

第3章 圃場の排水性向上のための土層改良工法

第1節 資材を利用したカルチタイン式心土改良耕による土層改良

1. はじめに

重粘土に代表される堅密性が障害となる灰色台地土(横井ら, 2001a)は畑利用されている場合が多い。これまで、これら灰色台地土の畑に対して排水性などの土壌の物理的な欠陥を改善するためには、心土破碎を中心とする土層改良が実用されてきた。しかし、改良効果が短期間で消失する場合があることから、より効果的かつ持続性のある土層改良が望まれていた。特に、網走地方や十勝地方、上川地方には、土層全体が堅密かつ極めて透水性や通気性が劣る堅密固結性土壌が存在する。これら土壌では、土壌の堅密性が原因で根の伸長や塊茎の肥大に大きな障害を与えるため、これら地域の農産物の品質評価が低く、農業生産上からも解決すべき問題であった。

堅密固結性土壌に対する土層改良では、有効土層を根域発達に適した土壌物理性にする必要がある。また、その効果が圃場全体に広がりを持ち、かつ耐久性に優れた工法であることが望まれる。

従来の土層改良は、問題のある改良すべき作土層より下層の土を利用し、混層耕や心土耕によって、作土の化学性を改善することが目的であり、心土自体を改良することは最近になってからである。

そこで、これまでの土層改良であまり対象にしていなかった心土を改良する土層改良の充実が必要と考え、心土の物理性を面状に改良する粗大で完熟したバーク堆肥(バーク堆肥と記す。)を利用した心土改良耕について検討した。

本節では、堅密な心土を持つ土壌に対する土層改良技術であるカルチタイン式心土改良耕の施工技術を開発するとともに、施工効果、改良効果の持続性、適用条件を明らかにする。

2. 試験及び調査方法

1) カルチタイン式心土改良耕の概要

カルチタイン式心土改良耕は、心土の堅密な土層や作土直下に生成した耕盤層の通気性と保水性、透水性を面的に改善して、有効土層を増加させる。本工法は、心土耕の心土破碎部であるヘビーカルチタインにより面的に攪拌破碎するとともに、バーク堆肥の土壌改良資材を混和することで改良効果を持続させるようにした。本施工

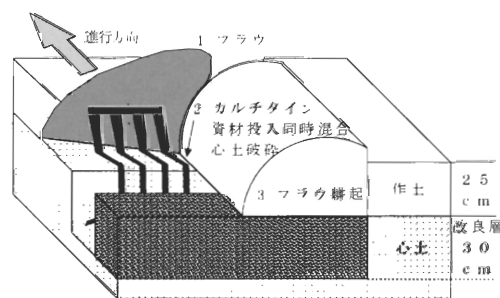


図3-1-1 カルチタイン式心土改良耕の改良概念図

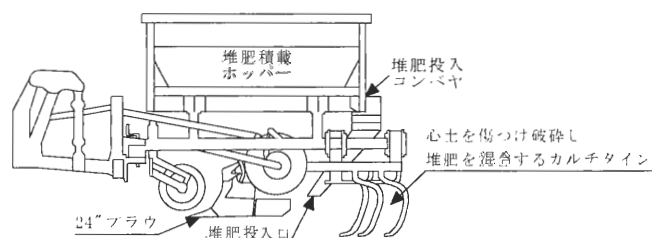


図3-1-2 カルチタイン式心土改良耕施工機の外観図



写真3-1-1 カルチタイン式心土改良耕の施工状況

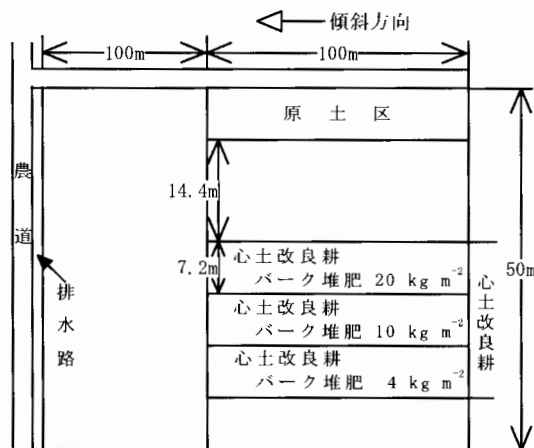


図3-1-3 カルチタイン式心土改良耕の試験圃場の概要

機は湿地10t級トラクタに直装し、図3-1-1のようにプラウにより作土をよけ、堅密な土層を表面に露出させ、その上に資材を散布すると同時にカルチタインにより破碎し資材を混合するものである。本試験では図3-1-2と写真3-1-1に示す北海道農業開発公社製の心土改良耕施工機を用いて施工した。その施工能力は0.08~0.12 ha h⁻¹であった。

2) カルチタイン式心土改良耕の施工効果

本試験ではカルチタイン式心土改良耕の効果を検証するため、美瑛町北瑛に原土区と改良資材としてパーク堆肥 4 kg m⁻²と10 kg m⁻²、20 kg m⁻²を施用したカルチタイン式心土改良耕区を1991年に設置した(図3-1-3)。このパーク堆肥投入量は、オープン式有材心土改良耕(横井ら, 2001b; 東田・北川, 2002)により60cm間隔の補助暗渠の施工に使用するパーク堆肥投入量である20~30 kg m⁻²を参考にして、それ以下になるように設定している。

心土改良耕の土壌物理性の改善効果を評価するため、施工圃場において、施工直後と施工後1年、3年、5年経過した作物収穫後に土壌断面調査を行い改良層の厚さを確認した。また、土壌物理性の改良効果の持続性を把握するため、改良層の中央で100cm³採土管を用いて試料を採取し、容積重、土壌三相、飽和透水係数、易有効水分量(-6.20~-100kPa)、全有効水分量(-6.20kPa~1.55MPa)、粒径組成(国際法)を分析した。

作付け作物は、1992年秋コムギ、1993年バレイショ、1994年テンサイ、1995年春コムギ、1996年サイトウである。処理区は1区720m²で栽培は現地慣行法に準じた。作物の収量への効果については、秋コムギの子実重とタンパク含量、バレイショの全イモ重と上イモ重、テンサ

イの根重と根中糖分、春コムギの子実重、サイトウの子実重と千粒重を計測した。また、カルチタイン式心土改良耕による根伸長の改善が養分吸収量に与える影響については、肥料成分のカリウムと同じ作物吸収性を示して自然界の存在量が極めて微量なルビジウムを用いて検討した。1995年の春コムギを作付け圃場の原土区と改良区としてパーク堆肥10 kg m⁻²区、20 kg m⁻²区において、根域が発達してきて生育量が旺盛になり始める7月初旬に0.05Lの臭化ルビジウム水溶液(Rbとして8000mg L⁻¹)を離れた畝間の深さ30cm以下と50cm以下に挿入管により注入して、1週間後に各1.2m²の面積の作物体を採取し、作物体中のルビジウム吸収量を計測した。作物体のルビジウムは原子吸光法により分析した。

さらに、心土改良耕の経済効果を比較するため、改良の費用の算定と1992年の秋コムギの収量から収益を算定して検討した。

3. 結果及び考察

1) カルチタイン式心土改良耕による土壌物理性改善効果と経年変化

カルチタイン式心土改良耕の効果検証に用いた堅密固結性土壌の土壌物理性は、表3-1-1に示すように、粒径組成が砂0.403~0.589 kg kg⁻¹、シルト0.099~0.368 kg kg⁻¹で土性がSC~CLである。心土の容積重が1.52~1.70 Mg m⁻³で固相が0.603~0.630 m³ m⁻³と大きく、下層ほど易有効水分量と全有効水分量が少ない。そのため心土は、土壌硬度が1.37~3.70 MPaと高く堅密なため、作物の根の伸長が阻害されるものと予想され、土壌物理性の改良が必要であった。

カルチタイン式心土改良耕の施工では、心土を作る膨軟な改良層を厚さは、地表から25cm以下に30cmの土層の厚さでパーク堆肥が混和された土層となることを計画で見込んでいたが、心土が極めて堅密であったため、改良層の厚さが15~20cmとなった。

施工後の心土の土壌物理性を1年経過と3年経過、5年経過時に調査した結果を表3-1-2に示した。1年経過では、心土の容積重が原土区で1.58 Mg m⁻³であったものが10 kg m⁻²区と20 kg m⁻²区の両方が1.2 Mg m⁻³程度まで減少し、固相率が原土区で0.627 m³ m⁻³から10 kg m⁻²区と20 kg m⁻²区で0.43 m³ m⁻³に減少した。それに伴い、気相率が原土区で0.029 m³ m⁻³から改良区で0.11~0.18 m³ m⁻³に、易有効水分量が原土区で0.042 m³ m⁻³から改良区で0.086~0.106 m³ m⁻³と増加し、さらに、飽和透水係数が10⁻⁶ m s⁻¹まで増加した。この改良された心土は、堅密性が和らぎ、通気性や保水性が改善され、作物の根

域となり得た。これは、カルチタインの破碎による膨軟化が大きく影響して、容積重が小さく、気相率が多くなったものと考えられる。加えて、保水性の大きい有機物が投入されたことによって、易有効水分量と全有効水分量がやや増加したことによると推察された。

3年が経過しても、容積重が4kg m⁻²区で1.45Mg m⁻³、10kg m⁻²区で1.31Mg m⁻³、20kg m⁻²区で1.13Mg m⁻³と原土区の1.57 Mg m⁻³より小さい。また、気相率は、4 kg m⁻²区で0.06m³ m⁻³、10kg m⁻²区で0.08m³ m⁻³、20kg m⁻²区で0.12m³ m⁻³といずれの処理区でも原土区の心土の2倍以上あり、改良効果が持続していた。改良層の物理性は、20kg m⁻²区で1年を経過した時と変わらずに容積重や気相率、易有効水分量が維持されており、より多く投入された粗大なバーク堆肥が物理性の変化を遅らせていると考えられた。

5年が経過すると、4 kg m⁻²区は、容積重が低いものの、液相率が高いため、改良層のバーク堆肥のムラが影響していたが、改良効果が残っていると推察できた。10 kg m⁻²区で容積重が1.45Mg m⁻³とやや増加、気相率や易有効水分量、全有効水分量は変化なかった。20kg m⁻²区では容積重が1.26Mg m⁻³まで増加し、気相率、易有効水分量、全有効水分量が減少傾向にある。しかし、いずれの改良区においても、原土区の心土の物理性より通気

性や保水性の改善効果が依然として続いていた。特に、バーク堆肥10kg m⁻²以上では、施工直後に比べ変化はあるものの、依然として良好な物理性であった。

2) カルチタイン式心土改良耕の作物に及ぼす影響

(1) カルチタイン式心土改良耕が作物の根吸収に及ぼす影響

カルチタイン式心土改良耕の作物に対する利点は、有効土層の増加にともない根域を増加させ、根の養分吸収を改善することにある。そこで、根域が広がることが望まれるコムギを用いて、作土の深さ30cm以下と改良土層の最深部までの根伸長を確認するため深さ50cm以下に臭化ルビジウム水溶液を注入し、作物に吸収されたルビジウムの吸収量を比較した。その結果、図3-1-4のように原土区に比べ10kg m⁻²区、20kg m⁻²区の順にルビジウム含有量が深さ30cm、50cmの両方で増加した。特に、バーク堆肥20kg m⁻²区では、改良層の容積重が低下して気相率が大幅に増加した改善効果により、根が改良層の最深部まで伸長しやすくなったことから、原土区に比べ30cmで3.5倍、50cmで2.0倍の養分を吸収したものと考えられた。このことから、カルチタイン式心土改良耕は、堅密な心土を膨軟で通気性の良い土層に改善して、作物根の養分吸収を改善したと評価される。

表3-1-1 試験圃場の土壌物理性

層位	深さ (cm)	腐植 (kg kg ⁻¹)	容積重 (Mg m ⁻³)	土壌三相(m ³ m ⁻³)			易有効水分量 (m ³ m ⁻³)	全有効水分量 (m ³ m ⁻³)	飽和透水係数 (m s ⁻¹)	粒径組成 (kg kg ⁻¹)			国際法土性	山中式土壌硬度 (Mpa)
				固相	液相	気相				砂	シルト	粘土		
Ap1	0-14	0.020	1.340	0.500	0.409	0.091	0.156	0.178	3.4×10 ⁻⁶	0.536	0.297	0.167	CL	0.22
Ap2	14-29	0.019	1.450	0.543	0.398	0.059	0.096	0.157	4.1×10 ⁻⁸	0.535	0.296	0.169	CL	0.84
BC	49-41	0.005	1.570	0.603	0.378	0.019	0.068	0.125	5.9×10 ⁻⁸	0.403	0.368	0.229	CL	1.37
BCg	41-	0.002	1.700	0.630	0.359	0.012	0.030	0.109	1.1×10 ⁻⁹	0.589	0.099	0.312	SC	3.70

注)易有効水分量は-6.20~-100kPa、全有効水分量は-6.20kPa~-1.55MPa

表3-1-2 カルチタイン式心土改良耕の物理性改善効果

経過年数	処理区 (堆肥投入量)	深さ (cm)	容積重 (Mg m ⁻³)	土壌三相(m ³ m ⁻³)			易有効水分量(m ³ m ⁻³)	全有効水分量(m ³ m ⁻³)	飽和透水係数 (m s ⁻¹)
				固相	液相	気相			
1年	原土区	31-41	1.580	0.627	0.344	0.029	0.042	0.170	5.9×10 ⁻⁸
	4kg m ⁻² 区	-	-	-	-	-	-	-	-
	10kg m ⁻² 区	29-45	1.181	0.438	0.378	0.113	0.086	0.210	1.2×10 ⁻⁶
	20kg m ⁻² 区	28-48	1.151	0.423	0.397	0.180	0.106	0.245	5.8×10 ⁻⁶
3年	原土区	30-40	1.566	0.58	0.389	0.031	0.044	0.175	1.4×10 ⁻⁸
	4kg m ⁻² 区	29-42	1.450	0.543	0.398	0.060	0.096	0.186	4.1×10 ⁻⁷
	10kg m ⁻² 区	30-45	1.314	0.497	0.421	0.082	0.082	0.200	3.7×10 ⁻⁶
	20kg m ⁻² 区	29-45	1.132	0.417	0.463	0.120	0.120	0.240	9.6×10 ⁻⁶
5年	原土区	30-40	1.608	0.606	0.374	0.020	0.050	0.181	1.1×10 ⁻⁸
	4kg m ⁻² 区	29-39	1.222	0.470	0.475	0.055	0.125	0.220	1.7×10 ⁻⁶
	10kg m ⁻² 区	30-44	1.447	0.535	0.384	0.081	0.081	0.195	8.3×10 ⁻⁶
	20kg m ⁻² 区	30-44	1.259	0.473	0.424	0.103	0.115	0.212	8.6×10 ⁻⁶

注)易有効水分量は-6.20~-100kPa、全有効水分量は-6.20kPa~-1.55MPa

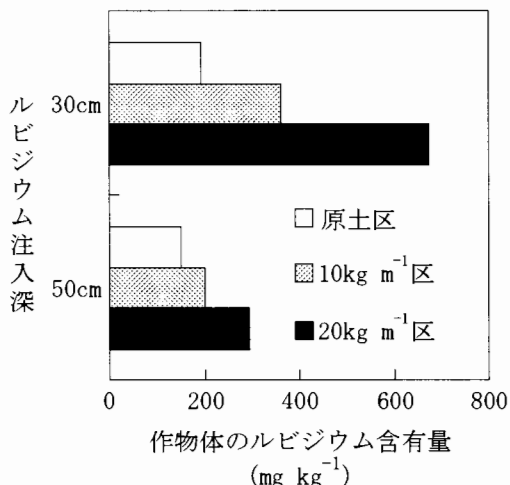


図3-1-4 カルチタイン式心土改良耕がコムギの根の養分吸収に与える影響

(2) カルチタイン式心土改良耕が作物収量に及ぼす影響
カルチタイン式心土改良耕が作物収量に及ぼす影響について表3-1-3に示す。

改良後の1年目に深根性の秋コムギを作付けし、根域拡大による改良効果を確認した。秋コムギでは改良を施したいずれの区でも収量が大きく増加し、パーク堆肥4~10kg m⁻²区までの増収率が顕著であった。また、原土区では水分ストレスにより子実のタンパク含量が0.082 kg kg⁻¹と低値であったが、改良区では根域が拡大して登熟時の水分吸収が良好になったことが予想され、タンパク含量が0.1kg kg⁻¹付近の適正值となった。このことから、秋コムギには、土壤の気相率や易有効水分量が高い土層の拡大効果が大きかった。しかし、パーク堆肥20 kg m⁻²区では、収量水準の上限に近いと考えられ、ここまでの改良の必要性はないと判断できる。

バレイショは培土の確保や塊茎の肥大のため有効土層が深いことが有利に働く。バレイショは改良区の全イモ重が5~6%増加した。生食用の規格内品の上イモ重は、心土の容積重の低下した土層が増えた影響により、改良区で3~10%増加した。バレイショには、心土を破碎攪乱して膨軟な土層が増加した効果が大きく、パーク堆肥投入量による差は明確でなかった。

表3-1-3 カルチタイン式心土改良耕の作物収量に与える影響

処理区 (堆肥投入量)	秋コムギ(1992年)		バレイショ(1993年)		テンサイ(1994年)		春コムギ(1995年)		サイトウ(1996年)
	子実重 (Mg ha ⁻¹)	タンパク含量 (kg kg ⁻¹)	全イモ重 (Mg ha ⁻¹)	上イモ重 (Mg ha ⁻¹)	根重 (Mg ha ⁻¹)	根中糖分 (kg kg ⁻¹)	子実重 (Mg ha ⁻¹)	子実重 (Mg ha ⁻¹)	千粒重 (g)
原土区	5.65(100)*1	0.082	40.45(100)	34.67	62.68(100)	0.178	3.09(100)	1.55(100)	304
4kg m ⁻² 区	6.62(117)	0.090	43.01(106)	37.93	79.36(127)	0.193	—	1.84(119)	289
10kg m ⁻² 区	7.27(129)	0.105	42.64(105)	35.52	70.19(112)	0.180	3.35(108)	2.70(174)	319
20kg m ⁻² 区	7.23(128)	0.096	42.80(106)	37.96	70.51(112)	0.181	4.74(153)	3.23(208)	357

*1 各作物の収量の横に記載した()内の数値は、原土区を100として比較した各処理区の相対値である。

*2 バレイショの上イモ重は、1個重が60g~360gのイモである。

同様に深根性のテンサイでもパーク堆肥の投入量にかかわらず、改良区で12~27%もの根重が増加した。これは、膨軟で通気性の良い土層が増加した効果と思われた。特に、乾物生産量が多く施肥量の多いテンサイでは、下層に投入されたパーク堆肥から緩慢に供給される窒素地力が収量に与える影響が少ない。このことから、テンサイには、土層を攪乱して土壤物理性を改善して根域を拡大する意義が大きかった。

春コムギは、根域が広がる土壤で生育が旺盛になり、収量が増加する。そのため、原土区の土壤物理性では、収量水準が低くなる。有効土層が深く、物理性の改善が顕著なパーク堆肥20kg m⁻²区の春コムギの収量は、容積重の低下と易有効水分量の増加による養水分吸収の増加により根域が改善され、栽培上の目標収量4.0Mg ha⁻¹以上に達した。これは、根域拡大とともに、堆肥による保水性の向上が春コムギの登熟時の吸水に寄与し、収量が増加したためと推察された。

サイトウはパーク堆肥の投入量に応じて収量が増加した。これは、サイトウが物理性の不良により原土区の収量が極端に低かったため、パーク堆肥10~20kg m⁻²区の土壤物理性が改善された改良区で地域の平均収量となったことによる。このような土壤物理性の改善によって、適正な収量水準になったことで、高い増収率となった。

カルチタイン式有材心土改良耕の作物収量への効果から見た経済性について、1992年のコムギの収量から算定し検討した結果を表3-1-4に示す。カルチタイン式有材心土改良耕の施工費は堆肥量が多くなるにしたがい増加する。しかし、作物収量及び粗収益の増加率は、パーク堆肥4~10kg m⁻²区当たりで緩やかになる。経費と圃場整備費を引いた所得は、パーク堆肥10kg m⁻²区以上で、粗収益の増加より圃場整備費の増加が上回るため所得が低下する。

以上のカルチタイン式心土改良耕による作物収量への影響と、経済性から見た効果を勘案すると、カルチタイン式有材心土改良耕に用いるパーク堆肥の投入資材量は、4~10kg m⁻²区の範囲内が適切と考えられた。

表3-1-4 カルチタイン式心土改良耕の作物収量から見た経営的評価

処理区 (堆肥投入量)	資材費 (千円 ha ⁻¹)	施工機械費 (千円 ha ⁻¹)	施工費*1 (千円 ha ⁻¹)	秋コムギ(1992年)				
				粗収益*2 (円 ha ⁻¹)	経営費*3 (円 ha ⁻¹)	圃場整備費*4 (円 ha ⁻¹)	所得 (円 ha ⁻¹)	所得 指数
原土区	—	—	—	857,858	857,858	—	472,758	100
4kg m ⁻² 区	95	577	672	1,005,137	1,005,137	44,800	575,237	122
10kg m ⁻² 区	238	720	958	1,103,828	1,103,828	63,867	654,862	139
20kg m ⁻² 区	477	958	1,435	1,097,755	1,097,755	95,667	616,988	131

*1 施工費は資材費と施工機械費の合計。

*2 コムギは農林水産省(1992b)の政府買入価格(Ⅱ類1等)

*3 経営費は農林水産省(1992a)の農林水産省(1992)の10a当たり小麦生産費。

*4 圃場整備費は施工費を事業実施上の土層改良の耐久年数15年(農林水産省, 1993)で除した値。

表3-1-5 カルチタイン式心土改良耕の施工の目安

土壌物理的な要因 (対象となる土壌)	心土や耕盤層が堅密で、地下水の影響がない土壌 (褐色森林土、黒ボク土)	
心土の山中式土壌硬度(MPa)	0.72MPa以上1.37MPa未満	1.37MPa以上
資材投入量(kg m ⁻²)	バーク堆肥 4 kg m ⁻²	バーク堆肥 5 ~ 6 kg m ⁻²

3) カルチタイン式心土改良耕の施工の目安

カルチタイン式心土改良耕は地下水位が低く、心土が堅密な土壌に対して行う工法である。施工対象となる土壌は褐色森林土や黒ボク土などで、耕盤層など下層に堅密層のある半湿性から乾性の土壌である。

カルチタイン式心土改良耕に用いるバーク堆肥の量は、作物収量と経済性から4~10kg m⁻²が適当な範囲と考える。施工効果の発現からは、資材の投入量が多いことが望まれ、その後の効果を長期間維持できると考える。ここでは、草地更新時などの圃場造成時の適切な投入量(北海道農政部, 2005)を勘案してバーク堆肥投入量の上限を6kg m⁻²とした。これらを勘案し、カルチタイン式心土改良耕の施工の目安を表3-1-5に示した。カルチタ

イン式心土改良耕は、心土の堅密性に合わせ、堅密な場合にバーク堆肥投入量を増すようにして、バーク堆肥投入量を2区分にした。心土の堅密性は、山中硬度計指示値で評価する。バーク堆肥投入量は、土地改良による心土破碎の必要条件(北海道農政部, 1996a)である0.72MPa以上から堅密固結性土壌の心土の指示値である1.37MPaまでを4kg m⁻²とし、山中硬度計指示値が1.37MPa以上のより堅密な心土に5~6kg m⁻²として、より高い改良効果をねらった。

