

論 說 報 告

第十八卷第十一號 昭和七年十一月

砂層内に於ける濾過速度

會員 工學博士 鶴 見 一 之

Filtering Velocity through the Sand Layer

By Kazuyuki Tsurumi, Dr. Eng., Member.

内 容 梗 概

砂層内の濾過速度を求むる式としての Darcy 式を適用する範圍は、從來區々の説あるも著者の實驗によりて、諸説は必ずしも全部信頼するに足らざるを指示し、且つ Darcy 式を用ひ得る範圍の一決定法を示し、之と附隨して濾過の問題中、起り得る實驗中の諸現象を指摘し砂層内の氣泡が、濾過作業に於て大なる注意を要する研究事項たること及濾過層の周壁に滑ふて濾過が他の部分よりも速かに行はるゝと信ぜらるゝは誤なることを實驗によりて明らかにせるものなり。

目 次

第一章 理 論.....	1
第二章 實 驗.....	3
第三章 濾過實驗に伴ふ諸問題.....	18

第 一 章 理 論

1. 總 論

砂層中に水の流るゝ速度を求むることは從來一般に Darcy 法則として知らるゝ

$$v = kJ \dots\dots\dots (1)$$

なる式を基礎とす。

本式は Darcy が 1856 年に公にせるものにして、之が由て來る所を尋ぬるに、既に Poiseuille が有名なる實驗式を 1842 年に "Recherches sur le mouvements des liquids dans les tubes de très petits diametres" なる題下に Academie Sciences, savants etrangers に發表したるに起因す。Poiseuille は實驗式として次式を出せり。

$$Q = \frac{\pi r^4}{8\mu l} \dots\dots\dots (2)$$

本式の理論的證明は後に至りて諸學者の與へられたるものなり。* 而して本式を應用し得る範圍は Poiseuille の行ひたる實驗の管は細きものにして、理論的に考へられる假定は、流速の極めて小なる所謂 stream line flow 或は laminaire flow をなす場合に限らる。故に毛細管にては流量、從つて流速は粘度係數の影響を受くる事大にして、粘度係數は水温により變ずるものなるにより、從つて水温が流速に關係を及ぼす大なる原因となるべきは一般に水理學者の信ずる所なり。

併し茲に一の疑問を生ずるは、砂層中の濾過作用を考ふる時には常に水温を考慮中に加ふべきものなりや否や、換言すれば砂層内の濾過流速は常に粘度係數によりて影響さるゝ laminaire flow ののみなりや否やの點にして此事

* Poiseuille に先ちて G. Hagen は 1839 年に Poggendorfs Annalen Vol. 46 に於て毛細管にては Q が r^4 に比例するてゝ事實を發見したりと云ふも Poiseuille は Hagen とは無關係に (2) 式を求めたるものなり。

は未だ明確にされたる問題に非ず。

次に Darcy 法則は常に濾過作用の生ずる時に應用し得べきや否や。若し應用の範圍が制限されるゝとすれば何を以て其應用範圍の制限を標準とすべきやの點に於て疑問を生ずるに至る。

抑も Darcy 法則は或特殊の場合には適合するも一定の制限以外には當て嵌らざるは多くの場合に指摘されたる事實なり。

今其主なる批評を次に直述することとせん。

2. Darcy 式の適用範圍

C. Piefke (は Bericht über die Fortführung eines Versuches behufs Gewinnung eines reinen Brunnenwassers, Berlin 1886 に於て Darcy 式の應用し得る範圍として **第一圖** を與ふ。本圖は E. Prinz 著 Hydrologie より轉載せるものなり。

之に出で見れば粗砂にては 1 時間 2 m 即ち 1 秒間に 0.6 mm 迄、甚だ小粒なる砂にては 0.08 mm 迄を以て Darcy 法則の當て嵌まる 最大流速となし、夫れ以上にては適用されざるものとなす。

F.H. King は 10th Annual Report U.S. Geological Survey 1897/1898 にて Principles and conditions of the movement of ground water なる題下にて同様に Darcy 法則の應用範圍を與ふ。

濾過速度 V と濾過傾斜 J との間の關係を圖表にして描けば Darcy 式は此二者は一定の砂と一定の状態の下にては直線關係となるべきを示す。然れども實際に於て粗砂にては **第二圖 (A)** の如く上の方に彎曲四面を向け、細砂にては同圖 (B) の如く四面を下側に向けたる曲線となる事を示せり。

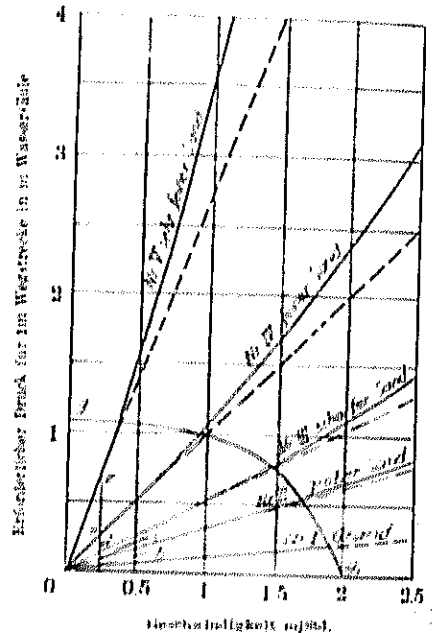
此關係は Piefke の與へたる所と相似たれど Piefke は粗砂に對する結果は之れを示さざりき。

Ph. Forchheimer は V.D.L. 1901 に於て Wasserbewegung in Boden なる題下にて Darcy 法則の應用範圍を限る多くの場合を示せり。

E. Prinz は其著 Hydrologie に於て、Darcy 法則の成立は小なる水面勾配にて小なる流速の時に限るとて、勾配としては 1:100~1:3 000 なりとし、それ以上の大なる勾配にては成り立たず、又同程の粒子にては應用し得ずと明記さる。仍つて普通の構造の上水道濾過床の如きは當然應用し得ずとなす。

其他 Sauercker の如きは Darcy 法則は全然當て嵌らずとて正而より反對し V.D.L. 1879 にて $J = k \frac{V^2}{2g}$ なる式にて濾過作用の流速と J との關係を表はし。此つとは常數に非ずして V の函數なりとなす。

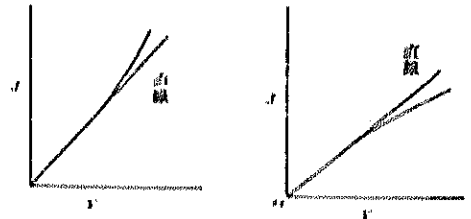
第一圖



gg. ... angenäherte Grenze der Gültigkeit des Darcyschen Gesetzes. Druckkurven für die Sande I-V (Nach Piefke.)

第二圖

(A) (B)



K. Terzaghi も亦 King の示せると同様の結果を得たり。同氏は緩く重なりたる砂及密に重なりたるものゝ兩種にて砂粒は 0.1 mm~1.3 mm に對し 60 回の實驗の結果粒徑が 0.1 mm~0.5 mm ならば $J=0.5\sim 5.0$ に於て水を上より下に濾過せしむると、下より上に向つて濾過せしむる時との如何を問はず、例外なしに Darcy 法則は成立し、粒徑 0.1 mm 以下及 0.5 mm 以上の時には同法則は成立せずとなす（以上は Terzaghi 著 *Erdbaumechanik* による）。F.H. King は前掲の報告書中に於て Darcy の k は土壤粒子の大小空隙率、液體の粘性によりて變ずるものなりと述べ、更に Darcy の法則は Poiseuille 法則に似たるものにて Poiseuille の法則は 1:10 以下の勾配に對しては眞となすを得るも $J=10$ の如き大なる勾配にては成立せずとなす。

第二章 實 驗

1. 實 驗 の 方 法

濾過速度に影響を與ふる主なる原因は次の如きものなるにより、成るべく其變化を起す原因を少くし、均一の状態に於て實驗を行はずば、其結果の信用を置くに足らざるに至るべきを以て、小規模にて行ふ方却つて可なりと信じ、小規模の實驗装置によれり。

尙ほ砂層の厚さを大にせざりし理由は後に第三章の 1. に記するが如き困難を實驗に與ふるによるものなり。一般に濾過速度に影響を及ぼす原因は次の如き諸因より起るものとなさる。

(a) 砂粒の大きさ, (b) 形状, (c) 層狀, (d) 空隙率, (e) 砂粒の混合割合, (f) 温度。

(a) 砂粒の大きさ

砂粒の細粗が濾過に大關係ある事は既に理論的にも實驗的にも示されたる所にして、其濾過率たる Darcy 式の k は砂粒の直徑 d の自乗によりて増減すると、さるゝ理由は Slichter 教授の誘導されたる理論的證明によりて示され又實驗的には Allen Hazen の指示されたる所の如し。

著者の實驗に於ては前述の如く常に均一の状態にある砂に就て何人が實驗を行ふも均一の結果を齎すが如きものたるを要するとの理由に基き成るべく均一の大きさのものに就て實驗をなす事とし。篩別法によりて篩別したる比較的均一の大きさを有する砂にて實驗を行ひたり。

(b) 形 狀

實驗に供したる砂は海濱の砂にて比較的稜角の少なきものなり。

(c) 層 狀

自然の地層内の砂に於ては其積み重なり状態が特殊のものあり、例へば河流又は海流の流れの方向が自然に一定されある場合に生じたる層又は風、水河による砂層の配列原因をなすもの、或は静穏なる湖沼港灣内にて沈澱せるが如き場合等ありて他の状態は一様なるも砂粒の方向が平行にありや又は不規則に錯綜せるやにて異なるものあり。

本實驗に於て砂層は後に記するが如く、水壓にて噴き上げたる砂が自然に沈澱して落着くに委する方法によれり。

(d) 空 隙 率

空隙率の大小は濾過さるゝ水の通路が廣きか狭きかを示すものにて、廣ければ濾過の抵抗少なくて狭ければ之に反するは明かなり。今 p を以て容積空隙率とするに濾過速度が p の如何なる函數にて表はさるゝやは未だ確説なし。本問題に就ては將來大に研究を要する所なるべし、次に現今まで發表され居る諸説を示さん。

(イ) Slichter 教授は 19th Annual Report U.S. Geological Survey に於て次表を與ふ。

$p=0.26$	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.43	0.44	0.46	0.47
$c=84.9$	65.9	52.5	40.5	34.7	26.5	24.1	20.8	17.3	14.8	12.8	11.4

而して Darcy's $k = \frac{11}{\phi} \dots \dots \dots (3)$

(B) J. Kozony 教授は Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1927 に於て次式を與ふ。

$$k \propto \frac{p^3}{(1-p)^2} \dots \dots \dots (4)$$

同誌 1929 に Dr. J. Donat も本式は正しとして Kozony 教授に賛同せり。

(C) Zeuner は Deutsche Tiefbauzeitung Nr. 30, 1930 に於て

$$k \propto \frac{p^3}{(1-p)^2} \dots \dots \dots (5)$$

なる事を主張し Kozony 教授に反對の意見を發表せり。

(D) K. Terzaghi 教授は有名なる氏の著書 Erdbaumechanik に次式を發表せり

$$k \propto \frac{(p-0.3)^2}{(1-p)^{1.75}} \dots \dots \dots (6)$$

以上記述せるが如く k が p の影響を受くる事は明かなるも如何なる法則に従ふかは未だ明かならず。

故に本実験にては成べく p を一定にして実験する事とし、 k と p との關係に就ては尙ほ將來の研究に俟つものとせり。

p を一定ならしむる爲には、砂層の下方より水壓によりて砂を吹上げ自然の儘に委ね、落着きたる後実験を始むる事とせり。此の如くする時には空隙は狭しく大ならんと想像さるゝも決して然らざるは實驗中殆ど砂層の厚さに變化を認むる事なく、一定の p の値を保つを以ても知るを得べし。又均一の大きさの砂にては此方法にて得たる p は最小空隙率に近き値なり。次に斯くの如くにして得たる砂層の空隙率は約 42.3% に當る。之れを測定する方は後に記述せり。

(e) 濾過速度

砂粒大小混合比の變ずるに従つて變ずべく Allen Hazen の如きは大小混合の粒子よりなる砂にては主として混合比によりて濾過が支配さるゝものなりとて所謂有效徑 (effective size) なるものを標準とせるが如きを見ても混合比を重要視するの要ある事を知るべし。

本実験に於ては先づ比較的均一の大きさの粒のものに就て研究し、次で混合比を變化して其影響を知る方研究の順序として當を得たるものとの考の下に混合比に就ては考慮を加へずして、比較的均一の大きさのものに就てのみ實驗せるものなり。而して混合比變化に就ては他日の研究に俟つこととせり。

(f) 温度

温度の影響が濾過に及ぼすは其液の粘性係数が温度によりて變化するによるものなり。

Poiseuille の式を見れば明かに $k \propto 1/\mu$ なるを示すが故に温度によりて μ の變化するを示し、其温度に對し μ の變化する關係は Poiseuille に依れば次の如し。

$$\mu_t = \frac{\mu_0}{(1 + 0.0330 t + 0.000221 t^2)} \dots \dots \dots (7)$$

$\mu_0, \mu:$ は夫々 0°C 及 t°C に於ける水の粘度係数を示すものなり。

Darcy は特に k が温度によりて變化する關係を式にて與へざりしが Poiseuille の式から同氏の式が出でたる

關係上言はずして此内に其意味が含まれ居る事を推察し得。

Allen Hazen は

$$k = C dw^2 \dots \dots \dots (8)$$

の式中、 C は温度によりて變化する關係にして次の如くにして表はしたり。

$$k = (0.03 t + 0.7) C_{10} \dots \dots \dots (9)$$

C_{10} は 10°C に於ける (8) 式の C の値なり。又 (8) 式の dw は Hazen の定義による有効徑なり。(9) 式の t は攝氏の度にて表はしたる水温を示す數にして、本式は Poiseuille の與へたる式 (7) 式を用ひ、單に變形したるに過ぎず、今其の然る所以を記さんに、(7) 式の $t=10^\circ$ とすれば

$$\mu_{10} = \frac{\mu_0}{1.30}$$

故に $1/\mu_t$ にて變ずる k の値は次の如くなるべし

$$\frac{1}{\mu_t} = \frac{1 + 0.0330 t + 0.000221 t^2}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_{10}} \frac{1 + 0.0330 t + 0.000221 t^2}{1.30}$$

$$\therefore \frac{1}{\mu_t} = \frac{1}{\mu_{10}} (0.73 + 0.025 t + 0.00017 t^2) \dots \dots \dots (10)$$

$$\text{又 } \frac{1}{\mu_t} = \frac{1}{\mu_{10}} (0.7 + 0.03 t) \dots \dots \dots (10 a)$$

次に $\frac{1}{\mu_{10}} = C_{10}$ とすれば、任意の温度 t には $(0.03 t + 0.7)$ を乗ずれば可なり、之 Hazen の與へたる温度に對する補正係數なり。今試に (10) 式と (10 a) 式の兩式にて算出したる C_{10} の係數を表記して比較對照せん。

$t^\circ\text{C}$	5	10	15	20	25	30
(10) 式	0.850	0.997	1.143	1.298	1.461	1.633
(10 a) 式	0.850	1.000	1.150	1.300	1.450	1.600

