

転換畑土壌中の水分移動

長谷川 周一*

Soil Water Movement in Upland Fields Converted from Paddy Fields
Shuichi HASEGAWA

National Research Institute of Agricultural Engineering

1. はじめに

農地の好適条件が水田や畑の改善目標としていくつか提案されており、土壌物理に関連する項目もいくつか含まれている。例えば、水田の作土は15cm以上に対し、畑の作土は25cm以上であり、畑の透水性や有効土層厚は水田と比べ約2倍の値が提案されている²⁾。一方、畑のみについても、粗孔隙は5%以上、気相率18%以上、硬度24mm未満等があげられている³⁾。ところで、現在の薄い水田の作土を厚くするためには、一度に深耕してもだめで10年計画でやるべきであると言われている⁴⁾。したがって、畑に転換したとき、深耕によって水田心土が転換畑の作土に急激に変化する訳でもない。

転換畑もしくは田畑輪換が可能な汎用農地については、上記の畑の物理的条件にくわえ、地下水条件、排水条件の整備が要求される。一方、均一な土壌に対して適用されてきた土壌物理を、暗渠施工が行なわれてたり乾燥亀裂の発達した圃場の物理性にそのまま応用出来ないこともある。そのため、現状の転換畑においては、目標値の決定、解釈、達成にはいくつかの問題を含んでいる。

本報告では、乾湿害を受け易い粘土質転換畑土壌と、典型的な畑の1つである関東ローム普通畑とを対比させて、土壌中の水の動きの特徴を実測値を含めて明らかにする。また、この結果をもとに、転換畑に要求される条件、目標値について、2～3の問題点を考察した。

2. 粘土質転換畑土壌と関東ローム普通畑土壌の物理性

粘土質転換畑としては、沖積水田の心土を充填して1977年に造成された、大きさが30×70m、深さが65cmの

有底（ビニール製）ライシメータを用いた。ライシメータ中央には、長辺に沿って本暗渠が施工されており、管上には疎水材としてモミガラが作土直下まで充填されている。1980年2月に弾丸暗渠が本暗渠に直交するように1.2m間隔で施工され、同年夏作よりダイズ畑に転換し、以後、夏作はダイズ、冬は裸地とした。作土層の厚さは、1980年の10月時点で12cmであり、1984年まではほとんど変化しなかった。

関東ローム畑は、農業土木試験場内の普通畑である。ロータリー耕で耕耘しているため、作土の厚さは15cmと薄い。暗渠等の排水改良施設はない。図-1に、粘土質転換畑（以下粘土と略す）と関東ローム畑（以下ロームと略す）の土層断面と物理性を示した。粘土はロームと比較して、pF3.0以下の保水量が少ない。粘土の水分

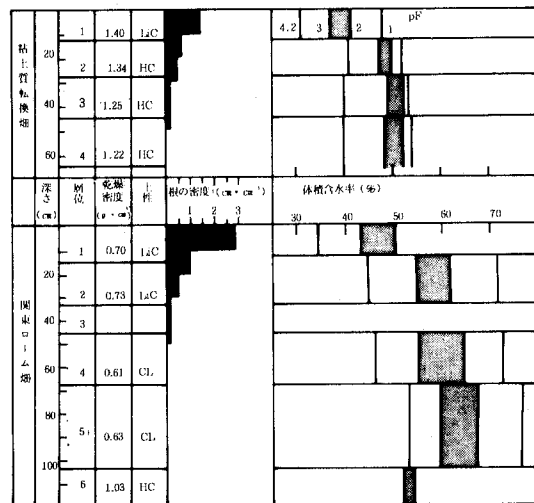


図-1 粘土質転換畑と関東ローム畑の物理性の違い (1982)

* 農業土木試験場

表一 畑の物理性とその改善目標

	地力増進法による改善目標	粘土質転換畑	関東ローム畑
作 土 の 厚 さ(cm)	25以上	12	15
主要根群域の緻密度(mm)	22 "	23	20
主要根群域の粗孔隙量(%)	10 "	1	2
主要根群域の易有効水分保持能(mm)	20 "	11	39