このように施工されたカルチタイン式心土改良耕は、5年を経過しても土壌物理性の改善及び作物収量への効果が持続していた。

第2節 資材を利用しない掘削式穿孔暗渠による土層改良

1. はじめに

これまで圃場の排水性は、暗渠や弾丸暗渠、心土破碎により改良されてきた。その中でも、暗渠は土壌中の余剰水を排除する最も有効な手段である。しかし、暗渠管や疎水材を用いる暗渠排水は、主に基盤整備事業により実施され、整備の費用が高く個人での実施が困難である。しかも、直ちに改良が必要な場合や、圃場の一部を施工する場合には事業による対応が困難であった。これに対して、整備費用が安価な営農による簡易的な排水改良として、弾丸暗渠や心土破碎が普及してきた（千葉，1974；新垣，1988；甲谷ら，1990）。これに加えて、暗渠管に近い役割と排水効果を持ちながら資材を用いず、生産者が営農管理として費用を負担できるコストで、耐久性があり、必要な時に直ぐに対応できる排水改良技術が求められていた。

この要望に対処するため、これまでに暗渠管を用いない、低コストで、必要な時に直ぐに施工できることを追求した排水改良技術である穿孔暗渠が提案されていた。これまでの穿孔暗渠(Maguire and Miller, 1954；鈴木，1989)は、幅10cm、深さ100cmの溝をトレンチャなどで掘削して、溝の横側の土を幅10cm又は20cm、地表から深さ50cmまで、大きな切断ナタで縦長の長方形土塊に切り、掘削溝側に寄せ倒すことで土蓋として閉じ、幅10cm、深さ50～100cmに溝空洞を形成する工法であった。そのため、掘削溝を閉める土蓋が繊維状で崩れにくい泥炭である場合は、泥炭の蓋が崩れず空洞が埋まることがない。しかし、掘削溝を閉める土蓋が土壌の場合は、土壌の蓋が崩れやすく空洞が埋まりやすい。特に、客土層や作土層が厚い土壌では土蓋が崩れて空洞が埋まりやすい。そのため、客土層の浅い泥炭で土蓋の部分泥炭となる場合に限定される工法であった。

そこで、穿孔暗渠の適用性を拡大するために改善を施したトレンチャ掘削式穿孔暗渠（以下、穿孔暗渠と記す。）による排水効果と作物生育への影響、耐久性などを検証するとともに、本工法においても施工が困難で耐久性に劣る土壌を整理して適用条件を明らかにした。

2. 試験及び調査方法

1) 穿孔暗渠の基本概念

穿孔暗渠は、弾丸暗渠と同様に、暗渠管等の資材を用いない排水改良技術である。北海道における従来の低コスト排水改良である弾丸暗渠は、深くまで耕耘管理され

る畑で広く用いられ、40～60cm程度の深さに円錐形の弾丸を挿入し貫入孔を押し広げて成形する技術であった。この広げられた貫入孔は、土圧により小さくなったり、貫入孔へ土塊が崩落する土壌もあった。この弾丸暗渠の改善としては、シートパイプ方式の検討（杉山・津田，1990）が進められ、府県の転換畑で用いられている。しかし、プラウ耕や心土破碎を行う畑では、これらの作業深が深く、シートパイプを破損する懸念から普及していない。

穿孔暗渠の施工法は、北海道暗渠排水設計指針（北海道農政部，1998；2002a）及び土地改良事業計画設計基準暗渠排水（農林水産省，2000）の補助暗渠「切断暗渠及び穿孔暗渠（無材）」として弾丸暗渠と別に説明されている。穿孔暗渠の排水効果は、弾丸暗渠と同じく、土壌中の余剰水を心土に作成した空洞により圃場外に排除することで発現する。弾丸暗渠と異なる点は、土壌を押し広げずに掘削して空洞を形成することである。

穿孔暗渠の施工には、図3-2-1に示すトラクタ直装のトレンチャ掘削機を用いる。穿孔暗渠の溝空洞は、①60～120cmまでの任意の深さに深さに、と下部に直径20cmの円形空洞とその上方に幅7cm程度の縦溝の空洞をトレンチャにより掘削し、②掘削と同時に縦溝空洞の途中から溝壁面を寄せて重ねた土蓋により溝を閉じて閉蓋

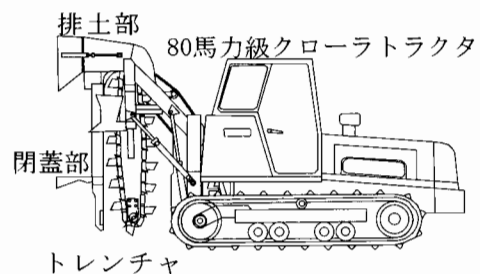
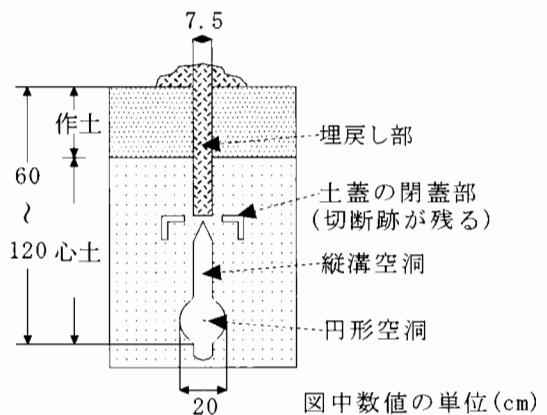


図3-2-1 トレンチャ式穿孔暗渠施工機



図中数値の単位(cm)

図3-2-2 トレンチャ式穿孔暗渠の断面図

部を作り、③この土蓋で閉めた位置より上の開口している空洞を、掘削土で埋め戻すことで、溝空洞を保持する。したがって、図3-2-2のように縦溝の下部と円形の空洞はくり抜かれた状態になる。穿孔暗渠は、弾丸暗渠と異なり施工時に空洞壁面への土圧が小さく、掘削溝の土壁を圧縮せず、弾丸暗渠に見られる破碎爪による抵抗で発生する亀裂もなく、溝空洞が維持されやすい。また、溝空洞は弾丸暗渠より大きく成形され、溝空洞の最深部は120cmから60cmの浅い位置まで調整が可能である。さらに、これまでの穿孔暗渠と異なり、土蓋を閉じる時に表土が溝に崩落することがないという利点を有する。

2. 試験及び調査方法

穿孔暗渠の排水性、作物生育に及ぼす影響、耐久性と経済性を評価するため、表3-2-1に示す試験圃場を設け以下の試験項目について調査を行った。試験圃場の穿孔暗渠の施工間隔は、暗渠管等を用いた暗渠の間隔を参考に10mとした。ただし、実際には排水状況により穿孔暗渠の施工間隔を5m程度まで狭めることがある。穿孔

暗渠末端の落水部は排水路の法面に掘り抜いてある。

穿孔暗渠の排水性は、降水量に対する暗渠排水量の割合（流出率）で評価した。測定は排水口にパイプを挿入して電磁流量計（愛知時計電機株式会社製）を接続して、転換畑A圃場で施工直後と2年経過時に行った。

作物生育への穿孔暗渠の効果を見るため、施工圃場と隣接する未施工圃場において秋コムギ（転換畑A圃場）、キャベツ（転換畑D圃場）、オーチャードグラス（採草地F圃場）を農家慣行で栽培して比較した。

穿孔暗渠の耐久性については、施工圃場の土壌断面調査を適時に行い、溝空洞の形状や溝空洞周辺の亀裂などの土壌状態を観察し評価した。この時に溝空洞周辺の硬度を山中式土壌硬度計で測定した。また、試験圃場7箇所と穿孔暗渠の施工圃場35箇所から採取した土壌試料を用い、粒径組成、コンシステンシーを分析し、穿孔暗渠が適用できる土壌の物理性を検討した。施工性は転換畑A圃場と採草地G圃場での施工時の機械走行速度を計測し施工効率から判断した。施工費は北海道での基盤整備事業による工事単価を用い試算した。

表3-2-1 試験圃場一覧

市町村	地目 圃場名（施工後経過年数）	土壌型	圃場規模
新篠津村	転換畑 A（0～4年）、B（5～10年）、C（7年）	泥炭土	3圃場共に0.5ha
南幌町	転換畑 D（4年）	泥炭土	0.5ha
長沼町	転換畑 E（0～5年）	低地土（グライ土）	3.5ha
標津町	採草地 F（3年）	泥炭土	2.0ha
滝川市	採草地 G（0～2年）	台地土（灰色台地土）	0.5ha

- 1) 試験圃場の表記は地目と圃場区分による「転換畑A圃場」とする。
- 2) 対照圃場は各試験圃場に隣接する無施工圃場とした。
- 3) 穿孔暗渠の施工に適する土壌条件調査のため、上記以外の新篠津村・南幌町・長沼町の35カ所の穿孔暗渠施工圃場で土壌採取を行い分析に用いた。

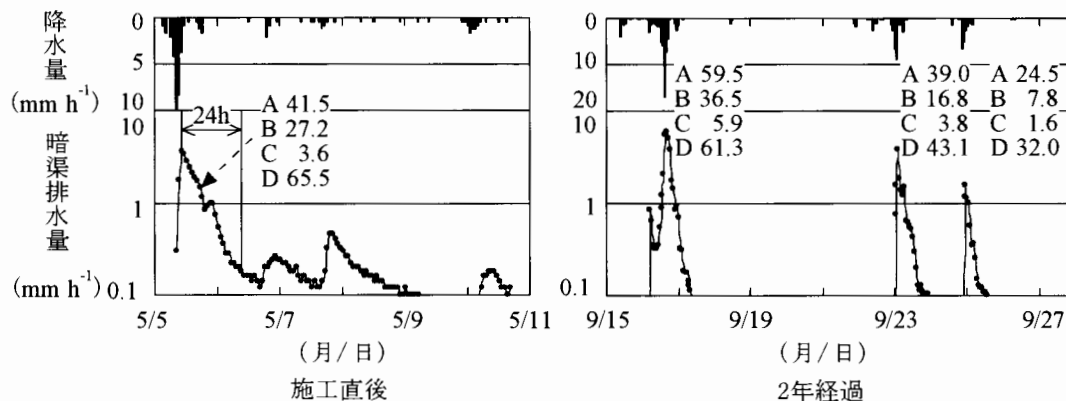


図3-2-3 穿孔暗渠の暗渠排水量

A:24時間降水量(mm) C B:24時間排水量(mm)、C:ピーク排水量(mm h⁻¹)、D:流出率(%)

3. 結果及び考察

1) 穿孔暗渠の排水性

施工直後の穿孔暗渠は、降雨後のピーク排水量が最大3.6mm h⁻¹で、その時の24時間排水量が27.2mm となり、期間内の降水量に対する暗渠への流出率が65.5%と、暗渠管等を用いる暗渠と同様に（村島・荻野, 1990b; 農林水産省, 2000）、降雨による余剰水を排除する機能を有していた。排水性の経年変化を把握するため、2年経過時に同一圃場で暗渠排水量を測定した。その結果、穿孔暗渠は、ピーク排水量が最大5.9mm h⁻¹で、各降雨時の24時間排水量が7.8~36.5mmとなり降水量に対する暗渠への流出率も32.0~61.3%と依然として降雨後から余剰水を排除していた（図3-2-3）。このように、2年後でも穿孔暗渠は、溝空洞の崩落などにより短期間で排水機能を消失することがなかった。

2) 穿孔暗渠の作物に及ぼす影響

表3-2-2には穿孔暗渠が作物に及ぼす影響を示した。秋コムギでは、排水性の善し悪しが発病に影響する雪腐

れ病が穿孔暗渠によりやや軽減され、穂数や子実重の増加が認められた。

キャベツでは、穿孔暗渠により過湿が回避されるなどの根圏環境が改善されたため収量も増加した。穿孔暗渠が未施工の採草地は、排水不良により機械作業が不可能で十分な草地管理が行われず、湿性の雑草が著しく侵入し牧草生育も極端に悪かった。しかし、穿孔暗渠の施工区では、滞水が軽減され湿性雑草が減少するとともに牧草収量が増加した。また、施工後には適時に機械が走行できるようになり、管理作業面での効果も大きかった。

以上のように、排水性の改善効果はいずれの作物の生育に対しても大きかった。

3) 穿孔暗渠の耐久性と適用条件

(1) 耐久性

余剰水を通水する空洞が維持されることは、穿孔暗渠の排水性を維持する上で最も重要な条件となる。ここでは図3-2-4に示した穿孔暗渠施工部の土壤断面調査結果に基づき、通水機能の低下を空洞の形状変化から検討

表3-2-2 穿孔暗渠が作物生育・収量に与える効果

処理場	秋コムギ (転換畑A圃場)			キャベツ (転換畑D圃場)			オーチャードグラス (採草地F圃場)	
	雪腐れ病の発病度 (%)	穂数 (本 m ⁻²)	子実重 (Mg ha ⁻¹)	全重 (Mg ha ⁻¹)	規格内収量 (Mg ha ⁻¹)	窒素吸収量 (g m ⁻²)	生草収量 (Mg ha ⁻¹)	乾物収量 (Mg ha ⁻¹)
穿孔暗渠区	70 (多)	364	4.88 (111)	76.1	42.2 (106)	15.2	4.10	0.897 (191)
対照区	78 (甚)	314	4.41 (100)	71.1	39.7 (100)	14.8	1.75	0.469 (100)

1) オーチャードグラス圃場は荒廃草地で無肥料栽培である。収量は一番草でリードカナリーグラス及び雑草を含む。

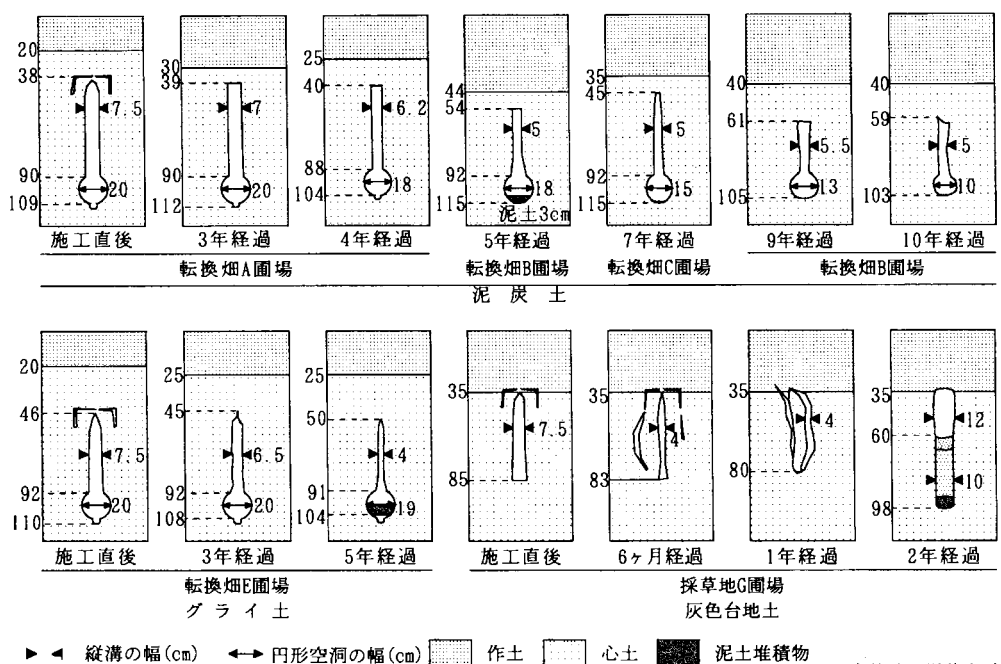


図3-2-4 穿孔暗渠の溝空洞の経年変化

した。泥炭土では溝空洞の形状が計画どおり成形され、崩落防止の蓋状に閉める作業も適正で崩落することがほとんどなかった。3～4年経過では、閉蓋部の土蓋の閉め跡が明確でなくなり、空洞に通水跡の泥土付着があったものの溝空洞の形状に大きな変化は見られなかった。5～7年が経過すると、溝空洞の上部が5 cm まで狭くなり、円形の空洞の下部に3 cm程度の泥土堆積が確認される場合もあった。さらに、9～10年が経過すると施工直後に比べて空洞は大きく変形していた。10年経過の溝空洞では断面積が施工直後に比べ40%減少したが、溝空洞は依然として維持されていた。したがって、泥炭土では穿孔暗渠の溝空洞の形状が10年程度まで維持され空洞の通水機能が確保されており、本工法は泥炭土の排水改良に適していると結論できる。

低地土の中でも排水不良を呈するグライ土は、土壤水分が十分にあり、塑性領域に保たれていたため、穿孔暗渠の形及び蓋状に閉めた部位が泥炭土よりきれいに成形された。グライ土における溝空洞の形状は安定しており、3年経過しても溝空洞がやや減少する程度であった。5年経過すると、溝空洞周辺の土壌は安定しているが、形状変化及び土壌崩落につながる亀裂の発生が目立つようになり、これは泥炭土より早かった。したがって、グライ土を含む粘質な低地土では、5年以上経過すると溝空洞の形状が一層変形・縮小し、通水機能が低下すると推察される。

一方、堅密な灰色台地土では、掘削時の抵抗を軽減させるため下部の円形空洞を除いて長方形の縦溝空洞だけにすることで、辛うじて溝空洞を成形できた。しかし、灰色台地土の穿孔暗渠は、施工後6ヵ月で閉蓋部周辺から大きい亀裂が発生し、1年が経過すると土塊が崩落して溝空洞が閉塞し、通水機能が消失した。

(2) 泥炭土への適用

穿孔暗渠は、多くの泥炭土で施工できるが、掘削に支障となる直径が5 cmを超える未分解の埋木が多い圃場では施工が困難である。ただし、埋木が細かい場合は、掘削機で切断が可能である。また、埋木が少ない場合は、埋木を回避するように配線を工夫することで施工が可能となる。なお、埋木の有無は、過去の圃場整備や排水改良、心土破碎時の状況を生産者から聞き取り、施工前に把握することが必要である。

本試験を含めて泥炭土の圃場の多くは、明渠などによる排水対策が施されており、泥炭の含水比が 6.0kg kg^{-1} 未満と中庸で安定している。このような圃場では、穿孔暗渠の耐久性も大きい。これに対して、これまで排水対

策が実施されていない高含水比の泥炭圃場では、穿孔暗渠により急速な脱水収縮が起こり、溝空洞の減少と穿孔暗渠周辺の沈下により穿孔暗渠の耐用年数が短くなることが予想される。

(3) 低地土への適用

穿孔暗渠は、土壌を掘削して成形し、溝空洞を作り余剰水を通水させる。そのため、土壌の形を維持する性質は、穿孔暗渠の適用性と耐久性に大きく影響する。ここでは、低地土における穿孔暗渠の適否を、土壌の水分による変形の性質を示すコンシステンシーと粒径組成から評価するため図3-2-5を作成した。

まず、液性限界が低い低地土では、短期間で空洞内の通水に伴い空洞周辺から土壌の崩落が発生したため穿孔暗渠が適さなかった。その土壌は、液性限界が45%未満で、塑性指数が0.2未満と小さく、少ない土壤水分の変化でも崩れやすかった。その土壌の国際法土性はSLやSCLなどで砂質であった。一方、液性限界が45%を超える低地土では、塑性指数が小さい場合でも短期間で空洞が変形しない。また、これらの土壌の国際法土性は、HCとLiC、CLなどであり、穿孔暗渠が不適な土壌との区分が明確であった。

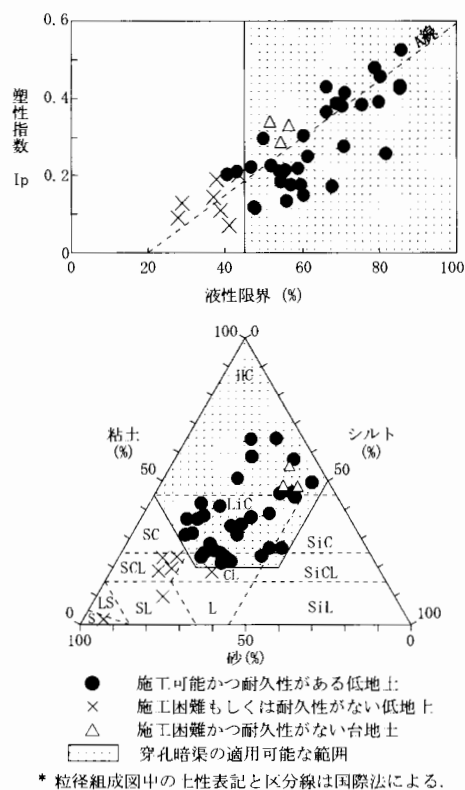


図3-2-5 コンシステンシーと粒径組成から見た穿孔暗渠の適用範囲

このことから、穿孔暗渠の耐久性が確保されやすく、適用可能と判断される低地土は、液性限界が45%以上で、粘土含量20%以上、シルト含量50%未満、砂含量55%未満を同時に満たす、国際法土性でHCとLiC、CL付近の土壌である。なお、コンシステンシーは土の形状を維持する性質を示すのに適しているが、一般的な土壌診断項目となっていない。実用場面での穿孔暗渠の適用性判断は、液性限界区分と粒径組成区分の両方ともに穿孔暗渠の適否が明確であることから、土壌調査で行う粒径組成区分による判定で支障ない。

(4) 台地土における制約要因

台地土は、土性がHCと、粒径組成が穿孔暗渠に適していると区分されるが(図3-2-5)、土壌の崩落が発生しやすく耐久性が低地土に比べて劣る。これは季節による土壌水分の変動が大きいため、土壌断面の結果から土壌の崩落の発生を次のように考えた。台地土では、夏季に強度の乾燥状態になりやすく、強制的に土を寄せた閉蓋部の周囲で乾燥収縮により亀裂が発生する。次に、秋以降に降水量が増えると、乾燥時にできた亀裂に余剰水が流れ、土壌が崩落しやすくなる。一方、地下水の供給が比較的多い低地土では、下層まで乾燥する期間が少なく、土壌水分が適度に保持され亀裂の発生が台地土に比べて少なく土壌が崩落しにくい。

さらに、台地土では下層が堅密なことが穿孔暗渠の施工効率にも影響した。その相違を泥炭土と灰色台地土と比較すると、泥炭土の施工効率は $366 \pm 10 \text{ m h}^{-1}$ であった。これに対して、堅密な灰色台地土では、施工時の機械への牽引抵抗と掘削動力への抵抗が大きく、直進することさえ困難であった。そのため、施工効率は、 $237 \pm 66 \text{ m h}^{-1}$ と泥炭土の場合よりも40%近く低下し、変動も大きく不安定であった。また、施工時の土壌硬度も2.96MPa(山中式土壌硬度計指示値29mm相当)と大きく、安定的な施工を行う限界を超えていると判断された(表3-2-3)。

表3-2-4 穿孔暗渠の適用条件と施工上の留意点

項目		条件
適用土壌	泥炭土	掘削に支障となる径5cmを超える埋木がない。
	低地土	液性限界 液性限界45%以上。 粒径組成 粘土含量20%以上、シルト含量50%未満、砂含量55%未満を満たす低地土。
留意点	ち密度	山中式土壌硬度計2.96MPa(指示値29mm相当)を超えるち密な土層がない。
	砂礫層	空洞部の深度に砂礫層がない。
	転換畑	長期および永久転換畑にのみ適用する。
	畑地・草地	地形に応じて急勾配にならないよう1/500未満で施工する。
	排水路	排水路の深さが1m以上あり、排水が空洞内に逆流しないこと。
	落水部	落水部には2m程度の合成樹脂管を挿入して保護する。

