J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 140, p.29 ～ 34 (2018)

古典を読む

粘土質水田の排水と暗渠に関する先駆的な 2 つの論文

長谷川周一 [1]

Reviewing classical studies in soil physics

Two pioneer studies on surface and subsurface drainage of clayey paddy fields

Shuichi HASEGAWA[1]

1. はじめに

農業基本法が 1961 年に制定され，農業生産性の向上に水田農業の機械化が必要とされた．水を張り代掻きをして軟らかくした田んぼの中を収穫機が走行するためには，排水を強化し，田面を乾燥させて地耐力を高める技術が必要とされた．暗渠はこの排水強化の一つとして導入されており，畑の暗渠とは目的が全く異なる．そこで，1960 年代に行われた 2 つの先駆的な研究に着目した．1 つは，田淵俊雄著「粘土質水田の排水に関する研究（1）粘土質水田の排水に関する問題点と仮説」である．この論文には 7 つの続報がある．これらの研究は水田の排水であり，暗渠を直接対象としていないが，排水に関して貴重な成果を出している．一方，2 番目は根岸久雄ら著「重粘土地帯水田の土層改良と用排水組織に関する研究（I）総括編」である．本論文では水田の排水機構に加え，“組み合わせ暗渠” 技術を発表している．この研究にも 3 報の続報がある．ここでは，前者の（1）と後者の（I）の論文を主体に紹介し，続報で明らかにされたことも取り上げる．

現在では水田に広く普及し，水田のみならず転換畑の農地の土壌水分を制御する手段として用いられている暗渠が，半世紀前に導入されるにあたり科学的に明らかにされた点に注目しながら 2 つの論文を紹介していく．なお，水田農業の機械化が始められた頃と現在とでは水田，コメを取り巻く状況は大きく異なるので Table 1 に簡単にまとめた．

2. 粘土質水田の排水に関する研究（1）

2.1 研究の端緒

著者は，「ごく一般的には，大型機械を導入するためには水田の地耐力が必要で，そのために水田の排水を良くしなければいけない．さらには大型機械を入れるために区画を大きくすると，排水路までの地下浸透距離が長くなり排水不良になるので排水改良をしなければならないといわれている．すなわち水田の排水改良は大型機械の水田への導入にとって必要条件とされている．」と述べている．さらに，「水分のコントロールに暗渠が本当に必要なのか，排水路を効かせるためには区画はやはりある程度の大きさに留めておいた方が良いのか，とさらに突っ込まれると，自信を持った返答は出来なくなる．それは，水田における排水の実態を真に把握していないからである．」と続けている．このことから 1960 年代半ばまでは水田土中の水移動の調査研究は不十分であったことが分かる．

続報の（2）～（6）までは（1）と同じ号に，（7）と（8）は農土論集 25 号（1968）に掲載されている．また，機械化と密接に関係する水田の地耐力と排水に関する研究も同時期に行われている（多田ら, 1967）．

2.2 従来の水田排水とそれに対する疑問

水田の排水には，土性によって排水路や暗渠の深さと間隔を変化させる地下排水が耕地内排水の奥の手として考えられているが，著者はこの考えに間違えはないのであろうかと疑問を投げかけ，以下の 5 項目に注目している．第 1 は，粘土の透水係数は 10^{-5} cm s^{-1} 以下であり，排水路や暗渠への動水勾配が小さいことから，土中の水移動は期待できないこと．一方では透水性の改良 ～ 亀裂の重視 ～ が指摘されていること．この点に関しては，山崎ら（1963, 1964）の「粘土質水田や重粘土地の暗渠

Table 1　水田の機械化が始まった頃と現在の稲作状況の違い．
Rice production and consumption in 1970 and 2012.（農水省）

		1970 年	2012 年
水稲作付面積	（万 ha）	284	158
10 a 当たり労働時間	（hr）	110	25
玄米平年収量	（t ha^{-1}）	4.3	5.3
1 人当たりの消費量	（kg）	95	56

[1]Professor Emeritus Hokkaido University, Kita 9 Nishi 9, Sapporo, 060-8589 Japan. Corresponding author: 長谷川周一，北海道大学名誉教授.
2018 年 7 月 3 日受稿　2018 年 8 月 24 日受理

