

圃場機械のけん引・走行性能向上に関する研究

亀井, 雅浩

<https://doi.org/10.11501/3151025>

出版情報：九州大学, 1998, 博士（農学）, 論文博士
バージョン：
権利関係：

第6章 細溝暗渠施工機による圃場試験と暗渠施工効果

前章において、耕盤に細溝を掘削して排水を促進する細溝暗渠排水法を提案し、モデル試験によってその排水性能を確認した。また、営農排水として実施されている振動式弾丸暗渠穿孔機に代わる作業機として耕盤まで細溝を2本掘削する中小形トラクタ直装式の細溝暗渠施工機を設計、製作した。しかし、汎用水田において耕盤の支持力を維持しながら排水性の向上を図るためには、圃場レベルで細溝暗渠排水法の排水性能を確認し、作物の生育・収量等に与える影響まで明らかにする必要がある。

本章においては、試作した細溝暗渠施工機を利用して、実際に輪換田に細溝暗渠を施工して、性能試験を行うとともに、施工後の土壌物理性の推移、細溝暗渠中の水の流れ、大豆、小麦生育中の土壌水分の推移、大豆、小麦の生育・収量等の調査を行い、細溝暗渠の排水効果を明らかにした。また、細溝暗渠を施工した圃場を水田に復元した場合の減水深に及ぼす影響、代掻き、田植え作業に及ぼす影響の調査も実施した。

6-1 細溝暗渠施工機の性能試験

6-1-1 圃場試験方法

試作した細溝暗渠施工機（2号機、第5章参照）を利用して、小麦収穫跡および水稻収穫跡の圃場でそれぞれ施工試験を実施した。試験年月は1990年2～6月である。供試圃場の土壌はいずれも多湿黒ボク土で乾燥過程のやや進行した段階にあったが、耕盤の土壌硬度が非常に高く、ベーシックインテークレートは1mm/hと悪かった。コーンペネトロメータで測定した供試圃場の土壌硬度を図6-1に示す。いずれも作土層の深さは15cm程度であったが、水稻収穫跡の圃場は、土壌表面付近の硬度がかなり高くなっていた。なお、使用した

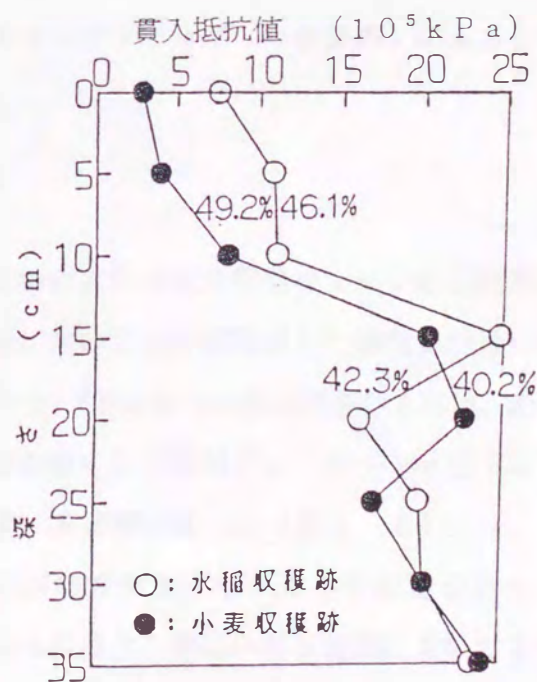


図6-1 供試圃場の土壌硬度

乗用トラクタの主な諸元は、エンジン出力 16.9kW {23PS}、機体質量 830kg、2輪駆動で、いずれもトラクタのエンジン回転数を 2500rpm に設定して施工試験を実施した。

調査項目は施工作業時の乗用トラクタの作業速度、すべり率、PTO軸トルクおよびPTO軸回転速度、掘削深、掘削幅、細溝断面調査（施工作業終了後に圃場を掘り起こして観察した）およびトラクタ座席の振動特性である。ここで、作業速度は走行距離 10m を走行する時間から算出した。すべり率は無けん引時の車輪 1 回転の走行距離と施工作業時の車輪 1 回転の走行距離から算出した。掘削チェーンの速度はPTO軸回転速度およびロータリ軸の回転速度から算出した。PTO軸トルクは、乗用トラクタのPTO軸と細溝暗渠施工機間にトルクピックアップ（TS-60S 共和電業）を挿入して、そのひずみ出力をストレインメータ（DPM-310 共和電業）を介して、データレコーダ（XR-50 TEAC）に記録し、後にパーソナルコンピュータ（PC9801VM21 NEC）にデータを入力して算出した。また、掘削体積当たりの所要エネルギーは、掘削深と掘削幅より掘削体積を算出して、トラクタPTO軸トルクおよびPTO軸回転速度から求めた所要動力より算出した。

また、トラクタ座席上の振動は、座席の下に 3 軸の加速度計（AS-20TB 共和電業）を貼付して施工作業時の上下、左右、前後方向の加速度を測定し、電圧値をストレインメータを介してデータレコーダに収録した。このデータを A/D 変換後にパーソナルコンピュータに入力して解析し、結果を XY プロッタに出力して読み取った。また、この振動加速度の周波数解析等は、同様に収録したデータを FFT アナライザ（小野測機）に入力して解析した。

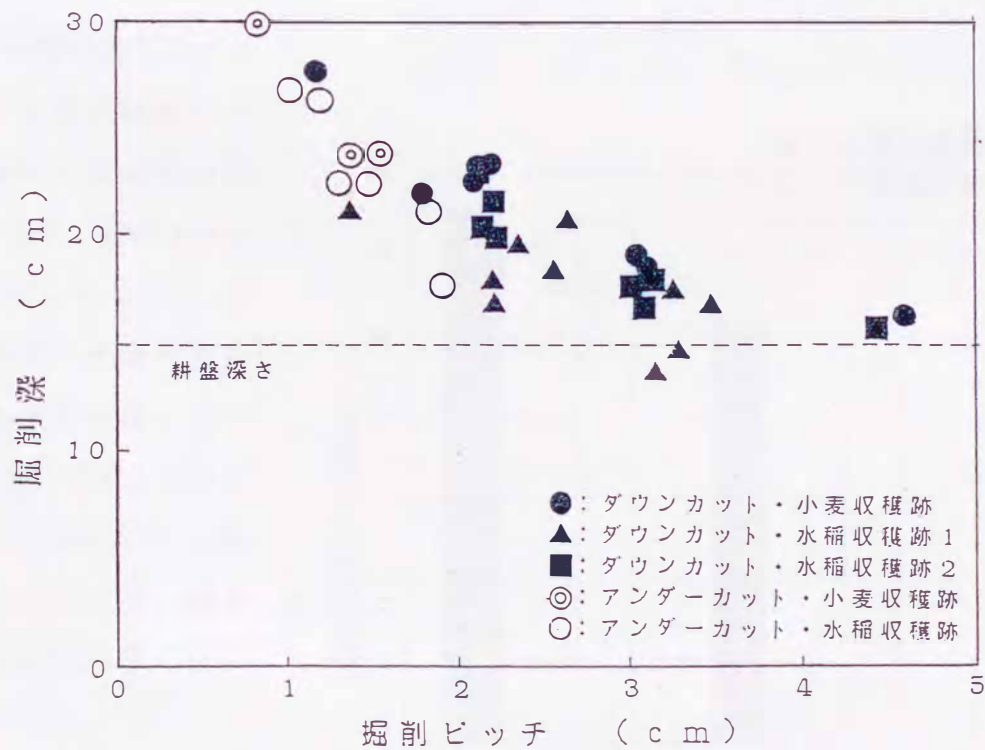
6-1-2 圃場試験結果および考察

細溝暗渠の施工状況を図 6-2 に示す。施工時の走行速度や掘削チェーンの回転速度により細溝の掘削深が変動するが、いずれの条件においてもほぼ想定した掘削深が得られた。施工時の走行速度は 0.05~0.25m/s で実施したが、25cm 以上の掘削深を得るには、走行速度を 0.12m/s 以下にするか、PTO軸回転速度を速くして掘削ピッチを 1.5cm 以下にして掘削チェーンの回転方向をアップカットで作業する必要があった（図 6-3）。

トラクタ車輪のすべり率は掘削チェーンの回転方向がダウンカットの場合は -10~5% であったが、アップカットの場合は 8~29% になり、特に小麦収穫跡においてすべり率が大きくなり、掘削作業に支障がみられる場合があった。本施工機を利用して細溝暗渠を施工する時期は、水稻収穫跡のように比較的土壌表面の硬度が高い条件が望ましい。



図 6 - 2 細溝暗渠の施工状況



注) 水稲収穫跡 2 は掘削チェーンと土壌表面の角度 $0.785\text{rad}\{45^\circ\}$, 他は $0.524\text{rad}\{30^\circ\}$

図 6 - 3 掘削ピッチと掘削深の関係 (試作 2 号機)

P T O 軸トルクはピークで約 $100\text{ N}\cdot\text{m}$ 程度で、供試した 16.9 kW {23PS} のトラクタでも作業可能であった。また、水稻収穫跡が小麦収穫跡より土壌硬度が高かったため、水稻収穫跡の P T O 軸トルクが若干大きくなる傾向がみられた (図 6-4)。また、P T O 軸回転速度が速くなるほど P T O 軸トルクが大きくなった。ただし、耕盤より深い掘削深 30 cm 以上を得るためには、細溝暗渠施工機の掘削チェーンの長さを長くするとともに、土壌の硬度にもよるがもう少し余裕を持たせ 22 kW {30PS} 級のトラクタを選択する必要があると考えられた。

また、掘削作業の所要エネルギーの水稻収穫跡と小麦収穫跡の比較結果を図 6-5 に示す。掘削体積当たりの所要エネルギーは、小麦収穫跡の作土層の土壌硬度が水稻収穫跡に比べ低く、また、土壌の密度も低かったために P T O 軸トルクが小さくなり、水稻収穫跡に比べ小さくなった。

また、作業速度が速くなるほど掘削ピッチが長くなり掘削深が浅くなった

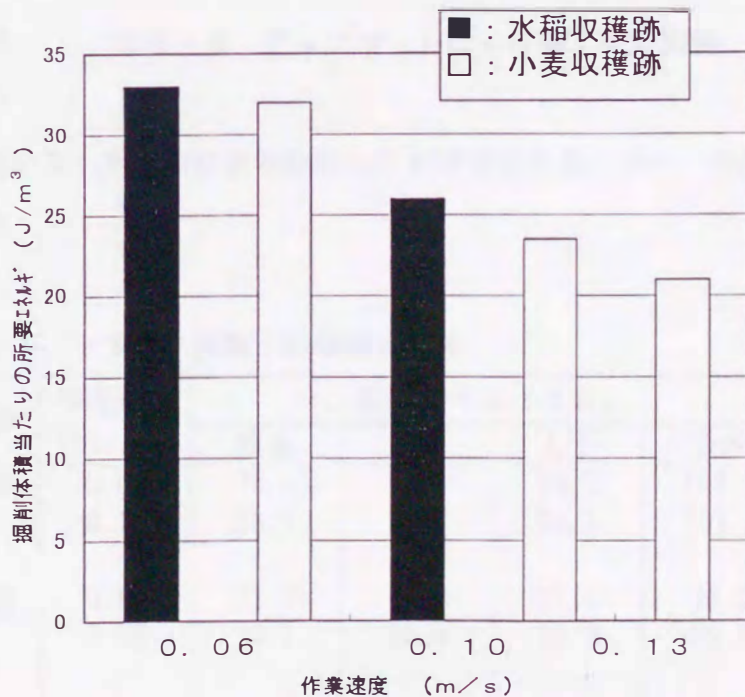
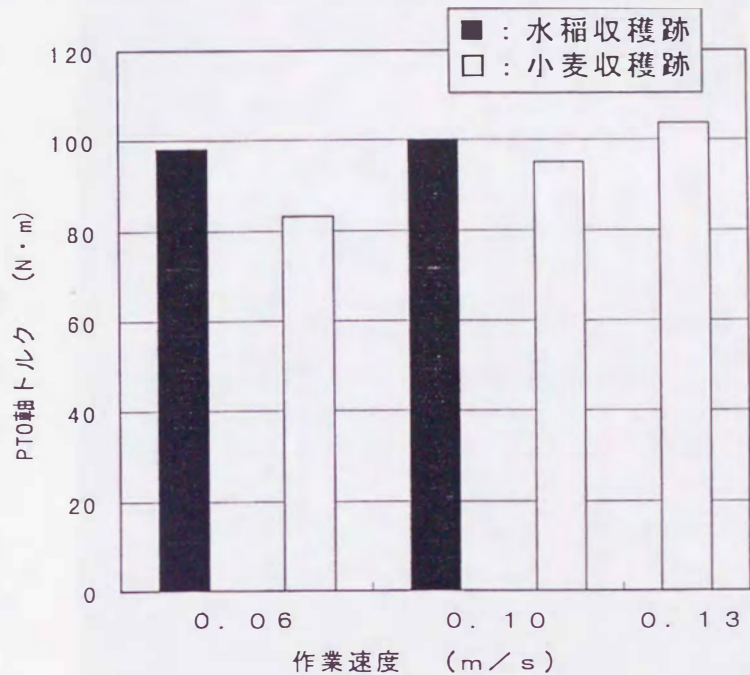


図 6-5 掘削体積当たり所要エネルギー

ため、所要エネルギーが小さくなる傾向がみられた。しかし、小麦収穫跡は作土が軟弱なため、トラクタ車輪のすべり率が大きくなり、水稻収穫跡に比べ作業能率および作業精度等は劣る傾向がみられた。このように細溝暗渠を掘削する場合は、少々所要動力が大きくなるが、水稻収穫跡のように比較的圃場面がしっかりした時期に施工することが望ましいことが明らかにされた。

掘削チェーンの回転方向をアップカットにして掘削した圃場の状況を図6-6に示す。この場合は、ダウンカットで掘削した場合と異なり、耕うん作業を行うまで細溝が残り、その



図6-6 アップカットによる施工後の圃場

間掘削土壌の乾燥が進めば、埋め戻した後の排水性能の向上が期待される。また、細溝周辺部の亀裂の生成も期待される。

表6-1 トラクタ座席下の振動レベル

作業機名	圃場の状態	作業速度 (m/s)	振動レベル (dB)			
			前後	左右	上下	合成
振動式弾丸暗渠 穿孔機	水稻収穫跡	0.08	86.4	98.8	99.0	102.5
		0.12	86.2	97.7	99.6	101.9
細溝暗渠施工機	水稻収穫跡	0.07	81.8	85.7	93.4	94.3
		0.10	83.1	91.0	95.3	96.9
細溝暗渠施工機	小麦収穫跡	0.05	81.3	88.3	93.0	95.2
		0.12	82.7	90.2	94.8	96.3

また、施工時に細溝暗渠の底に落ちた土塊の大きさを小麦収穫跡と水稲収穫跡で比較すると後者がかなり大きくなっていた。施工時の土壌含水比が水稲収穫跡のほうが高く、土塊が細かくならなかつたためと考えられる。以上、総合的に判断すると、細溝暗渠は畑地に転換する直前の水稲収穫跡に施工するのが最も効果的であると考えられた。

つぎに、トラクタ座席上の振動の軽減効果について考察する。細溝暗渠施工時のトラクタ座席の振動は、掘削チェーンの回転方向がアップカットの場合は振動式弾丸暗渠穿孔機に比べかなり軽減され（表6-1）、作業者の意見でもロータリ耕うん作業とほとんど変わらないということであった。

しかし、ダウンカットの場合は施工機が若干上下動し、トラクタ座席の振動も大きくなった。しかし、試作1号機に比べると大きく改善され、いずれの場合も無負荷時を少し上回る程度であった。また、水稲収穫跡、小麦収穫跡の圃場状態の違いは座席振動の差にはみられなかつた。