之によりて見れば (10 a) 式を用ふるも實用上同一と見做すを得べく、(10 a) 式の方遙かに簡單なるの利點あり。

Slichter も亦 Hazen と同様に (10 a) 式の補正を水温の變化に應じて施すべきを示せり。

抑も水の粘性が流速に影響を有するは laminar flow の場合に限り、turbulent flow の場合には、之を考慮せずとも可なる事は顯著なる事實となさる、而して吾人の考へつゝある流れが之等の何れに屬するやを定めたる後に、始めて温度に對する補正を施すべきや否やを決定せざるべからず。

然るに Hazen は濾過速度を考ふる場合には全部に對し前掲の補正を施すべしと判斷するゝ如きことを示し、多くの技術者は唯之を其儘借用するが如き觀あり。

温度の關係を濾過速度測定の結果に含ましむることを避けんとなれば、本實驗裝置を恒温室内に置き、恒温の水に就て實驗を行はざるべからず、然るに此の如き設備をなすは容易ならざるものあり。

依つて本實驗に於ては實驗に使用する水は最も得易き上水道水を用ひ、成るべく温度の變化をなさしめざる様に注意したるに過ぎず。

此點に於て設備の不完全なるは自ら認むるものなり。實は最初此點を顧慮して濾過裝置を恒温槽中に浸して上水道水を用ひ濾過試驗を行ひたるに、恒温槽内の温度が上水道水に比し少しく高きも直ちに砂粒に氣泡の附着することを認め、氣泡は濾過實驗に極めて妨害をなすものなるが故に、到底均一なる結果を得られず、失敗に終れるに鑑み、寧ろ恒温槽を使用せず大氣中に於て之を行ふに若かずとの考にて、全部大氣中に於て實驗を行ひたり、其結果は恒温槽を用ひたるものに比し均齊なるを知れり。

本実験を施行せる時の水温は 15.5°C ~ 21.5°C にて平均 18°C とすを得べく、実験中に最も濾過を不齊ならしむる原因は温度の變化に伴ひ或は其他不明の原因より生ずる氣泡に歸するものなるを知れるが、此影響を免れんとせば豫め水中の空氣を除きたる水を濾過せしむべきも、此事も多量の水を使用する本実験の如きに於ては容易の業に非ず仍て上水道水を其儘用ふる事とせり、此點に就ても嚴格なる意味に於ては不完全なる實驗なりとの非難を免れざるものなり。但し R. Cohen は Annalen der Physik und Chemie, Vol. XLV, 1893 に於て空氣を除去したる水と、然らざる水との兩者に就て精度係數の變化を實驗したることあり、其結果は兩者に於て毫も差違あるものならずとの結論を得たり。之を以て見れば温度の變化による空氣が砂層内に蓄積することが實驗を困難ならしむる最大原因なりと見做すを得べし。

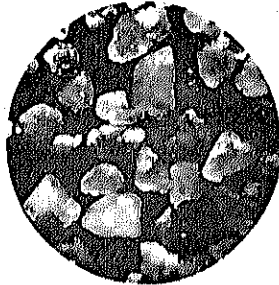
2. 實驗用砂

實驗用砂は仙臺市を距る約 8km の太平洋に直面する海岸、宮城縣宮城郡深沼村に於て當時海洋の荒波に洗はれ居る濱砂を採取し、以て河砂の如き泥土微粒を含有する虞なき清潔度を有するを期せり。之を Tyler 社製標準篩にて篩別し更に清水に浸し洗滌乾燥して清潔なる容器に納め使用に先立って充分に清水中に浸漬したり、斯くて篩別をなすに使用したる篩は持合せのものを以てせるに止まり、之が撰定に關し別段の理由を有せず、即ち次の如し。

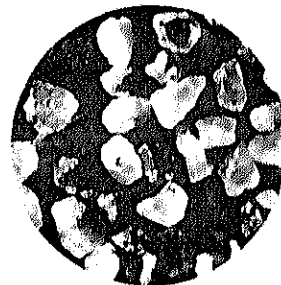
篩番號	No. 20	30	40	50	65	80	100	100 以下
砂種名稱	A	B	C	D	E	F	G	

砂種 A は No. 20. の篩を通過し No. 30 以上に止まるもの、砂種 B は No. 30 の篩を通過し No. 40 以上に止まるもの、以下同様の意義を有す。G 種の砂は No. 100 を通過するもの全部なるが微粉狀の粒子は之を含有せず。

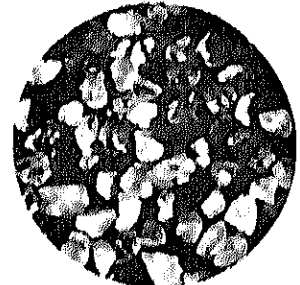
第三圖



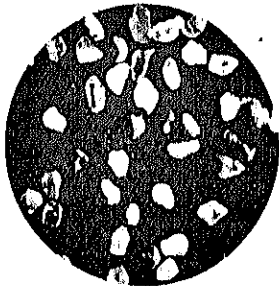
砂種 A



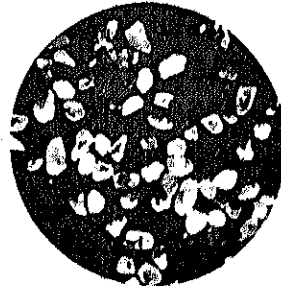
砂種 B



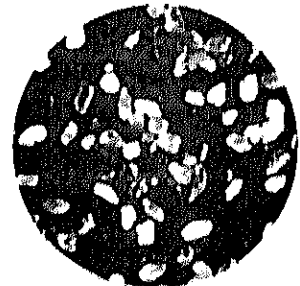
砂種 C



砂種 D



砂種 E



砂種 F

3. 砂質, 比重, 空隙量

砂質は主として硫酸質にして石英、長石、砂鐵等を含有す、而して其比重は平均 2.60 なり。

比重及空隙量の決定法次の如し。

今容量 100 c.c. なる測定用フラスクをとり、其内に 100c.c. の目盛迄乾燥せる砂を容れ、軽く振盪して充分に砂を詰む。然る後に之れを秤量す。此時の重量はフラスクの重量 W_f と乾砂 100c.c. の重量 W_s との和なり、即ち

$$W_1 = W_f + W_s$$

次に第四圖に示すが如く堅くゴム栓をなしたるフラスクの栓よりガラス管 C を以て、B なる水を充たしたる密閉せるガラス瓶に通ね、此 B の瓶も氣密のゴム栓をなして之に D なるガラス管を通す。此の D 管を空氣ポンプに通ね、充分に A なるフラスク内の空氣を抜取る、次で D 管を急に空氣ポンプより取はずし外氣壓を B 瓶の水面に働かしむ。然る時は B 瓶内の水は次第に A 内に送られ、砂の空隙内の空氣と入れ替へらるゝ事となり遂に 100 c.c. の目盛迄水を充たすに至る。茲に於て A のゴム栓をはづして再び秤量す此時の重量は次式にて表はさる。

$$W_2 = W_f + W_s + W_w$$

W_w : 空隙を充たしたる水の重量

故に $W_w = W_2 - W_1$

又フラスクは砂を入れるゝ前に乾燥したる清潔の状態にて秤量し之を W_f とす。

然る時は

$$W_s = W_1 - W_f$$

故に

$$\text{砂の比重} = \frac{W_s}{100 - W_w} \dots\dots\dots(11)$$

以上の方法によりて、各種の砂に就て測定せる結果次表の如し。

砂種	W_f	W_1	W_s	W_2	W_w	比重	水温
A	32.336 (gr)	181.08 (gr)	149.34 (gr)	223.15 (gr)	41.47 (gr)	2.55	19.9°C
B	〃	187.07	155.93	227.75	40.08	2.57	19.9
C	38.502	190.27	151.77	231.92	41.05	2.57	20.7
D	32.336	183.40	151.06	224.21	40.81	2.53	19.8
E	〃	183.07	150.73	223.78	40.71	2.53	19.8
F	〃	181.80	151.40	225.72	41.92	2.60	19.7
平均						2.56	

更に此際に濾過試験をなす時と同様の砂の固まり加減に於ける砂の空隙量を測定せり。其方法次の如し。

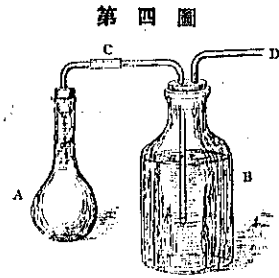
此實驗には砂の比重を求むる時のフラスクに詰めたる砂を其儘使用する事とせり。

最初フラスクに目盛 100 c.c. の所迄水を満たし、之を秤量したるに 131.921 gr. を得たり。目盛の (+) の方に 24 mm の目盛迄水を入れて秤量せるに 133.024 gr. を得たり。仍て目盛 1 mm に就き容量は 0.0708 c.c. となるべし。

扱て前に 100 c.c. の目盛迄相當の固まり加減に詰めたる砂を取出し、其フラスク内に水中にて自由に落ち着くに任ず時は 100 c.c. よりは高き砂面を得べし。

其増したる儘のフラスクを秤量す。之れを W'_s とす。然らば

$$W'_s = W_f + W_s + W'_w$$



第四圖

式中 W_w' は実験の際の砂の固まり加減に對する空隙を充たせる水の重量なり。

各種の砂に就て空隙率を求め次の結果を得たり。

砂 種	増加したる 分の目盛	増加したる 容 積 (cc)	W_s	$W_w' = W_s - W_1$	空隙率 = $\left(\frac{W_w'}{100 + W_1} \right)$	水 温
A	10.5 (mm)	1.16 (cc)	224.84 (gr)	43.10 (gr)	42.7 (%)	10.0°C
B	20.0	1.42	220.37	41.70	41.1	10.0
C	22.5	1.50	223.24	42.07	42.2	20.7
D	23.0	1.63	226.39	42.89	42.2	10.8
E	20.0	1.42	227.05	43.98	43.2	10.8
F	17.8	1.26	226.87	43.07	42.6	10.7
平 均					42.3	

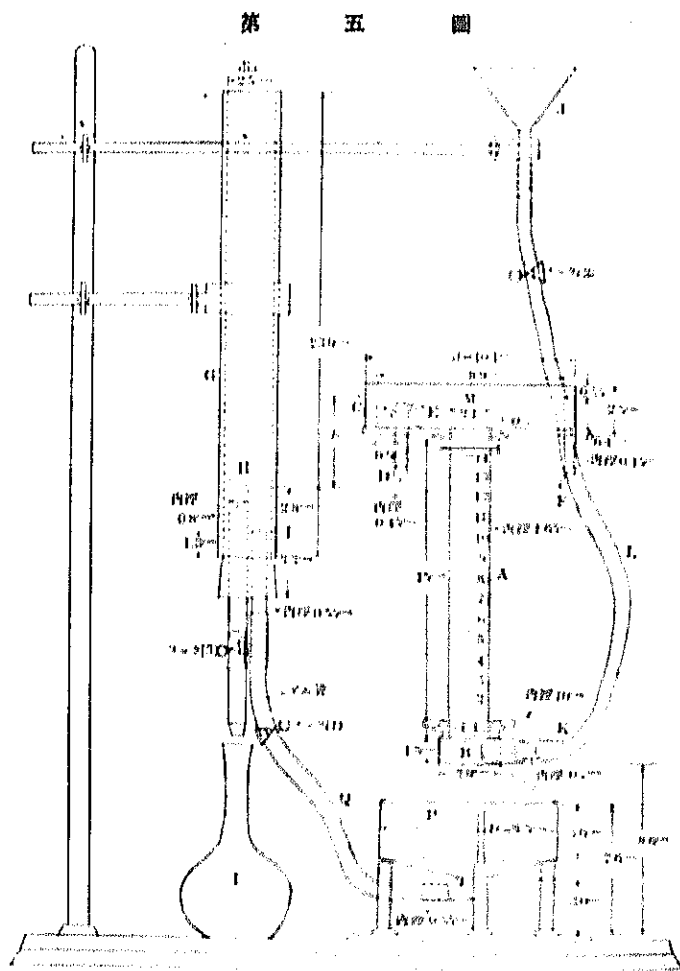
砂粒の粗細は空隙率には無關係なる事は等大の粒子ならば其固まり加減の状態均一なる時に然るべき事にて如上の結果は明かに之を證するに足るべし。

4. 濾過装置

第五圖の A は内徑 1.65 cm, 長さ 15cm の硝子筒にて其下端に金屬製の環を筒の外に固着し之にネジをきり, P なる内部空洞をなせる容器の上端の圓筒部のネジと固く水槽に連結するを得。P の上端圓筒部の内側に環状突起を有し, 此處に有孔白金板を載せ其上に目の粗き白布を敷き P と A とは此底部板を以て界とす。B の下に P の上部圓筒を貫きて K なる枝管を有し L の管を連らね J なる漏斗を其端に連結す。

A の上端も下端と同様に金屬製の環にネジを有し, C なる皿状器と密着するを得しむ。C なる皿には水の流入する口として D を有し, 排出する口として F の管を有す皿内の水位を一定せしむる爲, 破線を以て示せる周壁を

薄き板を以て作り上縁邊より溢流を許す, 而して D より流入する水は破線を以て示さるゝ E なる帽狀の蓋に衝突して流れ出る事とし以て溢流高さの水面の動搖を防ぐ, 砂は A の筒の内に入るゝ前に充分に水中に浸し任意の厚さに置かる。水は上の口 M より流入し砂層を濾過されて B より P の内に入り, 其底の管 Q を通りて R 管



なる結果を得。

之を以て見る時には $V=0.23$ cm/sec なる時には laminar flow が生じ $V=0.44$ cm/sec にては turbulent flow を生ずるが如く考へらる。仍て此中間に於て此 2 種の流状の限界が存する事を推察し得べし。

斯くの如き関係なるを以て $V=0.23$ cm/sec 以下に非ざれば Darcy 法則は成り立たざるを知るべく、他の種の砂にては本實驗に於ては B, C, D, E 種に對してはすべての v に對し Darcy 法則の如く J に正比例して v は變ずるを見るも F 種の砂は $v=0.15$ cm/sec 以下となるときは h と l とは直線的とならずして稍々凹面を下に向けたる曲線となるを見る、然れども其彎曲の程度は著しからずして實用的には直線と見做して大差なし。

以上 v と J との関係は前に附圖第一にて大略察知し得る事實なるが V の小なる時には A 種の砂にても亦 V が J に正比例するを示すものにて從來 King の示せるが如く最初 V の小なる 2 観測を圖示して圖上に於て是等 2 點を結ぶる直線上に他の V の大なる場合の點が位せざるによりて Darcy 法則が成立するとせざるを判別するものとは異りたる方法に據れるものなり。更に換言すれば Poiseuille, King 等は v と J とを直交軸に plot し (1) と (2) との 2 點を結ぶる直線上に (3), (4), (5) 等の點の位せざるが故に v と J とは正比例せずと判断せるものなるも著者の言はんとする所は v 又は V が或る値以下の時には此 v と J との関係が直線的となるも夫れ以上の v 又は V ならば $v \propto J^m$ なる関係を有するに至る事を示すの事なり。但し m は斯る場合に於て 1.0 よりは小なり。

之と反對に v 又は V が J に正比例するよりも一層小なる値となる時には同様に $v \propto J^m$ にて表はざるも m は 1.0 よりも大となるものなり。