排水における心土亀裂の役割」の研究成果が元になっていると考えられる．第 2 は，排水路や暗渠内の水位を低下させようとも粘土は水で飽和されたままであり，土の乾燥は蒸発散を考えなくてはならないこと．第 3 は，地表残留水（地表残水）を残さないように地表排水を重視すること．第 4 は，気候，特に無降雨期間の頻度と排水の関係を考えておくこと．そして第 5 は，機械化のための，田面を乾かし地耐力を確保するという排水は，従来の豪雨時の排水，適正浸透量の維持，裏作期の排水とは異なるということである．

2.3 粘土質水田の排水仮説とその検証

以上の疑問点を踏まえて著者は粘土質水田の排水仮説を提案している．その要旨は，粘土質の水田では亀裂以外の地肌（現在よく使われているマトリックスを意味する）の部分は水を通さないと仮定する．その結果，地下浸透に関しては，中干し期の排水は亀裂がないので地下浸透はゼロ．収穫期の落水は，中干し期に出来た田面の亀裂の有無により大きく変わる．そして裏作期間では，暗渠や下層亀裂があれば，表層亀裂から地下への浸透が行われるという仮説である．以上でこの論文は終わっているが，続く（2）から（7）報で調査結果に基づき仮説を検証している．

そこで，仮説の検証結果を簡単に紹介しておく．調査を行ったのは，太平洋側（大浜）と日本海側（長岡，柏崎）の粘土質水田である．

第 2 報では大浜町の大区画無暗渠水田において，中干し期の田面状態を湛水域，水たまり域，水なし域および亀裂域に分けてほぼ毎日スケッチしている．Fig. 1 は移植栽培水田における中干し期の田面状態の変化を示す．区画は，30 m × 110 m[注 1)] と大きい．この調査研究からは，浸透能の試験から地下浸透はない，亀裂の発達は微地形の影響を受ける，地表残水の消失日数は長いことなどを明らかにしており，地表排水の重要性を指摘している．第 3 報の大浜町の収穫期の調査からは，中干し期にできた地表面の亀裂は再湛水により消失したが，地中には残存していること．そのため，湛水の落水は亀裂土（表層の亀裂）を通して行われるという仮説は成り立たなかった．しかし，表層 5 cm より深い地中に残存している亀裂は，落水期に作土に発生する亀裂と連続し，再び機能することを図示している．地表面の凹凸は排水に大きな影響を与えた．さらに，代掻きをした土が中干し期に乾燥収縮した影響（圧密による沈下圧縮）は再湛水しても戻らないことを指摘している．

第 4 報の大浜町大区画無暗渠田の収穫期以降の排水においては，亀裂が入るほどに乾燥した水田の降雨排水では，表層の土は透水性を有しているが，地下浸透はゼロ．田面に亀裂があるので，水位差があれば横流れが生じることを確認している．

第 5 報は日本海側の長岡市の 10 m × 40 m の暗渠のある水田の中干し期および収穫期の落水状態を調査している．中干し期は毎日のように雨があり，亀裂は発達しなかった．そして暗渠が地表残留水の排除に果たす役割は大きくなかった．一方，収穫期には亀裂が認められ，幅 15 mm 程度の亀裂に水性塗料を注入すると，5 ～ 15 cm の有機物層を横流れして暗渠溝に流れた．亀裂が入るほどに乾かなくとも，田面の沈下圧縮を生じさせる中干しの効果は収穫期にも有効で，田面の沈下が 10 ～ 20 mm あるということは乾燥日数にして 2 ～ 4 日短縮され

