

水田転換畑における心土破碎の施工方法の違いによる土壌物理性および排水改善効果

持永 亮*・樋口俊輔¹⁾・水田一枝²⁾・竹下美保子

水田転換畑において、心土破碎のためのサブソイラ施工が土壌の物理性に及ぼす影響と施工間隔が暗渠からの排出量に及ぼす影響を調査した。併せて、パラソイラ施工について土壌の物理性および暗渠からの排出量を比較検討した。その結果、土壌硬度からサブソイラ施工では施工部付近に限り、土層中に切り込み溝と亀裂を確認することができた。サブソイラ施工部の浸透能は無施工部の約 20 倍に相当した。施工間隔毎に比較すると、19~26mmの降雨量に対して 3m間隔の施工区ではピーク排出量が 4.1mm/h、1.5m間隔の施工区では 5.5mm/h で、間隔を半分に詰めることで約 30%向上した。パラソイラ施工ではサブソイラ施工に比べて、深さ 15~25cm の下層土の土壌貫入抵抗値が低く、易有効水分量が有意に高かった。暗渠からのピーク排出量はサブソイラ施工と同様に高い排水効果が認められたが、サブソイラ施工区を上回る水準ではなかった。

以上のことから、サブソイラ施工法は施工部を中心に形成される切り込み溝や亀裂で排水を促し、施工間隔が狭いほど排水効果は高くなることが明らかになった。また、パラソイラ施工法は下層土の土壌物理性が改善され、サブソイラ施工法には及ばないものの高い排水効果を持つことが明らかになった。

[キーワード: 暗渠排出量, サブソイラ, 土壌物理性, 排水性, パラソイラ]

Effects of Method of Subsoil Breaking on Soil Physical Properties and Drainage Characteristics for Field Converted from Paddy. MOCHINAGA Ryo, Shunsuke HIGUCHI, Kazue MIZUTA and Mihoko TAKESHITA (Fukuoka Agriculture and Forestry Research Center, Chikushino, Fukuoka 818-8549, Japan) *Bull. Fukuoka Agric. For. Res. Cent.* 7: 1-6 (2021)

We examined the effects of using a subsoiler on soil physical properties and change of application interval on underdrain discharge in field converted from paddy. In addition, we investigated the effects of using a parasoiler on soil physical properties and underdrain discharge. Subsoiling formed cavities and soil cracks in the soil layer only in the immediate vicinity of subsoiler application. Percolation rate at locations where subsoiler was applied was about 20 times higher than at locations farther away. The peak underdrain discharge was 4.1 mm/h at subsoiler application intervals of 3m compared to 5.5 mm/h at intervals of 1.5m, an increase of about 30%. Penetration resistance value of parasoiler application was lower at a depth of 15-25cm than for subsoiler application. Also, available moisture (pF1.5~2.5) increased significantly compared to subsoiler. The peak underdrain discharge of parasoiler application was lower than for subsoiler, but had a high drainage effect. These results suggest that subsoiler application induces drainage by formation of cavities and soil cracks in vicinity of application, and increases underdrain discharge with reduction of application interval. Furthermore, parasoiler application improves physical properties of subsoil and has a high drainage effect.

[Key words: drainage, parasoiler, soil physical properties, subsoiler, underdrain discharge]

緒言

本県では、水田転作として大豆、裏作として麦類や露地野菜などの畑作物が栽培され、水田が有効活用されている。しかし、これら畑作物の栽培において、水稻栽培時に形成された鋤床層や地下水位が高いことなどにより排水不良となり、湿害が発生しやすい。そのため、水田で畑作物を栽培するためには排水性の改善が必要不可欠である。また、地球温暖化による近年の気候変動は顕著であり、夏期の局地的大雨、冬季の多雨等、従来よりも降雨に対して速やかな排水を行う必要性が高まっている。

農家が行う排水対策技術には、一般に明渠施工等による地表排水を促す対策と、心土破碎や補助暗渠施工等により作土層から本暗渠までを繋ぐ排水経路を作ることによって地下排水を向上さ