掘削された細溝内の土塊の分布をみると、水稲収穫跡が直径2 cm以上の土塊の重量比が大きくなっており、耕盤層の透水性向上の点では水稲収穫跡のほうが有利であると考えられた（図6-7）。前述した作業能率の面からも、施工作业は水稲収穫跡のある程度乾燥した時期に行うのが望ましい。

細溝暗渠の施工法の一例としては、図6-8のような方法が考えられる。掘削作業は水田に復元した時の代掻き、田植え作業を考慮してなるべく圃場の短辺方向に行う。また、

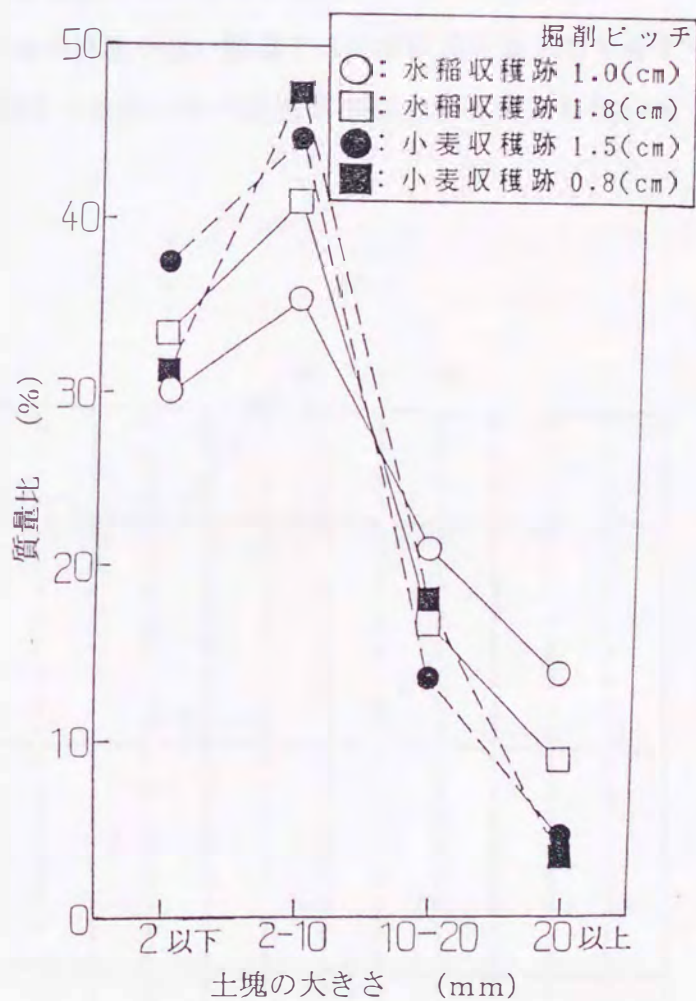


図6-7 細溝暗渠中の土塊分布

排水効果があがりにくい圃場では本暗渠に直行して施工するとよい。さらに、本暗渠が短辺方向に施工されている場合は対角線に沿って施工する方法も考えられる。細溝暗渠はあくまでも補助暗渠であるので原則として本暗渠と組み合わせて施工することが望ましいが、下層の排水性がよい圃場では単独で施工しても効果が期待できる。また、耕盤の大部分を残しながら根群域を拡大する部分耕起としての利用も期待できる。

なお、作業上の留意点として、2本の掘削チェーンを同時に回転させているので、走行中は直進する必要がある。枕地での回行に細溝暗渠施工機を持ち上げる場合は、静止してからもしくは直進しながら行わなければならない。また、細い掘削チェーンを採用していることから下層にレキが多い圃場では使用しないほうが望ましい。

さらに、最も重要な点として、耕盤の硬度が低い圃場では細溝暗渠を施工してもすぐにつぶれやすく排水効果がほとんど期待できないので細溝暗渠排水法を採用しないほうがよい。

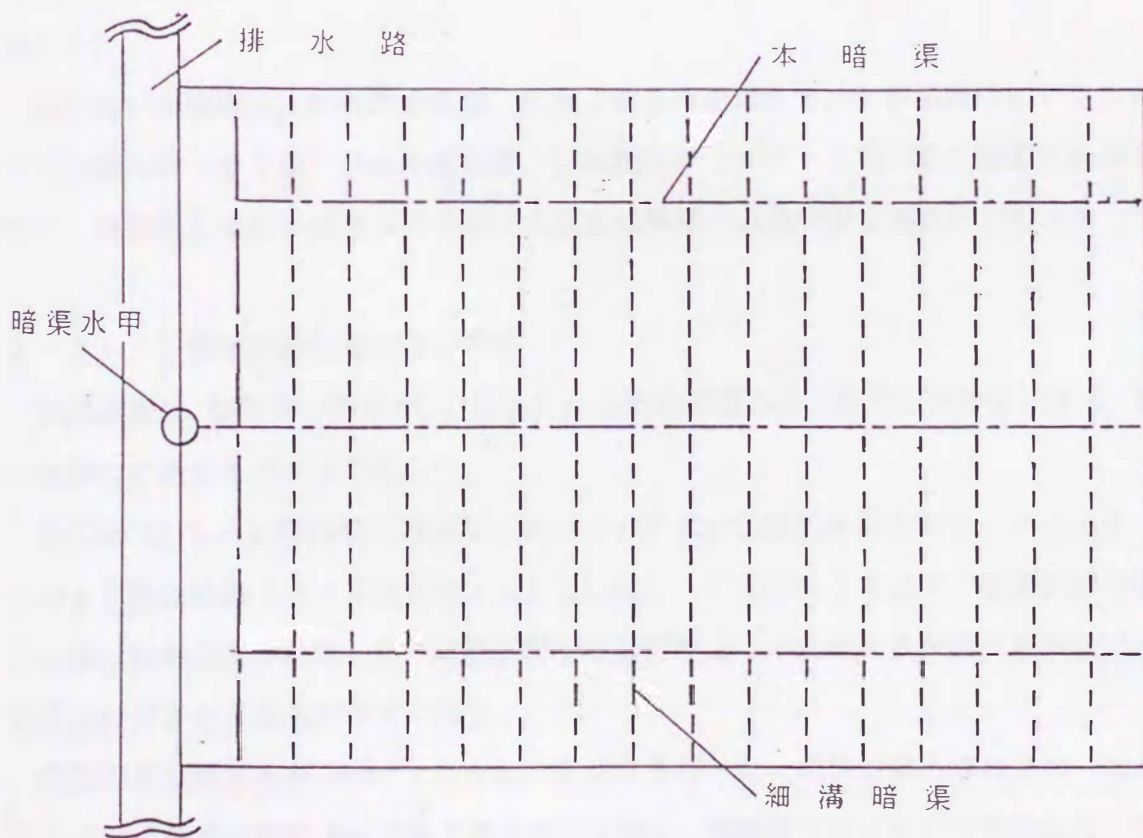


図6-8 細溝暗渠の施工例

6-2 弾丸暗渠による予備圃場試験

6-2-1 圃場試験方法

重粘土壌の物理性を改善して作付体系における作物の総合生産力の向上を図る方策として、深耕による耕盤管理、営農排水法、有機物および土壌改良資材の投入による土壌富化、畑作物の導入と栽培管理法の改善による輪作技術等が考えられる。

主に大豆、小麦を対象に灰色低地土壌での物理性、特に土壌水分、土壌硬度の変動による生育特性の解明と多湿条件での栽培管理法を検討して、新たに細溝暗渠排水法を導入することによる作物の多収穫技術の開発に資することを目的に、本節では弾丸暗渠排水法を導入した場合の効果を予備調査する。

供試圃場は九州農業試験場筑後水田（沖積／黒ボク）で、試験月日は1987年7月～11月である。本暗渠を20m間隔に施工した14aの圃場に弾丸暗渠（深さ35cm、間隔2m）を施工した後、大豆（フクユタカ）を7月10日に播種した。畦幅は140cmで4条（30×21cm、1粒播き）で、基肥Nは3kg/10aである。また、対照区として無暗渠区を8a設定した。

施工時に土壌硬度、飽和透水係数、土壌3相分布を測定し、生育期間中にテンシオメータで土壌水分（pF値）の経時変化を、土壌硬度計（SR-II型）で土壌硬度を測定した。特に、降雨発生後の土壌水分の推移と大豆の成熟期の収量調査を重点的に行った。

6-2-2 圃場試験結果および考察

供試圃場は、細粒質であるが、立地条件から乾燥過程のやや進行した段階にあり、水稻・小麦跡での透水性は中位であった。

開花後20日目の降雨発生時以降におけるpF水分曲線の変動を図6-9に示す。耕盤上のpF値は降雨2～3日後には1～1.5に達し、7日間は2.5以下の適湿状態を保ったが以後は乾燥程度が増大した。試験区間では測定地点での差があるが弾丸暗渠区で土壌の乾燥が促進される傾向が認められた。

収量調査は両区とも15m²×2カ所の坪刈りを行った。倒伏は認められなかったが無暗渠区では主茎長が抑制されて最下着莢高さが低く、暗渠施工区より分枝数が少ない等生育が劣った。したがって着莢数が少なく粒数がかなり減少したため、補償的な百粒重の増加があったが5%の減収となった（表6-2）。以上の結果から、無暗渠条件では過湿気味

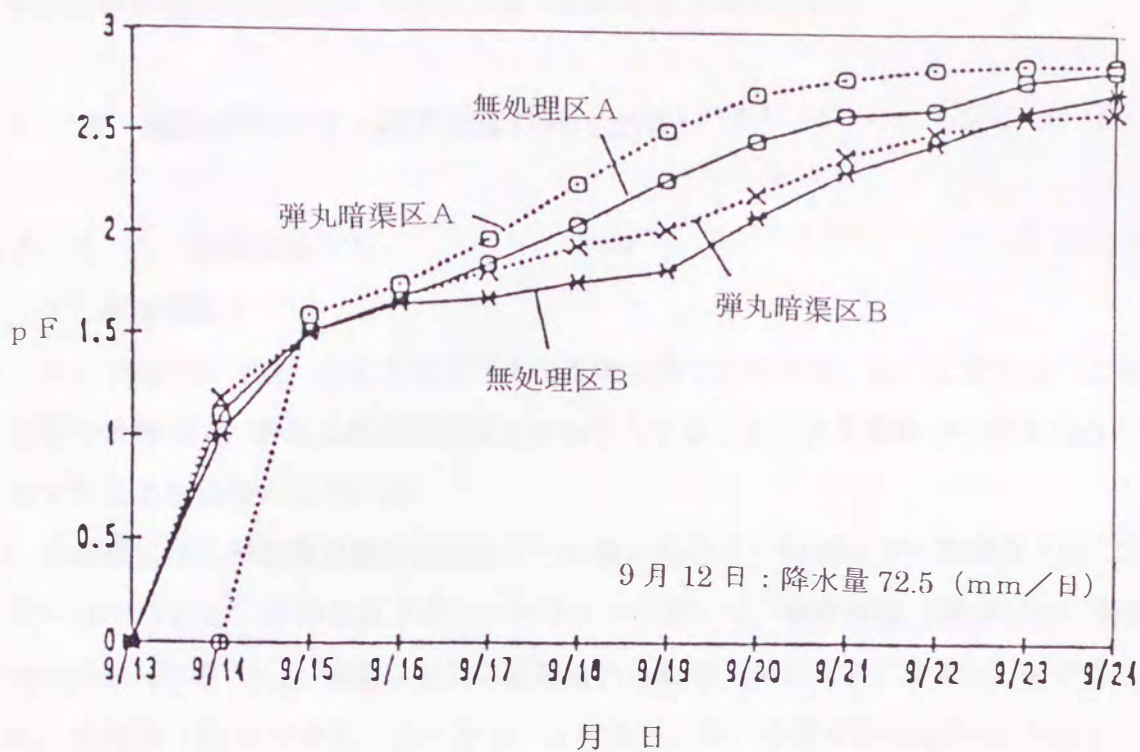


図6-9 pF曲線

表6-2 暗渠の有無と大豆の生育・収量の比較

試験区	主茎長 (cm)	主茎節数(節)	分枝数 (本/株)	稔実莢数 (個/株)	精粒数 (粒/m ²)	全重 (kg/a)	百粒重 (g)	子実重 (kg/a)
弾丸暗渠	56.2	16.3	7.1	93	964	54.9	30.2	29.1
無処理	54.4	16.0	6.4	88	877	51.3	31.6	27.7

の影響が通気性の劣化をとめない大豆の生育収量に悪影響を与えたものと考えられる。

重粘土壌の暗渠施工下では無暗渠よりも排水性が顕著に現れ、特に多雨年には大豆の増収効果が大きく、乾燥時には干害による減収も指摘されている。1987年の大豆作では播種後8月末までと10月中旬から収穫時まで異常多雨に経過し、また9月下旬から10月中旬までは無降雨が連続したため、全般に出芽、苗立ちと初期生育が悪く、登熟期間の粒の肥大も抑制されて収量水準が抑制された。しかし、暗渠施工区では生育期における降雨後の土壌の過湿状態が無暗渠区より緩和された形になり、開花期までの生育量の確保が登熟形質の増大にかなり反映する等乾物生産に好影響を与え300kg/10a近くの収量が得られた。登熟期間の過乾燥は葉の萎凋と体内窒素濃度の減少で収量を著しく減少させるため灌水は必須技術であり、特に遅蒔きでは有効であることが明らかにされているが、本試験でも

灌水技術の導入を図ればより多収が得られたものと考えられる。

6-3 細溝暗渠の排水機能および施工効果^{58) 59) 60)}

6-3-1 圃場試験方法

1) 圃場試験 1

ここでは主に大豆、小麦を対象に灰色低地土壌での物理性、特に土壌水分、土壌硬度の変動を検討して、新たに細溝暗渠排水法を導入することによる輪換田の排水性能の向上に資することを目的としている。

供試圃場は九州農業試験場筑後水田（沖積／黒ボク）の22aで、試験月日は1988年6月～11月である。前作物は小麦（シロガネコムギ）で、細溝暗渠（深さ30cm、間隔1m）、弾丸暗渠（深さ35cm、間隔2m）の処理を行った後、大豆（フクユタカ）を7月に播種した。畦幅は140cmで4条（30×21cm、1粒播き）で、基肥Nは3kg/10aである。なお、

