

綜 説

水田の透水性に關与する諸因子について

富士岡 義 一
(京都大学農学部)

I まえがき

水田の透水性は水稻の生育あるいは栽培には密接な關係を有する重要な性質であつて、水稻の生育に最も好適なる透水性(適正浸透量)が望ましいことは言うまでもない。

この水田の透水性は複雑なる現象であつて、これに關与する因子は非常に多岐にわたつてゐるのであるが、できる限りそれらの因子を単純なる形で取出し、それぞれの機能なり性格を明らかにすることは適正な透水性との關連において必要なことである。

水田の透水性に關与する因子として大別すれば、(1) 水田土壤中を流動するカンガイ水の性質、(2) 水田土壤の性質及びその存在の状況、(3) 水田の環境条件、の三者となるので、以下筆者の研究を中心にしてその概要を述べる。

II 水田内の水の性質

透水性を支配するものとしては、浸透水の粘性が考えられる。水田内の水としては、溶液の濃度による粘性の変化は微小で無視できるから、主として水温が大きく影響する。

(表-1参照) 例えば水温が5°Cより30°Cになれば粘性係数はほぼ半減することになり、透水度が倍加される。

表-1 水の温度と粘性係数

温度°C	0	5	10	15	20	25	30	50
粘性係数	0.01797	0.01525	0.01301	0.01138	0.01006	0.00895	0.00800	0.00550

その外水中に含まれてゐる空氣量に關係するが、自然界においては含氣量が急變することがないから無視することができるように考えられる。

III 水田土壤の性質及びその存在状況

一般に土壤の透水性は、透水係数(飽和あるいはこれに近い状態におけるもの)によつて表わしてゐる。透水係数についてはKogeny⁽¹⁾の式が信頼されてゐる。すなわち

$$k = \frac{g}{\nu c \Delta^2} \frac{(p - p_0)^3}{(1 - p)^2}$$

g = 重力の加速度

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ν = 水の動粘性係数

μ = 水の粘性係数

ρ = 水の比重

- c = 土壤粒子の形状値
- △ = 土壤粒子の分散度 = $\frac{\text{粒子の表面積}}{\text{粒子の実体積}}$
- p = 間ゲキ率
- p₀ = 間ゲキ内における不動水の率
- (p - p₀) = 有効間ゲキ率

p₀ に関係する不動水の量は、Ca、Mg などの2価のイオンを有する一般の土壤においては、Mitscherlich の吸着係数の2倍であるが、Na のような1価のイオンを有する土壤の場合には7倍の水を吸着して動かないことが明らかとなっている。⁽²⁾ 従つて2価のイオンを1価のイオンで置換すれば透水係数は急減する。

以上の透水係数の式は流体の性質と土壤の性質を含めて透水量を表現しているのであつて、流体の粘性係数が半減すれば透水係数は逆にほぼ2倍となる。次に c、△、などの土粒子に関するものは余り大きな変化を示さず透水係数に与える影響は小さいのが一般である。従つて (p - p₀) の有効間ゲキに支配的な影響を受けることを示しており、それは結局土壤構造に支配されることを意味しているのである。この有効間ゲキの変化による透水係数の変化は $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{100}$ 時には $\frac{1}{1000}$ に及ぶことがある。

土壤構造は土壤の種類によつて異なるのは当然であつて壤土、植壤土のように粒子が細くなるに従つて有効間ゲキ率は急激に減少する。また同一種類の土壤でもその詰り方によつても異なるのである。従つて水田の過度の浸透を抑制するために粘質土を客土することは前者の目的のためであり、またシロカキを入念に行うのはシロカキにより有効間ゲキ率の少い浸透しにくい土壤構造にならしめる目的であると言える。我々の研究室ではこの観点に立つてシロカキの実験的研究において面白い成果を得ている。

次に安定した水田土壤においても自然環境の如何により土壤構造が変化を起すのであつて、生物などによる物理的作用によるものは最も簡単でしかも不規則であるから、それ以外のものについて述べる。

A 水田土壤の還元と透水性⁽³⁾

湛水状態における水田土壤の顕著な特色は夏季高温のために、作土が酸化の状態から還元状態になることである。この変化が透水性に与える影響について室内で実験した結果は、図-1~3に示す通りである。

