

日本内地は若い地形がかなり多いからこれより高くなるのは豫想される。

次に試みに廣い高原のある咸鏡南道と略グレードに達した洛東江の流域を占めた慶尙南道との平均高度を前に掲げた材料によつてプリスマトイド及び圓錐を併用して算出して見た。慶南の最高點は智異山の一九一五米を用ひた。其結果は咸南は九五六米六、慶南は二六九米九の平均高度を有するのを知つた。即ち咸南は慶南の三倍半以上の平均高度を有し、アジアとヨーロッパとの對稱と略似てゐる。若し八百七十八米（論山、錦山、全州境の大屯山）以上の地點のない忠清南道や山地はあつても百米以下の土地が

地下水に就いて

渡邊 貫

緒言

地下水の本性に就いては誤つた考へを持つてゐる人が多い。

廣く——そこには若い准平原もある——且つ最も卓越してゐるのは五百米以下の低山地である黄海道（黄海道の最高點は一四八六米）の平均高度は慶尙南道にも増して低いことゝ思はれる。今回は之等を計算して見なかつたが、前の表には其の高度別の面積を併せ載せて置いたから、地學家として加減乗除に面倒さを感じられない讀者の計算を試みられることを希望する。

日本のうちの平均高度に關する最初であるだらうと思ふこの一小報告が後のすばらしい自然地理的數量算出の露拂ひとなれば幸ひ至極である。

特に地質家に大れが多いやうであるのは誠に遺憾である、之れは生じ地質學の教科書等に挿入されてある誤つた地下水の

觀察法を讀んで觸されてゐるためである。自分も現在の地下水に對する考へ方になるに六年間を要した隧道を掘つて地下水が潤れる問題に度々當面したお蔭である、丹那隧道では潤水事件で本年度までに既に二十萬圓の補償費を支出した將來益々この影響は擴大するであらう。

現在問題になつてゐるものでは萩線大刈隧道、三鼻線吳隧道土讃南線市喜山隧道、長門線境川隧道等である、特に吳隧道の如きは二千戸の飲料水の供給を迫られてゐる山々しき大事である。紀勢西線由良及小場師隧道、長門線堀越隧道は多額の補償金で既に落着した、隧道工事が斯うした方面まで波及して來て、地質家の仕事が増えて來たことは難しいだけまた興味あるものである。獨乙ではこの問題では大分苦しんでゐると見え既に一九一三年に、プロシア民法の特別法として地下水保護法案 (Grundwasserschutzgesetz) を起草し議會の協賛を得つゝ (Krusch, Gerichts- und Verwaltungs-Boogie 參照) 鐵道省でも目下大臣官房法規課長喜安健治郎氏の手許で研究して貰つてゐる。

同時に熱海建設事務所には地下水實驗室を設け、丹那隧道坑内の實地の應用と協力して盛んに研究をしてゐる、自分や廣田技師等もその仲間であるが主任の阿部技師が近日論文を發表することになつてゐる。

まるで教科書のやうな書き方をして實に僭越極まる話であるが、實地の地質家の多少とも御參考になりはしないかとの老婆心からである、若し疑問や誤謬の點があつたら直接小生の

地下水に就いて

處まで(鐵道省建設局計畫課)御知らせ願ひたい。

一、地下水の定義

地中にある水を次の三種類に分つことが出来る。

① 吸着水 (Hygroscopic water)

② 毛管水 (Capillary water)

③ 地下水 (Ground water)

吸着水といふのは分子引力に依て地中の土粒に吸着して居るもので、植物の根に依て吸上げることが出来ないやうなものを云ふ。

毛管水と云ふのは、毛細管作用に依て地中の土粒間に含まれて居るもので、植物の根に依て吸上げることが出来るもの、即ち上下運動が出来るものを云ふ。

地下水といふのは、地中の空隙を充たして居るもので、重力作用に依て流動をなし得るものをいふ。

二、地下水の成因

地下水の成因説に次の二種がある。

① 處女水 (Juvenile water)

②循環水 (Vadose water)