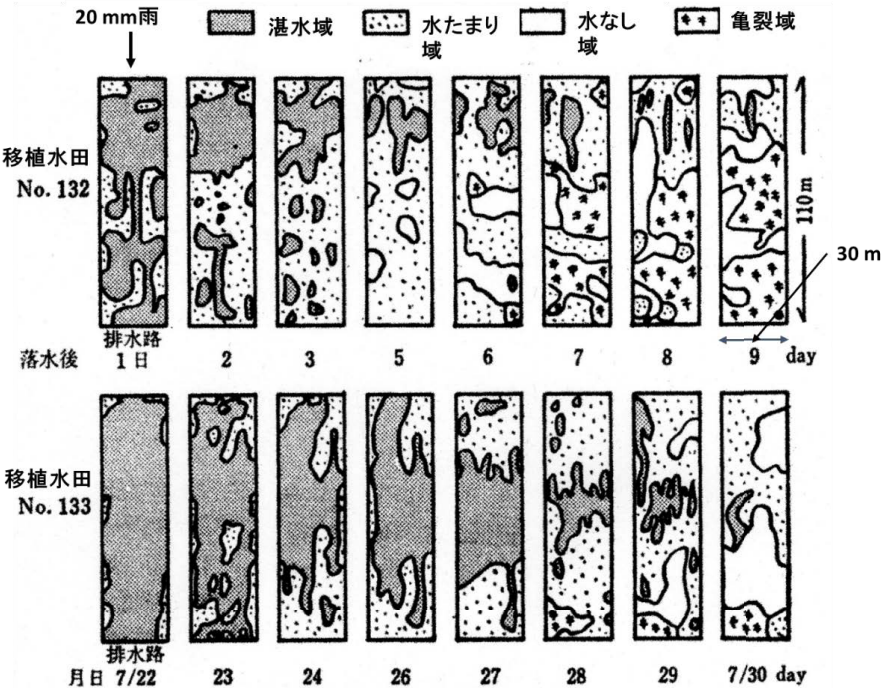


Fig. 1 中干し期の田面状態変化．田淵（1966）の Fig. 5 を一部改変．
Changes of paddy surface conditions of paddy fields at mid-summer drainage.

るという結果となった．第 6 報では収穫期以降の非灌漑期の長岡市の水田を対象とした調査である．乾燥によってもたらされる表層の透水化が暗渠に至る水みちを形成した．Fig. 2 は白色ビニール塗料の浸入結果である．また，暗渠管埋め戻し部の透水性を大きくしておくことや地表流出を増大させること（均平精度）の必要性も指摘している．第 7 報では長岡市と柏崎市における暗渠の排水効果を調査した．暗渠が効果を発揮するには，代掻き作土層が一度乾燥して亀裂が生じる必要がある．そのためには，収穫期には 1 ヶ月以上の落水期間が必要であり，かつ降雨日数が多くないこと，均平が良いことを挙げている．また，暗渠は湛水を排除するのに効果があるのであって，土壌水分の除去を直接行うものではないと指摘している．そして最後に，水田地耐力に影響を及ぼす要因には暗渠，落水，均平，降雨の 4 つがあり，それらの組み合わせで地耐力が決まること．0 ～ 15 cm 層の最大地耐力 1.0 ～ 1.2 kg cm^{-2}（0.1 ～ 0.12 MPa）以下の場合を耕起不能状態と判定すると結論づけている．最後の第 8 報では水田の乾燥と気象の年次変動について考察している．

以上が第 1 の論文の概要である．調査対象の水田は暗渠が必ずしも入っていないので，暗渠のみに着目した調査ではなく，いかに地耐力を確保するかが研究の主体であった．なかでも，中干しによる田面沈下の効果が収穫期にも認められるという発見は特筆すべきことだろう．また，暗渠がある場合には，亀裂が発達し，それが暗渠溝に連続したときにはじめて機能すること，暗渠は土壌水を脱水させる効果がないという重要な指摘も行っている．

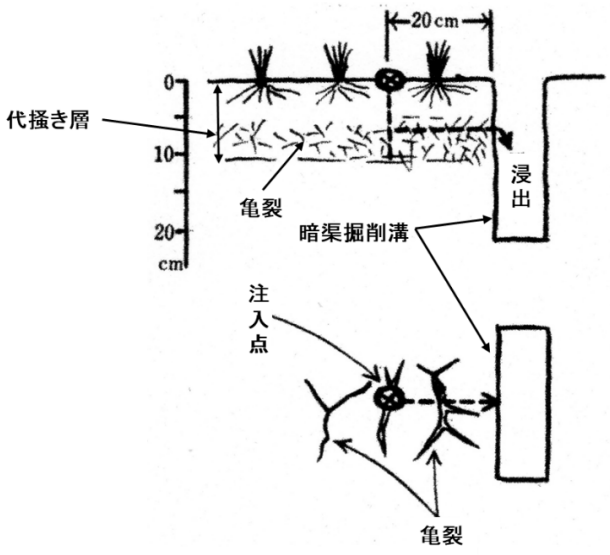


Fig. 2　塗料浸入（非灌漑期 12 月）．田淵ら（1966）の Fig. 8 に一部加筆．
Entry of paint into soil at December.