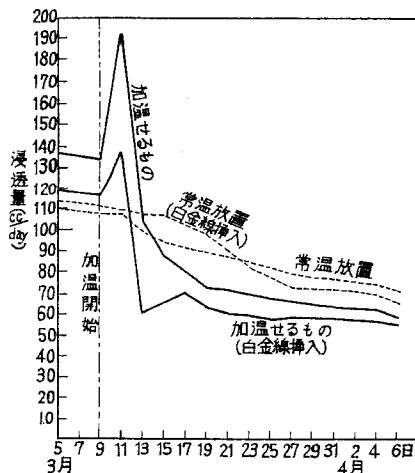


図1 砂壤土の浸透量変化

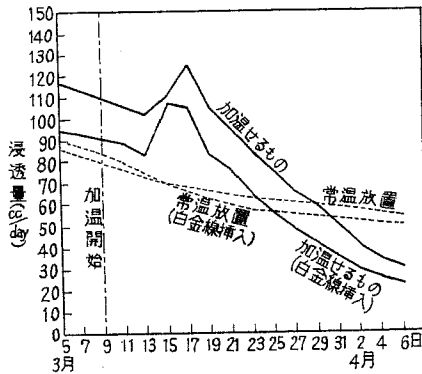


図2 埴壤土の浸透量変化

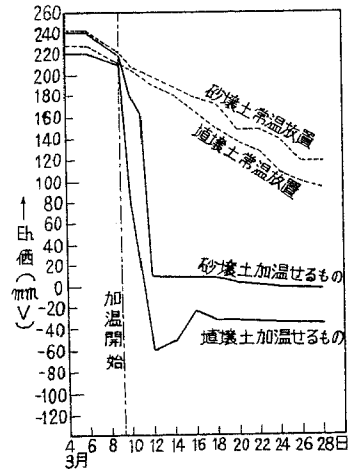
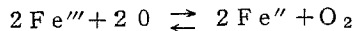
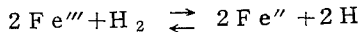


図3 Eh 価の変化

土壌を $30 \sim 38^{\circ}\text{C}$ (室温 $10 \sim 13^{\circ}\text{C}$) に加温すれば急激に還元状態となり、土性により多少異なるが大体3日目でEhは砂壤土が約 $+5\text{mV}$ 、植土は約 -40mV と安定している。それに対して浸透量は砂壤土においては、加温後たゞちに増加して2日目で最高に達しその後は急激に減少して終には最初の $\frac{1}{2}$ 以下となりEhの傾向とよく一致している。埴壤土においてはこの変化が著しく緩慢であつて8日目に最高に達し、以後徐々に減少している。また上述のように加温して浸透量が減少安定後再び室温に放置しても浸透量は復元増加しなかつた。

以上の結果を考察すれば、加温により粘性係数が小さくなつて一時的に浸透量が増加し、以後急激に浸透量が減少しているのはEhの低下即ち還元に起因していることは明らかである。

還元が進めばガスが発生して浸透を抑制することも考えられるが、還元状態になれば、3価の鉄化合物は下記のように還元されて2価の酸化鉄 (FeO_2 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, FeS) となり、これらの



2価鉄化合物は一部膠状酸化第1鉄となり、一部は土壌中に溶けている炭酸と作用して炭酸鉄もしくは重炭酸鉄となつて可溶性となり、一部は陰性コロイドたる腐植または他の無機膠質物と結する。これらの現象が土壌中の有効間ゲキを縮小せしめて浸透量を減少させるものと推察できる。

B 土壌戸の状況すなわち鋤床戸あるいは耕盤の存在と透水状況⁽⁴⁾⁽⁵⁾

熟田においては一般に鋤床戸あるいは耕盤が発達して作土戸よりも不透水性の場合が多い。これらの水田において水田各区に高低差のある場合には鋤床戸(耕盤上面)を境界面としてその大部分が畦畔に向つて浸透し鋤床戸に沿つた畦畔部分より下流側に流出していることを明らかにすることができたので、これを畦畔浸透と呼び、これに対して鋤床戸面を鉛直に浸透するものを鉛直浸透と呼ぶことにした。

これらの現象は放射性同位元素 $\text{Co}-60$ をトレーサーとして用い、小枠を設けてカンガイ期間中浸透させて、落水後各点の土壌のカウント数によつてその浸透流線を追跡した。それらの結果は、図4～5に示す通りである。以上のようにして見出した浸透流線が正しいかどうか(また一面畦畔浸透防止法として)を検証するために、畦畔内部に鋤床戸まで達する止水壁(コンクリート壁及びベントナイト粉

