九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

溶解気体による不飽和浸透の発生とその浸透性に関 する研究 2

黒田, 正治 佐賀大学農学部干拓水工学研究室

https://doi.org/10.15017/22974

出版情報:九州大學農學部學藝雜誌.22(3), pp.285-300, 1966-08.九州大學農學部 バージョン: 権利関係:

溶解気体による不飽和浸透の発生と その浸透性に関する研究 2*

黑 田 正 治⁺

Unsaturated percolation due to dissolved gas. and permeability 2

Masaharu Kuroda

V 溶解気体による不飽和浸透
 の発生と浸透性
 (温度変化がない場合)

1 概 要

 浸透水に溶解されている空気が、浸透層の間ゲキ内 に自由気体の気泡として放出され、その結果、流れが 飽和浸透流から不飽和浸透流へと移行することが実験 的に明らかにされている.4

この研究では、時間の経過にしたがつて、開ゲキ内 の不飽和化が進行する過程、およびそれにともなう浸 透性の低下について定量化を試みたものである。

解析の方法―: 浸透短の間ゲキに空気泡が放出され る主な原因として、温度が一定の条件のもとでは、供 給水の初期圧力と浸透層内の圧力との相異に基づく空 気溶解度の変化に着目する。この場合、圧力と気体溶 解度の関係として Henry の法則 " が成り立つと仮定 ることができるであろう。それゆえ、Henryの法則を 浸透層内で適用することにより,間ゲキ飽和度 S₈ およ び不飽和浸透性K (S₈)の定量化を行なつた。

実験の方法一: 浸透運動の解析を簡単化するために サイフォン内に浸透層を設置し, 層内に一定圧力 Pを 生じさせて実験を行なつた.

なお、この章で用いる圧力Pおよび圧力水頭 Rは、 それぞれ絶対圧力および絶対圧力水頭を表わすものと する。それに対し、大気圧を基準にとつた圧力および 圧力水頭は、それぞれPおよびAにて表示する。

* 九州大学農学部灌溉利水工学研究室業績。

* 佐賀大学農学都干拓水工学研究室。

↓この現象については第IV章で詳述した。

"Hentyの法則-:一定の温度で一定量の液体に溶 解する気体の重量は気体の圧力(分圧)に比例する。³⁹⁾ 2 不飽和浸和におけるDarcy法則および実験方法 の前提

 ~ 1

1. 不飽和浸透におけるDarcy法則について

不飽和鉛直降下浸透においてDarcy法則が成り立つ と仮定すれば

$$v = -\frac{\rho g}{\mu} K(S_{\psi}) \frac{d\phi}{dz}$$
 (5.1)

$$\phi = \frac{P}{\rho g} + z \tag{5.2}$$

となる. ただし

v;浸透速度〔LT¹〕
>;液体の密度〔ML⁻⁻³〕
#;液体の粘性係数〔ML⁻¹T⁻¹〕
P; 匹力〔ML⁻¹T⁻²〕
g; 重力の加速度〔LT⁻²〕
z;上向き方向を正にした鉛直軸〔L〕
,水頭で表わしたポテンシェル

S_w; 液体による浸透層内間ゲキの飽和度

K(S_w);不飽和浸透層に固有の浸透性を表わす係数 [L²] である。

不飽和浸透係数を k(S_n)とすれば、K(S_n)とk(S_n)の間には

$$K(S_{\mu}) = \frac{\mu}{\rho g} k(S_{\nu}) \tag{5.3}$$

の関係があり、 $K(S_u)$ 、 $k(S_u)$ はともに液体による浸透層間ゲキの飽和度 S_u の函数である.

(5・1), (5・2) から ø を消去すれば

$$v = - \frac{\rho g}{\mu} - K(S_{w}) \left\{ \frac{1}{\rho g} \cdot \frac{dP}{dz} + 1 \right\}$$
 (5.4)

となる.すなわち,浸透速度 » は不飽和浸透性**K(S_w)** と圧力コウ配**dP/dz**により決定される.

圧力 P=const. なる浸透層においては

$$\frac{dP}{dz} = 0 \tag{5.5}$$

であるから、この場合には(5・4)は

$$v = -\frac{\rho g}{\mu} K(S_{\mathbf{w}}) \tag{5.6}$$

となる、すなわち、圧力コウ配が零となる浸透運動で は不飽和浸透性 $K(S_{w})$ のみにより、浸透速度 vが定ま り、他方、浸透速度 vを測定すれば $K(S_{w})$ が求まる。

2. 実験方法の前提

(5.6)を満足する浸透層を作ることを試みる。

Fig. 5-1 のようなサイフォン内の EF 間に浸透層を 設置する.

ここで、流速は小さいので管路 ABCDE 内および EF 内における抵抗を無視することにより、エネルギ ーの損失は無視できると仮定する。そうすれば、エネ ルギーの消費は浸透層 EF 間のみにおいて生ずると考 えることができるであろう。

さらに、浸透層内全域に関して

$$\frac{dK(S_w)}{dz} = 0 \tag{5.7}$$

あるものと仮定する.*

このような条件のもとでは、 Darcy 法則 (5・1) は 次のようになる.

$$v = -\frac{\rho g}{\mu} K(S_{w}) \frac{d\phi}{dz} = -\frac{\rho g}{\mu} K(S_{w}) \frac{\phi g - \phi p}{z_{g} - z_{F}}$$
(5.8)

ここで 🎜 は上流端 🖉 のポテンシァル

$$\phi_E = z_E + \frac{P_E}{\rho_g} \tag{5.9a}$$

____

♥ は下流端Fのポテンシェル

$$\phi_F = z_F + \frac{P_F}{\rho_g} \tag{5.9b}$$

である.