更に以上の考を念頭に置いて對數方眼紙に v と J との関係を圖表的に記入して得たる結果は附圖第四なり。

附圖第四作成の方法は次の如し。

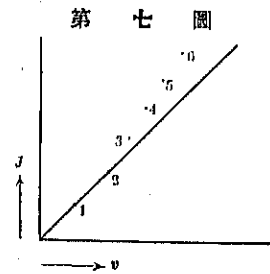
附圖第二の $h=5$ cm, $h=10$ cm, $h=15$ cm の三つの場合を考へたるが l を縦軸にとりある故に $J = \frac{h}{l}$ の関係より $h=5$ cm に對し $l=5$ cm ならば $J=1.0$ にて $l=5$ cm は横軸にて v を求め得。例へば A 種の砂の $J=1.0$ に對しては $v=2.12$ cm²/sec/F なる故に◎の點を $J=1.0$ の縦線中点とる $l=6$ cm とすれば $J = \frac{5}{6} = 0.833$ にて $v=1.04$ cm²/sec/F となるが如し。次で $h=10$ cm に就ても同様に $J=h/l$ に對し v を求め斯くして求めたる點を○印を附して圖上におく。

更に $h=15$ cm に對しても同様の事を繰返し●印を以て記入す。

多くの J に對して plot したる諸點は附圖第四に見るが如く殆んど一直線上にあるが如く散在す、然れども J が大となり、 v が大となるに従て凹面を J 軸の方に向けたる曲線となる事、前に粗砂の場合に於て得たる結果と同様となる。

附圖第四より次の諸項を認むるを得べし。

- (1) 砂種 A に於ては圖上の諸點を進めるが如き一直線を通す事は他種の砂に比して困難なり。
- (2) すべての種の砂に就て $h=5$ cm, $h=10$ cm, $h=15$ cm, と h が漸次大なる程列點を結び付くる曲線は順次下向きに彎曲する曲線となるも其彎曲率は h が小なるものは之が大なるものに比して大なり。
- (3) B 種より G 種迄の砂に對し縦横軸に 45° の傾斜をなす直線を通す時は大體に於て下彎曲線の上部に引ける切線となる。之れ v と J とは大體に於て Darcy 法則に従ふ事を示すものなり。
- (4) 然れどもこの曲線と直線との距離の大なるは Darcy 法則の當て候まらざるを示すものなり。



(5) Darcy 式の成立するは本圖表より見る時は砂種 A にては當て嵌まらざるも次の場合に當て嵌まると見做し得。

(a) (B) 種より (G) 種までに於て $J=1.0$ 以下に於て成立す

(b) $v=1.0 \text{ cm}^3/\text{sec}/F$ 即ち $V=\frac{1.0}{2.27}=0.44 \text{ cm}/\text{sec}$ 以下に於ては成立す。唯茲に注意すべきは $h=5 \text{ cm}$ の場合の諸點が此事實に反する點の多きは砂層の壓力が他の場合に比して小なるため砂層内に於て氣泡が濾過作用に妨害を與ふるに歸するならんと察せらる。此事實に就ては別に研究する必要ありとす。

以上記述したる所と第二節の Darcy 式の適用範圍の記述とを比較すれば King, Prinz 等の數字的に制限を與へたる所は未だ明かに定められたるものに非ずして、尙ほ將來の研究に俟つ所多きを知るべし。

7. 濾過率の決定

前記の結果により Darcy の式が成立する範圍内にある砂種と其範圍内に於て濾過率 k を求むる時は次の如き値を得べし。

砂種	粒徑 (mm)	k	
		cm/sec	m/day
B	0.59~0.42	0.41	355
C	0.42~0.297	0.22	191
D	0.297~0.208	0.12	104
E	0.208~0.177	0.07	60
F	0.177~0.149	0.057	49
G	0.149 以下	0.44	38

以上の k の値を得る方法は附圖第四を用ふれば極めて便にして $J=1.0$ の縦線に於ける 45° の斜直線との交點の v を讀みなば V は v/F にて $F=2.27 \text{ sq. cm}$ なるが故に直ちに k の値を得べし。

今參考のため清潔なる砂に就て測られたる k の値と著者の求めたるこの値とを比較するため數例を次に掲げん。

	$k(\text{cm}/\text{sec})$	
川砂 (粒徑 0.1~0.3 mm)	0.25	Prinz 著 Hydrologie
Hamburg 市緩速濾池川砂	0.77	同 上
Berlin 市 Spree 河畔 Opera の基礎工事場	0.251~0.316	Zentralblatt der Bauverwaltung, März 1928
和蘭砂丘の砂	0.03	Pennink
0.5~1.0 mm の砂	0.06	Welitschkowsky
1.0~2.0 mm "	0.59	同 上
Wizen 附近運河の工事場	0.01~0.06	Viktor Schmidt Bautechnik 10. April 1931

以上の例は大小の粒子混合せるものに就ての測定ならんが其値甚だ隔々なるも、著者の求めたる値と相距ること大ならざるを見得べし。

8. 濾過率 k と濾過細孔直徑との關係

抑も濾過作用が砂層を通して生ずる理由は砂粒間の空隙が存在するに起因し、其空隙中最小抵抗の方向をたどりて水が通過するものなるが故に、其一分子が砂層間を通過する道途は直線的にあらずして砂粒を迂回して通るべきも其砂層の厚さと此迂回路の長さの關係は未だ明かならず。

J. Kozony 教授は既掲の雜誌中に發表されたる所によれば直線的に測りたる砂層の厚さと迂回路との長さの比は 1:2 なる事は多くの實驗によりて定められたる所なりと記さるゝが故に、本論に於ては同教授に従ふ事とせり。扱て今吾人の考へつゝある場合は Darcy 及 Poiseuille の與へたる法則の成立するが如き laminar flow を

なす所の毛細管内の流動なるを以て Poiseuille の式を用ひて各砂種に對し等徑の毛細管が並列したるものと考へ其毛管の直徑を求めんとす。勿論實際の場合には大小不同の毛細管が存在すべきは明かなるも大小變化の模様を知るを得ざるが故に、止むを得ず上記の如く理想的の毛細管を考ふるものなり。

Poiseuille の式を吾人の今應用せんとする場合に合致せしめんが爲次の如く變形す。

$$Q = \frac{\gamma h n \pi d_0^4 t}{128 \mu l} \dots \dots \dots (14)$$

式中 n は毛細管が砂層横断面に並列されたる數とし、 d_0 は毛細管の直徑を cm にて表はす、又 t 秒間濾過されたる全量を $Q \text{ cm}^3$ とす。

今 μ_s を以て平面積 F に對し毛細管にて占めらるゝ面積率とすれば次式を得。

$$\frac{n \pi d_0^2}{4} = \mu_s F \dots \dots \dots (15)$$

依て (14) 式と組合せ

$$d_0^2 = \frac{32 \mu l Q}{\gamma h t \mu_s F}$$

本式中の l は實際に水が流るゝ毛細管の長さなるが故に砂層の厚さの 2 倍となるべきものなり。

又 $v = Q/t$ にして、本實驗には

$$\mu F = 0.423 \times 2.27 = 0.96 \text{ sq. cm}$$

なるを以て

$$d_0^2 = \frac{64 \mu v}{0.96 \gamma J} = \frac{66.5 \mu v}{\gamma J} \dots \dots \dots (16)$$

今附圖第四を用ひ $J = 1.0$ に相當する v を各種の砂に就て求め、各種の砂を實驗せる時の溫度の平均値に對して、 μ の値を求むる時は、 d_0 の値を各種の砂に對して求むるを得べし。

砂種	溫度 (°C)	μ (gr/sec.cm)
B	10.8	0.01014/g
C	"	0.01014/g
D	18.8	0.01041/g
E	18.2	0.01057/g
F	16.4	0.01107/g
G	15.5	0.01132/g

g は地球の重力による加速度 cm/sec^2 を以て示す。

d_0 の値の B 種の砂に對する値を d_B 、C 種に對する夫れを d_C 、以下同様の記號を用ふるとせば附圖第四より $J = 1.0$ に對し v を求め B 種の v を v_B 、C 種の v を v_C 、以下同様の記號を用ふれば次表を得。

砂種	v	66.5μ	$66.5 \mu v = d_0^2$	d_0 (cm)
B	$v_B = 0.05 \text{ cm}^3/\text{sec}/F$	0.0006881	0.0006881	$d_B = 0.0255$
C	$v_C = 0.50$ "	0.0006881	0.0003441	$d_C = 0.0185$
D	$v_D = 0.27$ "	0.0007061	0.0001907	$d_D = 0.0138$
E	$v_E = 0.16$ "	0.0007172	0.0001148	$d_E = 0.00107$
F	$v_F = 0.12$ "	0.0007512	0.0000901	$d_F = 0.0095$
G	$v_G = 0.10$ "	0.0007081	0.0000708	$d_G = 0.0088$

以上の如くして d_0 なる毛細管の直徑を算出したる後は V は d_0^2 に正比例する事は前掲 Poiseuille の式にて明かなるが故に前記の濾過率 k は d_0^2 に比例する事となる。仍て次式を得べし。

$$k = Cd_0^2$$

而して Poiseuille の式にて示す如く C の中には μ を含み、 μ は温度によりて變ずるが故に一定の温度の管に於ける C を得んが爲 10°C を標準とする事とし、 μ を $t^\circ\text{C}$ に於ける μ 、 μ_{10} を 10°C に於ける μ の値とし、又 C_t を $t^\circ\text{C}$ に於ける C 、 C_{10} を 10°C に於ける C とすれば次の關係を得べし。

$$C_{10} = C_t \frac{\mu_t}{\mu_{10}} \dots\dots\dots(17)$$

μ_t は前掲の如き値を有するが故に各種の砂に對し測定値を基として次表を得べし。

砂 種	k	d_0^2	C_t	t	μ/μ_{10}	C_{10}
B	0.41 cm/sec.	0.0006534	628	10.8°C	0.774	486
C	0.22	0.0003441	639	10.8	0.774	495
D	0.12	0.0001007	629	18.8	0.795	496
E	0.07	0.0001148	610	18.2	0.807	494
F	0.057	0.000901	633	16.4	0.845	535
G	0.044	0.0000768	573	15.5	0.864	494
平均						500

因て吾人は次式を得べし。

$$V = 500(0.7 + 0.03 t) d_0^2 J \dots\dots\dots(1)$$

Allen Hazen は濾過池の砂の新らしき時には次式を與ふ。

$$V = 110(0.7 + 0.03 t) d_w^2 J \dots\dots\dots(11)$$

又砂粒の徑が均一なる時には 110 の代りに 150 を用ふべしとなす。且つ非常に汚れたる砂にては 110 の代りに其 1/2.5 を取るべしとなせり。上記 (I) と (II) とは其形に於て似たるものなるも式の示す意味は甚だ異れり。

d は既述の如く砂層の空隙を形成する毛細管の直徑を cm 單位にて示せる數にして、 d_w は砂を篩別して求めたる Hazen の所謂有效直徑 (effective size) を cm 單位にて示したる數なり。

尙ほ茲に明記せざるべからざるは (I) 式は Poiseuille-Darcy の法則が成立する條件を吟味して、之を適用すべき時にのみ用ふべき制限を附したるものなるに、(II) 式は Hazen が與へたる例を見るに本實驗に用ひたる (B) 種は勿論 (A) 種よりも粗なる砂に於ても應用し得るものとなし、其最大粒は $d_w \leq 0.3 \text{ mm}$ 、 d_{max} 即ち濾過勾配の最大は 2.0 とせり。加ふるに濾過も本實驗に於て遭遇したるものよりも遙に大なる場合にも何等の制限を附せざりし點に於て、其の式實質上甚だ異なるものなる事は注意を要する所なり。

(I) 式中の d_0 は之を求むるに篩別によるが如く簡單ならざるは Hazen の d_w を用ひて式を作成せる點に比し實用上不便なるべきを以て、 d_0 と d_w との關係又は d_0 と d_m なる平均粒徑との關係が求められるならば甚だ便なるべしと考へらるゝに未だ斯かる關係に對して研究されたる例あるを聞かず。

又 C.S. Slichter 教授は同様に 10°C にて有効直徑及空隙率により、 C の値の異なる事を示せり。即ち次の如し。

空隙率	0.20	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.47
C の 値	90	120	150	190	230	260	310	370	420	520	610	680

上表によれば本實驗に於ける空隙率は 0.423 なるが故に挿入法によりて C を求めれば 470 となるを知る、此數は (I) 式の 500 に近き數なるも Slichter 教授の d は (I) 式の d_0 と其意味に於て甚だ異なるものなり。

總つて、實驗に使用したる砂粒の大きさと d_0 の關係を求むるに次の如くなるべし。

砂種	B	C	D	E	F	G
粒徑(mm)	0.12~0.50	0.207~0.42	0.208~0.207	0.177~0.208	0.149~0.177	0.149以下
d_v (mm)	0.255	0.185	0.188	0.107	0.095	0.088

粒徑は篩別法によりて定めたるが故に大小混合するも小粒徑を d_{min} とし、 d_m を平均粒徑として $d_{min} : d_v$ 及 $d_m : d_v$ を算出する時は次表を得。

砂種	B	C	D	E	F	平均
$d_{min} : d_v$	1.05	1.61	1.51	1.62	1.55	1.59
$d_m : d_v$	2.00	1.96	1.88	1.77	1.84	1.88

上記の如く $d_{min} : d_v$ は殆んど 1.50 にして、 $d_m : d_v$ は 1.88 となる、之等 2 數を用ふる時は (I) 式の代りに、次式の如き形となすを得べし。

$$\Gamma = 107(0.7 + 0.03 t) d_{min}^2 J \dots \dots \dots (III)$$

又は $\Gamma = 141(0.7 + 0.13 t) d_m^2 J \dots \dots \dots (IV)$

(III) 又は (IV) を用ひたる場合に實驗値と如何程の差異を生ずるかを知る爲、次表を作成せり。

砂種	B	C	D	E	F
d_{min} (mm)	0.42	0.207	0.208	0.177	0.149
d_m (°)	0.505	0.950	0.259	0.193	0.163
d_{min}^2 (°)	0.1764	0.0882	0.0433	0.0313	0.0222
d_m^2 (°)	0.2550	0.1280	0.0640	0.0372	0.0206
$t^\circ C$	19.8	19.8	18.8	18.2	16.4
$0.7 + 0.03 t$	1.204	1.204	1.204	1.246	1.192
III_{th} (cm/sec)	0.335	0.191	0.0853	0.0596	0.0423
IV_{th} (°)	0.352	0.179	0.0902	0.0525	0.0367
III_k (°)	0.433	0.243	0.1678	0.075	0.050
IV_k (°)	0.457	0.222	0.1140	0.0655	0.044
實測 $k = k_a$ (°)	0.41	0.22	0.12	0.07	0.057
$k_a - k_{III} (a)$ (°)	-0.023	-0.028	+0.012	-0.005	+0.007
$k_a - k_{IV} (a)$ (°)	-0.047	-0.002	+0.006	+0.005	+0.013
差百分率 (III)	-5%	-12%	+10%	-7%	+11%
° (IV)	-10%	-1%	+5%	+7%	+22%