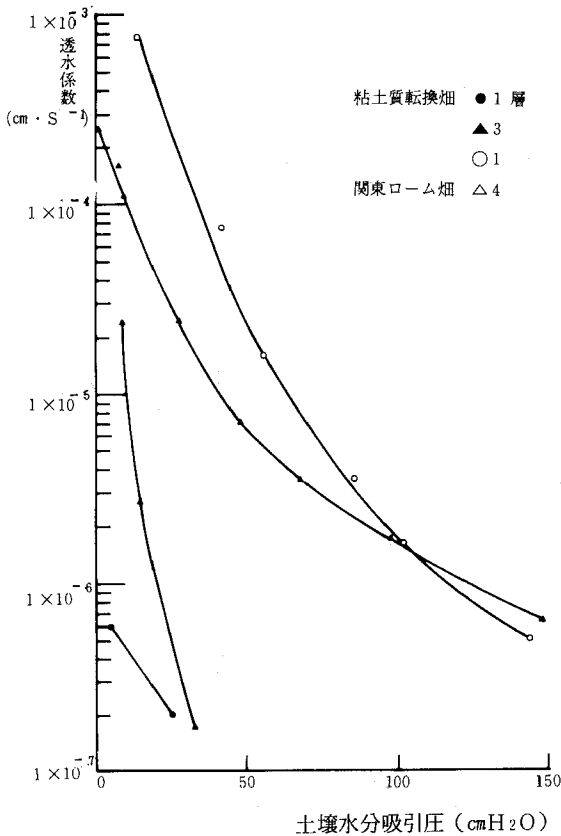


図-2 粘土質転換畑と関東ローム畑の透水係数の違い

保持特性は1980年秋と1982年秋とではほとんど変化がなく、1983年の調査ではビニール底に達する亀裂が発達していた。通常の管理では、転換畑の土壌の変化は耕土層に限定され、転換2年程度では水田の基本的な性格は失なわれないと言われている⁵⁾。表-1は、地力増進法の畑の基本的な改善目標とこれらの土壌とを対比させたものである。粘土ではすべて改善目標以下である。主要根群域は、地力増進法では地表下40cmまでの土層としているが、吸水の観点からは根の密度の限界は $0.5 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ と考えられており⁶⁾、図-1を参照すると粘土、ロームとも20cmである。粗孔隙量は毛管飽和からpF1.5までの孔隙の割合、易有効水分はpF1.8からpF2.7の水分量差から計算される値である。

図-2に粘土とロームの透水係数と吸引圧の関係を示

す。透水係数はRichardsの定常法⁷⁾により測定した。図には両土壌とも2つの層の値を示しているが、ロームの第6層を除き、両土壌の各層とも図と類似の傾向を示した。つまり、粘土の透水係数は $-30 \text{ cm H}_2\text{O}$ (pF1.5)で $1 \sim 2 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ まで低下するのに対し、ロームのそれは $-100 \text{ cm H}_2\text{O}$ (pF2.0)においてもほぼ $10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ のオーダーを維持するという大きな差異が読みとれる。

3. 排水

排水は、土壌への新たな水の供給が絶たれた後の重力による水移動を言う。一方、地下排水は過剰水の排除を意味しており、地下排水には降雨による浸透が加わることもある。そこで、内部排水と地下排水とを分けて考えることにする。

内部排水とは、初期に土層全体が飽和している条件から始まる水の流れである。1例として、地表まであった水面が急激に地表下60cmまで低下したと仮定して、粘土、ロームの排水の特徴を追跡してみよう。内部排水は、考えている水分領域で水分拡散係数は一定、吸引圧と体積含水率は1次の関係で表現されるという仮定のもとでポテンシャル方程式を解くことにより、次式で表わされる⁸⁾。

$$\frac{V}{V_{\infty}} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D \pi^2 t}{4 L}\right) \quad (1)$$

ここで、Vは排水開始後t時間の間に単位面積の土から排水される水の量、 V_{∞} は無限時間後に排水される全排水量、Dは水分拡散係数、Lは土柱の長さである。図-1に示したように粘土、ローム圃場とも成層化しているが、ここでは両土壌の内部排水の特徴をみるため、粘土の第3層、ロームの第4層に(1)式を適用した。水分拡散係数は透水係数と水分容量から求め、吸引圧が $30 \text{ cm H}_2\text{O}$ の時の値を採用した。水分拡散係数は、粘土で $1.4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、ロームで $2.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ であった。計算結果を図3に示す。全排水量はロームで 14.0 mm なのに対し、粘土ではわずか 2.7 mm しかなく夏期のダイズの日蒸発散量より少ない。排水速度は、ロームでは排水開始後2日で90%以上の排水が行なわれるのに対し、粘土では50%の排水が行なわれるのに約1週間、90%の排水には約1ヶ月を要する。