とこで浸透層の上流端および下流端のポテンシァル **68. 6** を適当に調節して

$$\phi_E - \phi_F = z_E - z_F$$
 (5.10)
となるようにすれば

すなわち、 $K(S_n)$ は浸透層内の位置に関しては均一で

$$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{F}} = \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{F}} = \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{M}} \tag{5.11}$$

となり、またポテンシェルコウ配は



* このことは、気泡が浸透層内で、位置に関係なく均質に発生することを仮定していることになる。

$$\frac{d\phi}{dz} = 1 \tag{5.12}$$

となる。ただし PM は浸透層内の圧力を表わす。

ゆえに $\phi_E - \phi_P = z_E - z_P$ となるように調節したサイ フォン内の浸透層では圧力 $P_M = \text{const.}$ となり、また (5·12) を (5·8) に代入することにより、(5·6) を満 足する浸透層を作ることができる.

3 間ゲキ鉋和度と圧力、流量との関係

1. 気泡の放出について

前節で述べた Fig. 5-1 の装置において、水が上流 側タンクからA断面を通りサイフォン内に入る. B,C. D断面において最大負圧(ただし大気圧面を基準にと つて相対圧力で表わした場合)に達し、E断面から没 透層内を浸透しF断面で浸透を終り、G断面を通つて 下流側タンク内に出てくる。

この場合、上流側タンク内で大気圧 Po のもとで飽 和溶解量の空気を溶解した水はサイフォン内で圧力を 低下させながら流れる.しかしながら、液体を単に静 かに減圧しただけでは、その中の溶解気体は過飽和の 状態になつたまま、気泡としては放出されない。それ ゆえ、区間 ABCDE においては気泡の発生は起らな い。そして、浸透層の区間 EF 内に入つて初めて十分 な力学的カク乱を受けて自由気体の気泡として、層内 の間ゲキに放出される.すなわち、気泡の放出には、 圧力の低下と力学的なカク乱の二つの要素を必要とす る.

それゆえ、この実験装置においては、大気圧 P_0 で 飽和溶解量の空気を溶解した水が、一定圧力 P_M の浸 透層に入つたときに放出される空気の量について検討 することが必要であると思われる、ただしここで $P_0 > P_M$ である。

2. 圧力と溶解気体の関係

気体を溶解している液体が浸透層内を流れていると する、層内で液体から遊離する気体には、その液体自 身の蒸気も含まれているであろう。しかしここでは、 それは考慮に入れない、浸透層内で放出される主な递 離自由気体は、液体中に溶解されていた気体であると 仮定する。

液体中に溶解されている溶解度のあまり大きくない 気体(たとえば、酸素や窒素)は、その液体中で、化 学的に非活性であり、温度が一定であれば、Henryの 法則にしたがう、

いま、考えている浸透層においては、層内の流路は 非常に複雑な形状をなしており、流路内で運動する液 体は十分なカク乱を受けるものと仮定する。 以上の仮定のもとでHenryの法則を適用することに より、放出される気体の量を求める。

気体が大気圧 Po の位置(上流側タンク内)におい て、液体1cc中に飽和溶解量Wog 溶解しており、圧 力PMの位置(浸潤層内)において、液体1cc中に WM g 溶解しうるものとすれば、液体1cc から浸透層内に 自由気体として放出される気体の重量4W。は

$$\Delta W_{d} = W_{0} - W_{M} = \frac{\Omega M}{\alpha \tau} (P_{0} - P_{M}) \quad (5.13)$$

ここで、M; 1グラム分子の重量

- 金;大気圧下における気体の溶解度(液体1 cc に溶解する気体の cc 数で表わす)
- α;定数 22421cc×1 atm
- r;定数 1033.6×1×980(圧力 Pを C.G.S.

単位で表わすための換算定数)

(5-13)で表わされる *4W。*が圧力 PMのもとで占め る体積 4V。(cc) は

$$\Delta V_{e} = \frac{Q}{P_{M}} (P_{0} - P_{M})$$
 (5.14)

圧力水頭を Hとすれば, P=คgH であるから, (5・14) は

$$\Delta V_{s} = \frac{Q}{H_{M}} = (H_{0} - H_{M}) \qquad (5.15)$$

液体Q cc が浸透層内を通過したために、浸透層間ゲ キ内に放出される自由気体の体積 V_s(cc) は

$$V_{s} = \frac{Q}{H_{M}} (H_{0} - H_{M}) Q \qquad (5.16)$$

浸透層全域において均質に気泡が発生するものとす れば、単位体積の浸透層における自由気体の体積C。は

$$C_{s} = \frac{V_{q}}{V_{M}} = \frac{Q}{H_{M}} (H_{0} - H_{M}) \frac{Q}{V_{M}}$$
(5.17)

となる.ここでVMは浸透層全体の "みかけの体積" で ある.一般に Q=Q(1) であるから C_aは時間の函数で ある.

間ゲキ飽和度と放出された自由気体との関係
 浸透層内の間ゲキと液体によつて占められる間ゲキ
 との比,すなわち,液体による飽和度 Su は

$$S_{w} = \frac{C_{w}}{\lambda} = \left(1 - \frac{C_{s}}{\lambda}\right) \qquad (5.18)$$

ここで、
$$S_w$$
; 浸透層内の水による飽和度

X:浸透層の間ゲキ率

C_w;単位体積の浸透層における液体部分の 体積

(5・17) で求めた C_aを (5・18) に代入すれば,液体 による層内飽和度 S_Wを求めることができる. C_aが時 間とともに変化するので飽和度 S_W も時間とともに変 化する.