せる対策がある。これまでに地下排水において水の移動について調査された報告が多数あり(富士岡・佐藤 1968, 古木ら 1972, 根岸ら 1972), 井上 (1988) は心土に存在する亀裂や弾丸暗渠などが排水経路として非常に重要な役割を果たし、降雨を迅速に本暗渠へと集めて排水することを報告している。

心土を破碎するにはサブソイラの施工が有効であり、古くから水田の排水性を改善する対策として行われてきた(小原 1980)。本県ではサブソイラを約 2~ 3m間隔で施工することを推奨している(福岡県 2010, 2014) が、より間隔を詰めて施工することで地下排水性を向上させることが期待できる。一方で、実際の圃場で施工間隔の違いが暗渠排出量に及ぼす影響を比較検討した事例はない。そこで、地下排水性向上のために、

*連絡責任者(生産環境部: mochinaga-r7208@pref.fukuoka.lg.jp)

受付 2020 年 7 月 20 日; 受理 2020 年 9 月 29 日

1) 現 福岡県農林水産部輸出促進課

2) 前 生産環境部

施工間隔を狭めた際に暗渠排出量が増加するか検証する必要がある。

また、心土破碎によって排水性を改善するための施工機はサブソイラ以外にも様々なものが開発されている。その中で、パラソイラ（松山株式会社製）は、圃場に垂直に切り込み溝を形成するサブソイラに対して、内側に折れ曲がった4本のナイフが垂直に土壤へと入り、下層土を反転させることなく土層を広範囲に破碎できることが特徴である（第1表、第1図）。パラソイラはナイフの数や形状の違いにより、サブソイラ施工よりも多くの亀裂を形成し、土層全体の膨軟化および透水性や保水性を高めるとともに、地下排水性を向上させることも期待できる。しかし、このパラソイラ施工した水田の暗渠排出量について評価した報告はなく、下層の土壤物理性への影響も不明である。また、従来のサブソイラ施工法の排水効果との違いも明らかではない。

そこで、本報告ではサブソイラの心土破碎において、土壤の物理性に及ぼす影響と、施工間隔による暗渠排出量を比較し、地下排水性向上の可能性について明らかにした。加えて、地下排水性のさらなる向上を目指すため、パラソイラ施工法と従来のサブソイラ施工法での下層の土壤物理性と暗渠排出量を比較した。

材料および方法

試験1 サブソイラによる心土破碎が地下排水に及ぼす影響

調査は農林試生産環境部圃場（筑紫野市）で実施した。圃場の大きさは長辺33m、短辺27.5mで、面積は8.5a、ピペット法により判定したこの圃場の作土の土性はSL（砂壤土）であった。本暗渠は圃場長辺と平行に3本埋設されており、施工年数は20年以上、暗渠管直上の疎水材には貝殻が使用されている。調査圃場では毎年水稻を作付けしており、試験は水稻作後に行った。

心土破碎は振動式サブソイラ（松山株式会社製、弾丸部径80mm一連）を34馬力のトラクタでけん引して行った。施工方向は本暗渠に対し直交方向に施工した。施工深度は30～35cmとした。2016年12月12日に3m間隔で施工し（3m施工区、2016年12月12日～2017年1月4日）、同一圃場において、2017年1月5日に3m施工区の間をさらに追加施工して、これを1.5m施工区とした（2017年1月5日以降）。サブソイラ施工前の2016年11月18日～2016年12月11日の期間を無施工区とした。

土壤硬度の測定はサブソイラ施工後の2017年5月に土壤貫入抵抗法を用いて行った。用いたデジタル土壤抵抗測定器（DIK-5504、大起理化学工業株式会社製）の測定値は垂直方向に10cm間隔で示した。調査箇所は圃場内の本暗渠上を避けたサブソイラ施工部とした。また、施工部を中心として水平方向に

