觀測値を第 11 圖に圖示した。砂層の厚さは常に 10cm に保ち空氣壓力差を種々に變へた。圖に於て●印は實測値である。之を結べば直線となる P=20cm の所に○印を附した。各種類について○印を結べば破線の如くなる。此の破線は通過面積 1cm²、厚さ d=10cm、空氣壓力差 P=20cm の時の通過量速度 q である。今空氣の壓力差 P=1cm、砂層の通過面積 A=1cm²、砂層の厚さ d=1cm の時の通過量速度を q₀ で表せば之は空氣の比通過量である。前記の豫備實驗結果より考へれば q と q₀ とは次の關係を有すべきである。

$$q = q_0 AP/d$$

従つて q を測定せば之より計算により q₀ を容易に求め



第 12 圖

得る。各種單純砂の比通過量 q₀ の實測値を第 11 表に記した。之を圖示すれば第 12 圖の如くである。第 12 圖に於ては縦軸に q₀ を又横軸に砂の細さを順にとつた。

第 11 表

砂の種類 (メツシ)	d=10cm, P=20cm, A=1cm ² の時の q	空氣の比通過量實測値	q ₀ (cc/s) 計算値
A. 20~30	29.0	14.50	17.20
B. 30~40	21.1	10.55	8.71
C. 40~50	13.8	6.90	5.35
D. 50~60	8.6	4.30	3.54
E. 60~70	6.2	3.10	2.68
F. 70~80	5.1	2.55	1.97
G. 80~90	4.8	2.40	1.70

以上の如くして各種類の單純砂につきての比通過量が分れば他の任意條件下に於ける通過量速度を算出することは容易である。例へば 40~50 メツシの砂層の通過面積 A=35cm²、砂層の厚さ d=15cm、空氣の壓力差 P=5cm なりと

せば通過量速度 q は

$$q = q_0 AP/d = 6.9 \times 35 \times 5 + 15 = 80.5 \text{ cc/s}$$

實驗結果が示すやうに砂層に於ては空氣の通過量速度と空氣壓力とは比例する。此の事實は空氣が砂層を通過する場合は Poiseuille の式が成立することを裏書するものである。

即ち

$$q = n\pi r^4 P / 8\eta l$$

が成立する。式に於て n は毛細管の數、r は毛細管の半径、l は毛細管の長さ、P は空氣の壓力差、η は空氣の粘性係數である。此の中 n, r 及び l は前に示して置いた。η は既知であり P は任意に定め得る値である。従つて Poiseuille の式が成立するならば計算に依つて q を求めることが出来る筈である。此處で Poiseuille の式を用ひての計算値と實測値とが合致するか否かを試みた。この比較を簡單にするために標準状態を選ぶことにした。即ち砂層 1cm 立方體につき空氣壓力差 P=1cm としての通過量速度を求めた。之は云ふまでもなく比通過量 q₀ である。かくて