3. 重粘土地帯水田の土層改良と用排水組織に関する研究（I）

3.1 研究の背景

農林省は水田農業の機械化に向けて複数の特別研究（プロジェクト研究）を実施しており，「重粘土地帯水田の土層改良と用排水組織に関する研究」もその一つであり，1968 年から 1970 年にかけて実施された．田淵の研究が水田の排水に影響を与える要因の解明であり，暗渠機能は研究の直接の対象となっていないのに対し，この特別研究は，重粘土では浸透水は亀裂等の連続した粗孔隙を流れることの解明に加えて，水田の土層改良の目標まで考察した技術的な研究でもある．暗渠の第一の目的は田淵と同様に，地耐力の確保であるが，本研究では多毛作や水田転換畑まで対象を広げて暗渠の役割を論じている．田淵の研究と本研究に直接的な関連はないが，前者で得られた知見は活用されているはずである．

本研究の緒言は以下の文章で始まっている．「我が国の沖積平野や干拓地，一部の洪積台地などに分布する重粘土地帯の水田は，土層の透水性が悪いため排水不良となり，また，湿潤状態での地耐力も弱いため，大型機械の走行や適正な水管理が難しく，田畑輪換などは一層困難な場合が多く，土地利用を制約し，生産性の向上の障害となっている．」さらに，研究成果を次のように端的にまとめている．「この研究によって，攪乱均質化された土壌の透水係数は，一般に小さく，浸透は主として土壌中の大きな連続した間隙によること．したがって水田での降下浸透の大小は，土壌粒度の細粗，密度の粗密だけでなく，この水みち的間隙の多寡によること．乾燥による土壌の変化，植物の蒸散による土層の乾燥効果等水みち的間隙の生成と保存，いわゆる土壌構造の発達など粘質土壌の透水性改良に関連する多くの事実と，その相互関係を明らかにした．」ここで，攪乱均質化されたとは，耕起・代掻き作業を受けた水田を示すと考えてよい．

本研究は重粘土水田土壌の物理的な特性から暗渠排水による土層改良法，排水組織の維持管理と基礎的研究から応用技術までを対象としているが，ここでは，土壌物理研究を主として取り上げた．続報の（II）～（IV）も同じく農業土木試験場（農土試）報告 10 号に掲載されている．

3.2 重粘土水田の物理性の特徴

ここでは重粘土水田を透水係数が 3×10^{-5} ～ 5×10^{-5} cm s^{-1} 以下と定義づけており，土性は HC とは限らない．また，重粘土として低平な沖積地に分布する密度の小さい重粘土（蒲原平野の潟東，頚城平野の高田）と地形的に高位にあり生成が古くて密度の大きな重粘土（福島県の安積地区）の 2 種の水田を調査研究の対象としている．対象とした水田は 10 ～ 20 a が主で，より小さな水田もある．本研究で示す水田の透水係数とは，ダルシー式から得られる透水係数ではなく，田んぼの水甲を開放

したときの暗渠流出量を田んぼの面積で除した流束を示す．したがって，亀裂に加え心土破砕や弾丸暗渠により人為的に作られた粗孔隙，暗渠疎水材の水移動も含むことになる．オーガーホール法や変水位法で得られたダルシー式に基づく透水係数は 10^{-6} cm s^{-1} 以下が半数を超えている．

重粘土水田で重視されるのは蒸発散の利用と田面排水（地表残水の排除を示すと思われる）の強化であり，下層土の亀裂の発達とその安定性は pF1.5 ～ 2.0 の乾燥状態が続くことを必要とする．また，代掻きにより作土の亀裂が失われても，安積や潟東では下層土の亀裂は残っていることを指摘している．しかし，さらに排水を強化するには弾丸暗渠や心土破砕のような人工的な水みちを造成する必要がある．