参考区として、この試験の前年に弾丸暗渠を施工した場所に直交に細溝暗渠を施工した区を設けた。試験区の設定を図6-10に示す。

なお、暗渠施工時の土壌含水比は作土46.2%、耕盤41.9%、仮比重は作土0.9、耕盤1.1、耕盤の3相分布は固相率39.7%、液相率

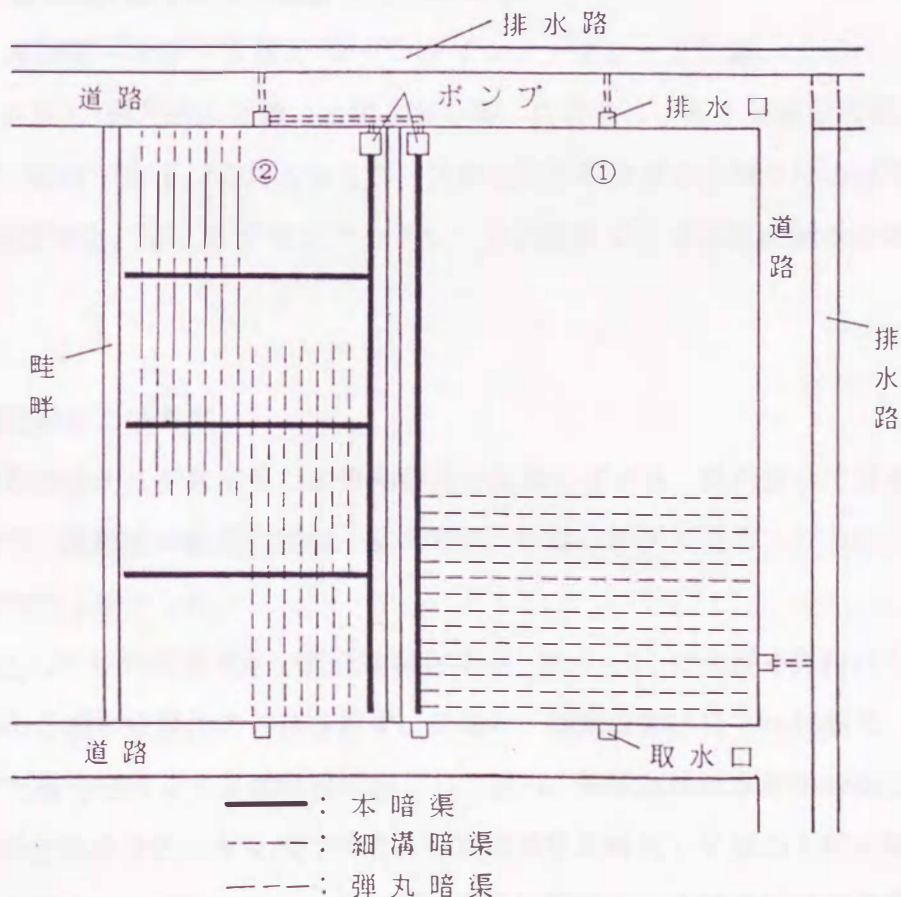


図6-10 試験区の設定

45.1%, 気相率 15.3%であった。

調査項目は、大豆生育期間中の土壌水分（テンシオメータ、pF値）、土壌硬度（SR-II型）、土壌3相分布および飽和透水係数（100ccコア）、白塗料による土層断面調査および大豆の成熟期の生育・収量である。また、大豆収穫後、小麦（シロガネコムギ）を作付けし、同様に生育期間中の土壌水分、土壌硬度、飽和透水係数、小麦の成熟期の生育・収量調査を実施した。

2) 圃場試験2

供試圃場は九州農業試験場筑後水田（沖積／黒ボク）の28aで、試験月日は1989年6月～11月である。小麦（シロガネコムギ）収穫後の1989年6月に細溝暗渠（深さ30cm、間隔1m）を施工した後、7月に大豆（フクユタカ）を畦幅140cmで4条（30×21cm、1粒播き）で播種し、無処理区と比較検討した。なお、基肥Nは3kg/10aである。供試圃場は、前年まで水稲、小麦の連作田である。また、前年に細溝暗渠を施工した圃場（22a）については土壌の飽和透水係数等の調査を継続して実施した。

主な調査項目は、土壌硬度（SR-II型）、シリンダイントークレート試験、土壌水分（テンシオメータ、pF値）、飽和透水係数、土壌3相分布、白塗料による土層断面調査、小麦および大豆の生育・収量である。これらのうち、大豆の生育期間中に土壌水分の経時変化（pF値）、土壌硬度測定、シリンダイントークレート試験および土層断面調査を実施した。

6-3-2 圃場試験結果および考察

細溝暗渠の排水効果を総合的に判断するため弾丸暗渠と比較しながら、降雨後の土壌水分変化、土壌硬度の推移、飽和透水係数の推移、細溝暗渠や耕盤の断面調査および大豆、小麦の生育・収量等について検討した。

まず、細溝暗渠を施工した年の圃場の水分変化を検討する。図6-11に大豆を作付けした圃場における耕盤上の土壌水分変化の一例を示す。ここで、細溝暗渠区は1m間隔で、弾丸暗渠区は2m間隔で補助暗渠を大豆播種前に施工しており、無処理区は本暗渠のみである。降雨後の耕盤上の土壌水分変化を比較すると、弾丸暗渠区が最もpF値の上昇が速く、続いて細溝暗渠区となり、いずれの場合も無処理区に比べ耕盤上の土壌の乾燥が促進された。調査期間中に降雨量が多い日が数度あったが、いずれも同様の傾向がみられた。

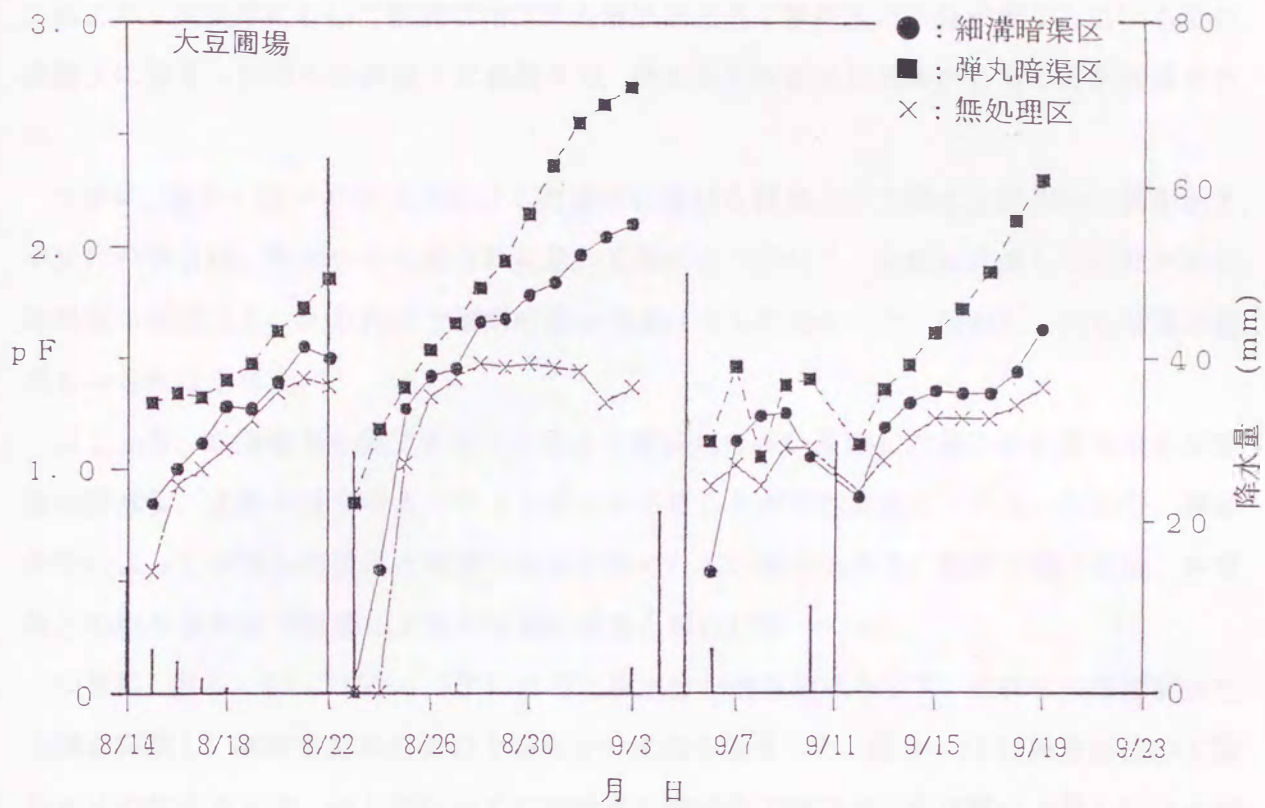


図 6-11 大豆作の土壤水分変化 (作土と耕盤の境界)

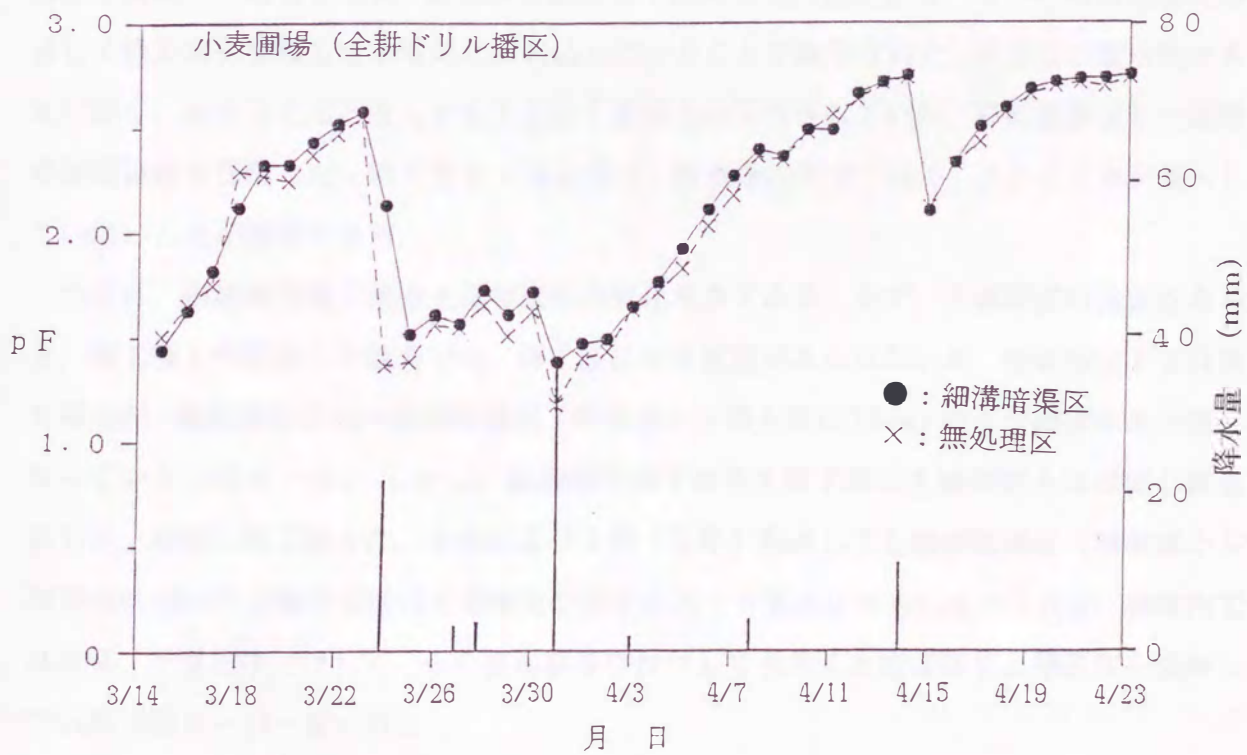


図 6-12 小麦作の土壤水分変化 (作土と耕盤の境界)

これより、大豆作において細溝暗渠は弾丸暗渠ほど速く耕盤上の水分が減少しないものの、耕盤上に留まった雨水を耕盤下に移動させ、排水性を改善する効果があることが確認された。

つぎに、図6-12に小麦を作付けした圃場における耕盤上の土壌水分変化の一例を示す。小麦作の場合は、冬期から春期の降雨量が夏期に比べ少なく、全般に乾燥していたために処理間の差はなく、大豆作ほど細溝暗渠の効果はみられなかった。同様に、弾丸暗渠の効果もみられなかった。

以上より、細溝暗渠を施工することにより降雨量の多い夏期には速やかに表面水を本暗渠に排水し、土壌水分を程よくコントロールすることが可能と考えられる。しかし、圃場条件によっては弾丸暗渠ほど顕著に効果がみられない場合もあり、細溝暗渠の間隔、本暗渠との組み合わせ方法等に工夫が必要になると思われる。

つぎに、図6-13に100ccコアによる土壌水分の調査地点を示す。それぞれ降雨前後に土壌を採取し、細溝暗渠周辺部の土壌水分の変化を調査した。図6-14に降雨前後の土壌含水比の変化を示す。作土層はいずれの地点も降雨後土壌含水比が同様に上昇しているが、耕盤層は細溝暗渠部のみ土壌含水比が急上昇している。この結果から、雨水は作土層を通過して耕盤上に滞留した後、横方向に移動して細溝暗渠に流れ込み、さらに細溝底部に滞留して横方向に移動して本暗渠に流れ込んでいることが確認された。耕盤層の透水性が非常に悪く、水はほとんど浸入することなく支持力は保持されていた。降雨後調査した細溝暗渠周辺部を掘削した一例を図6-15に示す。耕盤層は非常に硬く、ほとんど水が浸入していないことが確認できる。

つぎに、細溝暗渠施工後の土壌物理性の変化をみってみる。まず、土壌硬度の推移をみると、施工後1作経過した場合では、作土層には有意差がみられないが、耕盤層以下では弾丸暗渠区、無処理区に比べ細溝暗渠区（暗渠部から横方向に50cm）の土壌硬度が若干高くなっていた（図6-16）。しかし、細溝暗渠部では作土層下部の土壌硬度とほぼ同じ値を示した。同様に施工後2作、3作および4作（2年）経過しても細溝暗渠区（暗渠部から横方向に50cm）と無処理区は土壌硬度が非常に高く有意差はみられなかったが、細溝内では大豆、小麦と作付けして、その後水稻を作付けしても作土とほぼ同じ土壌硬度を保持していた（図6-17～6-19）。