(5) 穿孔暗渠の適用条件と留意点

穿孔暗渠の適用条件と施工上の留意点は表3-2-4のように整理できる。特に、全圃場に対する共通的な留意点は、以下のようなことが上げられる。溝空洞部に相当する深さに砂礫層がある場合は、砂礫層の崩落が懸念されるので不適である。また、乾燥にさらされる排水路法面にある排水の出口である落水部は、穿孔暗渠で最も崩落が発生しやすい部位である。そのため、落水部が崩落しても通水できるように、落水部に2m以上の合成樹脂管を挿入し保護することが有効である。さらに、溝空洞の洗掘を防ぐため、勾配や落水口の配置には留意が必要である。

4) 穿孔暗渠の施工費から見た優位性

普通暗渠の施工費は1,800~2,200千円 ha^{-1} で、疎水材の種類により異なる。近年推奨されている資材を使用すると高価だが、事業計画上の耐用年数である30年は効果の持続が期待できる。弾丸暗渠は施工費が70~110千円 ha^{-1} と安価であるが、耐久性に劣る。これに対して、穿孔暗渠の施工費は200~420千円 ha^{-1} である。耐久性は、泥炭土で10年、粘質な低地土で5年まで溝空洞が維持されている。このことは、基盤整備への投資が困難な草地や大規模な畑に対して穿孔暗渠が適していることを示している。

このような経済的視点を含めた穿孔暗渠の優位性としては次のことが指摘できる。すなわち、穿孔暗渠は弾丸暗渠より施工費がやや高いが、排水効果に優れ、耐久性が改善されている。また、穿孔暗渠は、普通暗渠に比べると耐久性に劣るが、施工費は1/4以下と極めて低コストである。

表3-2-3 穿孔暗渠の施工効率

試験圃場	土壌区分	施工効率 (m h^{-1})	施工時の土壌硬度 (MPa)
転換畑A	泥炭土	366 ± 10	0.19
採草地H	灰色台地土	237 ± 66	2.96

1) 泥炭土は転換畑A圃場、灰色台地土は採草地H圃場、施工面積は50a。

2) 施工効率：平均値±標準誤差

第3節 要約

資材を用いる土層改良であるカルチタイン式心土改良耕は、排水性の問題のない土壌に対して堅密な心土に資材を散布すると同時に、ヘビーカーチタインで混合し、面的に心土を膨軟にする工法である。この工法の特徴は、堅密な心土や耕盤層の破碎効果と、有機物の施用により改良土層が再び堅密になること防止する点である。

カルチタイン式心土改良耕を施工することによって堅密な心土が膨軟になり、容積重の低下や気相率と易有効水分量の増加も認められた。それにより、根の養分吸収は改善された。カルチタイン式心土改良耕の土壌物理性の改良効果は、施工後5年経過しても改良部周辺の気相率が $0.1\text{m}^3\text{m}^{-3}$ 程度で土壌硬度も 0.30MPa 程度と良好な状態を保っていた。また、5年経過時の収量にも改良の効果が認められた。作物に対しては、完熟パーク堆肥投入量 $4\sim 10\text{kg m}^{-2}$ で、心土の破碎攪拌により通気性と保水性の改善による増収と品質向上効果があった。また、経済性からも完熟パーク堆肥投入量 $4\sim 10\text{kg m}^{-2}$ が有効であっ

た。施工に際しての目安は、改良対象を心土の山中式硬度計指示値で $0.72\sim 1.37\text{MPa}$ で完熟パーク堆肥投入量を 4kg m^{-2} に、山中式硬度計指示値 1.37MPa 以上で完熟パーク堆肥投入量を $5\sim 6\text{kg m}^{-2}$ に区分した。

一方の資材を用いない低コストな排水改良技術であるトレンチ掘削式穿孔暗渠は、トラクタ直装の掘削機で深さ $60\sim 120\text{cm}$ に直径 20cm の円形空洞と幅 7cm の溝空洞を掘削し、次いで空洞上部を閉蓋して、それより上方を掘削土で埋戻し地中に空洞を作る工法である。この大きな空洞を持つ穿孔暗渠は、暗渠管を用いた暗渠と同様に余剰水を排除できる。この溝空洞の経年変化は、泥炭土では7年後に溝空洞全体がやや小さくなり、10年後には溝空洞が 40% 減少するものの溝空洞の形状が維持される。粘質な低地土では5年後で溝空洞の変形が顕著になる。台地土では溝空洞が崩壊しやすく適用が困難であった。このことから、穿孔暗渠は泥炭土と粘質な低地土の転換畑、畑、草地に適用できると判断した。なお、穿孔暗渠は従来の心土破碎や弾丸暗渠より施工費がやや高いが、耐久性が改善された。

第4章 土壌を考慮した排水改良技術

第1節 畑・水田における土壌を考慮した排水改良技術

1. はじめに

積雪寒冷地の農耕地は排水性に劣る土壌が多く、長雨や融雪により地表残留水が発生して過湿となりやすい。排水改良の主要技術としては暗渠排水がある。我が国の暗渠排水の設計基準は、水田への水利用を考慮して策定されている(田淵, 1984)が、畑暗渠についての検討(多田, 1984)は多くない。また、暗渠排水だけの排水改良が多い背景には、既存暗渠に土層改良を組合せて排水機能を向上する報告はあるが、実際に取り組むための排水改良区分などの目安が少ないため、組合せ暗渠による排水改良技術が土地改良による排水改良に十分活用されていないことが大きい。そのため、今後のより効果的な排水改良に向けて、暗渠排水と土層改良の組合せ技術について、土壌を考慮した改良の目安を明確にする必要がある。

本節では、農地の土地生産力を増強するための排水改良の知見から、近年の施工技術を用いた土壌を考慮した具体的な排水改良区分を示す。

2. 試験及び調査方法

1) 排水改良の作物生産性への影響

冷湿害時における暗渠排水の効果を明らかにするため、平常年と冷湿害発生年に暗渠設置が畑作物の収量に与える影響を調査した。暗渠の畑作物への効果については、十勝地方の本別町、音更町、帯広市、豊頃町において暗渠を5年以内に施工した21箇所の暗渠施工圃場と、暗渠

未施工あるいは暗渠施工後30年以上が経過して排水機能がなくなった隣接圃場において、冷湿害年の1996年とやや低温であるが平常年の1997年にアズキとテンサイ、バレイショを、平常年の1998年と1999年に秋コムギを栽培し、規格内収量を調査した。なお、暗渠設置圃場と未設置圃場は隣接しており、いずれの圃場でも同一作物を同一農家が施肥により地域慣行法で栽培した。

2) 暗渠施工された土壌の実態

暗渠施工が行われた土壌の実態を把握するため、第2章第1節の2.試験及び調査方法、1)暗渠の施工実態調査のうち、暗渠が施工された地域と土壌に関する内容を整理した。暗渠施工で事業実施計画書などに記載されている土壌区分は、水田土壌を対象とした施肥改善土壌区の種類であり、灰色土壌と褐色土壌の低地土と台地土がまとめられている。

なお、集計された暗渠施工の内容は、水田は1985年から1997年実施の15,976ha、畑は1971年から1997年実施の41,652ha、草地は1985年から1997年実施の5,503ha分である。

3) 排水不良土壌の物理性と暗渠排水の整備水準

(1) 排水不良土壌の物理性

排水不良土壌の物理性から排水不良要因を整理するため、水田と畑の代表的な排水不良土壌について土壌調査を行った。土壌調査では、土壌断面調査時に山中式土壌硬度を測定した。併せて100cm³採土管により土壌試料を採取し、容積重、土壌三相、有効水分量として易有効水分(水田で-3.1~-49.1kPa、畑で-6.2~-49.1kPa)、

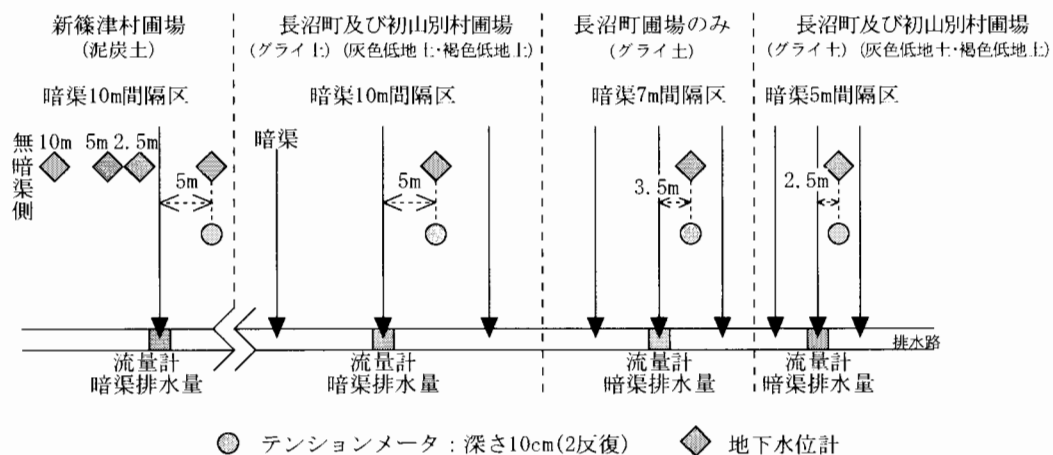


図4-1-1 水田暗渠試験圃場の観測機器配置

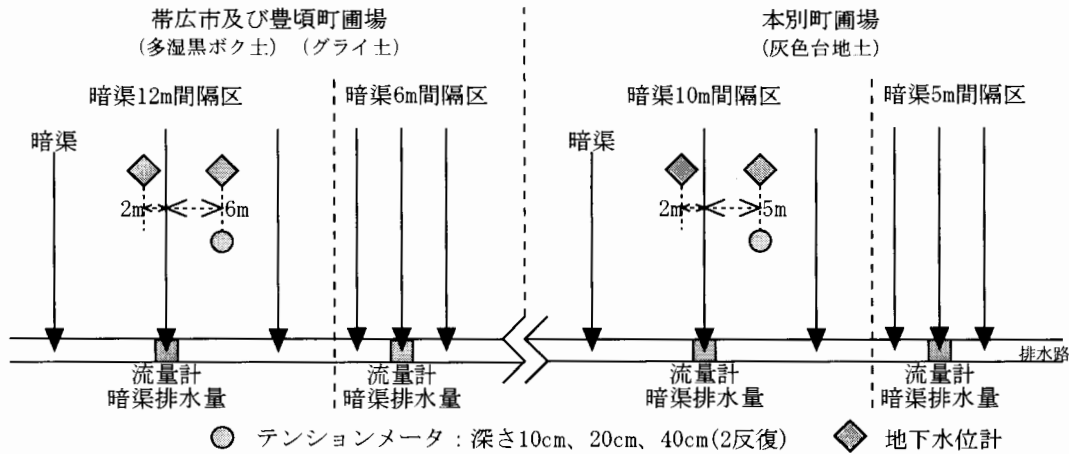


図4-1-2 畑暗渠試験圃場の観測機器配置

表4-1-1 試験圃場一覧

市町村	地目	調査年 (経過年)	土壌型	暗渠間隔の処理区 (疎水材)	埋設深 (掘削幅)	疎水材厚 (埋戻厚)	掘削方法 配線方法	各処理区 規模(ha)
長沼町	水田	1997年 (1年経過)	グライ土	10m(火山礫) 7m(火山礫) 5m(火山礫)	0.8m (0.15m)	0.55m (0.25m)	トレンチャ フォーク型集水	0.50
初山別村	水田	1998年 (2年経過)	灰色低地土	10m(チップ) 5m(チップ)	0.8m (上0.45~底0.2m)	0.55m (0.25m)	バックホウ フォーク型集水	0.50
			褐色低地土	10m(伐根チップ) 5m(伐根チップ)	0.8m (上0.45~底0.2m)	0.55m (0.25m)	バックホウ フォーク型集水	0.50
新篠津村	水田	1998年 (2年経過)	泥炭土	10m(土戻し)	0.9m (上0.45~底0.2m)	0.65m (0.25m)	バックホウ フォーク型集水	0.25
帯広市	畑地	1999年 (3年経過)	多湿黒ボク土	12m(砂利) 6m(砂利)	0.8m (上0.45~底0.2m)	0.50m (0.40m)	バックホウ 直抜き (暗渠排水量は集水して計測)	0.36
本別町	畑地	1999年 (3年経過)	灰色台地土	10m(砂利) 5m(砂利)	0.9m (上0.45~底0.2m)	0.50m (0.40m)	バックホウ 直抜き (暗渠排水量は集水して計測)	0.36
豊頃町	畑地	1999年 (3年経過)	グライ土	12m(チップ) 6m(チップ)	0.9m (上0.45~底0.2m)	0.50m (0.40m)	バックホウ フォーク型集水	0.34

有効水 (-49.1~-100kPa), 難有効水 (-100kPa~-1.55MPa), 飽和透水係数を分析した。また、攪乱した土壌試料により炭素含量, 粒径組成を分析した(土壌環境分析法編集委員会, 1997)。なお, 土壌調査は表4-1-1に示した試験圃場において, 水田土壌が初山別村の褐色低地土と灰色低地土, 長沼町のグライ土, 新篠津村の泥炭土で, 畑土壌が, 本別町の灰色台地土, 帯広市の多湿黒ボク土, 豊頃町のグライ土で行った。

(2) 排水不良土壌に対する暗渠の排水効果

各排水改良の改善効果を検討するため表4-1-1に示す暗渠を施工した試験圃場を設置した。暗渠の試験圃場造成にあたっては, 各暗渠処理区に吸水渠が必ず3本以上で, 概ね5本程度が設置できるように0.25~0.5haの面積を設定した。

暗渠排水量は各暗渠処理区の排水を1箇所に集水して三角堰流量計を用いてデータロガーにより自動計測した。

いずれの排水路も1m以深あり, 通常は滞水していない。ただし, 排水路の水位が高まり暗渠の落水口の水没する危険のある豊頃町圃場(グライ土)の一部では電磁流量計(愛知時計電機株式会社製)を用いた。

水田暗渠の新篠津村圃場の暗渠10m間隔, 初山別圃場の暗渠10mと5m間隔, 長沼町試験圃場の暗渠10m, 7m, 5m間隔の処理区で暗渠排水量を測定した。地下水位は, 暗渠処理区の中央部で, 暗渠間の中央である10m間隔で5m地点, 7m間隔で3.5m地点, 5m間隔で2.5m地点で圧力式センサーを用いて1箇所, 土壌水分吸引圧の推移は, 地下水深測定部に併せて暗渠間の中央で圧力式テンションメータを用いて2反復により, それぞれデータロガーを用い自動計測した。新篠津村圃場(泥炭土)ではこれらに加えて, 地下水位を無暗渠圃場側に向かって暗渠管上と1m, 2.5m, 5m, 10m離れた地点で計測した(図4-1-1)。

畑暗渠の本別町圃場の暗渠10m, 5m間隔, 帯広市圃

場と豊頃町圃場の暗渠12m, 6m間隔の処理区で暗渠排水量を測定した。試験圃場では, 地下水位を, 通常区が暗渠12m間隔の場合に暗渠から2m地点と中央6m地点で, 通常区が暗渠10m間隔の場合に暗渠から2m地点と中央5m地点で圧力式センサーを用いて1箇所, 土壌水分吸引圧の推移を暗渠間中央部の地下水位測定部に併せて深さ10cm, 20cm, 40cmで圧力式テンションメータを用いて2反復により, それぞれデータロガーを用い自動計測した(図4-1-2)。

3. 結果及び考察

1) 排水改良の作物生産性への影響

近年の農業気象災害は図4-1-3に示すように1993年の大冷害とともに1996年の冷湿害が代表的である。過去には1978年や1986年, 1989年を含め, 5年に1度の頻度で冷害や湿害による農業被害が発生していた。特に, 畑作物の湿害で影響の大きい気象要因としては①春作業時の多降水, ②生育初期の長雨, ③収穫期の集中降雨がある(図4-1-4)。30~100年に1度の厳しい低温で大雨年の1993年と1996年には, 北海道東部の畑地帯で大きな農業被害となった。1996年では畑作物の十勝地方の平均収量は, 平年の8割と低かった(図4-1-3)。加えて, 農産物の品質低下を考慮すると実質の被害はさらに大きいことが予想できる。このことから, 畑作では冷湿害への対応が農業生産にとって重要である。

冷湿害への対策には, 暗渠排水による農地の排水性向上が重要である。これら排水改良は農業生産に対して作物生産性と農産物品質を維持する効果が期待される。こ

こでは暗渠排水が有する冷湿害時の作物生産性を安定化する効果について図4-1-5に示す。主要な畑作物であり, 湿害に弱いテンサイとアズキ, 収穫前の多雨で腐敗し品質が低下するバレイシヨについては, 冷湿害年の1996年と平常年の1997年の収量から暗渠排水の効果が見てとれる。

平常年の1997年には, いずれの作物でも暗渠施工区と暗渠未施工区の収量差が小さく, 全ての圃場で同程度の収量の水準に収まっていた。

冷湿害年の1996年における暗渠未施工圃場の平均収量は, テンサイで39.8Mg ha⁻¹, バレイシヨで31.9Mg ha⁻¹, アズキで1.54Mg ha⁻¹と同年の本地域の平均収量(図4-1-3)であるテンサイ44.8Mg ha⁻¹, バレイシヨ35.0Mg ha⁻¹, アズキ2.16Mg ha⁻¹を大きく下回った。

暗渠排水施工圃場の平均収量はテンサイ54.4Mg ha⁻¹, バレイシヨ41.0Mg ha⁻¹, アズキ3.11Mg ha⁻¹と暗渠未施工圃場の平均収量より高く, 収量の変動も小さかった。このことから, 暗渠排水による排水改良は冷湿害年において畑作物の生産性を安定化する効果が大きいと判断して良い。

一方, 乾燥地での栽培が好ましいコムギについては, 平常年の1998年と1999年の収量でも, 乾燥傾向に推移する暗渠施工圃場で収量が増加傾向にあることから, 暗渠排水の効果が明瞭である。

排水改良は, 畑作物の湿害による収量低下を回避する効果が高く, 農業経営上のメリットが明確である。このことは, 現在も農業者から排水改良に根強い要望があり, より高水準の改良が求められる要因である。

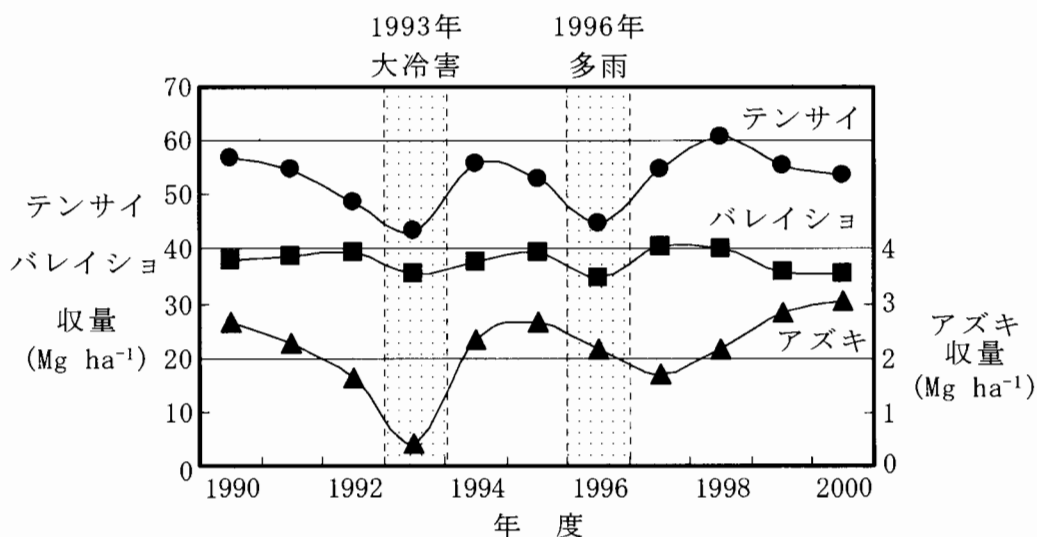


図4-1-3 十勝地方の畑作物の平均収量

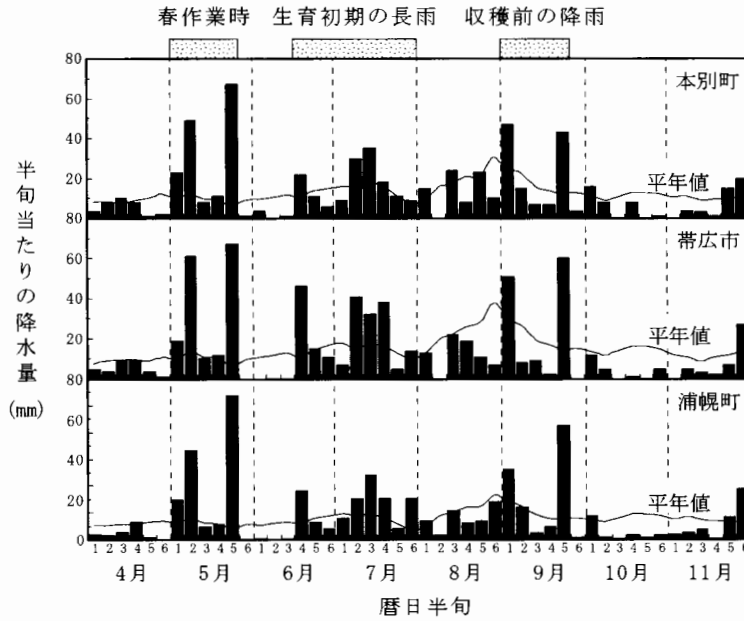


図4-1-4 冷湿年である1996年における十勝地方の気象条件

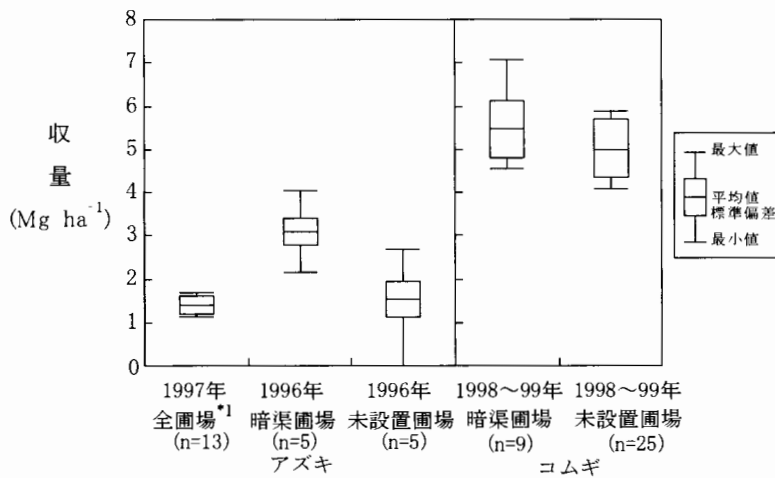
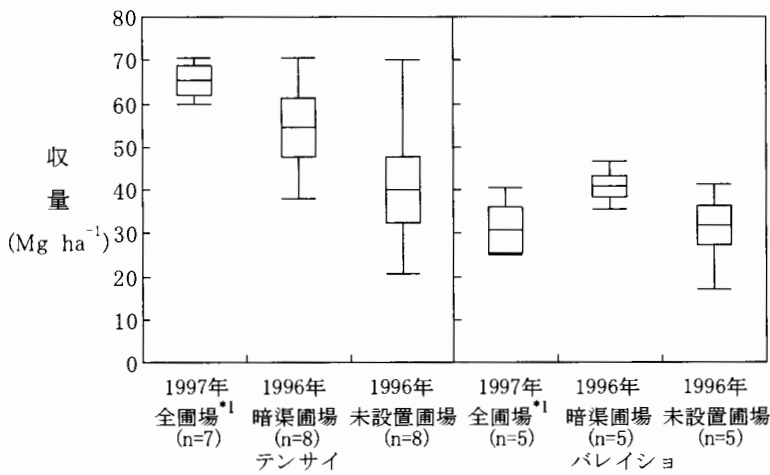