以上の表を見れば (III) 及 (IV) 式を用ひたる結果は ±10% 位の差違を生ずるに過ぎず、唯 (F) 種に於ては 22% の差を生じたるもののみ。

9. 電氣的方法によりて砂層毛細管直徑を決定する理論と豫備的實驗

此實驗は Kohlrausch 著 Lehrbuch der praktischen Physik, 13 Auflage, 1920, S. 448 に掲げたる方法によるものなり。其裝置の概略は第八圖の如し。圖に於て W は濾速の測定に用ひたる裝置其礎にして、砂層の底にある多孔白金板と砂層上に挿入せる圓形白金板とを兩電極とし、兩電極間の電氣抵抗を測定せり。圓形白金板は其直徑、硝子管より稍々小なるが故に硝子管中を自由に上下せしめ得、又該白金板の上面中央の部分に白金棒を附し之に硝子管を融着し、管中に水銀の少量を注入し置き、外部よりの導線を水銀に接する事により白金棒を經て白金板に電氣的に接続するを得たり。第八圖中 R は横河製高周波用抵抗箱 (1~100 000 ohm), II は電源の buzzer, T は電話器, AB は度盛板上に緊張せられたる長さ 1m の抵抗均質なる白金線なり。

D は滑動電鍵にして電源の一端に接続し AB 上を移動し任意の點に於て白金線と接觸せしむ。測定を行ふに先立ちて砂層用の電導媒質として食鹽の一規定液を調製せり。即ち E. Merck 製純 NaCl の 58.5 gr. を蒸留水に溶解して 1^l とせり。本實驗をなすに先だちて豫備實驗をなせり。

豫備實驗 (其一) 硝子管中に砂を置かず、單に底端白金極上に瀧連測定の場合と同様に白布を一枚敷き、其上部硝子管中に規定液を充たし、圓形白金極を上下して之と底端白金極との距離を種々に變じ、其間に介在する食鹽水の電氣抵抗を測定せり。測定を行はんに

第 八 圖

は先づ R を適當に撰び、D を移動して管の最低點を求む、其點の度盛を a cm とし、又實驗溫度 $t^{\circ}\text{C}$ に於ける兩極間の電氣抵抗を W_t とせば

$$W_t = R \frac{100 - a}{a} \dots\dots\dots (18)$$

測定は總て 25°C 附近に於て行ひたる故に其結果を 25°C の抵抗 W_{25} に換算せり。前掲 Kohlrausch により次式を用ふ。

$$W_{25} = W_t [1 + 0.022(t - 25)] \dots (19)$$

測定は毎回 R を 4 種に變じて行ひ其結果を表記したり。

又一般に液柱の電氣抵抗は斷面積 A に反比例し、液柱の高さ l に正比例するものなるを以て次式を得。

$$R = w \frac{l}{A} \dots\dots\dots (20)$$

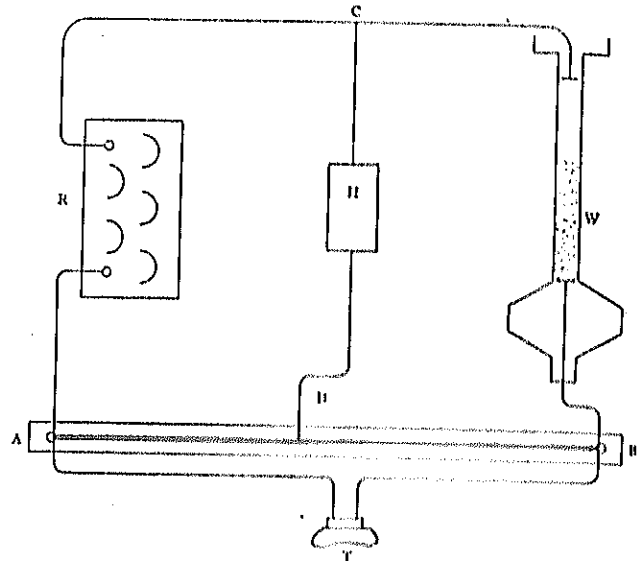
然るに本實驗に於ては硝子管の直徑は 1.7 cm にして A は 2.27 sq. cm なり、而して兩白金電極板の距離は即ち l なり、次に Kohlrausch に從へば (20) 式の w なる比電氣抵抗は次式にて表はすを得。

$$w = \frac{1}{0.0743 [1 + 0.022(t - 18)]} \dots\dots\dots (21)$$

仍て 25°C に於ける w を求めんとせば $t = 25^{\circ}$ として (21) 式を用ふ。實驗したる結果より得たる圖表は第九圖 A 線にて諸點は正しく一直線上に在るを以つて (20) 式より豫期するが如く液の電氣抵抗は液柱の高さに正確に正比例し高さ 1 cm に付き 5.70 ohm なるを知るを得たり。

尙ほ此の直線を高さの零迄延長し其點に於ける抵抗を求めたるに約 1.8 ohm を得たり。之は底端白金極と白布との接觸状態によりて生ずる抵抗と白布自體の抵抗なるべし。

(豫備實驗 (其二)) 瀧連測定の際は砂の沈着状態を一定にせんが爲に砂を下方より吹き上げ、全く混濁せしめ自然沈着の後測定せる前前述の如きが電氣抵抗測定の際も之と同様の状態となし豫備實驗の第二としては吹上げによりて電氣抵抗に變化を來さざるや否やを檢せり。吹上げを 10 回行ひ其度毎の沈着状態につき電氣抵抗を求めたるに何れも同一にして毫も異なる事なかりき (實測表省略)。從つて吹上げ回数如何に關せず常に電氣抵抗に對して同一の状態を得るを知れり。



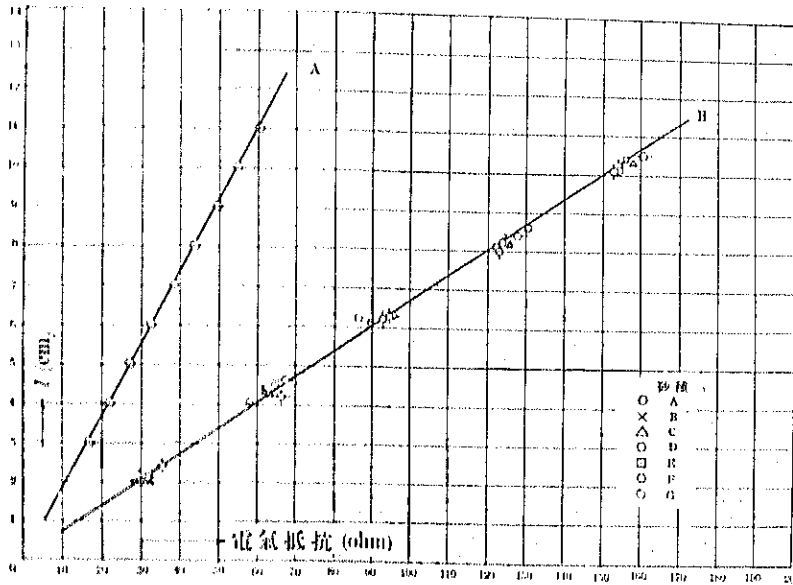
以上にて豫備実験を終り次に本実験を行へり。

本実験 砂層につき電氣抵抗を測らんには豫め規定液に浸し置きたる砂を用ひたり。即ち底端白金極上に白布を敷き、其上に砂を積み規定液にて十分に洗滌したる後、上部の圓形極板を底端より 12 cm の距離に保ちて測定せり、今砂層の厚さを l cm とし其電極抵抗を 25°C に於て B ohm とせば兩電極間の全抵抗 Π_{25} は次の如し。

$$\Pi_{25} = B + (12 - l) \times 5.70 \text{ ohm}$$

なるを以て、各種の砂の種々の l に対して測定をなし、之を圖上に表記せるは第九圖の B 線なり。本圖表より明らかなるが如く、砂層 1 cm に付き電氣抵抗は砂粒の大小に關せず 15 ohm なることを知り得、此結果より按

第九圖



ずるに空隙率は、類似の沈着状態に於ては、砂粒の大小に關せず不變なるを知る。此事實は既に求めたるものなるが電氣的にも同一の結論に達し得るは、其別證明となすを得べし。

10. 電氣的に毛細管直徑を測定する實驗

前節に掲げたる理論と實驗を基として、濾速を測定したる際、使用したる各種の砂に就て、食鹽水を用ひて、種々の状態の下に於て砂層中を通過する電流の受くる電氣抵抗を測定したり、其方法は前節と異らざるが故に之を省略す。

測定の結果を一々表記せり (測定表省略)。

前節によりて砂層 1 cm に對する電氣抵抗は砂種の如何に關せず、實驗に供したる程度の空隙率の下にては、15 ohm と見做すを得べきが故に次の計算には此値を用ふることとす。

次に前節に於ける (21) 式により食鹽溶液の比電氣抵抗を計算する時は、 $w = 1/0.0856$ となる。

(20) 式により

$$\frac{1}{B} = \frac{A}{w l}$$

にして A は毛細管の全面積なるを以て

$$A = n \frac{\pi}{4} d_v^2$$

又 B は l に正比例し且つ砂層 1 cm に付き 15 ohm なるが故に $B = 15 \text{ ohm}$, $l = 1.0 \text{ cm}$, $m = 1/0.0856$ なる式を上式に入れば

$$\frac{1}{15 \times 0.0856} = n \frac{\pi}{4} d_v^2 \dots \dots \dots (22)$$

次に Poiseuille の式によりて

$$8\mu l \frac{Q}{p} = \frac{n\pi}{16} d_v^4 \dots \dots \dots (23)$$

(22) 式と (23) 式を組み合せし時は

$$d_v^2 = 40.96 \mu \frac{Q}{l p}$$

となり、更に l は曲りたる途に沿ふて測る事先に考へたるが如くにし $p = \gamma h$ とし $Q/l = v$ とすれば

$$d_v^2 = 81.92 \frac{\mu v}{980 h} \dots \dots \dots (24)$$

又 $\frac{l}{h} = \frac{1}{J}$ とし、 $J = 1$ としたる時の v を測定表より求めて上式に入るときは、茲に Poiseuille の式と空流速とより得たる (16) 式と同様の形となり、唯異なるは 81.92 なる係数が、さきには 60.5 となり居るの點のみ、故に此場合に (24) 式より d_v を求むれば其結果は前法により得たる d_v に次の値を乗じたるものなるべし。

$$\sqrt{\frac{81.92}{60.5}} = 1.11$$

本節の方法によりて得たる d_v が前法によるものより 11% も大なるの理由は果して如何なる理由に基くやば明かに斷言するを得ざるも、兩法共に相似たる結果を得るは其實験法推理の點に於ての誤謬ならざるも、砂の如き天然の材料を實驗に供したる場合に於ける結果としては蓋し止むを得ざるべしと信ずるものなり。

第三章 濾過實驗に伸ぶ諸問題

1. 厚き砂層中への濾過作用の時間的變化

既記の實驗に於ては、砂層の最大厚は概ね 12 cm となし、夫れより小なる砂層中への濾過の法則を研究せるが何故に斯の如き厚き層のみを考へ、自然砂層又は之れに近き砂濾床の如き厚き層をとりて實驗をなさざるやの疑問の生ずる事あるべきにより、實驗室内にて行ひ得る成るべく厚き層に就ての實驗をなさんとの意味にて 第十圖に示す如き装置を作り砂層の厚さ 60 cm 以上に及ぼしたる濾過實驗を行ひたり。

本實驗に於ては一般的の性質を知るを以つて目的とせる爲唯一種の砂 B 種に就てのみ實驗したり。

實驗装置は大體前装置と異ならずと雖も砂層面積は内徑 1.8 cm の硝子筒を用ひたるが故に其面積は 2.55 cm² を有すること及び砂層圓筒の諸所の高さに於ける水壓を測定する爲、枝管を設けたり、之によりて砂層の厚さが一定するも其の層中に於ける損失水頭は必ずしも一定するものに非ざる事を示すものなり。今之を實驗例に就て説明せん。

實 驗(其一)

- 砂層の厚さ $l = 62.5 \text{ cm}$
- 濾過水頭 $h = 52.0 \text{ cm}$
- 砂層面積 $P = 2.55 \text{ sq. cm}$

100 c.c. を濾過するに要した時間 $t=2^m 21.6^s=141.6^{sec}$

$$\therefore v = \frac{100}{141.6} = 0.7 \text{ cm}^3/\text{sec./F}$$

$$V = \frac{v}{F} = \frac{0.7}{2.55} = 0.274 \text{ cm/sec.}$$

枝管相互の間の距離は大約 10 cm なり、最下枝管の番號を (1) とし番號を順次上の方に數ふる事とし、 t 秒の終りに於て次表に示すが如き壓力従つて枝管内水柱高の讀數を得たり。

枝管番號	1	2	3	4	5	6	7
水柱高讀數(cm)	21.0	28.5	37.1	45.9	54.5	63.4	69.0
差 (cm)		7.5	8.6	8.8	8.6	8.9	

番號 7 は損失水頭なき水面の高さなり。

上表によれば各 10 cm の砂層に對し、下より上に向つて各 7.5 cm, 8.6 cm, 8.8 cm, 8.6 cm, 8.9 cm の摩擦損失水頭の必要なる事を示す。即ち上層の方の 10 cm の損失水頭は下層の 10 cm の砂層よりは大なる水頭を要するを知る。

斯くの如き方法によりては濾過を繼續して、20 分間を経過したる後に於て同様に 100 c.c. を濾過するに要する時間と枝管の壓力水頭を測る時は次表の如し。

實 驗(其二)

枝管番號	1	2	3	4	5	6	7
水柱高讀數(cm)	21.0	28.0	36.3	44.5	53.0	62.3	69.0
差 (cm)		7.0	8.3	8.2	8.5	9.3	

此時の濾過速度は次の如し。

$$t=2^m 41.4^s=161.4^{sec} \text{ なるが故に } V=0.244 \text{ cm/sec.}$$

更に第二圖の實驗後繼續濾過を行ひ 20 分を経過したる後に同様の觀測は次表の如き結果を得たり。

實 驗(其三)

枝管番號	1	2	3	4	5	6	7
水柱高讀數(cm)	20.5	26.6	33.9	41.4	49.4	59.5	69.0
差 (cm)		6.1	7.3	7.5	8.0	10.1	

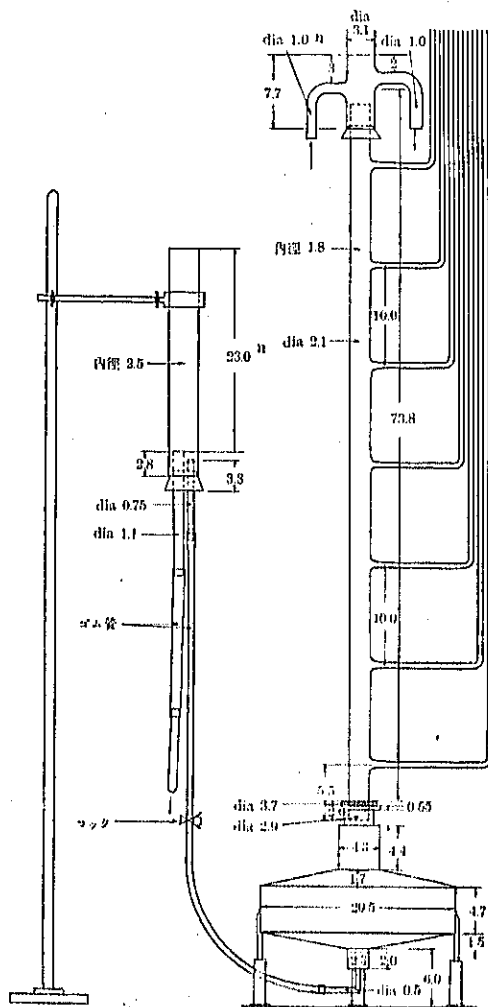
此時の濾過速度は前の如く 100 c.c. に對する t を求むるに $t=3^m 10.3^s=190.3^s$ なるが故に $V=0.205 \text{ cm/sec.}$