転換畑土壌中の水分移動

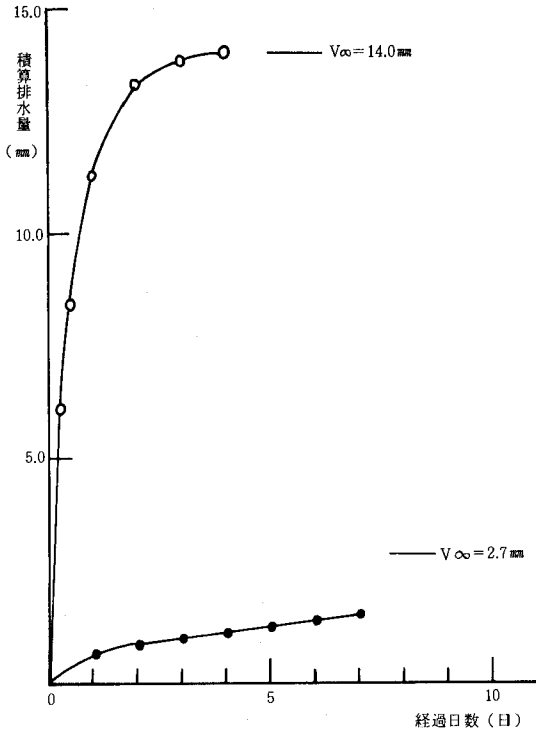


図-3 内部排水による積算排水量の推移
 ・関東ローム畑 ・粘土質転換畑

は排水により、また表層は蒸発散の影響で土壌水分が減少するのに対し、粘土では蒸発散により表層の土壌水分が減少するのみで、心土においては排水に伴う含水比の変化は約1週間の間では生じていないとみなされる。なお、ロームの含水比の破線は欠測部分である。

以上のように、内部排水の計算および圃場の測定から明らかなことは、ロームと比較して粘土では土層に保持される排水可能な水分量が極端に少なく、排水速度が非常に遅いことである。したがって、粘土の心土では排水路水位を低下させても気相率の増加は期待出来ない。そのため、畑作物の根は心土に発達した亀裂面を除くとほとんどみられない。

次に、地下排水を粘土を対象として考察してみる。粘土質転換畑の暗渠排水量は、内部排水と比較して非常に大きいことが多い。図-5に、粘土ライシメータにおける降雨-暗渠排水量の関係を示す。ライシメータは有底であるため、地中に入った水はすべて暗渠により排水される。ピーク排水量は $40\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ に達している。このような大きな排水量は、不飽和領域の水移動が主体である内部排水とは別に、地下排水が乾燥亀裂、弾丸暗渠等の粗大孔隙(マクロポア)を主体とした流れであることを意味している。乾燥亀裂が排水に大きく寄与することは、粘土質水田の排水において強調されてきた^{9,10,11)}。しかしながら、亀裂等が含まれる不均一土壌中の水移動の研究は未だ確立しておらず、いくつかの注目すべき研究や総説がみられるもの^{12,13,14)}、土壌物理解分野の残された大きな課題である。

粘土の地下排水が亀裂網を通して行なわれることは疑いが無いが、ここでは、このような水の流れに対してもダルシー流的な取扱いが可能と仮定して、粘土圃場の透水係数を求めることにする。計算には、定常状態で排水が行なわれているとき、暗渠の間隔を決定するために用いられるHooghoudtの式を適用した。この式は、自由水面を持った土層中を暗渠に向けて、水が水平方向に移動すると仮定して導入される。暗渠管が不透水性のビニール上にあるので、Hooghoudtの式は次のように表わされる¹⁵⁾。

$$k = \frac{q S^2}{4 (H_1^2 - H_2^2)} \quad (2)$$

ここで、 k は透水係数、 q は暗渠からの排水量、 S は暗渠の間隔、 H_1 はビニール面から測定した暗渠の中間($S/2$)の水位、 H_2 は暗渠管上の水位である。いま、暗渠の中間の水位が地表面に等しく、暗渠管上の水位がゼロと仮定し、 q 、 S 、 H_1 としてそれぞれ $40\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 30m 、 65cm を代入すると、この粘土圃場の透水係数は $2.5 \times 10^{-2} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ となる。透水係数のこの値は砂とほぼ同程度の大きさである。一方、土壌中に入った水が動水勾配1で降下浸