10cm間隔で40cm先までの範囲を調査し、土壤硬度分布を作成した。

浸透能の調査は2017年4月22日にシリンダーインターレート法（土壤物理性測定法委員会1980）に従って行った。調査箇所は、土壤硬度調査と同様、本暗渠上を避けたサブソイラ施工部とした。無施工部は、本暗渠およびサブソイラ施工部を避けた箇所でも調査した。それぞれ5カ所で調査を行い、平均値で評価した。

暗渠排出量の調査は3m間隔および1.5m間隔で施工した調査圃場で次の通り実施した。圃場中央の本暗渠を1本選定し、その暗渠排出口に塩化ビニルパイプを介してパルス出力式水道メーター（FMSDシリーズ、愛知時計電機株式会社製）を設置した。水道メーターからの測定データは、地上部に設置したパルスデータロガー（RTR-505、株式会社ティアンドデイ製）で収集した。測定して得られた本暗渠1本当たりの排出量（単位 m^3/h ）は、その本暗渠が排水に寄与する支配面積で除することにより、面積当たりの排出量（単位 mm/h ）として算出した。降雨量の測定には、雨量計（ECRN-50、デカゴン社製）を用いた。

試験2 心土破碎施工法の違いが地下排水に及ぼす影響

調査は宗像市の隣接した2筆の現地圃場で実施した。圃場面積はサブソイラ施工区が29a、パラソイラ施工区が37aであった。ピペット法により判定した両圃場の作土の土性はSC（砂質埴土）であった。本暗渠は圃場長辺と平行に約7m間隔で各々5本埋設されており、施工年数は20年以上、暗渠管直上の疎水材には砕石が使用されている。調査圃場の作付履歴は、水稻（2017年夏）→小麦（2017年冬）→大豆（2018年夏）であった。

心土破碎は、振動式サブソイラ（スガノ農機株式会社製、2本爪タイプ）とパラソイラ（松山株式会社製）を51馬力のトラクタでけん引して行った（第1図）。施工時期は麦作前の2017年11月とした。施工方法に関して、サブソイラは本暗渠に対して斜め方向、パラソイラは平行方向に施工した。

施工後の2018年8月17日に土壤貫入抵抗法を用いて土壤硬度を調査した。用いたデジタル土壤抵抗測定器（DIK-5504、大起理化学工業株式会社製）の測定値は垂直方向に5cm間隔で示した。測定場所は圃場内の12～16箇所を無作為に選定した。

大豆収穫前の2018年10月25日に100mL採土管により深さ約15～20cmの土壤を採取し、三相分布および乾燥密度、易有効水分量（ pF 1.5～2.7）、有効水分量の測定を行った。各項目の測定は土壤物理性測定法（土壤物理性測定法委員会1980）に従い、土柱法、加圧板法（DIK-3440、大起理化学工業株式会社製）、遠心法（SS-2000、株式会社佐久間製作所製）により行った。測定値についてはt検定を行い、*は5%水準で有意差があることを示した。

各施工区の暗渠排出量は次の通り調査した。各施工区の中央部の本暗渠 2 本を選定して 試験 1 と同様、パルス出力式水道メーターからの測定データをパルスデータロガーで収集した。得られたデータは面積当たりの排出量 (単位 mm/h) として算出し、2 本の暗渠排出量の平均値を求めた。降雨量の測定には、雨量計 (ECRN-50, デカゴン社製) を用いた。