實 驗(其四)

第三圖の觀測後 30 分間を経過したる後同様の方法によりて觀測を行ひ次表を得たり。

枝管番號	1	2	3	4	5	6	7
水柱高讀數(cm)	20.2	25.2	31.4	38.0	45.9	53.7	69.0
差 (cm)		5.0	6.2	6.6	7.9	13.8	

第 十 圖



(圖中數字は cm 單位なり)

此時 100 c.c. 濾過に對する $t=3^m 51.0^s=231.0^{sec}$ なるが故に $V=0.17 \text{ cm/sec}$ なり。

以上は 1.5 時間に亘る繼續濾過の一例に過ぎざるも、濾過作業が一定不變の定常的狀態にて行はれ居らざることを明かに認むるを得るものなり。

更に其砂層内の壓力が到る處に變化しつゝある模様を検するに、最高 10 cm の砂層を第一區とし次第に下の方に 10 cm の砂層を考へ之を第二區、第三區等とし一區毎に於ける所要水頭を求むるに其變化は次の如きを見るべし。

	第一回	第二回	第三回	第四回	
第一區	8.9 cm	9.3 cm	10.1 cm	13.8 cm	順次増
第二區	8.6 "	8.5 "	8.0 "	7.9 "	順次減
第三區	8.8 "	8.2 "	7.5 "	6.6 "	同
第四區	8.6 "	8.3 "	7.3 "	6.2 "	同
第五區	7.5 "	7.0 "	6.1 "	5.0 "	同
濾過速度	0.274 cm/sec	0.244	0.205	0.170	

上表を見るに第一區に於ては濾速が次第に減じたるにも拘らず、所要水頭が漸次増すが如き通常狀態と相反する結果を示すを見るべし。而して其何れの區間に於ても濾速と所要水頭とが正比例するが如き現象は起らず。

之或は濾速の大なるに失する結果に非ずやとの疑問あるべきを以て更に濾過水頭を減じて同様の實驗を行へり。本實驗にては $l=62.0 \text{ cm}$, $h=36.6 \text{ cm}$ にて濾過開始後 5 m, 25 m, 45 m と 20 分毎に讀數をとりたり。之を實驗其五と名づく。

實 驗(其五)

枝管番號	1	2	3	4	5	6	7
水柱高讀數(cm)	35.5	40.0	46.7	52.6	58.6	64.9	69.0
差 (cm)		5.9	5.8	5.9	6.0	6.3	

本實驗にては 100 c.c. 濾過に對する $t=2^m 47.9^s=167.9^s$ なるが故に

濾 速 $V=0.233 \text{ cm/sec.}$

實 驗(其六) (25 分 後)

枝管番號	1	2	3	4	5	6	7
水柱高讀數(cm)	35.6	40.9	46.9	52.8	58.8	65.1	69.0
差 (cm)		5.3	6.0	5.9	6.0	6.3	

此時の $t=2^m 50.4^s=170.4^s$ なりし故に $V=0.222 \text{ cm/sec.}$

實 驗(其七) (45 分 後)

枝管番號	1	2	3	4	5	6	7
水柱高讀數(cm)	35.9	41.1	47.0	52.9	58.8	65.1	69.0
差 (cm)		5.2	5.9	5.9	5.9	6.3	

この時の $t=3^m 2.4^s=182.4^s$ なりし故に $V=0.215 \text{ cm/sec.}$

各實驗に於て t を定むるには 5 回の觀測値を平均したるものなり。

前の如く各 10 cm の一區に於ける所要濾過水頭を表記すれば次の如し。

	第五回	第六回	第七回	
第一區	6.3 cm	6.3 cm	6.3 cm	不 變
第二區	6.0 "	5.9 "	5.9 "	減

第三區 (cm)	5.8	6.0	5.9	増 後 減
第四區 (%)	5.8	6.0	5.9	同
第五區 (%)	5.9	5.3	5.2	漸 減
濾 速	0.233 cm/sec. 0.222 cm/sec. 0.215 cm/sec.			

以上を見るに濾速は減ずるも第一區に於ては所要水頭不變なるは前の場合の如く同量を濾過するには所要水頭を大ならしめざるべからざることを示す、之前實驗と揆を一にするものなり。

第二區は殆んど不變と稱するも可なるが之も第一區と同様の意義を認むるを得べく。第五區は漸次所要水頭を減ずる事前の第一回乃至第四回に於て見たると同様なるに、第三區及第四區は一旦増したる後に減じたる事は前には認め得ざりし事なるも、甚だ不規則なる變化が生じつゝあるを認むるを得るなり。

仍て更に濾速を減じて次の如き實驗を繰返したり。此際 $l=62.6$ cm $h=28.0$ cm にて、濾過開始後 12.5^m, 32.5^m, 52.5^m を經過したる際の枝管讀數をとりたり。

實 驗 (其八)

枝管番號	1	2	3	4	5	6	7
水柱高讀數(cm)	43.0	47.7	52.0	56.5	60.3	65.0	69.0
差 (cm)		4.1	4.3	4.5	4.3	5.1	

此時の $t=3.3^m$ $52.6^m=232.6^m$ なりしにより $V=0.108$ cm/sec.

實 驗 (其九) (32.5^m 後)

枝管番號	1	2	3	4	5	6	7
水柱高讀數(cm)	43.5	47.5	51.7	56.3	60.9	65.8	69.0
差 (cm)		4.0	4.2	4.6	5.0		

此時の $t=6.3^m$ $1.0^m=331.6^m$ なりし故に $V=0.109$ cm/sec.

實 驗 (其十) (52.5^m 後)

枝管番號	1	2	3	4	5	6	7
水柱讀數(cm)	43.6	47.0	51.8	56.3	60.9	65.8	69.0
差 (cm)		4.0	4.2	4.5	4.6	5.1	

此時の $t=6.3^m$ $11.5^m=371.5^m$ なりし故に $V=0.106$ cm/sec. 前になせると同様に各區 10 cm 毎に要する水頭を列記して時間的の變化を示さん。

	第八回	第九回	第十回
第一區 (cm)	5.1	5.0	5.1
第二區 (%)	4.3	4.6	4.6
第三區 (%)	4.5	4.6	4.5
第四區 (%)	4.3	4.2	4.2
第五區 (%)	4.1	4.0	4.0
濾 速	0.108 cm/sec	0.109 cm/sec	0.106 cm/sec

上表を見る時は第五、第六、第七回に於ける結果と殆んど同様にて、從つて濾過水頭としては最上層附近に於て最も多くの水頭が費され、上層の抵抗が増加するに從つて下層の等厚層に於ては濾過水頭は比較的小にして等量の水を濾過するを得る事となるなり。

此實驗に於て知る如く上層より次第に下層に行くに從つて砂層内の壓力が減少するものなるを以て、等温にても尚ほ水中に含有されたる空氣を極めて少量づゝにても放散す、此空氣は氣泡となりて砂粒に附着するを以て益々

水の通過が妨げられて濾過に要する水頭は益々大とならざるべからず。此の如き繼續濾過を長時間に亘りて行ふ時には漸次濾過能力減退し遂に全然濾過が阻止されるに至る事あり。

本實驗に於て見るが如き砂層内の濾過現象が時間的に變化して一定の状態にある事なきは厚き砂層に於て見る所にして、薄き砂層にては比較的變化少きを以て砂層内の濾過水流の性質を研究するには却つて小規模の薄き砂層による方一様の結果を得べきにより、本研究に用ひし位の規模のものゝ方却て大規模の實驗よりは可ならんと信ず。

終に前記 10 回の實驗の結果を圖示すれば附圖第五を得べし。Forchheimer 教授も亦厚き砂層内の諸所の部分にて濾過現象が甚だ不規則なる事を V.D.I. 1901 に示されたり。

2. 周壁の影響が濾過速度に及ぼす關係の有無

此問題は濾過作業に従事する人々に屢々論議される所なるを以て、稍々詳細に實驗研究せんとす。

本實驗を別ち二次の二とす。

1. 定性的實驗
2. 定量的實驗

以下兩實驗につきて記述せんとす。

(1) 定性的實驗

本實驗は硝子筒中に砂を入れて、前實驗と同様に砂層の厚さと濾過水頭を變じ、種々の砂に就て本問題の解決を期すべきに至當とす。然るに既に各種の砂と各種の厚さと各種の濾過水頭に就て實驗せる結果を知り、且つ濾過速度が砂層の厚さに逆比して濾過水頭に正比例する關係を保つに於ては特に數多の異りたる場合を考ふるの要なく、次の如く 3 種の砂を以て代表せしめ得べし、其代表的の砂としては、前掲深沼藏の砂の内、C、E 及 G 種をとれり。C 種は粗粒にして、G 種は相當に細かく、E 種は其中間の大きさを有す。且つ砂層の厚さは、全部 10 cm とし濾過水頭は 25 cm, 50 cm, 10 cm 及 15 cm とす。斯くすれば $f=0.25, 0.5, 1.0$ 及 1.5 となり、前掲の實驗に於て知る如く、 v は f に正比例する範圍内にあるを以て、一々多くの場合の濾過實驗をなさざるも一より他の場合を類推換算し得るものなり。

定性的の實驗としては、或る一定の濾過實驗と同一の状態の下にて、砂面の中央部と周壁部とに於て如何程の速度にて水が通過するかを検すれば可なり。尙て本實驗にては先づ phenolphthalein の美麗なる赤色液を作り置き、其液の比重は水と等しくなる様に濃度を定めたり。實驗裝置は細き注射針を通して砂面に着色液を流し、砂層を通過する時間を測りたり。此色は砂によりて少しも吸收又は吸着されることなく濾過砂層の底に用ひたる白布にも毫も染まらずして之が底に達するや白布に明かに色が漏出するにより容易に濾過速度を知り得るものなり。

其實驗順序は次の如し。

與へられたる砂層の厚さと濾過水頭の下にて濾過速度を測定する方法は既記せる所と同様なり。即ち、砂を下側より水によりて吹き上げ自然に沈着せしめたる後に濾過を行ふ。

而して濾過を測りたる後に着色液を流すべき鍼尖を砂面の中心にて之に下度觸るゝ程度にて、 v 、液を通ずる管のロックを開き色を流し、之が底面に緊張されたる白布に赤く顯出する迄の時間を測り、測定表に記入す。次で針の尖端を圓筒硝子壁の砂面に接觸せしめ、同様の方法により、色が白布面に顯出するまでの時間を測り之を測定表に記入す。此際全周を大約 5 等分して、次々に異りたる周壁の點に鍼の尖端を置ける様に移動す。又着色せざる水のみを濾過は其間に時々之を測定し記帳す。以上の如くにして砂種 3 種に就て測定せる結果を見るに中心と

周壁とにて 10 cm の砂層を通過する時間は殆んど其差を認めざるが如く小にして強いていへば中央部は周壁よりは稍々速に濾過さるゝと稱すべくして、一般に盲信さるゝと反對の傾向を有するを知る。

本実験をなしたる副結果として、從來一般に信じられし如く色素は濾水よりも速に砂層を通過するといふ性質を知り得、而して濾水の平均速度を 1 とすれば色素の夫れは 2 に近き値を有す。此數に付ては曾て Chalon* が發表せる 1.9~2.0 倍と近し、尙ほ茲に附記すべきことは本実験にては着色液の比重は水の夫れと等しくなる様に豫め作れるものなるが故に、此液が重きが故に速に砂層を通過するものとは認め得ざるものなり。

(2) 定量的實驗

本実験にては、硝子筒、トタン筒及セメント筒の 3 種に就て、斷面積を異にする砂層を通過する量を測りて比較せる結果、周壁の影響がありとすれば若し周壁の方は中央部より速かなる時には斷面積に比し周長の大なる小管は、之に反する大管に比し大なる平均濾速を有すべきなり。而して之に反する場合には、之に反する結果を得べきものなり。今以上 3 種の筒に就て、之等の關係を實驗によりて定めんとす。

實驗(其一) ガラス筒の實驗

實驗に供せる筒は 3 本にして其直徑は 5 回之を測りて平均せり、其平均直徑と斷面積は次の如し。

	管の直徑	斷面積
大 管	4.48 cm	15.90 cm
中 管	2.40 "	4.63 "
小 管	1.65 "	2.27 "

ガラス筒は比較的精密に均等の直徑を有する如く製作されあるが故に直徑によりて定めたる面積を用ひ得べし。又實驗に供したる砂は深沼産の D 種のものなり。砂層の底の構造は細目を有する眞鍮網と白布を用ひ、大中小管共に同様の構造を有せしむ。

種々の濾過水頭と砂層の厚さに於て、濾速を測りたる結果を表に記入し、標準温度を 10°C とし温度に對する補正は $(0.7 + 0.03 t)$ を用ひ、各管の大きさに従つて毎平方寸、毎秒の濾過量を求め、更に $J=1.0$ の時の濾速即ち Darcy の k を求め、各の大きさの異なる管にて k の値を異にするや否やを檢せり。其結果次の如し。

番 號	大 管 (cm/sec)	中 管 (cm/sec)	小 管 (cm/sec)	注 意
1	0.127	0.120	0.120	番號 1, 2, 3, 4 の一つの 結果はすべて 25 回の測定 値の平均なり
2	0.127	0.128	0.121	
3	0.120	0.126	0.121	
4	0.112	0.124	0.120	
平均	0.125	0.122	0.121	

以上の表を見れば、大中小 3 管に就て、單個面積に於ての 1 秒時の濾過量は殆んど相等しくして、周壁に沿ひて速に濾過さるゝといふよりも反對に周壁の爲に、幾分濾速が阻害さるゝやも知れざるが如く感ぜらるゝも其影響たるや極めて微小なるものにして、實用上には影響なしと認め得る程度のものなり。

實驗(其二) 眞鍮筒に就ての實驗

眞鍮板を以て次の如き 4 種の大きさの異なる筒を作製したり、其底の構造は前實驗と同様に、眞鍮線網と白布を用ふ、但し其太さ大なる故底を補強する爲、太き鐵線にて極めて目の粗なる網を最下底に用ひたり。此鐵網の爲、濾

* Pring Hydrogie S. 210

速に影響する所あるかも知れざるが、全濾面に比して、此網の占むる面積は小にして、云ふに足らざる程度なるが故に、之を缺く爲に、底部の眞鍮網が弛みなば、却つて實驗を不結果に陥らしむるを以て、止むを得ざるに出でたるものなり。

4種の異なる大きさ筒の名稱を便宜上次の如く呼ぶこととせり。

名 稱	斷 面 積	斷 面 積 比
第一號筒	151.0(cm ²)	9.40
第二號筒	80.4 "	5.00
第三號筒	36.18 "	2.25
第四號筒	16.15 "	1.00

之等の筒は職工をして、注意して製作せしめたるも、均等的の直徑及斷面積を與へしむることは困難なるにより、次の方法によりて斷面積を決定せり。筒を直立せしめて、筒の底部を水密になし、最初砂層底部をなす眞鍮網の面まで水を充し、次で實驗の際、砂を入れるべき筒部に水を充し、其深さを測り、此深さに達する迄に筒部に加へたる水の重量を測りて水の容量を求め之より斷面積を決定せるものなり。然して前掲の値はすべて5回の測定の平均値を示せり。

