HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	水田の高生産畑作化に向けた土壌・水環境制御技術に関する研究
Author(s)	塚本, 康貴
Citation	北海道大学. 博士(農学) 乙第7138号
Issue Date	2021-09-24
DOI	10.14943/doctoral.r7138
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/83292
Type	theses (doctoral)
File Information	tsukamoto_yasutaka.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

水田の高生産畑作化に向けた土壌・水環境制御技術に関する研究

北海道大学　大学院農学院

塚　本　康　貴

目　次

第１章　緒　論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

第１節　背景と目的
第２節　本論文の構成
第３節　既往の研究

第２章　水田の高生産畑作化に向けた土壌物理性改善指標の設定ならびに評価法・・ 22

第１節　土性や有機物含量による土壌クラスト強度の違いが転換畑でのダイズ出芽に及ぼす影響
第２節　道央転換畑でのダイズに対する現場透水試験による簡易な土壌物理性評価法
第３節　要　約

第３章　水田の高生産畑作化に向けた水環境制御技術の開発・・・・・・・・・・・ 45

第１節　転換畑での秋まきコムギに対するハイブリッド水路による灌漑排水技術
第２節　転換畑での暗渠清掃用施設「集中管理孔」を利用した地下灌漑技術
第３節　要　約

第４章　総合考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 85

第５章　要　約・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 90

謝　辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 93

引用文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 95

Summary ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 108

第１章　緒　論

第１節　背景と目的

１．水田の畑地利用に関する経緯

日本の主食はコメであるが，日本人のコメの消費量は 1967 年をピークに年々低下傾向にある（図 1-1-1）。食文化の多様化に加えて近年は人口減少や少子高齢化が進んでおり，今後もこの傾向は続くことが予想される。

コメの需要減少への対応として，1970 年から国によるコメの生産調整が実施され，水田で水稲以外の作物を作付けする，いわゆる転作作物の導入が進められた（高橋，1976；武山，2003）。生産調整の方法として，当初は主食米を作付けしない圃場の面積を配分する方法であったが，2004 年以降は，前年の需要実績をもとにコメの生産数量目標を配分する方式に変更され，転作作物の位置づけは，主食米の代わりとして作付けする代替作物から，自給率向上や国内ニーズへ対応するための戦略作物へと変わった（小針，2018；農林水産省，2009）。生産数量目標の配分は 2018 年から廃止された（小針，2018；峯村，2018）が，現在も地域が主体となって需要に応じた生産調整を行っており，新たな食料・農業・農村基本計画では海外との競争力強化のために水田の畑地化，汎用化を一層進め，畑作・園芸作による高収益な農業を推進することを施策の柱とするなど，転作作物の生産性向上がこれまで以上に求められている（農林水産省，2020）。

日本における水田の畑地利用，いわゆる転換畑の面積は，コメの生産調整が本格的に始まった 1971 年（稲熊，2014）から急激に増加し，1981 年以降は，現在まで概ね 400,000 ha 前後で推移している（図 1-1-2）。全国の中でも北海道は最も転換畑の面積が多く，主要な転作作物であるコムギやダイズの収穫量，収量はいずれも北海道が上位を占めている（表 1-1-1）。北海道の転換畑は，国の施策目標を達成する上で欠かせない重要な位置づけであることがわかる。

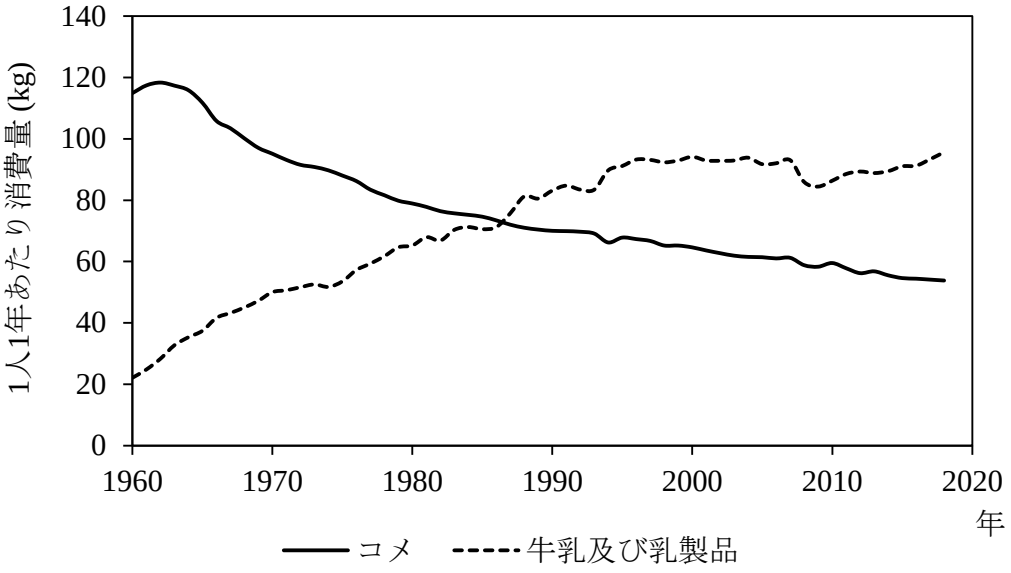


図 1-1-1　コメの消費量の推移
（農林水産省　大臣官房統計部，2020 a より作図）

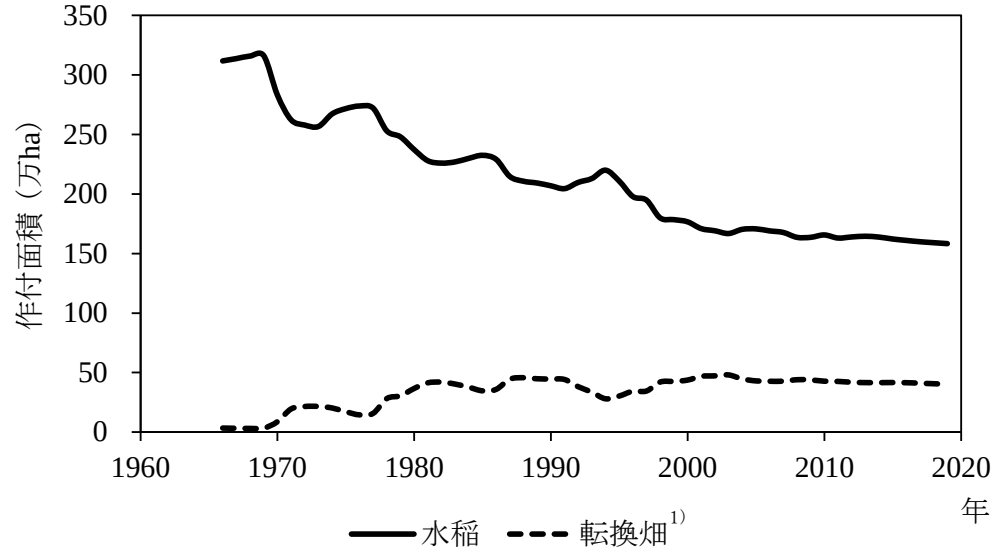


図 1-1-2　全国における水稲作付面積ならびに転換畑面積の推移
（農林水産省　大臣官房統計部，2020 b より作図）

1）資料中の「夏期における田本地の利用状況の推移」内の項目「水稲以外の作物のみの作付田」を転換畑面積とした。

表 1-1-1　全国農業地域における転換畑面積ならびにコムギ，ダイズの収穫量
（農林水産省　大臣官房統計部，1985；2019；2020 より作成）

全国農業地域	転換畑面積[1)] (ha)		コムギ収穫量・収量[2)]		ダイズ収穫量・収量[2)]	
	1985年	2019年	収穫量 (ton)	収量 ($g \cdot m^{-2}$)	収穫量 (ton)	収量 ($g \cdot m^{-2}$)
北海道	77,800	100,900	677,700	558	88,400	226
東北	55,900	98,500	18,500	290	52,100	148
北陸	23,800	27,700	705	188	18,400	148
関東・東山	48,600	40,900	81,000	389	11,400	115
東海	17,800	17,200	68,600	429	12,000	101
近畿	27,600	25,200	26,100	310	10,100	107
中国	26,200	22,100	9,780	385	4,350	100
四国	20,900	14,000	9,940	438	668	137
九州	49,000	56,200	144,700	433	20,400	97
沖縄	133	103	15	94	0	18

1）資料中の「夏期における田本地の利用状況の推移」内の項目「水稲以外の作物のみの作付田」を転換畑面積とした。

2）収穫量，収量ともに地目水田と畑を合わせた統計値でありいずれも 2019 年産の値。

２．水田－転換畑の作付体系に関する地域特性

水田を畑地利用する際の水田－転換畑の作付体系は，全国の農業地域によって傾向が異なる。温暖な関東以西では，1 年の中で水稲とムギなどの転作作物を栽培する 1 年 2 作（二毛作）が主体であり，東北，北陸地方では水稲，ムギ，ダイズによる 2 年 3 作が可能であるが，積雪寒地である北海道では，その厳しい気象条件により作物を栽培できる期間が限られており，1 年 1 作となる（日本土壌協会，2012）。北海道内における水田面積（約 223,000 ha）の約 8 割が分布している道央，道北地域は，初雪が 10 月中旬～下旬にかけて見られ，雪の終日は 4 月の中旬～下旬となる（気象庁，参照 2020.12.24）ことから土壌の乾燥する期間が短い。また本地域の土壌は，粘質な灰色低地土やグライ低地土，ならびに粘質土壌が客土された泥炭土といった排水不良な土壌が多く存在し，全水田面積の 8 割が潜在的に排水性の劣る湿田，あるいは半湿田に該当する（道立中央農業試験場，2004）。そのため，北海道内における水田－転換畑の作付体系は，転作作物栽培期間を 4 年程度とする田畑輪換体系と，転作作物栽培後は復田しない永久転換体系が行われているが，北海道では，田畑輪換が可能な圃場は排水性の良好な基盤整備済みの圃場とし，永久転換による水田の畑地化を推進している（道立中央農業試験場，2004）。

３．転作作物の高生産性を実現するための土壌・水環境制御に関する技術対応の方向性

１）転作作物の高生産性を実現するための土壌環境制御に関する技術対応の方向性

水田地帯では，転作作物による高収益な農業を推進することが急務であるが，依然として排水不良による湿害の発生など土壌物理性に起因するコムギやダイズの低収や，野菜導入の困難性を打破できずにいる。

水稲と畑作物では，生育に適した土壌物理環境が大きく異なる。水稲栽培圃場では湛水状態の維持が求められるため，圃場は水の利用に困らない低平地や集水地形に位置することが多く，（Hasegawa and Tabuchi, 1995），粘質な土壌を代かきし，作土直下に耕盤層（すき床）を形成するなどして，なるべく水を圃場外に排出しない管理を行っている。畑作物は還元状態や湛水状態を嫌い，圃場内に流入した余剰水は迅速な排除が求められ，有効土層も十分な深さを必要とする。そのため水田で畑作物を栽培する場合，根域や透水性を制限する耕盤層は破砕することが望ましいが，耕盤を破砕すると，復田した際に地耐力低下によるトラクタの沈下，苗の植付精度低下や漏水が生じる（足立，1988；小田原ら，1991）。

日本の水田地帯では依然として水稲中心の栽培体系であり，水稲と畑作物の短期輪作体系では特に水稲栽培を考慮する必要があるため耕盤層の破砕，消失は困難である。反面，中長期の畑輪作や永久転換畑では，畑輪作期間中に復田することを考慮する必要がないことから，耕盤層を破砕でき，抜本的な排水改良や土壌物理性の改良が可能となる。

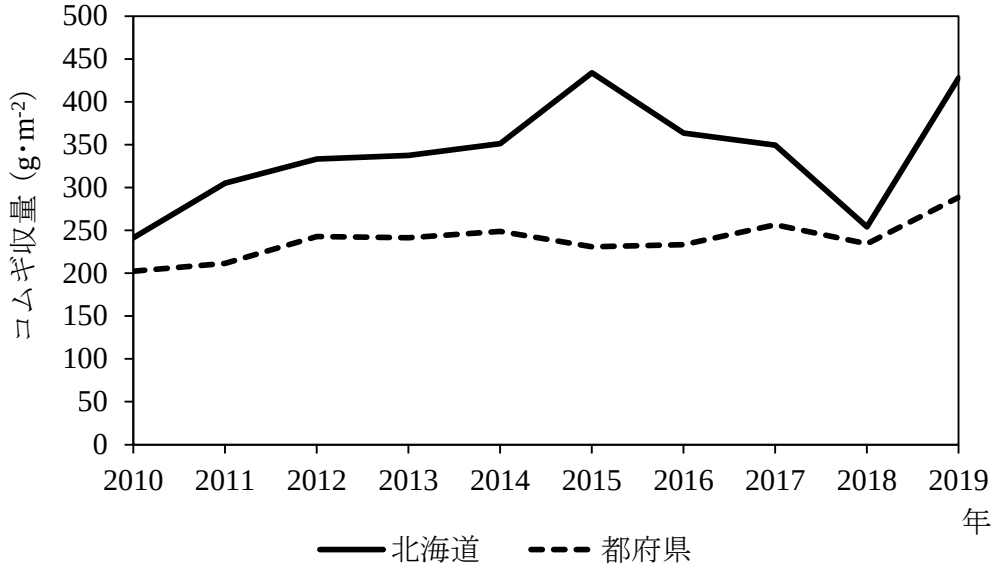
図 1-1-3 は，北海道と都府県において，水田で栽培したコムギとダイズの収量を比較したものである。いずれの作物も都府県では低位な収量水準で推移しているが，北海道は厳

しい気象，土壌物理環境下にあるにもかかわらず高い収量を維持している。これは，北海道が都府県に比べて水田の圃場整備率が高い（表 1-1-2）ことに加え，永久転換畑の推進により，畑作物に適した抜本的な土層改良を行える利点が影響しているものと思われる。そのため今後は，永久転換を含めた中長期の畑輪作体系を中心にすることで，これからの水田農業に不可欠な，畑作物の栽培に適した土壌物理環境の創出が可能となる。

一方，道内に目を向けると，主要な転作作物であるムギやダイズの収量は，道東の畑作地帯に比べて道央，道北では低い現状にある（表 1-1-3）。その要因として，道東の畑作地帯に比べて，道央，道北の水田地帯では，秋から翌年春にかけての降水量や積雪量が多く，土壌が乾燥する期間が短いのとともに，細粒，粘質で土壌物理性の劣る排水不良な土壌の多い（前田，1983）ことが考えられる。転換畑では，暗渠排水を整備した圃場においても湿害の発生など，土壌物理性に起因すると思われる作物生育の不良が依然として問題となっている（塚本ら，2020 b）。

転作作物の生産性を向上させるためには，生育収量を制限する土壌物理性の要因を明らかにし，栽培圃場が作物の生育収量を制限するような土壌物理性の状態であるかを診断した上で対策を講じる必要がある。転換畑での排水性や土壌物理性を改良する方法は，国の水田の畑地化，汎用利用に関する施策が実施されてから，国や地方の研究機関によりこれまで数多くの研究が行われてきており（農林水産技術会議事務局　農業研究センター，1988；農林水産技術会議事務局，1992；原口，1994；足立ら，2002；北川ら，2006；佐藤ら，2007），近年は改良効果の高い農業用機械も開発されてきている（例えば，中津ら，2004；北川ら，2010）。しかしながら，土壌物理性が転作作物の生育に与える影響程度を定量評価した研究は少ない。

また，改良の必要性を判断するための土壌物理性の評価方法は，土壌断面調査および試料採取による室内試験結果との総合判断によることが多い（中野ら，1998）。調査や判断は専門知識が必要で，かつ時間や労力がかかることから，営農者や農業技術指導者自らが行うことは困難である。そのため現地圃場で簡易に測定でき，土壌物理性の良否を判断できる測定法が望まれており，転換畑の土壌物理環境を改善する取組みを地域に広く進めるためには，簡易な土壌物理性の評価手法を開発する必要がある。



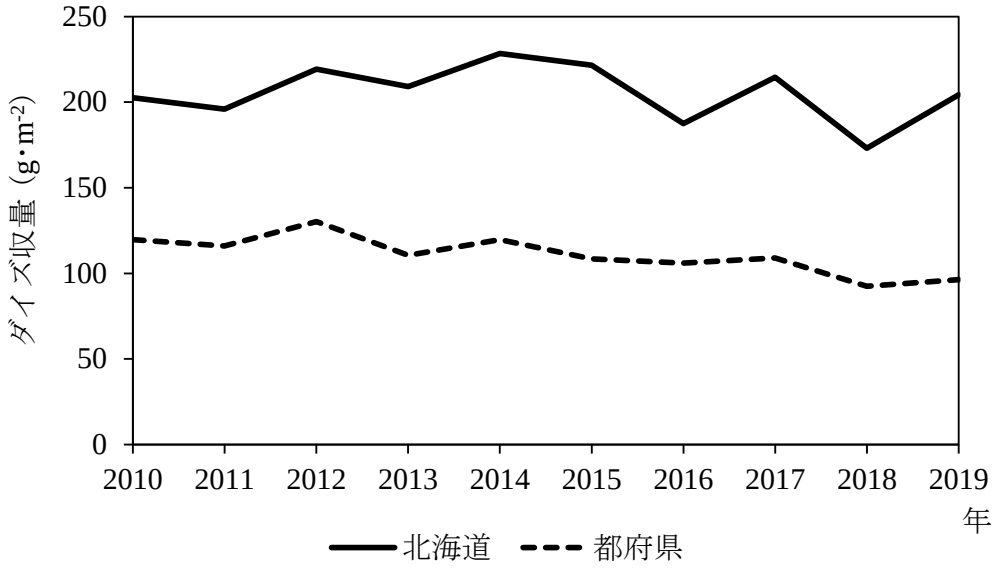


図 1-1-3　北海道ならびに都府県における転作作物収量の推移
（農林水産省　大臣官房統計部，2011～2020 より作図）

1）資料中に掲載されている市町村別地目水田の 10a あたり収量について，北海道ならびに北海道以外の都府県で平均値を求め収量（g･m^{-2}）に換算した。

表 1-1-2　全国の水田における 30 a 以上整備済み面積ならびに圃場整備率
（農林水産省　農村振興局，2015；農林水産省　大臣官房統計部，2015 より作成）

