塩水滞水層の電気浸透効果

出　井　　紘

ELECTRO-OSMOTIC EFFECTS IN A SALTY AQUIFER

By *Hiroshi* DEI

Synopsis

This paper describes an experiment to examine the possible use of the electro-osmotic effect in a salty aquifer. For the different particle size and NaCl concentration, the electro-osmotic velocity is measured and it is shown that the electro-osmotic velocity increases as the particle size and NaCl concentration decrease. Then there may be possible use of the electro-osmotic effect in the aquifer where the particle size is small or NaCl concentration is low by diffusion process.

1. はじめに

わが国では農業用水，工業用水の需要増加にともなう過剰揚水の為に，地下水の塩水化が多くの海岸地方で見られるようになった。この塩水化を防止する方法として塩水揚水，あるいは塩水淡水の同時揚水，いわゆる Double pumping method が考えられている[1]。筆者は新しい防止法の可能性検討の一助として，電気浸透効果をとりあげて考えて見た。

電気浸透効果の発見の歴史は古く，1808年の F. F. Reuss に始まる。その後この効果は，土木技術分野では脱水工法として利用され，また石油工学分野でも利用されている[2),3)]。最近は地辷り防止にも，この効果を利用して地下水の流れを停止させ，地辷りを防止する簡単な方法も論じられている[4)]。

このような電気浸透の利用は，porous media を構成している土の粒径が小さく，しかもイオン濃度の低い場合に限られているように見受けられるが，これは一般に電気浸透効果は，上のような条件では著しく現われるからであろう。海岸地下水の塩水化のような porous media の粒径が比較的大きく，イオン濃度の高い条件でこの効果を期待できるかどうかは疑問に思われるが，拡散などによりイオン濃度が低下している地域，あるいは porous media が粘土またはシルトのような半透水層を対象とする場合には，この効果が期待できると思われるので以下に述べるような基礎的な実験を行なった。

2. 電気浸透効果の理論と実験目的

porous media を毛細管の束と仮定し，これに強さ E(V/m) の電界を加えると，porous media 中のイオン溶液に拡散電気二重層が存在するために，電気浸透効果が起る。この効果による単位面積当りの流量を ΔQ_e (m/sec) とすると，次の関係が成立する[5)]。

$$\Delta Q_e = n\zeta\varepsilon E/\eta \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，n は間隙率，ζ はジータ電位 (V)，ε は溶液の誘電率 (farad/m)，η は溶液の粘性係数 (N•sec/m^2) である。

(1)式から明らかな様に，間隙率，ジータ電位，電界の強さが大きいほど，電気浸透効果が大きくなることが分る。またジータ電位は，溶液のイオン濃度が低いほど大きい[6)]。このことから，濃度が低いほど，電気浸透効果が大きいことが分る。

塩水化している海岸地下水のように，NaCl 濃度が 1000～25000ppm という高い値を示す場合に電気浸透

効果が現れるか否かを調べた実験は，今までにないように見受けられる。上の(1)式から，このような高い濃度で電気浸透効果が現れるかどうかは疑問であるが，現われる可能性も残されており，また同じ濃度でも，粒径が小さいほど，Darcy 流速は小さくなるため，相対的に電気浸透効果が大きく現れる可能性もあるため，以下に述べるような実験を行なった。

3. 実 験 方 法

実験は，**Fig. 1** の装置を使って行った。図の A, B は内径 20(cm) のタンクであり，5(cm)おきに over-flow 用パイプを付け，種々の head が保てるようにした。C は sand-core であり，内径 20(mm) のパイプを用い，種々の粒径の porous media, あるいは長さの core を取りはずしできるようしてある。タンク A, B には，直流電源に接続されているニッケル電極 D を吊し，porous media に電界を与えた。電界の強さは，core の両端に接続されたボルトメータで測定できるようにした。

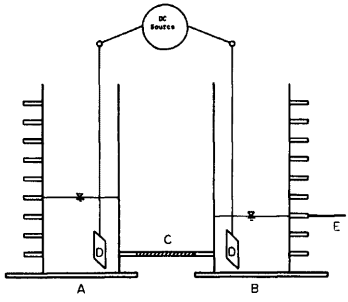

Fig. 1. Profile of the experimental apparatus.