處女水の語源はフンボルトの「カル、スバアド噴泉は處女水なり (Das Karlsbader Sprudel ist juvenile wasser)」という言葉から出づ居る、夫れは地中奥深藏有されて居る岩漿から發散された水蒸氣が冷えて集積したもので、その水が地表に湧出して始めて太陽に觸れたといふ意味である。

然し乍らこの種に屬する地下水は溫泉とか其他の極く一部分に止まり、地下水の大部分は循環水に屬するものと見做した方がいゝやうである。

元來地球の表面四分の三の面積を占めて居る海面からは、太陽熱のため絶えず多量の水が蒸發され、之れが水蒸氣となつて遠く陸地のの上まで運ばれ、夫れが雨其他の形となつて地表面に落下する。この落下して來た水は其の一部は直ちに蒸發するが、一部は地中に滲入しその殘部は地表面を流れる、その滲入した水が地中奥深く侵入して行つて、地下深所にある不透水層に

到達すると、そこでその層より上部の地中の空隙は盡く水を以て充されて、こゝに地中水の集積が行はれる之れが即ち地下水 (Ground water, Grundwasser Eau Souterraine) に相當する。

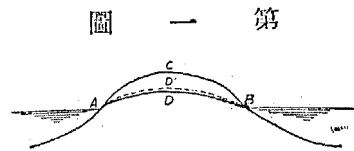
然し乍らこの地下水も泉となつて湧出し或ひは又河中に滲出したりして、集まつて河水となり再び海中に歸へつて來る。この現象を「水の循環」と稱する。

三、地下水の形狀

地下水の表面を地下水面 (Ground water table, Grundwasserspiegel, nappe d'eau souterraine) と稱する。

地下水の表面がどういふ形狀を呈して居るか云ふことを説明するために、便宜上茲に第一圖のやうな海中にある一様の性質の砂島を考へる、A、Bを通り周圍から絶えず海中に地下水は滲出するが、同時に地表面Cからは雨水が滲入して來る。その結果水の流動の本質に従て地下水面の形狀は、Dを中心とした圓形に近い凸面をなすことは明かである、尤も滲入水の増減

に従てその頂點はD—D'の間を上下する。



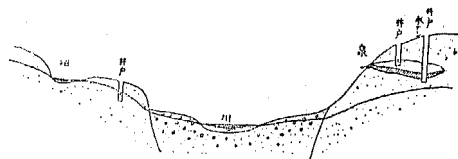
從て地下水面の形狀は、略その地形に應じて高低起伏するものと見做して、而して地下水面が勾配を以て居れば地下水は流動する、この現象を地下水流 (Underflow Grundwassers-
from Sousécoulement) と稱する
地下水面の深さは種々の事實に徴して見るに、略百呎前後のも
のを見做して、いゝやうである、

尤も地下水は必ずしもすべてが集合して居るとは限らない、不透水層が數多あれば各その位置で地下水帯を形成する。

從て地下水面の上部に不透水層がありそこに水溜を形成してをることがある、此の如きものを偽地下水 (False ground water) と稱して居る。或ひはその溜り方からして Perched water body とも云つて居る、Perch といふ言葉は鳥が木の枝に止まるといふ意味だそうである。又地下水

地下水に就いて

第二圖

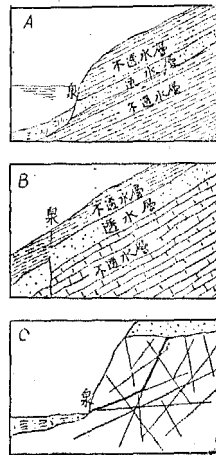


溜 (Grundwasserbecken) とか滞水 (Schwebende wasser) とも云つて居る (第二圖參照)。

泉 (Spring, Quelle, Source) と云ふのは、地下水面が地表と交接して居る場合で、その交接線に沿ふては泉が配列して居ることが多い、この線を泉位線 (Quellhorizonten) と稱して居る。