農政局	田面積	30 a以上区画整備済み面積	整備割合[1)]
	（ha）	（ha）	（%）
北海道	223,400	212,889	95.3
東北	611,200	396,405	64.9
関東	430,800	274,302	63.7
北陸	281,600	192,153	68.2
東海	133,300	83,857	62.9
近畿	177,400	99,620	56.2
中国四国	278,700	118,102	42.4
九州	320,300	189,696	59.2
沖縄	852	505	59.3
全国	2,458,000	1,567,527	63.8

1）整備割合は，田面積に対する 30 a 以上区画整備済み面積の割合として算出した。

表 1-1-3　北海道内における地域別の秋まきコムギならびにダイズの収量
（農林水産省　大臣官房統計部，2014～2020 より作成）

地域[1)]	平均収量[2)]（g･m^{-2}）	
	秋まきコムギ	ダイズ
道央	375 ±37	221 ±15
道北	359 ±40	211 ±19
十勝	525 ±84	255 ±17
オホーツク	492 ±53	240 ±15

1）「北海道施肥ガイド 2020」による地帯区分に基づき，道央は石狩中央部および空知全域，道北は上川中南部，十勝は十勝中央部，オホーツクはオホーツク内陸の市町村とした。
2）資料中に掲載されている市町村別 10a あたり収量について，道央，道北は田の値を，十勝ならびにオホーツクは畑の値を用いた。各地域における 10 a 当たり平均収量（2013～2019 年の最高及び最低値を除いた 5 か年の平均値）を求め，収量（g･m^{-2}）に換算した。収量の横の数字は標準偏差。

２）転作作物の高生産性を実現するための水環境制御に関する技術対応の方向性

道央，道北の水田地帯は積雪量が多いため，積雪前の秋や融雪後の春は土壌水分が多く排水不良による被害を受けやすい。その一方で，北海道においても作物生育期間中に寡雨となる時期があり，これまでも寡雨が原因と思われる作物生育の不良が報告されている（北海道立中央農業試験場，2006；2007；北海道立総合研究機構中央農業試験場，2013；2019）。5～7 月期において，気象条件から計算される蒸発散位の最大値が，降水量を上回っている地域が道央以北に広く分布しており（竹内，2005），特に 5 月から 6 月にかけては寡雨傾向にある。表 1-1-4 に，道央，道北地域のアメダス地点で観測された過去 20 年間における月別降水量の平均値と，月ごとにおける日単位で継続した期間に生じた総降水量（以下，一雨降水量（草薙，2018））が 20 mm 以上となった日数の平均値を示す。5～6 月は 7～8 月と比べて月別降水量が少なく，一雨降水量が 20 mm 以上の日数も 0.9～1.5 日と少ない。4 月上～中旬までは積雪していることから，5 月までは気温が低く土壌の乾燥が進まないが，気温が高まる 6 月は土壌が乾燥しやすい。粘質な転換畑は排水性とともに保水性も不良なため干湿害を受けやすく（長谷川，1986；前田，1986），道央，道北の水田地帯で栽培する転作作物にとって極めて厳しい水分環境下に置かれている。近年の寡雨と豪雨が頻発する気象条件下では，作物に与える影響はさらに高まることが予想される。

表 1-1-4　北海道内の水田地帯における月別降水量平均値

アメダス地点	降水量（mm･month^{-1}）1)			
	5月	6月	7月	8月
長沼	77.5（1.1）	88.6（1.5）	120.6（2.3）	143.8（2.5）
岩見沢	79.9（1.2）	75.0（1.3）	122.0（2.1）	151.2（2.4）
富良野	65.3（0.9）	67.2（1.2）	128.5（2.4）	169.5（2.3）
比布	72.3（1.3）	70.8（1.2）	156.5（2.5）	155.1（2.5）

1）括弧内数字は一雨降水量 20 mm以上発生日数（d）。

2）データは過去20年間（1999 ～2018年）の平均値。

このような状況に対応するためには，積雪寒地である北海道の水田地帯においても，十分な排水機能とともに灌漑が可能な圃場の創出が必要となる。

転作作物は水田で栽培するため，用水機能を利用して圃場内に灌漑できる。比較的規模の大きな圃場に対して実施される灌漑方法は，主にスプリンクラーやリールマシンなどによる散水灌漑，用水を直接圃場に流入させる地表灌漑，暗渠管を利用した地下灌漑が挙げられる。散水灌漑は散水量を細かくコントロールすることが可能であるが，施設が高額で，圃場面積が大きく散水を必要とする圃場数が多い場合は，適期に散水できない圃場が生じる。地表灌漑を実施するには，圃場内に流入させた水を溜めることのできる，いわゆる貯水機能を有した圃場である必要があり，散水灌漑とは逆に細かな散水量の調整はできないが，水田用水が潤沢に確保できれば一度に多くの圃場で実施することができる。地下灌漑

は暗渠排水が整備されている圃場で，かつ貯水機能を有し，暗渠管内に流水させる工夫や地表下の水位を制御する機能が必要であるが，地表面を濡らすことなく作物根域に直接水分供給することが可能であるため，散水灌漑や地表灌漑で考慮しなくてはならない灌漑期間中の防除や雑草対策，土壌病害に対する懸念はない。このように，各灌漑方法はそれぞれ特徴を有するため，地域や圃場条件に合った方法を用いることになる。

リールマシンなどの散水灌漑施設は高額で，地目が水田の圃場に対して整備事業による導入ができないこともあり，現状での転作作物への灌漑方法は主に地表灌漑と地下灌漑になる。転作作物への地表灌漑は，農家が実施しやすく，都府県において夏期の少雨時に灌水するよう現在も営農指導が行われている（例えば，福岡県飯塚農林事務所田川普及センター，2018）。しかし，国内における地表灌漑に関する研究は，灌漑を実施している現地圃場の実態に関する報告（橋本，1999；本間，2008）や，灌水時期や効果についての報告が若干ある（渡辺ら，1982；松下ら，1988；北海道農業試験場，1995）程度で，実圃場規模の試験は少なく，農家が実施しやすい灌漑の判断手法は確立されていない。特に北海道においては，寒冷な気象と水田地帯の大半が粘質で排水不良な土壌であり，圃場規模も大きい（表 1-1-2）。用水から地表面へ直接掛け流すことによる土壌や作物への悪影響が懸念されるためか，小さな区画での試験がある程度（高橋，1995）で，転作作物への地表灌漑に関する実圃場規模での研究や，営農指導はこれまで行われてきていなかった。

地下灌漑に関する研究は，1979 年から始められた転換畑に関するプロジェクト研究（農林水産技術会議事務局　農業研究センター，1988）において既に検討され始めており，現在までの間に灌漑システムに関する内容や土壌水分の動態，灌漑による転作作物への影響など多くの報告がある（松原ら，1985 a；松原ら，1985 b；置塩ら，1987；伊藤・大西，1988；福本ら，1992；兼子ら，2000；村上ら，2007；冠ら，2008；若杉・藤森，2009；竹田・佐々木，2013；望月ら，2013；蓮川ら，2014；中野ら，2014；古檜山ら，2014；鈴木ら，2014）。とりわけ，農研機構農村工学研究部門と民間企業が共同開発した地下水位制御システム FOEAS は，独自の暗渠配線と水位制御機構を有した新たな施設であり，全国で FOEAS を用いた地下灌漑試験が実施されている（若杉・藤森，2009）。

北海道の水田地帯では，暗渠管の清掃を行う施設「集中管理孔」を設置した暗渠排水の整備が 2000 年度より進められている（塚本ら，2020 a）。2014 年度からの道営土地改良事業における暗渠排水整備では，暗渠管の清掃による暗渠排水機能の回復と長寿命化を図ることを目的に，集中管理孔の設置を基本としており，2018 年度までの設置済み面積は 18,500ha に上る。本施設を増設する場合の施工費の割増は 30～50 万円/ha と灌漑施設としては安価であり，今後さらなる設置面積の拡大が見込まれる（塚本ら，2020 a）。

本施設は水田用水を暗渠管に通水する機構を有するため，水位調節用の水閘を設置することで地下灌漑施設として利用できる。暗渠を利用した地下灌漑を転作作物に導入する際に問題となる，均一な灌漑を得るための方法は，根岸ら（1972）が示している弾丸暗渠を用いた組み合わせ暗渠の利用など，農家が実施できる対策で対応可能である。しかしながら，地表灌漑同様に，作物へ灌漑する際の判断方法は，マトリックポテンシャルの測定による判断（渡辺・高橋，1982；大沼，1978；置塩ら，1987；松下・浅生，1988；竹ノ内・芝田，1992；高橋，1995）や，葉の傾斜角（松下・浅生，1988），葉の気孔開度（伊藤・大西，1988；山本ら，2011）などの試行がされているがいずれも実用的ではない。灌漑技

術を農家に普及させるためには，土壌水分計などの測定機器を使用せずに灌漑の実施を判断できる方法を示すことが必要である。

2018 年度現在において，集中管理孔が設置された圃場は北海道内の全水田面積 221,900 ha の 8 %ほどと依然として少ない。本州においても FOEAS を初めとする地下水位制御施設の設置済み圃場は少ないことから，転作作物への灌漑排水技術は，地下水位制御施設の設置済みによる対応と，未設置圃場に対する地表灌漑を用いた制御技術の両方の対応が必要となる。

以上の背景に基づき，本研究では，北海道を事例に，水田土壌環境下において畑作物の生産性を高めるために必要な土壌物理環境を，作物生産を制限する土壌物理性の要因を解析することで明らかにする。また，土壌物理性の改善指標値を設定するとともに，測定が簡易な土壌物理性の評価法を示す。さらに，干湿害の生じやすい気象条件ならびに水田土壌環境下において，生産性の高い畑作栽培のための水田の用排水施設を有効利用した，排水と灌漑を兼ねた水環境制御技術を開発することを目的とした。

第２節　本論文の構成

第 2 章では，北海道での代表的な転作作物であるダイズを用いて，水田土壌で畑作物を生産する際に，不良な土壌物理性が作物に与える影響程度を明らかにし，その改善指標値や簡易な評価法を示す。ダイズの収量構成要素は，大きく「苗立ち本数（plant･m^{-2}）」と「個体あたり子実重（g･$plant^{-1}$）」に分けることができ，生産性の向上にはこれら各要素の確保が必要となる。苗立ち本数は，出芽から苗立ちまでの期間における土壌物理環境が影響し，個体あたりの子実重は，苗立ち以降の土壌物理環境が影響する。そのため第 2 章では，土壌物理性の影響についてこれら各要素に分けた検討を行う。

第 2 章第 1 節では，ダイズの出芽を妨げる土壌物理性の代表的な要因として，土壌クラストの硬化を取り上げる。土壌クラストの硬度がダイズの出芽に与える影響程度を定量評価して改善指標値として設定するとともに，土壌クラストの硬度と土性や土壌有機物との関係を解析することで，土壌クラストの硬化によるダイズの出芽阻害を回避できる土壌物理環境について，土壌有機物の点から考察する。

第 2 章第 2 節では，まず道央の粘質な低地土転換畑を対象に現地実態調査を行い，転換畑の土壌理化学性の特徴を把握する。次に，ダイズの苗立ち以降の生育収量を制限する土壌物理性の要因として土壌の浸透能に着目し，現地実態調査圃場において測定した，シリンダーインテークレート法による浸透能とダイズの生育収量，ならびに土壌物理性や土壌断面の状態との関係を解析することで，ダイズの生育収量に影響を及ぼす土壌物理性の制限要因を明らかにする。その結果を基に，転換畑でダイズの生産性向上に必要な土壌物理環境について考察するとともに，土壌物理性の簡易な診断手法としてシリンダーインテークレート法による土壌物理性の改善指標値を示す。

第 3 章では，干湿害の生じやすい気象条件，ならびに水田土壌環境下において，生産性の高い畑作栽培のための手段として，水田の用排水施設を利用した，農家が自ら実施可能な新たな水環境制御技術を開発する。

第 3 章第 1 節では，ダイズとともに北海道内の主要な転作作物である秋まきコムギを栽培する圃場内に，排水と灌漑を兼ねた溝（以下，ハイブリッド水路と記載）を形成する技術を開発する。ハイブリッド水路は農作業用の溝掘機を用いて形成し，越冬前や越冬後春先の湿潤時には地表排水用の溝として，また，秋まきコムギの吸水量が多く，雨が少なく土壌が乾燥しやすい時期には灌漑用の溝として機能させる。ハイブリッド水路の施工時期や施工間隔を検討し，排水，灌漑効果を明らかにする。

第 3 章第 2 節では，道内の水田圃場に設置されている暗渠清掃用施設「集中管理孔」を，転作作物への地下灌漑として利用する技術として開発する。ダイズ，秋まきコムギを対象に，各作物の吸水量の多い時期を灌漑時期とし，土壌が乾燥した際に地下灌漑を行うことによる効果を明らかにするとともに，土壌水分計などの測定機器を使用せずに，降雨条件から灌漑実施の要否を判断する方法を検討する。

第 4 章の総合考察では，以上の各章で明らかにした内容から，水田土壌で畑作物の高生産性を実現するための土壌・水環境制御技術について考察を行う。

第３節　既往の研究

１．転換畑での土壌物理性と作物生育に関する研究

１）土壌クラストと作物生育に関する研究

土壌クラストは降雨や灌漑水などによる土壌の細粒化，スレーキングなどにより土壌表面に生じる透水性の低い堅密な皮膜であり，土壌クラスト形成による影響は作物栽培や土壌保全の様々な局面に及ぶ（田中，1995）。その低い透水性（Hillel, and Gardner, 1969；西村ら，1990；西村ら，1993），通気性（有原ら，1991）により，土壌侵食（Bresson, 1995）や作物への干湿害を助長し（有原ら，1991），作物の播種後に硬化が生じると，種子の出芽を著しく阻害することが報告されている（井之上・陳，1981；佐川・千田，1991；Shiel and Yuniwo, 1993；Lee et al., 1996；Nabi et al., 2001；横井，2006）。

土壌クラストの形成過程は，主に雨滴の衝撃により形成される構造的クラスト（structural crust），ならびに土壌粒子の移動，沈積作用により形成される沈積的クラスト（depositional crust）に大別できる（Chen et al., 1980；山田，1991）。土壌クラストの形成は，土壌団粒の安定性に依存しており，団粒が分散しやすい土壌では，土壌クラストが生じる可能性が高い（Le Bissonnais, 1996；ヒレル，2001）。粒径組成では，団粒の安定性は粘土含量の増加とともに増大するが（Kemper and Koch, 1966），逆に粘土含量の増加はクラストの形成を促進するとの報告がある。（Moldenhauer and Kemper, 1969; Lee et al., 1996）。その一方で，シルト含量が高いと団粒が不安定になるとされており，FAO（1998）ではクラストが生じる条件を，シルト含量が 0.25 kg･kg^{-1} より多く，かつ砂含量が 0.35 kg･kg^{-1} 未満と定義している。また，シルト含量が高い土壌ほど硬いクラストが生じる傾向にあるとしている（Lemos and Lutz, 1957; Seker，2003）。Ferry and Olsen（1975）は硬いクラストが形成する要因として，粘土粒子が平行かつ密に配列することによるものとし，破砕係数（Modulus of rupture；Richards, 1953）で求めたクラストの硬さは土粒子径が大きいほど低値となる（破砕係数の大きい順に，clay > silt >> sand）結果を示しているなど，土壌クラストの形成しやすさや硬さに対する見解は異なる。土壌クラストの粒径組成や硬度などの物理的な性質は，土壌クラストが構造的クラスト，沈積的クラストまたはこれらの中間的な過程を経た形成により異なることが想定され，形成過程を考慮した解析が必要と思われる。

土壌クラストの硬化程度の測定法は，成形した供試体の破砕強度から算定する破砕係数（Modulus of rupture）による方法（Richards, 1953; Hanks and Thorp, 1957），プッシュ式のペネトロメータ（Pocket penetrometer）（Seker，2003；横井，2006；小原ら，2008）やデジタルフォースゲージの利用（岩渕ら，2006）など様々であり，定められた測定法は確立されていない。研究事例は少ないが，各々の方法により，土壌クラストの硬化程度と作物の

出芽への影響に関する定量的な研究が行われている。Hanks and Thorp（1957）はコムギ，ソルガム，ダイズを用いた室内試験を行い，クラスト硬度の増加による出芽率の減少傾向は，どの作物も同程度という結果を得ている。Seker（2003）はハウス内で行った人工降雨条件下での実験において，クラスト硬度が 0.37～0.48 MPa でコムギの出芽率が 20～30 % に低下した結果を示している。横井（2006）は，北海道美瑛丘陵地に分布する，土壌クラストが形成しやすい堅密固結性土壌に対する砂質火砕流堆積物の客土効果の試験を行っており，ダイズを用いた試験により，客土が必要な土壌クラスト硬度の指標値として，プッシュ式のペネトロメータ（商品名：クラスト硬度計，大起理化工業製）の値が 15 mm（0.8 MPa）以上としている。粘質な水田地帯における土壌クラストの形成過程や畑作物の出芽への影響程度は，横井らの報告にある丘陵地帯での結果とは異なることが想定されるが，粘質な水田土壌における畑作物の出芽への影響程度は明らかにされていない。

土壌クラストの形成や硬度を抑制する方法に関しては，主に種子近傍の土性を粗粒化する方法や有機物の利用が検討されている。岩間・石井（1974），竹内・大山（1994），横井（2006）は，クラストの生じやすい土壌に対して砂質土の客土を行い作土の土性を変える方法を検討しており，竹中（1994）は，種子直上への砂質土の投入が可能な播種機を開発している。

土壌団粒の促進に寄与する有機物に着目した報文として，Lado and Ben-Hur（2004）は，土壌中の有機物による団粒の形成による土粒子の分散抑制と，土壌クラストの形成抑制を指摘しており，Seker（2003）は砂含量が少なく硬いクラストが生じる土壌に，2 mm 以下に調整した麦稈を混ぜることで破砕強度が低下する結果を示している。これらのことから，土壌への有機物投与により土壌クラストの硬化による出芽への影響を低減できる可能性があるが，粘質な水田土壌条件下において，土壌クラストの硬化を低減する技術的な検討を行う前提となる，土壌クラストの硬度と有機物含量との関係に関する定量的な解析はなされていない。