また、大豆作付け期間中にも土壌硬度を継続して測定したが、同様の傾向がみられ、細溝内では膨軟な状態を保っていた。さらに、土壌の3相分布の測定結果からも同様に細溝

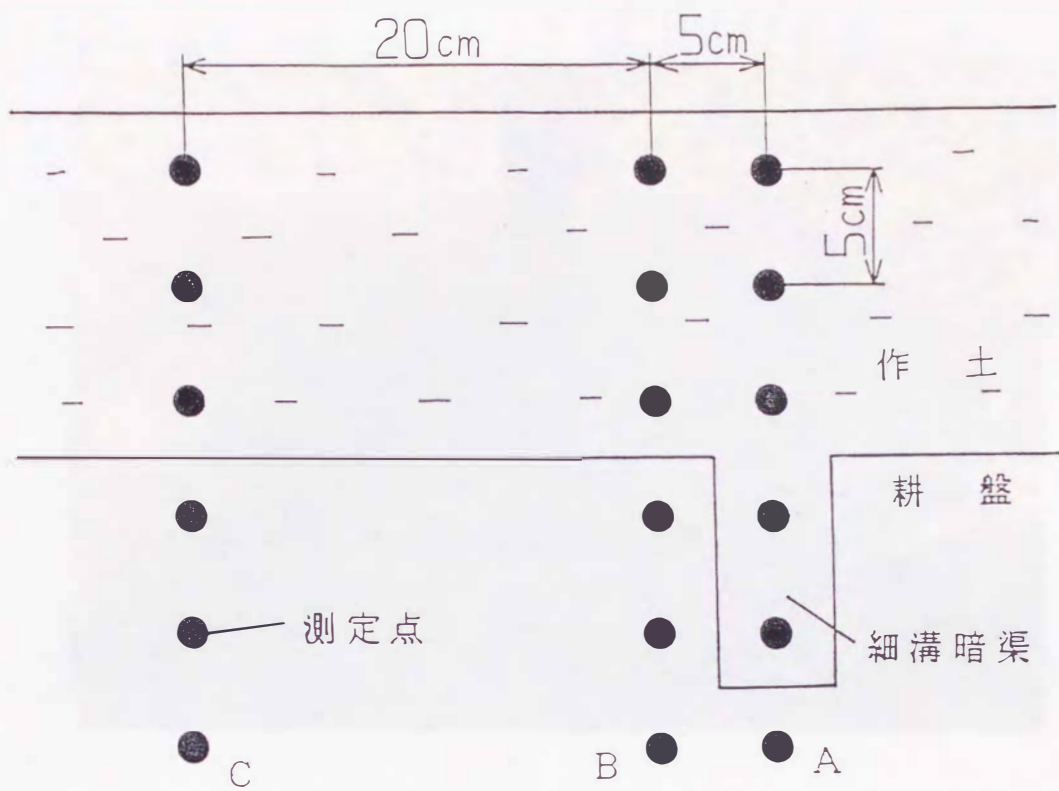


図6-13 土壌含水比測定地点

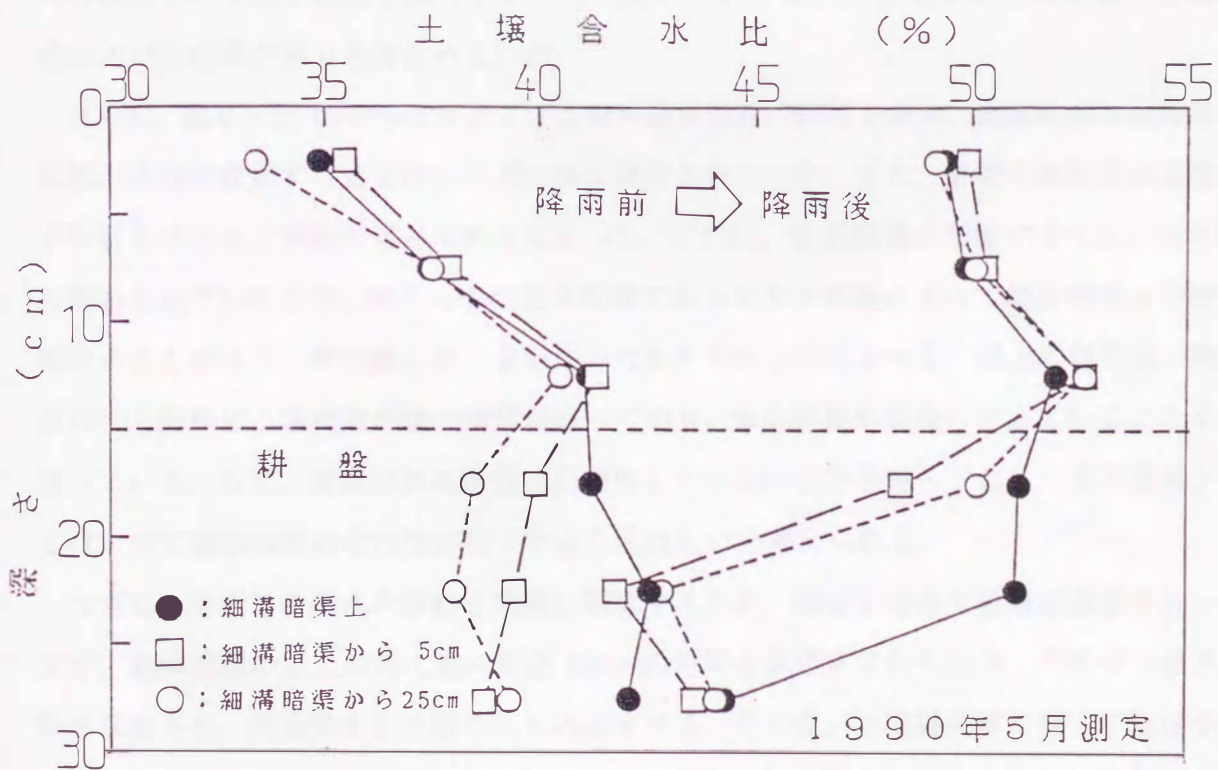


図6-14 降雨前後の土壌含水比の変化



図 6 - 15 細溝暗渠の断面図

内は作土とほぼ同じ状態を保持していた（表 6 - 3）。また，細溝部以外の耕盤は土壤硬度および固相率が高く維持されていた。

さらに，図 6 - 20 に 100cc コアによる飽和透水係数の推移を示す。細溝暗渠の飽和透水係数は水田に復元するまで作土に近い値に保持されていた。また，耕盤の飽和透水係数はどの区もほとんど無処理区と変わらなかった。これは，供試圃場の耕盤がすでにかなり締め固められていたため，耕うんや代掻き作業でもトラクタ車輪によって細溝暗渠まで締め固めることがなく，作土層と同じ状態が保たれたものと考えられる。以上の結果は，細溝は作土と同様に土壤構造が疎の状態になっており，水の移動が容易になっていることを物語っている。また，細溝以外の耕盤は処理をしていない状態を保っており，支持基盤としては十分で圃場機械の走行性が低下することはないと考えられる。

つぎに，降雨後の雨水の移動を実際に確認するため，細溝暗渠の土層断面調査を行った。まず，細溝暗渠の直上の作土層に直径 50cm の円筒を耕盤まで打ち込み，その中に白色塗料を湛水させ，完全に水を土壤中にしみ込ませる。その後，土壤層を縦に掘って断面を形成して，観察により水の流れを確認した。その結果，細溝暗渠を施工した直後は作土から流れ込んだ水は耕盤上から細溝に流れ込み，細溝の底部に溜まって横方向に移動していた

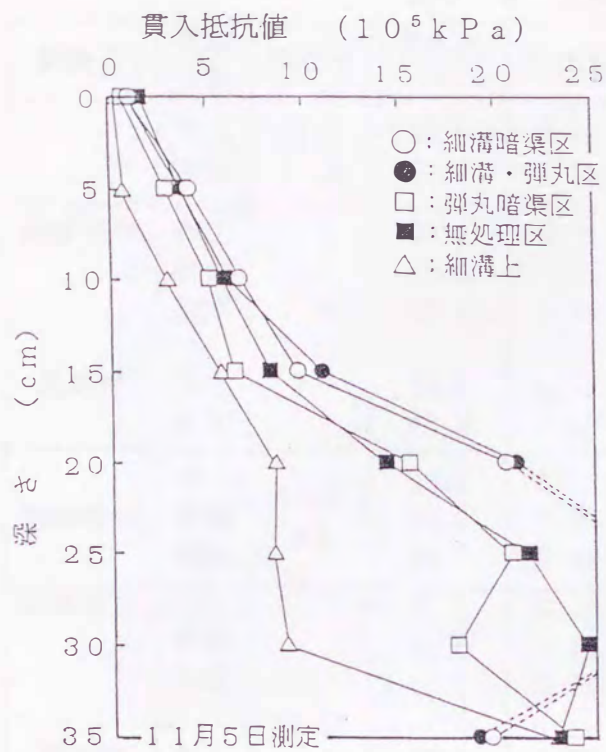


図6-16 土壤硬度(1作後)

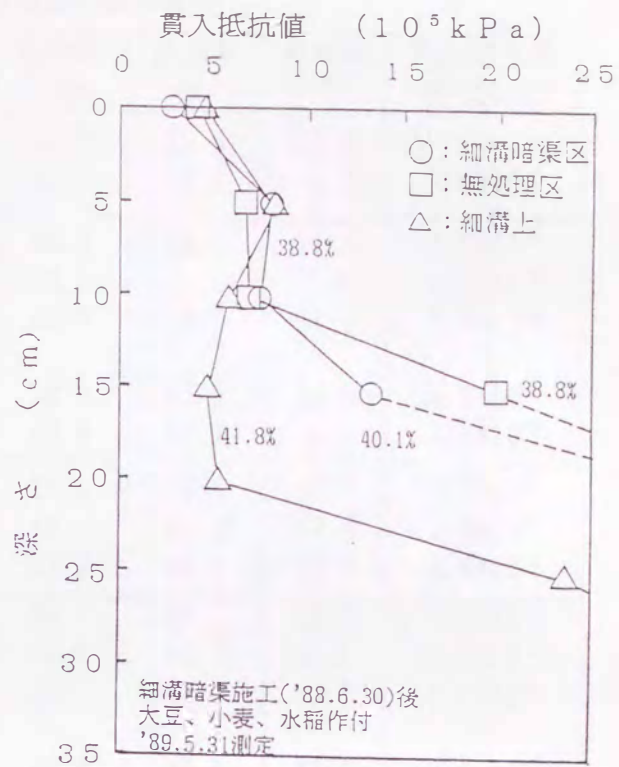


図6-17 土壤硬度(2作後)

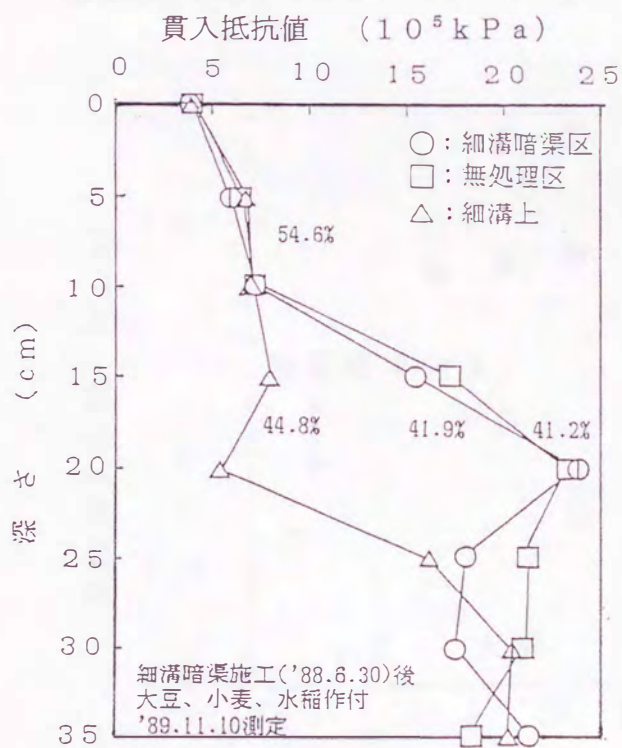


図6-18 土壤硬度(3作後)

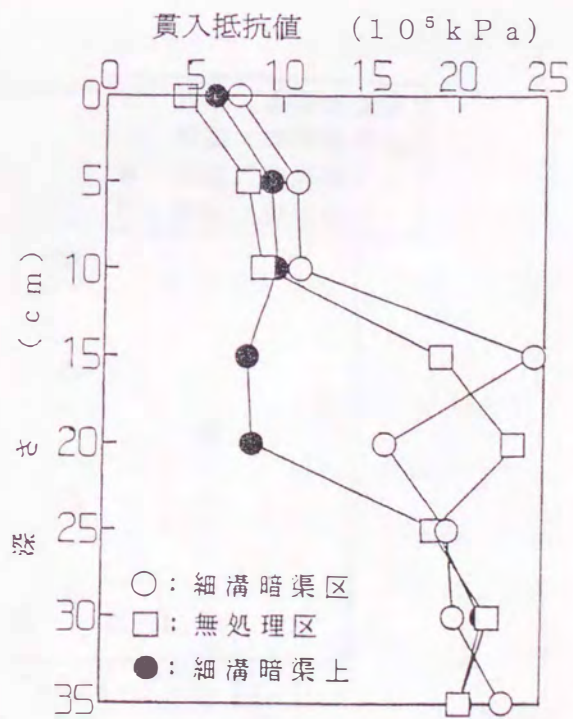


図6-19 土壤硬度(4作後)

表 6 - 3 土壤物理性の経時変化

試験区	採取位置	採取日	含水比 (%)	仮比重	固相率 (%)	液相率 (%)	気相率 (%)	飽和透水係数 (cm/s)
	作土 耕盤	1988	38.5	0.88	34.2	33.9	31.9	—
		11.8	38.7	1.15	44.7	44.6	10.7	1.8×10^{-5}
細溝暗渠	作土 耕盤 細溝	1989 5.31	40.1	0.95	34.9	38.0	27.1	8.7×10^{-3}
			40.2	1.18	43.5	47.6	9.8	8.8×10^{-6}
			44.4	0.88	32.3	39.0	28.7	3.6×10^{-3}
無処理	作土 耕盤		39.7	0.89	32.8	35.3	31.9	8.7×10^{-3}
			40.3	1.19	43.9	48.1	8.0	5.8×10^{-6}
細溝暗渠	作土 耕盤 細溝	1989 9.4	52.2	0.76	26.6	39.7	33.7	5.2×10^{-2}
			52.0	0.99	36.1	51.4	12.6	2.0×10^{-4}
			48.1	0.92	33.5	44.1	22.4	4.6×10^{-3}
細溝暗渠	作土 耕盤 細溝	1989 11.10	51.3	0.72	24.6	36.7	38.7	5.6×10^{-2}
			42.8	1.15	41.7	49.1	9.2	4.2×10^{-3}
			47.5	0.91	33.2	43.3	23.5	5.4×10^{-3}
無処理	作土 耕盤		48.4	0.75	26.4	36.1	37.5	5.6×10^{-2}
			42.9	1.12	41.3	48.2	10.5	2.9×10^{-5}

注) 作土 : 深さ 5 ~ 10cm, 耕盤 : 深さ 15 ~ 20cm, 細溝 : 深さ 15 ~ 20cm

細溝暗渠の施工年月日 : 1988 年 11 月 10 日, 冬作は小麦, 夏作は大豆を作付け

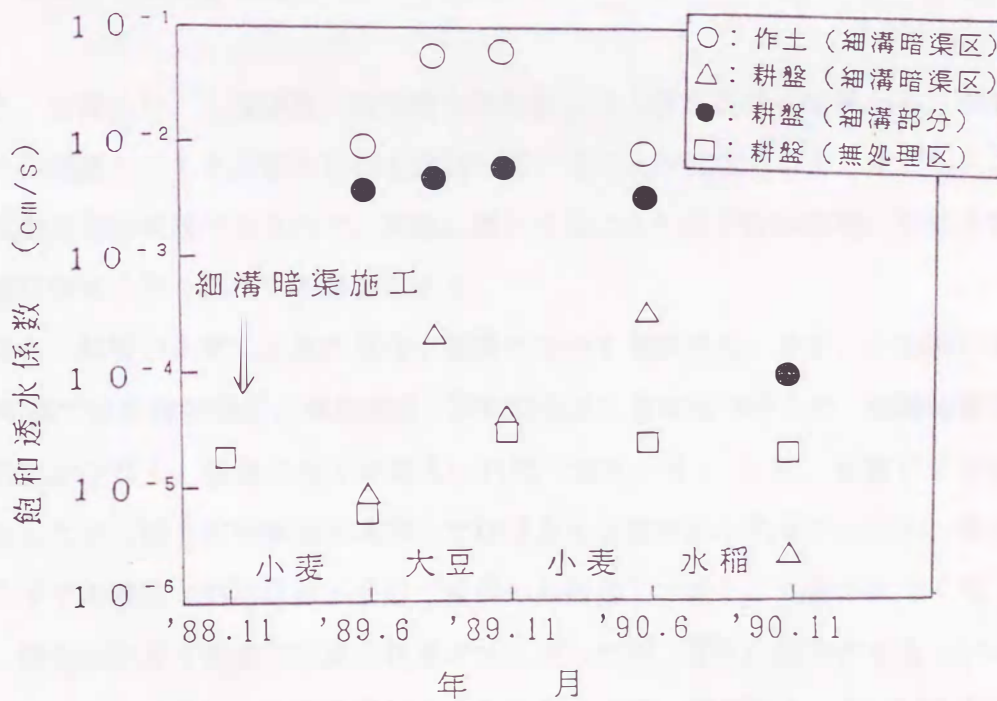


図 6 - 20 飽和透水係数の推移

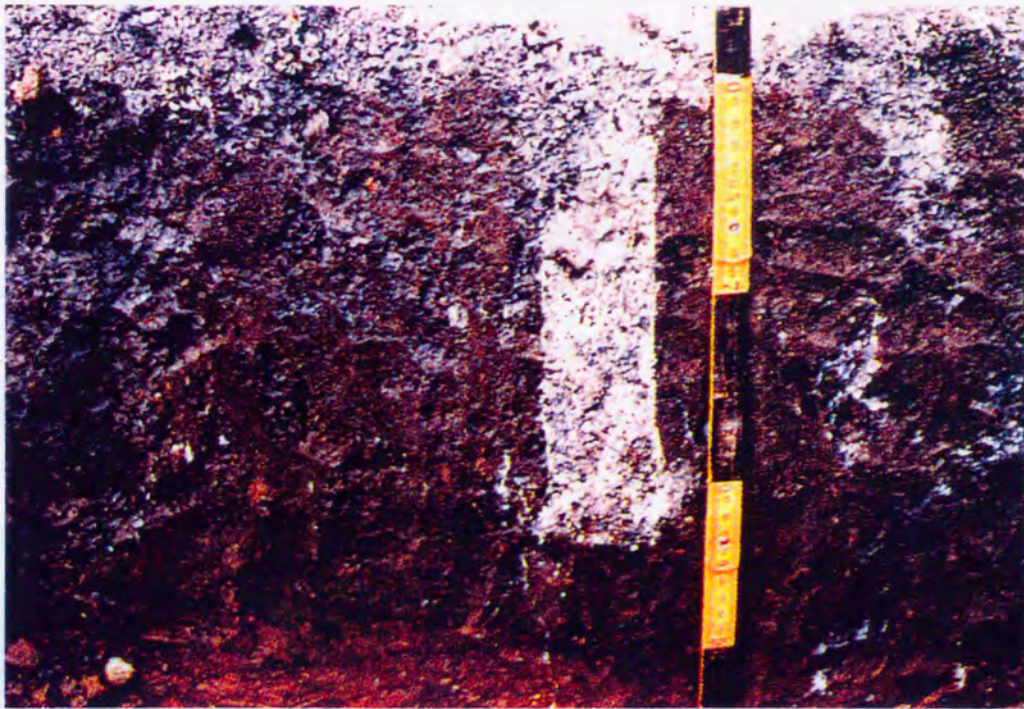


図 6 - 21 細溝暗渠の水の流れ

(図 6 - 21). また, 細溝暗渠施工後 1 作 (大豆), 2 作 (小麦), 3 作 (水稻) 経過後に同様に土層断面調査を実施したが, 3 作経過後もその機能を維持していることが確認された.