4. 間ゲキ飽和度と不飽和浸透性との関係

間ゲキ飽和度 S_w と不飽和浸透性 K(S_w) との関係に ついては、現在まで多くの研究がなされている。

Irmay²7)は Poiseuille の公式から,間ゲキ内に自由 気体を含んだ浸透層の浸透性K(S₀)を定めることを試 みている。その結果をここでは用いることにする。

$$K(S_w) = K_0 \frac{(S_w - S_0)^3}{(1 - S_0)^3}$$
(5.19)

てこで

- 1₂₁

K₀; 完全飽和 (S_s=1) の場合の 層に 個有の浸透 性 (L²)

- Sw;水による間ゲキの飽和度
 - So;限界飽和度,すなわち,液体は存在するが流れは生じていない"死んだ間ゲキ"の割合を示す。ゆえにS-Soは実際に液体が運動している"生きた間ゲキ"を表わしている。

さらに、不飽和浸透性K(S_w)と飽和浸透性 K₀ との 比 Xを導入して、これを相対浸透性 (relative specific permeability)と定義すれば

$$X = \frac{K(S_w)}{K_0} = \frac{(S_w - S_0)^3}{(1 - S_0)^3}$$
(5.20)

となる.

(5・18) で求めた 間ゲキ内の水による飽和度 S_# を (5・19) および (5・20) に代入することにより,任意の 時間における不飽和浸透性 K(S_#) および相対浸透性 Xを求めることができる.

4 実験

実験目的

2で述べた間ゲキ飽和度 Su の時間による変化および不飽和浸透性 K(Su),相対浸透性 X に関する解析 を実験により検討する。

- 2. 実験装置および実験の方法
- 2.1 実験装置

Fig. 5.1 に示す実験装置を用いた.

 $\phi_{E-1}\phi_{F}=z_{E-1}z_{F}=94.0$ (cm) になるように浸透層をサイフォン内に設置した、この

場合, 2・2 の説明が成り立つとすれば浸透層内の圧力 は

 $P_M = \text{const.} = 933.6(g/\text{cm}^3)$

となり,圧力水頭は

 $H_M = \text{const.} = 933.6(\text{cm})$

である. これはまた相対圧力水頭で示せば *h_M*=const.=-100.0(cm)

の負圧である。

供給水の圧力水頭 H₀=1033.6(cm) である。

2.2 浸透層の構成材料

粒径の比較的均一なガラス球を用い、最密充テンと なるよう完テンした。その理由は、浸透層全域にわた つて層の構成の均質性を保ち、(5・7)を満足させるの を目的としている。

2.3 浸透水の性質

P0=1 atm (大気圧) において飽和溶解量の空気を溶 解した水を用いた。

一般に水道水は加圧送水されているため、溶解空気 量は1気圧における飽和溶解量に対し過飽和となつて いる、過飽和空気を取り除くため、水深20cm、長さ 130cmの上流側タンク内にサンフレックスをつめ、タ ンクの一端から水を低流速で通し、他端からサイフォ ン内に取り入れた、このようにすれば、1気圧に対し て過飽和な空気はサンフレックスに気泡として附着し 取り除かれるので、大略、大気圧で飽和溶解量の空気 を溶解した水が浸透層内に供給できると思われる. 浸透層、浸透水の踏元を Table 5-1 に示す.

Table 5-1。浸透層,浸透水の緒元。

×.	実験 I	実験 II
	18.5 94.0 1,739 0.85~1.39 2,819 2.513 1.621 35.5	18.5 94.0 1,739 2.00~1.68 2,750 2.513 1.581 38.7
浸透水の温度 (℃)	20.3±0.2	17.8±0.6

3. 実験結果

3.1 空気溶解度

温度 **T**℃, 圧力 1 atm の水に対する空気溶解度 **2**を International Critical **Tables**²⁶) のデータから最小自 乗法により求めると

$$\mathcal{Q} = \frac{1}{1000} (19, 90e^{-0.03707} + 9.16) \quad (cc//k \ 1 \ cc)$$
(5.21)

3.2 実験 I

大気圧のもとで浸透水の温度 T=20.3°C のとき空気 溶解度 2 は (5・21) から

 $Q = 1.853 \times 10^{-2} (cc/ \pm 1 cc)$

流量
qと時間
tとの関係を測定値から
最小自乗法に

より求めると。

 $q=8.36e^{-1.71\times10^{-4}t/tu}+3.28$ (cc/sec)

(5-22)

ここで 1* は単位時間(sec) を表わす.

実験開始時 1=0 から任意の時間 1=1 までに浸透層 内を通過した水の全量 Q(cc) は (5・22) を1 で積分し て

$$Q = \int_{0}^{1} qdt = -\frac{8.36}{1.71 \times 10^{-4}/t_{s}} (e^{-1.71 \times 10^{-4}t/t_{s}} - 1) + 3.28t$$
(5.23)

(5・21), (5・23) および (5・17) から C_a と t の関係を 求め, さらにその結果と (5・17) から, 間ゲキの水に よる勉和度 S_a と時間 t の関係が求まる。 以上の計算 結果を Fig. 5・2 に示す.

さらに上に述べた方法で求めた S_w を用いて(5·19), (5·20) により不飽和浸透性 $K(S_w)$ および相対浸透性 Xを求めることができる.ただし,(5·19),(5·20)の S_0 は一般に、0~0.20の間の値をとり,特に浸透層の 構成粒子が小さい場合 0.20をとる.この実験におい ては,粒子も比較的大きく(0.85~1.39 mm), $S_0=0.10$ として計算した.その結果を Fig. 5·3 に示す.なお 同時に、実調の浸透性もプロットしている.飽和浸透 性 $K_0=6.45 \times 10^{-8}$ cm² である. 3.3 実験 II

大気圧のもとで浸透水の温度 T=17.3°C のとき空気 溶解度は (5·21) から

 $Q = 1.973 \times 10^{-2}$ (cc//k 1 cc)

流量 q と時間 t との関係を測定値から最小自乗法に より求めると

$$q=36.74e^{-3.92\times10^{-4}//12}+6.43^{\circ}$$
 (cc//sec)
(5.22')

ここで h は単位時間 (sec) を表わす.