泉には此の如く地下水面の高さの關係からばかりでなく、地質構造に基く所謂放水口 (überfall) の條件に因る場合が屢々ある。例へば第三圖に示すやうに傾斜透水層に因るもの (Schichtquell-
en)、斷層に依り抑止された透水層に因るもの (Verwerfungsquellen)、高位地にある透水層内の水が龜裂又は節理に傳ふ靜水壓作用に因るもの (Spaltenquellen) 等の如きものである。掘抜井戸 (Artesian well artesischer Brunnen, Puits

第三圖



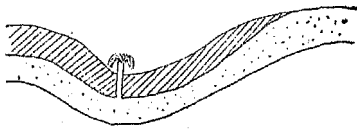
artésien)といふのは第四圖に示すやうに、不透水層の間に挟まれた透水層内の井戸を掘り、その中の地下水の持つ高い静水壓力を利用して自噴せしめるものである。

四、地下水の流動

(a) 土砂中に於ける土の壓力及び流動

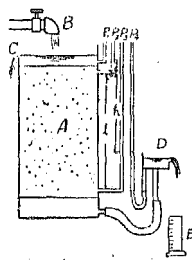
土砂の空隙を水が充して居る時、水が動かない場合には水の静水壓力は土砂のない場合と同様に働く。

水が土砂、礫等の空隙を通じて流るゝ時、その流速と水壓力



どの關係を試験するに、第五圖の如くA管中に砂を詰めB活栓から水を送る。その量は砂中を通るものよりもつと多くすれば、餘分の水はCから溢流し水位を一定に保つ、砂を通つた水はDから出る茲にも溢流があつて水位を一定に保つ。Dより出る水量

第五圖



はEのメートルグラフで測る。又各部分の水壓力は P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 等のピエゾメータで測る。Dを上げればピエゾメータの示度の差が小さくなり流量も増すピエゾメータの差が大となる。

此の如くして實驗した結果に據ると、土砂等を通る場合の流速（流量を全斷面積で割つたもの） V と、動水傾斜（通路の長さとその間損失水頭との比） $\frac{h}{L}$ との關係は、砂の如き細いものと礫の如き荒いものとは異り、砂の場合（所謂有孔徑三耗以下）では

① 流速は動水傾斜に比例する

即ち $v = Ks$ (ダルシイの公式)

② 動水傾斜と流速との關係は、砂の性質、粒の大きさ、混合割合、空隙率等に依て異り、概して砂粒小さく空隙率少なる程一定動水傾斜に對する流速が少さくなる、即ち前式に於てKの價が少さくなる。

③ 一定の砂、一定の動水傾斜の下に於ても、溫度が高ければ流速は大、低くければ小となる。

ハゼンの公式 $v = cd^2h/L$ (0.70 + 0.03t) に従ふべし

但し v は流速(毎日米)

t は水溫(攝氏)

d は砂の有孔徑(粒)

c は常數(四〇〇—一、〇〇〇)

水溫が攝氏二〇度の時は零度の時の約倍の流速となるわけである。

次にシユグヒテルが彼の公式

$$\frac{Q}{s} = 0.2012 \frac{hd^2}{ucl}$$

地下水に就いて

但し q は流量(毎分立方呎)

s は砂層の斷面積(平方呎)

d は砂粒の平均大さ(粒)

u は溫度に依て變る常數

k は砂の空隙率に依て變る常數

に依て實驗したkの價を掲げて置く (この際 t は華氏五〇度、空隙率四〇%)

種別	直徑 (mm)	k (cm/sec)
泥	0.01—0.02	0.00004—0.00015
極微粒砂	0.04—0.08	0.0006—0.0025
細粒砂	0.10—0.20	0.0038—0.015
中粒砂	0.30—0.40	0.004—0.081
粗粒砂	0.50—0.75	0.096—0.215
小砂利	0.90—5.00	0.31—3.60

之れに據て見てもkの價は砂の一吋した具合で非常な相異の生ずることが判る。

砂利等の場合では

① 流速は動水傾斜の n 乗に比例する

即ち $v = Ks^n$

尙實驗の結果に據れば

$$S = av + bv^2$$

の形が最もよく一致する。

② n 、 k の價は礫の性質、粒の大小、混合の割合、空隙率等に依て異り、粒の大き及び空隙が小さければ n は 1 に近く k は大となり、之等が大となれば n は $\frac{1}{2}$ に近く k は大となる。