以上, 土壌水分, 土壌硬度, 飽和透水係数および土層断面調査結果から, 細溝暗渠は施工後 4 作経過してもその排水性能を維持していることが確認された. ただし, この結果は本供試圃場での成果であるので, 実際に導入するにはそれぞれの圃場の特性を把握してから最適な排水方法を採用する必要がある.

最後に, 作物の生育・収量に及ぼす影響について考察する. まず, 小麦の生育・収量は, 1989 年産では細溝暗渠区と無処理区, 弾丸暗渠区に有意差がみられ, 細溝暗渠区が子実の枯れ熟れが少なく, 収量の低下が抑えられた (表 6 - 4). また, 全耕ドリル播区 (一度耕うんしてから耕うん同時施肥播種) ではほとんど差がみられなかったが, 全面全層播区や有心ドリル播区 (播種床は不耕起で畝間のみ耕起) ではその効果が大きくなった. 試験年は, 降雨量が多く全般に小麦の収量が低くなったが, 春先に排水がうまくいった細溝暗渠区で減収が抑えられたと考えられる. しかし, 全般に豊作であった 1990 年産では処理による有意差はみられなかった (表 6 - 5). 小麦の場合, 生育期間中の降水量が少なく

排水がほとんど必要なければ、細溝暗渠の施工効果を明らかにすることは難しいと考えられる。ただ、九州地域の場合は一般に小麦収穫前の3～6月にかけて降水量が多いので、補助暗渠の必要性が認められる。

つぎに、大豆の成熟期の諸形質と収量は、1988年産ではいずれの区も主茎長が75cm前後と長くなり、収量は350kg/10a前後とかなり増収となったが、処理間での有意差はみられなかった(表6-6)。

また、1989年産においても細溝暗渠区では百粒重がやや大きくなったものの倒伏がみられ、収量は300kg/10a程度で同様にその効果は確認されなかった(表6-7)。大豆の場合はいずれの年も出芽、苗立ちの時期に大雨にあうことがなく、補助暗渠を入れた効果はみられなかったが、細溝暗渠内へ大豆の根が進入しており、毎年細溝暗渠を入れることによる部分深耕として大豆の根群域拡大の効果は期待される。また、九州地域は梅雨の期間に大雨に会うことが多いので、小麦と同様に補助暗渠を施工することによる排水性の向上が期待される。

以上、作物の生育・収量に与える影響は、小麦においては若干減収が抑制されることが確認されたが、大豆では有意差がみられず、今回の圃場試験では細溝暗渠施工による優位

表6-4 小麦の生育・収量(1989)

圃場 No.	試験区	成熟期	稈長 (cm)	穂長 (cm)	有効穂数 (本/m ²)	全重 (kg/10a)	子実重 (kg/10a)
1	細溝暗渠	5/25	77.7	9.0	381.2	1052.7	404.7
	細溝・弾丸	5/24	72.7	8.9	349.7	1045.0	325.7
	弾丸暗渠	5/23	68.3	8.3	289.6	820.7	245.0
	無処理	5/24	68.8	8.6	298.8	776.3	299.3
2	細溝暗渠						
	ドリル播	5/25	71.7	8.5	351.3	808.3	302.7
	全面散播	5/24	72.8	8.8	366.9	853.5	313.5
	有心広幅播	5/25	79.8	8.4	479.5	1113.0	446.0
	無処理						
	ドリル播	5/23	69.3	8.4	315.2	765.3	303.0
全面散播	5/23	62.5	7.9	286.4	543.0	174.5	
有心広幅播	5/23	71.5	8.1	369.0	793.5	294.5	

注) 品種: シロガネコムギ, 播種日: 11月21~22日, 調査2m²×5点

圃場1: 転作2年目, 1区面積5a, 圃場2: 稲麦連作田, 1区面積4a

性は確認できなかった。試験年次を長くして、長期間細溝暗渠を施工した場合の作物の生育・収量に及ぼす影響を調査する等、検討の余地が残された。

表 6 - 5 小麦の生育・収量 (1990)

試験区	成熟期	稈長 (cm)	穂長 (cm)	有効穂数 (本/m ²)	千粒重 (g)	全重 (kg/10a)	子実重 (kg/10a)
細溝暗渠	5/23	91.5	9.3	436.3	29.3	1369	531.1
無処理	5/23	92.0	9.1	428.7	29.7	1392	557.2

注) 品種: ニシカゼコムギ, 全耕ドリル播, 調査 2 m² × 5 点

表 6 - 6 大豆の生育・収量 (1988)

試験区	成熟期	主茎長 (cm)	最下着莢 高(cm)	主茎節数 (節/株)	稔実莢数 (個/株)	百粒重 (g)	子実重 (kg/10a)
細溝暗渠	10/31	76.2	10.9	15.0	60.2	30.3	349.1
細溝・弾丸	10/31	78.3	10.9	15.5	61.0	31.1	355.4
弾丸暗渠	10/31	76.8	10.7	15.0	59.2	31.5	345.3
無処理	10/31	74.3	10.9	14.7	58.8	31.1	343.5

注) 品種: フクユタカ, 開花日: 8月20日, 転作2年目, 調査 1.3 m² × 5 点

細溝・弾丸区の細溝暗渠は細溝暗渠区と同時に施工, 弾丸暗渠は8ヶ月前に施工

表 6 - 7 大豆の生育・収量 (1989)

試験区	成熟期	主茎長 (cm)	最下着莢 高(cm)	主茎節数 (節/株)	稔実莢数 (個/株)	百粒重 (g)	子実重 (kg/10a)
細溝暗渠(横)	11/6	72.7	10.9	15.0	57.3	30.3	297.2
細溝暗渠(縦)	11/6	70.0	10.3	14.8	73.1	39.6	327.7
無処理	11/6	71.8	10.6	14.2	53.9	39.2	293.7

注) 品種: フクユタカ, 転作3年目, 調査 1.3 m² × 5 点

6 - 4 水田復元の影響

6 - 4 - 1 圃場試験方法

細溝暗渠を施工した圃場を水田に復元した場合, 水稻生育中の日減水深および水稻の生育・収量へ与える影響, 代掻き, 田植え作業に与える影響を確認するために調査を行った。

供試圃場は6-3節で施工試験を実施した圃場で、2年間大豆および小麦を作付けして水稲に復元した圃場と3年間大豆および小麦を作付けして水稲に復元し2年目になる圃場である。いずれの圃場も本暗渠が20m間隔で敷設されており、水田に復元する前年の大豆作付け前に細溝暗渠を1m間隔で施工している。なお、対照区として水稲、小麦の連作田の減水深を調査した。

それぞれ、水稲生育期間中の中干し前と中干し後に分けて日減水深の推移を毎日調査した。また、水稲の成熟期の生育・収量調査も実施した。さらに、それぞれの圃場における代掻きや田植え作業中に乗用トラクタおよび田植え機の車輪が細溝暗渠に入り込まないか観察により確認した。

6-4-2 圃場試験結果および考察

細溝暗渠を施工して1年が経過した圃場を水田に復元した圃場の日減水深は、中干し前8~33mm(平均18mm)、中干し後50~90mm(平均79mm)であった。無処理区の日減水深は10~30mm(平均18mm)、中干し後35~110mm(平均57mm)で、いずれも中干し後減水深が大きくなる傾向がみられた(図6-22)。特に、細溝暗渠区が顕著であったので、中干しを軽くする必要性がみられた。

また、1年目の調査で細溝暗渠を施工した復元田では通常より代掻きを丁寧に行う必要性が認められたので、2年目の試験では通常の2倍の代掻きを実施した。細溝暗渠を施工して1年が経過した圃場を水田に復元した圃場の日減水深は中干し前8~20mm(平均13mm)、中干し後21~35mm(平均26mm)であった。水田に復元して2年目の日減水深はそれぞれ、9~21mm(平均13mm)、12~30mm(平均21mm)であった(図6-23, 6-24)。それぞれ無処理区とほぼ同じ日減水深となり、いずれも中干し後若干大きくなる傾向がみられるが、代掻きを通常より丁寧に行うことにより影響をほとんどなくすることが可能であった。

また、作業面では復元田におけるトラクタによる代掻き、乗用田植え機による田植え作業ともに無処理区と同様に通常どおり作業しても支障はなかった。ただし、細溝暗渠を施工して次の年に水田に復元する場合は、田植え機を細溝暗渠と平行に走行させると車輪が細溝に落ち込むことが考えられるので細溝暗渠の施工方向には注意を要する。

また、水稲の生育・収量に与える影響をみたのが表6-8および表6-9である。精玄米重は細溝暗渠を施工した区が若干多くなったが有意差はみられず、水稲の収量に関して

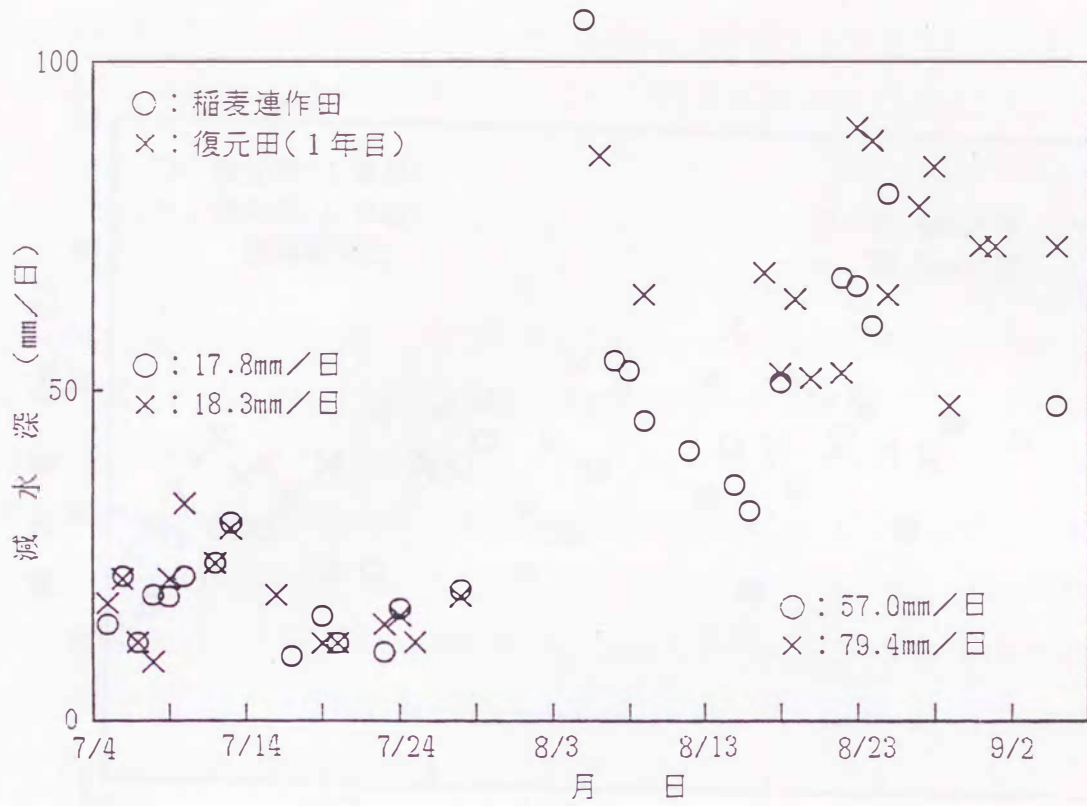


図 6-21 日減水深の変化 (1988)

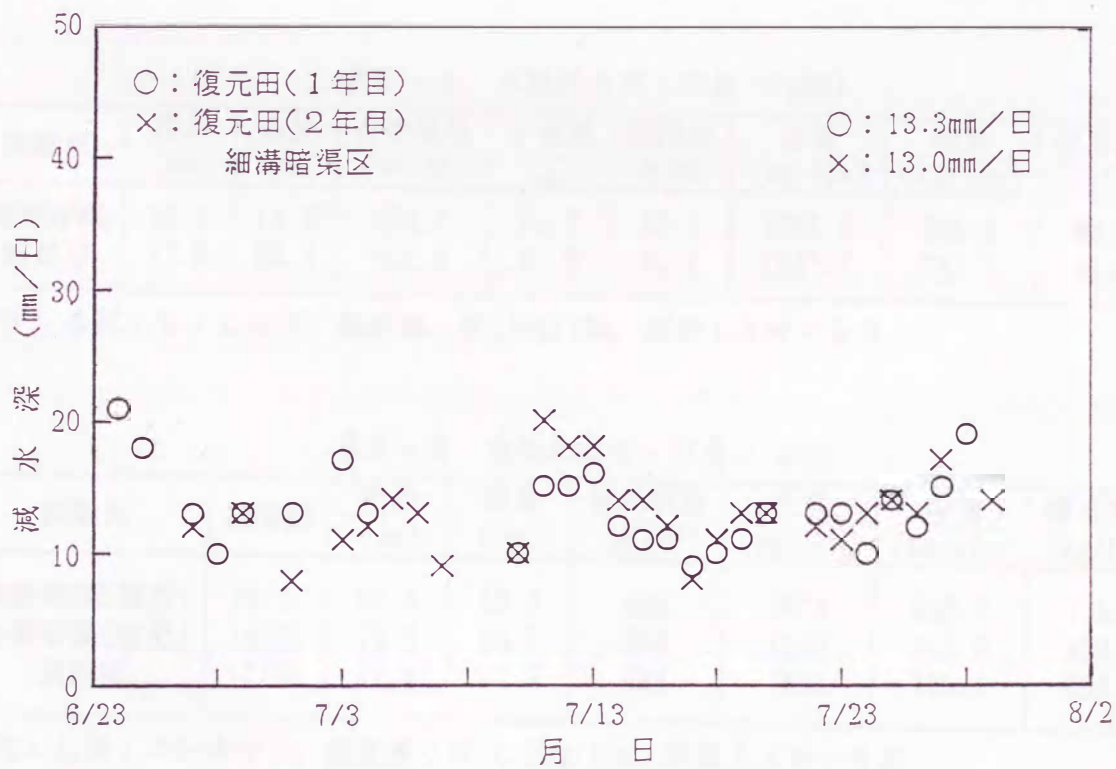


図 6-22 日減水深の変化 (1989, 中干し前)