２）転換畑での土壌物理性の特徴に関する研究

1970 年代から推進された水田転作に対応するため，「転換畑を主体とする高度畑作技術の確立に関する総合的開発研究」（国立試験研究機関）および「転換畑高度畑作技術確立試験研究」（公立試験研究機関）が水田の畑地利用に関する本格的な研究として開始され（塩谷，1988），現在に至るまで転換畑の土壌物理性に関する多くの研究が行われてきた。水田を畑地転換することによる土壌物理性への影響は，土壌が乾燥することにより，グライ層の深層化と斑鉄や亀裂の増加といった土壌断面の変化，ならびに乾燥密度や孔隙量，易有効水量，飽和透水係数に変化をもたらす（河野，1976；長堀・高橋，1977；桜井，1981；島田・加納，1983；前田，1986；古賀野，1987；荒木ら，2003）。この土壌物理性の変化

や変化の程度は水田時の土壌水分環境により異なることが指摘されており，褐色低地土のような乾田型土壌では，グライ低地土のような湿田型土壌に比べて土壌断面の形態変化は小さいことがわかっており（前田，1986），飽和透水係数や孔隙量の増加，ならびに乾燥密度の低下傾向を示すが，湿田型土壌では孔隙量の低下や乾燥密度の増加を示す場合がある（古賀野，1987）。また，作土と作土下の傾向が異なる結果（安中・白谷，1987；吉田ら，1997）や，栽培作物，気象条件による影響を受ける結果（足立ら，2003）もあるなど，水田で畑作物を栽培することによる土壌物理性の変化は，その土性，土壌水分環境，耕耘や栽培作物などの栽培管理による影響を大きく受けることがわかる。

畑地転換することにより土壌物理性の影響を受ける土層の深さに関しても，土壌条件による影響を大きく受ける。地表下の水位が低い段丘上の黒ボク土のような，土壌が乾燥しやすく土壌構造の発達しやすい環境では，畑地転換による夏期の干天と蒸発散量の増加で下層深くまで亀裂の発達が促進される（河野，1976）が，粘質な湿田型土壌における土壌の乾燥収縮は心土には及びにくく（前田，1986；島田・加納，1983），土層改良による耕盤層や下層土の亀裂形成の重要性が指摘されている（島田・加納，1983；安中・白谷，1987；飯田ら，1990；荒木ら，2003）。

粘質な転換畑の土壌物理性の大きな特徴として，物理性の不均一さが挙げられる。作土や耕盤層の飽和透水係数は，畑地転換により高まることが報告されている（桜井，1981）が，粘質な土壌における降雨や融雪水の排水は，主に作土下に形成された亀裂を通ることがわかっている（山崎ら，1963；山崎ら，1964；根岸ら，1972；長谷川，1986；井上，1988）。長谷川（1986）は，粘質な転換畑での排水特性について，亀裂のないマトリックス部における透水係数の測定値から算出した小さな内部排水量と，暗渠排水量の測定結果から得られた大きな地下排水量から，粘質な転換畑での地下排水は主に乾燥亀裂や粗大孔隙を主体とした流れであることを明らかにしている。同様の結果は井上（1988）による観測と解析でも得られており，転換畑における余剰水の排除は，下層深くまでの亀裂や粗大孔隙の形成が重要な役割を持つことが示されている。

また長谷川は，粘質な転換畑と黒ボク土畑との比較により，粘質な転換畑における土層に保持される排水可能な水分量の少なさ，内部排水速度や蒸発散時の下層土から表層に向かう上昇流の小ささを定量的に導き出し，粘質な転換畑は干害が起こりやすい土壌であることを指摘している。さらに，粘質な転換畑の下層土に形成された亀裂沿いに作物の根は多く伸長する（Hasegawa and Kasubuchi，1993）が，亀裂中に伸長する根による土壌中の給水量の大きさを，粘土の上向きフラックスと定量比較することで，この根からの吸水が作物の水消費に大きく寄与していることを明らかにしている（Hasegawa and Sato，1987）。

これらのことから，粘質な水田での畑作物栽培は，畑土壌での栽培とは明らかに異なる土壌物理環境下に置かれており，畑土壌に比べて低い転作作物の生産性を向上するための要因解析ならびに対策技術は，上述の転換畑の土壌物理性の特徴を踏まえる必要がある。

３）転作作物の生育収量を制限する土壌物理性の要因ならびに評価法に関する研究

転換畑での土壌物理性が作物生育に与える影響に関する研究は，水田での畑作物栽培条件がその高い土壌水分と地表下の水位の高さが問題となることから，地表下の水位による影響（幸田，1982；鎌田，1983；前田，1986；高橋，1988）や，高い土壌水分や水位により低下する通気性（久津那，1986），粗孔隙量（渡辺ら，1974；幸田，1982；鎌田，1983）といった土壌物理性と作物生育との関係に焦点をあてた研究や調査が行われてきた。

転作作物に対して適した地表下の水位に関して，幸田（1982）は水位が連続的に変化する傾斜圃場を用いて 34 種類の野菜類，畑作物および飼料作物を栽培し，作物ごとの適水位，適 pF，適気相率を示している。同様の試験は高橋（1988）も実施している。その他にも水位の異なる圃場（前田，1986）やポット試験（長野間，1978）による解析が行われているが，実際の圃場では，地表下の水位は気象条件や周囲の圃場利用により大きく変動し，土壌への影響も土性や土壌物理性の状態で大きく変わる。そのため水位と作物との関係ではなく，水位の高低により生じる土壌物理性の状態と，その状態に対する作物への影響が重要であると考える。この点に関して，久津那（1986）は地表下の水位を調整した枠試験を実施し，水位ではなく O.D.R（酸素拡散係数）に着目して作物生育との関係を解析し，出芽や生育初期における O.D.R の好ましい値を提示している。

渡辺ら（1974）は現地の転換畑圃場と普通畑 10 圃場において，地表下の水位の状態と孔隙，根張りの状態について調査している。転換畑は普通畑に比べて地表下の水位が高く粗孔隙量が少ない状態で，作物の根の分布が良好な粗孔隙量の下限が 0.05～0.10 $m^3 \cdot m^{-3}$ の間に存在するとしている。鎌田（1983）は現地の転換畑 11 圃場で実態調査を行い，その結果から作物の生育が劣る土壌条件として，地表下の水位が 40 cm 未満の地区，50 cm 以内にグライ層が出現する土壌，次層，下層の易有効水分ならびに粗孔隙量が 0.05 $m^3 \cdot m^{-3}$ 未満の土壌を挙げている。現地圃場の多くの実態調査を元に，転作作物の生育収量と土壌要因の関係について解析する方法は，北田（1989）や安田（1991），安田・天野（1994）が数量化理論を用いて行っている。数量化理論は，目的変数である外的基準に対する説明変数の影響度の大きさが示される。そのため外的基準に作物の生産性，説明変数に土壌要因を用いて解析することで，抽出された土壌要因がどの程度作物の生育収量に影響を及ぼしているかを把握することができる。例えば北田（1989）は，作土の深さ 15 cm 未満，次層の粗孔隙率 0.05 $m^3 \cdot m^{-3}$ 未満，作土の乾燥密度 1.2 $Mg \cdot m^{-3}$ 以上の土壌条件下でオオムギの生育を低下させているとしている。本解析法を用いることで，抽出された土壌要因がどのような土壌物理性の状態を示しており，作物の生産性を制限しているのかを推定することが可能となることから，土壌物理性の診断を行う際の適した解析法と思われる。

土壌物理性の診断法は，その改良目的に加えて作物の種類，生育時期，気象条件など様々

な要因が関わることから決定が難しいと言われている（長野間，1994）が，1959 年から開始された地力保全基本調査，ならびに国内の研究機関における研究結果を基に，既に 1970 年代には土壌物理性と作物との関係や，作物ごとの土壌物理性の基準値を示している（三好・丹原，1977；土壌物理研究会，1979）。1985 年には地力増進法が施行され，土壌理化学性の改良目標が示されている地力増進基本指針が策定された（農林水産省，参照 2021.3.31）。これを受け，国や各都道府県の農業試験研究機関では土壌診断基準値を設定しており現在も使用している（例えば，北海道農政部，2020）。

転換畑の土壌物理性に関する指標値や基準値に関しては，畑地化の指標値として水中沈定容積測定を元に算出する畑地土壌化指数（三土，1988）や，塑性限界と pF 1.8 における含水比の比（中野，1988）が示されており，これらはいずれも易耕性の評価として用いられている。長谷川（1992）は，水田を畑地転換する際の耕盤層の存在が作物生育に影響を与える点に着目し，耕盤破砕の要否を判断する指標を，土壌硬度（24 mm 以下），耕盤の透水係数（-10 kPa 条件下において 1 mm d^{-1} 以上），排水性（降雨後 24 時間以内の地表残水排除），ガス拡散係数（降雨後 24 時間以内の $D/D_0 \geqq 0.005$ 以上）としている。この条件を満たさない圃場では湿害回避と干害回避のための耕盤破砕法に分けて，地表残留水や地表下の水位，下層土の亀裂や根の貫入の有無，作土と耕盤下の下層土のマトリックポテンシャルの差から判断するフローチャートを作成している。干害防止に関しては，耕盤破砕の他に適切な灌漑法も検討する必要がある点を述べており，この点は粘質な転換畑の土壌特性を踏まえた重要な指摘である。

転換畑の土壌物理性の状態として着目すべき要素である亀裂や孔隙の量を評価する方法は，圃場における白色塗料や染料による方法（山崎ら，1963；山崎ら，1964；長堀・高橋，1977；波多野ら，1983；石黒，1989），採取した試料で軟 X 線を用いた方法（徳永ら，1984；森ら，1994；成岡ら，2000）などが行われているが，いずれも試料を採取したり，測定部位を掘削調整したりと労力や作業に熟練を要する。足立ら（1997）は，1 圃場内の暗渠排水量と暗渠出口の水位を測定し，降雨により上昇した水位と暗渠開放後の排水量を計測することで，暗渠排水に関与する亀裂などの粗孔隙量を簡易に評価する方法を検討した。圃場全体の孔隙状態を把握できる方法であるが，現地圃場においては漏水の問題や，計測機器の設置，降雨が生じるごとに確認，操作が必要であることなど，生産現場での実用化には難しい面がある。

以上のことから，転換畑での土壌物理性を評価する手法は，労力や熟練度を極力必要とせず，機器設置や観測を伴わず，多地点で実施可能な簡易な方法の検討が残されている。

２．転換畑における灌漑排水技術に関する研究

１）排水技術

転換畑における排水技術に関して，その基本となる考え方は，水田の排水同様に，地表排水と地下排水である。これら排水技術の方法は，根岸（1981）が具体的にまとめており，近年では北川（2005）や原口・若杉（2014）が報告している。主な地表排水の促進方法は畦立て栽培（泉ら，1982；Sayre and Moreno Ramos, 1997；御子柴，1990；細川，2004；Wang et al., 2004; Tripathi et al., 2005）や圃場の傾斜均平化（長利，1987；若杉・藤森，2008），圃場内に排水用の溝を形成することである。

排水溝に関して，排水溝を形成する際の深さは耕起層より 5～10 cm 下（地表下 20～30 cm 程度），施工幅は国内外を含めて諸説存在し，5 m を越えないこととするものから 20 m 程度としているものまである（Schwab et al., 1957；USDA SCS，1971；竹中，1975；根岸，1981；谷脇・宮沢，1981；泉・武田，1982；長利，1987；Ochs et al., 1995）。排水溝の施工間隔は，狭いほど集水域が確保でき，排水効果も上がることが想定されるが，溝形成により作付け不可能となる面積（損失面積）が増える。農家の経営耕地面積が増加し，国の施策として大区画圃場の造成を進めている中では溝の形成作業に対する労力も考慮しなくてはならない。数 m 間隔で畝立てすることで浅い排水溝を形成する播種機の開発も行われている（細川，2004）が，大区画圃場の整備済み地域では播種速度の高い海外製の大型播種機が普及しており，今後の圃場区画規模の拡大を考慮すると，排水効果が認められ，なおかつ圃場内の損失面積を加味し，農家の利用する作業機や作業体系を考慮した排水溝の間隔について検討する必要がある。

地下排水技術は，山崎ら（1963）や田淵ら（1966）により水田土壌の排水における亀裂の重要性が指摘され，疎水材を使用した暗渠排水と，それに交差する方向に施工する補助暗渠による組み合わせ暗渠技術が開発された（根岸ら，1972）。この技術が現在においても転換畑における地下排水技術の基本となっており，欧米の技術解説に関しても，これまで地下排水は深い明渠や暗渠管埋設のみの記述（Twitty and Rice, 2001）であったが，近年では組合せ暗渠を推奨している（Hill et al., 2015）。暗渠疎水材はモミガラが多く使用されているが，経年腐朽による機能低下が報告されいる（渋谷ら，2004；吉田，2008）。疎水材は地域的な限定のある資材が多いが，北川（2005）は，北海道内で使用可能な新たな疎水材の利用開発を行い，モミガラ以外の地域で利用しやすく耐久性の良い資材を提示し，疎水材の利用促進を図っている。

補助暗渠に関しては，土層内に大きな通水部を形成する弾丸暗渠，暗渠管を使用せず疎水材のみを埋設する方法，ならびに土層中に亀裂や孔隙を多く形成させる心土破砕の方法がある。これら補助暗渠の施工機械は，農作業用として開発，販売されており，農家が自ら施工できる。特に近年は，弾丸暗渠の耐久性を向上させた切断掘削式の穿孔暗渠，新たな土層掘削機構や埋設機構を有する有材補助暗渠，土層の広範囲に亀裂や孔隙を形成できる全層心土破砕機が開発され，排水改良や土壌物理性の改良効果が示されている（北川ら，2017；塚本ら，2020 a）。さらに，緑肥の栽培による排水性や土壌物理性の改良効果も明ら

かにされている（佐藤ら，2007）。

以上のように，地下排水を促進し，土壌物理性を改良する技術に関しては実用，普及促進の段階にある。しかしながら，転換畑での畑作物栽培において，生産性を制限する土壌物理性の要因が明らかにされていない，もしくは診断方法が確立されていないことから，これら改良技術を効果的に行うことや技術の現場普及が難しい状況にある。

２）灌漑技術

（１）灌漑方法

転換畑での汎用性の高い灌漑技術は，用水を直接圃場に流入させる地表灌漑と，暗渠管を利用した地下灌漑が挙げられる。

国内における地表灌漑に関する検討事例は少ないが，1970 年台から研究報告が認められ，その大半は供試作物をダイズとした用水から直接畝間にかけ流す畝間灌漑（大沼，1978；渡辺・高橋，1982；松下・浅生，1988）である。試験規模はいずれも数十 m^2 と小さい中で，若杉・藤森（2008）は圃場内に 1‰程度の緩傾斜をレーザーレベラーで形成することによる迅速な灌漑と排水方法を実規模の圃場で検討し，技術提案している。しかしながら，若杉らの報文も含めて作物栽培を伴う実圃場規模での灌漑試験は見あたらない。

近年，メキシコやインド，オーストラリアでは，圃場内に幅 80 cm 程度の播種床と 15 cm 程度の深さの溝からなる畝立て灌漑栽培（Raised bed furrow irrigation system）が現地導入されており，溝部がトラクタの走行部となるため溝の下方浸透が抑制され，灌漑効率が高まるとしている（Sayre and Moreno Ramos, 1997；Wang et al., 2004；Tripathi et al., 2005；Jat et al., 2005）。しかしながら圃場内に灌漑用の溝を形成する方法は地表排水用の溝形成と同様に，灌漑効果が認められ，かつ圃場内の損失面積を加味し，農家の利用する作業機や作業体系を考慮した間隔とする必要がある。

地下灌漑に関しては，農水省が全国に試験圃場を設定して 1970 年代後半から約 10 年間実施された試験研究結果を基に，地下灌漑の方式や構造，適地などについて「地下かんがいの手引き」としてとりまとめている（農林水産省　構造改善局計画部資源課，1990）。地下灌漑による給水方法は，暗渠管を用いる方法と深い明渠を用いる方法に大別される（Twitty and Rice, 2001）。海外では明渠からの地下灌漑が古くから行われている地域がある（Zotarelli et al., 2013）が，日本では潰れ地が生じることへの懸念や，粘質で土壌構造の発達が弱い転換畑の土壌特性を考慮し，暗渠管からの給水方法が採用されている。

暗渠管への水の流入方法は，研究初期には排水路の水位を高めて暗渠管内に流入させる方法（松原ら，1985 a；松原ら，1985 b；兼子ら，2000），ならびに用水を暗渠管へ流入する方法（置塩ら，1987；伊藤・大西，1988；福本ら，1992）が行われていたが，近年は用水利用にほぼ統一されており，農研機構農村工学研究部門が開発した，独自の暗渠配線と水位調整施設を有する地下水位制御システム FOEAS（若杉・藤森，2009）と，用水路から暗渠管へ通水するための桝を設置し，排水路側の水位調整可能な水閘で地表下の水位設定を行う方式（秋田県，2018；塚本・唐，2020 a；2020 b）に大別される。FOEAS は施工時

に暗渠に交差する方向に弾丸暗渠が 1 m 間隔で施工され，秋田県の地下灌漑施設も 2.5 m 間隔でモミガラを疎水材とする補助暗渠が施工される。「地下かんがいの手引き」においても，「耕盤層上下を中心とした土壌構造の発達の有無は，地下かんがいの成否の鍵を握っていると言って過言ではない」と述べているように，粘質な転換畑において作物根域へ効果的に水分供給を行うためには，あらかじめ作土下に水みちとなり，作物の根が伸長できるような亀裂や孔隙を形成させ，土壌構造を発達させた状態にする必要がある。

（２）作物への灌漑方法，灌漑効果

作物の生育収量向上に効果のある灌漑実施時期に関しては，これまで散水灌漑など畑地灌漑に関する試験で多く行われており，北海道では道内の主要畑作物と露地園芸作物，果樹，飼料作物などを網羅した灌漑マニュアルをまとめている（畑地かんがい試験研究会，1997）。その中では，作物の生育期間内における適正な土壌水分量，ならびに灌漑を開始する土壌水分量（いずれも pF で表示）が示されている。一方で，転換畑での地表灌漑や地下灌漑における試験研究では，作物の水分消費量が多く，雨の少ない期間を灌漑実施時期としているものが多い（大沼，1978；渡辺・高橋，1982；松下・浅生，1988；中沢・後藤，1988；伊藤・大西，1988；福本ら，1992）。これは，灌漑方式の特徴と，その特徴に起因する灌漑の目的の違いによるものと考える。すなわち，スプリンクラーやリールマシンなどの散水灌漑は，細かな灌水量の設定や制御により，作物の生育期間中に常時適した土壌水分状態に近づけることができる。反面，地表灌漑や地下灌漑は，細かな灌水量の制御が不可能なため，常時最適な土壌水分状態を維持するという考えではなく，作物の生育を制限するような水分不足に陥った際に灌漑を行うという利用法になる。実際，転換畑の畦間灌漑に関する現地農家の実態に関する報告や営農指導では，ダイズであれば開花期以降に雨が少なく土壌が乾燥した時に灌漑を行うことにしており，灌漑による収量向上効果も認められている（松田，2004；本間ら，2008；福岡県飯塚農林事務所田川普及指導センター，2008；山形県農林水産部，2020）。