実験方法は，塩水をタンク A では，20(cm) の head に保ち，タンク B では 15(cm) head に保って，定常流が形成されてのち電界をかけて，その影響による流量変化を，タンク B に取り付けた細いガラス管 E から over-flowする流量により測定した。このように head 差を保ち定常流を作っておくのは，電気浸透効果による流量は微量であり，伝導電流によって，ジュール熱が発生し core の温度上昇を防ぐ為である。水温上昇にともない気泡の発生などによって透水係数が時間と共に減少するため，測定方法は次のようにした。電界をかけない時の Darcy 流による流量 Q_0 を，電界をかける前後で測定し，その平均値を採用した。電界は，まずタンク A に陽極，タンク B に陰極を挿入することによって与え，その時の流量を Q_1 とし，逆にタンク A に陰極，タンク B に陽極を挿入し，その時の流量を Q_2 とし，Q_1, Q_2 を測定した。これ等と Q_0 の差 $\Delta Q_1 = Q_1 - Q_0$, $\Delta Q_2 = Q_2 - Q_0$ を用いて電気浸透効果による流量 ΔQ_e を $\Delta Q_e = \Delta Q_1 - \Delta Q_2/2$ とした。このような操作を行なったのは，電気浸透効果の有無をより確実に調べるためと，この実験が電気浸透効果を利用して流量を減少させるという目的を持っているためである。

4. 実 験 結 果

実験は，NaCl 濃度 3%(30,000ppm), 0.5% (5,000ppm), 0.25%(2,500 ppm) について行なった。また粒径との関係を見るため，実際の海岸帯水層の粒径よりは小さいが，粒度分析用の mesh で粒径を 500～1000 (μ), 250～500(μ) に揃えた寒水砂を用いた。

NaCl 濃度 3 %の食塩水については，電流を通じるとすぐ電気分解が始まって測定できなかった。

その他の結果は，**Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4** に示されている。図中の点線はそれぞれ最小二乗法で求めた直線であり，式はそれぞれの図中に示してある。

なお，**Fig. 2** の場合は，電界の強さ 13 (V/cm) 以上，**Fig. 3** の場合は 14 (V/cm) 以上では電気分解が起り測定できなかった。

実験結果の値にはかなりのばらつきがあるが，傾向として流量は電解の強さに比例することが分り，その比例定数は同濃度では粒径が小さいほど，同じ粒径では濃度の低いほど大きいことが分る。

なお，流し始めの電界をかけないときの透水係数は，**Fig. 2** の場合 0.33 (cm/sec)，**Fig. 3** の場合 0.17 (cm/sec)，**Fig. 4** の場合 0.27 (cm/sec) であった。また間隙率は wet and dry method により求めた。

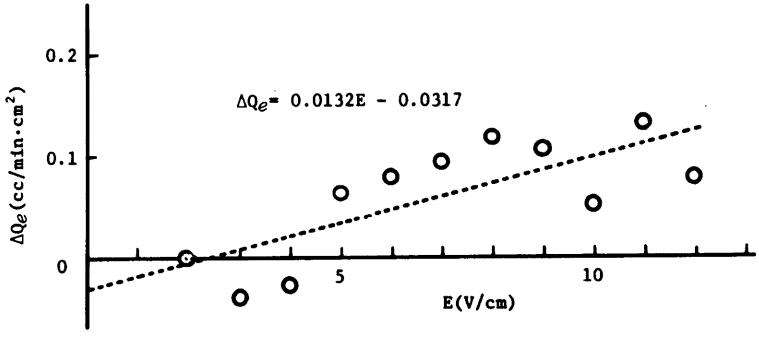

Fig. 2. Water flux ΔQ_e as a function of E when $\Delta h=5$ (cm), sand core length is 14 (cm), NaCl concentration is 0.5%, sand particle size is 500～1000 (μ) and porosity is 0.40.