3.3 重粘土水田の改良目標

機械走行性（支持力）と圃場排水（土壌乾燥）の両面から検討している．支持力については走行する機械の種類や作業によっても異なるが，収穫をコンバインで行うときにはコーン支持力は作土では 0.15 MPa 以上，耕盤では 0.25 MPa 以上必要としている．そして，収穫期の排水条件として，湛水排除を 2 日，湛水消失後 2 日目の地下水位を 40 cm としている．さらに，水稲移植栽培条件下の重粘土水田の排水に関する目標値を Table 2 のようにまとめている．ここで，重粘土水田における浸透は暗渠施工部分や亀裂等の粗孔隙を通して行われることから，土壌の透水係数は暗渠排水量等から算定される値である．10^{-5}cm s^{-1} は日単位に直せば，おおよそ 10 mm d^{-1} である．著者らは，降下浸透速度は中干し期までは稲の生理からは 0 であってもよいといわれるが，重粘土水田では降下浸透がある方が有利であるとして適正浸透量を与えている．この点については，稲収量と浸透量の議論が当時行われていたことが反映されている．しかし，適正浸透があるといわれた当時の稲収量は現在よりも約 1 t ha^{-1} 少なく，食味よりも量が重視されたことを考えれば，重粘土水田に必要とされる降下（適正）浸透量についての検討は残されていると判断される．湛水期の減水深と降下浸透量の差は蒸発散量である．収穫期に必要とされる排水目標値は 25 ～ 50 mm d^{-1} の値であり，この値が現在の暗渠排水量の目標値の元になったと考えられる．また，本表で不思議なのは，降雨後 2 日目および 7 日目の地下水位（pF 値）が出ていることである．この点に関しては論文中に詳細に触れられていない．本研究の共同執筆者である多田敦氏（筑波大学名誉教授）の私信によれば，浸透水が亀裂等の粗孔隙を流れるとしても，圃場全体として正確に捉えられないことから，水位計に現れた値から地下水位を表現するなどの方法で測定したということである．一方，(IV) 報には，地表残水が消失して暗渠排水量がほとんどゼロになり，蒸発散量が 6 mm d^{-1} のとき地下水位が 15cm 低下すると，土壌の間隙の 4% が水分を失ったことになり，pF 試験からは亀裂の発生を促すという記述がある．したがって，本研究でいう地下水位は亀裂や粗孔隙内の水位に相当していると考えられる．

Table 2 の右の欄には参考として転換畑の目標値が示されている．畑作物の根は酸素を吸収して二酸化炭素を放出するため，根が窒息しないためには，土中空気と大気とのガス交換が保障されなければならない．そのための気相率は作物によっても異なるが 15 ～ 20 % は必要とされる．しかし，重粘土水田の下層土のマトリックス部分は地下水位と無関係にほぼ飽和しているため，畑作物の伸長は認められない．一方，亀裂や粗孔隙には根が集中的に発達していることがある．しかし，畑作物の根の発達を促進するための地下水位と亀裂内水位は別物であると考えるべきである．

3.4 圃場の排水性の改良

本研究においても，排水を迅速に行って土壌表面を乾

Table 2 重粘土水田の排水に関する目標値（水稲移植栽培）．根岸ら（1972）の Table 11 を複製．
Target figures for drainage in clayey paddy fields (in the case of transplanting culture).

項目＼時期別	タン水期（移植栽培 中干し期まで）	非タン水期 湿潤期（表日本刈取り期まで 裏日本秋冬期）	非タン水期 乾期（表日本秋–春期 裏日本春期）	参考（転換畑）
減水深	10 ～ 20 mm d^{-1}	25 ～ 50 mm d^{-1}	—	—
タン水 (降雨) 消失速度	—	50 mm/2 日	60 mm/1 日	50 mm ～ 100 mm/1 日
降下浸透速度	10 ～ 15 mm d^{-1}	25 ～ 50 mm d^{-1}	50 ～ 60 mm d^{-1}	50 ～ 100 mm d^{-1}
土壌透水係数	10^{-5} cm s^{-1}	5×10^{-5} cm s^{-1}	10^{-4} cm s^{-1}	10^{-4} cm s^{-1} <
降雨後 2 日目の 20 cm 土壌水分	—	pF 0.7	pF 1.2	—
降雨後 2 日目の 地下水位	—	30 cm	40 cm	40 cm
降雨後 7 日目の 20 cm 土壌水分	—	pF 1.5	pF 1.7	—
降雨後 7 日目の 地下水位	—	50 cm	60 cm	60 cm