畦間灌漑に関する試験研究の場合，一時的に圃場内を湛水状態にさせて排水する方法がほとんどで，地下灌漑の場合は，栽培期間中，地表下の水位を常に一定に維持させる方法（冠ら，2008；若杉・藤森，2009；竹田・佐々木，2013；望月ら，2013；蓮川ら，2014；中野ら，2014；鈴木ら，2014）と，一時的に水位を上昇させ排水する方法（松原ら，1985 a；松原ら，1985 b；伊藤・大西，1988；福本ら，1992；塚本・唐，2020 a；塚本・唐，2020 b），これらの方法について比較検討した研究（世古ら，1987；Shimada et al., 1995）に分かれている。

世古ら（1987）は粘質な転換畑においてダイズの栽培期間中，地表下の水位を常時 40 cm 深の一定にした状態と，開花期から結莢期の約 1 ヶ月間に水位を上昇させる処理（開花期まで：開花期～結莢期：結莢期以降として，70：40：70 cm ならびに 40：20：40 cm）を灌漑未実施の対照区と比較した。寡雨条件であり，水位が常時 40 cm の処理が最も収量が高く，水位上昇した処理は減収した結果から，全期間を通じて 50 cm 前後の水位維持が適当と結論している。Shimada et al.（1995）も同様の試験を実施しており，多雨年では水位が常時 70 cm，寡雨年では常時 40 cm の処理が多収で，水位を 8 月下旬以降 40 cm から 15 cm

に変更した処理で減収した結果から，水位を変化させることは好ましくなく，降雨条件に応じて地下水位を一定に維持することが重要としている。しかしながら，これらの試験では試験期間が寡雨年であったり，水位を上昇させる期間が長かったりするため，水位を変動すること自体により作物への負の影響が生じたのか，変動させた水位の深さにより生じた土壌物理環境の変化が作物へ負の影響をもたらしたのかが判別できない。

転換畑圃場において地表下の水位を 30 cm 程度に維持する方法で実施した地下灌漑試験では，生育収量の向上効果が認められている報告がある（冠ら，2008；若杉・藤森 2009；蓮川ら，2014）。その反面，生育収量の向上効果が認められず，湿害により減収する事例も生じている（竹田ら，2013；望月ら，2013；中野ら，2014）。また鈴木ら（2014）は，北陸地方の重粘土圃場での直播水稲と冬作オオムギ，ダイズの 2 年 3 作体系下において，転作作物栽培時の水位を常時地表下 20～30 cm に設定した場合，暗渠の排水性が低下する結果となり，これを乾燥にともなう安定した粗大孔隙の発達が抑制されたためとしている。

伊藤・大西（1988）はダイズの開花終わりの 8 月上旬と 8 月下旬に地表下の水位を 35 cm を 2 日間実施しその後直ちに排水する方法で，30 %ほどの増収が得られている。福本ら（1992）は秋まきコムギに対して穂ばらみ期の 5 月下旬から 7 月上旬の期間，一時的に作土まで水位を上昇させ排水する方法を用いて地下灌漑を実施したが，漏水の影響で水位は地表面まで上昇せず作土下に留まった一方で，秋まきコムギの収量は灌漑未実施の圃場に比べて増収し，根が心土まで伸長している場合は心土のみの灌漑が適しているとしている。

これらの既往の研究結果から，地表下の水位を一定に維持する方法は，土壌の乾燥する期間の短い積雪寒冷地では特に，作土下の土壌構造の発達を抑制する懸念があるため，土壌中の亀裂や粗孔隙が水で飽和される期間が短い方法を用いることが望ましいと考える。農水省発行の「地下かんがいの手引き」では，作土層までの水分供給が想定されているが，作土までの水位上昇は，地表面まで湿潤になるため営農作業上や土壌病害の懸念が生じる。灌漑期間における防除や除草，土壌病害などの営農管理面，転換畑における排水特性と亀裂沿いに発達した根の吸水による作物生育への寄与，そして積雪寒冷地の気象条件を加味すると，作土下に亀裂や孔隙を形成させ，伸長した根を利用する地下灌漑技術の開発が必要である。

灌漑実施の要否を判断する方法に関しては，大きく作物の水分不足状態を把握する方法，プログラミングによる方法，気象条件から判断する方法がある。作物の水分不足を把握する方法としては，土壌水分計の設置による判断が多く，その値は作土（地表下 10～20 cm 位置）のマトリックポテンシャルが 15.5 kPa（pF 2.2）～49.1 kPa（pF 2.7）（pF 2.2：渡辺・高橋，1982，pF 2.5：大沼，1978；置塩ら，1987；松下・浅生，1988，pF 2.7：竹ノ内・芝田，1992；高橋，1995）と灌漑を開始する土壌水分状態の幅は広い。このほか，葉の水ポテンシャル（岩崎ら，2011；吉田・岩崎，2014），浸潤法による気孔開度（伊藤・大西，1988；山本ら，2011），赤外線放射測温（中原・井上，1997；本間・白岩，2009；伊地知・徳田，2017），デジタルカメラを用いた画像解析（高山ら，2009）などがある。これらはいずれも作物が受けている水分不足の状態を，専用の機器や試薬を用いて測定する必要がある。松下・浅生（1988）は，ダイズの主茎上位の頂小葉の上下傾斜角による判断法を試みている。

プログラミングによる方法は，気象や土壌，作物に関する情報を入力することで灌漑の要否を判断するソフトウエアが主に海外で各種開発されている（例えばSkaggs, 1982；FAO, accessed 2021.3.31；熊谷ら，2016）が，日本での普及は進んでいない。

気象条件による灌漑要否の判断法について，中沢・後藤（1988）は開花期以降に無降雨日が連続で4日となる際に畦間灌漑を実施する方法を示し，無灌漑区に比べて増収結果を得ている。伊藤・大西（1988）は，現地試験における土壌水分の推移と葉の気孔開度の結果から，開花期以降晴天が7日以上続く場合に地下灌漑を行うこととしている。これら気象条件を基にした判断方法は，正確な土壌水分や作物の水分ストレス状態を把握することはできない。しかしながら，転換畑における灌漑の利用目的を，作物の生育を制限するような気象，土壌水分環境になる時に水分供給することで生産性の低下を抑える方法とした場合，土壌や作物の水分状態を細かく測定せずとも，気象条件のみで概ねの傾向を把握し，灌漑要否の判断法として開発することは可能と思われる。気象条件のみによる灌漑要否の判断法は農家も利用しやすく，作物の安定生産に大きく寄与するものと考える。

第２章　水田の高生産畑作化に向けた土壌物理性改善指標の設定ならびに評価法

第１節　土性や有機物含量による土壌クラスト強度の違いが転換畑でのダイズ出芽に及ぼす影響

１．はじめに

転換畑は元々地目が水田に由来するため，細粒，粘質な土壌であることが多い。また，水稲栽培を目的とした土壌管理が行われてきたことから，畑土壌に比べて土壌物理性が劣る場合が多く，土壌物理性がダイズ生育に与える影響は大きい。特にダイズは大きな子葉を地上部へ持ち上げて出芽することから,出芽時の種子近傍の土壌の硬さや土塊の大きさ，重さなど，物理的な影響を受けやすい。ダイズの出芽を良くするために，砕土性を高め，土塊を細かくすると，降雨後の乾燥に伴う土壌クラストの形成による，子葉抽出への障害が指摘されている（井之上・陳，1981；佐川・千田，1991）。

クラスト硬度とダイズの出芽程度との定量的な関係についての研究事例は少なく（Hanks and Thorp, 1957；Seker, 2003；横井，2006）。また，土壌クラスト形成を回避する手法としては，砂質土の客土により作土を粗粒化する方法（岩間・石井，1974；竹内・大山，1994；横井，2006）や，播種床造成時の砕土率を低くし，土粒子の分散を抑制する方法（Bresson, 1995），ダイズ播種粒数を一株あたり 3 粒にして抽出力を高める方法（岩渕ら，2006）などが検討されている。一方，土壌への有機物の施用，特に炭素率が高い有機物の土壌への施用は，仮比重の低下や気相率の増加，易耕性の向上など土壌物理性の改善効果が示されている（前田，1974；橋本，1994）。そのため土壌への有機物の施用により，土壌クラストの形成を軽減できる可能性が考えられる。

本試験では，北海道内の転換畑の作土を用いて，土壌クラストによる土壌の硬化がダイズの出芽に与える影響程度を解析し，改善指標値を設定する。また堅密な土壌クラストが生成する土壌要因を明らかにして土壌クラストの生じやすい土壌条件を把握することで，その改善方策について土壌有機物の点から考察する。

２．試験方法

１）土壌クラストによる土壌の硬化がダイズの出芽に与える影響

クラスト硬度とダイズの出芽率の関係を明らかにするため，北海道立総合研究機構中央農業試験場（以下，中央農試と記す）内の園芸用ガラス室内において，クラスト硬度を変えたダイズの出芽試験を行った。

中央農試内にある細粒質褐色低地土圃場の表土を採取し，風乾処理後 2 mm 篩通過分を供試土壌として用いた。供試土壌の化学性を表 2-1-1 に示す。

土壌クラストの硬さの調整は，砂質土の混和によりクラスト硬度を低下する技術（岩間・石井，1974；竹内・大山，1994；横井，2006）を利用し，供試土壌に 2 mm 篩を通過させた恵庭降下軽石堆積物を，供試土壌との割合を体積比で 1：1～1：5 の範囲で混和し，650 × 230 × 180 mm のプランター内に振動充填した。その後，ダイズ「トヨムスメ」の種子を深さ 3cm に 2 粒ずつ等間隔で 4 カ所に 8 粒播種した（2 反復）。市販の散水ノズルを用いて散水強度 145 mm･h^{-1}（標準偏差 3）で 8 分間散水後，ガラス室内に 2 週間静置し土壌クラストを形成させた。なお散水量は日換算では 20mm･d^{-1} ほどであり，プランター底部の排水口から水の流出が確認できる量である。散水後における地表下 0～5cm 深の体積含水率は 39.4 %（標準偏差 5.9）であった。

ダイズの子葉が展開した時期（VC：cotyledon stage）に出芽数を測定し，出芽率を算出した。出芽数の測定と同時に大起理化工業株式会社製のクラスト硬度計（写真 2-1-1，DIK-5561，先端は球形スティック使用）を用いて，種子近傍の表土の硬さを測定した。

表 2-1-1　供試土壌の化学性（中央農試）

pH	腐植含量	交換性塩基			CEC	リン酸吸収係数	可給態リン酸[1)]
		CaO	MgO	K_2O			
(H_2O)	kg･kg^{-1}	mg･kg^{-1}			$cmol_c$･kg^{-1}		mg･kg^{-1}
5.8	0.019	2,602	1,525	475	14.9	582	609

1) トルオーグ法。

写真 2-1-1　本試験で使用したクラスト硬度計
（先端の球形スティック形状：φ 8 mm×L 54 mm）

２）土性，土壌有機物が土壌クラストに与える影響

クラストが生じる土壌の性質を把握するために，低地土転換畑 40 箇所の表土を採取し，風乾処理後 2 mm 篩通過分を 100 mL 採土管に振動充填した。先の試験と同様に，市販の散水ノズルを用いて降雨強度 145 mm･h^{-1}（標準偏差 3）で 8 分間散水後，40℃の通風乾燥機内で 1 週間風乾し，土壌表面の硬さをクラスト硬度計で測定した。

採取土壌の分析について，粒径組成はピペット法にて，全炭素については乾式燃焼法にて測定した。強熱減量は電気マッフル炉を用いて 550 ℃，5 時間加熱して測定し，腐植含量については熊田法によりアルカリ抽出画分を測定して求めた（北海道立総合研究機構農業研究本部，2012）。採取土壌の化学性を表 2-1-2 に示す。

表 2-1-2　低地土転換畑の表土の化学性（n = 40）

	pH	腐植含量	交換性塩基			CEC	リン酸吸収係数	可給態リン酸[1)]
			CaO	MgO	K_2O			
	(H_2O)	kg･kg^{-1}		mg･kg^{-1}		$cmol_c$･kg^{-1}		mg･kg^{-1}
平均値	5.5	0.056	2,756	660	318	19.8	962	292
標準偏差	0.6	0.034	1,116	370	193	8.3	273	366

1）トルオーグ法。

３．結果及び考察

１）土壌クラストがダイズ出芽に与える影響

ダイズの出芽率とクラスト硬度との関係を図 2-1-1 に示す。出芽率はクラスト硬度計値が 10 mm（0.35 MPa）未満であると 70～100 %の値であるが，10 mm 以上では 60 %を下回り，10 mm 未満に比べて有意に出芽率が低下した。

ダイズ栽培時における，出芽不良による再播種が必要となる出芽率については，佐賀県で 2010 年にダイズ播種後の台風による冠水被害を受けた際の対応として，出芽率 70 %未満が示されている。そこで出芽率 70 %未満をダイズ栽培時における再播種の目安とすると，本試験結果ではクラスト硬度計値が 10 mm 以上となるような土壌クラストが生成すると，再播種が必要になるほどダイズの出芽が著しく低下することになる。

土壌クラストの硬化程度を測定する方法は定まっておらず，過去に色々な硬度の測定方法で作物の出芽との関係が検討されている。そのような中で，本試験と同じ測定器を用いた試験結果として，岐阜県の灰色低地土転換畑での調査（農林水産技術会議事務局，2007）では，0.37～0.57 MPa のクラスト硬度でダイズの出芽不良が認められており，本試験結果と概ね同様の結果が得られている。

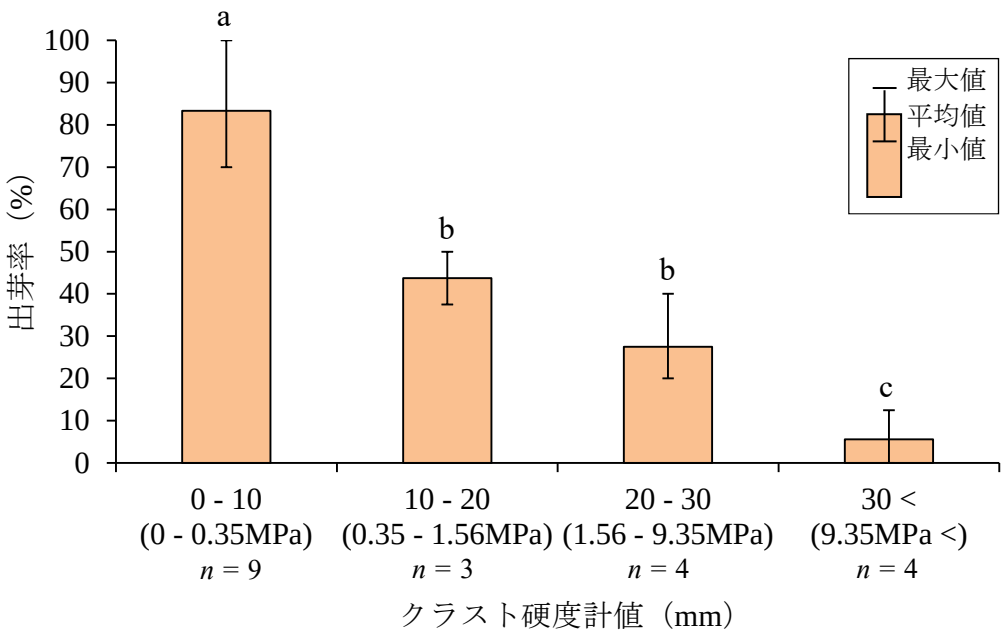


図 2-1-1　土壌クラスト硬度がダイズ出芽に与える影響

1）図中の棒は平均値，エラーバーは最大，最小値であり，横軸の境界値は，「以上－未満」とした。危険率 5 %で Tukey 検定を行い，図中の異なる英小文字の符号は各クラスト硬度区分間に有意差があることを示す。

２）土性，土壌有機物が土壌クラストに与える影響

クラスト硬度と国際法による粒径組成との関係を図 2-1-2 に示す。なお図中のクラスト硬度計値 40 mm 上のプロットについては，今回使用したクラスト硬度計の測定可能な範囲が 40 mm までであるため，40 mm 以上の値も含む。

粘土含量が 0.20 kg･kg^{-1} 以上，シルト含量では 0.30 kg･kg^{-1} 以上，砂含量では 0.50 kg･kg^{-1} 未満になるとクラスト硬度計値が 10 mm 以上となる土壌が多くみられた。また，土壌有機物含量の多少を，便宜上土壌断面調査の腐植含量区分で「富む」とされる 0.05 kg･kg^{-1}（日本ペドロジー学会，1997）で区分した場合，有機物含量の多い土壌では少ない土壌に比べ，粒径組成が同程度の土壌においても，クラスト硬度計値が低い傾向が見られた。