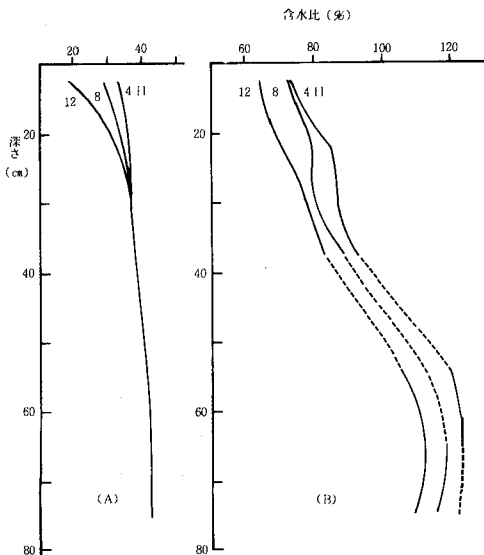


図-4 降雨後の深さ別含水比の変化(1982)
 (A) : 粘土質転換畑 (B) : 関東ローム畑
 (図中の数字は8月の日付)

図-4は、1982年7月30日から8月3日までの103mmの降雨後の土壌水分を直接採土法で測定した含水比分布図である。8月7日には5mmの降雨があった。ロームで

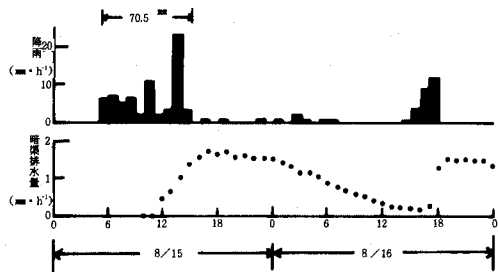


図-5 粘土質転換畑における降雨-暗渠排水量(1983)

透するとみなしたとき、 $40\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ に相当する透水係数は $5 \times 10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ となり、Hooghoudtの式から計算される値に比べて3オーダー小さい。暗渠間隔が30mで、しかも、暗渠が十分機能している事実は、この粘土質転換畑の圃場の透水係数は砂と同程度の 10^{-2} のオーダーであると考えるのが妥当である。

地下の排水が亀裂によって行われると仮定したときの亀裂の巾と間隔を次に推定してみる。土壌を毛管の集合とみなし、土壌水の運動にHagen-Poiseuille式を適用したモデルは多い^{16,17)}。また、マクロポアにHagen-Poiseuille式を適用した例もみられる¹²⁾。そこで、第一近似として亀裂を平板とみなし、平板間のHagen-Poiseuille式を適用して亀裂の巾と間隔を計算した。平板間のHagen-Poiseuille式は(3式)と与えられる¹⁸⁾。

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \frac{h^3}{\mu} \left(-\frac{dp}{dx} \right) \quad (3)$$

ここで、 Q は流量、 h は平板間の距離(亀裂の巾)の半分、 μ は水の粘性、 $(-dp/dx)$ は圧力勾配である。暗渠疎水材に向って水が、ビニール底に達する巾2h、間隔 d の垂直亀裂中を水平方向に流れ、暗渠排水量が q であるとき、(3式)は次のように変形される。

$$q = \frac{4}{3} \cdot \frac{h^3 \cdot g}{S^2 d \mu} (H_1^2 - H_2^2) \quad (4)$$

そこで、Hooghoudtの式を適用したときと同様、暗渠管上での水位 $H_2=0$ 、暗渠の中間での水位 $H_1=65\text{cm}$ とし、 $q=40\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ を代入すると、亀裂の間隔が15~100cmの範囲にあるとき、亀裂の巾は0.5~0.9mmとなる。水の流れが亀裂の中でも幅の狭い部分で規定されることと、圃場の亀裂発達状況から、亀裂の幅はオーダー的には妥当と思われる。(4式)では、垂直亀裂は間隔 d で平行に発達し暗渠と直交すると仮定しているが、多くの亀裂は互いに結合し合っており、幅の広い所では乱流も生じていると考えられる。一方、亀裂の中には孤立していて排水に関与しないものも存在する。したがって、上記のHagen-Poiseuille式の適用はあくまで第一近似である。