末壁)を挿入した所(図-6参照)ほとんど完全に畦畔浸透が防止することができ、以上のような流れ方をすることを実証した。

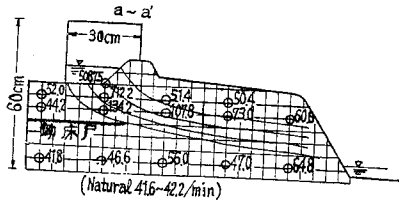


図4 畦畔浸透流線と放射能カウント数
(亀岡農試試験田)

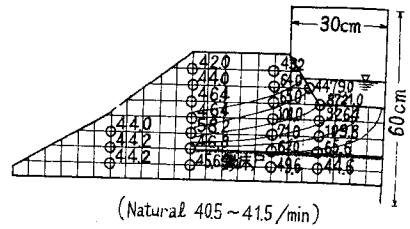


図5 畦畔浸透流線と放射能カウント数

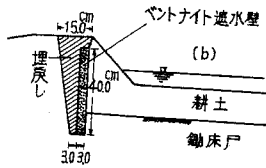


図6

従つて水田よりの浸透には鉛直浸透と畦畔浸透とがあつて、筆者の測定した範囲では、後者は前者の3~10倍にも達するので両者を区別して考えねばならない。

畦畔浸透量は畦畔の土性構造などによつて異なるのは勿論ではあるが、同一畦畔においても晴天時には増加し、曇天になり降雨になるに従つて減じて終には鉛直浸透量に近い値を示すようになる。

IV 水田存在の環境条件(6)(7)

A 地下水位の高低と透水性

地下水位の高低と透水性との関係を見るためには先ず鉛直浸透の浸透機構を明らかにしなければならない。このために、地下水位がかなり下方にあつて土壌が均質な場合の単純なる条件を想定して図-7のように、湛水深を変化して鉛直降下浸透実験を行つて図のような結果を得た。

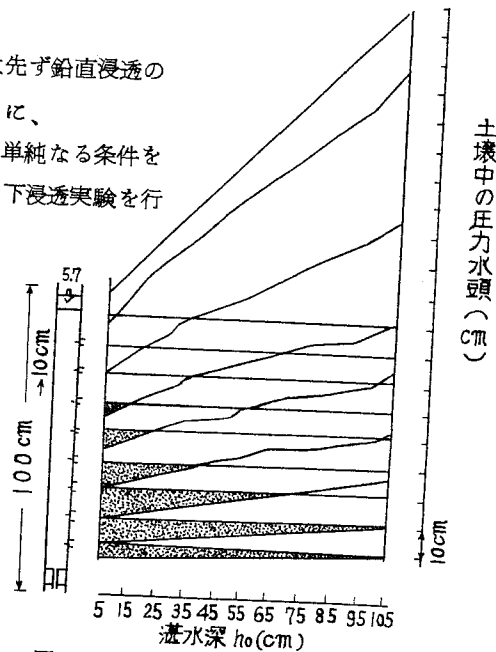


図7 湛水深と土壌中の圧力水頭の関係

以上の結果によれば、表戸部だけが飽和されて正圧を示し、それ以下は不飽和（開放浸透状態）となつて負圧となりそれが下方に行くに従つて増加している。次に湛水深を増加すれば水圧0点は下方に行き、正圧は増加すると共に負圧は減少する。一方湛水深を減少すると逆の関係が成立する。なお土壌面より負圧0点までの距離を l とすれば湛水深 h_0 との関係は砂壤土については

$$l = \log_{2 \times 1.058} h_0$$

なる関係がある。また湛水深を増加すればする程浸透量は増加する。

更に負圧下方の変化を実験により詳細に調べた結果、その傾向は図-8の通りである。

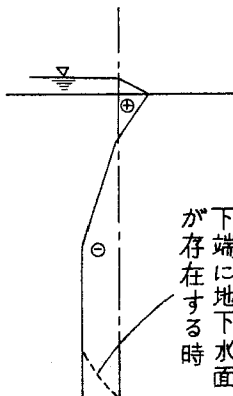


図8 土壌中の圧力水頭

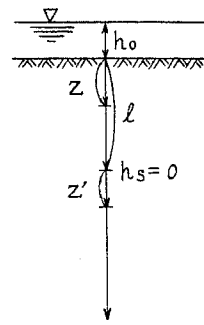


図9

以上によつて明らかなように下方に行くに従つて負圧は増加するが、ある点以下になれば一定値となる。この部分の含水比は圃場含水量にほぼ近い値を示した。

負圧一定値までの土壌中の圧力水頭は、Navier-Stokesの運動方程式を適用して考究した結果次式により表わされる。(図9参照)