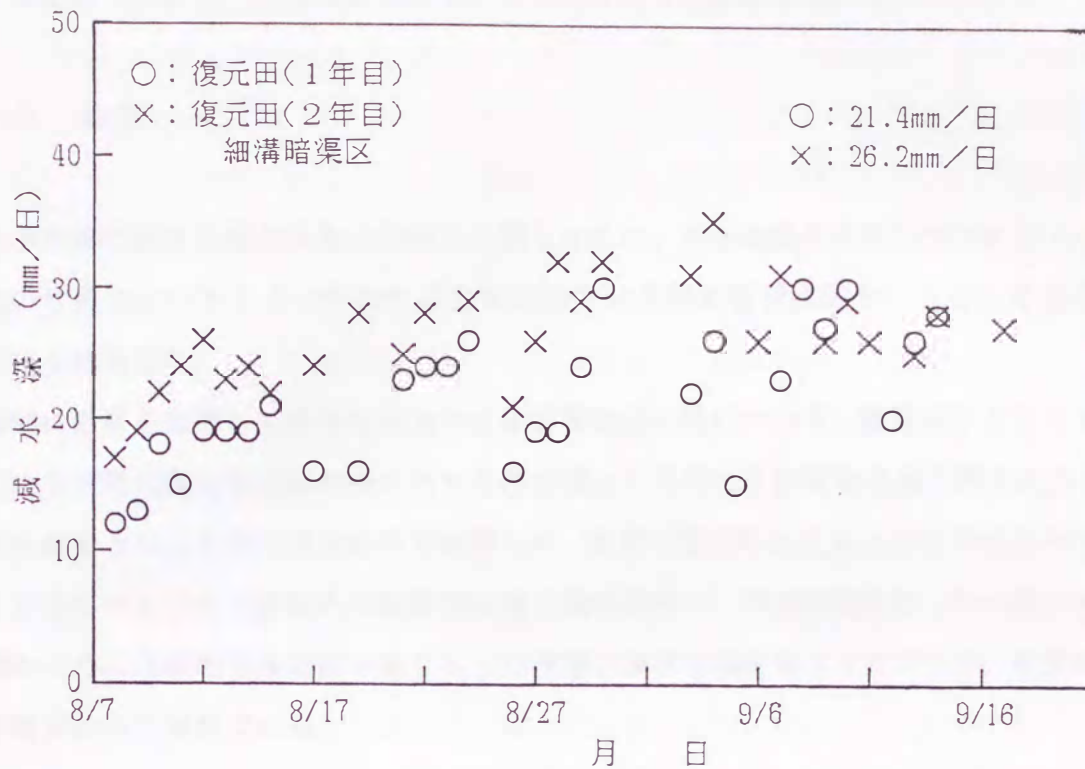


図 6 - 23 日減水深の変化 (1989, 中干し後)

表 6 - 8 水稻の生育・収量 (1989)

試験区	稈長 (cm)	穂長 (cm)	有効穂数 (本/m ²)	千粒重 (g)	籾摺歩 合(%)	全重 (kg/10a)	籾重 (kg/10a)	精玄米重 (kg/10a)
細溝暗渠	83.3	18.7	404.1	21.7	80.2	1707.3	806.3	631.8
無処理	77.5	18.4	421.6	21.5	80.1	1681.1	783.1	614.9

注) 品種: ヒノヒカリ, 施肥量: N12kg/10a, 調査 1.8 m² × 5 点

表 6 - 9 水稻の生育・収量 (1990)

試験区	成熟期	稈長 (cm)	穂長 (cm)	有効穂数 (本/m ²)	全重 (kg/10a)	籾重 (kg/10a)	精玄米重 (kg/10a)
細溝暗渠(慣行)	10/27	87.3	18.6	389	1873	855.2	705.5
細溝暗渠(無肥)	10/25	75.5	16.5	298	1153	512.0	422.4
無処理	10/30	86.4	17.9	424	1813	795.9	656.6

注) 品種: ニシホマレ, 施肥量: N10.5kg/10a, 調査 1.8 m² × 5 点

は細溝暗渠施工の効果は確認されなかった。しかし、減水深の増加等で水稻が減収になることはなかったので、細溝暗渠を施工することによる悪影響はないと考えられる。

6-5 摘要

汎用水田における総合生産力の向上を図るために、水田機能を活用しつつ水田・畑のいずれの状態においても高い作物生産力を発揮させる耕盤管理技術の一つとして細溝暗渠排水法を開発した。

耕盤に細溝を掘削して排水を促進する細溝暗渠排水法について、営農排水として実施されている振動式弾丸暗渠穿孔機に代わる作業機として新たに細溝暗渠施工機を試作して、圃場試験をとおしてその排水効果を確認した。本章で得られた成果は以下のとおりである。

1) 中小形トラクタ直装式の細溝暗渠施工機を試作し、圃場試験を行った結果、水稻収穫跡のように比較的土壌表面が硬くなった状態で細溝暗渠を施工することが、作業能率、作業精度の点で優れている。

2) 細溝暗渠施工時のトラクタ座席の振動は、掘削チェーンの回転方向がアップカットの場合は振動式弾丸暗渠穿孔機に比べ大幅に軽減され、作業者の意見でもロータリ耕うん作業とほとんど変わらないということであった。

3) 細溝暗渠部の土壌硬度、飽和透水係数等は施工後3作経過しても作土と同程度であり、降雨後の水は細溝を通して移動していることが確認され、弾丸暗渠には若干劣るものの排水性が向上することが確認された。

4) 細溝を施工した圃場を水田に復元した場合、代掻きを通常より丁寧に行うことにより日減水深の増大を避けることができる。

5) 作物の生育や収量に及ぼす影響は、試験年次が短かったこともあり、小麦の減収を抑える効果が若干みられたが、大豆、水稻ともに増収効果は確認できなかった。

終 章 （ 総括および結論 ）

本論文はトラクタ等圃場機械のけん引・走行性能の向上を目的として、ラグ車輪の運動特性および力学的特性に関して、新たな測定法を導入して実測するとともにすべり線解法を導入して理論的に解明し、さらに、支持基盤である水田の排水性を改善する新たな耕盤管理技術を開発したものである。

まず、推進力や支持力発生の基本要素であるラグ車輪のラグおよびリムの各部に作用する土壌反力を同時に、かつ、独立に測定できる測定用ラグ車輪を設計、製作し、基礎実験を行った。ラグおよびリムに作用する土壌反力の合成波形は、車軸で測定した波形とほぼ一致し、本測定装置は妥当な精度を有することを示した。

つぎに、本測定用ラグ車輪およびスライドベアリング機構の採用により、台車に対し鉛直方向にのみ自由に運動しうる走行実験装置を供試して、軟質な土壌においてラグ先端角およびすべり率を一連に変化させつつ走行実験を行った。その結果、ラグ先端角、すべり率等の違いが正味推進力、沈下量等に及ぼす影響を明らかにするとともに、ラグ車輪の運動解析を行い、実験結果と合わせて最適なラグ先端角を導いた。

さらに、すべり線解法を導入して、土壌中のラグの状態に応じた新たなすべり線場を分類、提案し、ラグ車輪のラグに作用する土壌反力を算定した。これらの算定値と実測値はほぼ一致しており、すべり線解法によるラグに作用する土壌反力の予測の妥当性が示された。

また、支持基盤である水田の排水性の向上を図るため、耕盤に細溝を掘削し圃場排水を促進する細溝暗渠排水法を提案するとともに、トラクタ直装式の細溝暗渠施工機を設計、製作した。水稻、小麦および大豆を輪作する水田における圃場試験より、細溝暗渠部の土壌硬度、土壌3相分布等は施工後2年経過しても作土と同程度に膨軟さを維持し、降雨後の水は細溝暗渠を通過して下層へ移動していることが確認され、細溝暗渠は排水性能の向上に寄与することを明らかにした。また、開発した細溝暗渠施工機は振動式弾丸暗渠穿孔機に比べ、トラクタ座席の振動が軽減されるとともに、中小形トラクタでも施工可能であることを示した。以下、各章ごとの総括と結論を述べる。

第1章では、現在使用されているトラクタ等圃場機械の走行装置の分類および特徴を述べ、それらに基づいて走行中のラグ車輪各部に作用する外力を測定できる測定用ラグ車輪を設計、製作した。

圃場機械の走行装置は大きく車輪、履帯、車輪補助装置に分類される。現在、我が国では、

トラクタ等に使用される走行装置は大部分ゴム車輪（空気タイヤ）であるが、軟弱地等では鉄車輪、履帯、車輪補助装置が使用される。

試作した測定用ラグ車輪はL型アングル、平板、パイプ等で構成される簡単な構造で、走行中にラグ車輪のラグ1枚、リムおよび車軸に作用する外力、モーメントを独立に、かつ同時に測定できる。また、ラグは取り外し可能で、ラグ先端角、ラグ枚数、ラグの大きさ等の条件も自由に変えることができる。車軸に作用する外力および車軸トルクはパイプに貼付した3組のひずみゲージで、ラグ1枚およびリム部に作用する外力および作用線の測定は、「L型」アームに貼付した3組のひずみゲージで測定される。

測定原理に基づいて貼付したひずみゲージの較正をそれぞれ行い、また、測定装置の自重の影響を考慮することにより、ほぼ正確にラグ車輪各部に作用する外力を測定できることが確認された。

第2章では、ラグ車輪の基本的な特性を把握することを目的として、スライドベアリング機構の採用により、台車に対して鉛直方向にのみ自由に運動できる走行性能実験装置と第1章で述べた測定用ラグ車輪を利用して、砂質系土壌においてラグ先端角およびすべり率を一連に変化させつつ走行実験を行った。

まず、ラグおよびリムに作用する土壌反力を測定し、さらに、これらの反力の合成波形を算定した結果、車軸で測定した波形とほぼ一致しており、本測定用ラグ車輪は妥当な精度を有することが確認された。

リムに作用する土壌反力はラグに作用するその60%にも達する場合があり、ラグ車輪設計上無視しえないものであった。なお、正味推進力および動的接地荷重のラグ分担率は、いずれもラグ先端角が大になるほど大きくなった。

正味推進力、けん引係数および車軸トルクはすべり率とともに増大し、これらは、ラグ先端角が小さいほうが大きくなった。けん引効率は、すべり率15%前後で最大となり、特にラグ先端角 1.047rad (60°) で最も高い値を示した。以上より、総合的に判断すると、間隙比の大きい軟質土壌においては、ラグ先端角 0.698rad (40°) 前後で最も高いけん引・走行性能が発揮された。

第3章では、ラグ車輪の合理的な設計のための指針を得る目的で、路上を走行するラグ車輪の運動特性を明らかにした。特に、軟弱地盤上を走行するラグ車輪の運動軌跡について考察し、走行実験によって車輪の上下動を測定して、それに基づいて軌跡方程式を求め、ラグ車輪に作用する外力との関係を明らかにした。

まず、ラグ車輪の運動を大きく3つに分類し、1) コンクリート上等剛性平面上を走行する場合、2) 湛水田等沈下が大きい平面上を走行する場合、3) 上記の中間の平面上を走行する場合について運動軌跡を考察した。特に、3) について走行実験結果より、ラグ車輪の鉛直方向の上下動を正弦関数として表現できるとして、車軸中心の軌跡方程式を提案した。

本軌跡方程式からラグ車輪各部の運動軌跡を数値解析により求め、さらにそれらの速度および加速度を算出し、土壌中のラグの運動を解析した結果、ラグ面に対してほぼ垂直方向に運動するラグ先端角を持つラグが最も効果的であった。また、土壌中のラグの運動方向とラグに作用する土壌反力の方向を検討することにより、最も効果的なラグ先端角は 0.698rad $\{40^\circ\}$ 付近であることが明らかにされた。このように、ラグ車輪各部の運動を理論的に解析することより、ラグ車輪の合理的な設計指針を得ることが可能になる。

第4章では、ラグに作用する土壌反力を理論的に解析するため、すべり線解法を導入して新たにラグの状態に応じたすべり線場を分類、提案し、これらのすべり線場に作用する破壊応力状態、ラグ接地面積よりラグ車輪のラグに作用する土壌反力を算定し、実測結果と比較検討した。

平面ラグが土壌に貫入する場合、土壌の破壊条件、ラグ面の摩擦条件、ラグの沈下状態、ラグの傾きおよび運動方向により、それぞれ異なるすべり線場が生じるため、それぞれの条件に応じたすべり線場を提案した。特に、すべり線場を具体的に規定するための対数らせん拡がり角の表現式を示した。これらのすべり線場より、ラグ面下のすべり線域の任意点における破壊応力状態が算定され、さらに提案したすべり線場に基づいて、ラグ接地長を分類、解析し、ラグ面に作用する土壌反力を算定した。

計算値と実測値の比較においては、定性的には十分よく一致しており、特に、ラグ先端角 0.524rad $\{30^\circ\}$ および 0.698rad $\{40^\circ\}$ のすべり率が小さい場合に最もよい一致がみられた。しかし、定量的には十分よい一致が得られたとは言えず、今後、土壌の変形に伴う強度変化、車輪回転に伴う機体沈下の変動等を考慮したより精緻な解析への発展が望まれる。

第5章では、汎用水田における総合生産力の向上を図るために、水田機能を活用しつつ水田・畑のいずれの状態においても高い排水性能を発揮させる耕盤管理技術を開発した。

地表から深さ約 30cm 、幅 5cm の細溝を掘削し、その掘り出した土壌を埋め戻して排水を促進する細溝暗渠排水法を提案した。耕盤上に停滞した水はこの細溝を通して本暗渠または下層に除去される。ライシメータによるモデル試験から、耕盤に細溝を掘削することにより、弾丸暗渠と同程度の排水機能の向上が期待されることが確認された。

営農排水として実施されている振動式弾丸暗渠穿孔機に代わる細溝暗渠施工機を設計、製作し、輪換田において圃場試験を実施して、その性能を確認した。トラクタ直装式の本機は、既存のロータリフレームを利用して、そのロータリ軸部に掘削チェーンを左右2本装着したもので、細溝暗渠を2本同時に施工できる。また、本機は振動式弾丸暗渠穿孔機に比べ、トラクタ座席の振動がかなり軽減されるとともに、中小形トラクタでも施工可能であった。

第6章では、第5章で述べた細溝暗渠排水法について、圃場試験をとおしてその排水効果を確認するとともに、作物の生育および収量に与える影響について調査した。

輪換田においてアップカット式の細溝暗渠施工機で圃場試験を行った結果、水稻収穫跡のように比較的土壌表面が硬い状態で細溝暗渠を施工することが、作業能率、作業精度の点で優れていた。

細溝暗渠部の土壌硬度、飽和透水係数等は施工後4作経過しても作土と同程度に維持されており、また、降雨後の水は細溝を通過して下層へ移動していることが確認され、弾丸暗渠には若干劣るものの排水機能が向上することが明らかにされた。また、耕盤上の土壌水分の経時変化調査からも同様の結果が得られた。

細溝暗渠を施工した圃場を水田に復元した場合、代掻きを通常より丁寧に行うことにより日減水深の増大を避けることができた。また、代掻きや田植え時に圃場機械の走行に及ぼす悪影響もほとんどみられず、耕盤の強度を保持しながら排水機能を向上させる可能性を見出した。