以上のように、亀裂が発達した粘土質転換畑の地下排水では、典型的な水みち排水が行なわれており、暗渠、弾丸暗渠施工、畑としての利用により、圃場の透水性は砂と同程度になるまで改良されている。そして、対象とする土壌の体積が圃場全体というように大きくなると、流量が圧力勾配の1次関数で表現されるダルシーの法則やHagen-Poiseuilleの式が成り立っているようである。内部排水と地下排水の2つの排水現象の比較より、粘土質水田を畑に転換することで地下排水性の向上は短期間に期待出来るが、内部排水を規定する土壌の保水性、不飽和透水係数のような土壌構造の変化を伴う土壌改良には時間のかかることがわかる。

4. 蒸発散

作物の蒸散が盛んに行なわれるためには、その根が土壌中深くまで発達していること、多くの根が分布する作土中に植物が利用出来る水分が豊富にあること、および心土から作土に向って十分な水が供給されることが必要である。これらのうち、前二者は図1等で触れたので、ここでは三番目の問題に焦点をあてて粘土とロームとを比較してみる。蒸発散に伴う上向き水分の流れはほとんど不飽和状態で生じるため、浸透や地下排水に大きく寄与してうち亀裂等の大孔隙は水の流れに関与しなくなり、代ってより小さな間隙中の水移動の速さが重要となってくる。図-6に、吸引圧が $1,000\text{cmH}_2\text{O}$ ($pF3.0$)までの透水係数を示した。ロームは作土の充填土で、粘土は第3層の不攪乱土で代表させた。低吸引圧側の透水係数はRichardsの定常法⁷⁾、低吸引圧側のそれはDoeringのワンステップ法¹⁹⁾で求めた。両土壌を比較すると、低吸引圧側では透水係数に大きな差異が認められるが、吸引圧が $1,000\text{cmH}_2\text{O}$ では両者の差は小さいことがわかる。しかし、ロームに比べ粘土の飽和度は依然として高い(図-1参照)。

心土から作土に向う水の流れ易さを比較するため、最も単純な例として、土壌面蒸発が定常状態で生じている場合を考えることにする。地表面の土中水分吸引圧 p と地下水面までの距離 z との関係は、ダルシーの法則を積分することにより次第で与えられる²⁰⁾。

$$Z = \int \frac{1}{1+q/k} dp \quad (5)$$

ここで、 q は蒸発速度、 k は透水係数である。境界条件は、地下水面上($z=0$)で $p=0$ である。図-6に示した粘土とロームの透水係数は、吸引圧の関数としてそれぞれ次のように近似させた。

転換畑土壌中の水分移動

粘土

$$k = \frac{1.8 \times 10^{-4}}{P^2 + 1.8} \quad (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (6)$$

ローム

$$k = \frac{7}{P^3 + 2300} \quad (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (7)$$

(6)又は(7)式を(5)式に代入した結果を図-7に示す。例えばロームでは、日蒸発量が6mmのとき、地下水位が地表下100cmの所にあっても地表の土壌水分吸引圧は150cm H₂O程度である。一方、粘土では、日蒸発量が3mmのとき、地下水位がほぼ10cmであっても地表の土壌水分吸引圧は数100cm H₂Oに達する。図-8は、圃場に埋設したテンシオメータの挙動と室内試験より得られた不飽和透水係数を用いて圃場における上昇流を計算した結果である。粘土はロームと比較して、上昇流が吸引圧の増加とともに急激に低下する。