第 1 表 試験に用いた心土破碎機の特徴

施工機	ナイフ数	ナイフ形状	ナイフ間隔
サブソイラ	2	前方に曲	約 120cm
パラソイラ	4	内側に曲	約 55cm



サブソイラ

パラソイラ

第 1 図 試験に用いた心土破碎機

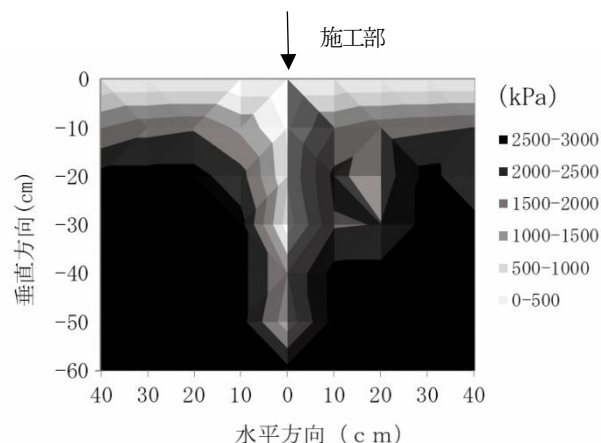
結果

試験 1 サブソイラによる心土破碎が地下排水に及ぼす影響

サブソイラ施工部の中心から幅 80cm、深さ 60cm までの土壌硬度分布を第 2 図に示した。施工部で垂直方向に土壌硬度が小さく、心土が破碎され亀裂が形成されている様子が確認できた。亀裂は深さ 50cm で、幅 20cm にわたっていた。施工部から離れるにつれて破碎された深さは浅くなり、心土破碎の効果は小さくなった。深さ 40cm までは 施工部から水平方向に幅 40cm 程度の範囲まで一部が破碎されたが、深さ 40~50cm では幅 20cm 程度の範囲で破碎されていた。

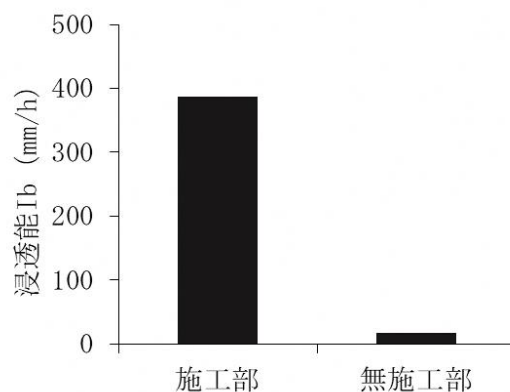
サブソイラ施工部と無施工部の浸透能 Ib (ベーシックインテークレート) を第 3 図に示した。施工部の浸透能 Ib は約 390mm/h で、無施工部の約 18mm/h と比較して約 20 倍の水準であった。

サブソイラの施工間隔毎の暗渠排出量の推移を第 4 図に示した。暗渠排出量を比較した降雨事象は、各々の試験区を設けた期間に 1 時間あたりの最大雨量が最も多かった事象 A (2016 年 11 月 19 日 2 時~7 時)、事象 B (2016 年 12 月 22 日 5 時~16 時)、事象 C (2017 年 2 月 22 日 17 時~23 日 1 時) とした。1 時間あたりの最大雨量は A が 18mm で最も多く、次いで B と C