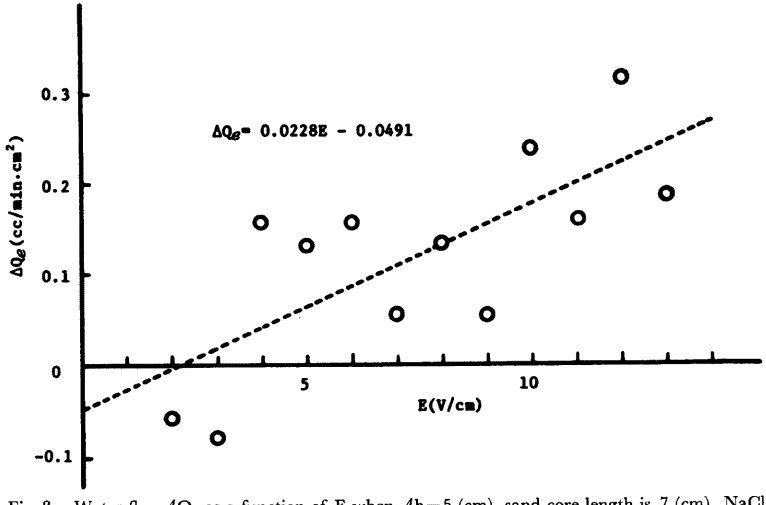

Fig. 3. Water flux ΔQ_e as a function of E when $\Delta h=5$ (cm), sand core length is 7 (cm), NaCl concentration is 0.5%, sand particle size is 250～500 (μ) and porosity is 0.44.

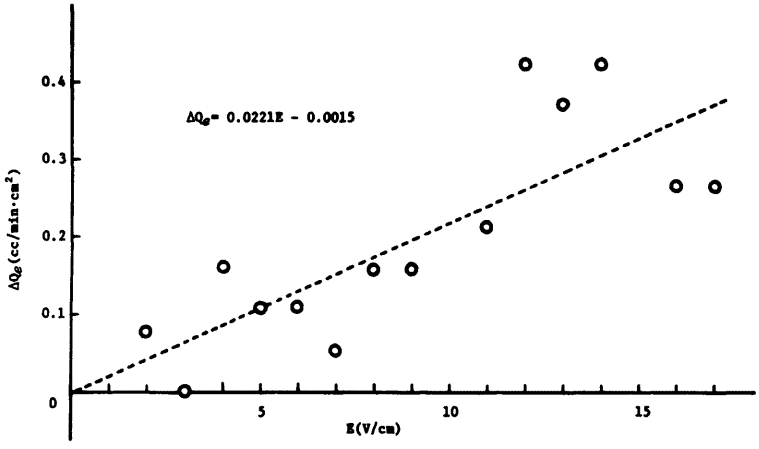

Fig. 4. Water flux ΔQ_e as a function of E when $\Delta h=5$ (cm), sand core length is 14 (cm), NaCl concentration is 0.25%, sand particle size is 500～1000(μ) and porosity is 0.40.

5. 考　　察

Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 より電気浸透効果が確かに存在することが分る。どの程度の電気浸透が起っているかを次のようにして評価した。

(1)式より

$$\Delta Q_e=\frac{n\zeta\varepsilon E}{\eta}=\frac{n\zeta\varepsilon}{\eta}\cdot\frac{\Delta V}{L}=\frac{k_e}{\eta L}\Delta V,\quad k_e=n\zeta\varepsilon$$

一方 Darcy 流による流量

$$Q_0=\frac{k}{\eta L}\Delta H$$

ただし，k_e, k はそれぞれ electro-osmotic permeability, hydrodynamic permeability であり，$\Delta V, \Delta H$ はそれぞれ電位差，水位差である。一般に電気浸透効果の程度を示す指標として，k_e/k が用いられているので，ここでもそれに従った[6]。

Fig. 2 の場合，グラフの傾きより $k_e/\eta=0.0132(\mathrm{cm^2/min\cdot V})$ であるから，$k_e/\eta L=9.4\times10^{-4}(\mathrm{cm/min\cdot V})$ となり，$k/\eta L=1.42(1/\mathrm{min})$ であるから，MKS 単位系で

$$k_e/k=6.6\times10^{-6}(\mathrm{m/V}) \quad \cdots\cdots(2)$$

となる。同様に **Fig. 3** の場合，

$$k_e/k=2.3\times10^{-5}(\mathrm{m/V}) \quad \cdots\cdots(3)$$

Fig. 4 の場合，

$$k_e/k=1.3\times10^{-5}(\mathrm{m/V}) \quad \cdots\cdots(4)$$

となる。

(2)，(3)を比較すると，塩分濃度が同じでも粒径が小さい方が電気浸透は効果的に現われることが分る。これは(3)の場合 k が低下するために，電気浸透効果が相対的に大きくなるためである。

(2)，(4)を比較すると，同じ粒径の porous media でも塩分濃度の低い方が効果は大きいことが分る。これは前にも指摘したように，濃度の低い方がジータ電位が大きくなるためである。