図4-1-5 暗渠排水の有無が作物収量に与える影響

*1 全圃場とは暗渠圃場と未設置圃場の両方を合わせて示したもの。

注1) 暗渠圃場と未設置圃場は隣接し、同一作物を農家慣行で栽培した。

注2) 調査年の気象条件は、1996年が異常年、1997年が平常年（やや低温）、1998年と1999年が平常年である。

2) 排水不良地の土壌物理性と排水改良の必要性

(1) 暗渠施工された土壌の実態

図4-1-6に北海道の暗渠施工面積が年間10,000～20,000haと多かった1971年から1997年に施工した暗渠で、詳細が明らかな256地区について地目別に施工対象となった土壌の面積を集計した結果を示す。

水田暗渠は、融雪期と落水後の早期乾燥化が主目的で、地下水位が高い、もしくは表土が粘質で透水性が悪い泥炭土やグライ土で多く施工された。これは、水田暗渠が空知と上川、石狩で多く、この地域に多く分布する排水不良土壌が泥炭土やグライ土であったことと一致する。畑では根圏域を酸化的に保つため、停滞水や過湿な土層の余剰水を早急に排除することが重要となる。そのため、排水改良は、地下水位が低く、強粘質、堅密あるいは粗間隙が少なく排水性の劣悪な土壌でも必要である。これらのことから畑暗渠は、灰色台地土や灰色低地土の重粘土、高水分条件となる多湿黒ボク土で多い。さらに、非湿性土壌である褐色森林土や褐色低地土においても、機械作業での不透水層の形成による透水性の低下(丹羽ら, 1999)が指摘され、これを裏付けるように暗渠が施工されている。草地では圧倒的に泥炭土と灰色台地土や灰色低地土で暗渠施工面積が多い(図4-1-6)。

(2) 水田土壌の物理性を考慮した暗渠排水の整備水準

水田暗渠の役割は、表面滞水を排除して作土の乾燥条件を確保することにある。表面滞水や地下水を暗渠により排水する機能には、土壌の透水性の影響が考えられ、暗渠間隔の設定を水田土壌の物理性から検討する。

代表的な水田土壌の物理性を表4-1-2に示す。泥炭土は、数回の客土により客土層が40cmと厚く、客土層の土性がLiC～CLと粘質である。客土層の気相は0.03～0.06m³ m⁻³と小さい。この客土層の中でACd層の耕盤層は、土壌硬度が高く密で、透水係数が10⁻⁷m s⁻¹と最も小さい。このような客土層内に土壌物理性の悪い土層がある場合には、地表残留水が排除されにくくなる。地下水がある泥炭層は、間隙が0.874m³ m⁻³と多く、透水係数が10⁻⁶m s⁻¹とやや大きい。このことから、泥炭層の地下水は暗渠まで移動しやすい。

グライ土は、土性がHC～CLと粘質な土壌が多い。下層土は、容積重が小さく、液相が多いものの易有効水分量が小さい。また、グライ土は気相が小さいため、透水係数が10⁻⁷～10⁻⁸m s⁻¹と小さく、通気性と排水性が悪く、地下水位が高い還元した土壌である。ただし、排水による乾燥化で土壌収縮による亀裂の発達が期待できる場合もある。

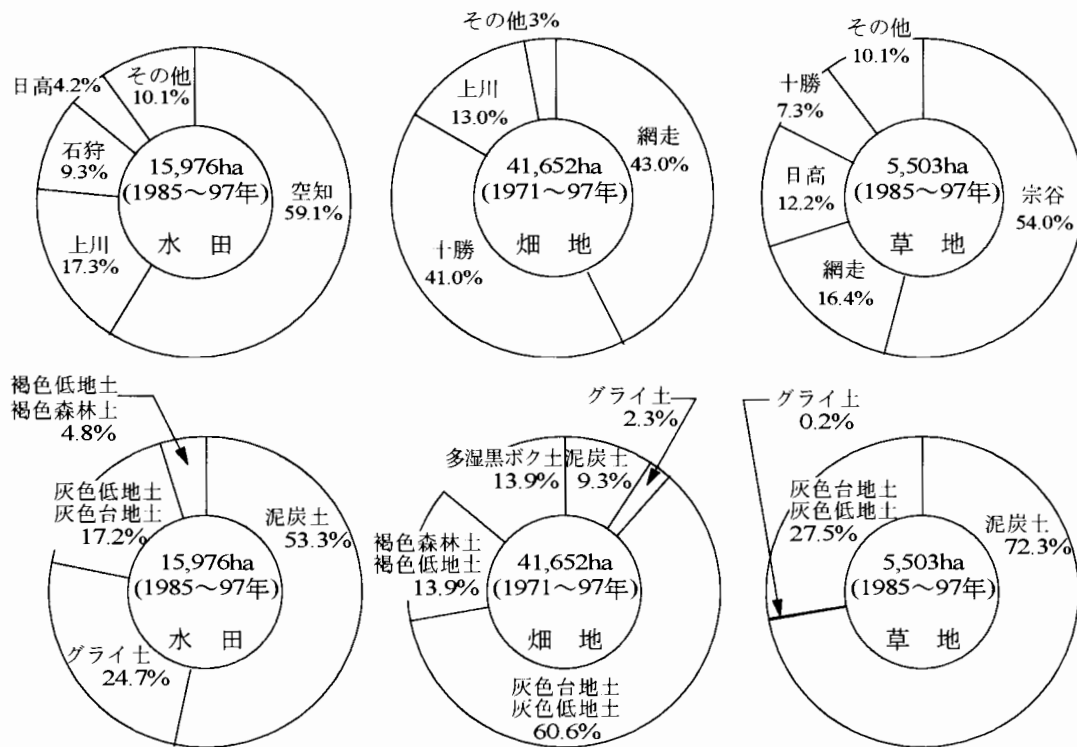


図4-1-6 北海道における暗渠が施工された地域と土壌の地目別割合
注) 道営事業において土壌調査による土壌区分が確認された面積から作図。

表4-1-2 水田の排水不良土壌の物理性

土壌	層位	深さ (cm)	炭素 含量 (g kg ⁻¹)	粒径組成(kg kg ⁻¹)			土性	容積重 (Mg m ⁻³)	土壌三相(m ³ m ⁻³)			有効水分量(m ³ m ⁻³)*1			土壌 硬度 (MPa)	飽和透 水係数 (m s ⁻¹)
				砂	シルト	粘土			固相	液相	気相	易有 効水	有 効水	難有 効水		
泥炭土	Ap	0-17	34.2	0.511	0.253	0.236	CL	1.031	0.402	0.500	0.098	0.061	0.010	0.050	0.40	2.8×10 ⁻⁶
	ACd	17-40	35.4	0.553	0.242	0.205	LiC	1.142	0.450	0.507	0.043	0.033	0.011	0.057	0.72	1.5×10 ⁻⁷
	H	40-	-	-	-	-	-	0.252	0.127	0.746	0.127	0.181	0.054	0.213	0.30	1.4×10 ⁻⁶
グライ土	Ap	0-12	16.8	0.502	0.249	0.249	CL	0.886	0.308	0.561	0.131	0.052	0.028	0.108	0.10	2.1×10 ⁻⁵
	Cd	12-25	16.2	0.572	0.209	0.219	CL	0.961	0.358	0.581	0.061	0.022	0.013	0.094	0.30	8.3×10 ⁻⁷
	G1	25-60	18.6	0.046	0.372	0.582	HC	0.725	0.267	0.688	0.045	0.021	0.014	0.087	0.14	4.6×10 ⁻⁷
	G2	60-	8.1	0.587	0.279	0.134	L	1.170	0.426	0.533	0.041	0.021	0.010	0.086	0.62	6.8×10 ⁻⁸
灰色 低地土	Ap	0-13	13.3	0.548	0.342	0.110	CL	1.059	0.486	0.478	0.036	0.042	0.011	0.098	0.30	4.8×10 ⁻⁷
	C1g	13-40	8.7	0.730	0.214	0.056	HC	1.186	0.511	0.461	0.028	0.020	0.011	0.051	0.72	2.3×10 ⁻⁸
	C2g	40-	7.0	0.504	0.323	0.173	L	1.225	0.515	0.463	0.022	0.008	0.009	0.059	1.16	5.3×10 ⁻⁹
褐色 低地土	Ap1	0-15	18.0	0.283	0.470	0.247	L	1.106	0.421	0.417	0.162	0.074	0.015	0.168	0.25	1.8×10 ⁻⁵
	ACd	15-26	15.1	0.231	0.494	0.275	SL	1.065	0.420	0.476	0.104	0.041	0.017	0.116	0.25	5.5×10 ⁻⁵
	BC1	26-44	12.2	0.155	0.546	0.299	CL	1.193	0.450	0.458	0.092	0.032	0.045	0.111	0.34	1.2×10 ⁻⁶
	BC2	44-	12.2	0.313	0.487	0.200	CL	1.201	0.453	0.467	0.080	0.107	0.043	0.100	0.40	1.1×10 ⁻⁶

*1 各有効水分量はつぎのとおりである。易有効水：-3.1~-49.1kPa、有効水：-49.1~-100kPa、難有効水：-100kPa~-1.55MPa

一方、灰色低地土は、容積重が大きくて液相が小さく土壤硬度が高い、グライ土より乾燥したち密な土壤である。灰色低地土は、気相が極めて小さいため透水係数も10⁻⁸~10⁻⁹ m s⁻¹と小さいが、亀裂が発達している場合もある。グライ土と灰色低地土は、いずれも土壤の透水性が低く、暗渠までの余剰水の移動は、多少ある亀裂を通じたものと考えられる。

他方、褐色低地土は、下層土まで土性がCL~SLと中庸で、気相が0.10m³ m⁻³前後と大きくて透水性も透水係数も10⁻⁵~10⁻⁶ m s⁻¹と大きいことから、透水性と通気性の良好な土壤である。褐色低地土は地下水もなく土層全体の透水性も良いことから暗渠排水の必要性は低い。

ここでは、水田土壤に対応した暗渠排水の整備水準について検討する。暗渠の排水は、ピーク排水量の状態が続くことはなく、時間とともに低減していく。暗渠のピーク排水量や排水量の低減程度は、土壤の性質やその時の土壤状態により異なる。

亀裂が発達している場合などには、暗渠のピーク排水量は高くなる。しかし、24時間排水量などの期間内の排水量は、土壤の透水性などの影響を受けるため、大きな排水量になることは少ない。このことから、暗渠の排水機能は、ピーク時の排水量が暗渠排水の計画基準を達成していれば、設計基準の通水性を有していると考えられる。

土壤の違いによる暗渠の排水量を比較した結果について、図4-1-7に示した。土壤の種類と暗渠排水量の関係は、ピーク排水量は地表に亀裂が発生している場合を除いて、泥炭土>グライ土≧灰色低地土の順であった。

透水性の低い土壤でも乾燥により大亀裂の発達して透

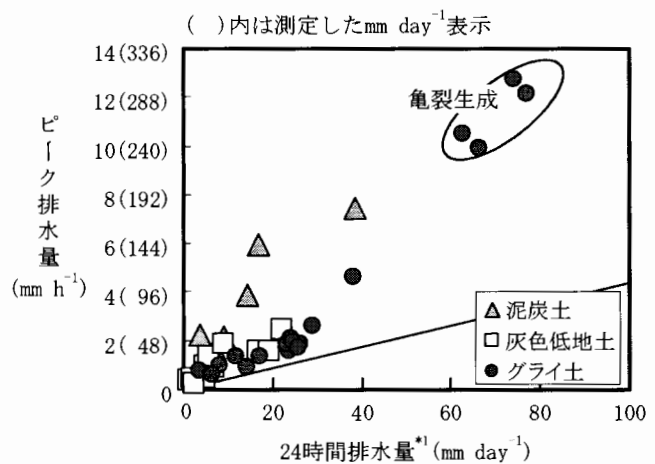


図4-1-7 土壤による暗渠排水量の違い(10m間隔)

*1 暗渠の24時間排水量はピーク排水量時以降の24時間で排水された排水量の合計。

水性が良好になるとピーク排水量が増加する。このことは、圃場の排水性を良好にするために重要である。このことから、グライ土や灰色低地土などの透水性の低い土壤に対しては、亀裂の発達を促す心土破碎などによる排水対策の実施と暗渠間隔の設定について検討が必要と考える。

図4-1-8には泥炭土における暗渠排水量と地下水位を示した。泥炭土では、降水により泥炭層の地下水位が敏感に上昇して、暗渠で排水され早くに低下する。泥炭土の暗渠排水量は、日降水量58mmの時にピーク排水量が2.5mm h⁻¹ (60mm day⁻¹相当)と高かった。しかし、泥炭土では、ピーク排水後の1日程度経過すると0.1mm h⁻¹

程度の排水量が落ち着く。泥炭土は、泥炭層の透水性が大きいことから暗渠周辺5m以上の広範囲までの地下水を排除し、2～3日で暗渠管理設深付近まで広い範囲の地下水位が低下する(図4-1-9)。以上のことを勘案すると、泥炭土の暗渠には、表土の物理性の影響があるものの、低地の中で最も高い排水性を示すといえる。このことから、泥炭土の暗渠間隔は、12～14mと広げても十分な排水性を確保でき、現状より暗渠間隔を狭める必要がない。

グライ土は、排水性に問題のある土壤である。土壤の透水性が小さく、地下水も浅く土壤が還元するため構造が発達しにくい。グライ土では、暗渠間隔が10mで、表面滞水のある状態からの落水おけるピーク排水量が 48 mm day^{-1} と設計基準程度であった。暗渠を7m間隔に狭くするとピーク排水量が 2.5 mm h^{-1} 、5m間隔で 3.4 mm h^{-1} まで増加し、その後の暗渠排水量も10m間隔より若干多く推移した。また、グライ土では、暗渠を10mより7mに狭くすることで、地下水が深くなり土壤水分吸引圧が低く推移して乾燥傾向になった。ただし7mと5mでは明確な差はなかった(図4-1-10)。

なお、水田区画で多い、長辺170m短辺30mの0.5haの圃場では、10m間隔から吸水渠を1本増やすことで7m間隔に、3本増やすことで5mとなり、7m間隔はコスト面から取り組みやすい。このような、地下水が浅く、透水性の小さいグライ土では、暗渠間隔を10mから7m

の範囲で設計すべきと考えた。

灰色低地土は、地下水が深く、ち密で乾燥した土壤であるが、降雨が多い季節に土中の大空隙に停滞水が出現する。灰色低地土は、亀裂以外に土中の通水間隙が少なく、地下浸透水が少ない。そのため、暗渠排水量は図4-1-11に示すように、ピーク排水量が暗渠10m間隔で 1.5 mm h^{-1} と他の低地土に比べ明らかに小さい。暗渠間隔を5mに狭くしてもピーク排水量が 1.9 mm h^{-1} とあまり増加しない。これは、暗渠が下層土の排水への関与が小さいことによる。

灰色低地土では、圃場排水に対する暗渠排水の関与が小さいため、暗渠排水の排水機能を高めるには、暗渠間隔の検討よりも弾丸暗渠や有材心土改良耕などの土層改良によって通水間隙を作ることが優先されると判断できる。これらを勘案すると、暗渠間隔は現行の10mから14m程度と同程度か広げて、土層改良を組合せた暗渠で対応すべきと考える。

褐色低地土では、降雨が多い季節に亀裂への停滞水が短期間発生し、10m間隔の暗渠から 0.8 mm h^{-1} 未満であるがピーク排水量が観測された。褐色低地土の土壤物理性は、良好なため他の土壤より明らかに乾燥している(図4-1-12)。そのため、褐色低地土では、暗渠の必要性が低く、必要な場合でも暗渠間隔を10～14m以上にすべきである。

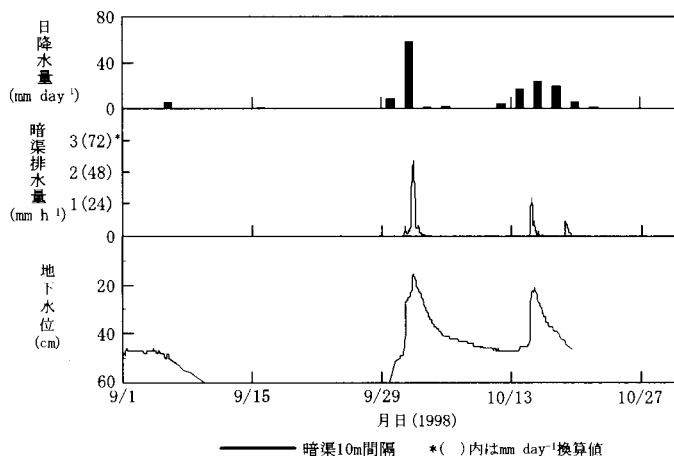


図4-1-8 泥炭土における水田の落水後の土壤水分環境 (新篠津村, 暗渠10m間隔)

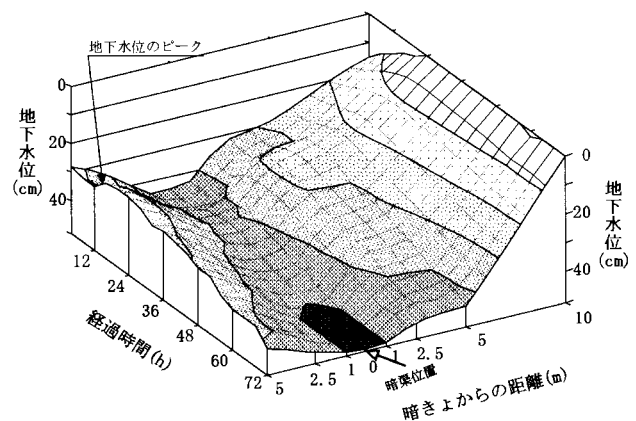


図4-1-9 泥炭土の暗渠周辺の地下水位変動 (1998年9月30日)

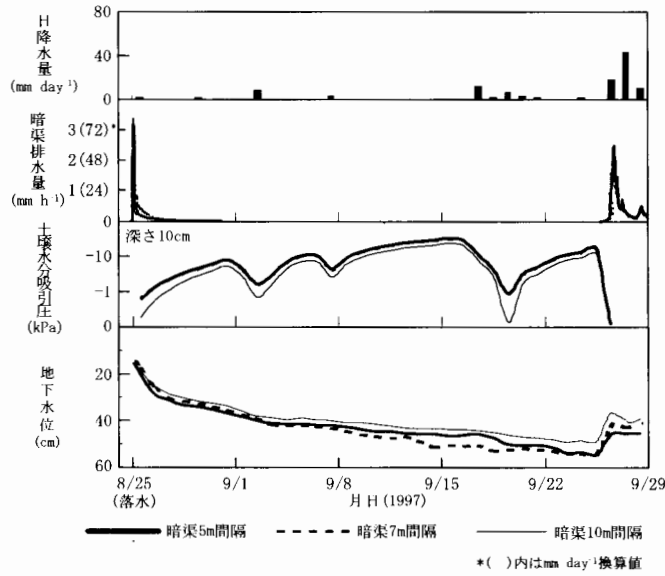


図4-1-10 グライ土における水田の落水後の土壌水分環境(長沼町, 暗渠10mと7m, 5m間隔)

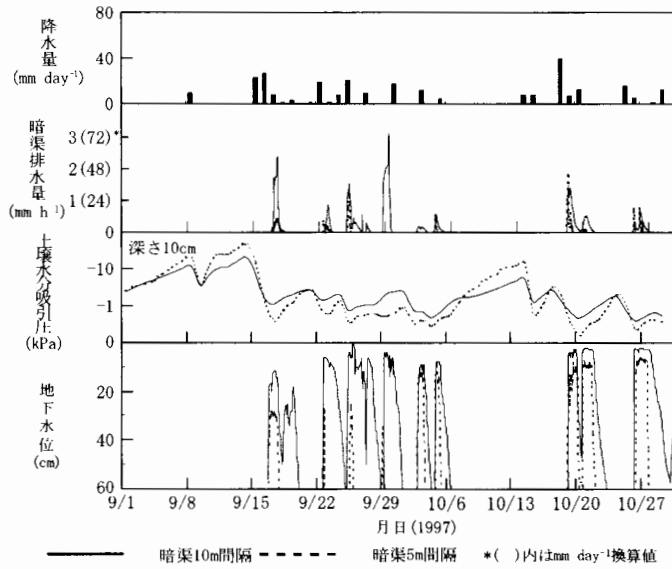


図4-1-11 灰色低地土における水田の落水後の土壌水分環境(初山別村, 暗渠10mと5m間隔)

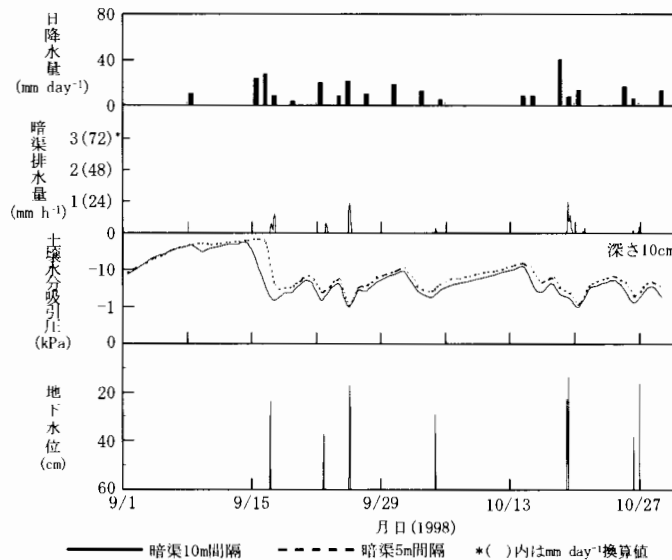


図4-1-12 褐色低地土における水田の落水後の土壌水分環境(初山別村, 暗渠10mと5m間隔)

(3) 畑土壌の物理性を考慮した暗渠排水の整備水準

畑暗渠の役割は、地下水を排除して根域の通気性を確保することにある。亀裂の停滞水や地下水を暗渠により排水する機能には、土壌の透水性や保水性の影響が考えられ、暗渠間隔の設定を畑土壌の物理性から検討する。

代表的な畑土壌の物理性を表4-1-3に示す。グライ土は、土性がLiC~CLと粘質な土壌が多い。グライ土は、容積重がやや小さく液相が多い。気相は60cm以浅で中庸で、それ以深で小さく、透水係数は 10^{-6} ~ 10^{-7} m s⁻¹と中庸である。また、畑のグライ土は、地下水の低下によって気相が増加し、通気性を確保できことから、水田より土壌還元程度が弱い。