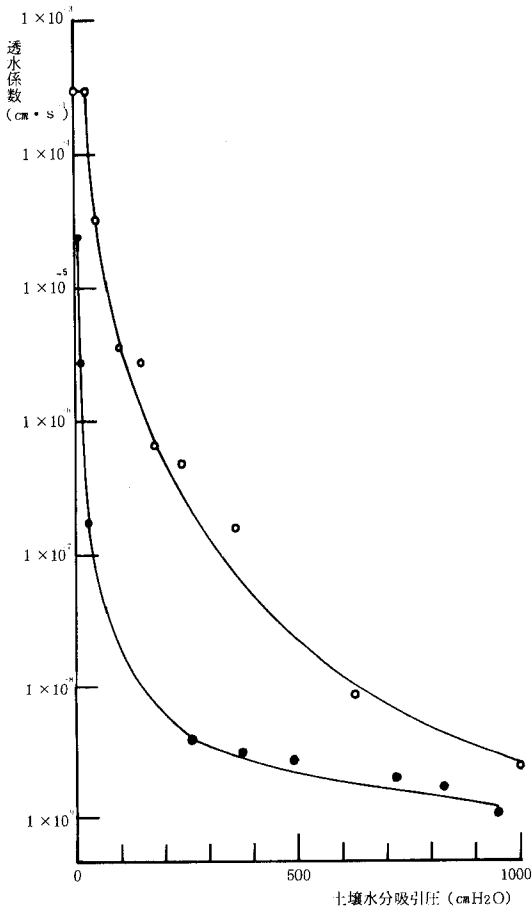


図-6 透水係数と土壌水分吸引圧との関係

- ・関東ローム作土 (充填土)
- ・粘土質転換畑 (不攪乱土)

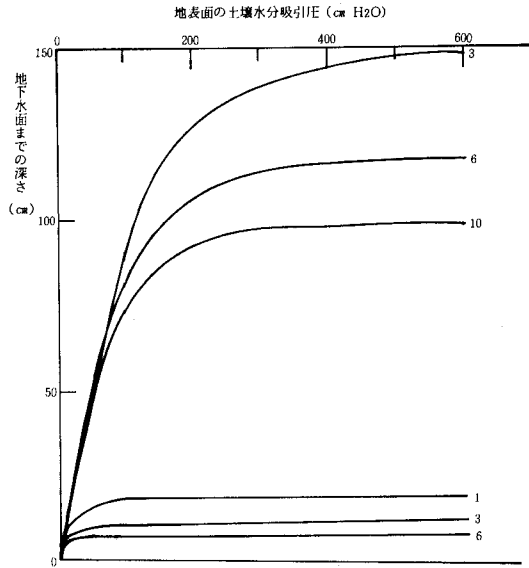


図-7 地表面の土壌水分吸引圧と地下水面までの深さ上の3つは関東ローム作土 (充填土), 下の3つは粘土質転換畑 (不攪乱土)
図中の数字は日蒸発量 (mm)

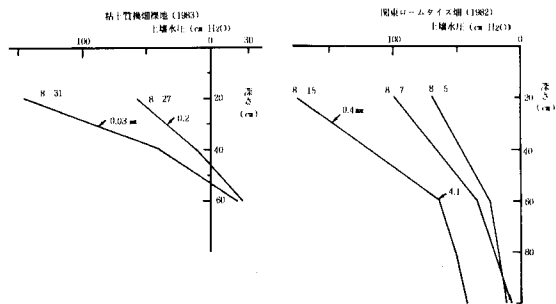


図-8 圃場における土壌水圧と上昇流の速さ

以上の結果から、ロームでは、地下水位を調節することにより根群域内の土壌水分吸引圧を制御出来るのに対し、粘土では、地下水位により土壌水分吸引圧を制御することが出来ず、地表面近くは過剰に乾燥しても、その下は飽和に近いという状態が生じる。また、作土が薄く有効水分が少ないことにくわえ上昇流が小さいことは、粘土質転換畑において干害が起り易いことを意味する。このように、不飽和土壌水の運動理論を蒸発散に適用することにより、実際の農地の水分状態や変動をかなり良く説明することが出来る。