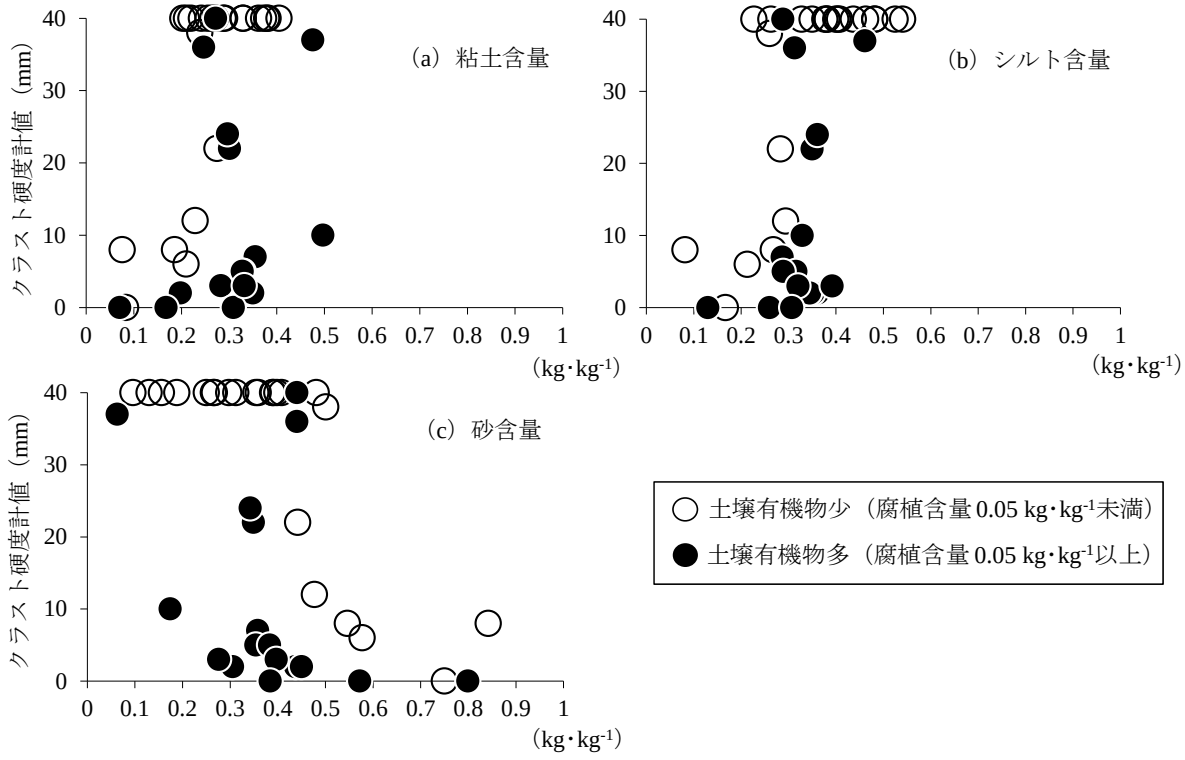


図 2-1-2　粒径組成とクラスト硬度との関係

1）クラスト硬度計の測定限界が 40 mm であるため，図中でのクラスト硬度計値 40 mm 上のプロットについては 40 mm 以上の値を含む。土壌有機物の多少は便宜上腐植含量 0.05 kg･kg^{-1} で区分した。

そこで，クラスト硬度計値 10 mm 以上となる土壌が多かった，砂含量が 0.50 kg･kg^{-1}未満の土壌について，腐植含量，強熱減量ならびに全炭素含量とクラスト硬度との関係を見てみると，腐植含量との関係は判然としないが，強熱減量，全炭素含量については値の増加とともにクラスト硬度が低値となり，強熱減量が 0.13 kg･kg^{-1} 以上，全炭素含量 0.06 kg･kg^{-1}以上であるとクラスト硬度計値が全て 10 mm 未満となった（図 2-1-3）。

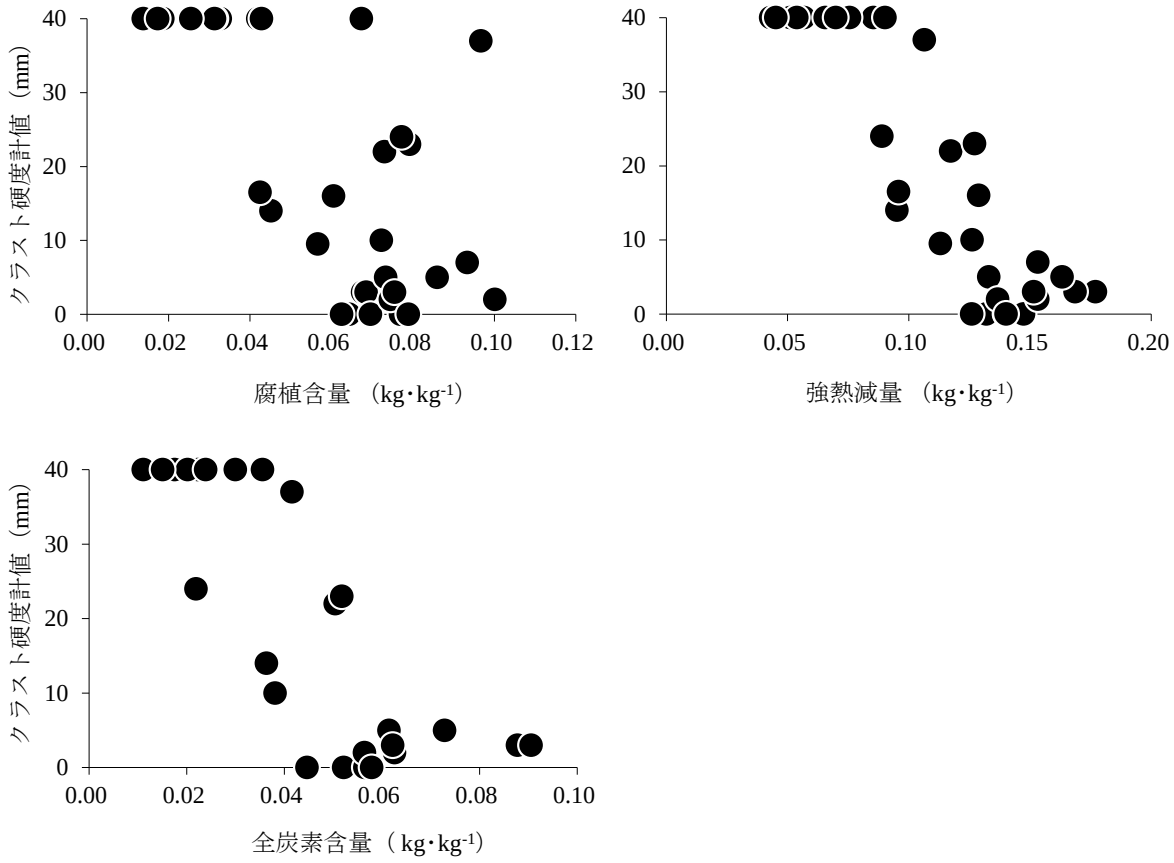


図 2-1-3　砂含量 0.50 kg･kg^{-1}未満の土壌における腐植含量，強熱減量ならびに全炭素含量とクラスト硬度との関係

1）クラスト硬度計の測定限界が 40 mm であるため，図中でのクラスト硬度計値 40 mm 上のプロットについては 40 mm 以上の値を含む。

Taylor et al.（1966）や Lutz and Haque（1975）は，シルト含量が高い土壌ほど硬いクラストが生じる傾向にあるとしているが，今回転換畑の土壌を用いて行った試験結果では，クラスト硬度はシルト含量だけでなく，粘土含量もクラスト形成に大きく影響していることが示唆された。Ferry and Olsen（1975）は硬いクラストが形成する要因として，粘土粒子が平行かつ密に配列することによるものとし，破砕係数で求めたクラストの硬さは土粒子径が大きいほど低値となる（破砕係数の大きい順に，clay > silt >> sand）結果を示した。その理由として，大きな土粒子の不規則な形状が，粘土粒子の密な充填や結合を妨げることによるとしている。粘土含量の増加や砂含量の低下により，土壌表層の硬化強度が乾燥に伴って増加することは久保寺（2001）も報告しており，その原因が乾燥による収縮と，収縮に伴う土壌粒子間の摩擦力増大によるものとしている。

粘土粒子が密に配列するような土壌クラストの形成過程は，細粒質な土壌で平坦な地形において, 主に土壌の攪拌, 沈積作用により生じるものと考えられている（Chen et al., 1980；山田，1991；田中，1995）。すなわち，雨滴の作用により土壌表面の団粒の崩壊が生じて，短時間のうちに極表面の孔隙をふさぎ，透水性が急激に低下することにより湛水状態となり，土粒子の懸濁液の攪拌作用により表層に微細粒子の沈積層が形成される。この沈積層が乾燥することで硬い土壌クラストとなる。本試験で行った人工降雨処理により形成された土壌クラストや，細粒，粘質で平坦な地形である転換畑で生じる土壌クラストについては，上記と同様の形成過程と推定され，北海道内の実際の転換畑でも土壌の攪拌，沈積作用により生じたものと思われる土壌クラストが観察された（写真 2-1-2）。

写真 2-1-2　表層が細粒質な転換畑でのダイズ播種後に生じた土壌クラストの様子

また本試験では，細粒質な土壌においても，有機物含量が多い土壌でクラスト硬度が低くなり，特に強熱減量や全炭素量でその傾向が強かった。強熱減量，全炭素量には腐植の他に麦稈や稲わらなどの未分解の植物遺体（以下粗大有機物と記す）も含まれていることから，クラスト硬度の低減には，粗大有機物の存在が大きく影響しているものと考えられる。

Lado and Ben-Hur（2004）は，土壌中の有機物による団粒の形成が土粒子の分散を抑制することで，土壌クラストの形成が抑制されることを述べている。Seker（2003）は砂含量が少なく硬いクラストが生じる土壌に，2 mm 以下に調整した麦稈を混ぜることで破壊強度が低下する結果を示し，その理由として有機物の添加で土粒子間の粘着性が低減したことによるものとしている。これらのことから，土壌中の有機物の存在は，団粒の安定化に寄与するとともに，粗大有機物自体が粒子間の密な充填・結合を妨げる役割をしているものと考えられ，土壌クラスト低減のための砂質土の客土と同様に，粗大有機物を含めた土壌中の有機物含量を高めることによって，土壌クラストを軽減する可能性が示唆された。

土壌クラストの対策は，硬化した表層を破砕する機械施工（北海道農政部，2007）や，砂質土の混和による土性改良（例えば，竹内・大山，1994）があり，即効的で持続性が高いがコストも高い。そのため堆肥や緑肥など，土壌への有機物施用が生産者の取り組みやすい対策となるが，作土に混和する堆肥や緑肥などの有機物施用量と，それに伴う炭素含量の増加や土壌クラストへの影響に関しては未検討である。北海道内の水田地帯では堆肥の入手が困難な場合が多いことから，緑肥，ならびに稲わら，麦稈といった圃場副産物の利用が生産者の実施しやすい取組みと考えられる。そのため今後は北海道における地域特性や栽培体系を考慮した，圃場への緑肥や圃場副産物の利用による土壌クラストの低減技術が必要である。

以上のことから，ダイズ種子の出芽を妨げる土壌クラストの硬さは，クラスト硬度計値で概ね 10 mm（0.35 MPa）以上であったことから，この値を出芽から苗立ち時における土壌物理性の改善指標値とする。また，砂含量では 0.50 kg･kg^{-1} 未満で強熱減量が 0.13 kg･kg^{-1} 未満，全炭素含量が 0.06 kg･kg^{-1} 未満になるとクラスト硬度計値が 10 mm 以上となる傾向がみられたことから，このような土壌では，土壌クラストにより出芽が抑制される可能性が高いといえる。土壌クラストの生じやすい土壌においても，粗大有機物を含めた土壌中の有機物含量を高めることで，出芽への影響を軽減する可能性が示唆された。

第２節　道央転換畑でのダイズに対する現場透水試験による簡易な土壌物理性評価法

１．はじめに

畑土壌に比べ細粒，粘質で土壌物理性の劣る場合が多い転換畑では，暗渠排水を整備した圃場においても排水不良による湿害の発生など，土壌物理性に起因する作物生育の不良が依然として問題となっている。そのため作物の生育を制限する土壌物理性の状態を把握し，状態に沿った対策を講じることが必要である。

現地圃場における土壌物理性の評価方法としては，土壌断面調査および 100 mL 採土管による室内試験結果との総合判断によることが多い。しかし，調査に対する労力が大きく，調査や室内試験に時間がかかることから，営農者や農業技術指導を行う担当者からは，現地圃場で簡易に測定でき土壌物理性の良否を判断できる測定法が望まれている。そこで，現場透水試験として土壌の浸透能を測定するシリンダーインテークレート法に着目した。

本節では，道央の粘質な低地土転換畑を対象に，土壌理化学性の実態調査を行い，土壌物理性を中心に転換畑の特徴を把握する。また実態調査圃場において，シリンダーインテークレート法による浸透能の測定を行いダイズ子実収量との関係を求め，浸透能に影響を及ぼす土壌物理性の特徴について解析することで，ダイズの子実収量を低下させる土壌物理性の制限要因を明らかにする。さらにこれらの解析結果から，シリンダーインテークレート法が転換畑でのダイズに対する簡易な土壌物理性の評価手法となり得るか検討する。

２．試験方法

１）調査圃場

調査圃場は道央でダイズを栽培している低地土転換畑（一部泥炭土圃場を含む）を対象とし，2002～2004 年の 3 年間実施した。年次ごとの調査圃場の栽培ダイズ品種，土壌型，転換後年数，土性（国際法）を表 2-2-1 に示した。湿性土壌であるグライ低地土や灰色低地土の圃場が約 8 割を占め，作土の土性は細粒質であり，転換後年数については主に 1～2 年経過した圃場である。供試作物であるダイズの品種については地域で主に栽培されている中～大粒のものを選定した。品種特性としての収量レベルは 300 $g \cdot m^{-2}$ 程度であり，異なる品種間における収量差は 10 %以内である。また，本調査地域における標準的な窒素施肥量は 1.5 $g \cdot m^{-2}$（北海道農政部，2020）であり，栽植密度として，畝間は 66 cm，株間は 15～20 cm，1 株ごとの播種数は 2～3 粒で栽培されている。

表 2-2-1　調査圃場の概要

調査年	調査圃場番号	ダイズ品種	土壌型	転換後年数	作土土性（国際法）	暗渠整備の有無
2002	1	トヨコマチ	褐色低地土	1	LiC	無
	2	トヨムスメ	褐色低地土	2	LiC	有
	3	ユキホマレ	グライ低地土	1	SiC	有
	4	トヨムスメ	グライ低地土	1	SiC	有
	5	ユキホマレ	グライ低地土	1	SiC	有
	6	トヨムスメ	褐色低地土	2	LiC	有
	7	NA	グライ低地土	1	CL	有
2003	8	ツルムスメ	灰色低地土	1	LiC	有
	9	ツルムスメ	グライ低地土	1	LiC	有
	10	ツルムスメ	灰色低地土	3＜	LiC	無
	11	トヨムスメ	グライ低地土	1	CL	有
	12	トヨムスメ	グライ低地土	1	CL	有
	13	トヨムスメ	灰色低地土	1	CL	有
	14	ツルムスメ	灰色低地土	2	LiC	有
	15	トヨムスメ	グライ低地土	1	CL	有
	16	NA	灰色低地土	NA	HC	有
	17	NA	灰色低地土	NA	CL	有
	18	NA	グライ低地土	1	LiC	有
	19	NA	灰色低地土	2	CL	有
2004	20	トヨムスメ	褐色低地土	3＜	SiC	無
	21	トヨムスメ	泥炭土	1	CL	有
	22	トヨムスメ	灰色低地土	1	CL	有
	23	トヨムスメ	グライ低地土	1	CL	有
	24	トヨムスメ	灰色低地土	1	SiC	有
	25	NA	灰色低地土	1	SiC	有
	26	トヨムスメ	灰色低地土	1	LiC	有
	27	トヨムスメ	グライ土	1	SiC	有
	28	NA	灰色低地土	NA	HC	有
	29	NA	灰色低地土	NA	CL	有
	30	NA	灰色低地土	1	CL	有

1）NA：収量調査未実施，情報未入手により該当データなし。

２）調査方法

（１）ダイズ生育収量調査

生育調査は最大繁茂期に該当する 8 月上旬に，収量調査は 10 月中旬から下旬に実施した。生育調査は各調査圃場内の 3 箇所においてダイズ株を 20 本ずつ，ダイズ株の周囲 20 cm 四方，深さ 20 cm の土壌ごと採取し地上部と地下部に分けた。その後地上部は 70℃で 1 週間通風乾燥させ，地上部重を算出した。地下部は土壌を洗い流した後，根に着生している根粒を採取し，70℃で 1 週間通風乾燥させ根粒重とした。収量調査は各調査圃場内の 3 箇所において，2.6 m^2 内に生育しているダイズの本数を数えた後に地上部を刈り取り，通気風乾させた。その後脱穀して屑粒を取り除き，百粒重（g），苗立本数（本･m^{-2}），個体あたり子実重（g･$plant^{-1}$）および子実収量（g･m^{-2}）を算出した。またこれとは別に調査圃場内の 3 箇所のダイズ株を 20 本ずつ採取し，主茎長，着莢数，一莢内粒数を調査した。

（２）土壌調査

ダイズの収量調査後の 10 月下旬に，各調査圃場内の代表箇所 1 箇所において概ね 80 cm 深さまでの試坑を掘削し，土壌断面調査を行った。各層位の土壌硬度を山中式硬度計で測定後，撹乱土および 100 mL 採土管による不撹乱土を採取し，撹乱土に関しては風乾後に粒径組成（国際法，農学会法），pH（H_2O），交換性塩基（CaO，MgO，K_2O），有効態リン酸（トルオーグ法）の測定を行い，不撹乱土に関しては乾燥密度，粗孔隙量（マトリックポテンシャルで-3.1 kPa 以上に相当），全孔隙量，易有効水分量（-98.1～-3.1 kPa），飽和透水係数（変水位法）の測定を行った（北海道立総合研究機構農業研究本部，2012）。また試坑地点近傍のダイズ株間において，貫入式土壌硬度計（大起理化工業製 DIK-5521）を用いて深さ 60 cm までの貫入抵抗を 3～5 回測定するとともに，シリンダーインテークレート法を 2 反復で実施した．シリンダーインテークレート法は，直径 16 cm，長さ 40 cm のステンレス製円筒をダイズ株間に深さ 15 cm までできるだけ土壌構造を乱さないよう挿入し，円筒内外の壁面と土壌との間に生じた隙間を埋めた。緩衝池は設置せず，円筒内に地面から 20 cm 程度の高さまで水を入れ，シリンダー内の水位の低下を 60 分間，所定の時間刻みで計測し，土中への浸入量を測定した。水位の低下が早い場合は水を補給し測定を継続した。得られたデータから積算浸入量を求め，積算浸入量 D と浸入経過時間 t との関係に Kostiakov 式（式（1））をあてはめ，最小二乗法で得られた定数 c と n から式(2）により基準浸入能 I_b を算出した（土壌環境分析法編集委員会，1997；北海道立総合研究機構農業研究本部，2012）。

$$D = ct^{n} \qquad (1)$$

$$I_b = 60cn\left(600(1\text{-}n)\right)^{n\text{-}1} \qquad (2)$$

なおデータの解析には，株式会社エスミ 「EXCEL 多変量解析」，「EXCEL 数量化理論」を使用した。

３．結果および考察

１）道央転換畑における土壌理化学性の実態

表 2-2-2 ならびに表 2-2-3 に，調査圃場の土壌理化学性の平均値ならびに北海道施肥ガイド 2020（北海道農政部，2020）による土壌診断基準値を示した。土壌化学性に関して，作土に該当する 1 層は，交換性 CaO が基準値より若干低く，交換性 MgO が高いがその他の項目では概ね基準値を満たしている。交換性 MgO が高いのは，本地域が蛇紋岩地帯であり，その母材の特性に由来しているものと思われる（後藤ら，2003）。2 層においても 1 層と同様の値を示した。一方で土壌物理性に関して，1 層の値は概ね診断基準値を満たしているがその層厚は薄い。2 層の値は 1 層に比べて乾燥密度が高く，粗孔隙量，易有効水分量，飽和透水係数が低かった。2 層の土壌硬度については 20 mm を超えており，耕盤層となっていた。