砂は深沼産のものを用ひ、前に記述せる理由によりて代表的の砂として、C種、E及G種の3種をとれり、唯此場合には筒の大なるものにありては、下より水壓によりて水を攪亂して、自然に沈着する如き状態に砂粒の配置を一定にする事は留意する必要があるが、吹き上げの作業困難なるにより次の方法によれり。筒部に砂を充す際、豫め水に浸漬したる砂を少量づゝ匙にとりて、筒内の水中にて混亂沈定せしめ、更に次の一匙を加ふる時も同様に、既に沈定せるものも攪亂して沈定せしむ、かくする事によりて後に加へられたる粗粒のものは上層に留まることなく前に加へたる細粒のものは、下層に留まらずして上層に来る様になり、恰かも吹き上げた後に沈着せる場合に近似したる細粒の配置となるべしと考へたるによる。若し然らずとするも本實驗を通して、同様の砂粒配置をなさしむる必要上、上記の方法を探れり。其他の實驗上の注意方法及装置の概要は、既記と異らざるが故に、之を省略することとす。測定の結果は表に記入し、前回と同様に標準温度を10°C、 $J=1.0$ として Darcy のもの値を4種の異なる大きさの管に就て算出し次表を得。

	第一號筒	第二號筒	第三號筒	第四號筒	注 意
C種の k	0.197(cm/sec)	0.194	0.202	0.196	掲記の1種の數字 はすべて10回測 定の平均
E "	0.073	0.072	0.075	0.078	
G "	0.034	0.035	0.032	0.032	

上表を見れば筒の大きさが濾速に及ぼす影響は、之を認むるを得ずと稱するを至當とす。

實 験 (其三) セメント筒を用ふる實驗

既述の如くセメント筒を作り、亜鉛筒と同様に底部を作りて、3個の直徑を異にするものに就て、濾過實驗を行へり。すべて前實驗と同様の経路をとりたり、筒の大きさは次の如し。

名 稱	第一號筒	第二號筒	第三號筒
斷 面 積	157.40(cm ²)	79.98	39.75
斷 面 積 比	3.96	1.97	1

實驗に使用したる砂は、深沼産のC種、E種及G種の3種なり。

其結果を記すれば次の如し。

	第一號筒	第二號筒	第三號筒
C 種の水	0.224 (cm/sec)	0.201	0.206
E 〃	0.0681	0.083	0.082
G 〃	0.041	0.041	0.042

注 意
前圖の場合と同じ

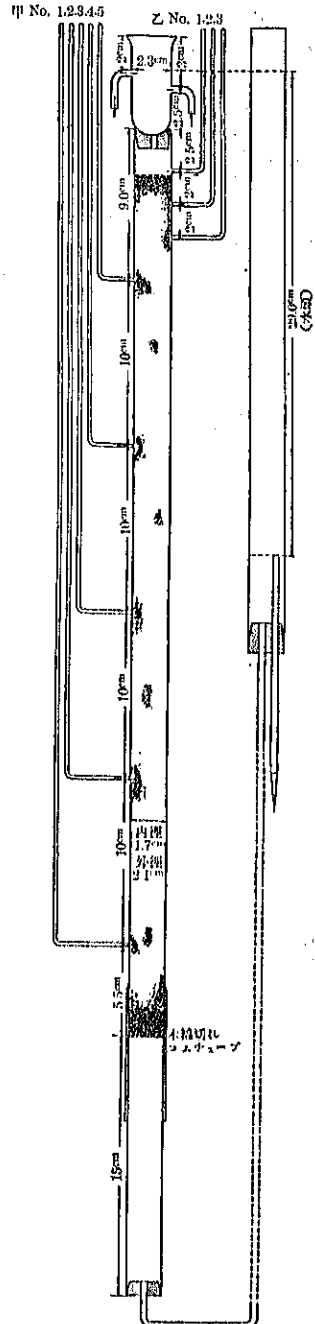
本表を見るも、前實驗と同様の結論に達すべく、何れの材質の周壁にても、砂層と接する面に於て、特に速かなる濾過を有するものとは断定するを得ず。但し本實驗にては砂層の上面に濾過膜を有せざるが故に、實際の濾過池の場合に於て濾過膜と周壁との接面に間隙を生じ之が爲に周壁に沿ひたる部分が、中央部に於けるよりも速に濾過が行はるべしとの問題は別個に考へらるべきものなり。然れども小規模に行ひたる本論の實驗の結果を大なる砂層にも其儘應用し得べき論據としては重要な一結果と稱するを得べしと信ず。

3. 長時間に渉る戸外に於ける濾過

長く濾過を繼續したる場合の砂層内の壓力變化を室内にて行ひたる結果は第三章第一節にて記述せる所なるが、戸外に於て日光を受けたる所にて、長き濾過作業を繼續せば、或は砂層表面に下等生物を生じ、濾過膜の生成することあるべきかとの豫想の下に、濾過實驗を行ひたり。此際實驗に用ひたる水は上水道管より導きたり。上水中には生物の種子、胞子等を含まざる爲に更に膜濾のものを生ずることなかりしが、濾過作用は漸次減退するを見る。之砂層内に氣泡を生ずる爲、之に妨げられて、水は能く濾過されざるによる。此現象は小管にても屢々見得る所にして、時間の経過と共に濾過力の減退する主なる原因は、實に此處に存するものといふも過當に非ざるが如し、勿論濾過膜を通過する爲には、甚しく濾過水頭を費すことは、明かなる事實なるも、前述の氣泡の影響も相當大なる事は、本實驗に於て認め得る如き、濾過膜を生ぜざるにも拘らず、濾過力時間的に著しく減退するを見ることは附圖第六を検すれば明かに之を知るを得べし。本圖は昭和6年7月6日より同月21日に渉る間に第十一圖に示す装置を用ひて、連續的に濾過を行ひたるものによる。之に用ひたる砂は、仙臺市上水道濾過池に實際用ひつゝあるものなり。附圖第六に示す如く1日に1回又は2回に濾過を測り、且つ各枝管の壓力を測り之を記録せり。

圖表によれば枝管水柱の高さは甚しく不齊にして其原因は明かに硝子壁を通して見ゆるものにて、氣泡の存するによるものなり。斯くの如くに、濾過能力の衰へたる砂層に對し、何處か甚しく氣泡の蓄積せる枝管の空氣を除去する時は之に伴ひ砂層内の氣泡も極めて僅少なれど除去される場合あり、或は然らざる場合もありといへども、之が原因となりて、減退したる濾過が回復するを認め得。故に1枝管の氣泡を除ける場合に、濾過速度を増し、2枝管ならば更に増加するや明かならん。然れども濾過能力の回復は、其當初の能力には達せずして、漸次衰退するを見る。

第十一圖



本實驗に於ては第十一圖に於て見る如く、圖の左方には5本の枝管を種々の高さより分岐し、以て砂層内の壓力變化の模様を知らんとすること、第一節の實驗と同じ。又右方には3本の枝管を分岐せしめたり。其目的は砂層表面に濾過膜が生ずるならば之が爲に幾許の濾過水頭を費さるゝ事を測らんとするものなり。前記5本の枝管を甲と稱し1號より5號迄の名を附し表記に便せり。同様に上層にある枝管を乙と稱し1號より3號と呼べり。然れども既記の如く濾過膜は成立せざりしを以て乙號枝管は豫期の目的には何等の用をなさざりしものなり。されど表層附近に於て濾過水頭の大部分が費さるゝ事を示すものにして、濾過膜が存せずとも此結果を見るは、濾過作業に於て特に注目し得べき一事實と稱すべきものなり。

上水道の緩速濾過池に於ても、砂層内に空氣の蓄積する事は既に知られたる所なるが、普通淨水作業を長日目に涉りて繼續するに其間に、砂層内の空氣を除去するが如き作業を行はざるが故に、濾過の減退は一に濾過膜の生ずるに基くものとなすも以上の事實に徴すれば尙ほ大に研究を進め同一濾過池に於ても、濾過能力の増加をなさしむる方法を講ずる作業方法を得べきものならんかとの信念を著者は有するものなるが、遺憾ながら、未だ之を實地に於て調査するの機を有せず。仍つて著者の一疑問として記述し、將來未問題を解決の機を待てるものなり。

感 謝

本研究實驗をなすに當り、最初より多大なる厚意を以て援助協力をなされ、且つ化學實驗用諸器具、藥品類並に實驗室を使用する便宜を興へられたる、仙臺高等工業學校教授理學博士河上益夫氏に對し、深甚なる謝意を表し、併せて助手佐藤農治君の熱心なる助力を感謝す。

第十二回編輯委員會

協議事項

1. 第十八卷第十一號討議依頼先決定三件
2. 原稿調査
3. 第十九卷第二號登載論文決定並に第三號論文暫定三件
4. 昭和七年度優秀論文に因する件

以上

原稿調査 (昭和七年12月19日現在)

論説報告

25	-	-	200	(1) 弾性地盤上に置かれたる版の近似計算法	准工	松村 孫治	11.24
10	-	3	140	* (2) 水圧隧道の漏水に就て	会工	石井 頼一郎	12.2

討議

2	-	-	20	* (1) Theorie der Roste und ihre Anwendungen	准	御厨 忠文	11.29
12	-	-	100	* (2) The Derivation of Influence Equations of Statically Indeterminate Structures	会	座野 卷治	12.6

彙報

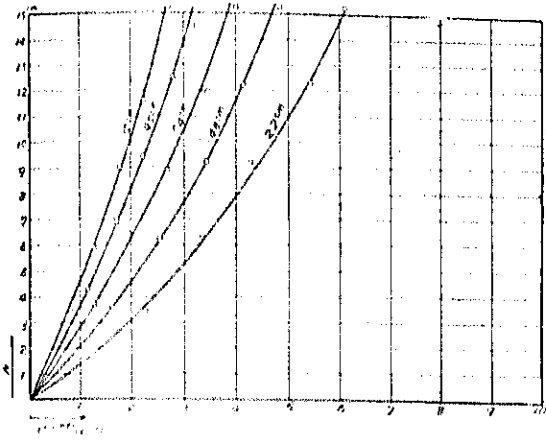
参考資料

15	-	-	100	(1) 故末廣博士の應用地震學に就ての講演	工	五十嵐 醇三	12.2
2	-	-	15	* (2) Jenkinの土圧論と其実験	准工	野坂 孝忠	12.7
4	-	-	30	* (3) 上端に水平力を受くる杭の解法	会工	福田 武雄	12.7
1	-	-	8	* (4) 乾燥汚泥用削集機	准工	枝倉 誠	12.12