③ 温度の影響は砂の場合のやうに明瞭ではない、丹那隧道に於ける實驗では

河 砂 利

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{砂粒 } 5-25\text{粒} \quad V = 11.15^{0.35} \\ \text{空隙 } 42\% \quad S = 0.0083v + 0.0076v^2 \end{array} \right.$$

火山荒砂

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{砂粒 } 3-15\text{粒} \quad V = 3.63^{0.76} \\ \text{空隙 } 40\% \quad S = 0.083v + 0.063v^2 \end{array} \right.$$

即ち砂中を流れる時は管に於ける流線運動の場合に酷似し、礫になれば混亂運動に近づく。

岩石の中を水が通る時その空隙が小なる時は砂の場合と同様の法則に従ふが、龜裂等を流れるものは砂利の中を流れるものと同

じ法則に従ふやうである。

(b) 地下水流動の理論的研究

地下水の流動の法則は前述の通りであるが、之を用ふれば理論的に地下水面の形等を導出することが出来る(第六圖(イ)(ロ)参照)。

次に最も簡單の場合二つを掲げて見る。

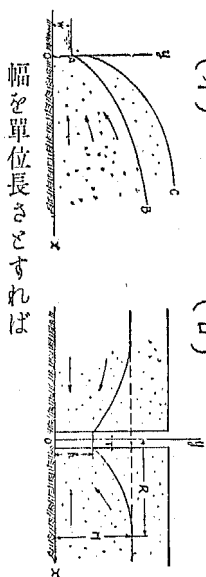
(イ) 水平な不透水層上に一樣な砂層があり、その一方の端が河川となつて居る場合。實際は流線は底部に於ては直線、上部になるに従ひ曲線となる等壓線も曲線となるが之等の曲率を無視すれば

$$v = KS = K \frac{dy}{dx} \quad \text{イ}$$

第六圖

(イ)

(ロ)



幅を單位長さとするれば

$$Q = K_y \frac{dy}{dx}$$

$$Qa = \frac{1}{2}ky^2 + c$$

次に $a=0$ $y=w$ とせば

$$C = -\frac{1}{2}Kw^2$$

$$Qa = \frac{1}{2}K(y^2 - w^2)$$

即ち地下水面は一つの拋物線を形成する。

(ロ) 水平な不透水層上に一樣な砂層があり、その中の地下水面が平なる時、之に圓形の井戸を掘り水を吸上げる場合。この場合にも流線の等壓曲線の曲率を無視すれば

$$v = KS = K \frac{dy}{dx}$$

$$Q = K \frac{py}{dx} \times 2\pi xy$$

$$\therefore \frac{Q}{\pi} \log_e x = ky^2 + c$$

$a=R$ に於て實用上井戸に依る水位の降下

地下水に就いて

なる時 $y=H$

$$\text{從て } \frac{Q}{\pi} \log_e R = KH^2 + c$$

$$\therefore C = \frac{Q}{\pi} \log_e R - KH^2$$

$$\therefore H^2 - y^2 = \frac{Q}{\pi K} \left(\log_e \frac{R}{x} \right)$$

之に依て種々の場合の地下水面の形狀を求むることが出来る。例へば沖積地に於ける地下、鐵道、基礎工事等に應用する、地下面降下施工法 (Grundwasserspiegel absenkung) の場合の如きに用ふることが出来る。

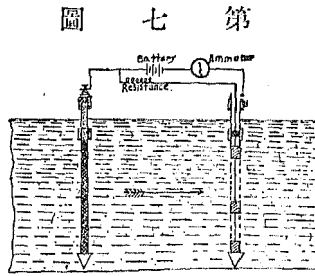
(c) 地下水流動の速度

普通一般に地下水流動の速度を測定する方法としては、鹽類又は染料を溶解して實驗して居るが、シュリヒタアは次のやうな興味ある裝置を工夫した。夫れはある種の電解物 (Electrolyte) 例へば鹽化アムモニウム又は苛性曹達の如きものを井戸中に投じ、その流動を二個の井戸壁管間を結付けた電路内に附けたアムメータに依