表 2-2-2　調査圃場の土壌化学性（*n* = 30）

層位		pH（H_2O）	交換性 CaO（mg･kg^{-1}）	交換性 MgO（mg･kg^{-1}）	交換性 K_2O（mg･kg^{-1}）	塩基飽和度（%）	石灰飽和度（%）	石灰/苦土（当量比）	苦土/加里（当量比）	有効態リン酸[1)]（mg･kg^{-1}）
1 層（作土）	平均値	5.80	2,687	720	244	60.0	42.2	2.9	7.3	217
	標準偏差	0.34	745	238	84	23.2	17.7	1.5	2.3	73
2 層	平均値	5.93	2,694	836	217	70.0	47.6	2.6	9.4	194
	標準偏差	0.42	751	320	69	26.4	19.1	1.3	3.0	80
土壌診断基準値[2)]		5.5 ～6.5	3,000 ～6,000	250 ～450	150 ～300	60 ～80	40 ～60	6 以下	2 以上	100 ～300

1）トルオーグ法。

2）「北海道施肥ガイド2020」による作土の値。

表 2-2-3　調査圃場の土壌物理性（n = 30）

層位		厚さ (cm)	乾燥密度 ($Mg \cdot m^{-3}$)	全孔隙量 ($m^3 \cdot m^{-3}$)	粗孔隙量 ($m^3 \cdot m^{-3}$)	易有効水分量[1] ($m^3 \cdot m^{-3}$)	飽和透水係数 ($cm \cdot s^{-1}$)	土壌硬度[2] (mm)
1 層（作土）	平均値	14.8	1.05	0.59	0.15	0.09	1.7×10^{-3}	11.3
	標準偏差	6.6	0.14	0.06	0.09	0.03	$10^{1.2}$	3.5
2 層	平均値	35.8	1.19	0.54	0.05	0.07	5.0×10^{-5}	20.5
	標準偏差	12.6	0.20	0.07	0.04	0.04	$10^{1.2}$	2.8
土壌診断基準値[3]		作土深 20 ～30	作土 0.90 ～1.10		作土 0.15～0.25	作土 0.10 以上	10^{-3} ～10^{-4}	心土 16～20

1）-98.1 ～ -3.1 kPa。

2）山中式硬度計による。

3）「北海道施肥ガイド2020」 による。

水田を畑にした場合の土壌理化学性の変化については古くから試験研究が行われており，北海道内においても 1987 年に転換畑作研究成果情報としてとりまとめられている（古賀野，1987）。その中では，畑転換による作土の土壌化学性の変化として，転換 1 年目の畑においても交換性 CaO 含量や有効態リン酸含量の増加が認められ，営農者による畑転換時に土壌改良対策として，石灰質やリン酸質資材の投入結果が反映されているものと推察している。本調査圃場において，交換性 CaO の値が診断基準値より若干低いが，pH は診断基準値内の値となっており，いずれも後藤ら（2003）が示している北海道内の水田土壌の値（pH：5.54～5.57，交換性 CaO：2,053～2,225 mg･kg^{-1}）よりも高い。このことから，転換後年数が 1～2 年とあまり経過していない圃場においても土壌改良資材の投入により，比較的速やかに畑作物に適した土壌化学性となることが想定される。また本調査圃場では 2 層の値も 1 層と同様の値を示しており，本調査地域において土壌化学性に関しては，ダイズの生育を制限するような問題は少ないものと思われた。

本調査圃場における土壌物理性の結果を，北海道内の水田，畑の土壌物理性と比較することで，調査圃場の土壌物理性の特徴について考察する。表 2-2-4 に塚本ら（2016）が示したデータを元に作成した北海道内の主に灰色低地土，グライ低地土を対象とした水田および畑の土壌物理性を示した。1 層における乾燥密度，全孔隙量は表 2-2-4 における水田の値と畑の値との間に位置するが，粗孔隙量や飽和透水係数は土壌診断基準値を満たしており，畑地化が進んでいることがうかがえる。一方で 1 層の厚さについて畑では 20 cm 以上であるのに対して調査圃場では 14.8 cm と薄く，水田の値とほとんど変わらない。2 層の粗孔隙量が少なく土壌硬度は畑の値に近く 20 mm を超えていた。したがって，道央における転換後間もない低地土転換畑では，畑地転換により土壌物理性は畑の様相へ移行しているが，作土が薄く，作土下の浅い位置から土壌物理性の不良な土層が出現する圃場が多い。この状態がダイズの生育収量を阻害する制限要因となっている可能性が示唆された。

表 2-2-4　北海道内の灰色低地土，グライ低地土を対象とした水田および畑の土壌物理性[1)]（塚本ら（2016）を改変）

土地利用形態	層位		厚さ (cm)	乾燥密度 ($Mg \cdot m^{-3}$)	全孔隙量 ($m^3 \cdot m^{-3}$)	粗孔隙量 ($m^3 \cdot m^{-3}$)	飽和透水係数 ($cm \cdot s^{-1}$)	土壌硬度[2)] (mm)
水田 (n = 22)	1 層（作土）	平均値	15.6	0.98	0.61	0.06	5.2×10^{-5}	8.5
		標準偏差	2.6	0.14	0.05	0.07	$10^{1.4}$	5.4
	2 層	平均値	—	1.22	0.53	0.03	3.3×10^{-6}	18.5
		標準偏差	—	0.20	0.07	0.04	$10^{1.1}$	4.9
畑 (n = 13)	1 層（作土）	平均値	22.7	1.16	0.53	0.12	1.8×10^{-4}	16.2
		標準偏差	5.5	0.18	0.07	0.08	$10^{1.0}$	4.6
	2 層	平均値	—	1.25	0.50	0.08	5.6×10^{-5}	21.8
		標準偏差	—	0.13	0.05	0.04	$10^{1.1}$	3.2

1）調査は作物収穫後秋に実施。

2）山中式硬度計による。

２）道央転換畑でのダイズ子実収量とシリンダーインテークレート法による浸透能との関係

図 2-2-1 に現地圃場で実施した，シリンダーインテークレート法による I_b と，ダイズの子実収量との関係を示す。ダイズの目標収量を品種の収量レベルである 300 g･m^{-2} とした場合，I_b が 100 mm･h^{-1} 未満では子実収量が 300 g･m^{-2} を下回る結果となった。また，ダイズの収量構成要素は大きく「苗立本数（plant･m^{-2}）」と「個体あたり子実重（g･plant^{-1}）」に分けることができることから，苗立本数，個体あたり子実重それぞれの値と I_b とを比較してみると，苗立本数との間には明瞭な関係が見られないが，個体あたり子実重に関しては，I_b が 100 mm･h^{-1} 未満だと 15 g･plant^{-1} を下回る傾向が認められた（図 2-2-2）。

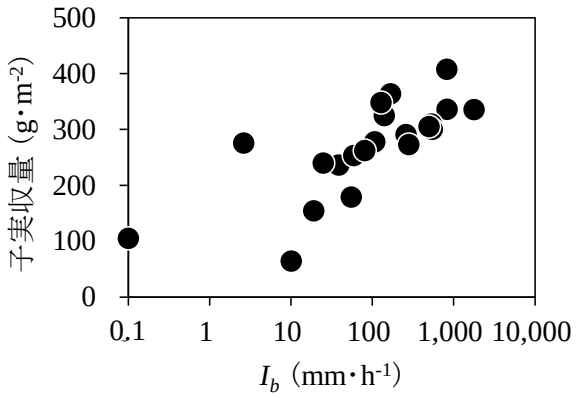


図 2-2-1　道央転換畑でのシリンダーインテークレート法による I_b とダイズの子実収量との関係

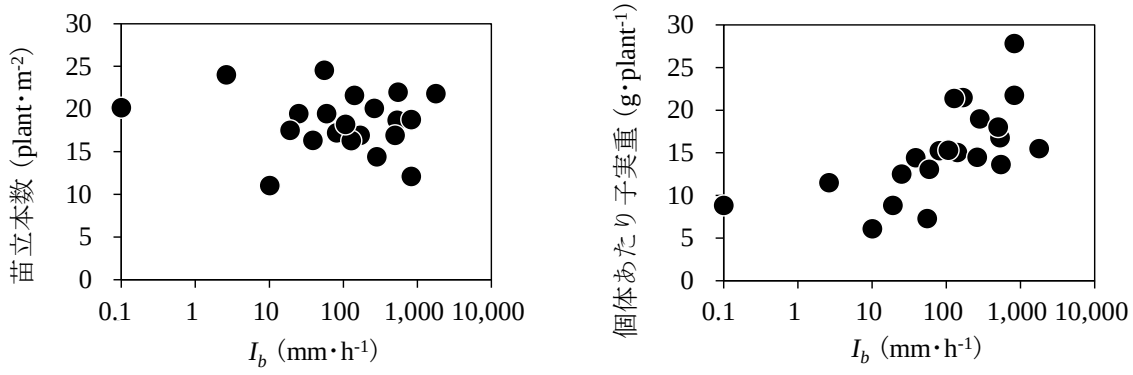


図 2-2-2　道央転換畑でのシリンダーインテークレート法による I_b とダイズの苗立ち本数ならびに個体あたり子実重との関係

ダイズの生育に影響を及ぼす土壌物理環境として，苗立本数は土壌クラスト（横井，2006；塚本ら，2012）や砕土性（孫ら，2004；吉田ら，2013），播種後から出芽までの水分状態（濱田ら，2007）など出芽時の土壌物理環境が影響し，個体あたり子実重は出芽後の土壌水分（杉本ら，1988）や堅密層の有無，孔隙量（久保田ら，1983）など主に出芽後の土壌物理環境が影響する。表 2-2-5 にダイズ子実収量と生育量，根粒重，収量構成要素との間の単相関係数を示したが，ダイズ子実収量は苗立本数とは相関が認められず，最大繁茂期の乾物重や着莢数，個体あたり子実重と相関が認められ，特に個体あたり子実重との間に強い相関が認められた。また出芽後にダイズ根に着生し，ダイズへの窒素供給を行うことで生育収量に大きく貢献する根粒菌に関しても，子実収量と強い相関が認められた。根粒菌は土壌の通気性や過湿，過乾燥による影響を強く受ける（桑原，1988）ことからも，本調査圃場では，出芽後のダイズ生育が土壌物理性の影響を強く受けていると考えられた。

表 2-2-5　道央転換畑でのダイズ子実収量と生育量，根粒重，収量構成要素との相関関係

項目	相関係数[1)]
苗立本数	0.112
最大繁茂期乾物重	0.613 **
主茎長	0.413
着莢数	0.660 **
一莢内粒数	0.265
百粒重	0.400
個体あたり子実重	0.852 **
最大繁茂期根粒重	0.653 **

1）** 1%水準で有意。

３）シリンダーインテークレート法による浸透能が示す土壌物理環境

図 2-2-1 では，現地圃場でのシリンダーインテークレート法による浸透能とダイズ子実収量との間に関係が認められ，I_b が 100 mm･h^{-1} 未満では子実収量が 300 g･m^{-2} を下回る傾向が見られている。そこで，I_b がどのような土壌物理環境を表しているのかを明らかにするために，圃場の土壌断面の状態と土壌物理性のデータを用いて多変量解析手法の一つである数量化II類を行い，ダイズの子実収量を低下させる土壌物理性に関する要因の抽出を試みた。作物の生育収量と土壌要因の関係を検討する際に数量化理論を用いる方法は，北田（1989）や安田（1991），安田・天野（1994）が行っており，説明変数として用いた土壌要因ごとの外的基準に対する影響度の大きさを把握することができる。

まず始めに土壌物理性に関する項目として，土壌断面調査で得られた，目視による亀裂が確認できない無構造の状態が出現する深さ（以下，無構造出現深と記載）ならびに作土の厚さと，土壌物理性のデータとして乾燥密度，粗孔隙量，全孔隙量，飽和透水係数，粘土含量（国際法，農学会法），貫入式土壌硬度計による貫入抵抗値，易有効水分量を用いた。土壌物理性のデータに関しては，シリンダーインテークレート法での円筒の打ち込み深さとダイズの主要根域（金田ら，2004；高橋ら，2014）を考慮して土壌表面から 20 cm 深さまでの制限値（乾燥密度，貫入抵抗値，粘土含量については最も高い値で，粗孔隙量，全孔隙量，飽和透水係数，易有効水分量については最も低い値）を用いた（表 2-2-6）。I_b を外的基準（100 mm･h^{-1} 以上と 100 mm･h^{-1} 未満）とし，土壌物理性に関する項目を説明変数として，各々の項目ごとに 1 変数による判別分析を行い有意な差の認められる項目を選定した（表 2-2-7）。また，得られた線形判別関数は外的基準と説明変数との 1 次式となることから，表 2-2-7 における定数項を判別係数で除すことによりデータの境界値を求めることができる。

その結果，I_b との間に有意な関係が見られた項目は，無構造出現深，乾燥密度，粗孔隙量，全孔隙量，飽和透水係数であり，作土の厚さは棄却された。選定された項目の境界値は無構造出現深 38 cm，乾燥密度 1.24 Mg･m^{-3}，粗孔隙量 0.04 m^3･m^{-3}，全孔隙量 0.52 m^3･m^{-3}，飽和透水係数 10^{-5} cm･s^{-1} であった。

表 2-2-6　多変量解析に用いた土壌物理性の項目

検討項目名		平均値	標準偏差
無構造出現深	cm	40.2	17.5
作土の厚さ	cm	14.8	6.6
乾燥密度	$Mg \cdot m^{-3}$	1.23	0.17
粗孔隙量	$m^3 \cdot m^{-3}$	0.05	0.03
全孔隙量	$m^3 \cdot m^{-3}$	0.53	0.06
飽和透水係数[1)]	$cm \cdot s^{-1}$	-4.33	1.36
農学会法粘土含量	$kg \cdot kg^{-1}$	0.52	0.14
国際法粘土含量	$kg \cdot kg^{-1}$	0.32	0.12
貫入抵抗値[2)]	MPa	1.13	0.52
易有効水分量	$m^3 \cdot m^{-3}$	0.07	0.03

1) 対数値で表示。

2) 貫入式土壌硬度計による値。

表 2-2-7　判別分析による I_b と関連性が認められる土壌物理性に関する項目の選定結果

検討項目名	判別係数	定数項	F 値	P 値	判定[1)]	境界値
無構造出現深	-0.106	4.042	16.287	0.0004	**	38.1 cm
作土の厚さ	-0.088	1.260	2.231	0.1465		-
乾燥密度	6.854	-8.518	8.238	0.0077	**	1.24 $Mg \cdot m^{-3}$
粗孔隙量	-43.156	1.807	10.930	0.0026	**	0.04 $m^3 \cdot m^{-3}$
全孔隙量	-20.506	10.667	8.641	0.0065	**	0.52 $m^3 \cdot m^{-3}$
飽和透水係数[2)]	-1.820	-8.224	24.294	0.0000	**	10^{-5} $cm \cdot s^{-1}$
農学会法粘土含量	0.012	-0.621	0.195	0.6620		-
国際法粘土含量	0.001	-0.031	0.001	0.9753		-
貫入抵抗値	0.271	-0.308	0.145	0.7066		-
易有効水分量	-9.259	0.599	0.604	0.4437		-

1) 1%水準で有意。

2) 飽和透水係数に関しては対数値について解析した。

次に，これら土壌物理性の項目が I_b に与える影響度の大きさを求めるため，I_b を外的基準に，選定項目を説明変数，境界値をカテゴリーとして数量化II類による解析を行った。なお説明変数のうち，全孔隙量は乾燥密度との相関が高かった（r = -0.949，1％水準で有意）ため乾燥密度を代表値とした。

解析の結果，相関比 0.78（相関比 0.5 以上で精度良）と精度の良い判別式が得られた（表 2-2-8）。表中のカテゴリースコアについて，正の値ならば外的基準である I_b が 100 mm･h^{-1} 以上に与える影響度合いを示し，負の値は I_b が 100 mm･h^{-1} 未満に与える影響度合いを示している。I_b が 100 mm･h^{-1} 以上の要因については，飽和透水係数 10^{-5} cm･s^{-1} 以上と乾燥密度 1.24 Mg･m^{-3} 未満，ならびに無構造出現深 38 cm 以深が同程度の影響度を示し，I_b が 100 mm･h^{-1} 未満の要因では影響度の大きい要因順に，無構造出現深 38 cm 未満，飽和透水係数 10^{-5} cm･s^{-1} 未満，乾燥密度 1.24 Mg･m^{-3} 以上，粗孔隙量 0.04 m^3･m^{-3} 未満となり，無構造出現深 38 cm 未満の影響度が最も大きかった。

I_b を 100 mm･h^{-1} 未満に低下させる要因として抽出された，無構造出現深，飽和透水係数，乾燥密度，粗孔隙量はいずれも土壌構造の発達程度に関連する項目である。特に無構造出現深が I_b の低下に大きく影響を及ぼしていたことから，土壌構造が未発達で亀裂や孔隙の少ない環境が I_b を 100 mm･h^{-1} 未満に低下させ，ダイズの生育収量を低下させる要因であることがわかった。

表 2-2-8　I_b と土壌物理性に関する項目との数量化II類を用いた解析結果

外的基準	相関比	説明変数	カテゴリー	カテゴリースコア	偏相関係数
I_b　100 mm･h^{-1}以上 I_b　100 mm･h^{-1}未満	0.781	無構造出現深	38 cm 以上	0.297	0.682
			38 cm 未満	-0.565	
		飽和透水係数	10^{-5} cm･s^{-1} 以上	0.318	0.626
			10^{-5} cm･s^{-1} 未満	-0.451	
		乾燥密度	1.24 Mg･m^{-3} 以上	-0.280	0.546
			1.24 Mg･m^{-3} 未満	0.300	
		粗孔隙量	0.04 m^3･m^{-3} 以上	0.140	0.273
			0.04 m^3･m^{-3} 未満	-0.131	