多湿黒ボク土は、火山灰を母材とすることから土性がSC~Sと中粗粒質で、炭素含量が 100g kg^{-1} を超え有機物に富み、保水性の高い土層が60cm深まで厚く堆積している。そのため、多湿黒ボク土は飽和透水係数が高いものの、深さ50cmまでの土層全体の易有効水分孔隙量が多い(石渡ら, 1993)。多湿黒ボク土は、多雨期の短期間に通水間隙内の停滞水が見られる。また、多雨期には土壌水分が高く推移するため下層30~70cmの保水性の高い腐植層で液相が $0.6\sim 0.7\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ と多くなり、気相が減少する。そのため、土壌の通気性が低下することで作物根の呼吸が阻害され湿害となりやすい(保井ら, 2000)。このことから、多湿黒ボク土では土壌の保水性に起因する気相の低下が問題となる。

灰色台地土は、土性がCLと粘質で、30cm以深の容積重が 1.2Mg m^{-3} 以上で土壌硬度が 1.2MPa 以上と堅密で、

透水係数が 10^{-7}m s^{-1} 以下のため不透水性な下層土がある。また、土壌構造が発達しておらず、保水性も小さく、根域となる有効土層が浅い。土壌浸透能が小さく、乾燥期には土壌水分が低下し乾燥しやすい。一方、少量の降雨により余剰水が土層内の亀裂間隙に停滞して飽和しやすい。これらのことから、暗渠が土壌中の排水に関する役割は小さいと考えられる。

畑土壌に対応した暗渠排水の整備水準について検討する。グライ土では地下水の供給が多いため、地下水位が1m内外と他の土壌に比べ浅い。地下水位は、降雨直後に急激に上昇し、長雨により暗渠間中央だけでなく、暗渠の脇2m地点でも高まる。地表の排水が進み乾燥してきても、地下水位は降雨直後に60~80cmまで上昇した後、緩慢に低下する。乾燥過程の土壌水分吸引圧は、下層ほど地表よりも遅れて低下するため、地表と下層で土壌水分吸引圧の差が広がり、下層ほど過湿である(図4-1-13)。このため、低湿地に分布するグライ土では、暗渠間隔を狭めることで暗渠のピーク排水量が明らかに大きくなり、降雨後の地下水位の上昇を抑制し、作物の根域を確保する上で効果と考える。そのため、暗渠を現行水準の12m程度かそれ以上の間隔での整備することは過大な投資とならない。

多湿黒ボク土における湿害発生は、地下水に起因するものでなく、降雨時に土壌水分が高まり土壌の気相が少なることで通気性が阻害されることによる。そのため、少ない降雨では、暗渠からの排水はなく、多雨時にのみ暗渠から排水される。多雨時の暗渠のピーク排水量は土

表4-1-3 畑の排水不良土壌の物理性

土壌	層位	深さ (cm)	炭素 含量 (g kg ⁻¹)	粒径組成(kg kg ⁻¹)			土性	容積重 (Mg m ⁻³)	土壌三相(m ³ m ⁻³)			有効水分量(m ³ m ⁻³)*1			土壌 硬度 (MPa)	飽和透 水係数 (m s ⁻¹)
				砂	シルト	粘土			固相	液相	気相	易有 効水	有 効水	難有 効水		
グライ土	Ap1	0-13	36.2	0.348	0.41	0.242	CL	0.905	0.348	0.454	0.198	0.091	0.017	0.169	0.16	$1.4\sim 10^{-5}$
	Ap2	13-27	40.0	0.349	0.412	0.239	CL	0.959	0.373	0.518	0.109	0.063	0.019	0.178	0.30	$4.0\sim 10^{-6}$
	IIA	27-43	47.3	0.295	0.44	0.265	LiC	0.767	0.276	0.609	0.115	0.056	0.028	0.141	0.62	$1.1\sim 10^{-6}$
	IIG1	43-64	41.8	0.204	0.486	0.31	SiC	0.705	0.259	0.651	0.090	0.062	0.042	0.144	0.40	$5.1\sim 10^{-6}$
	IIG2	64-	50.5	0.249	0.474	0.277	SiC	0.600	0.299	0.634	0.067	0.097	0.066	0.129	0.30	$2.2\sim 10^{-7}$
多湿黒 ボク土	Ap1	0-17	120.1	0.635	0.101	0.264	SC	0.728	0.305	0.528	0.167	0.092	0.018	0.179	0.30	$9.6\sim 10^{-6}$
	Ap2	17-34	116.6	0.631	0.02	0.349	SC	0.787	0.315	0.554	0.131	0.101	0.036	0.197	0.84	$4.9\sim 10^{-7}$
	IIA	34-45	120.6	0.823	0.123	0.054	SL	0.470	0.197	0.631	0.172	0.103	0.028	0.186	0.53	$2.3\sim 10^{-7}$
	IIICg	45-58	99.2	0.926	0.054	0.02	S	0.396	0.146	0.713	0.141	0.121	0.009	0.252	0.40	$4.6\sim 10^{-6}$
	IVA	58-70	68.4	0.883	0.095	0.022	LS	0.608	0.216	0.595	0.189	0.083	0.099	0.041	0.46	$1.5\sim 10^{-7}$
	IVCg	70-84	15.1	0.696	0.245	0.059	SL	0.839	0.309	0.565	0.126	0.183	0.048	0.053	0.30	$2.5\sim 10^{-5}$
灰色 台地土	VCg	84-	8.7	0.874	0.101	0.025	S	0.814	0.275	0.601	0.124	0.112	0.099	0.041	0.25	$8.0\sim 10^{-6}$
	Ap1	0-15	40.7	0.48	0.319	0.201	CL	0.910	0.362	0.495	0.143	0.099	0.041	0.157	0.46	$1.2\sim 10^{-6}$
	Ap2	15-32	41.7	0.484	0.32	0.196	CL	0.982	0.387	0.512	0.101	0.106	0.040	0.154	0.62	$6.1\sim 10^{-6}$
	IIIC1g	32-50	7.8	0.44	0.341	0.219	CL	1.222	0.460	0.472	0.068	0.035	0.017	0.093	1.16	$1.2\sim 10^{-7}$
IIIC2g	50-	4.7	0.454	0.328	0.218	CL	1.486	0.564	0.432	0.004	0.013	0.004	0.049	3.70	$1.7\sim 10^{-9}$	

*1 各有効水分量はつぎのとおりである。易有効水：-6.2~-49.1kPa, 有効水：-49.1~-100kPa, 難有効水：-100kPa~-1.55MPa

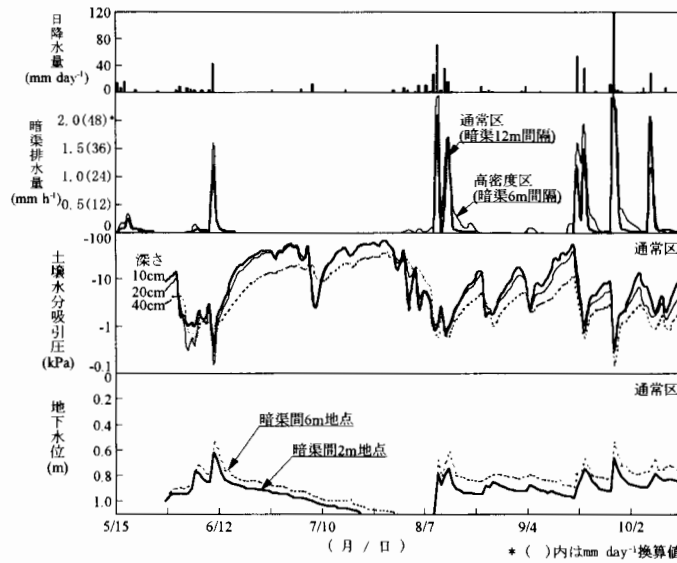


図4-1-13 グライ土における畑の土壤水分環境(豊頃町, 暗渠12mと6m間隔)

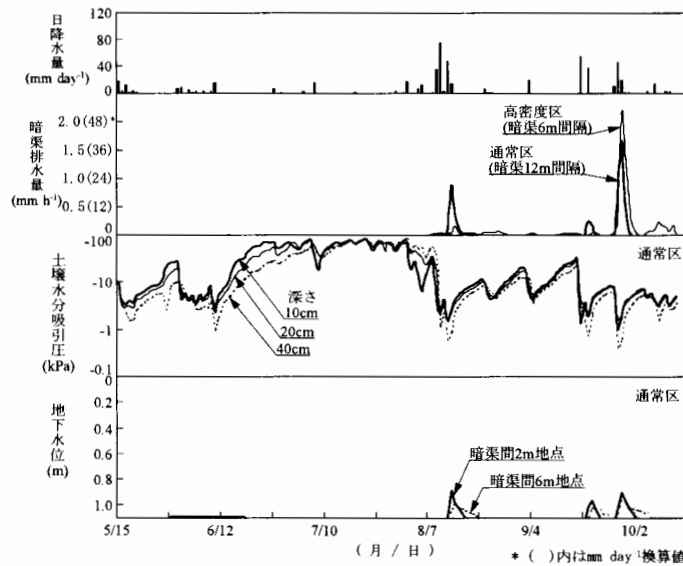


図4-1-14 多湿黒ボク土における畑の土壤水分環境(帯広市, 暗渠12mと6m間隔)

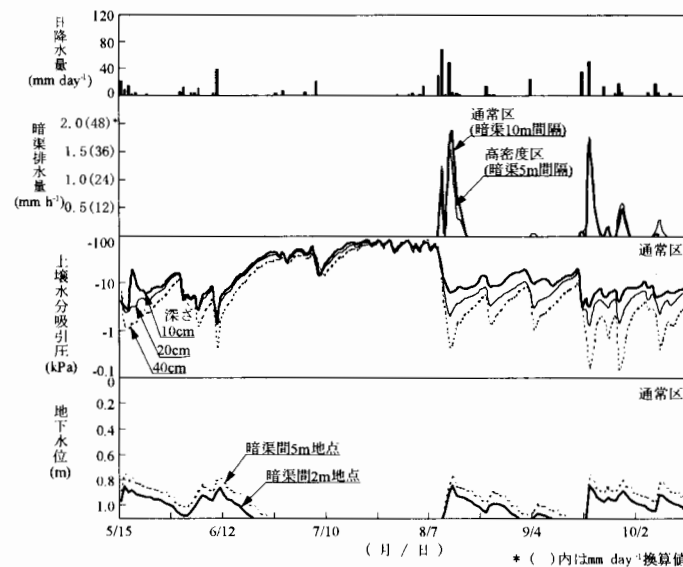


図4-1-15 灰色台地土における畑の土壤水分環境(本別町, 暗渠10mと5m間隔)

壤の透水性が高いことから高く、暗渠の排水機能は現状で十分と考える(図4-1-14)。これらのことから、多湿黒ボク土の排水改良は、余剰水を排除する点よりも、過湿条件下でも土層中の粗間隙を確保して通気性を維持することが必要と考え、作土直下に透水性と通気性の高い疎水材を投入した有材心土改良耕(東田・北川, 2002)を組合せた改良が作物生育にとって望ましい。

灰色台地土の暗渠排水は、不透水層上の亀裂間隙に溜まった余剰水が集水され排水するが、粗間隙の少ないことと透水係数が小さいことから土壌中の浸透水量とその移動量は小さい。そのため、暗渠の排水は短期間で停止してしまい土中の亀裂間隙に溜まった余剰水を排除する機能が十分でない。そのため、いつまでも深さ40cmの土層が過湿となる(図4-1-15)。このことから、灰色台地土では暗渠排水の間隔を狭くしても効果的でなく、暗渠排水への集水量を増加させるには、土壌の粗大な間隙を増加させて浸透水量を増やす心土破碎や有材心土改良耕(横井ら, 2001b)などの組み合わせが必要となる。そのため、灰色台地土の暗渠間隔は、整備間隔が暗渠排水量に及ぼす影響程度が小さい点を考慮すると現行10mからさらに広げた14m程度の水準で良く、心土破碎や弾丸暗渠などの組み合わせ暗渠による土壌物理性の改良がより重要と考える。

3) 土壌を考慮した排水改良技術

土壌を考慮した暗渠排水と土層改良を組合せた排水改良技術の区分を行うため、我が国で最も土地改良計画で有効に活用できる農耕地土壌分類第2次案改訂版(農業技術研究所, 1983)による土壌の特性評価を基に、前述の土壌理化学性を考慮した排水不良要因に基づく排水改良技術を表4-1-5の土壌統毎に提示する。

ここで使用した土壌分類の農耕地土壌分類第2次案改訂版は地力保全基本調査により全国を網羅した農耕地土壌図の統一的土壌区分である。この土壌図の土壌分類は、排水性に影響する土壌の種類と粒径によって区分されており、この土壌分類から土地改良事業の対策工法を対応させやすい特徴がある。

具体的な排水改良については、土壌の物理性から暗渠の間隔を適切に設定する。多湿黒ボク土は土壌の保水性と通気性から土層改良が必要であり、暗渠は10~12m間

隔とし土層改良を施す。灰色台地土と灰色低地土は土壌がち密で透水性が小さく暗渠排水の寄与率が小さいため、心土破碎や弾丸暗渠の対応が有効であり、暗渠は10m間隔で整備し通水機能を確保する。黒ボクグライ土やグライ台地土を含めたグライ土は地下水が浅くに存在することで通気性や酸化条件が不良である。そのため、暗渠排水には常に地下水を排除するための排水機能も高いことが望まれ、暗渠間隔は7~10mが必要と考える。泥炭土は泥炭の透水性が高いことから、暗渠の間隔は14m程度まで広げて構わない。

しかし、圃場の排水性を暗渠排水だけで維持していくことは難しい。排水性が低下する原因には、疎水材直上を含む土層中へ耕盤などの不透水層が形成(村島・荻野, 1992)、重粘土のように元々土壌が堅密で不透水性である(横井ら, 2001a)、営農機械による表土の練返して透水性が低下するなど、様々な原因がある。これらへの対応策としては、強制的に暗渠までの通水経路を確保する補助暗渠があり(表4-1-4)、これら土層改良の効果を検討し、適した組合せを検討した。ここでは、暗渠に組合せる補助暗渠となる土層改良について表4-1-4に整理し、表4-1-5の排水改良技術に適用する。

表4-1-4に示した土層改良で、資材を利用する改良には、水田用の工法に、モミガラ心土破碎などの補助暗渠としてトレンチャ掘削や切断刃で土に挿入し押し広げたレイヤー工法(佐野, 1981; 佐藤・小沢, 2003)、水田用の心土改良耕(北海道農業開発公社, 1990; 北海道農政部, 1996a)がある。畑用の工法に、オープナー式有材心土改良耕(横井ら, 2001b; 東田・北川, 2002)とカルチタイン式有材心土改良耕(北川ら, 2001)、トレンチャ補助暗渠(久保田, 2006; 網走支庁農業振興部, 2004)がある。他方、資材を利用しない低コストな改良には、パンブレーカによる心土破碎、弾丸暗渠がある。穿孔暗渠には、トレンチャ掘削式(北川ら, 2004; 2006c)や切断刃での掘削方式(北川ら, 2006b)がある。

これにより、これまで当然のように行われてきた短期間での暗渠再整備に対して、暗渠の排水機能低下が土壌物理性の悪化を原因とする場合に、既存暗渠を生しながら、表4-1-5の土層改良の組合せによる排水機能回復技術として活用できる。これらの対応がなされることで、経済性からも効果的であると考えられる。

表4-1-4 排水改良として用いられる土層改良法（補助暗渠）の種類と特徴

工 法	対象地目	施工方法の特徴	主な使用資材
有 オプナー式有材心土改良耕 (OST)	畑	60cm間隔にオプナーと呼ばれる破砕刃で心土破砕をしながら表土直下に幅10cm・高さ25~30cmの資材を充填した渠溝を構築する。	完熟バーク堆肥, 火山灰
有 カルチタイン式心土改良耕(CST)	畑	表土直下に資材を投入し、ヘビーカルチで下層土を耕耘破砕しながら資材を混和し、表土直下に厚さ10~15cmの資材入りの膨軟土層を面的に構築する。	完熟バーク堆肥, 火山灰
トレンチャー補助暗渠(TDU)	畑	トレンチャーにより幅7~15cmの縦溝を掘削し、掘削した溝に資材を充填して渠溝を構築する。渠溝の間隔と深さは自由に設定できる。	完熟バーク堆肥, 火山灰, 火山礫,
トレンチャー補助暗渠(TDP)	水田	土壌の物理性により適した掘削刃の形状が異なる。トレンチャーの掘削刃はカップ刃が一般的で、堅密な土壌ではカッター刃が適している。複合刃もある。”	モミガラ, 木材チップ, 貝殻
材 レイヤー補助暗渠(RD)	水田	破砕刃で土を押し広げた幅4~10cmの溝に資材を充填した渠溝を構築。渠溝の間隔は自由に設定できる。	モミガラ, 木材チップ
心土改良耕(ST)	水田	1m間隔に破砕刃で心土破砕をしながら表土直下に幅10cm・高さ25~30cmの資材を充填した渠溝を構築する。	モミガラ, 木材チップ 火山礫,貝殻
パンブレーカー（心土破砕）(SS)	畑	破砕爪と爪の最下部に接続したウイングを土中に引き込むことで下層土を破砕する。	—
無 弾丸暗渠 (MD)	全地目	破砕爪と爪の最下部に接続した円錐状の抵抗体を土中に引き込むことで、円形空洞を成型する。	—
トレンチャー掘削式穿孔暗渠(TMD)	畑	トレンチャーにより幅5~10cmの縦溝を掘削し、表土以下で溝の中央部分で横の土を寄せて土蓋をして空洞の渠溝を構築する。渠溝の間隔と深さは自由に設定できる。	—
材 切断掘削式穿孔暗渠 (CMD)	畑	切断刃と排土板により縦長の土塊を切り抜きながら持ち上げ、下層に幅10cmの縦溝を掘削し、溝横の土を寄せるなどして持ち上げた土塊を固定し、空洞の渠溝を構築する。渠溝の間隔と深さは自由に設定できる。	—

表4-1-5 農耕地土壌分類第2次案改訂版に基づく排水改良区分

大まかな 土壌区分	土壌群	土壌統群	暗渠の 間隔*1	土層改良*2	
				水田の補助暗渠	畑の補助暗渠
黒ボク土	黒ボク土(03)	厚層多腐植質(03A), 厚層腐植質(03B) 表層多腐植質(03C), 表層腐植質(03D), 淡色(03E)	—	—	(CST)
	多湿黒ボク土(04)	厚層多腐植質(04A), 厚層腐植質(04B) 表層多腐植質(04C), 表層腐植質(04D), 淡色(04E)	10~12m	—	OST・TDU・(SS)
	黒ボクグライ土(05)	多腐植質(05A), 腐植質(05B), 淡色(05C)	10m	TDP	OST・TDU・MD・TMD・CMD
台地土	岩屑土(01)	岩屑土(01A)	—	—	—
	褐色森林土(06)	細粒(06A), 中粗粒(06B), 礫質(06C)	(10~14m)	—	(CST・OST・TDU)
	灰色台地土(07)	細粒(07A), 中粗粒(07B), 礫質(07C), 石灰質(07D)	10m	ST・SS・MD	OST・TDU・SS・MD・CMD
	グライ台地土(08)	細粒(08A), 中粗粒(08B), 礫質(08C)	8~10m	TDP・RD・MD	TDU・MD・TMD・CMD
	赤色土(09)	細粒(09A), 中粗粒(09B), 礫質(09C)	—	—	—
	黄色土(10)*3	細粒(10A), 中粗粒(10B), 礫質(10C)	—	—	—
		細粒(10D), 中粗粒(10E), 礫質(10F)・斑紋あり	(10~14m)	—	—
暗赤色土(11)	細粒(11A), 礫質(11B)	(10~14m)	SS	OST・TDU・SS	
低地土	褐色低地土(12)	細粒(12A), 中粗粒(12B), 礫質(12C)・斑紋なし	—	(SS)	(SS)
		細粒(12D), 中粗粒(12E), 礫質(12F)・斑紋あり	(10~14m)	TDP・RD・SS	SS
	灰色低地土(13)	細粒・灰色系(12A), 細粒・灰褐色系(12D), 下層有機質(13H)	10m	TDP・RD・ST・MD	TDU・MD・TMD・CMD
		中粗粒・灰色系(12B), 礫質・灰色系(12C), 中粗粒・灰褐色系(12E), 礫質・灰褐色系(13F), 下層黒ボク土(13G), 斑紋なし(13I)	10~14m	RD・ST・SS	(OST)・TDU・SS
		細粒強(14A), 細粒(14D), 下層有機質(14G)	8~10m	TDP・RD・ST・MD	TDU・MD・TMD・CMD
グライ土(14)	中粗粒強(14B), 礫質強(14C), 中粗粒(14E), 下層黒ボク(14F)	10m	TDP・RD・ST・SS	TDU・SS	
砂丘未熟土(02)	砂丘未熟土(02A)	—	—	—	
泥炭土	黒泥土(15)	黒泥土(15A)	10~14m	TDP(・RD・MD) (埋木のある場合 RD・MDは不適)	TDU・TMD(・MD・CMD) (埋木のある場合 MD・CMDは不適)
	泥炭土(16)	泥炭土(16A)	—	—	—
造成土	造成台地土(17)	造成台地土(17A)	10~14m	TDP・ST・SS・MD	OST・CST・TDU・SS・MD・CMD
	造成低地土(18)	造成低地土(18A)	8~14m	TDP・RD・ST・MD	TDU・MD・TMD・CMD

*1 暗渠排水は北海道内の地力保全基本調査—土壌図・対策図—記載の間隔と代表的な土壌物理性の障害性や試験結果を参考に、北海道暗渠排水設計指針(北海道農政庁, 2002a)で対応可能な間隔の範囲に変更して示す。()内は土壌の状態により暗渠排水が必要である場合の間隔と土層改良工法。

*2 下層の土層改良の工法は表4-1-4の工法の()内に記載されている略記号とした。

*3 黄色土(10)は北海道に存在しない。一般的に排水の良い土壌である黄色土に対しては、MacEwan et al.(1992)の黄色土への暗渠の必要性を参考に、斑紋の有無で暗渠排水の区分をした。

第2節 要約

我が国では、生産性を維持するため暗渠排水を中心とした排水改良が広く行われている。その生産性への効果としては、1996年の北海道での冷湿害年における湿害に弱いテンサイやアズキなどの畑作物の収量維持効果を確認した。このことから、畑暗渠の生産性への影響は大きく、今後も農業者からの暗渠整備の要望は多いと予想される。

排水不良土壌の物理性に対応した排水改良技術については、排水不良な水田土壌のグライ土、灰色低地土、泥

炭土、畑土壌のグライ土、多湿黒ボク土、灰色台地土の土壌物理性や土壌水分条件から考えられる適切な暗渠間隔を示した。また、補助暗渠として組合せることのできる資材を利用したモミガラ心土破碎や心土改良耕、有材心土改良耕やトレンチャ補助暗渠、資材を利用しない低コストな心土破碎や弾丸暗渠、穿孔暗渠による土層改良技術を整理し、農耕地土壌図の分類法である農耕地土壌分類第2次案改訂版を用いて、暗渠排水と土層改良の組合わせによる排水改良区分を策定した。これは、暗渠再整備に対して、既存暗渠を生しながら、土層改良の組合わせによる排水機能を回復できる効果的な技術である。