て記録する方法である。流動の下手の井戸内に

入れた電極は、井戸壁管と絶縁して電路に結付ける(第七圖参照)。

電解物が地下水の流動に伴ひ下手の井戸の方へ流動するに従ひ、アムメータに依つて記録された電流は次第に増し、電解物が下手の井戸に到達するやシヨオトして突然曲線が上る。



第八圖に示すグラフは此の如き方法に依て實際に測定した結果得たものである。

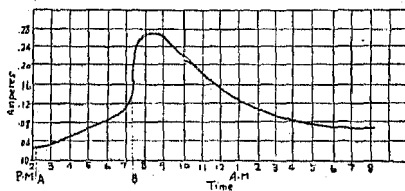
上手の井戸中に電解物を投じた瞬間を示すA點と、それが下手の井戸に到達した時を示すB點(曲線の屈折點を取り最高點とせず、その理由は電解物の擴散の影響を消去するためである)との時間の隔りが、地下水が二個の井戸間を流

動するに要した時間に相當する。

この流動の速度さへ判れば透水層の空隙率が決るから、この二つの因子からその層の單位斷面積から地下水滲出量が推定される。

次に北米に於て測定された地下水流動の速度の實例を掲げて見やう。

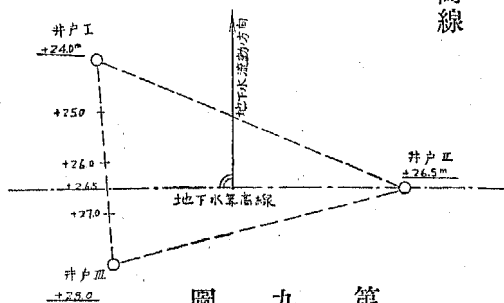
第八圖



場	所	地質	勾配 (呎/哩)	流速 (呎/日)	測定者
Dakota		砂	—	14.5—23.0	Darton
.....		普通砂	—	14.5	Rogers
Ris Honds, Cal.		沖積層	—	1.17—58.0	Slichter
San Gabriel河, Cal		砂	20	9.0—96.0	"
Mojaive河, Cal		砂	10—12	0.2—12.0	"
Long Island		粗粒砂	—	10.6—96.0	"
Waugh Res.		砂	7.0	2.6	"
.....		—	17.0	6.4	"
East Meadow 池		細粒砂	7.9	7.4	"
Arkansas 河		小砂利	—	—	"

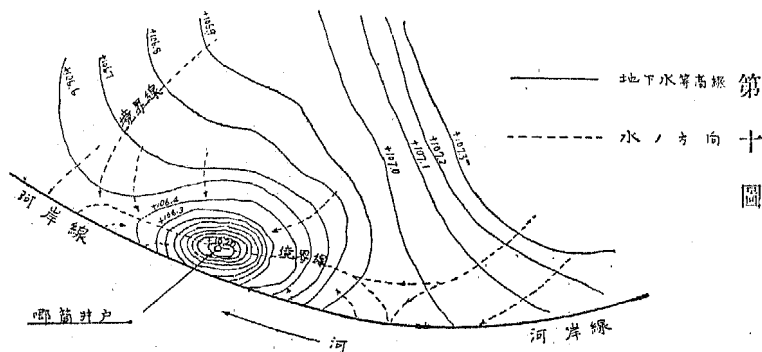
Ogallala Kau.	砂利	6.4	Smith
Rifugio 谷	砂	33.0-274.0	"
"	砂泥	13.0-60.0	"
"	砂泥	25.4	"
*****	粗粒砂	17.0-93.0	"
Los Angeles 河	粗粒砂	12.0-23.0	Sieher
"	砂泥	3.4-27.0	Hamlin
"	細粒砂	7.0-77.0	"
"	砂	3.4-96.0	"
"	粗粒砂	2.5-6.4	"