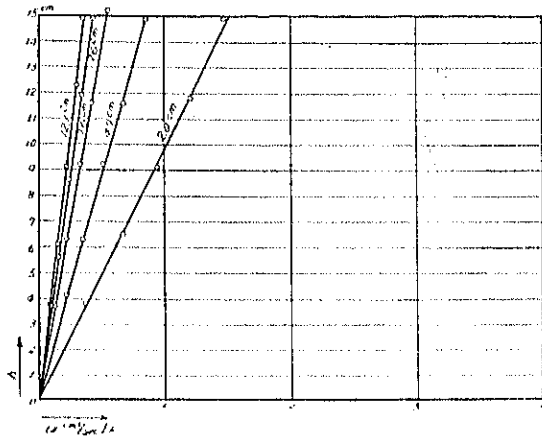
* 印は新原稿

附圖第一

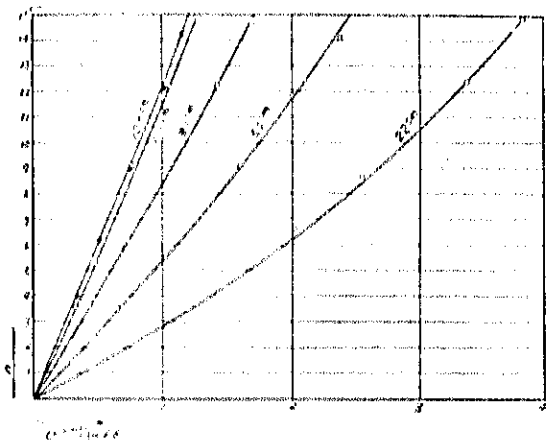
(其一) 砂種 A



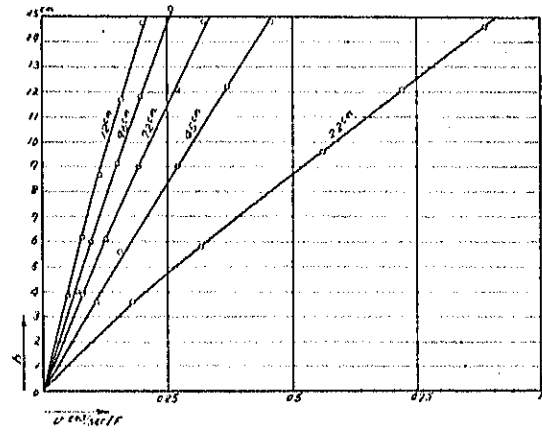
(其四) 砂種 D



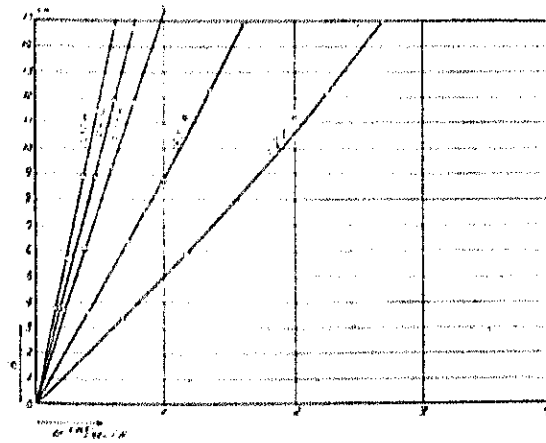
(其二) 砂種 B



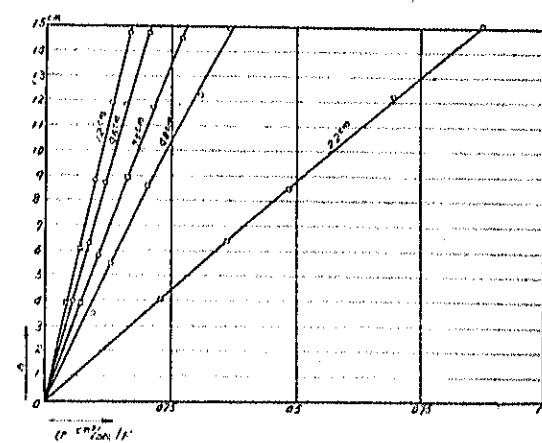
(其五) 砂種 E



(其三) 砂種 C

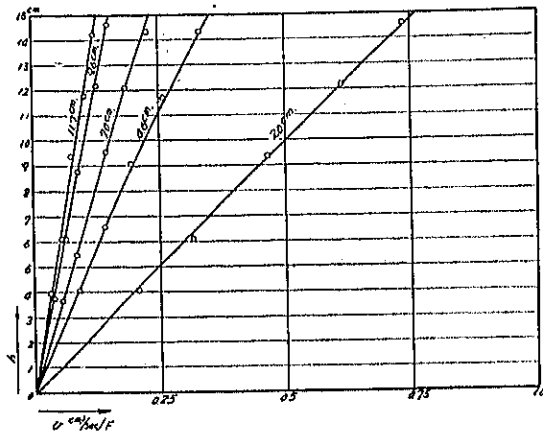


(其六) 砂種 F

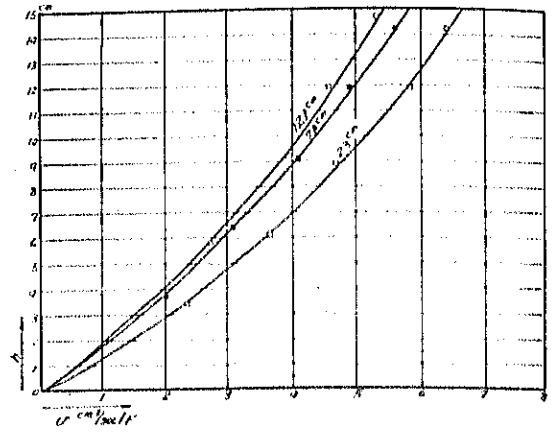


附圖第一

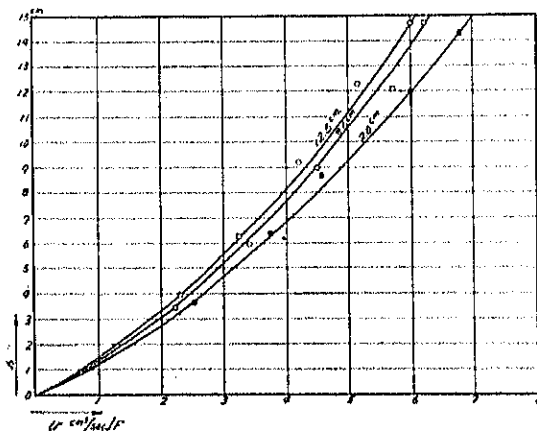
(其七) 砂種 G



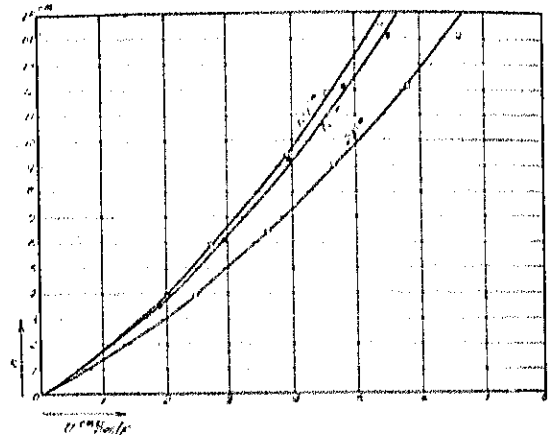
(其十) 第三號散彈 3.45mmφ



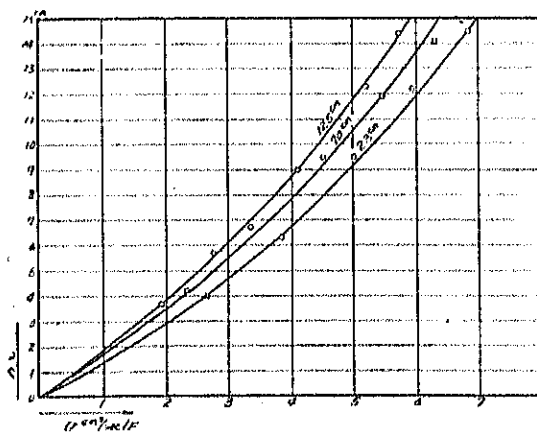
(其八) 第一號散彈 3.7mmφ



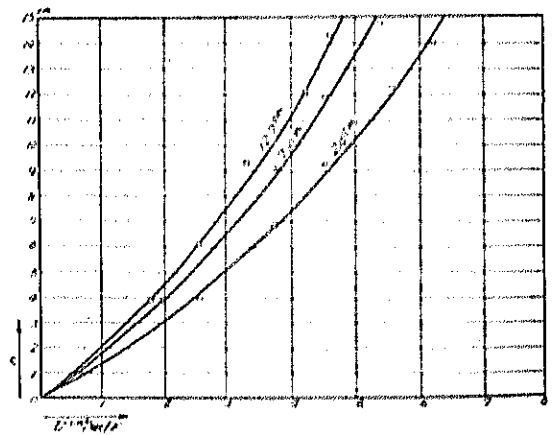
(其十一) 第四號散彈 2.9mmφ



(其九) 第二號散彈 3.6mmφ

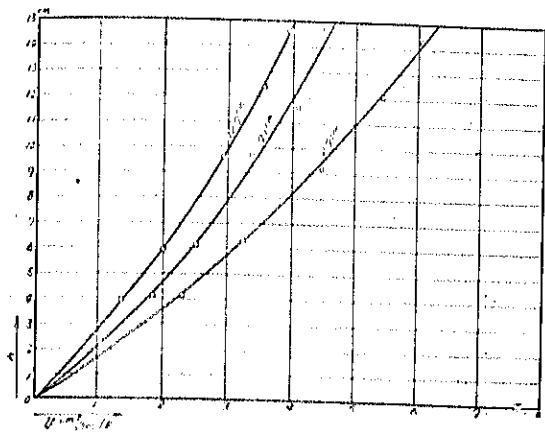


(其十二) 第六號散彈 2.5mmφ



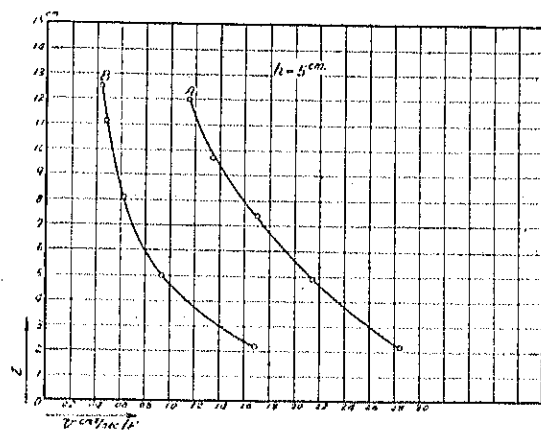
附圖第一

(其十三) 第八號散彈 2.2mmφ

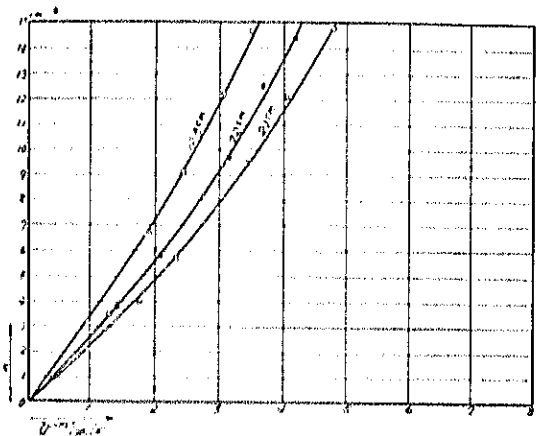


附圖第二

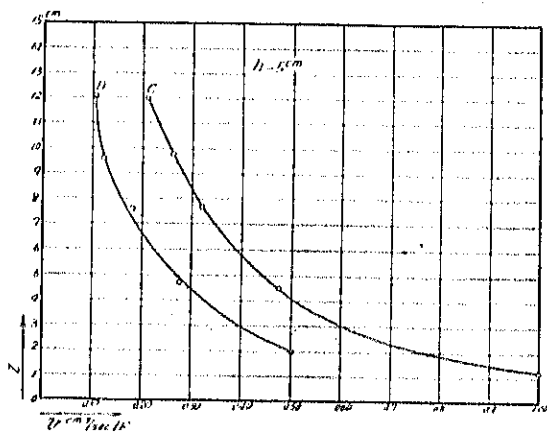
(其一)



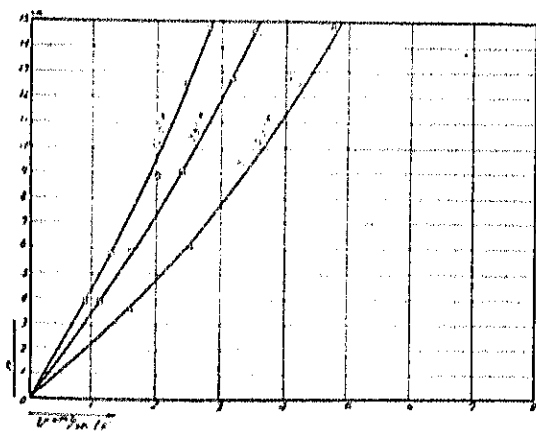
(其十四) 第十號散彈 1.8mmφ



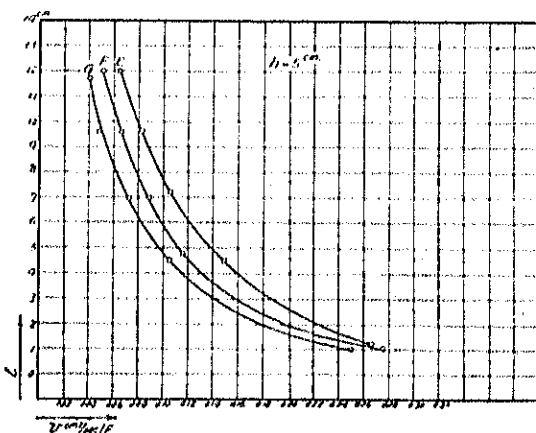
(其二)



(其十五) 第十二號散彈 1.5mmφ

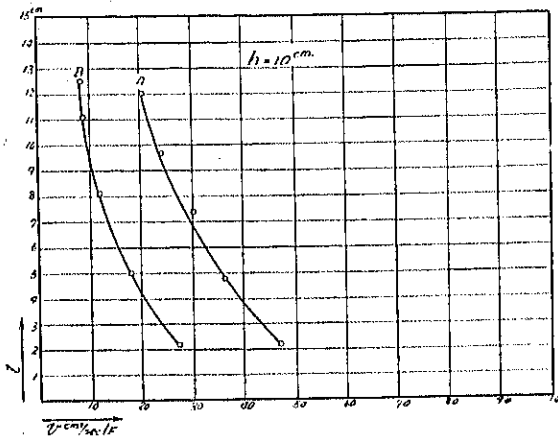


(其三)

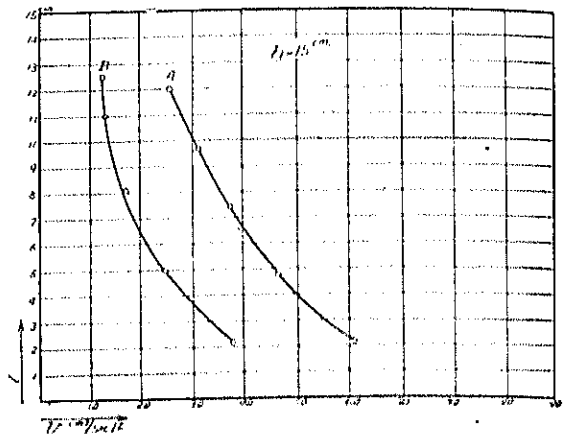


附圖第二

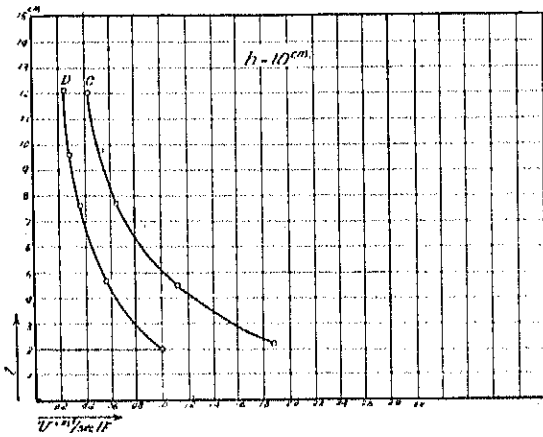
(其四)



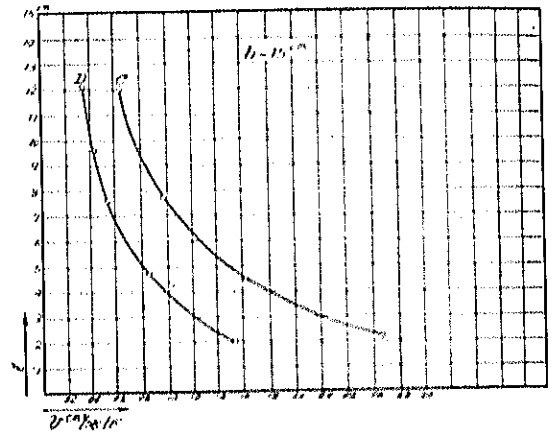
(其七)



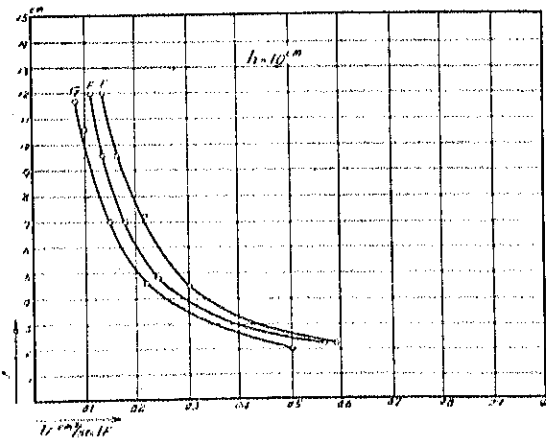
(其五)



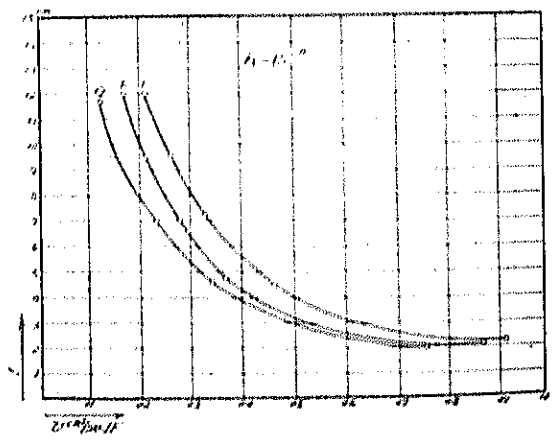
(其八)



(其六)

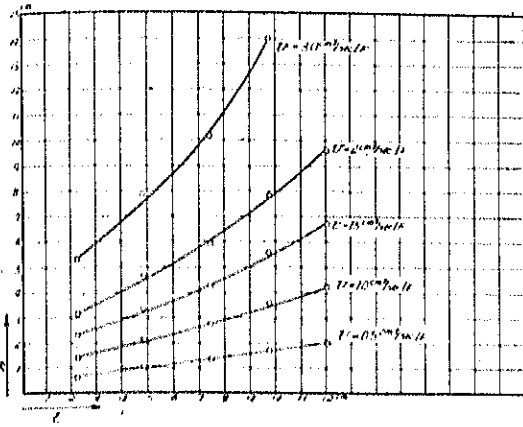


(其九)