第5章 総合考察

第1節 農地の基盤整備状況と暗渠の排水機能向上の改善対策

温帯から冷帯湿潤気候で降水に恵まれた我が国にとって、排水改良は労働生産性と土地生産性の維持・向上に必要不可欠な技術である。暗渠排水や排水路の整備といった排水改良は、戦前の国力増強や戦後復興期の食料増産に大きく貢献してきた。排水改良は、これらの食料自給率の向上や経営規模拡大に伴う大規模機械化農業の推進、多様な農業経営を創出していく上で、重要な役割を担っている。

我が国の農地の半分を占める水田での排水改良を伴う土地改良は、集約再編整備や汎用利用の観点から推進されている。これらを背景として、水田における暗渠排水と排水路の整備は、1990～2002年に平均で年間57千haとなっている。そのうち暗渠排水は15千haを占め、全国で施工されている。一方、畑に対する排水改良も多く、1990～2002年に平均で年間28千haの整備が行われ、そのうち暗渠排水は4千haを占めており、その97%は北海道である。このことを、我が国の排水不良土壌の特徴から考えると、水田土壌がグライ土と灰色低地土だけで農地面積の40%を占め、酸化還元障害がある水田が多く、水田暗渠の必要性は全国共通であった。一方、畑の湿性が問題となる地域は、北海道をはじめ東北地方などの積雪寒冷地が多く、畑暗渠の施工面積が北海道や東北地方で大きいことと一致している。このような、暗渠の施工実態から、我が国の代表的な畑地帯として北海道における畑の排水改良技術の検討は重要と考える。

また、これまでの暗渠施工済み面積が排水不良地面積に相当する現状においても、耐用年数の目安である15～30年前後の排水機能が低下した暗渠の再整備が増加することから、今後の暗渠施工面積は現状を維持すると予想される。この暗渠の整備に対しては暗渠の再施工だけでなく、既存暗渠に土層改良の組み合わせによって効果的かつ効率的に機能を回復させる技術を確立することは、我が国の農地の排水性を維持・向上させる上で、経済面からも大きな意義がある。

圃場の排水性向上のためには、圃場からの余剰水を迅速に排除する暗渠の排水機能低下の要因を解明することが必要となる。そこで、北海道各地で暗渠の排水機能低下が指摘された圃場に対して現地調査を行い、排水機能低下の実態と発生割合を明らかにするとともに、改善策

を検討した。

これまでに施工されてきた暗渠の最も大きな問題としては、暗渠の排水能力を向上させる疎水材の使用が水田61.1%、畑41.8%、草地4.1%と地目により格差が大きく、使用率も十分でないことがあった。また、被覆材だけの暗渠では、稲ワラが暗渠管へ付着して管内への通水を阻害するため、疎水材への変更など対策を講じるべきであることも明らかにされた。

暗渠自体が原因となる排水機能低下の要因についても明確となった。暗渠管のズレは少なく、暗渠管内の沈積物堆積の発生率は13.5%と若干多かった。また、泥炭土における暗渠管の浅層化や黒ボク土圃場での施工時に掘削溝の崩落する問題が指摘できた。加えて、畑暗渠の施工管理の問題として勾配管理が重要であることが明らかになった。しかし、これら暗渠自体が原因となる問題の発生率は20%未満であり、暗渠の排水機能低下の主要な要因ではなかった。

他方、暗渠の排水機能を低下させる最も大きな要因は、暗渠の埋戻し部の透水性低下であった。ほとんどの暗渠では、地目によらず埋戻し部が施工前の心土より透水性が低下していた。また、営農による排水対策である圃場内小排水路となる溝切りや心土破碎などの実施率は、市町村によって異なり、多くは不十分であった。そのため、暗渠施工圃場において耕盤層やグライ層が発達している割合は、水田の71.3%、畑の52.6%と多かった。また、施工管理や水閘など附帯物の維持管理が不十分で排水機能が低下する事例もあった。

以上、暗渠の排水機能低下の要因については、次のようにまとめることができた。①疎水材が未使用であること、②暗渠排水の埋戻し部や耕盤層に透水性が不良な土層が形成されること、③透水性の不良な土層に対する営農排水対策を行っていないこと、が原因であった。一方で、暗渠自体の機能不良は、④暗渠管の閉塞、⑤泥炭土において経年的に暗渠管が浅くなること、さらに、⑥暗渠の維持管理が不十分であること、が原因であった。

まず、暗渠の排水機能低下の要因から埋戻し部の透水性を改善する必要性が明らかにされた。このことで、暗渠の排水機能向上には、埋戻し部の断面積を少なくして、暗渠直上の通水性を高める疎水材を使用することが有効である。疎水材としては、これまで水田でモミガラが、畑で砂利が広く使用されていたが、依然として疎水材の使用率が低い状態が続いている。疎水材の使用率向上に

は、各地域において疎水材として利用可能な地域資源の開発が必要であった。疎水材には、耐久性があり環境に対する影響が少なく、資材の確保や取り扱いがしやすく、安価であることが必須であり、これらに適合する資材の利用開発を目指した。新たな疎水材としては次の資材が有効と考えた。パルプ用原料として全国で生産され輸入自由化により販路が減少している地場産の木材チップや、伐採した樹木根を粉碎した伐根チップの資材、無機質系疎水材として各地の火山礫や火山灰、また、ホタテ貝殻も地域発生資材であり、これまでもカキ殻が疎水材に使用されている。これら資材を疎水材として利用するため、各資材の理化学性を明らかにする必要がある。

水田の疎水材であるモミガラは、疎水材の中で容積重が 0.12Mg m^{-3} と軽く、透水性も 10^{-2} m s^{-1} と高いが圧縮されやすい。有機物であるため経年変化による腐朽によって物理性が変化し、徐々に疎水材の断面積の維持機能や通水機能が低下する。酸化的で腐朽しやすい土壌で10年経過すると疎水材の断面積が施工当初より激減する。しかしながら、水田では必ず発生する資材であり有効に活用することが重要である。

新たな疎水材であるチップは、容積重が 0.37Mg m^{-3} とモミガラより大きい、粗大な間隙が多くて透水性が高く、圧縮されにくい。チップはC/N比も高く腐朽に強く疎水材に適している。加えて、伐採した樹木根をチップ化した伐根チップは容積重がチップより多少軽い程度で大差なく、疎水材に使用可能である。各チップの耐腐朽性は、モミガラに比べて優れていた。特に、針葉樹のチップではリグニン含量が多いことから耐腐朽性に勝っていた。チップの作物への影響を幼植物栽培試験によって検討したが問題なく、懸念された排水中のフェノール類も認められないことから使用上の問題は無い。

無機質系疎水材には、各地で産出される火山礫と火山灰がある。北海道では疎水材に適した火山礫と火山灰が6産地あり、それぞれの粒径の特徴を整理した。また、水産物加工により廃出されるホタテ貝殻は、理化学性から疎水材として適している。ホタテ貝殻の疎水材としての耐用年数は、15年経過した貝表面のカルシウム結晶の変化から、溶解程度は少なく、15年以上であると考えられた。

これら提案した新しい疎水材は、理化学性からみて利用可能である。特に、チップは北海道をはじめ、東北地方でも利用され始め、全国的に広がりつつある。また今後の資材開発の参考に資するため、新たな資材の疎水材としての適正判断について手順を示した。

発生割合の多い暗渠自体が原因となる排水機能低下の要因には、暗渠管閉塞がある。特に顕著な事例としては、

十勝岳噴火泥流により強酸性土層が堆積した過湿な泥炭土で暗渠管が酸化鉄で完全に閉塞する現象が見られた。そこで、十勝岳泥流地帯で発生している暗渠管閉塞を回避するため、閉塞物質の生成過程を解明するとともに、その対策工法の確立が求められていた。

暗渠管閉塞圃場は、土壌に多量のイオウを含む強酸性土壌である。下層には泥炭層があり鉄とイオウが硫化鉄や硫酸鉄として集積しており、これらが暗渠管の急速な閉塞に関与していた。また、暗渠管の閉塞物質は、非晶質の酸化鉄で鉄酸化細菌の代謝産物であった。この結果から、短期間で暗渠管を閉塞させる物質の生成過程は、次のように考察した。①湿地である泥炭土に火山噴火に伴う泥流が堆積した。この泥流中のイオウは、酸化され硫酸となり、土壌中の鉄とともに下層の泥炭層に移動した。②基盤整備による客土と酸性硫酸塩土壌の影響が抑制できる水田利用が行われ土壌が還元的になり、下層の泥炭層に硫酸と鉄が硫化鉄として蓄積した。③農業情勢の変化にともない、本地区でも畑転換が進み、暗渠排水を施工したことにより、土壌中に蓄積していた硫化鉄は、急速に酸化され、硫酸と鉄が含鉄酸性水として暗渠管に流入した。④暗渠管に流入した含鉄酸性水は、鉄酸化細菌の働きによって鉄の代謝産物が暗渠管内に層状に沈積し、暗渠管を閉塞した。

この暗渠管閉塞の対策工法には、暗渠管に酸化鉄を沈積させる鉄酸化細菌の生態を考慮して、疎水材を用い流入水のpHを変える方法を考案した。具体的には、暗渠管を囲むように厚さ10cmのケイ酸カルシウムを主成分とするロックウール疎水材を敷設することである。この機能は、暗渠管へ集水される含鉄酸性水の中和と除鉄が行われる。ロックウール浸透水の中和は、pHを高めて好酸性の鉄酸化細菌の繁殖を抑制する。また、pHを7.0以上に高めることは、浸透水中の鉄を水酸化第二鉄として析出させロックウール中に沈殿させ鉄を濾過する。この除鉄作用により暗渠管内で沈積する鉄そのものを減少させる。これらの作用により、暗渠管内で鉄酸化細菌の繁殖が抑制され、鉄が付着しにくくなり、暗渠管閉塞を回避できる。この施工効果は6ヵ月経過時の暗渠管で確認でき、従来暗渠に多量の鉄が付着していたが、ロックウール疎水暗渠の暗渠管に鉄の付着はなかった。また、この時のロックウールの化学成分に変化はなく、排水のpHを上昇させる化学的な効果は長期間続くことが予想され、計算上は15年以上持続すると推定された。

このようなロックウール疎水材により鉄酸化細菌の繁殖を抑制して酸化鉄による暗渠管閉塞を防止する実用技術を開発したことにより、強酸性土壌の農地において発生する暗渠管閉塞問題を解決した。

第2節 圃場の総合的な排水改良技術の確立

排水改良の具体的な農業生産性への影響としては、冷湿害時における畑作物への収量維持効果について明確にした。このことから、暗渠排水を基軸とした排水改良の農業生産性への寄与は大きく、今後も農業生産地からの暗渠整備の要望は多いと考えられ、土壌に対応した排水改良技術の提案が求められる。

しかし、排水改良の実施にあたって暗渠の排水機能低下は、暗渠管閉塞などの暗渠再施工が必要な排水機能低下の原因よりも、暗渠周辺の土壌物理性の悪化が原因である場合も多いことが明らかとなった。そのため、暗渠の再整備に対しては、土層改良を組合せて既存暗渠を生じて排水機能を回復させる技術が経済性から有効であった。

暗渠に組合せる土層改良法には、次の既存の工法があった。資材を用いた土層改良には、水田で線的に排水溝を作るモミガラ心土破碎がある。畑では、同様な工法のオプナー式有材心土改良耕（横井ら、2001b; 東田・北川、2002）があり、既に北海道十勝地方で普及している。しかし、完熟バーク堆肥の投入量が多く、量を調整できない改善点が残されていた。そのため、同工法をトレンチ掘削により実施する補助暗渠工法（久保田、2006; 網走支庁農業振興部、2004）の検討が進められている。また、耕盤層などに対して面的に土壌物理性を改良でき、資材の使用量が少なく調整できる工法が必要とされた。他方、資材を利用しない低コストな改良には、広く普及している心土破碎や弾丸暗渠があるが、これ以外に実用されている工法がなく、新たな土層改良法の開発が必要であった。

新しい土層改良法としては、工法の開発と実用化に向けた効果検証を進めた2種類について提案した。資材を用いた土層改良であるカルチタイン式心土改良耕は、堅密な土壌の心土を、ヘビーカルチタインで耕耘破碎し、同時にバーク堆肥を混和し膨軟にすることで、心土の土壌物理性を改良する工法である。本工法を施工することで堅密な心土が膨軟になり、容積重の低下や気相の増加が認められた。また、作物根の養分吸収が改善され、心土での養分吸収量が増加し、作物収量が良好になった。本工法の土壌物理性の改良効果は、施工後5年経過しても改良部周辺の気相率が $0.1\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ 程度で土壌硬度も 0.30MPa 程度と良好な状態を保っていた。また、5年経過時にも作物収量に改良の効果が認められた。本工法の対象となる土壌は、褐色森林土で、心土の山中式土壌硬度が心土破碎施工の目安である 0.72MPa 以上である。カルチタイン式心土改良耕はバーク堆肥の投入量の調整が可能で、これまでの土層改良より経済面と環境面から優れている。このような柔軟性を有するカルチタイン式心土改

良耕は、堅密な畑土壌に対して作物の根域拡大による作物生産性の向上に貢献できる数少ない土層改良である。

資材を用いない低コストな排水改良技術である新しい穿孔暗渠には、トレンチ掘削式（北川ら、2004; 2006c）と切断刃での掘削方式（北川ら、2006b）などがある。新たな工法として実用段階まで技術を確立したトレンチ掘削式穿孔暗渠は、トラクタ直装の専用掘削機で、深さ $60\sim 120\text{cm}$ の任意の深さに直径 20cm の円形空洞とその上方に幅 7cm の縦溝の空洞を掘削して、縦溝の途中から溝壁面を寄せて重ねた土蓋により溝を閉じて、これにより通水する溝空洞を保持する工法である。この大きな空洞を持つ穿孔暗渠の排水効果は、暗渠管を用いた暗渠と同程度に余剰水を排除できた。

穿孔暗渠の耐久性に関係する溝空洞の経年変化は、泥炭土では7年後に溝空洞全体がやや小さくなり、10年後には溝空洞が40%減少するが溝空洞の形状が維持されていた。粘質な低地土では5年後で溝空洞の変形が顕著になった。しかし、溝空洞が変形しやすい土壌条件もあり、溝空洞が長期間安定する土壌は限定される。特に、台地土では溝空洞が崩壊しやすく適用が困難であった。また、穿孔暗渠は、施工深を深くすることができ、弾丸暗渠の空洞より深くに排水の空洞を構築できる特徴がある。これにより穿孔暗渠は、畑のプラウ耕耘深や草地更新時の耕耘によって破壊されない。そのため、穿孔暗渠が適用できる地目の条件は、弾丸暗渠より広い。以上のことから、トレンチ掘削式穿孔暗渠は泥炭土と粘質な低地土の転換畑、畑、草地の広範囲の農地に適用できると判断された。

排水不良地の土壌物理性に対応した排水改良技術について、代表的な排水不良な土壌の物理性と暗渠排水の効果から適切な暗渠間隔を明らかにした。また、最近の新しい土層改良技術を含めてのそれぞれの特徴を整理して適用性を明らかにした。さらに、土壌の特性を評価するため農耕地土壌図の分類法である農耕地土壌分類第2次案改訂版を用いて、土壌に対応した暗渠間隔と土層改良の適用性から、暗渠排水と土層改良の組合せによる排水改良区分を提案した。これにより、排水改良の再整備を行うにあたって、既存暗渠を生じた土層改良の組合せにより排水機能を回復する効果的な技術である。

以上のことから、我が国で広く行われている排水改良をより効果的な技術にするため、①暗渠の排水機能低下の要因解明を行い、その対策として暗渠周辺の通水機能を向上させる新たな疎水材と暗渠管閉塞を防止する技術を開発すること、②暗渠だけに頼らない土層改良法の検討を行うこと、③これらの①、②に加え土壌を考慮した新しい土層改良法を組合せた総合的な排水改良技術を提案した。

第6章 要 約

排水が不良な農地においては、圃場の排水性を抜本的に改善するため、地下排水法である暗渠による改良が施されてきた。北海道において排水改良を必要とする農地面積は、全体の48.6%に及ぶ。これまでに暗渠が施工された面積は全排水不良地に匹敵するが、耐用年数30年以内の暗渠施工面積は全排水不良地の半分である。主要な水田と畑地帯では暗渠の再整備が行われているが、一方で耐用年数を超過した暗渠は増加傾向にあり、暗渠の排水機能を回復する対策の必要性が増している。

また、これまでの排水改良は暗渠単独に偏っていた。その暗渠排水の設計基準は、計画排水量を重要視しており、暗渠間隔を狭くすることで排水量の増加を導いている。しかし、実際には排水量が増加せず排水性が改善されていない問題がある。圃場の排水性向上には暗渠よりも土壌の物理性を改善する土層改良が必要とされるが、土層改良を組合せた暗渠の導入は進んでいない。そのため、圃場の排水性向上を図るには、土壌の物理性を考慮した土層改良を組合せた暗渠による排水改良技術の確立する必要がある。

そこで本研究では、主要な排水改良である暗渠の排水機能低下の要因を明らかにし、その対策として暗渠排水の改善策や新しい土層改良法を開発した。加えて、排水不良土壌の物理性を全国統一的な土壌評価区分を用いて排水改良の観点から整理するとともに、土壌を考慮した土層改良を積極的に活用する排水改良技術の適用区分について提案した。

1. 暗渠の排水機能低下の要因を解明して改善策を確立するため、暗渠施工の実態調査から要因別の排水機能低下の発生割合を明らかにした。暗渠の排水機能が十分に発揮されない要因には、①暗渠施工時に埋戻した部位の土壌構造の消失と暗渠周辺への耕盤層形成による透水性低下など、土壌物理性の関与が大きいこと。②暗渠自体による排水機能低下の要因には、1998年以前に施工された暗渠では暗渠管周辺の通水を促進する資材である疎水材の使用率が43.4%と低いこと。③暗渠管への沈積物堆積の発生率が13.5%と若干高いこと。④泥炭土において暗渠管が経年的に浅くなること。⑤暗渠の維持管理と営農による排水対策が不十分なこと、などが明らかになった。

暗渠の排水機能低下の主要因である暗渠施工時に埋戻した部位の土壌の透水性低下に対しては、疎水材を敷設

することで改善できる。疎水材には、モミガラ以外に地域発生資材である木材チップや伐根チップ、火山礫と火山灰、砂利、ホタテ貝殻を利用することが有効と考え、素材の特性と機能性、素材の経年変化、作物生育や排水水質への影響などを実験的に明らかにして、疎水材としての適用性を示した。

また、暗渠の排水機能低下要因の一つである暗渠管が閉塞する現象に対しては、発生要因を解明して対策技術を開発した。十勝岳噴火に由来する泥流と泥炭が存在する酸性硫酸塩土壌では、暗渠施工後の1年という短期間で暗渠管が閉塞した。化学分析により暗渠管の閉塞物質には鉄とイオウの含有量が多く、鉄酸化細菌により生成された酸化鉄であることが判明した。この現象は、還元条件の泥炭層に蓄積していた硫化鉄が溶けて、暗渠に含鉄酸性水として集水され、暗渠管内で鉄酸化細菌が急速に繁殖し、酸化鉄として暗渠管を閉塞するというプロセスが考えられた。そこで、対策技術としては、ケイ酸カルシウムが主成分であるロックウールを疎水材に使用して排水を中和・除鉄し、鉄酸化細菌の繁殖を抑制することで、暗渠管の酸化鉄による閉塞を防止する技術を考案して実用化した。

2. 圃場の排水性を左右する土壌物理性の改善には、土層改良が必要となる。そこで、資材を利用した新しい土層改良法であるカルチタイン式心土改良耕を開発した。これは、心土が堅密な土壌や耕盤層が形成された土壌に対して、心土をヘビーカルチにより耕耘破碎すると同時に完熟パーク堆肥を混和し膨軟にすることで、心土の物理性を改良する土層改良法である。本工法では、心土への有機物投入量を心土の土壌硬度が0.72～1.37MPaの場合には完熟パーク堆肥4kg m⁻²とし、土壌硬度が1.37MPa以上の堅密な場合には完熟パーク堆肥5～6kg m⁻²とすることで、改良効果を高めて、効果を持続させることが可能であった。さらに、本工法には、心土の物理性改善によって根の養分吸収を改善し、作物収量を良好にする効果も認められた。

資材を利用しない新しい土層改良法であるトレンチャ掘削式穿孔暗渠は、深さ60～120cmの任意の深さに直径20cmの円形空洞とその上方に幅7cmの縦溝の空洞を掘削して、縦溝の途中から溝壁面を寄せて重ねた土蓋により溝を閉じて、これにより通水する溝空洞を保持する工法である。本穿孔暗渠は、暗渠管を用いる暗渠と同じく

余剰水を圃場外に排除でき、作物の湿害回避に効果的であった。泥炭土では、10年後で溝空洞が半分程度まで小さくなったが、通水する円形空洞が維持されていた。粘質な低地土では5年後で溝空洞の変形が顕著になる。本穿孔暗渠は、泥炭土と低地土で長期間、通水するための溝空洞が維持される。しかし、台地土では半年で溝空洞が崩落するため適用できない。本穿孔暗渠は暗渠管を用いる暗渠の施工費の4分の1以下と低コストであった。

3. 圃場の排水改良の農業生産性への具体的な影響については、1996年の冷湿害年においてテンサイとバレイショ、アズキの収量が排水改良区において低下しなかった結果から、その効果が大きいことを明らかにした。

畑と水田における排水不良土壌の物理性に対応した排水改良技術を設定するにあたっては、水田土壌のグライ土、灰色低地土、泥炭土、畑土壌のグライ土、多湿黒ボク土、灰色台地土の代表土壌の物理性を定量化した。これらの土壌に対し、暗渠を一般的な10~12m間隔と試験的に高密度な5~6m間隔で設置して、土壌水分や暗渠

排水量の変化を計測し、各土壌における暗渠の排水効果から必要性を検討した。その結果は、土壌の全国統一的な分類法である農耕地土壌分類第2次案改訂版の土壌区分に対応する暗渠の要否と適切な暗渠間隔として提示した。これに加えて、土壌物理性を抜本的に改善して圃場の排水性を向上させる土層改良法については、資材を利用するモミガラ心土破碎や有材心土改良耕、新しい改良法であるカルチタイン式心土改良耕、資材を利用しない低コストである心土破碎や弾丸暗渠、新しいトレンチャ掘削式穿孔暗渠などの適用条件を整理した。

以上のように本研究では、暗渠の排水機能低下について要因別の発生割合を解明し、改善策として地域発生資材を利用した疎水材や暗渠管の閉塞防止技術を開発して暗渠の機能向上を図った。また、土壌を考慮した圃場の排水性向上の必要性から、新たな土層改良法を開発するとともに、適切な土層改良法と暗渠の組合せについての排水改良区分を策定し、総合的な排水改良技術として確立した。

謝 辞

本研究をとりまとめるにあたり、北海道大学大学院農学研究科教授長谷川周一博士には終始暖かい激励と懇切な指導を賜るとともに、ご校閲の労をおとりいただいた。北海道大学農学研究科教授長澤徹明博士には懇切なご校閲いただいた。北海道大学農学研究科助教授相馬尅之博士には研究当初から温かい激励と指導を賜るとともに、ご校閲をいただいた。心から感謝申し上げます。