五、地下水等高線

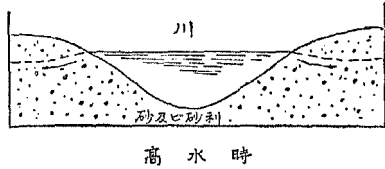
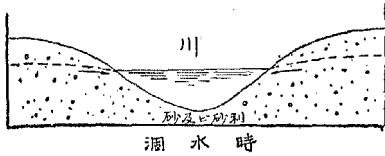


試みに第九圖に示すやうに、三個の井戸内に於ける地下水面を測定して見れば、地下水流の大體の方向を知ることが出来る。

然し乍ら此の如きは各井戸に於ける水の汲出量が大差ない場合で、若し一個の井戸のみから特別に多量の水を汲出せば第六圖(ロ)に示すやうに地下水面は漏斗形に下降する。



第十圖



照)。第一圖參
 する（第
 中に滲出
 水が河水
 時は地下
 位が低い
 對に河水
 受け、反
 水位が高い場合は地下水からその供給を
 交代作用 (Wechselbeziehung) と稱する。即ち河

戸が假りに河岸にあつた場合はどうであるかといふに、第一〇圖の地下水等高線圖に示す様に井戸内の水は、一部は直接に地下水から出るが他の一半部は河水が差して来る。即ち水の流動の方向(點線で示すもの)は等高線に直角になる此の如き現象は河底が透水性である場合には必ず起り得ることで、之れを河水と地下水との交代作用 (Wechselbeziehung) と稱する。即ち河

六、水分學的調査の必要
 水力電氣の河川調査等に依る實測結果に據ると、河の水流といふものは旱天時に於ても平時に比して大して増減がないといふ極めて興味ある事實が判明して居る、降雨季に河の水量が多いといふことは誰しも當然のことと思ふであらうが、旱天時に於ても水量が少しも減らないといふことは一見非常に不思議なことのやうに思へる。

この事實は明かに河の水量は地下水に依て調節される。即ち前記の交代作用の結果であることを證するもので、從て河の水と地下水とは極めて密接な關係を持つて居ることが判る。

故に地下水を研究するためには、河の状態と相關連して調査しなければならぬといふことになる、河を論ずるには當然前述したやうな「水の循環」と云ふ問題に亘らなければならぬ。

從て地下水研究の方法としては、降雨、蒸發、滲透、流去量に關する測定をなすことに依り、河を中心とした陸地内に於ける水の循環狀態を

調査するといふことになる、此の如き研究方法を水分學 (Hydrology) と稱し自然科學の一部門として近年稍體系をなすに至つた。

從來地下水學と云へば單に地質學の一部門位にしか思はれて居なかつたが、此の如く寧ろ氣象學乃至は水理學的の廣範圍にまで相關連した綜合科學であることは、非常に興味あると同時に又可成り面倒な學問であるため、餘り著書等も見當らないやうである。特にこの研究に興味を持たれる人々のため目下手許にある參考書の名前を掲げて置く。

Drenkhahn, Kreislauf des Wasser und Gewässerkunde, Sammlung Göschen, 960

Leipzig 1927

Prinz, Hydrologie, Berlin 1923

Mead, Hydrology, New York 1919

Meyer, Elements of Hydrology, New York 1917

Le, Physiographie des Süßwasser, Enzyklopädie der Erdkunde Teil I. Leipzig

地下水に就いて

1925

我が國ではこの科學の専門家といふのは未だ餘り聞ひて居ない、恐らく鐵道省建設局技師阿部謙夫氏がその唯一者であらうと思ふ、近き將來に同氏の著述「水分學講話」が上梓されるであらうが十分の期待を持つていつ、この稿等も昭和四年十二月二日東京帝大地震研究所に於ける同氏の「地下水に就いて」といふ講演に負ふ所が多い。尙地下水學の參考書としては次のやうなものである。

Kaehne, Grundwasserkunde, Stuttgart 1928

Keilhack, Grundwasser und Quellenkunde,

Leipzig 1910

Heimhalt, Grundwasser und Quellen, Bra-

unschweig 1920

Martel, Nouveau traité des eaux souterraines,

Paris 1921

Schultze, Die Grundwasserabsenkung in

Theorie und Praxis, Berlin 1924