5. 転換畑を推進するにあたっての問題点

保水性、透水性が大きく異なる粘土質転換畑土壌と関東ローム普通畑土壌を用いて、土壌中の水移動の特徴を

明らかにして来た。そこで、これまでの結果をふまえて、転換畑に要求されている地下水位と排水の目標値について若干の考察を加えてみたい。

a. 地下水位目標

地下水位の深さは、根群域の空気量を確保し土壌の過湿化を防止するため、転換畑にとって最も重要な条件の1つとなっている。地下水位の目標値としては、降雨後2～3日で地表面下40～50cm、常時地下水位は地表面下50～60cm²¹⁾、これと類似した数値が提案されている²²⁾。一方、畑作物根の伸長と土壌空気量との関係より、地下水位を50cm以深とした提案²³⁾もある。しかしながら、転換畑に地下水位の目標値を設定することに問題点も認められる。第1に、地下水位と作物生育に関する試験によると、生育に好ましい地下水位が、例えばダイズの例では20cmから60cm以上と変動し一定してないことである²⁴⁾。第2に、地下水位の目標値は、通常の方法により地下水面の測定が要易な土壌、つまり、地下水位の制御が可能な土壌に対して成り立つ。しかし、今まで述べて来たように、粘土質転換畑の心土では地下水面を考へても根の生育環境にとってほとんど意味がない。第3に、地下水位の目標値はもっぱら根群の土壌水分を過剰にしないという面からとらえられており、作物の干害と関係が深い土壌中に貯留される有効水分についての考慮が払われていないことである。以上のような問題点は、特に、作土、耕盤、心土と成層化した土壌の不飽和状態の水移動が十分に考慮されていなかったこと、転換畑の根群分布の調査が不十分であることに大きな原因がある。地下水位の目標値は一義的に決定出来ないことは今までの議論で明らかであり、土壌によっては、地下水位の目標値そのものが意味を持たないこともある。今後更に検討する必要がある。

b. 排水目標

転換畑の暗渠排水量の目標値としては1日50mmが提案されている²⁵⁾。また、排水路水位については、常時排水路水位は暗渠の吐出口以下であること、降雨時の高水位は圃場面より20cm以上低いこと、最高水位でも圃場面を越えないことが1つの目標値として提案されている²²⁾。暗渠排水量の目標値には、降雨後の地表湛水をどの程度許容するかと言う問題が含まれるため、ここでは触れないことにし、排水路水位と暗渠排水量について若干の検討を行ってみる。

暗渠埋戻し部の水位が排水路水位と等しいと仮定して、地下排水に用いた(2)式を適用してみる。田面から排水路水面までの位高差を h とすると、 $h = H_1 - H_2$ で表わされる。この関係を(2)式に代入すると次式が得られる。

$$q = \frac{4k}{S^2} (2h H_1 - h^2)$$

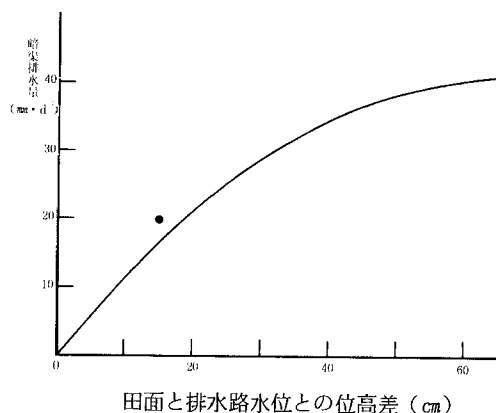


図-9 暗渠排水量と排水路水位との関係
・実測値

粘土ライシメータで得られた数値を(8)式に代入し、図示すると図-9のような2次曲線となる。排水量の増加率は、排水路水位が高いときの方が大きい。粘土ライシメータに浅く湛水し、排水路水位を土直下の15cmに設定したときの暗渠排水量は、図中に黒丸で示すように最大排水量 $40 \text{ mm} \cdot \text{d}$ の約半分であった。暗渠排水量と排水路水位の実測例は少ないが、この関係が1次直線で近似される例も多い²⁶⁾。(8)式は排水現象を単純化しているが、暗渠排水量と排水路水位との関係が2次曲線であるとすれば、降雨時の排水路水位を比較的高く設定してもかなりの排水量が見込めることになり、地区全体の排水計画にも影響を与えるであろう。

6. 今後の課題

粘土質転換畑の土壌中の水移動を関東ローム普通畑と対比させながら検討して来た。作物生育の立場から考えると、粘土の水分環境は劣悪で、ロームの水分環境は非常に良好である。したがって、多くの転換畑土壌の水分挙動はこの両者の間にほぼ入ってくると考えられる。そこで、水分移動の立場から転換畑、汎用農地の生産性、改良方向についての分類を行うことが必要であろう。また、田畑輪換を行った場合の土壌の変化、透水性の変化等の研究も今後十分に行う必要がある。そして、亀裂や弾丸暗渠等を含む不均一な土壌中の水の流れを明らかにすることが、これらの問題の把握や類型化にとって不可欠であろう。