実験開始時 1=0 から任意の時間 1=1 までに浸透層 内を通過した水の全量 Q(cc) は(5・22) を 1 で積分 して

$$Q = \int_{0}^{t} qdt = -\frac{36.74}{3.92 \times 10^{-4}/t_{*}} (e^{-3.52 \times 10^{-4}/t_{*}-1}) + 6.43t$$
(5.23')

実験 I と同様の方法により、C₀と1の関係を求め、 さらにその結果と (5・17) から S_# と1との関係を求め る、以上の計算結果を、Fig. 5・4 に示す。

さらに、いま求めた S_w を用いて(5-19)と(5-20) から $K(S_w)$ 、Xを求める. その結果をFig. 5-5 に示 す. なお同時に実測の浸透性もプロットしている. $K_0=25.05\times10^{-6}$ cm² である.



Fig. 5・2. Su と1の関係 (実験I).



Fig. 5-3. K(S_w), Xとtとの関係 (実験1).



Fig. 5.4. Sue と t の 関係 (実験 II).



Fig. 5.5. K(S_w), X と t との関係 (実験 II).

1. Fig. 5-3, Fig. 5-5 から明らかなように, 理論 値と実測値とは良く一致しており, 浸透層内に放出さ れる溶解気体の量を算定するためにHenryの法則を導 入することは有効であると思われる.

2. ガラス面からの観察によると、実験開始後 20分 程度で層全体にポッポッと気泡が発生するが、時間の 経過にしたがつて、上流部分の気泡の密度が大きくな り、気泡の密度が大きい部分と小さい部分の境界が比 較的明瞭に観察される、時間の経過にしたがい、この 境界は漸次下降し全面が白濁してくる。これに要する 時間は、実験 I では 14,400 秒、実験IIでは 7,200 秒で あつた。

このことは、実際には気泡が層内に均質に発生して いないことを示すものであり、仮定に用いた dK(S_w)/ dz=0 は厳密には成り立つておらず、層内は厳密な意 味での一定負圧にはなつていないであろう、しかし層 全体を巨視的に取り扱つた場合、層内の平均圧力とし て、P_M=constと考えることができるであろう、

3. 実験 I では 1=14,400 秒以後,実験 II では 1= 7,200 秒以後は放出された気泡に運動が生じ,空気は 下方に流れ Fig. 5-1 果の FG の部分に出てくる.その 結.浸透性は計算値と実測値とが一致しなくなる(Fig. 5-3, Fig. 5-5).

この場合には下方に流下する空気の量を考慮して (5・18) を

$$S_{w} = \frac{C_{w}}{\lambda} = \left(1 - \frac{C_{a} - C_{v}}{\lambda}\right)$$

とおくべきであろう.ただし C₇ は単位体積の浸透層 から単位時間に流出する空気の量である.

4. 空気の下流方出が生じた以後の浸透性は周期的 な振動性の変化をする (Fig. 5-3, Fig. 5-5). とくに 実験IIではこれが著しい、この現象はある程度層内に 空気泡が蓄積されて急に流出し、それがくり返される ために生ずるものと思われる。

5. 考察 4. の現象を平均化して取り扱えば実験 I で は t=14,400 秒以後は $K(S_w)=1.96\times10^{-6}$ cm², X=0.329となり大略,一定となる. この結果から浸透層 内の飽和度 S_w を逆算すると, $S_w=0.721$ となつている. これらを Fig. 5-2, Fig. 5-3 に点線で示している.

実験II では t=7.200 秒以後は $K(S_w)$ =4.47×10⁻⁶ cm³, X=0.178となり、実験 I と同様、大略、一定となる、この結果から S_w を逆算すると、 S_w =0.606となつている、これを Fig. 5·4, Fig. 5·5 に点線で示している。

6 搷 要

以上の解析および実験は、浸透水の温度が一定で、 dP/dz=0なる理想化された条件のもとで行なつたも のであるが、Henryの法則を導入して間ゲキの飽和度 S_{*} を求めることは有効と思われる。

S. は時間の函数となるので、不飽和浸透性 K(S.) および相対浸透性 X はともに時間の函数となる。 理 論と実験とは良く合致している.

VI 溶解気体による不飽和浸透の発生と浸透性 (温度変化がある場合)

1 概 要

浸透の間ゲキに 空気泡が放出される 主な 原因として、液体の空気溶解量の変化が考えられる。一般に液体の空気溶解量 2 は圧力 P, 温度 Tによつて変化する。 すなわち、 2=2(P, T) と考えることができる。

第V章においては、温度Tが一定で、供給水の初期 圧力 Poと浸透層内圧力 Pとの相異のみがある場合に ついて、実験および解析を行なつた。

本章においては、第V章の実験、解析をさらに拡張 し、温度 Tの変化も同時に存在する場合の浸透層の不 飽和化について検討を行なう。第V章よりさらに一般 化された間ゲキ飽和度 S_w および不飽和浸透性 $K(S_w)$ の定量化を試みたものである。

実験の方法としては、第V章と同じように、浸透運動の解析を簡単化するために、サイフォン内に浸透層を設置し、層内に一定圧力Pを生じさせて実験を行なった。それゆえ、不飽和浸透におけるDarcy法則についての検討および実験方法の前提としてのDarcy法則の解析は、第V章・2の論述をそのまま適用する。

間ゲキ飽和度 S_# は時間の函数となるので,不飽和 浸透性 K(S_w) および相対浸透性 X は,ともに時間の 函数となる.なお,浸透層間ゲキ内に放出された空気 泡の再吸収に関しては,浸透液体の空気吸収能ととも に,気泡と液体との接触に関する確率も問題となり, これが不飽和浸透性のもつヒステリシスの一因となつ ていると考えられる.