$$q_0 = n\pi r^4 P / 8\eta l$$

に於て P=1cm=981 dynes/cm² 又空氣の粘性係數 η は R. A. Millikan¹¹⁾ の値を用ひた。之によれば

$$\eta = 0.00018240 - 0.000000493(23-t)$$

t は溫度である。本研究は 25° 恒溫で行ひたるを以て

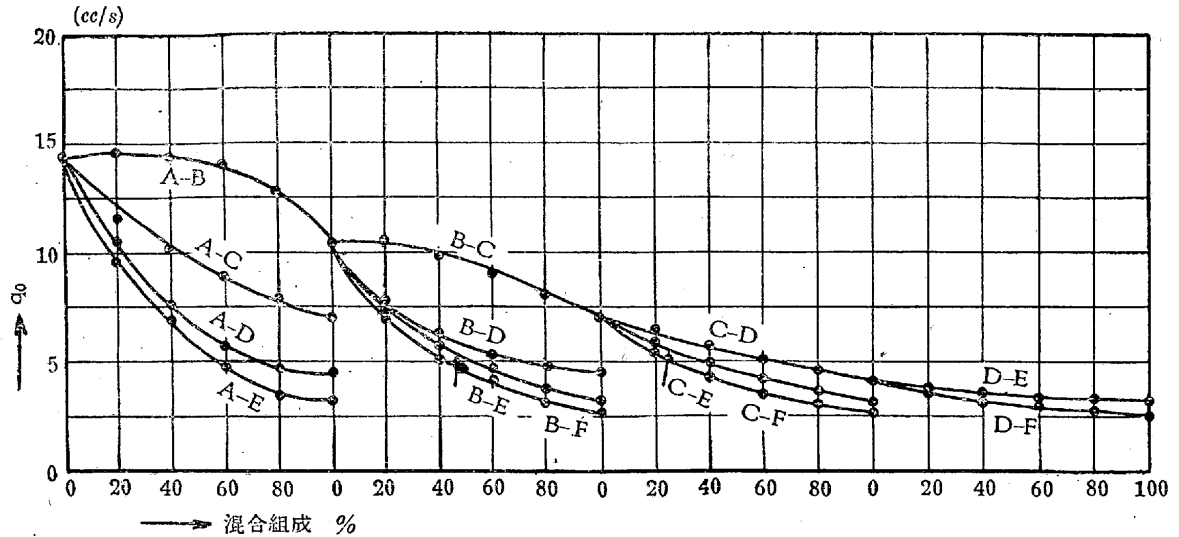
$$\eta = 0.000192$$

之等の數値を上式に入れて計算して求めた比通過量を第 11 表に計算値として示した。此の計算値は實測値によく近似することが分る。

單純砂層に關する測定結果を要約すれば次の如くである

- 1) Tayler 篩 20~90 メツシの 10 メツシ毎の試料に就て空氣の通過試驗を行つた。
- 2) 空氣の通過量速度は空氣壓力に正比例する。
- 3) 標準状態に於ける通過量速度を求めた。之は 1cm 立方の砂層に對し空氣壓力が水柱で 1cm の場合の通過量速度である。之を q₀ で表はし空氣の比通過量と名づけた。
- 4) 空氣の比通過量 q₀ が分れば任意の狀況下にある單純砂層の空氣通過量速度が計算によつて容易に求められる。
- 5) 空氣の通過量速度が空氣壓力に比例する事より空氣

¹¹⁾ Millikan, R. A.: Phil. Mag. (6) 34 (1917) 1



第 13 圖

の通過には Poiseuille の式が適用される事を知る。尙ほ構造恒數に基き Poiseuille の式 $q = n\pi r^4 P / 8\eta l$ を用ひて計算した q の値はよく實測値に近似する。之に依れば構造恒數なるものはよく砂層の物理的現象を定量的に示すものであることが裏書きされた。

6) 水並に空氣の通過が共に Poiseuille の關係に従ふものならば水の比通過量と空氣の比通過量との比は粘性係數に逆比せねばならぬ。此の逆比關係を用ひ水の比通過量より計算せる空氣の比通過量は實測値によく近似する。

3. 混合砂層に関する測定

混合砂は 2 種の單純砂を容積の割合で 20% : 80%, 40% : 60%, 60% : 40%, 80% : 20% の 4 種に混合した。單純砂の組合は A-B, A-C, A-D, A-E, B-C, B-D, B-E, B-F, C-D, C-E, C-F, D-E, D-F, E-F の 14 種である。砂層の厚さは常に 10cm に保つた。又通過斷面積は 1cm^2 であつた。測定結果より標準状態に於ける比通過量を求め之を第 13 圖に圖示した。又前に決定した構造恒數を用ひて單純砂の場合と同様の計算を行ひ空氣の比通過量の計算値を求めたが實測値とよく一致した。

以上を要約せば混合砂層の性質は單純砂層の性質の延長であつて空氣の通過性は水の通過性と相似關係に在る。混合砂層に於ける詳細なる吟味は重複するきらひがあるので之を省略した。