$$h_s = h_0 + Z \left(1 - \frac{v}{k} \right) \quad \text{正圧部分}$$

$$h_s = -Z' \left(\frac{v}{k'} - 1 \right) \quad \text{負圧部分}$$

h_s = Z点 (Z'点)における土壌中の圧力水頭、

k, k' = 正圧及び負圧部分の透水係数、

v = 浸透流速、

次にやや不透水性の鋤床戸が狭まれた場合には図-10のようになり、不透水性戸上は静止水中和同様な圧力分布をとり、不透水性戸下で急激に負圧が発生して以下は一定値になる。(勿論この状況は不透水性の度合、並びにその厚さなどにより変化するものである。)

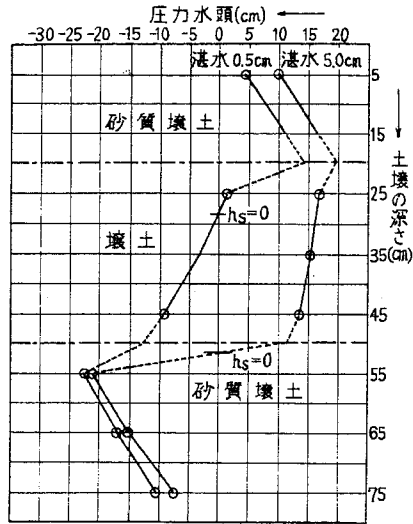


図10 表土下にやや不透水土層が挟まれた場合に各土層における圧力水頭の分布

以上により水田における鉛直浸透の状況が明らかとなったのである。

従つて地下水位が変動する場合、例えば地下水位が負圧一定値以上で変動すれば、地下水位が上昇すれば浸透勾配は小さく成つて浸透量は減少し、逆に下降すれば増加することが推察される。所が負圧一定値以下で上下しても浸透量には影響しないことが明瞭である。(実際の場合には地下水面が現われると毛管上昇などによつて、可なり変化するが定性的には以上のことが言える。)

これらの関係は実験調査の結果⁽⁸⁾によつても実証されている。すなわち、砂土1.5~2.0m, 砂壤土0.9~1.0m, 壤土0.6mなどが浸透量に影響する限界深さで、それら以上で地下水位が変動すれば影響を受けることになる。また実際の場合、排水改良を行つて地下水位を低下すれば水田の浸透量が増加することは古くから認められている所である。

B 水稻栽培の場合の葉面蒸発量と透水性⁽⁹⁾

わが国における水田の浸透量は、多いもので減水深にして10~35mm/dayの間にあつて浸透流速にすれば 1×10^{-5} ~ 4×10^{-5} cm/secの非常に緩速度で降下浸透を行つている。このような土壤中に水稻の根が張れば可なりの水量(水深4~10mm/day, 流速 5×10^{-6} ~ 1×10^{-5} cm/sec)を吸収することになり、降下浸透中の水が途中で奪取されて浸透量に影響を与えるものと考えられる。これらを調べるために鉄製浸透試験器にて水稻の栽培試験を行い(別に無栽培の浸透試験も行つた)、灌水量、浸透量を測定し、葉水面蒸発量を算出した。それらの結果は、図11, 12, 13に示す通りである。