木章で用いる圧力Pおよび圧力水頭Hは、第V章と 同じように、それぞれ絶対圧力および絶対圧力水頭を 表わすものとする。それに対し、大気圧を基準にとつ た圧力および圧力水頭は、それぞれPおよびhにて表 示する。

2 間ゲキ飽和度と流量,空気溶解量との関係28)

任意の圧力、温度において単位体積の水に溶解する 空気の体積を標準状態(NPT)に換算したときの体積 をQ(cc/x 1 cc)とする、圧力 $P=P_0$ 、温度 $T=T_0$ の ときの $Q \in Q(P_0, T_0)$ 、圧力 $P=P_0$ 、任意温度 T=Tのときの $Q \in Q(P_0, T)$ 、任意圧力P=P、任意温度 T=Tのときの $Q \notin Q(P, T)$ とする、

P=Po, T=To の条件における水1 ccが, P=P, T=

Tの条件の浸透層間ゲキ内で放出する空気の体積を標準状態で示す体積で表わし、*AQNPT*(cc/水1cc)とすれば

 $A\mathcal{Q}_{NPT} = \mathcal{Q}(P_0, T_0) - \mathcal{Q}(P, T) \qquad (6.1)$

一方, ここで *Q***(***P***,** *T***) と***Q***(***P***₀,** *T***) の間に Henry の法則を適用すると**

$$Q(P, T) = -\frac{P}{P_0} Q(P_0, T)$$
 (6.2)

の関係があるので(6・1)と(6・2)から

$$\Delta \mathcal{Q}_{NPT} = \mathcal{Q}(P_0, T_0) - \frac{P}{P_0} \mathcal{Q}(P_0, T) \quad (6.3)$$

となる.

4QNPT>0 のときは、浸透園間ゲキ内に空気泡が放 出されることを意味し、4QNPT<0 のときは間ゲキ内 の空気泡が液体により吸収、再溶解されることを意味 している。

単位時間(1 sec)に層内を浸透する流量 q(cc/sec) によつて浸透応間ゲキ内に放出される空気の量を標準 状態において示す体積 4V_NPT(cc/sec) で表わすと

$$\Delta V_{NPT} = \Delta \Omega_{NPT} \cdot a \qquad (6.4)$$

1=10 から任意の時間 *1=1*(sec) までの間に、 浸透 層間ゲキ内に放出される空気の量を標準状態において 示す体積 *VNPT*(cc) で表わせば

$$V_{NPT} = \int_{t_0}^t \Delta V_{NPT} dt = \int_{t_0}^t (\Delta \mathcal{Q}_{NPT} \cdot q) dt \quad (6.5)$$

標準状態で VNPT(CC) の体積を示す空気泡は, 浸屬 間ゲキ内では圧力は P, 温度は T であるから, Boyle-Gay-Lussac の法則により, 実際にはつぎのような体 積になつている.

$$V = \frac{1 \operatorname{atm}}{P} \cdot \frac{273.2 + T}{273.2} \cdot V_{NPT}$$

= $\frac{1 \operatorname{atm}}{P} \cdot \frac{273.2 + T}{273.2} \cdot \int_{t_0}^{t} (\Delta \mathcal{Q}_{NPT} \cdot q) dt$ (6.6)

(6・6)の 49_{NPT} および gは時間 t により変化する 量であるから、各々の実験について求めた値を代入す る.

浸透層全域において均質に空気泡が発生するものと すれば、単位体積の浸透層における空気の体積 C_aは

$$C_{a} = \frac{V}{V_{M}} = \frac{1 \operatorname{atm}}{P} \cdot \frac{273.2 + T}{273.2} \cdot \frac{1}{V_{M}} \int_{t_{0}}^{t} (4\Omega_{NPT} \cdot q) dt \quad (6.7)$$

となる. ここで V_M は没透層全体の "みかけの体積" である.

18) で表わされる.

ゆえに (6-7) で求めた *C*_a を (5-18) に入れると, 時間 t における 間ゲキ勉和度 *S*_a を求めることが でき る.

間ゲキ飽和度 S_{u} と不飽和浸透性 $K(S_{u})$ の間には (5・19)の関係があるので、上に述べた方法で求めた $S_{u} \in (5・19)$ に入れることにより不飽和浸透性 $K(S_{u})$ を求めることができる、また相対不飽和浸透性は (5・ 20)によつて求める、以上の解析を実験により検討し、 考察を行なう、

3 実験方法

1. 実験装置

Fig. 5-1 に示す実験装置を用い

 $\phi_E - \phi_F = z_E - z_F = 94.0$ (cm)

になるように、浸透層をサイフォン内に設置した。この場合、第V章・2・2の説明が成り立つとすると、浸透 層内の圧力**P**は

 $P = \text{const.} = 933.6 \ (g/cm^2)$

圧力水頭耳は

H = const = 933.6 (cm)

すなわち, h=-100 (cm) の負任である.