VI. 球狀粒群の流體通過性

今同徑の完全球體群について考へて見る。その中最も接近せる 4 箇の球體をとつて見れば第 14 圖に示す如き諸狀

態を考へる事が出来る。是等の内 $\theta = 60^\circ$ の時に群は最も密且安定にして $\theta = 90^\circ$ の時が最も疎且不安定である。流體の通過する方向に従つて球體間の空隙を辿つて見ればそれは甚だ變化に富む斷面を有する毛細管と見做すことが出来る。若しも此の毛細管が直線的であるならば其の長さ l' は次の如くに表はすことが出来る¹²⁾。

$$l' = \frac{d(1 + \cos\theta)}{\sin\theta\sqrt{1 + \cos\theta}} \dots\dots\dots (1)$$

式中 d は考ふる所の球體團の厚さである。然るに實際に於ては毛細管は多少屈曲し之を理論的に吟味すれば其の實長 l は

$$l = \frac{d(1 + \cos\theta)}{\sin\theta\sqrt{1 + 2\cos\theta}} \left(1.195 - 0.39 \frac{\theta}{\pi} \right) \dots\dots\dots (2)$$

となる。こゝで $\theta = 60^\circ$ とすれば $l = 1.3$ となる。この値は實驗より求めたる平均値 1.5 に近似する。毛細管の斷面は所によりてそれぞれ異なるが最小の斷面は第 14 圖 C に示した部分にして平行四邊形より圓を差引きたる殘餘面積の半分である。之を A_1 とせば

$$A_1 = (\sin\theta - \pi/4) 2R^2 \dots\dots\dots (3)$$

式中 R は球體の半徑。此の部分に於ける毛細管斷面の全斷面に對する比 (即ち平面空隙率) f は

$$f = (\sin\theta - \pi/4) / \sin\theta \dots\dots\dots (4)$$

となる。毛細管の斷面は此の部分に於て最小にして之より進むに従ひ漸次擴大し遂に最大に達するが更に進めば再び縮小して初めと同様の最小面積になる。今 $\theta = 60^\circ$ の場合に於ける毛細管斷面の平均 A_2 を求めれば

¹²⁾ Schlichter, C. S.: United States Geological Survey, Nineteenth Annual Reports 301 (1897-98)

$$A_2 = \left(\frac{15}{4}\sqrt{3} - 2\pi\right)R^2 = 0.2118R^2 \dots (5)$$

第 15 圖に見る如く互に外接する 3 箇の同徑圓によりて挟まる空隙 DEF の面積は $(\sqrt{3} - \pi/2)R^2 = 0.1613R^2$ にして此處に於て 3 圓に接する正三角形の面積は $(7\sqrt{3} - 12)R^2 = 0.1247R^2$ であるが流體がかゝる断面を通過する場合は餘りに狭い所は通らずして實際に通過する所の有效面積は DEF より小にして正三角形より大なりと考へらるゝ故に是等の間値として Schlichter は是に $0.1475R^2$ なる値を與へてをる。然らば毛細管の全長にわたる平均断面なる $0.2118R^2$ は最狭断面より 31.3% 大きく又有效断面より 43.5% 大きい。Greenhill¹³⁾ によれば三角形の断面を有する管内に於ける水流の平均速度 V_1 は次の如くなる。

$$V_1 = 1/20\sqrt{3} \times PA/\eta l \dots (6)$$

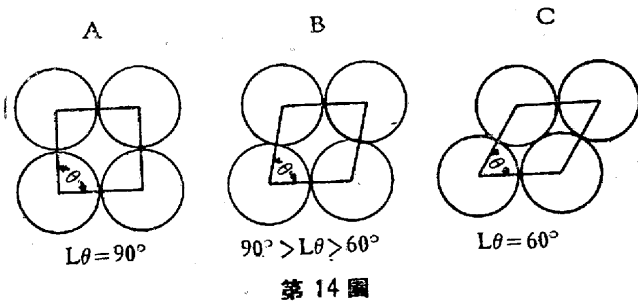
式中 A は毛細管の斷面積。之と同一斷面積の圓管内に於ける平均速度 V_2 は Poiseuille の法則によれば次の如くなる。

$$V_2 = PA/8\pi\eta l = 0.03679 \times PA/\eta l \dots (7)$$

されば斷面積が同一なる場合には圓管の方が三角形管よりも 35% 平均速度が大きい。如上の諸關係より見れば $\theta = 60^\circ$ の場合に於ける粒子群の通過性は最狭断面と有效断面との平均に近似する斷面積を有する圓管のそれに近い事が分る。今毛細管の斷面が圓形にして且最狭断面と同一の面積を有するものと假定し球體群に於ける水の通過量 q を求めれば

$$q = V_2 f S = \frac{PR^2 S}{4\pi\eta d} \cdot \frac{(\sin\theta - \pi/4)^2 \sqrt{1+2\cos\theta}}{(1+\cos\theta)(1.195 - 0.39\theta/\pi)} \dots (8)$$