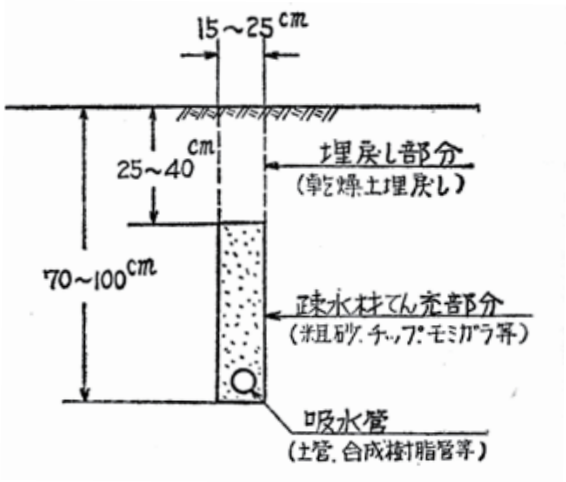


Fig. 3　本暗渠（吸水渠）の標準断面形状．根岸ら（1972）の Fig. 7 を転載．
Standard section of a pipe drain.

燥させ地耐力を上げるには，田面の均平精度を高め，排水量の大半を占める地表排水を迅速に行うことにより地表残水を少なくすることを指摘している．また，圃場の地下排水性を促進させるためには地表に乾燥亀裂を発達させ，下層の粗孔隙等と連続させる必要があると指摘している．比較的均平管理がなされた水田では地表残水は 20 ～ 30 mm 程度となる場合が多く，落水後の亀裂発生までの日数は各試験地の結果から 3 ～ 4 日程度であり，田面残水消失後比較的短時間で亀裂が発生する．この成果は圃場試験の積み重ねから出てきた知見に基づいており，水田機械化農業に大きく前進させたと考えられる．

3.5 籾殻の使用

多田氏によれば，暗渠への籾殻の使用はこの特別研究を契機に普及していった．しかし当初は，籾殻の作物への影響や耐久性に懸念があったという．そして，Fig. 3 に見るように，籾殻が暗渠埋め戻し部に厚く充填されることになった．これが現在でも使われている本暗渠（吸水渠）の原型である．そして籾殻は従来の，管内への泥の侵入を防ぐ被覆材（filter や envelope）という概念から水みちの確保，保全という疎水材（permeable fill）の役割に変わった．見方を変えると，疎水材が充填された幅の狭い明渠と見ることも出来る．コメ生産農家が廃棄物として出す籾殻を疎水材として利用するという発想は，畑暗渠には見られない水田暗渠の特徴である．

3.6 組み合わせ暗渠

重粘土水田のマトリックス透水性の低さ，単独暗渠排水による土層改良の困難性を打破するため，耐久性の長い暗渠排水組織（本暗渠）と乾燥亀裂や機械的に造成された水みちによって，地表残水および表層粗孔隙の排水の迅速化を図る目的で，浅く密に設ける耐久性を要しない補助暗渠から構成されるのが “組み合わせ暗渠”（技術普及の観点から，誰でも無料で使用できるように農土試が特許を取得）である．補助暗渠は本暗渠埋め戻し部に充填された疎水材と直交することで粗孔隙の連続性が確保され，本暗渠への迅速な排水が行われる．補助暗渠には弾丸暗渠，心土破砕等がある．さらに，弾丸暗渠などの補助暗渠は農家自身が任意の間隔で繰り返し施工できることから，“組み合わせ暗渠” は水田の排水改良工法の決定打となったといえよう．現在では西欧の排水関係の本にも弾丸暗渠と本暗渠の組み合わせは紹介されている（Smart and Herbertson, 1992）．しかし，半世紀も前に水田の地耐力を確保する目的で速やかな残水排除を “組み合わせ暗渠” で実施したことは，非常に高く評価される．