2. 浸透層の構成材料

第V章の実験と同じように、粒径の比較的均一なガ ラス球を用いた。浸透層の諸元は、Table 6・1 に示す。

Table 6-1。浸透層の諸元。

浸透間の断面積	18.5	cm ²
泛透層の厚さ	94.0	cm
浸透層の体積	1,740	cm ³
ガラス球の直径	0.85~1.39	mт
ガラス球の重転	2, 820	g
ガラス球の真比重	2. 513	-
浸透層の仮比重	1,621	
浸透脳の間ゲキ寧	35.5	96
		-

3. 供給水の性質

供給水は圧力 $P_0=1$ atm,水温 $T_0=21.1\pm0.4^{\circ}$ Cである。一般に水道水は加圧送水されているため、1気 圧における飽和溶解量に対し、過飽和となつている。 それゆえ、第 V章の実験と同じように、供給水をサン フレックス内に低流速で通し、過飽和な空気を取り除 いている。 その結果、 $P_0=1$ atm, $T_0=21.1\pm0.4$ C で、大略、飽和溶解量の空気を溶解した水を供給でき ると思われる。

4. 浸透水の温度調節について

3·3. の条件を満足している供給水, すなわち, 初期 圧力 P₀=1 atm, 水温 T₀=21.1±0.4℃ で飽和溶解 量の空気を溶解している供給水を,上流側タンク内で 氷により急冷却し、任意の温度に調節した。そして、 それを浸透水として浸透層内に導入した。

5. 空気溶解量と限界温度

International Critical Tables²⁸⁾のデータから, 圧 力 P₀=1 atm=1033.6(g/cm³) における水の空気 溶 解量と温度との関係を求めると,

$$\mathcal{Q}(P_0, T) = \frac{1}{1000} (19.90e^{-0.0370T} + 9.16) \quad (6.8)$$

である. ゆえに供給水の圧力 $P_0=1033.6(gr/cm^2)$, 温度 $T_0=21.1(^{\circ}C)$ であるから、供給水1 cc に溶解さ れている空気の体積は、標準状態に換算して、

$$\mathcal{Q}(P_0, T_0) = \frac{1}{1000} (19.90e^{-0.0370 \times 21.1} + 9.16) \\ (cc/7k \ 1 \ cc) \qquad (6.9)$$

である

浸透層内では、圧力 P=933.6 (gr/cm)、温度 T= T(℃) であるので、浸透水1 cc に溶解する空気の量は (6・2) と (6・8) から

$$\mathcal{Q}(P, T) = \frac{P}{P_0} \mathcal{Q}(P_0, T)$$

= $\frac{933.6}{1033.6} \cdot \frac{1}{1000} (19.90e^{-0.0370T} + 9.16) (cc//k 1 cc)$
(6.10)

(6·8), (6·9) および (6·10) を図示すると, Fig. 6·1 のようになる、

 浸透層間ゲキ内において、単位体積(1 cc)の浸透 水から放出される空気の量 49NPT は、(6・3)、(6・9) および(6・10)から

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{Q}_{NPT} &= \mathcal{Q}(P_0, T_0) - \mathcal{Q}(P, T) \\ &= \frac{1}{1000} (19.90e^{-0.0370 \times 21.1} + 9.16) \\ &- \frac{933.6}{1033.6} \cdot \frac{1}{1000} (19.90e^{-0.0370T} + 9.16) \quad (6.11) \end{aligned}$$

となる.

(6·11)から 49_{NPT}=0となる限界温度 Tc を求める と

$$T_C = 15.8^{\circ}C$$
 (6.12)

となる。

ゆえに $T>15.8^{\circ}$ Cのとき $4g_{NPT}>0$ となり, 浸透層間 ゲキに空気の放出が生じ、 $T<15.8^{\circ}$ Cのときは $4g_{NPT}$ <0 となり、間ゲキ内に放出された空気の吸収、 再溶 解が生ずることになる、

4 実験結果と考察

1. 浸透水を急冷却し 温度を限界温度以下に 下げた 場合

正力 Po=1 atm=1033.6 g/cm², 温度 To=21.1°C

. - -



294

- -

の供給水を上流側タンク内で 氷を用いて限界温度 T_c 以下に急冷却している。それゆえ、浸透層内における 浸透水の温度は $T=6.8\pm0.8$ °Cとなつている。また浸 透層内の圧力は、P=933.6 g/cm² である、実験開始 直前に浸透層間ゲキは、水が飽和させ、13時間継続し て、実験を行なつた。

実測した浸透係数 k および浸透水の温度Tにより, (2・11)を用いて求めた浸透層の飽和浸透性 Koは, は とんど一定で, その平均値は,

$K_0 = 7.31 \times 10^{-6}$ (cm²)

となつている. 詳細を Fig. 6・2 に示している. これ を $T=6.8^{\circ}$ C における浸透係数 k で 表わせ ば, k= 0.505(cm/sec) に相当している.

このように浸透性 K に変化が生じないことは、浸透層間ゲキ内に空気泡が放出されていないこと、すなわち間ゲキの不飽和化が生じておらず、飽和浸透が継続されていることを示していると結論できる。その理由は、浸透性 K の変化は、(5・19)からも明らかなように、飽和度 S_{ω} に依存しているからである。

この現象は、浸透水の温度がT=6.8±0.8℃となつ



ており、(6・12)の限界温度 *Tc*=15.8℃よりも低く、 その結果 *49_{NPT}*<0となるので、没透水からの空気の 放出は生じないこととも一致している。

この場合、ガラス面からの観察の結果からも気泡の 発生は認められない。

2. 浸透水の温度を上昇させた場合

Fig. 6・3 に示すように、漫透水の温度 Tを上昇させ

た結果,限界温度 Tc=15.8℃ 以上に達すると,徐々 に浸透層間ゲキ内に気泡が発生しはじめ,流れは不飽 和浸透流へと移行する.

浸透水の温度 Tと時間 t との関係は

T=1.585×10-4+16.16 (6.13) となつている、ただし、経過時間はは浸透水の温度 T =16.16℃の時刻を t=0 として秒単位で測つている。







Fig. 6-5. K(S_w), X と t との関係. (温度上昇の場合).