式中 S は全斷面積。之に於て $\theta = 60^\circ$, $S = 1\text{cm}^2$, $P = 1\text{cm}$ 及び $d = 1\text{cm}$ の場合に於ける空氣の通過量即ち



第 14 圖

$\theta = 60^\circ$ に於ける比通過度 q_0 を求めれば

$$q_0 = 2350 R^2 \dots (9)$$

¹³⁾ Proceedings London Mathematic Soc., 13 43(1881)

(9) 式の關係を砂粒に関する實際に應用して見る。砂粒 100 粒をとり其の重量及び比重を測り砂粒の平均半徑 R を求む。之を (9) 式に入れて理論通過度 q_0 を決定すれば第 12 表に示した如くなる。但砂粒の平均比重は 2.55 であつた。

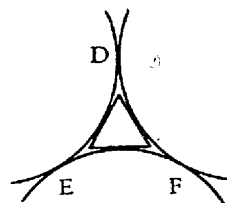
第 12 表

砂の種類 (メツシ)	1 粒の重量 (g)	平均半徑 R(cm)	比通過度の	
			理論値 q_0	實測値 Q_0
20~30	0.0003552	0.0322	2.42	17.20
30~40	0.0002230	0.0275	1.78	8.71
40~50	0.0000729	0.0190	0.86	5.35
50~60	0.0000312	0.0144	0.49	3.54
60~70	0.0000211	0.0127	0.38	2.68
70~80	0.0000150	0.0113	0.30	1.97
80~90	0.0000124	0.0106	0.27	1.70
90~100	0.0000102	0.0100	0.25	1.40

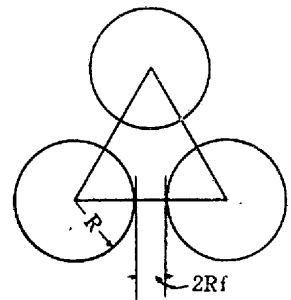
以上の如き理想群體の計算結果と實測結果とはかなり相異なるのはかゝる理想群體の觀念をそのまま實際の砂粒群體に應用することの不合理なる事を意味するものである。

著者は次の如き考察を行つた。砂粒群の砂粒は決して完全球體ではなくして種々雜多の形狀を呈し且又同じメツシのものであるとするも大きさにかなりの不同差異が存在すべきである。かゝる粒群は第 14 圖 C に示すが如き正確なる最稠密の状態を呈するが如きことはあり得ない。さればとて A 又は B の如き状態に在りとも云ひ得ぬ。大小種々であり且形狀が略と球狀に近きものの粒群體内に於ける流體通路は平均して第 16 圖に示すが如き空隙状態に近き性質を呈するものと考へられる。偕て第 16 圖に於て R は圓の半徑又相隣接する圓周間の距離は圓の直徑に對して f なる割合のものとして假定する。然らば第 16 圖に於て圓の中心を結ぶ正三角形に於ける空隙は次式の關係を有する。

$$A = \left\{ (1+f)^2 \sqrt{3} - \frac{\pi}{2} \right\} R^2 \dots (10)$$



第 15 圖



第 16 圖

今毛細管の斷面が圓形でその面積が A に等しいとすれば毛細管の半徑 r は次の關係をもつことになる。

$$\pi r^2 = \left\{ (1+f)^2 \sqrt{3} - \frac{\pi}{2} \right\} R^2 \dots (11)$$

砂層に於て流體の通過する方向に直角の單位斷面に於ける流體通路の總面積を S_1 とすれば

$$S_1 = n\pi r^2 \dots\dots\dots (12)$$

n は單位斷面積に於ける毛細管數である。然らば砂粒の實體によりて占めらるゝ面積 S_2 は

$$S_2 = 1 - n\pi r^2 \dots\dots\dots (13)$$

然して S_2 は單位斷面に於ける砂粒實體の斷面積なる故

$$S_2 = n\pi R^2 \dots\dots\dots (14)$$

従つて空隙 S_1 と實體 S_2 との比は (11) (13) 及び (14)