第 2 図 サブソイラ施工部の土壌硬度分布

- 1) 黒矢印が施工部の中心
- 2) 測定は垂直、水平方向ともに 10cm 間隔で行った

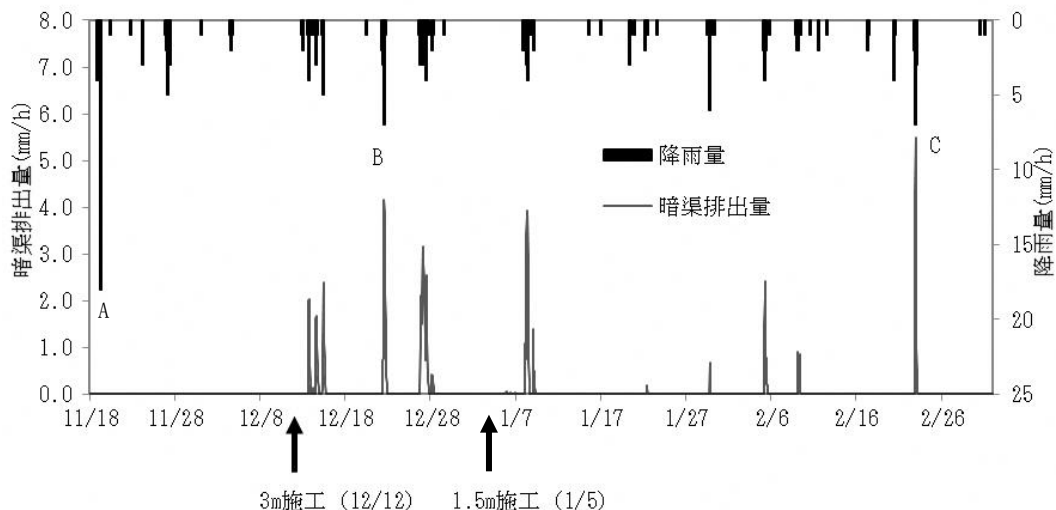


第 3 図 サブソイラ施工部と無施工部の浸透能

- 1) 浸透能はベーシックインテークレートで算出した
- 2) いずれも 5 箇所平均値

が 7mm で同等であった。総雨量 (降雨時間) は A が 35mm (6 h)、B が 26mm (12 h)、C が 19mm (9 h) の順に多かった (第 2 表)。

サブソイラ無施工区の 11 月 19 日 (A) の 1 時間あたりの最大雨量および総雨量が他の試験区よりも多かったにも関わらず、本暗渠からの排出はほとんど確認されなかった。一方で、12 月 22 日 (B) のサブソイラ 3m 施工区の 1 時間あたりの最大雨量および総雨量は 11 月 19 日 (A) の無施工区よりも少なかったにも関わらず、本暗渠から 4.1mm/h の排出が認められた。さらに施工間隔を狭めたサブソイラ 1.5m 施工区 (C) では、3m 施工区 (B) の雨量と同程度であったが、本暗渠からの排出量は 5.5mm/h で、3m 施工区を上回る水準であった。



第4図 サブソイラの施工間隔毎の暗渠排出量の推移

- 1) 2016年11月18日～12月11日に無施工区を調査した
- 2) 2016年12月12日～2017年1月4日に3m施工区を調査した
- 3) 2017年1月5日以降に1.5m施工区を調査した

第2表 サブソイラ施工間隔別の対象降雨事象の1時間あたりの最大雨量、総雨量およびピーク排出量

施工間隔 (m)	降雨 事象	1時間あたりの最大雨量 (mm)	総雨量 (mm)	ピーク排出量 (mm/h)
無施工	A	18	35	0.0
3	B	7	26	4.1
1.5	C	7	19	5.5

- 1) 降雨事象Aの期間は2016年11月19日2時～7時
- 2) 降雨事象Bの期間は2016年12月12日5時～16時
- 3) 降雨事象Cの期間は2017年2月22日17時～23日1時

試験2 心土破碎施工法の違いが地下排水に及ぼす影響

心土破碎施工法毎の土壌貫入抵抗値を第5図に示した。10cm深までの土壌貫入抵抗値は両試験区とも約550kPaと差が認められなかった。パラソイラ施工区では、20cm深で土壌貫入抵抗値が1700kPaと最大となった。一方、サブソイラ施工区では15cm深で2000kPa、20～25cm深で2300kPaと、パラソイラ施工に比べ土壌貫入抵抗値が高かった。このように、パラソイラ施工法はサブソイラ施工法と比較し15～25cm深の下層を膨軟にした。