本研究は、1994年に元北海道立中央農業試験場農業土木部生産基盤科長横井義雄氏（元北海道立農業大学校教務部長）の熱心なご指導とご助言により開始されたものである。また、農業土木研究の端緒を与えてくれたのみならず、その後の試験研究の発展方向について元同場農業土木部長前田要博士（元北海道立花・野菜技術センター場長）並びに元同場農業土木部主任研究員成田保三郎博士（現専修大学北海道短期大学部教授）にご指導をいただいた。前北海道立中央農業試験場農業環境部環境基盤科長竹内晴信氏（現北海道立十勝農業試験場栽培環境科長）並びに前同場農業環境部主任研究員志賀弘行博士（現北海道農政部）には研究遂行のご指導とご協力をいただいた。北海道立中央農業試験場環境保全部農業環境科長中本洋氏並びに同場環境保全部主任研究員中津智史博士には懇切なご指導とご助言をいただいた。

また、元北海道立中央農業試験場農業環境部長能代昌雄氏、元同部長今野一男博士、元同場生産システム部長稲津脩博士、北海道立中央農業試験場環境保全部長木曾誠二博士、元帯広畜産大学教授菊地晃二博士には終始温かい激励と適切なご指導いただいた。

本研究に関連して2001年に国内研修を受け入れていただいた独立行政法人農村工学研究所農村総合研究部水田汎用化システム研究チーム長藤森新作氏には農地整備の技術開発のあり方について貴重なご指導をいただいた。同所企画管理部長小前隆美博士、同所農村環境部長長利

洋博士には、我が国の農業発展の視点からの貴重な経験を与えていただくとともに、研究遂行にあたり有益なご助言をいただいた。

本研究に関連する2002年の北海道における暗渠排水設計指針改訂に伴う試験調査にあたり、北海道大学名誉教授梅田安治博士には暗渠排水に関する調査研究のみならず、農業土木研究に対する貴重なご指導を賜った。

本研究の各試験を実施するにあたり、日鉄環境エンジニアリング株式会社大石徹博士、新日鐵化学株式会社札幌支店長加藤恒昭氏、前上川支庁中部耕地出張所中津敬太氏（現後志支庁）にはロックウール暗渠疎水材の開発に多大なるご協力いただいた。有限会社ユニット商事株式会社代表取締役社長西口元治氏には掘削式穿孔暗渠の施工試験及び調査にご協力いただいた。財団法人北海道農業開発公社の関係各位には心土改良耕並びに各種土層改良法の開発及び試験実施にあたりご協力いただいた。また、北海道農政部並びに各支庁事業実施部局、各土地改良区の関係各位には暗渠排水設計指針改訂に伴う試験調査や各種試験研究実施にあたり多大なるご協力いただいた。

本研究の研究遂行にあたり、前北海道立上川農業試験場栽培環境科後藤英次氏（現北海道立中央農業試験場水田転作科）には多大なるご協力をいただいた。前北海道立中央農業試験場農業土木部農村環境科長寺元信幸氏（現網走支庁）、前同科長山田雅彦氏（現北海道農政部）、北海道立中央農業試験場環境保全部農業環境科橋本均氏には農業土木研究についてご指導をいただいた。また、北海道立中央農業試験場須田達也研究員、塚本康貴研究員、末久美由紀研究員、上野達研究員、関係各位には試験及び調査の実施にご協力いただいた。以上の各位に深甚なる感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 網走支庁農業振興部(2004): 補助暗渠接続工, 畑地帯総合土地改良事業担い手育成型佐呂間東部地区調査報告書, 調査51業務.
- 2) Cavelaars, J.C., Vlotman, W.F., Spoor, G. (1994): Subsurface drainage Systems, Drainage principles and applications, second Ed, 827-929, IRLI publication 16.
- 3) Concaret, J. (1981): Drainage agricole, The'orie et Pratique, CHAMBRE re'gionale d'agricluture de bourgogne, FRANCE.
- 4) Dent, D. (1986): Acid sulfate soils, A baseline for research and development. ILRI publication, 39, p.37, Wageningen, Netherlands.
- 5) Doolittle, J.A. (1987): Using Ground-penetrating radar to incrsase the quality and effeciency of soil surveys, Soil Survey Techniques, Soil Sci. Soc. Am. Spesial Publication No. 20, 11-33.
- 6) 土質工学会(1991): 土の実験実習書, 土質工学会, 25-36.
- 7) 土壤保全調査事業全国協議会(1991): 日本の耕地土壌の実態と対策, 博有社, 東京, 17-55.
- 8) 土壤環境分析法編集委員会(1997): 土壤環境分析法, 博友社, 東京, 24-29; 48-58; 195-196; 222-226; 262-264.
- 9) 土壤養分測定委員会(1997): 鉄, 土壤養分分析法, 養賢堂, 東京, 297-316.
- 10) FAO(1982a): Drainage design factors, FAO Irrigation and drainage paper No. 38.
- 11) FAO(1982b): Drainage testing, FAO Irrigation and drainage paper No. 28.
- 12) 福中斉, 村尾重信, 足立一日出, 深山一弥, 千葉豪 (1980): 畑地の土地改良と土壌水分管理, II 畑地の土壌水分と地下水位管理, 北農, 47(2), 24-35.
- 13) 福島忠雄(1974): モミガラ詰めモグラ暗渠施工機の試作, 高水分重粘土地の暗キヨ排水工法について(1), 農土誌, 42(4), 235-240.
- 14) 古木敏也, 長利洋(1990): 暗きよ疎水材としてのカキ殻の利用について, 農土誌, 58(8), 799-805.
- 15) 藤野尚士, 林進(1980): 福井県三里浜地区における水田転換について, 農土誌, 48(9), 663-668.
- 16) 富士岡義一, 丸山利輔(1971a): 粘質土壌水田における暗渠キヨ排水に関する研究(Ⅰ), 暗キヨ埋戻し部と作土キ裂の役割, 農土論集, 35, 48-53.
- 17) 富士岡義一, 丸山利輔(1971b): 田面タン水と暗キヨ排水量関係の一考察, 粘質土壌水田における暗渠キヨ排水に関する研究(Ⅱ), 農土論集, 37, 26-32.
- 18) 富士岡義一, 丸山利輔(1971c): 水理的にみた暗渠組織の合理的決定法, 粘質土壌水田における暗渠キヨ排水に関する研究(Ⅲ), 農土論集, 37, 33-38.
- 19) 藤原俊六郎 (1985): シャーレを使った堆肥の簡易腐熟度検定法, 土肥誌, 56, 251-252.
- 20) Garrels, R.M. and Chraist, C.L. (1965): Solutions, minerals and equilibria, Freeman, Cooper & company, Son Francisco, p.450.
- 21) 橋本均, 木村清, 大垣昭一(1985): モミガラ疎水材の耐久性について, 北農, 52(2), 43-51.
- 22) 橋本均(1987): 心土破碎の雪上施工, 土壌の物理性, 54, 43-48.
- 23) 橋本均・志賀弘行(1993): 北海道土壌区一覽, 北海道立農業試験場資料, 21.
- 24) 橋本良材(1973): 新潟県における大区画水田の暗渠排水の実施例, 農土誌, 41(9), 597-602.
- 25) 秀島好昭, 山岸巖, 月居誠, 大矢根昌雄(1993): 疑似グライ土畑地における被覆材等の異なる暗渠の排水機能, 農土誌, 61(9), 849-854.
- 26) 東田修司, 北川巖(2002): 十勝地方の多湿黒ボク土に対するパーク堆肥充填有材心土改良耕の効果, 北海道集報, 83, 51-54.
- 27) Hathoot, H.M. (1998): Theory of pipe drainage assisted by mole drainage, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 124, 102-107.
- 28) 北海道開発局開発土木研究所土壤保全研究室(1993): 北海道の農耕地土壌の物理性とくに水分保持特性, 北海道の畑地かんがいのための土地資源緒元, 附図1北海道農耕地の重力水孔隙量(排水特性)分布図.
- 29) 北海道開発局農業水産部, 北海道農政部(1993): 気象変動下における土地改良事業の有効性調査, 10カ年の概要昭和58~平成4年, 北海道開発局資料.
- 30) 北海道開発局(1994): 北海道の農地の現状, 第3次土地利用基盤整備基本調査.
- 31) 北海道立総合経済研究所(1963a): 北海道農業発達史上巻, 北海道立総合経済研究所, 中央公論事業出版, 93-234, 955-1028.
- 32) 北海道立総合経済研究所(1963b): 北海道農業発達史上巻, 北海道立総合経済研究所, 中央公論事業出版, 札幌, 818-872, 1432-1478.

- 33) 北海道農業土木協会(2006): 農業農村整備事業制度について, “06~07” 農業農村整備事業実務必携, 44-51.
- 34) 北海道農業開発公社(1990): 農用地整備用機械便覧, (財)北海道農業開発公社, 24-25.
- 35) 北海道農政部(1989a): 団体営土地改良事業等採択地区便覧昭和39年~平成元年, 北海道農政部農村計画課.
- 36) 北海道農政部(1989b): 道営土地改良事業等採択地区便覧昭和39年~平成元年, 北海道農政部農村計画課.
- 37) 北海道農政部(1996a): 土層改良計画指針, p.15; 28-38; 134-139.
- 38) 北海道農政部(1996b): 農業農村整備事業採択地区便覧昭和61年~, 北海道農政部農村計画課.
- 39) 北海道農政部(1998): 暗渠排水設計指針(案), 31-32.
- 40) 北海道農政部(1999): 農業農村整備事業採択地区便覧平成元年~平成11年, 北海道農政部農村計画課.
- 41) 北海道農政部(2002a): 暗渠排水設計指針, p.23; 63-68.
- 42) 北海道農政部(2002b): 酸性硫酸塩土壌の判定, 北海道施肥ガイド(施肥標準・診断基準・施肥対応), p.72.
- 43) 北海道農政部(2005): 北海道における有機質資材の利用ガイド, 北海道農政部食品安全室, 41-45.
- 44) 北海道立中央農試(1972): 強粘質水田の排水法改善, 北海道農業試験会議, 普及奨励ならびに指導参考事項, 北海道農政部, 145-158.
- 45) 北海道立中央農業試験場(1985): 酸性硫酸塩土壌の判定法, 北海道農業試験会議成績会議資料, 普及奨励並びに指導参考事項, 北海道農政部, 295-297.
- 46) 北海道立中央農業試験場(1990): 北海道土壌区一覧, 北海道立農業試験場資料, 21.
- 47) 北海道立中央農試(1996): カラマツチップの暗渠疎水材への適応性, 北海道農業試験会議, 普及奨励並びに指導参考事項, 北海道農政部, 319-320.
- 48) 北海道立十勝農業試験場(1989): 地中探査レーダーによる土層調査報告書—土壌断面と画像写真集(第2集)—, 土壌保全対策診断調査報告書.
- 49) ICID(1987): Design practices for covered drains in an agricultural land drainage system, A world wide survey, International commission on irrigation and drainage, New Delhi, India, .
- 50) 猪狩源三(1940): 十勝岳爆発流泥に関する調査成績, 北海道農事試験場報告, 39.
- 51) 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.
- 52) 井上久義(1989): 亀裂が発達した粘土質圃場における水移動現象のモデル化, 土壌の物理性, 59, 35-51.
- 53) 井上嘉幸(1972): 木材の劣化と防止法, 森北出版, 東京, 19-31.
- 54) 石渡輝夫, 齊藤万之助(1989): 北海道における国営農地開発事業対象地の土地条件と今後の課題, 農土誌, 57(2), 91-97.
- 55) 石渡輝夫, 沖田良雄, 齊藤万之助(1992a): 北海道における各種酸性硫酸塩土壌の区分, 分布及び性状, 開発土木研究所月報, 467, 2-7.
- 56) 石渡輝夫, 横濱充宏, 齊藤萬之助(1992b): 重粘土地における暗渠埋戻し土の性状と埋戻し処理のあり方, 農土誌, 60(1), 1-6.
- 57) 石渡輝夫・小林信也・齊藤萬之助(1993): 北海道の農耕地土壌の孔隙分布特性とその分布図, 土肥誌, 64(6), 685-689.
- 58) Ishiwata, T., Takamiya, N., Oya, T. and Yokobori, M.(1998): Properties and components of deposit which occurred inside a drainage tube, Soil Sci.Plant Nutr., 42, 573-586.
- 59) 岩間秀矩, 塩崎尚郎(1982): 重粘土における畑地の水収支, 土壌の物理性, 45, 39-47.
- 60) 神部広之, 増川熙之, 杉山英雄, 堀要(1975): 暗キョ排水機能促進剤について(I), 農土誌, 43(5), 5-12
- 61) 神部広之, 光永演充, 堀要, 杉山英(1977): 暗キョ埋戻し土壌の安定性, 暗キョ排水機能促進剤について(II), 農土誌, 45(8), 546-550.
- 62) 神部広之, 光永演充, 杉山英雄(1978): 現場における暗キョ埋戻し部の機能保持暗キョ排水機能促進剤についてIII, 農土誌, 46(6), 415-419.
- 63) 兼子健男, 豊田勇, 犬童止, 竹本眞悟(1995): 動力噴霧機を利用した暗渠目詰まり除去技術, 農土誌, 63(10), 424-429.
- 64) 木俣勲, 富士岡義一, 丸山利輔(1971): 暗キョ流出解析へのユニットグラフ法の適用と暗キョ流出量の長期変動の推定—転換畑における降雨と暗キョ流出に関する研究(II)—, 農土論集, 38, 59-65.
- 65) 菊地晃二(1981): 十勝地方における土壌類型区分図とその土壌改良対策への応用, 道立農業試験場報告, 34.
- 66) 菊地晃二(1996): 十勝畑作地域における土地生産性の推移と今後の土地改良指針, 北海道十勝支庁農業振興部刊行物, 1-75.
- 67) 金容煥, 川村登(1977): 平衡式振動弾丸暗渠せん孔機の研究, 農業機械学会誌, 39(3), 299-304.
- 68) 北田久志(1993): 北海道の畑地排水, 農業土木学会

- 誌, 61(9), 843-837.
- 69) 北川巖, 横井義雄, 津田真由美(1996): カラマツ木材チップの暗渠疎水材への利用, 水と土, 105, 54-62.
- 70) 北川巖, 竹内晴信, 横井義雄(2000): 北海道における暗渠排水の実態と機能向上対策, 平成11年度新しい研究成果—北海道地域—, 北海道農業試験研究推進会議, 農林水産省北海道農業試験場, 20-29.
- 71) 北川巖, 横井義雄, 後藤英次, 相馬尅之(2001): パーク資材混合カルチタイン式心土改良耕による北海道上川地方の堅密固結性土壌の改良, 土肥誌, 72(3), 439-443.
- 72) 北川巖, 竹内晴信, 横井義雄(2004): 無材暗きょによる低コスト排水改良技術, 土肥誌, 75(4), 483-486.
- 73) Kitagawa, I. and Takeuchi, H. (2004): The Mechanism and Countermeasure for a Clogged Underdrain Pipe in a Low pH Area Consisting of Mudflow from Mt. Tokachidake. The 6th International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH, Sendai, Japan, p. 330-331.
- 74) 北川巖(2005): 積雪寒冷地における排水改良の現状と今後の展開, 土壌の物理性, 100, 43-53.
- 75) 北川巖, 竹内晴信, 中津敬太(2005): 泥流地帯における暗きょ排水管閉塞の対策技術, 農土誌, 73(8), 727-728.
- 76) 北川巖, 竹内晴信, 木曾誠二(2006a): 十勝岳泥流地帯における暗渠管閉塞要因の解明と回避対策, 農土論集, 241, 117-122.
- 77) 北川巖, 横井義雄(2006): カラマツ木材チップの暗きょ疎水材としての適用性, 農土論集, 243, 317-322.
- 78) 北川巖, 竹内晴信, 千葉佳彦, 榊佳一, 小谷晴夫, 堀川泰彰, 大野稔彦, 榎田謙(2006b): 吸水渠施工装置及びその施工方法, 特許38257575号.
- 79) 北川巖, 竹内晴信, 横井義雄(2006c): トレンチャ掘削式穿孔暗渠の耐久性と適用条件, 農土論集, 243, 349-354.
- 80) 国分欣一, 根本清一, 増島博(1966): 機械作業と水田土壌の物理性に関する研究(第1報)(暗渠排水による土壌硬度と走行性の変化), 土壌の物理性, 15, 15-18.
- 81) 国分欣一, 増島博, 根本清一, 長野間宏, 清井敏博(1977): 上田の重粘土水田における暗渠排水が土壌および水稻生育に及ぼす影響(とくに中干しの効果について), 農土誌, 45(8), 529-534.
- 82) 幸田浩俊(1983): 野菜類と普通作物による低湿地帯の田畑輪換栽培に関する研究(第1報), 地下水位と作物の生育・収量, 作土層の水分吸引圧・気相率、および土壌養分の動態との関係, 茨城県農試研究報告, 22, 25-64.
- 83) 甲谷潤, 足立健夫, 川戸義之(1990): 土壌改良材注入による弾丸暗渠の耐久性向上技術, 農土誌, 58(4), 399-404.
- 84) 甲谷潤, 川戸義行, 足立健夫(1989): 暗渠疎水材の更新法とスポット孔による暗渠管の清掃法, 農土誌, 57(8), 695-699.
- 85) 小幡馨(1976): 水田転換畑(飼料作)における基盤整備, 農土誌, 44(8), 518-521.
- 86) 小林荘司, 水元秀彰(1973): 強粘質水田の排水法改善に関する研究, 第1報 モミガラ暗渠とパンプレーカーの併用効果, 北海道立農試集報, 28, 33-44.
- 87) 厚生労働省(2003): 水道水が有すべき性状に関する項目, 水道法に基づく水質基準に関する省令, 厚労省令第101号.
- 88) 小島清嗣, 岡本洋一(1997): 画像解析テキスト NIHImage新講座, 羊土社, 東京.
- 89) 小島貞男, 須藤隆一, 千原光雄(1995): 環境微生物図鑑, 講談社, 東京, 67-83.
- 90) 久保田利之(2006): 重粘質土壌に於けるトレンチ(有材)による補助暗きょの効果, 第23回北海道農業新技術検討報告会要旨集, 北海道農業土木協会, 22-33.
- 91) 工藤隆, 斎藤博行(2002): 暗渠排水を利用して畑地化を進める補助暗渠の施工技術, 東北農業研究, 55, 99-100.
- 92) Kurien, V. M., Cooke, R. A., Hirschi, M. C., Mitchell, J. K. (1997): Estimating drain spacing of incomplete drainage systems, Transactions of the ASAE, 40(2), 377-382.
- 93) 日下達朗, 深田三夫, 大野利博, ロイ キンシュック(1993): 長期間埋設された土管暗渠の管内堆積土壌の状況と吸排水効果の持続性について—暗渠の排水機構と耐用性(I)—, 農土論集, 168, 97-104.
- 94) 京都大学農学部農芸化学教室(1957): 農芸化学実験書, 産業図書, 東京, 239-244; 1219-1229.
- 95) Linardn, N. (1991): Colmatage des srains et enrobages, e'tat des connaissances et perspectives, hydrylique agricole No.12, Centre national du machinisme agricole du genie rural des eaux et des forets, FRANCE.
- 96) MacEwan, R. J., Gardner, W. K., Ellington, A., Hopkens, D. G., Bakker, A. C. (1992): Tile and mole drainage for control of waterlogging in duplex soils of southern Australia, Australian journal of Experimental Agriculture, 32(7), 865-878.
- 97) Maguire, M. and Miller, H. M. S. (1954): Drainage in

- peat soils, international peat symposium, (Dublin, Ireland; Bord na Mona.Co.), 北海道農地開発調査資料 1954-1961, 北海道農地開発協会.
- 98) 丸田勇(1970): 粘土質の暗渠施行田における排水(2), 多収穫水田の排水と物理的性質, 土壌の物理性, 21, 11-15.
- 99) 丸山利輔, 森川正雄(1967): 埼玉県小美野地域における暗渠排水の調査研究, 農業土木試験場技報 A(土地改良), 2, 1-23.
- 100) 松井公平(1990): 骨材・石材, 資源, 日本の地質 1, 北海道地方, 共立出版, 東京, 195-196.
- 101) 松本勲(1981): 現場施行例からみた暗渠排水設計施行の留意点, 農土誌, 49(12), 1085-1088.
- 102) 松本康夫, 五十崎恒, 河合芳郎(1980): 開畑地におけるユウ水の出現機構について, 農土誌, 48(2), 105-110.
- 103) 水野直治, 前田要, 稲津脩(1984): 後志地方に発生した酸性硫酸塩土壌の実態と対策, 北農, 51, 7-17.
- 104) 水野直治, 稲津脩, 丸岡孔一, 長谷川進, 後藤英次(1995): 十勝岳泥流地帯の化学的特性, 上富良野町資料.
- 105) 木材工業ハンドブック編集委員会(1982): 木材工業ハンドブック, 丸善, 東京, 743-749.
- 106) 森田浩(1970): 新堀地区・水田のカンガイ期における暗渠排水量について, 農土誌, 38(2), 73-78.
- 107) Mirjat, M.S. and Kanwar R.S. (1994): A comparison of two saturated hydraulic conductivity measuring techniques in relation to drain installation methods, Applied Engineering in Agriculture, 10(1), 65-68.
- 108) 三浦綾子(1982): 泥流地帯(続), 新潮文庫, 東京, 35-37.
- 109) 村井信仁(1985): 縦暗渠による排水工法について, 土壌の物理性, 52, 47-52.
- 110) 村上英行(1967): 中海, 宍道湖地域における酸性硫酸塩土壌の分布とその特性, 酸性硫酸塩土壌の特徴と改良法(第1報), 土肥誌, 38, 112-116.
- 111) 村尾重信, 足立一日出, 深山一弥, 福中斉(1980): 畑地の土地改良と土壌水分管理, I 土壌水分管理による地温上昇, 北農, 47(1), 26-39.
- 112) 村尾重信, 長利洋(1981): 汎用耕地と暗渠排水, 農土誌, 49(12), 1033-1039.
- 113) 村島和男, 荻野芳彦(1985): 現場透水係数の補正係数(α)を用いた暗渠排水設計の実際, 汎用化耕地のための暗渠排水設計(Ⅲ), 農土論集, 119, 13-20.
- 114) 村島和男, 荻野芳彦(1990a): 計画暗きょ排水量の決定法, 汎用化耕地のための暗渠排水設計(Ⅳ), 農土論集, 149, 45-51.
- 115) 村島和男, 荻野芳彦(1990b): 暗渠間隔決定のための実用的簡便法(汎用化耕地のための暗渠排水設計(V)), 農土論集, 149, 53-59.
- 116) 村島和男, 荻野芳彦(1992): 汎用化水田の暗渠排水の機能とその維持管理, 農土誌60(1), 13-18.
- 117) 永石義隆, 山下恒雄(1967): 機械化水田におけるモグラ暗渠の耐用性について(1), 農土誌35(6), 3-6.
- 118) 永石義隆(1968): 機械化水田におけるモグラ暗渠の耐用性について(2), 農土誌, 36(1), 11-14.
- 119) 永石義隆, 山下恒雄(1972): トラクター直装型弾丸暗渠のコウ配布装置について, 農土誌, 40(9), 625-628.
- 120) 永石義隆(1977): 暗きょ疎水材としてのモミガラ耐用性について, 農土誌, 45(6), 387-390.
- 121) 永石義隆(1980): 暗きょ疎水材としてのモミガラ耐用性について(第Ⅱ報), 農土誌, 48(6), 387-391.
- 122) 永石義隆, 井上久義(1985): 傾斜地水田の圃場整備における湧水処理の一事例, 農土誌, 53(2), 101-106.
- 123) 永石義隆, 原口暢郎(1986): 暗渠を利用した傾斜地輪換畑の地下水位制御について, 農土誌, 54(10), 945-950.
- 124) 中西信彦, 西口猛, 谷本寿男, 牧田元男(1978): モミガラ壁式暗渠の考え方と施工法, 農土誌, 46(10), 729-732.
- 125) 中山兼徳(1986): 北海道畑作における地力問題について, 北農, 53(1), 1-10.
- 126) 成田保三郎, 平井義孝, 上坂晶司(1985): 羊蹄山麓地帯の土層改良に関する試験, 北農, 52(7), 25-44.
- 127) 根岸久雄, 中山熙之, 長谷川周一(1981a): 網状暗きょ管の粗度係数について, 農土試技報, A, 土地改良, 25, 35-42.
- 128) 根岸久雄, 中山熙之, 長谷川周一(1981b): 厚いモミガラ層をもつ暗きょの機械踏圧試験(I)(1981), 農土試技報, A, 土地改良, 25, 43-73.
- 129) 新垣雅裕(1988): 土壌のレオロジー的挙動からみた階段畑の弾丸暗渠の施工法に関する一考察, 農土論集, 135, 83-89.
- 130) 日本分析化学会北海道支部(1966): 水の分析, 日本分析化学会北海道支部, 化学同人, 京都, 139-143; 156-157; 173-175; 185-188; 231-235; 240-247.
- 131) 日本土壌協会(2002): 地力保全基本調査による土壌情報データベース, 土壌環境評価システム開発事業, 財団法人日本土壌協会, 東京.
- 132) 日本気象協会北海道本部(1992): 降雨に関する資料