上のことから，粒径の小さい半透水層で，潮汐振動などによる塩分拡散のため濃度の低くなっている場合には，電気浸透効果を利用して塩水浸入を防止する可能性は残されている。

しかしながら，土木工学あるいは石油工学で電気浸透効果を利用して粘土層または sandstone から水や石油を流出させる場合，k_e/k が 1(m/V) を越えるのに比して，**Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4** いずれの場合もk_e/kの値は極めて小さい[6]。

また現実的に見ても，例えば断面積 1(m^2)，長さ 1(m)，粒径 250～500(μ) の porous media で塩分濃度 0.5%の塩水の流量が 20(l/min) である場合，その流量を10%減少させるのに約 300(KW) の多量電力が消費されるというような経済的な制約が残されており，塩水揚水あるいは，塩水・淡水両者揚水によって防止する方がはるかに実際的であるように思われる。

また，塩水層，淡水層の間には地辷り地で見られるような接触電位差はなく，従って塩水層と淡水層を短絡させて電位差を取り除き，塩水の流動を止めるという簡単な方法も取れないように思われる。

実験結果の検討を加えておくと，理論的には **Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4** で見られるような直線は，原点から出発しなければならないが，実際には電界の強さがある程度以上でないと，浸透効果は見られなかった。この事は他の実験でも見られ[7]，原因はまだ論究されていない。

次に，**Fig. 2** の直線の傾きから，おおよそのジータ電位を見積ると，$n\zeta\varepsilon/\eta=0.0132$ (cm^2/min•V) であるから MKS 単位系では 2.2×10^{-8}(m^2/sec•V) となり，間隙率 $n=0.40$, 誘電率 $\varepsilon=8.85\times10^{-10}$(farad/m)，塩水の粘性係数 $\eta=0.9132\times10^{-3}$(N•sec/m^2) を代入して，$\zeta=-60$(mV) を得る．因みに NaCl 濃度 2×10^{-3}(mol/l) (0.01%) と石英の場合－100(mV) が得られている（化学便覧)。

また(1)式から流量 ΔQ_e と電界の強さ E との比例定数 $n\zeta\varepsilon/\eta$ は，間隙率 n に依存する。**Fig. 2** の場合と **Fig. 4** の場合では，塩分濃度が共に0.5%であるからジータ電位，粘性係数は等しい。このことを利用して，**Fig. 2** の場合から **Fig. 4** の直線の傾きを計算すると，$n\zeta\varepsilon/\eta=0.0145$($cm^2$/min.V) となり，実験結果の方がはるかに大きい。これは粒径が小さくなると溶液との接触面積が増加し，拡散電気二重層の影響が大きくなるためと推定される。

なお，実験装置の関係上，core 内部の温度を直接測定できず，伝導電流による温度上昇に伴う粘性低下の影響を見積れなかったが，強い電界を加えない限り，温度上昇はほとんど見られなかった。従って k_e/k の値は実際より多少大きいと思われるが，結論には影響しないであろう。

最後に，本研究を進めるに当り，終始適切な御指導をいただいた京都大学防災研究所の奥田節夫教授に心から厚く御礼を申し上げます。また快く御助言して下さった同研究所地形土壌災害部門の人々に心から感謝いたします。

文　献

1） 出井　紘・福尾義昭, 海岸地下水の塩水化について, 京都大学防災研究所年報第18号 B, p. 293-303, 1975.
2） Alfreds R. Jumikis., Soil Mechanics, D. Van Nostrand Comp. Inc., p. 213-228, 1962.
3） George V. Chilingar et al., Possible Use of Direct Electrical Current for Augmenting Reservoir Energy During Petroleum Production, Compass of Sigma. Gamma Epsilon, Vol. 45, No. 4, p. 272-285, May 1968.
4） Ch. Veder, Phenomena of the Contact of Soil Mechanics, Proc. First Int. Symp. Landslide Control, p. 143-150, Oct. 1972.
5） 北原文雄・渡辺　昌, 界面電気現象, 共立出版, p. 102-108, 1972.
6） George V. Chilingar, Effect of Direct Electrical Current on Permeability of Sandstone Cores, Jour. Pet. Tech., p. 830-836, July 1970.
7） R. C. Srivastava, P. K. Avasthi, Electro-Osmotic Effects in a Bentonite-Water System, Jour. Hydrol., Vol. 20, p. 37-47, 1973.