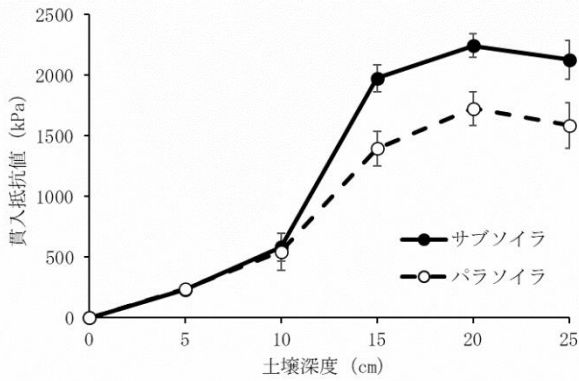
心土破碎施工法毎の下層土の物理性について第3表に示した。パラソイラ施工区では、サブソイラ施工区と比べ、易有効水分量が有意に高く保水性が優れていた。また、気相率が高く、乾燥密度が低い傾向であった。

第6図に心土破碎施工法毎の暗渠排出量を示した。2018年5

月6日9時から8日15時にかけての総雨量は90mm、1時間あたりの最大雨量は13mm/hであった。両試験区の暗渠からのピーク排出量は、サブソイラ施工区が4.1mm/h、パラソイラ施工区が3.3mm/hで、ともに高い排水効果が認められたが、パラソイラ施工区がサブソイラ施工区を上回る水準ではなかった。また、降雨終了後24時間までの暗渠排出寄与率（総暗渠排出量/総雨量）も、サブソイラ施工区が73%、パラソイラ施工区が66%と同水準であった。

考察

水田転換畑では、水稻作付時に形成される鋤床層が下層への水の浸透を妨げるため、暗渠排出量が減少し、排水不良が生じることが報告されている（足立・井上1989、永石1981）。サブソ



第5図 心土破碎施工毎の土壌貫入抵抗値

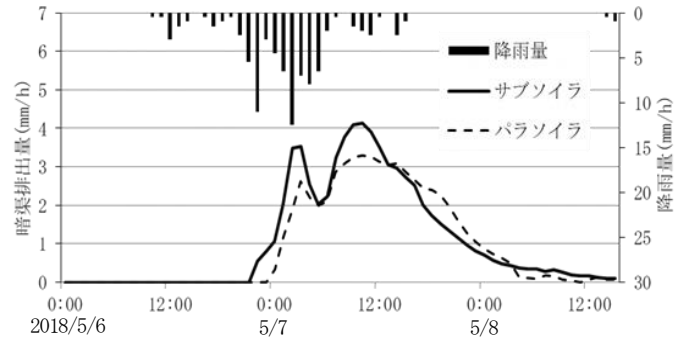
- 1) 値は平均値 (サブソイラ : n=16, パラソイラ : n=12)
- 2) 測定は2018年8月17日
- 3) バーは標準誤差を示す

第3表 心土破碎施工毎の下層土の物理性

試験区	三相分布			乾燥密度 (g/100mL)	易有効水分量 (%)	有効水分量 (%)
	気相率 (%)	液相率 (%)	固相率 (%)			
サブソイラ	4.0	41.1	54.9	1.44	2.6	8.9
パラソイラ	5.2	41.4	53.4	1.40	4.3*	10.0

- 1) 土壌採取深度は約15~20cm
- 2) 三相分布は吸引圧30cm時の値
- 3) 値は平均値 (n=6)
- 4) *はt検定により5%水準で有意差があったことを示す

イラ施工は鋤床層および心土を破碎することにより地下の排水経路を確保し排水性を向上させることから、排水対策技術として推奨されている。本試験ではまず、サブソイラ施工後の土層の破碎の状況を調査した。その結果、施工部と施工部から離れた箇所では土壌硬度が大きく異なり、サブソイラ施工により施工部を中心に土層内に切り込み溝と多数の亀裂が生じたと推測された。土層中に生じた亀裂程度が弾丸暗渠施工部分の浸透能に影響を与える(冠ら 2007)ことや、疎水材直上の土層の亀裂が水田における暗渠の排水性の程度に影響する(吉田・足立 2005)ことが報告されている。本試験では作土層から疎水材が投入されている深さ30~40cmの範囲において、土壌硬度の小さい範囲が、施工部中心から幅40cm程度で一部認められた。よって、施工部および施工周辺部で見られる溝や亀裂が作土層から疎水材までの排水経路となり、浸透能や暗渠からの排水性を向上させていることを確認できた。また、サブソイラ施工深度より深い地表面下50cmまで土壌硬度が小さくなっていた。通常、本暗渠は水田の場合、深さ50~60cmに設置されている(農林水産省 2017)。