- (確率降雨編), 降雨配分方式の再妥当法の決定に関する調査資料, 北海道農業土木協会, 札幌.
- 133) 日本水道協会(1993): 鉄細菌, 日本水道生物, 日本水道協会, 東京, p.169-176.
- 134) 丹羽勝久, 辻修, 大淵清志(1999): 細粒質褐色低地土に生成した耕盤層が土壌水分変動およびテンサイ根系発達に及ぼす影響, ベドロジスト, 43(1), 7-15.
- 135) 農業土木学会北海道支部(2004): 北海道の農業農村整備事業関係年表, 北海道の農業と農村, 218-223.
- 136) 農業技術研究所(1983): 農耕地土壌の分類—土壌統の設定基準および土壌統一覧表—第2次案改訂版, 農業技術研究所化学部土壌第3科.
- 137) 農耕地土壌分類委員会(1995): 農耕地土壌の分類, 第3次改訂版, 農耕地土壌分類委員会, 農業環境研究所資料, 17.
- 138) 農林水産技術会議(1964): 水田土壌適正分級法試案, —農業構造改善のために—. 農林省.
- 139) 農林水産省(1979): 土地改良事業計画設計基準, 暗渠排水, 農林水産省構造改善局, 農業土木学会, 10-13.
- 140) 農林水産省(2000): 土地改良事業計画設計基準, 暗渠排水, 農林水産省構造改善局, 農業土木学会, p.48; 108; 78-79; 154-155; 161-164.
- 141) 農林水産省農蚕園芸局(1984): 肥料取締法の一部改訂に伴う今後の肥料取締りについて, 昭和59年4月18日付け59農蚕第1943号, 農林水産省農蚕園芸局長通達.
- 142) 農林水産省(1980): 農林水産累年統計, 北海道, 農林水産統計情報部.
- 143) 農林水産省(各年): 農耕地面積, 農林水産統計, 北海道, 農林水産統計情報部.
- 144) 農林水産省(各年): 木材需給報告書(製材統計調査・木材流通調査結果), 累年, 木材チップ工場数・生産量・出荷量累年統計.
- 145) 農林水産省(1990~2002, 各年): 農用地等建設業統計, 受益形態別集計表, 都道府県別, 農林水産統計情報部.
- 146) 農林水産省(1992a): 米及び麦類の生産費(年産), 10a当たり小麦生産費累年統計.
- 147) 農林水産省(1992b): 食糧統計年報, 政府買入価格, 麦類.
- 148) 農林水産省(1993): 土地改良事業の効果算定における標準耐用年数表, 農業農村整備事業計画マニュアル, 北海道農業土木協会, 札幌, 376-377.
- 149) 農林省農地局(1955): 土地改良設計基準, 暗渠排水.
- 150) 大垣昭一(1980): 北海道における汎用耕地の問題点, 農土誌, 48(7), 479-484.
- 151) 大垣昭一, 藤田秀三, 梅田安治(1981): 泥炭地の暗渠排水(空知南部での調査例), 農土誌, 49(12), 1061-1063.
- 152) 緒形博之, 千葉豪, 根岸久雄, 丸山利輔, 森田浩, 山内一郎, 藤根与兵衛(1973): 暗渠排水の計画, 施行, 管理についての報告, 農土誌, 41(9), 575-596.
- 153) 小川和夫(1984): 農業と土壌物理(3.重粘土畑土壌の改良), 土壌の物理性, 50, 9-13.
- 154) 荻野芳彦, 村島和男(1985a): 暗渠排水計画の理論的検討, 汎用化耕地のための暗渠排水設計(I), 農土論集, 119, 1-6.
- 155) 荻野芳彦, 村島和男(1985b): 現場透水係数の補正係数(α)の求め方について, 汎用化耕地のための暗渠排水設計(II), 農土論集, 119, 7-12.
- 156) 荻野芳彦, 村島和男(1985c): 汎用化水田の暗渠排水の計画と設計, 農土誌, 59(9), 1045-1050.
- 157) 尾口毅(1980): 暗渠排水の施工管理の一方法について, 水と土, 41, 68-71.
- 158) 小野潤一, 赤沢伝, 大垣昭一(1981): 北海道における重粘地の暗渠排水, 農土誌, 49(12)1064-1066.
- 159) 長利洋, 古木敏也(1990): カキ殻利用による暗渠疎水材, 農業および園芸, 65(12), 1391-1397.
- 160) 大杉繁, 川口桂三郎(1983): 硫酸アンモニア施肥の障害を起こす原因に関する研究(第1報), 土肥誌, 12, 298-300.
- 161) 太田隆, 大平忠英(1986): 強酸性土壌地帯の圃場整備(新潟県営圃場整備事業石川地区の場合), 農土誌, 54(2), 107-111.
- 162) 大友功一, 谷口哲司, 松田豊, 土谷富士夫, 辻修, 高畑英彦, 干場秀雄, 佐藤禎稔(1988): 地中探査レーダによる農用地盤情報収集に関する研究, 帯畜大研報I, 15, 301-312.
- 163) 大塚信郎(1981): 現場における暗渠排水の問題点と今後の課題, 農土誌, 49(12): 1022-1024.
- 164) 坂井克宏(1981): 低平重粘土地帯の暗渠施行例, 農土誌, 49(12), 1076-1078.
- 165) 坂井盛二, 川口豊, 山田雅彦(1987): ホタテ貝ガラ暗渠の効果とその可能性, 北海道農業土木新技術検討報告会講演要旨集, 4, 31-37.
- 166) 佐野文彦(1981): 暗渠排水の機械施行技術の進展, 農土誌, 49(12), 1055-1060.
- 167) 佐々木長市, 富田道久, 宮崎博寿(1986): 改良山成畑に施工した各種暗渠の研究, 宮城県農業短期大学学術報告, 34, 43-50.
- 168) 佐々木長市, 角野三好, 加藤幸, 高松英明(2003):

- 砂丘畑の暗渠機能低下原因と対策, 農土誌, 71(9), 811-814.
- 169) 佐藤正一, 小沢良夫(2003): 農業用作業機を使用した整地工と暗渠施工, 農土誌, 71(6), 511-514.
- 170) 佐藤俊(1986): 木質物の堆肥化過程と木質系堆肥の熟度の基準策定に関する研究, 林業試験場報告, 334, 53-146.
- 171) 佐藤裕一, 工藤祐晃, 吉田力, 秀島好昭(1989): 傾斜畑における土壌水分移動とその分布, 畑面流出水及び暗渠流出水との関わり, 農業土木学会誌, 57(12), 1155-1160.
- 172) 佐藤裕一(1990): 傾斜畑における心土破碎と暗渠工併設の排水効果, 農土誌, 58(4), 423-428.
- 173) 佐藤裕一(1990): 傾斜畑における心土破碎と暗渠工併設の排水効果, 農土誌, 58(4), 423-428.
- 174) 佐藤真由美, 三浦真由己, 関一人, 斉藤直人, 北川巖(2003): 木質チップの暗渠用疎水材としての利用, 北海道立林産試験場報告, 17(1), 1-6.
- 175) 佐藤全良(1981): 傾斜地における暗渠排水の施工工法, 農土誌, 49(12), 1079-1084.
- 176) 佐藤全良(1988): 大分県における暗渠排水工法の開発とその効果, 農土誌, 56(7), 693-645.
- 177) 清野真人, 土開義広, 近野雅子, 瀬野義昭(1994): 暗渠排水疎水材としてのモミガラの耐久性と暗渠排水機能の維持改善, 山形県農試研報, 28, 99-114.
- 178) 四方田穆(1978): 樹林地の土壌改良後における水吸支について, 土壌の物理性, 37, 29-34.
- 179) 篠邊三郎(1970): りんご園の改良, 土壌の物理性, 22, 9-12.
- 180) 篠邊三郎(1988): リンゴ園の暗渠排水, 農業土木学会誌, 56(6), 559-565.
- 181) 宍戸信貞, 石渡輝夫, 森川俊次, 中村和正(2002): ホタテ貝殻の暗渠排水疎水材としての効果と性状変化, 土肥誌, 73(1), 11-15.
- 182) 塩入松三郎, 原田登五郎(1943): 湛水状態の土壌中に於ける窒素の形態変化, 土肥誌, 17, 375-376.
- 183) 塩崎尚郎(1984): 北海道における畑地の湿害と排水, 農業技術, 39, 298-302.
- 184) 宍戸信貞, 森川俊次, 中村和正, 岡本隆, 石渡輝夫(2001): 暗渠疎水材の疎水材として用いられた貝殻及び埋木チップの効果と耐久性, 北海道開発土木研究月報, 574, 18-28.
- 185) Singh, P., and Kanwar, R.S.(1995): Modifisatoin of RZWQM for simulating subsurface drainage by adding a tile flow component, Transactions of the ASAE, 38(2), 489-498.
- 186) Skaggs, R.W.(1992): Drainage and water management modeling technology, Drainage and water table control, the 6th international drainage symposium, Nashville Tennessee, ASAE, 1-11.
- 187) 宗谷支庁(1986): 貝ガラ及び笹の被覆物の効果測定, 畑総クトネベツ地区調査業務報告書.
- 188) Stuyt, L.C.P.M.(1992): Effect of drain envelops on the water acceptance of wrapped subsurface drains, Drainage and water table control, the 6th international drainage symposium, Nashville Tennessee, ASAE, 257-263.
- 189) 杉山満丸, 津田豊(1990): シートパイプクロス暗渠工法と施工後の状態, 農土誌, 58(2), 159-167.
- 190) 鈴木智久(1989): 2連式無材暗渠, 暗渠排水Q&A・施工事例, 全国土地改良総合整備事業制度研究会, 畑地農業振興会, 270-274.
- 191) 谷田貝光克(1980): 樹の魅力, その中で色と香りと耐久性を生み出す木の成分, 樹木抽出成分とその利用方法 その1, 林業試験場報告, 192, 1-3.
- 192) 十勝支庁(1987): 礫質材被覆暗渠排水の検証, 畑総更正第2地区調査設計報告書.
- 193) 田淵俊雄(1984): 1. 粘土質水田の排水改良, 農業と土壌物理, 土壌の物理性, 50, 3-6.
- 194) 多田敦(1984): 2. 重粘土水田の土層改良, 農業と土壌物理, 土壌の物理性, 50, 6-9.
- 195) 高橋旨象(1994): 木のひみつ—木はなぜ腐るのか—, 京都大学木質科学研究所, 東京書籍, 東京, 201-209.
- 196) 高橋強, 天谷孝夫, 長堀金造(1981): 圃場の乾燥に及ぼす水切溝の効果と役割(笠岡湾干拓地の農地整備について(II)), 農土誌, 49(9), 773-778.
- 197) 高橋豊, 上原修, 春日健一, 真野勝也(1990): 暗渠疎水材としての団粒化促進材の効果, 新潟農試研究, 37, 65-66.
- 198) 竹野直人(2005): Eh-pH図アトラス, 熱力学データベースの相互比較, 地質調査総合センター研究資料集, 419, 104-105.
- 199) 竹内晴信・大山 毅・宮脇忠・菊地晃二(1994): 北海道網走地域の畑地に対する軽石流堆積物客土の効果と問題点, 土壌の物理性, 70, 55-66.
- 200) 田中義幸(1968): 畑地帯における圃場排水について, 水路, 32, 7-17.
- 201) 丹原一寛(1984): 農業と土壌物理(4. 樹園地の下層土), 土壌の物理性, 50, 13-15.
- 202) 谷昌幸, 近藤鍊三, 筒木潔(2001a): 泥炭土における

- 鉄の形態および分解度指標との関係, 土肥誌, 72(2), 180-188.
- 203) 谷昌幸, 近藤鍊三, 筒木潔(2001b): 泥炭地水中の溶存有機物と溶存鉄との相互作用, 土肥誌, 72(3), 348-356.
- 204) 千葉豪(1974): 心土破碎の施工法と効果, 土壌の物理性, 30, 1-5.
- 205) 津田真由美, 関一人, 斉藤直人, 青山政和, 奥村真由己, 森満範, 菊地伸一, 窪田貫, 北川巖, 横井義雄(1997): カラマツチップの暗渠疎水材としての適用性, 北海道立林産試験場報告, 11(2), 5-10.
- 206) 津田豊(1987): 農業用シートパイプ暗渠とその工法(概要), 畑地農業, 349, 17-24.
- 207) 辻修, 松田豊, 土谷富士夫(1993): 排水不良畑における特殊暗渠の有効性, 農土誌, 61(9), 855-858.
- 208) 上野英世(1995): 鉄細菌, 環境微生物図鑑, 講談社, 東京, 3-5; 80-83.
- 209) 梅田安治(1981): 暗渠排水の資材(暗渠管・被覆材の適用効果), 農土誌, 49(12), 1049-1053.
- 210) USDA soil survey staff(1975): Soil Taxonomy, The United states department of agriculturre Soil conservation service, agriculture handbook 436.
- 211) USDA soil survey staff(1999): Soil Taxonomy second edition, The United states of department of agriculturre natural resources service, agriculture handbook 436.
- 212) Van-Zeijts, T. E. J. (1993): Subsurface drains, International water Irrigation Review, 13(4), 26-2.
- 213) 脇阪銃三, 小林宏康(1981): 最近における暗渠排水の傾向について, 農土誌, 49(12): 1025-1032.
- 214) Weil, C., Natho, Jina, S., Chambers, R., Wires, K.(1991): Mole drainage in silicate clay soils subject to freezing, Transactions of the ASAE, 34(4), 1693-1698.
- 215) 矢橋晨吾, 小出進, 竹中肇, 長谷部次郎(1979): 西津軽地区土地基盤整備調査(I)(ホ場排水の促進を主体として), 農土誌, 47(3), 155-173.
- 216) 山田忍, 田村昇一, 近堂祐弘(1958): アトサヌプリ統火山性土の酸性化の要因について(第一報), 土肥誌, 29, 126-128.
- 217) 山根忠昭(1984): 水稻生育障害原因となる熱水変成安山岩中の硫化物, 土肥誌, 55, 146-150.
- 218) 山品正志(2002): 雪上施工, 農土誌, 70(4), 339.
- 219) 保井聖一, 丹羽勝久, 大淵清志, 菊地晃二(2000): 十勝管内における湿性畑土壌の物理的特徴と作物生育, 第1報 多湿黒ボク土の物理性とテンサイ根系, 土壌の物理性(85), 31-40.
- 220) 横井義雄, 長谷川進, 坂本宣崇(1998): 北海道上川地方の堅密固結性土壌に対する砂質火砕流堆積物の客土効果, 土肥誌, 69(6), 644-648.
- 221) 横井義雄, 北川巖, 菊地晃二(2001a): 十勝岳火砕流堆積物を母材とする美瑛丘陵地の土壌生成, ペドロジスト, 45(2), 105-111.
- 222) 横井義雄, 北川巖, 後藤英次, 田丸浩幸(2001b): 北海道上川地方の堅密固結性土壌に対するオープン式有材心土改良耕の効果, 土壌の物理性, 88, 37-44.
- 223) 吉田修一郎, 足立一日出, 関光夫(2005): 重粘土水田における暗渠疎水材もみ殻の劣化と渠溝の空洞, 農土論集, 73(1), 25-33.
- 224) 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(1), 35-41.
- 225) 全国土地改良総合整備事業制度研究会(1988): 暗渠排水 Q&A・施工事例, 畑地農業振興会, 東京, 113-114.

Establishment of comprehensive drainage technologies for improving field drainage

Iwao Kitagawa

Summary

In Hokkaido, 48.6% of agricultural land requires drainage improvement. The actual area in Hokkaido where underdrains have been installed is equal to the area with poor drainage. However, the area where underdrains have been installed within the past 30 years is half of the necessary area. Redevelopment of underdrains is being done mainly in paddy fields and the field zone. Despite this, the total area where underdrain durability has been exceeded is on the increase. This makes it necessary to establish countermeasures to restore drainage function. To solve this problem we constructed an underdrain that significantly improves field drainage.

Conventional drainage improvement has focused on the individual underdrain. Conventional underdrain design attaches high value to drainage discharge. Increases in drainage discharge have been accomplished by narrowing the underdrain interval. However, there are drainage problems that cannot be solved by increasing discharge. Even from the underdrain subsoil improvements that enhance soil physics are necessary. To solve this problem it is necessary to develop comprehensive drainage technologies that combine subsoil improvement with a consideration of soil physics.

This study makes clear the following. First, I determine the factors decreasing underdrain function. Then, I lay out plans to improve underdrain function and develop new subsoil improvement technologies. I also identify soil classifications that can benefit from the combination of drainage improvement technologies with subsoil improvement. This is determined by examining the relationship between soil physics and drainage status for the various soil classifications.

1. I figure out the frequency for each of the factors decreasing underdrain function.

The factors decreasing underdrain function are as follows: ① Soil physics is a factor in decreasing the function of the underground trench laid for the underdrain pipe, and the construction of the plow sole above the underdrain. ② Most structural defects are caused by a shortage of backfill material. The use rate of backfill material was 43.4% before 1998. ③ Incidences of drain pipes being clogged by deposits is 13.5%. ④ Over the passing years drain pipes shallow in peat soil. ⑤ Inadequate maintenance of the underdrain and poor drainage management by farmers. The use of filter materials affects underdrain function by decreasing the function of the underdrain trench. I think that wood chips, logged rooted wood chips, volcanic gravel and ash, gravel, and scallop shells are effective filter materials. The influence of the characteristic, the functionality of the material, crop growth, and the drain water qualities, are experimentally clarified. The applicability of each material as a filter is shown.

I explained the drainpipe construction process, and developed a new installation method that reduces clogging. Drainpipes in upland fields converted from paddy use at the foot of an active volcano become clogged within a few years after construction. Deposits in the pipes have been identified as un-crystalloid iron by a metabolic product of the iron oxidizing bacteria, *Gallionella ferruginea*. The soil of this area contains an acid sulfate layer that originated by mudflow from an active volcano (Mt. Tokachi-dake); there is a peat layer at the bottom. The formation process of the clogging phenomenon is explained as follows. Sulfur in the subsoil is oxidized to hydrosulfate and moved into the peat layer with ferrous iron. The iron sulfide forms in the strongly reduced peat layer. After construction of the underdrain pipe iron sulfide re-oxidizes into hydrosulfate and ferrous iron. Ferrous iron carried into the pipe is then oxidized by bacteria at low pH condition and clogs the pipe. We developed a new installation method to avoid iron accumulation. Wooden tips and rockwool (an ingredient of calcium silicate) are excellent envelope materials because they prevent clogging and ensure proper function of subsurface drainage.

2. Subsoil improvement is needed for improving the elements of soil physics that affect field drainage. We developed two new subsoil improvement methods.

One method is spring-Tine cultivator type subsoil improvement with amendment matter. Subsoil improvement by spring-Tine cultivator loosens tight soil at 50cm deep, and mixes manure and bark compost into the subsoil layer. The manure swells and leads to an improvement in subsoil physics.

The input weight of manure at the subsoil improvement layer is 4 kg m^{-2} in cases of soil hardness between $0.72 \sim 1.37 \text{ MPa}$. The input weight of manure at subsoil improvement layer is $5 \sim 6 \text{ kg m}^{-2}$ in cases of soil hardness above 1.37 MPa . This improvement method functions efficiently over an extended period of time. As a result of improving subsoil physics the nutrient absorption of the root is improved; this increases crop yields.

Construction effects and soil conditions suitable to low-cost underdrain digging by a trencher type excavator without envelope are studied. The digging type underdrainage requires construction of a drain hole that is 7 cm wide, 40 cm high, at a soil depth of 60 to 120 cm, and a hole with a diameter of 20 cm. The upper side of the drain hole is closed by a soil lid and backfilled. This drain hole without envelope can be constructed by a farm tractor with a trencher implement. This digging type underdrain has a big hole and is able to drain excess water as pipe drainage. As for durability of the digging underdrain, in peat soil the drain hole becomes a little smaller after 7 years; 10 years later the drain hole is decreased by 40%. In alluvial soil the transformation of the drain hole is significant after 5 years. The digging type underdrain was difficult to construct in diluvial soils because the drain hole collapsed easily. Therefore, the digging underdrain should be applied in peat and alluvial soils, on upland fields converted from paddy, and grasslands. The cost of constructing the digging underdrain is 25% lower than a conventional pipe drain.

3. Concrete benefits to agriculture productivity from drainage improvement are shown by increased agriculture output. Crop yields of sugar beet, Irish potato, and small red bean were maintained in 1996 when cold weather damage and wet injury occurred. In order to design comprehensive drainage technology corresponding to the soil physics of poor drainage soils, I fixed a quantitative approach to the soil physics of the representative soils. The various types of paddy field were gray soils, gray lowland soils, peat soils. And the various types of upland field were wet ando soils, gray soils, gray upland soils. I measured the change of soil moisture and underdrain discharge and examined the requirements of the underdrain in each field of the representative soils. This was determined by comparing the underdrain of general interval $10 \sim 12 \text{ m}$ with the underdrain of experimentally high density interval $5 \sim 6 \text{ m}$. These ranges were chosen because none of the culverts corresponded to the soil division of the revised nationwide soil classifications, united soil classifications, or appropriate culvert intervals. I established classifications of drainage improvement methods by judging drainage requirements. A determination of proper underdrain intervals was made by using classifications of cultivated soils in Japan.

Formation of artificial waterways by subsoil improvements is required to facilitate the function of main drains. Therefore, I established classifications applicable to various conditions of required drainage improvements. This includes new methods such as supplementary drain with filled filter, spring-Tine cultivator type subsoil improvement, and digging underdrain.

In these studies I figure out the frequencies that occur for each factor decreasing underdrain function, and the underdrain improvement plans necessary for each. In the suggestions for improvements, usage of new filter materials and development of a new installation method for clogged drainpipes is effective for correcting the main causes that lead to decreased underdrain function. Subsoil improvement is needed for the enhancement of soil physics, which controls filed drainage status. Two new subsoil improvement methods were developed. I establish comprehensive drainage technologies for improving field drainage that judgment of necessity to drainage and determination of proper underdrain. Classifiably applicable condition of drainage improvements.