4. 終わりに

暗渠は畑地において地下水位を下げて根群域を拡大する手段としてヨーロッパで開発された．140 年近く前の 1877–1880 年に札幌農学校で農学の教鞭を執ったアメリカ人教師のブルックスの講義ノートが「ブルックス札幌農学校講義」（高井, 2004）として出版されており，畑の暗渠は 20 ページにわたって詳細に説明している．その考え方は現在でも通用する．一方，水田の暗渠の研究は 1960 年代に開始されたが，その発想は土壌表面を早期に乾燥させて農業機械が導入できるように地表面を硬くするという点であり，畑の暗渠とは発想が全く異なる．田淵は田面の乾燥に着目し，地下浸透に期待できない点を強調している．一方，根岸らは田面の乾燥化のための土層改良，すなわち地下排水の迅速化をめざし，“組み合わせ暗渠” という新しい技術を開発した．2 つの論文とも粘土質土壌の保水の特徴から，排水と地下水位は無関係であり，排水は気相率の増加に結びつかないことを指摘している．しかし，土壌物理学を学んできた人でさえ，水田暗渠に対する理解は不十分であり，水田転換畑の暗渠は，畑暗渠と同じく地下水位を低下させる手段だと理解しているのは，何とも残念なことである．

謝辞

原稿の執筆に当たり，特に農土試報告については，実際に研究を担当されていた多田敦氏から，半世紀前の研究を振り返り，本文に記述したように大変貴重な助言をいただいた．深く感謝いたします．私的なことではあるが，筆者が農土試に採用されたときの室長は多田敦氏，2 代目の室長は故根岸久雄氏であり，お二人からは多くの現場技術を教えていただいた．

注 1）：当時の水田は 10 a が多く，30 a の水田を大区画水田と称していた．

引用文献

根岸久雄, 多田 敦, 古木敏也, 守谷 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 (I) 総括編. 農業土木試験場報告, 10: 43–94.

Smart, P. and Herbertson, J.G. (Eds.) (1992): Drainage design, pp. 73–82. Blackie and Son Ltd., Glasgow.

多田 敦, 安富六郎, 堤 聡, 田淵俊雄 (1967): 粘土質水田の地耐力に関する研究 (II) — 地耐力と地表排水の関係 —. 農業土木学会論文集, 21: 29–35.

田淵俊雄 (1966): 粘土質水田の排水に関する研究 (1) 粘土質水田の排水に関する問題点と仮説. 農業土木学会論文集, 18: 7–11.

田淵俊雄, 中野政詩, 住田 章, 丸田 勇 (1966): 粘土質水田の排水に関する研究 (6) 小区画暗渠田の非カンガイ期の排水 (長岡市). 農業土木学会論文集, 18: 39–47.

高井宗宏編 (2004): ブルックス札幌農学校講義，pp. 71–91. 北海道大学図書出版会.

山崎不二夫, 八幡敏雄, 竹中 肇, 田淵俊雄 (1963): 北海道小向の重粘土地の暗キョ排水における心土キ裂の役割. 農業土木研究, 30(8): 1–8.

山崎不二夫, 竹中 肇, 田淵俊雄, 多田 敦 (1964): 粘土質の水田の暗キョ排水における心土キ裂の役割. 農業土木研究 32(3): 151–159.

要　　旨

粘土質水田の排水の研究は機械化農業の推進のために 1960 年代後半に行われた．田淵の論文は中干し期と刈り取り期の田面状況の詳細な観察に基づいて行われた．地耐力の増加に結びつく田面の乾燥は蒸発散によって行われること，浸透は粗孔隙を通して行われること，地表残水を少なくし乾燥を早めるには田面の均平が重要であること，代掻きを行った土の排水によって生じる沈下は刈り取り期の亀裂の発生を促進することなどを明らかにした．根岸らの研究でも田面の乾燥は蒸発散により生じることや浸透に寄与する粗孔隙の重要性を指摘している．そして，粗孔隙を人為的に作出し，保全することが排水改良に不可欠であるという考えを追求した結果が組み合わせ暗渠という排水技術に結びついた．

キーワード：水田，地表残水，均平，乾燥亀裂，組み合わせ暗渠