第6図 心土破碎施工毎の暗渠排水量

- 1) 各圃場2本の暗渠排水量の平均値

このことから、疎水材として有機物などが利用されている水田で、分解により水の浸透能が低くなった場合でも、サブソイラ施工により生じた溝や亀裂が作土層から本暗渠までの排水経路となり、地下排水を促すことが可能であると考えられる。

次に、施工の有無や間隔の違いが暗渠からのピーク排水量に及ぼす効果を明らかにした。本試験では、各試験区の効果を1時間あたりの最大雨量が最も多い降雨事象を対象として、ピーク排水量を比較することで評価した。その結果、ピーク排水量は1.5m間隔の施工で最も多く、次いで3m間隔で多くなり、無施工ではほとんど排出が認められなかった。錦ら(2016)はピーク排水量1.25mm/hを基準として暗渠の排水能の評価を行っており、本試験において1.5m間隔、3m間隔ともに十分な排水性が期待できると判断された。施工間隔と排水性の関係に関しては、北倉ら(2004)は細粒強グライ土(作土:LiC)の圃場でサブソイラを3m間隔および1.5m間隔で施工した場合、深さ20cmまで5cm毎に測定した土壌水分は1.5m施工区で最も低く推移したと報告している。本試験では暗渠からの排水量で排水性を評価しているが、同様に1.5m間隔で排水効果が高いことが明らかとなった。以上の結果から、鋤床層が形成される排水不良の水田転換畑では、施工間隔を狭めた1.5m間隔の施工により、地下排水性の向上を図ることが望ましいと考えられる。

サブソイラは施工部を中心に局所的に下層土を破碎し、地下排水を促すことが明らかになった。一方で、パラソイラは内側に折れ曲がった4本のナイフで下層を広範囲に破碎する。この時の下層土の土壌物理性に与える影響や排水効果の詳細は不明であった。本試験の結果、土壌貫入抵抗値について、サブソイラ区は深さ15~25cmで2000kPa以上を示す一方で、パラソイラ区はそれより低い値を示した。一般に耕盤層は1500kPa以上の値を示し、作物根の伸長が困難になる土層とされている(中津ら 2004)。パラソイラ区ではこの耕盤層がサブソイラ区に比べて広範囲にわたって破碎され、膨大な作物根が伸長しやすい土層の範囲が広がっているものと考えられる。田中(2006)は、ナイフの

角度に応じた土層破碎の程度をシミュレーションしており、内側にナイフが折れ曲がるほど、ナイフ先端から地表面近くまで大きな亀裂が形成されることを報告している。よって、パラソイラの内側に折れ曲がったナイフの形状が下層土を含め広範囲に亀裂の発生を促し、土層を柔らかくしたと推察される。また、土壤物理性について、パラソイラ施工法はサブソイラ施工法と比較して、気相率や有効水分量が高い傾向にあり、易有効水分量が有意に高かった。これらのことから、パラソイラ施工法はサブソイラ施工法よりも広範囲にわたって心土破碎効果を持ち、孔隙量増加や保水力向上など下層土の物理性改善に大きく寄与することが明らかとなった。

サブソイラ施工法とパラソイラ施工法で実際の暗渠排出量を比較した結果、ピーク排出量はそれぞれ 4.1mm/h、3.3mm/h であり、両試験区ともに高い排水効果が認められたが、パラソイラ施工区がサブソイラ施工区を上回る水準ではなかった。施工法により暗渠排出量の違いが生じたのは、パラソイラ施工法では下層土の孔隙量増加や保水性が高くなった結果、地下へ浸透する余剰水が減少したことによると推察される。本試験ではサブソイラとパラソイラの施工方向が異なり、パラソイラは本暗渠に対して平行に施工している。このため、本暗渠上の疎水材部分との交点が少なく排水経路の形成が少ないことが推測される。よって、施工方向を本暗渠に対して直角方向または斜め方向に施工することで、暗渠排出量がより増加する可能性も考えられる。