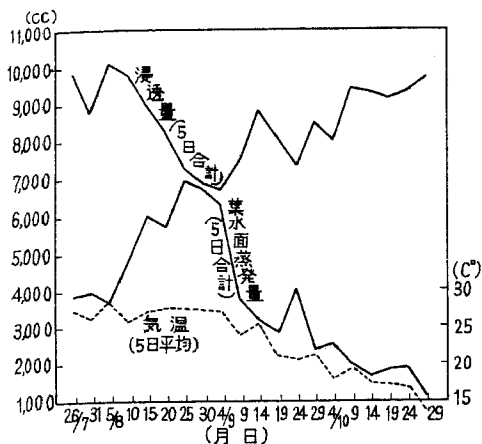


図11 葉水面蒸発量と浸透量との関係

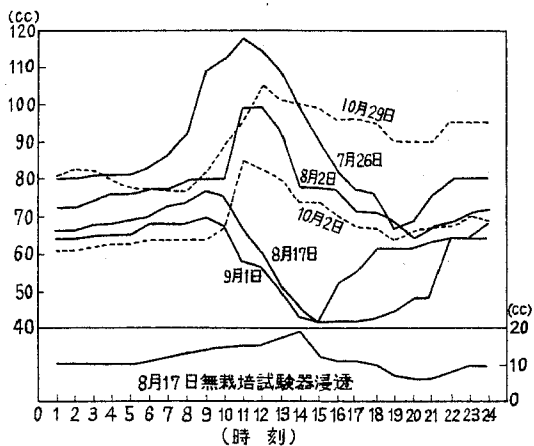


図12 生育時期別浸透量の日変化

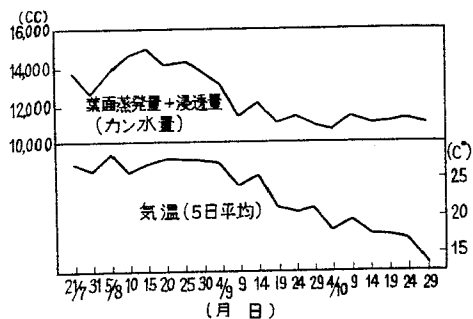


図13 カン水量と気温との関係

表2 相関係数および偏相関係数

	相 関 係 数	偏 相 関 係 数
葉水面蒸発量と浸透量	$r_{1.2} = -0.4603$	-0.4855
葉水面蒸発量と気温	$r_{1.3} = +0.8333$	+0.8390
気温と浸透量	$r_{2.3} = -0.2395$	+0.2941
気温と浸透量(8月17日)	$r = -0.7288$	-
同上 無栽培	$r = +0.6383$	-
(葉水面蒸発量+浸透量)と気温	$r = +0.8386$	-

土壤本来の浸透は、IIで述べたように気温(水温)が上昇すれば増加するのであるにかゝらず、生育全期間においてもまた一日中の変化においても逆に葉面蒸発量に反比例的に減少しているので葉面蒸発量が浸透量に影響することは明らかである。

図-13は、葉水面蒸発量+浸透量=灌水量と気温との関係であつて、両者は全く同じ傾向を示している。(10月後半は毛根の木化腐朽のために水道が付き気温ほどは減少していない。)また無栽培区の気温と浸透量との関係もほぼ同様な傾向を示している。この事柄は、灌水量が気温によつて変化する本来の浸透量に等しいことを示すものである。(表-2参照)

以上を総合すれば、土壤の本来の浸透量は気温の変化に対応した変化を行うのであつて、そこへ水稻

が吸水を行う時には、その浸透量は、その吸水量に相当する量だけ減少しているものようである。

これらの関係は従来の減水深の測定結果を詳細に検討すれば、水稻が生理的に最も水を必要とする穂孕期前後が最大にならず、気温の最も高い7月中旬～8月上旬が減水深最大を示していることからしても実証しているものと考えられる。

以上のような観点よりすれば、水田よりの浸透量は〔畦畔浸透＋鋤床あるいは耕盤よりの浸透〕と考えるのが合理的である。従つて水田の透水性としては、畦畔浸透は好ましくないのでできる限り防止すべきであるから、ただ鋤床戸あるいは耕盤の透水性を考えればよいことになる。

参 考 文 献

- (1) J. Kogeny : Hydraulik 1953, P289 ~ 394
- (2) F. Alten und B. Kurmies Handbuch der Bodenlehre
1939, P219 ~ 239
- (3) 富士岡, 五十崎 : 水田状態土壤の還元が浸透に及ぼす影響について
農業土木研究 vol. 23, No6 . 1956
- (4) 富士岡 義 一 : 畦畔浸透について (I)
農業土木研究 vol. 25, No1 . 1957
- (5) 富士岡, 馬 場 : 全 (I)
農業土木研究 vol. 26, No1 . 1958
- (6) 富士岡 義 一 : 土壤の鉛直降下浸透における負圧発生機構に関する研究 (I)
農業土木研究 vol. 21, No6 . 1954
- (7) 富士岡 義 一 : 全 (II)
農業土木研究 vol. 23, No5 . 1955
- (8) 大 島 一 志 : 地下水位の変化に基く水田用水量の相対的増減関係とその動態に関する研究(II)
農業土木研究 vol. 21, No6 . 1954
- (9) 富士岡 義 一 : 水稻の葉面蒸発量が浸透に及ぼす影響について
農業土木研究 vol. 25, No5 . 1958