粘質な土壌において，シリンダーインテークレート法のような湛水条件下における土壌中への水の浸入は，亀裂や粗大孔隙の寄与が大きい（酒寄ら，1998；中川ら，2002）。また，粘質な水田土壌における余剰水の迅速な排出には亀裂や粗大孔隙の形成が必要であることを山崎ら（1963）は指摘している。したがって I_b への影響度が大きい項目として無構造出現深が抽出されたことは，粘質な転換畑でのシリンダーインテークレート法による土壌中への浸入現象を反映しているものと思われ，妥当と考える。なお今回実施したシリンダーインテークレート法では緩衝池を設置しておらず，I_b は鉛直下方への水移動の他に，打設した円筒下端から横方向への水移動も含まれた値となっている。そのため本解析で抽出された項目や値については，3 次元的な土壌物理環境を反映しているものと考えられる。

無構造出現深が 38 cm となったことに関して，本試験では亀裂の状態が土壌断面調査における目視による判断に留まり定量的な測定を行っていないことから，無構造出現深とダイズの生育収量や水の浸入現象に関する詳細な解析を行うことはできないが，福中（1980）が重粘土牧草圃場において，心土破砕の施工間隔や深度を変えた処理による土壌物理性や作物生育への影響について調査した結果では，施工深度は 40 cm で十分であることを明らかにしている。また西入（2001）は，ダイズの生育と土壌水分との関係について，地下水位は作土層からさらに 20～30 cm ほど下げる必要があると述べている。これらのことを考慮すると，粘質な転換畑における土壌構造の発達は，少なくとも地表下 40 cm までは発達させる必要があると思われる。

道央転換畑における土壌物理性の実態調査結果では，作土が薄く，作土下の浅い位置から土壌物理性の不良な状態となることが，ダイズの生育収量の制限要因となっている可能性が示唆されたが，作土の厚さについて I_b との間に有意な関係は認められなかった（表 2-2-7）。これは作土の厚さが 20 cm 以上であるが I_b が低く，作土下の土壌物理性が不良で土壌構造が未発達な圃場が存在したことによる。

粘質な土壌における作物の根は土壌中の亀裂や粗大孔隙に沿って伸長することが報告されている（高橋ら，1991；Hasegawa and Kasubuchi，1993；佐藤ら，2007）。そのため作土下に亀裂や孔隙が存在しないような土壌物理環境では，ダイズ根が作土下に伸長することができず，寡雨時には根が下層の養水分を吸収できないため干ばつによる影響を受けやすい。さらに降雨などによる余剰水が根群域外へ迅速に排水されないことから，多雨時には土壌が過湿な状態になりやすい。粘質な転換畑でダイズを栽培するためには，余剰水の排除と作物根の伸長による乾燥ストレス回避の両方の視点から，十分な作土厚の確保以上に地表下 40 cm 深程度まで亀裂や孔隙を形成させ，土壌構造を発達させる必要がある。

作土下に亀裂や孔隙を形成させる方法は，心土破砕などの土層改良機械の施工や深根性作物の栽培，堆肥や緑肥の鋤き込みが有効で，既存の技術で対応可能である。また本研究結果により，改良に必要な深さは 40 cm ほどであることがわかったため，農家は土壌物理性改善のための具体的な対策を行うことができる。

以上のことから，亀裂や孔隙の状態を反映しているシリンダーインテークレート法の I_b を，道央転換畑でのダイズ栽培における土壌物理性の簡易な評価手法として用いることが有効であり，I_b が 100 mm･h^{-1} 以上を土壌物理性の改善指標値とする。

第３節　要　約

転換畑でのダイズ栽培において，土壌クラストによる土壌の硬化がダイズの出芽に与える影響程度を検討した。クラスト硬度計値が 10 mm（0.35 MPa）以上ではダイズの出芽率が 60 %を下回る結果となり，種子の発芽を妨げる土壌クラスト硬度計値は概ね 10 mm 以上と考えられた。また粘土含量が 0.20 kg･kg^{-1} 以上，シルト含量では 0.30 kg･kg^{-1} 以上，砂含量では 0.50 kg･kg^{-1} 未満であるとクラスト硬度計値が 10 mm 以上となる土壌が多くみられた。その一方で，クラスト硬度計値が 10 mm 以上となりやすい砂含量が 0.50 kg･kg^{-1} 未満の土壌においても，強熱減量が 0.13 kg･kg^{-1} 以上，全炭素含量 0.06 kg･kg^{-1} 以上であるとクラスト硬度が全て 10 mm 未満となった。

以上より，クラスト硬度計値 10 mm 未満を出芽から苗立ち時における種子近傍の土壌物理性の改善指標値とする。また土壌クラストによる出芽抑制を受ける可能性の高い土壌条件は，砂含量が 0.50 kg･kg^{-1} 未満でかつ強熱減量が 0.13 kg･kg^{-1} 未満，全炭素含量 0.06 kg･kg^{-1} 未満であることが明らかになり，粗大有機物を含めた土壌中の有機物含量を高めることで，土壌クラストを軽減する可能性が示唆された。

次に，道央でダイズを栽培している粘質な低地土転換畑を対象に実態調査を行った結果，転換畑の土壌は作土が薄く，土壌物理性の不良な土層が作土下の浅い位置から出現する傾向が認められた。また現地圃場で実施したシリンダーインテークレート法による I_b が 100 mm･h^{-1} 未満では，収量構成要素のうち個体あたり子実重に影響を及ぼして子実収量が 300 g･m^{-2} を下回った。

I_b を外的基準に，土壌物理性に関する項目を説明変数として数量化II類による解析を行った結果，I_b を 100 mm･h^{-1} 未満に低下させる要因として影響度が大きい順に，無構造出現深 38 cm 未満，飽和透水係数 10^{-5} cm･s^{-1} 未満，乾燥密度 1.24 Mg･m^{-3} 以上，粗孔隙量 0.04 m^3･m^{-3} 未満であった。

これらの結果から，作土下の土壌構造が未発達で亀裂や孔隙の少ない環境がダイズの生育収量を低下させる要因であることがわかり，粘質な転換畑でのダイズの良好な生育には，十分な作土厚の確保以上に地表下 40 cm 深程度まで亀裂や孔隙を形成させ，土壌構造を発達させることが重要である。

以上より，道央転換畑での苗立ち以降の土壌物理性の評価法として，亀裂や孔隙の状態を反映しているシリンダーインテークレート法の I_b を用いることが有効で，改善指標値は 100 mm･h^{-1} 以上とした。

第３章　水田の高生産畑作化に向けた水環境制御技術の開発

第１節　転換畑での秋まきコムギに対するハイブリッド水路による灌漑排水技術

１．はじめに

北海道で栽培する秋まきコムギは 9 月に播種を行い，越冬して翌年の 7 月に収穫期を迎える。播種後から 5 月頃まではコムギ作物体も小さく，水分消費量も少ない。そのため積雪地である道央，道北の転換畑では特に，春先には融雪水の停滞など，排水不良による湿害を受けやすい。反面，止葉期が終わり，コムギが出穂し始める 6 月以降は子実を充実させるために多くの水分を必要とする（FAO，accessed 2019.10.19）が，北海道内の水田地帯は 5 月から 6 月にかけて寡雨傾向にあり，土壌物理性が不良である粘質な転換畑では特に水分不足が生育を制限し，コムギの収量品質を不安定にしている。

粘質で平坦な圃場の排水促進には，圃場内に排水溝を施工することが有効（長利，1987）である。北海道内の転換畑では，地表排水対策として圃場内の畦畔沿いに幅，深さともに 30 cm ほどの溝（額縁明渠）の形成が推奨されており，圃場内に溝を形成することに抵抗がなく溝掘機を所有している農家も多い（塚本ら，2020 a）。

そこで，秋まきコムギを栽培する転換畑の圃場内に，幅，深さともに 30 cm 程度の溝を一定間隔で掘り，秋まきコムギ播種後の秋から翌年春までの圃場が湿潤となりやすい時期には排水促進を，6 月の圃場が乾燥しやすい時期には水田用水路から溝への通水による灌漑を行うことのできる方法を考案した。この溝は排水と灌漑を兼ねることから「ハイブリッド水路」と名付けた。

本節では北海道内の転換畑において，秋まきコムギの生育に対応し，農家の栽培管理を考慮したハイブリッド水路の施工時期，施工間隔を明らかにするとともに，ハイブリッド水路による排水促進，水分供給効果を明らかにする。

２．試験方法

１）調査圃場の概要

試験は中央農試内の圃場ならびに岩見沢市，奈井江町，月形町の現地農家圃場において，2007～2010 年に実施した。調査圃場の処理区概要を表 3-1-1 に，施肥概要を表 3-1-2 に示す。調査圃場の中には，ハイブリッド水路を施工したが，灌漑を実施しなかった圃場を含む。中央農試内の圃場では，品種は「ホクシン」（2008～2009 年），ならびに「きたほなみ」（2010 年）を用い，9 月下旬に 18 cm の畝間で「ホクシン」は 255 粒･m^{-2}，「きたほなみ」は 170 粒･m^{-2} を目標に播種した。施肥量は「ホクシン」で 10.0 g N，12.5 g P_2O_5，5.0 g K_2O･m^{-2}，「きたほなみ」で 14.0 g N，12.5 g P_2O_5，5.0 g K_2O･m^{-2} とした。現地農家圃場におけるコムギの品種は「ホクシン」ならびに「キタノカオリ」であり，栽培方法については農家慣行とした。

施肥体系として，「ホクシン」を栽培した圃場では止葉期以降に窒素施肥を行わず，その他の品種については止葉期以降に窒素施肥を行った。なお調査圃場は全て暗渠排水が整備されている。

表3-1-1　調査圃場の処理区概要

試験年（収穫年）	調査圃場（略記号）	土壌型	作土の土性（国際法）	ハイブリッド水路の施工時期	処理区面積（m²）[1]	ハイブリッド水路施工間隔（m）	灌漑実施日	灌水量（mm）[5]
2008	中央農試（C08）	泥炭土	LiC	播種前	Hd:5520 Co:2700	15	6/25	85.1
	月形町[2]（T08）	灰色台地土	LiC	播種直後	Hd:6120 Co:4110	15	—	—
	奈井江町[3]（N08）	褐色森林土	LiC	起生期	Hd:2805 Co:—	11	6/18	102.7
2009	中央農試[4]（C09）	灰色低地土	LiC	播種直後	Hd:2400 Co:1200	12	6/3, 6/29	105.0
	岩見沢市（I09）	泥炭土	LiC	2葉期	Hd:2700 Co:2700	12	6/8	106.7
	奈井江町[3]（N09）	褐色森林土	LiC	4葉期	Hd:2805 Co:—	11	6/30	102.7
2010	中央農試1[4]（C10-1）	灰色低地土	LiC	播種直後	Hd:2400 Co:1200	12	6/11, 6/29	96.3
	中央農試2[2]（C10-2）	灰色低地土	LiC	播種直後	Hd:2400 Co:1200	12	—	—
	岩見沢市（I10）	泥炭土	LiC	播種直後	Hd:5100 Co:6400	15	6/14	70.6

1）Hd はハイブリッド水路を施工した圃場で，Co はハイブリッド水路未施工の隣接圃場。

2）ハイブリッド水路を施工したが，灌漑は未実施の圃場。

3）奈井江町の圃場はハイブリッド水路施工圃場のみ設置。

4）5 月中旬から 7 月までの間，雨よけ用のビニールハウスを圃場内に設置。

5）各灌漑実施時における灌水量の平均値（灌水量の算出は，灌漑開始時の設定取水強度と灌水時間から算出した概算値）。

表3-1-2 調査圃場の施肥概要

試験年（収穫年）	調査圃場（略記号）	栽培品種	窒素施肥量（$g \cdot m^{-2}$）		
			止葉期まで	止葉期以降	合計
2008	中央農試（C08）	ホクシン	10.0	0	10.0
	月形町（T08）	ホクシン	17.4	0	17.4
	奈井江町（N08）	ホクシン	10.0	0	10.0
2009	中央農試（C09）	ホクシン	10.0	0	10.0
	岩見沢市（I09）	キタノカオリ	23.0	6.9	29.9
	奈井江町（N09）	ホクシン	10.0	0	10.0
2010	中央農試1（C10-1）	きたほなみ	10.0	4.0	14.0
	中央農試2（C10-2）	きたほなみ	10.0	4.0	14.0
	岩見沢市（I10）	キタノカオリ	8.8	5.7	14.5

２）処理区の設定

ハイブリッド水路は，幅，深さともに 30 cm ほどの溝を圃場内の畦畔沿い，ならびに圃場の長辺方向と平行に掘削して形成し，ハイブリッド水路施工区（以下，Hd 区）とした（図 3-1-1）。また灌漑時や排水時の流路を確保するために，ハイブリッド水路と水田用水路の取水口ならびに圃場内に設置されている落水口とを接続させた。ハイブリッド水路を施工しない対照区（以下，Co 区）は，ハイブリッド水路施工圃場との間に耕作道や排水路を有する隣接圃場に設置することで，処理区間での土壌水分による影響を及ぼさないようにした。

処理区面積は 1,200～6,400 m^2 であり，Hd 区と Co 区における栽培品種，施肥量，栽培管理，前歴の栽培作物は同一とした。

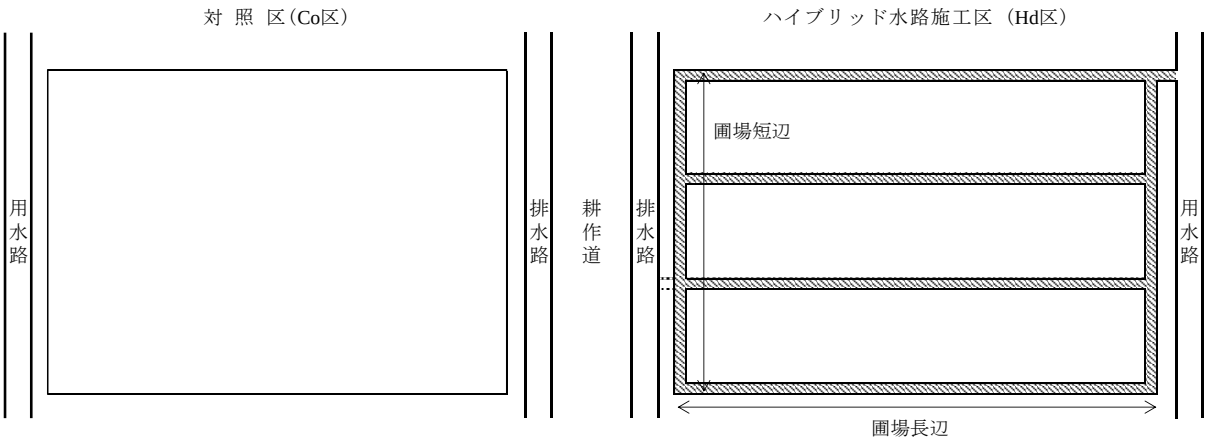


図 3-1-1　処理区の概要

1）Hd 区で灌漑を実施する際には暗渠出口ならびに落水口を閉塞し，用水路の取水口を開放して入水した。
排水時は用水路の取水口を閉塞し，暗渠出口ならびに，落水口を開放した。

３）ハイブリッド水路の施工時期の検討

秋まきコムギの生育状況と作業性の視点から，ハイブリッド水路の適した施工時期を検討した。

調査圃場においてハイブリッド水路の形成時期を，秋まきコムギ播種前（C08），播種直後（T08，C09，C10-1，C10-2，I10），コムギの 2 葉期（I09），4 葉期（N09），起生期（N08）に分けて試験を行った。ハイブリッド水路の施工に使用した機械は，T08，C08，C09，C10-1，C10-2，I10 ではオーガ式溝堀機（写真 3-1-1（a））である。掘削により形成される溝の形状は最大で上底 320 ×下底 250 ×深さ 300 mm となる。N08，N09，I09 ではロータ式溝堀機（写真 3-1-1（b））を用いた。形成させる溝の形状は最大で上底 400 ×下底 80 ×深さ 260 mm である。掘削機械を装着したトラクタは 50PS セミクローラ型を用い，PTO（power take-off：動力取出装置）回転 540 rpm，作業速度 0.5 km･h^{-1} で掘削作業を行った。掘削は地表面が乾燥した条件で実施し，溝の掘削で生じた土塊がコムギを被覆した後に，コムギの生育状況を目視にて確認した。

（a）　　（b）

写真 3-1-1　ハイブリッド水路の形成に用いた溝掘機（a：オーガ式，b：ロータ式）

４）ハイブリッド水路による灌漑のための施工間隔の検討

用水路からハイブリッド水路へ水を流した際に，圃場内全体への速やかな灌漑が可能となるハイブリッド水路の溝の間隔を検討した。

灌漑時間は農家の管理のしやすさを考えると，朝に水を入れ始め，夕方に完了することが望ましい。したがって灌漑を始めてから終了するまでの時間を 10 時間（例：7 時～17 時）以内とした。

検討した溝の間隔は，圃場内外周のみにした場合（C08）と，圃場内外周に加えて圃場内の長辺方向に 11 m 間隔（N08），ならびに 15 m 間隔（C08）に変えた処理とした。圃場内へ灌漑を行った際の水の広がりの確認方法は，目視による水足のスケッチ（圃場内外周のみの灌漑：C08），ならびに地表面の土壌水分の測定（溝 11 m 間隔：N08，15 m 間隔：C08）により把握した。

地表面の土壌水分の測定は，圃場内の長辺，短辺をそれぞれ 5 m 間隔に区切り，その交点を測定箇所とし，プローブ長 11 cm の TDR 土壌水分計 TRIME - FM 3（IMKO 社製）を用いて測定した。なお灌漑を実施する際には暗渠出口ならびに落水口を閉塞し，用水路の取水口を開放して入水した。排水時は用水路の取水口を閉塞し，暗渠出口ならびに，落水口を開放した。灌漑時の流量は，本地域の水稲栽培時の標準的な量である 10.0～14.5 $L \cdot s^{-1}$ とし，灌漑を実施した圃場における灌水量は 70.6～106.7 mm であった（表 3-1-1）。