謝 辞

本研究内容に関してはもとより、農業機械分野等科学全般にわたり終始的確な御教示、御鞭撻を賜ると共に、本論文の執筆に当たり終始熱意ある御指導を頂いた九州大学農学部・橋口公一教授に深く感謝申し上げます。また、農業工学の御専門の立場から貴重な御意見を賜った九州大学農学部・高山昌照教授、秋元浩一教授ならびに井上英二助教授に心より御礼申し上げます。さらに、農業機械学に関する分野はもとより、農業全般にわたり幅広く御教示を頂いた元九州大学農学部・石橋貞人教授（現、鹿児島大学名誉教授）、坂井純教授（現、九州大学名誉教授）ならびに村田敏教授（現、九州大学名誉教授）に感謝申し上げます。

また、多方面にわたり多大な御協力を頂いた九州大学附属農場・中司敬助教授、九州大学農学部・山中捷一郎助手に、また実験に際して種々御世話頂いた九州大学農学部・田代克己技官に謝意を表します。

つぎに、ラグ車輪の運動特性および力学的特性に関する研究において貴重な御意見を頂いた岩手大学農学部・広間達夫助教授、当時の九州大学農学部大学院生であった金基大博士（現、韓国忠南大学校教授）、スリン・ポンスパサミット博士（現、タイ国チュラロンコン大学教授）、岩崎浩一博士（現、鹿児島大学助教授）、岸本正博士（現、帯広畜産大学助手）、鄒誠博士（現、中国西北農学院副教授）、権純球博士（現、韓国蜜陽産業大学校講師）、井手祐市郎氏（現、自営）、今村剛氏（現、㈱クボタ）に感謝の意を表すると共に、本研究に協力して頂いた当時の専攻生に御礼申し上げます。また、公私にわたって貴重な御意見を頂いた琉球大学農学部・上野正実教授ならびに鹿内健志助手に感謝申し上げます。

なお、本研究で供試した実験装置の製作および実験に関しては、元九州大学農学部大学院生のトラン・タン・グエン氏（現、㈱クボタ）、横山浩二氏（現、宮崎県庁）、元九州大学農学部研究員の郭麗蕭氏に負うところ大であった。記して謝意を表します。

耕盤管理技術の研究に関して貴重な御意見を頂いた当時の九州農業試験場農地利用部機械化作業研究室・篠崎浩之室長、九州農業試験場水田利用部機械化研究室・伊藤茂昭室長（現、四国農業試験場業務科長）、西田初生主任研究官（現、九州農業試験場機械化研究室長）、甲斐俊二郎主任研究官に感謝の意を表します。なお、圃場試験に当たっては九州農業試験場水田利用部・山口政義技官ならびに大久保吉郎技官の御協力を頂いた。記して謝意を表します。

また、土壌肥料の専門の立場から御協力頂いた当時の九州農業試験場水田利用部水田土壌研究室・吉野喬室長に、農業土木の専門の立場から御協力頂いた九州農業試験場農地利用部

農地整備研究室・原喬室長（現，農業工学研究所派遣職員），安中武幸研究員（現，山形大学農学部助教授）に感謝申し上げます。

さらに，農業機械学に関する御専門の立場から貴重な御意見，御指導を頂いた生物系特定産業技術研究推進機構元畜産工学研究部（現，研究交流推進本部）・諏澤健三部長，同畜産工学研究部・八木茂部長，同前畜産工学研究部（現，四国農業試験場総合研究部）・石束宣明部長，同畜産工学研究部飼料生産工学研究・山名伸樹主任研究員に謝意を表します。

また，論文の作成において貴重な時間をさいて御指導を頂いた中国農業試験場作物開発部機械化研究室・前岡邦彦室長，吉田智一主任研究官ならびに土屋史紀研究員に感謝申し上げます。なお，研究に関してはもとより，先輩としての的確な御指導を賜った中国農業試験場総合研究部総合研究第一チーム・岡崎紘一郎チーム長ならびに中国農業試験場作物開発部品質特性研究室・小野田明彦室長に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Tanaka, T. : Operation in Paddy Fields : State-of-the-Art Report, J. of Terramechanics, 21(2), 153-179, 1984
- 2) 田中 孝 : 湿田への動力耕うん機の導入に関する研究 (第4報), 農業機械学会誌, 20(3), 104-108, 1958
- 3) 田中 孝 : 湿田への動力耕うん機の導入に関する研究 (第5報), 農業機械学会誌, 20(4), 142-146, 1958
- 4) 田中 孝 : 湿田への動力耕うん機の導入に関する研究 (第6報), 農業機械学会誌, 20(4), 147-151, 1958
- 5) Wu, S. X., Hu, J. H. and Wong, J. Y. : Behavior of Soil under a Lugged Wheel, Proc. 8th Int. Symp. Terrain Vehicle Systems, 2, 545-559, 1984
- 6) 増田正三・田中 孝 : トラクタのけん引性能に関する研究 (第5報), 農業機械学会誌, 26(1), 5-8, 1964
- 7) 増田正三・田中 孝 : トラクタのけん引性能に関する研究 (第6報), 農業機械学会誌, 26(1), 9-13, 1964
- 8) Gee-Clough, D. : Single Lug Forces for a Rigid Open Wheel on Rice Soils, University of California, Davis, 1-161, 1974
- 9) Gee-Clough, D. and Chancellor, W. : Pull and Lift Characteristics of Single Lug on Rigid Wheels in Wet Rice Soils, Trans. of the ASAE, 19(3), 433-441, 1976
- 10) Bekker, M. G. : Theory of Land Locomotion, University of Michigan Press, 220-227, 1962
- 11) Zhang, T. L. and Shao, Y. J. : The Analysis on the Dynamic Performance of a Single Lug, Proc. 8th Int. Symp. Terrain Vehicle Systems, 2, 575-591, 1984
- 12) Hettiaratchi, D. R. P., Witney, B. D. and Reece, A. R. : The Calculation of Passive Pressure in Two-Dimensional Soil Failure, J. of Agr. Eng. Res. , 11(2), 89-107, 1966
- 13) Hettiaratchi, D. R. P., Witney, B. D. and Reece, A. R. : The Calculation of Passive Resistance, Geotechnique, 24(3), 289-310, 1974

- 14) 土屋功位・穂波信雄：車輪のラグに関する研究（第1報），農業機械学会誌，23(4)，149-155，1961
- 15) 土屋功位・穂波信雄：車輪のラグに関する研究（第2報），農業機械学会誌，26(4)，236-240，1964
- 16) 山中 勇：小型トラクタ用鉄車輪に関する基礎的研究，東京教育大学農学部学術報告，8，117-177，1962
- 17) 田中 孝・中嶋 洋：土-ラグの相互作用に関する基礎的研究（第1報），農業機械学会誌，48(2)，225-232，1986
- 18) Kötter, F. : Die Bestimmung des Druckes an Gekriimten Gleitfiachen, eine Aufgabe aus der Lehre vom Erddruck, Ber. Akad. Wiss., Berlin, 229-233, 1903
- 19) Bekker, M. G. : Off-The-Road Locomotion, The University of Michigan Press, 113-147, 1960
- 20) 川村 登：プラウ曲面の研究（第4報），農業機械学会誌，15，90-94，1954
- 21) 梅田重夫：ロータリ式耕うん刃の性能と土との関係についての基礎的研究，京都大学学位論文，1961
- 22) 穂波信雄：平板の掘削作用に伴う砂土の挙動，農業機械学会関西支部報，31，1-4，1972
- 23) 橋口公一：摩擦性塑性体に関する降伏理論，土木学会論文報告集，199，57-66，1972
- 24) Zhang, T.L. and Shao, Y.J. : The Analysis on the Dynamic Performance of a Single Lug, Proc. 8th Int. Symp. Terrain Vehicle Systems, 2, 575-591, 1984
- 25) Rankine, W.J.M. : On the Stability of Loose Earth, Phil. Trans. Roy. Soc. London, 147, 1856-1867, 1856
- 26) 竹中 肇：畑地転換の意義，農業土木学会誌，44(12)，5-8，1976
- 27) 村尾重信・長利 洋：汎用耕地と暗渠排水，農業土木学会誌，49(12)，13-19，1981
- 28) 福島忠雄：農地形態と暗渠排水工法，農業土木学会誌，49(12)，21-27，1981
- 29) 山崎不二夫・竹中 肇・田淵俊雄・多田 敦：粘土質の水田の暗キヨ排水における心土キ裂の役割，農業土木研究，32(3)，27-35，1964
- 30) 永石義隆・山下恒雄：機械化水田におけるモグラ暗キヨの耐用性について（1），農業土木学会誌，35(6)，3-6，1967

- 31) 富士岡義一・高橋 強：成層土壌における暗キヨ排水の基礎的研究（Ⅱ），農業土木学会論文集，21，19-23，1967
- 32) 田淵俊雄：粘土質の水田の排水に関する研究（1），農業土木学会論文集，18，7-11，1966
- 33) 富士岡義一・丸山利輔：粘質土壌水田における暗キヨ排水に関する研究（Ⅰ），農業土木学会論文集，35，48-53，1971
- 34) 佐野文彦：暗渠排水の機械施工技術の進展，農業土木学会誌，49(12)，35-40，1981
- 35) 手塚右門・遠藤俊三：振動式心土破碎機に関する研究（第1報），農業機械学会誌，24(1)，21-24，1962
- 36) 手塚右門・遠藤俊三：振動式心土破碎機に関する研究（第2報），農業機械学会誌，24(2)，49-52，1962
- 37) 遠藤俊三：振動式心土破碎機に関する研究（第3報），農業機械学会誌，25(2)，76-82，1963
- 38) 守島正太郎・小島和雄：弾丸暗きょせん孔機に関する研究（第2報），農業機械学会誌，27(1)，28-32，1965
- 39) 農業機械学会：新版農業機械ハンドブック，コロナ社，288-300，1984
- 40) 和田一雄：耕耘機誕生，富民協会，13-237，1979
- 41) 林 尚孝：車輪類の共用化調査，茨城大学調査報告書，1978
- 42) 橋口公一・亀井雅浩・広間達夫・坂井 純・井手祐市郎・今村 剛：ラグ車輪の力学的特性に関する基礎的研究（第1報），農業機械学会誌，50(1)，27-36，1988
- 43) 共和電業：共和ゲージとその取り扱い法，技術資料，5，1-55，1973
- 44) 岩崎浩一：農業機械-土系の力学的作用に関する研究，九州大学学位論文，1-71，1986
- 45) R. N. ブレイスウェル：フーリエ変換とその利用（上），マグロウヒル好学社，1981
- 46) 坂井 純・橋口公一・トラン. タン. ゲン：農用車輪の力学的特性に関する研究（Ⅰ），農業機械学会第40回年次大会講演要旨，1，1981
- 47) 岸本 正：農用ラグ車輪の運動解析および設計理論に関する研究，九州大学学位論文，1-137，1991
- 48) Drucker, D. C. : A More Fundamental Approach to Plastic Stress - strain Relations, Proc. 1st U. S. Natl. Congr. Appl. Mech., ASME, 1, 487-491, 1951

- 49) Sokolovsky, V.V. : Statics of Soil Media, Butterworth, 10-18, 1954
- 50) 山口柏樹 : 土質力学, 技報堂, 745-891, 1969
- 51) Haar, M.E. : Foundation of Theoretical Soil Mechanics, McGraw-Hill Co. , 233, 1966
- 52) 橋口公一・亀井雅浩・坂井 純・井手祐市郎・今村 剛 : ラグ車輪の力学的特性に関する基礎的研究 (第2報), 農業機械学会誌, 51(1), 37-43, 1989
- 53) 亀井雅浩・橋口公一・坂井 純・井手祐市郎 : ラグ車輪の力学的特性に関する基礎的研究 (第3報), 農業機械学会誌, 51(2), 17-22, 1989
- 54) Hashiguchi, K. and Kamei, M. : Slip-line Analysis of Soil Reactions Acting on a Lugged Wheel, Proc. 2nd Asia-Pacific Int. Soc. Terrain Vehicle Systems, 205-217, 1988
- 55) 九州農業試験場 : 重粘土の物理的特性の変化と作物生育に関する基礎的研究, 昭和62年度重点基礎研究報告書, 1-13, 1988
- 56) 亀井雅浩・西田初生 : 細溝暗渠施工機の開発 (第1報), 九州農業研究, 51, 170, 1989
- 57) 亀井雅浩・西田初生・伊藤茂昭・甲斐俊二郎 : 細溝暗渠施工機の開発 (第2報), 九州農業研究, 52, 170, 1990
- 58) 亀井雅浩 : 細溝暗渠施工機を使う営農排水技術, 機械化農業, (株)新農林社, 1991-9, 19-23, 1991
- 59) 亀井雅浩・伊藤茂昭・甲斐俊二郎 : 細溝暗渠施工機による営農排水法, 平成2年度九州農業試験場年報, 39-42, 1992
- 60) 亀井雅浩・伊藤茂昭・甲斐俊二郎 : 細溝暗渠施工機の開発 (第3報), 九州農業研究, 53, 142, 1991
- 61) 石橋貞人 : 湿潤土壌上における車輪のけん引抵抗に関する研究 (1), 農業機械学会誌, 20(1), 21-24, 1958
- 62) 増田正三・田中 孝・笈田 昭 : トラクタのけん引性能と土の強さに関する研究, 農業機械学会誌, 29(3), 119-127, 1967
- 63) 松尾昌樹 : 車輪の各種使用状態と性能試験, 農業機械学会誌, 30(3), 127-136, 1968
- 64) 田中 孝 : 代かき用の水田車輪, 機械化農業, (株)新農林社, 1968-2, 30-35, 1968
- 65) 伊藤信孝・増田正三 : 農用車輪のころがり抵抗-動的沈下-, 農業機械学会誌, 32(1), 10-15, 1970

- 66) Onafecko, O. and Reece, A.R. : Soil Stress and Deformations Beneath Rigid Wheels, J. of Terramechanics, 4(1), 59-80, 1967
- 67) Burt, E. C. and Bailey, A. C. : Thrust-Dynamic Weight Relationship of Rigid Wheels, Trans. of the ASAE, 20(4), 811-813, 1975
- 68) Bailey, A. C. : Thrust-Dynamic Weight Relationship of Rigid Wheels (2) , Trans. of the ASAE, 19(1), 37-40, 1976
- 69) 寺尾日出男 : トラクタ車輪のすべり率測定に関する一事例, 農業機械学会誌, 40(1), 21-27, 1978
- 70) Hashiguchi, K., Lam, V.H. and Iwasaki, K. : Measurement of Force by Strain Gauges, J. Fac. Agr., Kyushu Univ., 23, 145-153, 1979
- 71) 橋口公一・岩崎浩一 : 四半ないし半無限体の支持力 (1) , 農業機械学会誌, 42(1), 15-20, 1980
- 72) 北野昌則・時田宗之 : 剛性輪と土の相互作用に関する研究, テラメカニックス, 5, 48-54, 1982
- 73) 橋口公一 : 農用タイヤの現状 - 構造, 種類, 特徴 -, 機械化農業, (株)新農林社, 1985-5, 3-7, 1985
- 74) 井手祐市郎 : 農用鉄車輪の力学的特性に関する研究, 九州大学修士論文, 1-598, 1985
- 75) 伊藤信孝・王 秀崙 : 軟弱地におけるラグの効果に関する一考察, 農業機械学会誌, 50(3), 53-59, 1988
- 76) 中嶋 洋・田中 孝 : 土-ラグ系の相互作用に関する基礎的研究 (第2報) , 農業機械学会誌, 50(6), 3-10, 1988
- 77) 中嶋 洋・田中 孝 : 土-ラグ系の相互作用に関する基礎的研究 (第3報) , 農業機械学会誌, 51(2), 47-55, 1989
- 78) 中嶋 洋・田中 孝 : 土-ラグ系の相互作用に関する基礎的研究 (第4報) , 農業機械学会誌, 52(1), 77-83, 1990
- 79) 王 秀崙・田中 孝・山崎 稔 : ラグ車輪と土との相互作用に関する研究 (第1報) , 農業機械学会誌, 51(3), 33-40, 1989
- 80) 王 秀崙・田中 孝・山崎 稔 : ラグ車輪と土との相互作用に関する研究 (第2報) , 農業機械学会誌, 51(5), 11-18, 1989