謝 辞

本報告は、農林水産省の「転換畑を主体とする高度畑作技術の確立に関する総合的開発研究」で得られた成果をもとに若干の考察を加えたものである。また、一部には、茨城大学の佐藤泰一郎君(現東京大学)との共同研

究で得られたデータを使用した。記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 地力増進法 1984年11月
 - 2) 構造改善局編 1984年. 土地改良事業計画設計基準, 計画・土層改良. 農業土木学会. p24
 - 3) 多田敦・河野英一・駒村正治. 1979. 農業土木技術者のための土壌の知識とその応用(その4). 農土誌 47 : 359 - 366
 - 4) 川田信一郎. 1984. 稲の根. 山崎農業研究所所報 41 : 4 - 11
 - 5) 渡辺春朗. 1979. 田畑輪換に伴う土壌の変化. 土壌の物理性 39 : 18 - 29
 - 6) Passioura, J. B. 1982. The role of root system characteristics in drought resistance of crop plant. *in* Drought resistance in crops with emphasis on rice. The International Rice Research Institute Los Banos Laguna. Philippines. pp71 - 82
 - 7) Richards, L. A. and D. C. Moore. 1952 Influence of capillary conductivity and depth of wetting on moisture retention in soil. *Trans. Amer. Geophysical Union* 33 : 531 - 540
 - 8) Gardner, W. R. 1962. Approximate solution of non-steady state drainage problem. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 26 : 129 - 132
 - 9) 山崎不二夫・竹中肇・田淵俊雄・多田敦 1964 粘土質水田の暗渠排水における心土亀裂の役割. 農土研 32 : 151 - 159
 - 10) 田淵俊雄. 1966. 粘土質水田の排水に関する研究. 農土論集 18 : 7 - 11
 - 11) 根岸久雄・多田敦・古木敏也・守屋貢・渋谷勤治郎 菅原和夫・上村春美. 1972. 重粘土地帯水田の土層改良と用排水組織に関する研究(1). 農土試報 10 : 43 - 94
 - 12) Bouma, J. and J. L. Anderson. 1973. Relationships between soil structure characteristics and hydraulic conductivity. *in* Field soil water regime. SSSA Special publication Series. No 5. pp77 - 105
 - 13) 波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫. 1983. メチレンブルートレーサー法による水みちの分布状態. 土肥誌 54 : 490 - 498
 - 14) Beven, K. and P. Germann. 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.* 18 : 1311 - 1325
 - 15) 福田仁志. 1965. 排水工学. 養賢堂東京. p181
 - 16) Childs, E. C. and N. Collis - George. 1950. The permeability of porous materials. *Proc. Roy. Soc. Ser. A.* 201 : 392 - 405
 - 17) Mualen, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 2 : 513 - 522
 - 18) 高野暲. 1975. 流体力学 岩波書店東京. p195
 - 19) Doering, E. J. 1965. Soil-water diffusivity by the one-step method. *Soil Science* 99 : 322 - 326
 - 20) Gardner, W. R. 1958. Some steady-state solution of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science* 85 : 228 - 232
 - 21) 構造改善局編. 1979. 土地改良事業計画設計基準, 計画・暗きょ排水. 農業土木学会 p13
 - 22) 根岸久雄. 1981. 水田利用再編のための転作技術2. 排水. 農業技術 36 : 529 - 538
 - 23) 大久保隆弘. 1980. 農地の汎用化と土・作物・排水. 農土誌 48 : 647 - 653
 - 24) 農林水産省大臣官房技術審議官室編. 1979. 水田利用再編のための技術資料第2編. 全国農業改良普及協会. 東京. pp22 - 25
 - 25) 農林水産省大臣官房技術審議会室編. 1977. 水田利用再編のための技術資料. 全国農業改良普及協会. 東京. p46
 - 26) 山形県農業試験場. 1984. 高水時における地下水排除機能の保持対策. 昭和59年度農業土木試験研究成績・計画概要集. 農土試. pp199 - 202
- 安富(茨城大) : 暗渠排水量と排水路水位の関係において, 排水路水位の基準面はどこにおとりになったのですか。
- 長谷川 : 排水路水位の基準面は地表面です。