流量 **q**と時間**t**との関係を、測定値から最小自乗法 によつて求めると

 $q = -0.138e^{0.000248t/ta} + 12.00$ (cc/sec)

(6.14)

となつている. ここでt_u は単位時間 (sec) を表わす. (6・11) に (6・13) を代入することにより, 49_{NPT}を 時間 t の函数として表わす. このようにして求めた 49_{NPT} と (6・14) の q とを (6・4) に代入し. 以下 2. で述べた方法を適用して, 間ゲキ飽和度 S_w を求める と, Fig. 6・4 の実線のようになる.実測の浸透性Kか ら、(5・19)を用いて逆算した間ゲキ飽和度もプロット している.両者は大略,一致している.

間ゲキ飽和度 S_w を, (5·19) および (5·20) に代入 して, 不飽和浸透性 $K(S_w)$ および相対浸透性 X を求 めると, Fig. 6·5 のようになる. 同時に測定値もプ ロットしている. 計算値と実測値は大略, 合致してい る. ただし, ここで (5·19), (5·20) の飽和浸透性 K_0 は, 実測値から K_0 =7.31×10 $^{\circ}$ (cm²) とし, S_0 = 0.10 としている.

経過時間 t=14400(sec) 以後は, 浸透層間ゲキ内に 放出された空気に流れを生ずる.



Fig. 6.6, 経過時間と浸透水の温度との関係。(浸透水の温度を低下させた場合)。

I=16200 (sec) 以後は、間ゲキ内に放出される空気 と浸透層の下方 (Fig. 5・1のFG の部分) に流出する 空気との間に平衡の状態を生じ、不飽和浸透性 $K(S_n)$ は定常となる。 この実験では、定常に達した後には $K(S_n)=4.10 \times 10^{-6}$ (cm²) となつている。この場合の 間ゲキ飽和度 S_n は 0.85 である。

3. 間ゲキ内の不飽和化が定常に達したのち再度,浸 透水の温度を低下させた場合

前に述べた実験において、不飽和化が進行して、不 飽和浸透性 $K(S_*)$ が定常化してのち、浸透水の温度 を低下させる、温度 Tと時間tの関係は

 $\begin{array}{ccc} 0 \leq t \leq 1260(\sec) & T = -0.00536t + 15.8(^{\circ}C) \\ 1260 \leq t \leq 13860(\sec) & T = 9.05(^{\circ}C) \\ \end{array} \right\}$ (6.15)

ただし,経過時間1は浸透水の温度が低下して,限界 温度 Tc=15.8°C に達した時刻を1=0として,秒単位 で測つている.(Fig. 6·6 参照)

流量は時間の経過にしたがつて増加する. 流量 q と 時間 t との関係を, 測定値から最小自乗法によつて求 めると

 $\begin{array}{ll} 0 \leq t \leq 8460 (\sec) & q = 0.980 e^{1.65 \times 10^{-4} t/t \pi} + 4.38 \\ 8460 \leq t \leq 13860 (\sec) & q = 7.00 e^{2.11 \times 10^{-5} t/t \pi} \\ & (cc/sec) \\ & (6.16) \end{array}$

となつている. ここで f_a は単位時間 (sec) を表わす. (6・11) に(6・15) を代入することにより, *4g_{NPT}を*時間 f の函数として表わす. このようにして求めた *4g_{NPT}* と (6・16) の g とを (6・4) に代入し, 以下, 2. で述べた方法を適用して, 間ゲキ飽和度 S_a を求め る.しかし、この場合すでに間ゲキには空気が存在す るのであるから、(6・5)はそのまま適用できず、

$$V_{NPT} = (V_{t=t})_{NPT} + \int_{t_0}^t \Delta V_{NPT} \, dt \quad (6.5')$$

としなければならない、ただし、 $(6\cdot5')の(V_{t=t_0})NPT$ は、 $t=t_0$ において浸透層間ゲキ内にすでに存在していた空気の体積を標準状態に換算して表わしたものである。この実験では、t=0において $(V_{t=t_1=0})NPT=81.6$ (cc)である。

以上の方法で求めた間ゲキ飽和度 S_# を, Fig. 6-7 に実線で示している、同時に実測の浸透性から(5-19) を用いて逆算した間ゲキ飽和度もプロットしている。

間ゲキ飽和度 S_#を (5・19) および (5・20) に代入 して,不飽和浸透性 K(S_#) および相対浸透性 X を求 める、その結果を Fig. 6・8 に示している。同時に実 測値もプロットしている。

Fig. 6-7, Fig. 6-8 から明らかなように、計算値と 実測値とは明らかに含致していない。計算値では1= 5400(sec) において間ゲキ炮和度 S_w=1.0となり、浸 透層間ゲキ内の空気は全部吸収されたことになる。こ のことは浸透水のもつ空気吸収能力と、実際に吸収し た空気量との相異を表わしている。 Fig. 6-7 からも 明らかなように浸透層間ゲキの水による飽和度が0.85 以上もあるために、間ゲキ内の空気量は非常に小さく 間ゲキ全体積の15%程度しか示していない、それゆえ 浸透水と空気泡との接触能率が悪いために、このよう な現象を生じたと考えられる。換言すれば、実際には もつと空気を吸収、再溶解しうる能力をもつた水が、



Fig. 6.7, Sw と 1 との関係 (温度低下の場合).



Fig. 6-8. K(S_w), X と 1 との関係. (温度低下の場合).

気泡に十分に接する機会がなく,そのまま流下したこ とになる.

このことは Fig. 6.7, Fig. 6.8 の実測値が,時間 の経過とともにゆるやかなコウ配となつていることか らも推察される. 実際に飽和浸透性 Ko に回復するに は,非常な長時間を要する.

この問題を解決するためには、浸透水の空気吸収能 とともに、気泡と浸透水の接触に関する確率的な考え を導入することが必要であると思われる.