以上のことから、サブソイラ施工法は施工部を中心に心土破碎効果が限られ、施工間隔を狭くするほど排水効果が向上することが明らかとなった。また、内側に折れ曲がった 4 本のナイフを特徴とするパラソイラ施工法は従来のサブソイラ施工法の暗渠排出量には及ばないものの高い排水効果を持つことに加えて、下層土の物理性改善にも高い効果があることが明らかになった。今後は県内の土性の異なる圃場において、排水状況や土壤物理性を考慮しながら、サブソイラやパラソイラのより効果的な施工方法を検討していく必要がある。

謝辞

今回の試験にあたり、現地圃場での作業、調査にご協力いただいた宗像市の生産者と北筑前普及指導センターの普及指導員に深く御礼を申し上げます。また、心土破碎機の準備から施工までご支援いただいたクボタアグリサービス株式会社福岡事務所に深謝の意を表す。

本研究の一部は、農林水産省委託プロジェクト「多収阻害要因

の診断法及び対策技術の開発」によって実施されたものである。

引用文献

- 足立一日出・井上久義(1989) 輪換田の代かきによる浸透抑制について. 輪換田の水移動に関する研究. 農土論集 140 : 19-26.
- 土壤物理性測定法委員会(編)(1980) 土壤物理性測定法. 養賢堂, 東京, p. 137-154, 169-173.
- 富士岡義一・佐藤晃一(1968) 粘質土壌水田の乾燥とキ裂について(Ⅲ). 農土論集 26 : 8-14.
- 福岡県農林水産部経営技術支援課(2010) 福岡県麦栽培技術指針. 福岡, p12.
- 福岡県農林水産部経営技術支援課(2014) 福岡県大豆栽培技術指針. 福岡, p3.
- 古木敏也・根岸久雄・上村春美・佐藤 寛(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(Ⅲ), 新潟県潟東地区における現地試験. 農土試報 10 : 141-166.
- 井上久義(1988) 亀裂が発達した粘土質圃場における暗渠排水特性. 農土論集 137 : 25-33.
- 冠 秀昭・岩佐郁夫・星 信幸・加藤 誠(2007) 水田輪作における弾丸暗渠の排水効果持続性と施工意義. 農業農村工学会論文集 75(4) : 453-461.
- 北倉芳忠・土田政憲・酒井 究(2004) 転換畑作におけるサブソイラを活かした灌・排水管理. 福井農試研報 41 : 47-56.
- 永石義隆(1981) 粘質水田における中干しの土壌排水効果. 農土誌 49 : 789-795.
- 中津智史・東田修司・沢崎明弘(2004) 耕盤層の簡易判定法と広幅型心土破碎による対策. 土肥誌 75(2) : 265-268.
- 根岸久雄・守屋 貢・多田 敦・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(Ⅳ), 新潟県高田地区における現地試験. 農土試報 10 : 167-205.
- 錦 秀斗・相澤直樹・冠 秀昭(2016) 浅層暗渠施工器を用いた圃場排水対策と大豆栽培への影響. 東北農業研究 69 : 45-46.
- 農林水産省 (2017) 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説計画 「暗渠排水」. 東京, p52.
- 小原勝蔵(1980) 水田における営農排水機械の開発と利用. 農業技術 35(3) : 108-113.
- 田中宏明(2006) 振動式サブソイラによる土層破碎の個別要素法(DEM)シミュレーション. 農業機械学会誌 68(4) : 13-17.
- 吉田修一郎・足立一日出(2005) 水田における暗渠直上の浸透能の空間的変動. 農土論集 73 : 35-41.