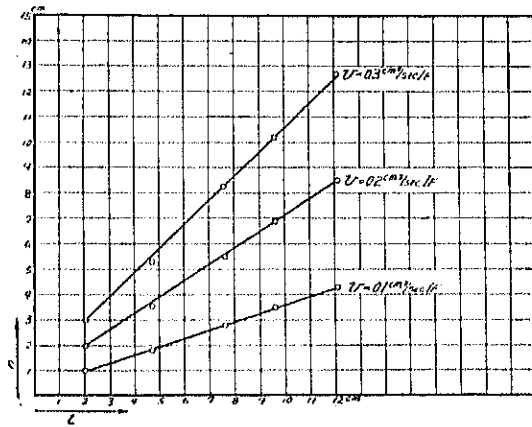


附圖第三

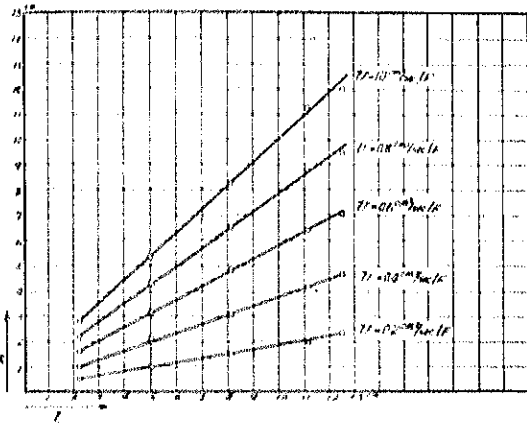
(其一) 砂種 A



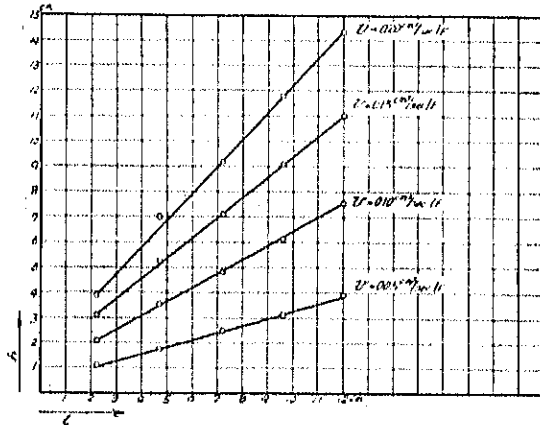
(其四) 砂種 D



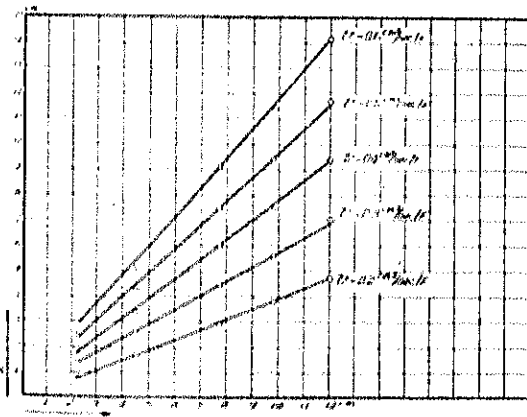
(其二) 砂種 B



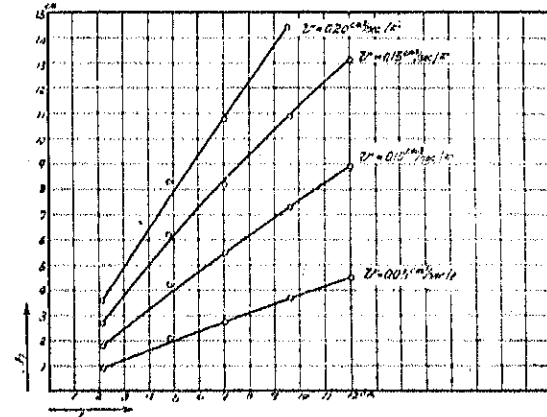
(其五) 砂種 E



(其三) 砂種 C

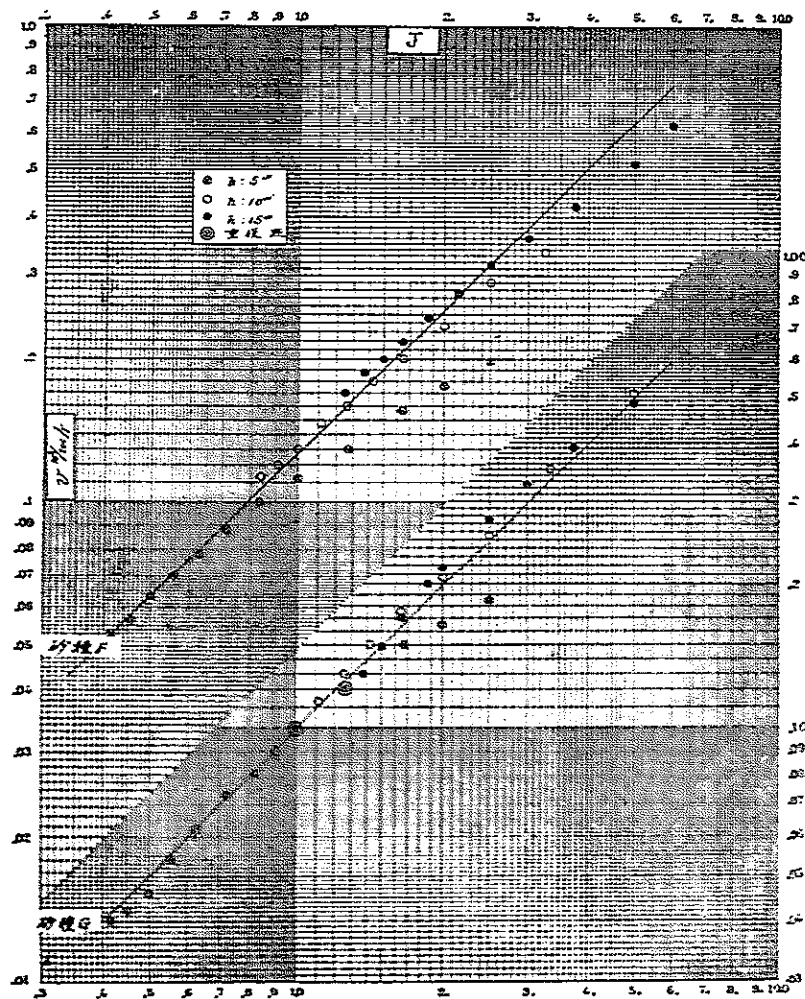


(其六) 砂種 F

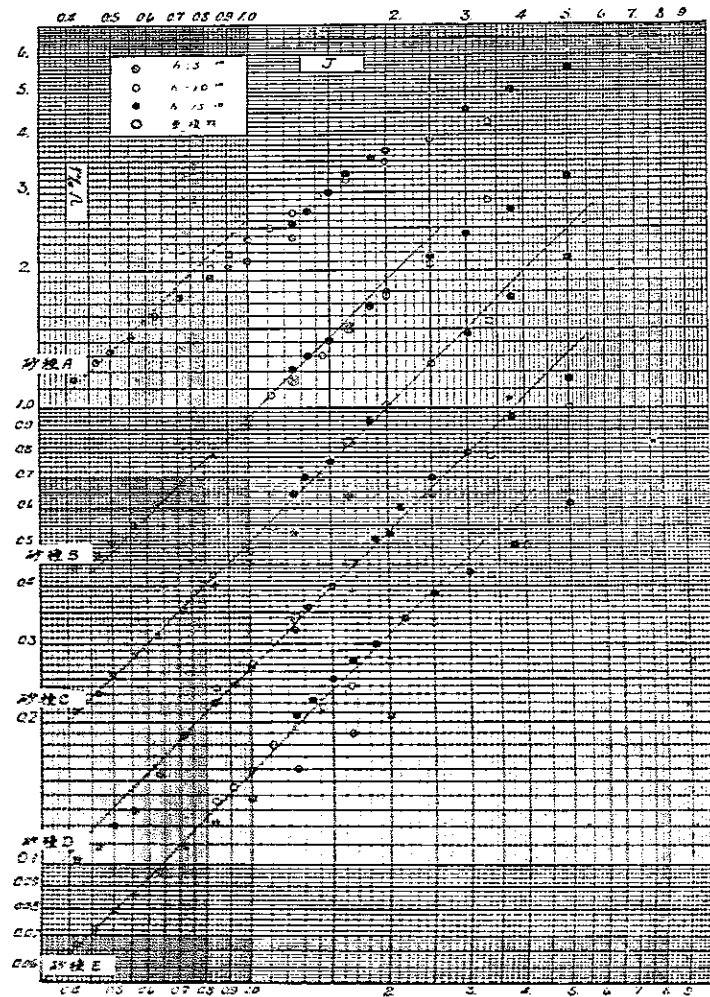


附圖第四

(其一)

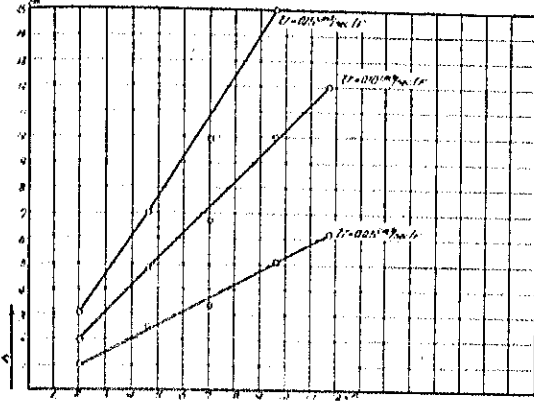


(其二)



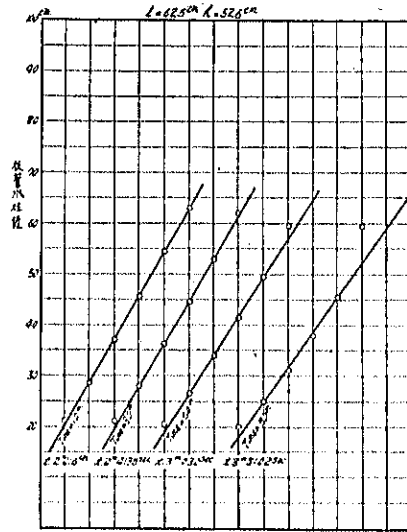
附圖第三

(其七) 砂種 G



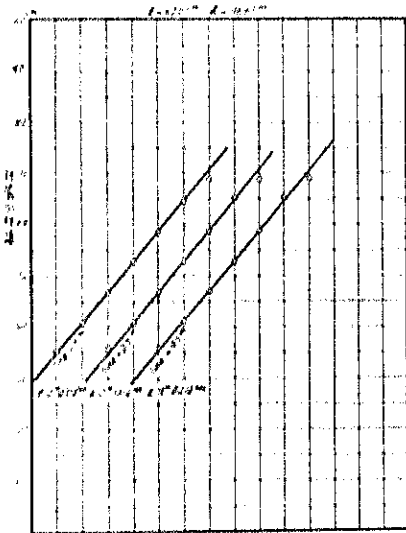
附圖第五

(其一) 砂種 B

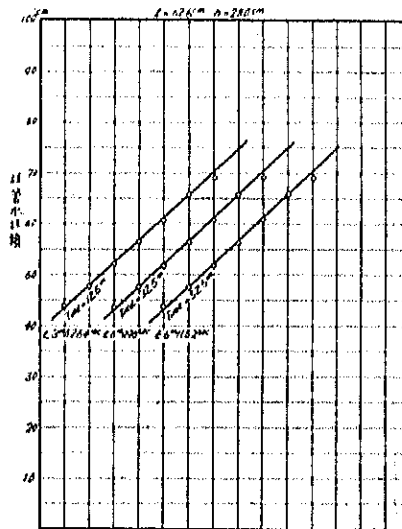


附圖第五

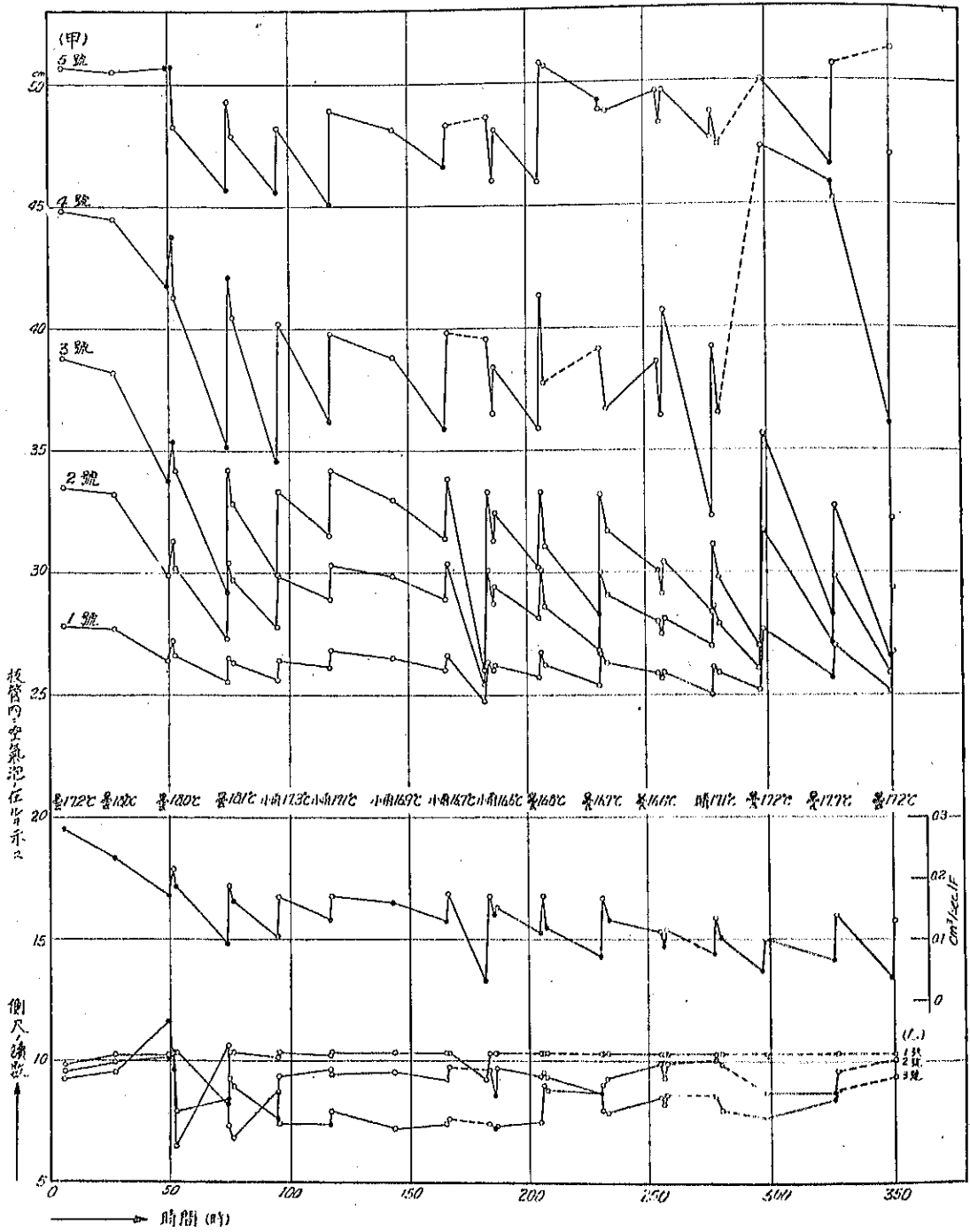
(其二) 砂種 B



(其三) 砂種 B



附圖第六



昭和六年七月六日午後五時五分開始
 同年同日午後五時五分終了

軌跡
 するは
 つま
 快速
 速
 此外
 て軌跡
 て軌跡
 によ
 80米
 軌跡
 我
 の飛行
 間の精
 (1
 10
 昭