またこのことは不飽和浸透性の変化に、ヒステリシ スが生じることの一因であると考えられる。

VII 総 括

負圧浸透においては、(1) 浸透層内に負圧は発生し ているが、飽和浸透が維持される場合、(2) 時間の経 過とともに、飽和浸透流から、不飽和浸透流へと移行 する場合、の二つの性質の異なつた流れが存在する。

この研究では、浸透液体に溶解されている気体によ り、流れが飽和浸透流から不飽和浸透流に移行する過 程を明らかにし、浸透層間ゲキの飽和度の変化、およ び不飽和浸透性の変化に関する定量化を試みた、

この論文は、第1部および第2部の二つの部から構 成されている。

第1部は,第I, II, III および IV 章の四つの章を 含んでおり,第2部は,第 V, VI および VIII 章の 三つの章を含んでいる.

第**「章**では、との研究を行なうに至つた端緒について 述べている。

第11章では、Darcy 法則の微分方程式表示および, 浸透流の基礎方程式に関して,既往の研究を中心に 検討考察を行なつた。

第 III 章では,成層鉛直降下浸透において,浸透層内 に負圧は発生するが,飽和浸透が維持される場合の流 れについて,実験的、理論的な解析を行なつた.一般 にこのような負圧浸透においては,ポテンシアル・コ ウ配が大きいけれども,Darcy法則がまだ有効であり 正圧,負圧に関係なく飽和浸透流としての取り扱いが 可能なことを明らかにした.

第Ⅳ章では、成層鉛直降下浸透および傾斜成 層浸 透に関する実験を行なつた。負圧浸透において、時間 の経過による浸透層間ゲキ内の不飽和化の過程と、そ れにともなう圧力分布の変化について実験的な解析を 行ない、その特性に関する知見を得た。また、層内間 ゲキでの浸透液体からの溶解気体の放出が、間ゲキの 不飽和化の原因であるとの結論に至つた。

第 V 章では、 浸透液体に温度変化が存在せず, 圧力 変化のみが存在する負圧浸透流について、 浸透層間ゲ キ勉和度の変化、および不飽和浸透性の変化について 理論的な定量化を試みた、 実験はサイフォン内で行な つている、 理論と実験とはよく一致している。 第VI章では、さらに一般化して、浸透液体に温度変 化、圧力変化がともに存在する場合についての定量化 を試みた、この場合には、任意の圧力変化に対応して 限界温度が存在する。限界温度以上では、間ゲキ内の 不飽和化が進行する。理論と実験とは、よく合致して いる、限界温度以下では、間ゲキ内の空気泡の吸収、 再溶解を生ずる。この場合には、理論と実験との間に 時間的なズレを生ずる。このことに対する考察を行な つた。

この研究における実験は、浸透液体としては水を用い、浸透層の構成粒子としては砂粒子およびガラス球を用いて行なつたものである。

献

26) International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry, and Technology, (1928), Vol. 3, 257–258, McGRAW HILL,

文

- 27) Irmay, S. (1954), On the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Trans. Ameri Geophy. Union, Vol. 35, No. 3, 463-467.
- 28) 黒田正治(1964),溶解気体による不飽和浸透の 発生と浸透性(その2)一浸透液体に温度変化があ る場合一,第25回農業土木学会九州支部講演集,236-241.
- 29) 汴田 栄 (1958), 化学通論, 朝倉, 訂正 23版, 141-144.

Summary

In the previous report — Part 1, Chapter IV — it was clearly shown through experiments that the air dissolved in the percolating water, was released as bubbles in free gas into the pores of porous medium, and that as the result, the percolating flow was changed from saturated into unsaturated.

In this present report — Part 2 —, of the changing flow with the course of time in the pores being unsaturationized and of its permeability being then degraded, a quantitative analysis was made.

As the principal cause of air-bubbles released in the pores in porous medium, it can be considered that the air solubility in liquid varies. Generally, the air solubility in liquid (\mathcal{D}) varies according to the changing pressure (P) and temperature (T), as

$\mathcal{Q} = \mathcal{Q}(P, T)$

In chapter V, at the constant temperature (T), and under the difference between initial pressure (P_0) of the supplied water and the optional pressure (P) in porous medium, both experiments and analysis were made.

The method of analysis: as the principle of the air-bubbles released in the pores in porous medium, Henry's Law concerning the air solubility based on the difference of pressure between the initial in supplied water and that in porous medium, could be presumed to form. According to the Law applied in porous medium, therefore, the quantitative analysis of unsaturated liquid intrinsic permeability, as well as the degree of liquid saturation, was made,

The method of experiment: In order to simplify the analysis of percolation, porous medium was set up in siphon tube under the constant pressure produced in the medium.

As the degree of liquid saturation (S_w) is the function of the time, both unsaturated liquid intrisic permeability $K(S_w)$ and liquid relative specific permeability (X), also turn to be respectively the function of time. The theory was well satisfied with the experiment.

In chapter VI, the former experiment and analysis as described in chapter V, were further developed: at the changing temperature (T) also, the unsaturationizing in porous medium was considered. Here, more generalized quantitative analysis of the degree of liquid saturation (S_w) and of the unsaturated liquid intrinsic permeability $K(S_w)$, was made.

In this case, the critical temperature varied according to the changing pressure. Above the critical temperature, the unsaturationizing went on in the pores: the theory was well satisfied with the experiment. Below that, however, air-bubbles in the pores were absorbed and dissolved again: a discrepancy between theory and experiment appeared, here. The probability of air-bubbles being made contact with water, as well as the air-solubility of percolating water, came into be problem, upon which a cause of hysteresis in the unsaturated liquid intrinsic permeability, could considered to be based,

In this Part 2, the pressure (P) stands for the absolute pressure, the pressure head (H) for the absolute head; whereas, (p) for the pressure under the standard atmospheric pressure, and (h) for the pressure head under the same.