- 81) 王 秀崙・田中 孝・山崎 稔：ラグ車輪と土との相互作用に関する研究（第3報），農業機械学会誌，52(2)，11-18，1990
- 82) キティチャイ トゥリラタナシリチャイ・笈田 昭・本田雅志：かご車輪の設計基準確立に関する研究（第1報），農業機械学会誌，52(4)，21-27，1990
- 83) キティチャイ トゥリラタナシリチャイ・笈田 昭：かご車輪の設計基準確立に関する研究（第2報），農業機械学会誌，53(3)，47-56，1991
- 84) 守島正太郎・松尾昌樹：心土犁の形状作用に関する基礎研究（第1報），農業機械学会誌，26(2)，84-88，1964
- 85) 守島正太郎・松尾昌樹・小島和雄・池見隆男：地下せん孔体に関する研究（第1報），農業機械学会誌，26(3)，183-189，1964
- 86) 守島正太郎・松尾昌樹・小島和雄・池見隆男：地下せん孔体に関する研究（第2報），農業機械学会誌，26(3)，190-193，1964
- 87) 小島和雄・下村 功：弾丸暗きょせん孔機に関する研究（第4報），農業機械学会誌，27(3)，172-177，1965
- 88) 長浜謙吾・手島三二・富田正彦：暗きょ排水技術の歴史的発展過程（I），農業土木学会論文集，21，50-54，1967
- 89) 長浜謙吾・手島三二・富田正彦・谷口 浩：モグラ，管複合方式暗きょの機能の実態について（V），農業土木学会論文集，26，29-34，1968
- 90) 富士岡義一・佐藤晃一：粘質土壌水田の乾燥について（II），農業土木学会論文集，26，1-7，1968
- 91) 畑村洋太郎・千々岩健児：土の切削機構の解明（第1報），日本機械学会論文集（第3部），40(338)，2945-2955，1974
- 92) 畑村洋太郎・千々岩健児：土の切削機構の解明（第2報），日本機械学会論文集（第3部），41(349)，2749-2759，1974
- 93) 農業土木学会畑地転換対策調査委員会：畑地転換の技術的諸問題とその対策，農業土木学会誌，44(12)，9-41，1976
- 94) 長堀金造・高橋 強：畑作転換に伴う土壌物理性の変化，農業土木学会誌，45(9)，5-10，1977
- 95) 三竿善明：心土の機械的破碎に関する研究（第1報），農業機械学会誌，53(2)，41-51，1991

Improvement of Traction Performance and Trafficability of Farm Machinery

Masahiro KAMEI

Summary

In order to improve the traction performance and trafficability of farm machinery such as the tractor, this paper sought to clarify kinetic and dynamic characteristics of a rigid lugged wheel running on soft ground. As well, sole pan management technology for efficient farming drainage in paddy fields, while maintaining the sole pan for stable running of farm machinery, was developed.

First, to analyze the dynamic characteristics of the rigid lugged wheel, a special test lugged wheel was made, which enabled us to measure soil reactions acting on the lug and the rim independently and simultaneously. Then soil reactions were measured on the soft soil. The influence of differences in the lug tip angle and slippage upon net traction, sinkage, etc. was shown and the optimal lug tip angle was obtained through kinetic analysis and experiments with the rigid lugged wheel.

Kinematically admissible slip-line fields were proposed, classifying them according to a failure condition of soil, a friction condition of soil-lug interface, and a state and kinetic direction of the lug. Soil reactions acting on the lug were calculated based on each slip-line field. While a good approximation of theory to experiments for waves of horizontal and vertical force was obtained qualitatively, a more precise analysis is desirable for a quantitative prediction.

To develop the sole pan management technology, the trenching underdrain method was proposed, by which drainage is promoted by trenching in the sole pan, and drainage improvement was clarified through a model test and field tests. Also a trenching underdrainer, which can be used with medium- or small-sized tractors, was made and tested via the construction of the trenching underdrain in a paddy field. Although this resulted in only a small improvement

in the rate of work, tractor seat vibration was reduced, compared with a vibrating mole drainer. The following are the summary and conclusion of each chapter.

[Chapter 1]

The currently used running devices of farm machinery such as the tractor were classified. Based on this classification, a special test lugged wheel was made, which enabled us to measure the force acting on each rigid lugged wheel during running.

The running devices of farm machinery are divided into wheels, tracks and auxiliary wheels. At present in Japan the running device used for tractors are mainly rubber wheels (pneumatic tires), while iron wheels, tracks and auxiliary wheels are used on soft ground.

The special test lugged wheel has a simple structure consisting of an L-shaped angle, a flat plate, pipes, etc. and the force and the moment acting on a lug, the rim and the axle of the rigid lugged wheel can be measured independently and simultaneously. The lug is removable, and the lug tip angle, the number of lugs and other conditions can be changed. The force acting on the axle and the axle torque are measured by three sets of strain gauges attached to the pipe and the force acting on each lug and the rim and the acting point are measured by three sets of strain gauges attached to the "L-shaped" arm.

The attached strain gauges, based on the measurement principle, were calibrated and the force acting on each rigid lugged wheel could be measured quite accurately by taking account of the influence of the empty weight of the measuring equipment.

[Chapter 2]

The basic characteristics of the rigid lugged wheel were measured using the running test equipment, which can move freely only in the perpendicular direction in relation to the truck by employing a slide bearing mechanism and

the special test lugged wheel described in Chapter 1, while changing the lug tip angle and slippage in succession on the soft soil.

First, the soil reactions acting on the lug and the rim were measured and the resultant waveforms of these reactions were calculated. These waveforms corresponded closely to the waveforms of the force measured at the axle and this special test lugged wheel had the appropriate accuracy.

The soil reaction acting on the rim was up to 60% of that acting on the lug, the rim was important for designing a rigid lugged wheel. The larger the lug tip angle, the larger the rates of both the net traction and the dynamic contact load shared by the lug.

Net traction, coefficient of traction, and axle torque increased with increasing slippage and they were bigger when the lug tip angle was smaller. Tractive efficiency reached a maximum at about 15% slippage. In particular, it had its highest value with a lug tip angle of 1.047rad $\{60^\circ\}$. It was judged comprehensively that the highest performance of traction and trafficability were obtained with a lug tip angle of around 0.698rad $\{40^\circ\}$ on soil with a high void ratio.

[Chapter 3]

The kinetic characteristics of the rigid lugged wheel running on the road were clarified in order to achieve a rational design of the rigid lugged wheel. In particular, the kinetic locus of the rigid lugged wheel running on the soft soil was examined, the vertical motion of the wheel was measured in a running experiment, and a locus equation based on the experiment was obtained.

The following three types of motion of the rigid lugged wheel are possible depending on the condition of the field surface:

- 1) Motion in running on a rigid surface such as concrete pavement.
- 2) Motion in running on terrain with large sinkage such as a ponding paddy field.
- 3) Motion in running on ground with a state between 1) and 2).

In particular, from the experimental results of case 3), it is supposed that the

vertical motion of the rigid lugged wheel in the perpendicular direction can be expressed as a sine function and the locus equation centering around the axle was proposed.

The kinetic locus of each rigid lugged wheel was obtained from the locus equation, its speed and acceleration were calculated and its motion was analyzed in the soil. It was found that the most effective lug is one whose lug tip angle moves approximately in the vertical direction in relation to the lug surface. Also, the most effective lug tip angle was placed at around 0.698rad $\{40^\circ\}$ by examining the direction of soil reaction acting on the lug. In this way, theoretical analysis of the motion of the rigid lugged wheel allows this type of wheel to be designed rationally.

[Chapter 4]

In order to theoretically analyze soil reaction acting on the lug, the slip-line fields were classified and the states of failure stress acting on these slip-line fields were analyzed. Soil reaction acting on the lug of the rigid lugged wheel was analyzed by introducing the slip-line method and the analyzed results were compared with actual measurement results.

When a plane lug penetrates into the soil, different slip fields will be generated depending on the failure condition of the soil, the friction condition of the lug surface, the sinkage of the lug and the inclination and kinetic direction of the lug. Accordingly, a slip-line field corresponding to each condition was proposed. In particular, the expression of the angle of expansion of logarithmic spiral was used in order to specifically stipulate the slip-line field. Based on this slip-line field the state of failure stress was calculated at an arbitrary point of the slip-line field under the lug surface. Furthermore, the lug contact lengths were classified and analyzed using the proposed slip-line field and the soil reaction acting on the lug surface was calculated, taking account of the state of failure stress.

When the calculated values were compared with the actual values, it was

found that they corresponded quite well qualitatively. In particular, they corresponded best when slippage was small, with lug tip angles of 0.524rad {30° } and 0.698rad {40° }. However, they did not correspond to each other very well quantitatively. More accurate analysis must be done in the future, taking account of changes in strength with both soil deformation and the fluctuation of machine body sinkage with wheel rotation.

[Chapter 5]

A sole pan management technology, which ensures high crop productivity in both paddy fields and upland fields, was developed in order to improve comprehensive productivity in a multipurpose paddy field.

The trenching underdrain method, which promotes drainage by trenching a drain of about 30cm in depth from the soil surface and 5cm in width, and returning the excavated soil, was proposed. Water on the sole pan is drained through this trench to the main underdrainage or to the lower layer. It was confirmed from the model test using lysimeters that the improvement of drainage capacity would be equal to that of a mole drain by excavating trenching underdrainage on the sole pan.

A pilot trenching underdrainer was made, in place of a vibrating mole drainer, which is used for farming drainage, and a field test in a rotational paddy field was conducted to investigate its performance. This machine was a direct mounted type, using the existing rotary frame with excavating chains mounted on the right and left of the rotary shaft. It can excavate two trenching drains simultaneously. It results in less vibration to a tractor seat than a vibrating mole drainer and it can be used with a 15kW{20 PS} class tractor.

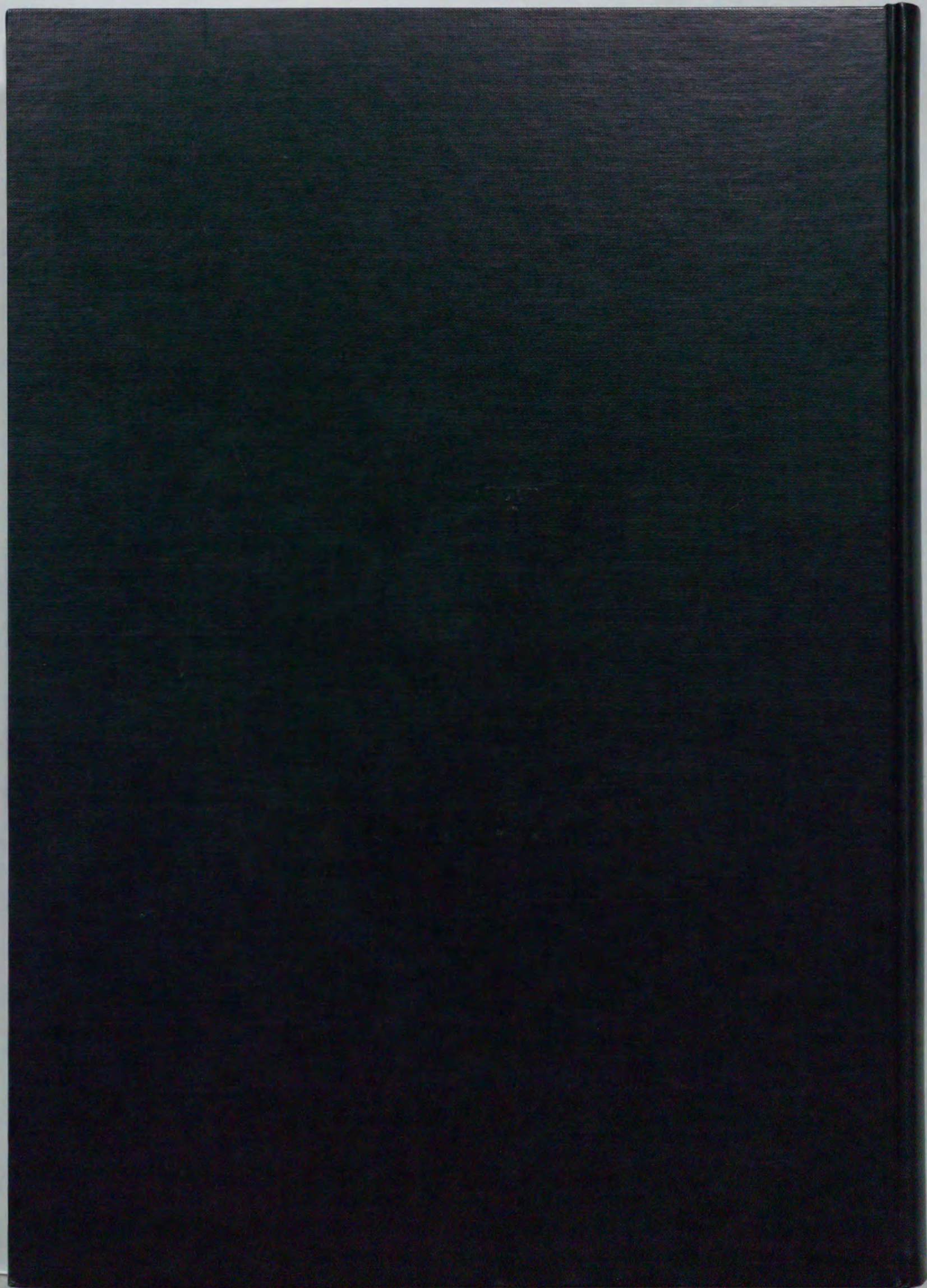
[Chapter 6]

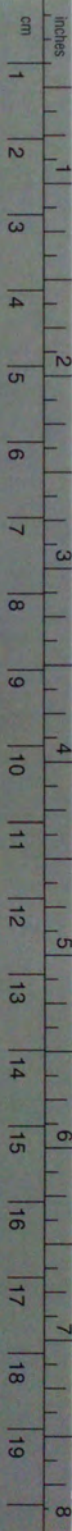
The drainage effect of the trenching underdrain method described in Chapter 5 was confirmed through a field test and the effects of this method on trafficability of farm machinery were also investigated.

As a result of the field test using the trenching underdrainer, which has solved the problems of the existing underdrainer, it was found that a better rate and quality of work can be obtained when the trenching underdrainage is constructed on a relatively hard soil surface such as that of a paddy after rice has been harvested.

It was confirmed that soil hardness and saturated water interpenetrating coefficient of trenching drainage were maintained to an extent similar to the plow layer after fourth harvest since the trenching drains was constructed and that rainwater moved to the lower layer passing through the trench. This demonstrated the improvement of drainage. An investigation of changes in soil moisture on the sole pan over time yielded similar results.

When the field in which the trenching underdrainage was constructed was turned back into a paddy field, the increase of water requirement in depth was avoided by paddling more carefully than usual. The trafficability of farm machinery on the sole pan in which the trenching underdrainage was constructed was the same performance as that on normal sole pan at the time of paddling and rice transplanting. It was possible to improve drainage while maintaining the sustaining capacity of the sole pan.





Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue	Cyan	Green	Yellow	Red	Magenta	White	3/Color	Black
[Blue patch]	[Cyan patch]	[Green patch]	[Yellow patch]	[Red patch]	[Magenta patch]	[White patch]	[3/Color patch]	[Black patch]

Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

- A** 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