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{n\pi r^2}{n\pi R^2} = \left\{ (1+f)^2 \sqrt{3} - \frac{\pi}{2} \right\} \frac{1}{\pi} \dots\dots (15)$$

第 13 表

砂の種類 (メッシュ)	n	r	$S_1 = n\pi r^2$	$S_2 = 1 - n\pi r^2$	$\frac{S_1}{S_2}$	$R^2 = \frac{S_2}{n\pi}$	$R = \sqrt{\frac{S_2}{n\pi}}$	f
20~30	1200	0.0102	0.392	0.608	0.644	161.5×10^{-6}	1.272×10^{-2}	0.44
30~40	2410	0.00724	0.396	0.604	0.656	$79.8 \times "$	$0.893 \times "$	0.45
40~50	4400	0.00552	0.419	0.581	0.709	$42.1 \times "$	$0.649 \times "$	0.48
50~60	7000	0.00443	0.429	0.571	0.751	$27.2 \times "$	$0.522 \times "$	0.51
60~70	9450	0.00383	0.433	0.567	0.764	$19.11 \times "$	$0.438 \times "$	0.51
70~80	12200	0.00332	0.421	0.579	0.737	$15.12 \times "$	$0.389 \times "$	0.50
80~90	15300	0.00302	0.438	0.572	0.766	$11.95 \times "$	$0.346 \times "$	0.52
90~100	18400	0.00278	0.447	0.553	0.808	$9.52 \times "$	$0.309 \times "$	0.54

之を本研究の結果に就きて計算すれば第

13 表に示すが如くである。この結果によれば砂粒群體の如何なる斷面に於ても空隙と砂粒實體との斷面積の比は 0.64~0.87 で平均すれば 0.73 である。又 f は 0.44~0.54 であつて平均すれば 0.49 となる。

電熱用鐵・クロム・アルミニウム系合金の基礎的研究

(日本鐵鋼協會第 26 回講演大會講演 昭 16. 10 東京)

三島徳七・川勝一郎・難波雄一**

FUNDAMENTAL STUDY OF Fe-Cr-Al ALLOY STEELS FOR ELECTRIC HEATING ELEMENT

Tokusiti Misima, Kōgakuhakusi, Iirō Kawakatu & Yūiti Nanba.

SYNOPSIS:—The authors investigated some important industrial properties of a series of Fe-Cr-Al alloys containing 5~30% Cr and 1~7% Al, such as hardness, specific resistance, its temperature coefficient, oxidation resistance, specific weight, thermal expansion and magnetic transformation. The authors, again, examined effect of grain growth on mechanical properties, since the alloys have unusual phenomenon of grain growth at high temperatures. The result of experiments was summarised as follows:

In the hardness test, it was found that the most suitable heat treatment for softening these alloys is heating to about 800°C followed by rapid cooling. From the result of measuring the specific resistance, the ternary specific isoresistance curves were completely plotted. In the oxidation test, in case the Al content is in excess of 3%, the 15% Cr addition is sufficient for enhancing high temperature oxidation resistance but further addition yields little improvement. Besides, in Fe-Cr-Al alloys with the high-Cr and high-Al content, a remarkable grain growth is observed by heating to temperatures above 900°C and they become very brittle. Therefore full consideration should be made in annealing or using them at high temperatures.

目 次

- I 緒 言
- II 試料の調製
- III 硬度試験
- IV 電氣抵抗及び溫度係數の測定

- V 耐酸化性試験
- VI 熱膨脹, 磁氣分折, 比重の測定
- VII 結晶粒の成長
- VIII 結 言

I. 緒 言

*東京帝國大學 * 東邦産業研究所

電熱用 Fe-Cr-Al 系合金はニクロム線の代用として近時