５）ハイブリッド水路による排水効果

ハイブリッド水路の形成による排水効果を確認するために，C09 の Hd 区と Co 区において，地表面の土壌水分と地温の測定，ならびに秋まきコムギの生育量の調査を行った。土壌水分の測定は，秋まきコムギ播種後 10 月から 11 月まで期間，この時期の主要根域である 10cm 深さのマトリックポテンシャルをテンシオメータ（大起理化工業株式会社製 DIK-3160-11）により 1 時間間隔で測定した。テンシオメータの設置位置は，Hd 区では圃場内中央部の溝から 0.5 m 離れた溝近傍と，溝から 6 m 離れた溝と溝との間（以下，溝間と記載）であり，Co 区は圃場の中央部とし，所定の位置に 1 箇所ずつ設置した。

地温は秋まきコムギ播種後 10 月から 11 月までの期間，ならびに翌年の 4 月から 5 月までの期間に，深さ 10 cm 位置の温度をサーミスタ温度計（ティアンドデイ社製　RTR-52）により 1 時間間隔で測定した。温度計は，Hd 区は圃場内中央部の溝間に，Co 区は圃場の中央部に各 1 箇所設置した。

６）ハイブリッド水路による灌漑効果

T08，C10-2 以外の圃場において，ハイブリッド水路を利用した灌漑を実施し，灌漑による秋まきコムギへの影響を調査した。秋まきコムギ栽培期間中，地表下 40 cm 位置にテンシオメータ（大起理化工業株式会社製　DIK-8334-11）を，Hd 区は圃場内中央部の溝間に，Co 区は圃場の中央部に 1 箇所設置して灌漑前後のマトリックポテンシャルを 1 時間間隔で測定した。また C09 と C10-1 では，雨を遮る処理を施したモデル試験を行った。モデル

試験では，播種後翌年の 5 月下旬から 7 月までの期間，雨よけ用のビニールハウスを Hd 区，および Co 区の一部に幅 7.2 m，長さ 20 m の範囲で設置した。

秋まきコムギへ灌漑を行う時期は，秋まきコムギの水分要求量が高く，かつ北海道内の主要な水田地帯である道央,道北地域において寡雨で土壌が乾燥しやすい 6 月に設定した。灌漑を開始するマトリックポテンシャルに関して，北海道における畑地灌漑では，作土（地表下 15 cm）のマトリックポテンシャルが-31 kPa（pF 2.5)以下としている（畑地かんがい試験研究会，1997）。本試験における灌漑の目的は，作土に常時適水分を供給させるのではなく，作物の生育が水不足により制限され低収となることを回避するための灌漑としている。そのため，主要根域に適度な土壌水分が存在していれば水不足による影響を回避できると考え，灌漑実施時期における秋まきコムギの主要根域である 40 cm 深さ（塚本・唐，2020 b）のマトリックポテンシャルを灌漑判断の目安とし，40 cm 深さの値が -31 kPa 以下となった時点で灌漑を実施した。灌漑は圃場内の地表面が全体的に湿潤状態になった時点で終了した。

７）生育収量調査

生育調査は秋まきコムギの越冬前の 11 月上旬と，起生期に該当する 4 月中旬，止葉期に該当する 5 月下旬，成熟期に該当する 7 月中旬に実施した。各処理区内の 3 箇所において，1 畦につき長さ 1 m の地上部を刈り取り，70℃で 1 週間通風乾燥させ，コムギの地上部重（$g \cdot m^{-2}$）を求めた。

収量調査は 7 月下旬の成熟期に実施した。各処理区内の 3 箇所において，2.0 m^2 内の地上部を刈り取り，それぞれ 1 週間以上外気で通風乾燥させた。その後重量を測定して脱穀し，2.2 mm 篩通過分を排除した。子実水分の測定後，13.5 %水分に換算した値を子実重（$g \cdot m^{-2}$）とした。子実タンパク質含有率は Infratec 1221 Grain Analyzer（FOSS Analytical A/S 社製）を用いて近赤外線分光法により測定した。また収量調査で採取した作物体は硫酸－過酸化水素分解法により全窒素を定量し，窒素吸収量を求めた（北海道立総合研究機構農業研究本部，2012）。

３．結果および考察

１）ハイブリッド水路の施工時期の検討

ハイブリッド水路を秋まきコムギの播種前に施工すると，秋まきコムギが溝の掘削により飛散する土の影響を避けることができるが，溝形成後の砕土整地や播種作業の際に機械幅を考慮する必要があり，圃場内に播種できない場所が生じた（写真 3-1-2）。

秋まきコムギ播種後の施工では，播種直後，4 葉期，起生期の生育であれば大きな影響は見られなかった（写真 3-1-3，3-1-5）。しかし 2 葉期に施工した圃場では，溝近傍の飛散した土にコムギの葉が全て覆われ，その後は土から葉を出すことなく裸地化した（写真 3-1-4）。本試験で使用した溝堀機は，掘った土を片方向に 5～10 m 程度飛ばす仕組みである。溝の掘削により地表面に被覆される土の厚さは，掘削断面から計算すると平均 1～2 cm となる。秋まきコムギの分げつは 3～4 葉期から出現し始める（Kirby, 2002）ことから，2 葉期頃までは分げつ前で作物体も小さく，飛散した土に埋没しやすい。

これらの結果から，ハイブリッド水路の施工は秋まきコムギ播種直後に行うことが適している。多量の降雨などにより播種直後の施工が困難な場合には，秋まきコムギの分げつが進み作物体が大きくなる 4 葉期以降に施工する必要がある。

写真 3-1-2　ハイブリッド水路の播種前形成状況（調査圃場：C08）

写真 3-1-3　ハイブリッド水路の播種直後形成状況（調査圃場：C09）

写真 3-1-4　ハイブリッド水路の 2 葉期形成状況（調査圃場：I09）

写真 3-1-5　ハイブリッド水路の 4 葉期形成状況（調査圃場：N09）

２）ハイブリッド水路による灌漑のための施工間隔の検討

C08 内の外周のみに溝を掘り，溝に水を流した際の水足の広がりを目視によりスケッチした結果を図 3-1-2 に示す。水足は通水開始から 5 時間後に溝から約 15 m 地点まで進行し，その後進行速度が急激に低下した。

次に，同じ圃場において圃場内の外周と圃場の長辺と平行に，等間隔で 15 m の溝を掘り溝へ水を流し灌漑を行った。その結果，9 時間経過後には概ね圃場全体が湿潤状態になった（図 3-1-3）。溝の間隔を 11 m にした N 08 では，8 時間経過時に圃場全体が湿潤状態になった（図 3-1-4）。これらのことから，圃場内に灌漑水を行き渡らせるための溝の間隔は 15 m 以内が妥当であると判断した。

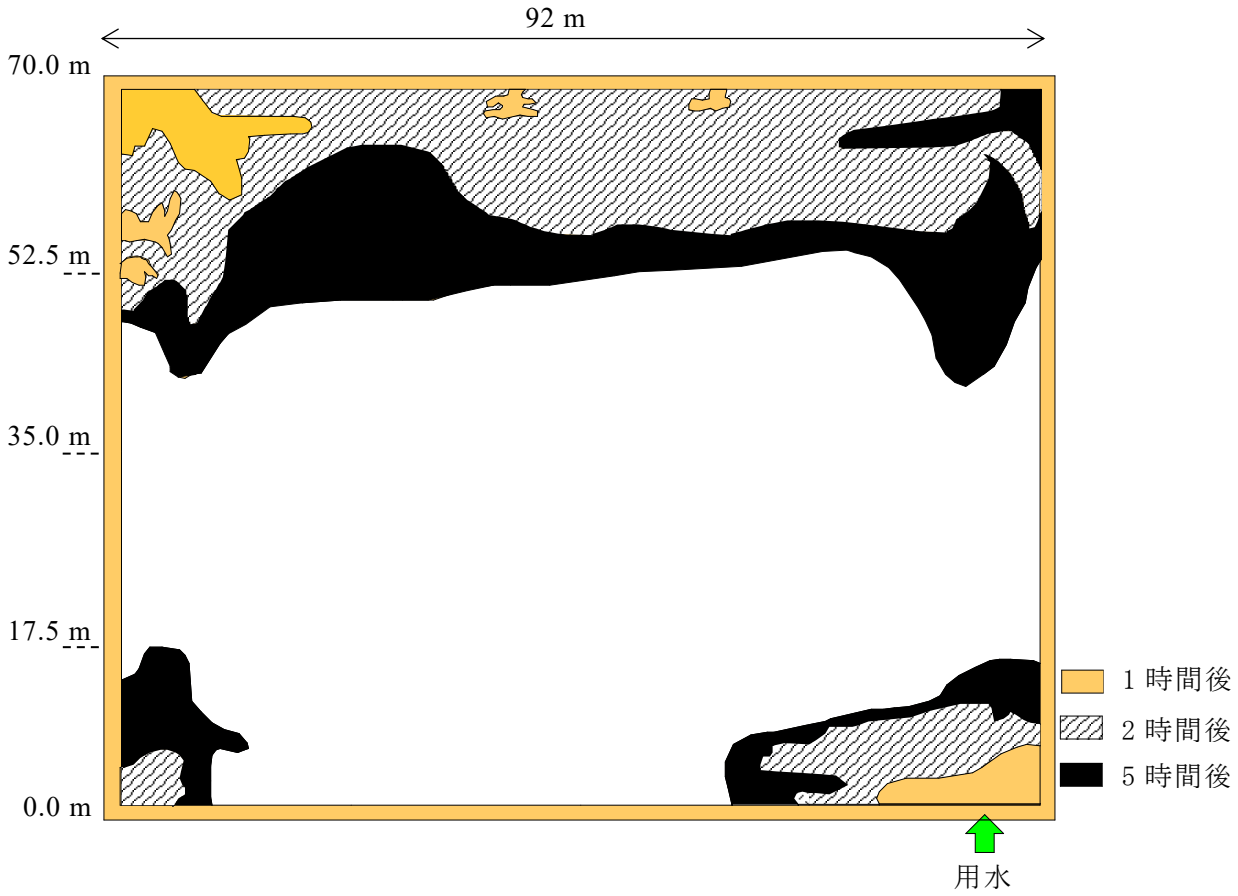


図 3-1-2　圃場内外周の溝に水を流した際の水足の広がり状況（調査圃場：C08）

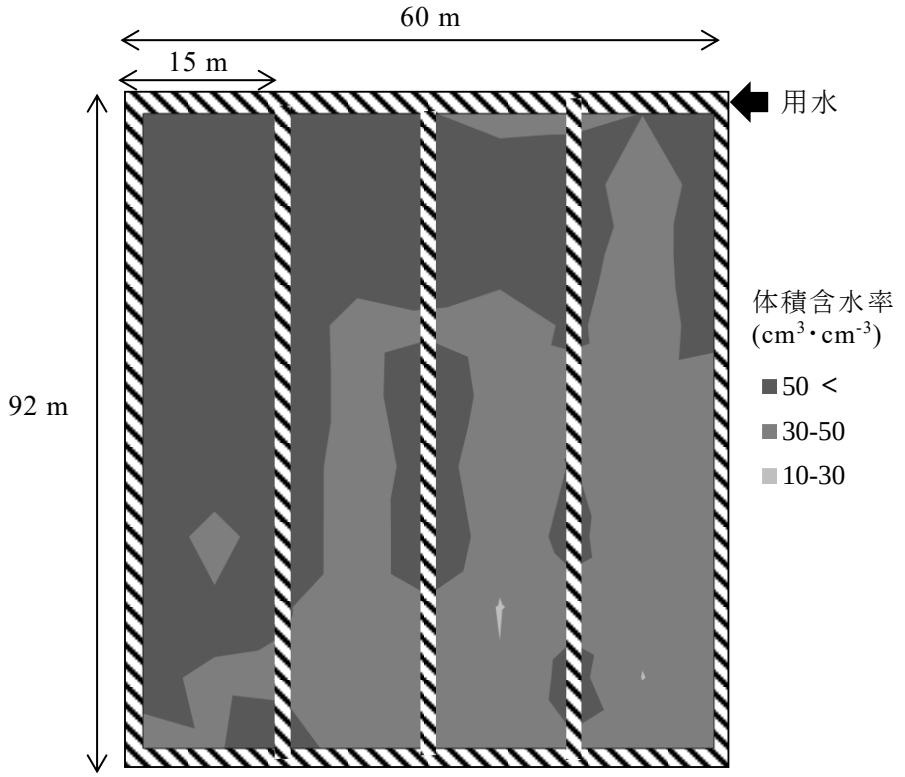


図 3-1-3　圃場内の外周ならびに長辺方向に 15 m 間隔で溝を施工した圃場に灌漑した際の 9 時間後における体積含水率の分布（調査圃場：C08，灌漑直前の体積含水率平均値は 27.1 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，体積含水率測定総地点数 n = 90）

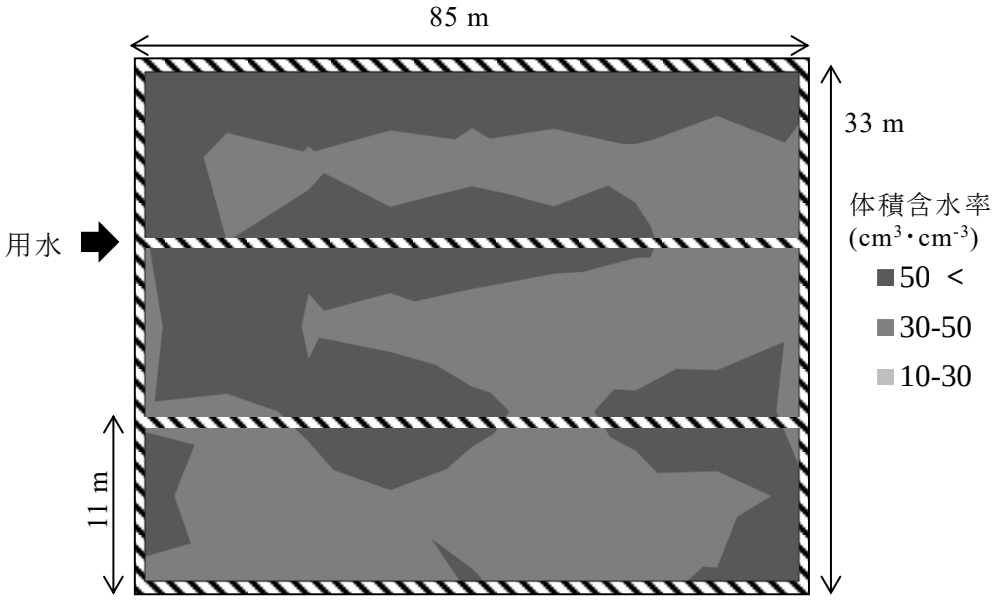


図 3-1-4　圃場内の外周ならびに長辺方向に 11 m 間隔で溝を施工した圃場に灌漑した際の 8 時間後における体積含水率の分布（調査圃場：N08，灌漑直前の体積含水率平均値は 27.5 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，体積含水率測定総地点数 n = 63）

日本は水田農業が主体であるため平坦な圃場を造成し，畦畔で周囲を囲み，畦畔内を湛水して灌漑する湛水灌漑を伝統的に行ってきた。このような灌漑方法は降下浸透の低い粘質な土壌に適している（Walker, 1989）ため，日本の転換畑での適用性は高い。また培土や畦立てして栽培する作物に対しては，畦間灌漑を行っている。しかし近年は 1 ha を超える圃場の大区画化が進められており（森，2008），区画規模の大きな圃場への灌漑は時間を要することが考えられる。コムギは水稲よりも耐湿性に弱い（Cannell et al., 1980; Yavas et al., 2012）ことから，できるだけ早く圃場内に水を行き渡らせ，また排水する必要がある。

省力的な灌漑方法としてメキシコやインドなどでは，圃場内に幅 80 cm 程度の播種床と 15 cm 程度の深さの溝からなる畦立て灌漑栽培（Raised bed furrow irrigation system）が導入されている（Sayre and Moreno Ramos, 1997; Wang et al., 2004; Tripathi et al., 2005; Jat et al., 2005）。溝の形成は牽引式の溝形成機を用いて播種と同時に行うことができるため，PTO 機構を必要とせず，省力的に作業を実施できる。反面，溝の形成に動力を用いないため溝の深さが安定せず，また圃場内に形成する溝の数が多くなり，潰れ地が増える。

ハイブリッド水路は播種後に溝掘り作業を行うため作業工程が増えるが，溝の間隔を播種作業機械の幅に制約されることなく自由に設定でき，海外の畦立て灌漑栽培に比べて圃場内に形成する溝の本数が少なくて済む。ハイブリッド水路の形成には PTO 機構により掘削する溝掘機を用いているため，PTO 機構を有する農業用トラクタが必要となるが，北海道の転換畑で営農する多くの農家が PTO 機構を有するトラクタを所有している。PTO 機構で掘削する溝掘機により 30 cm 深さ程度の溝を安定的に形成でき，掘削した土塊を粉砕し飛散させるため，掘削土塊によるコムギへの影響も少ない。

適した溝の間隔に関しては，排水性の評価の視点で検討している報告は多い（Schwab et al., 1957；USDA SCS，1971；竹中，1975；根岸，1981；谷脇・宮沢，1981；泉・武田，1982；長利，1987；Ochs, et al., 1995）が，見解が異なっている。国内の転換畑における研究では，排水可能な間隔を 20 m 程度（谷脇・宮沢，1981）としているものもあるが，5 m を越えない範囲（根岸，1981）やムギ類で 5～8 m（泉・武田，1982）などと概ね 10 m 以内とする報文が多い。一方で，国外では転換畑のような地下への排水が遅い圃場に対する圃場内の溝の間隔は，30～80 フィート（9～24 m）程度との記述があり（USDA SCS, 1971），フロリダの大区画圃場における伝統的な排水と灌水を兼ねた方法では，溝の間隔を 60 フィート（18 m）としている（Zotarelli et al., 2013）。これらの見解の違いは圃場の大きさが影響しているものと思われる。国内でこれまで対象にしてきた圃場は主に 0.1～0.3 ha 程度の規模であるが，国外では数 ha～数十 ha 規模であるため，溝の形成にかかる労力や損失面積を考慮すると，10 m 以内の幅は営農作業上困難を伴う。日本においても今後の圃場区画規模の拡大を考慮し，農家の利用する作業機や作業体系を考慮する必要がある。

本試験ではハイブリッド水路の溝の間隔を，圃場内外周の溝に灌漑した際の水足の広がりから 15 m ほどと推定したが，北海道での畑作物栽培時における防除機械の通路間隔も考慮した。すなわち，圃場内には防除機であるブームスプレーヤの散布幅を加味し，作物を栽培しない，もしくはタイヤで作物を踏み倒してトラクタが走行するための通路を形成するが，その間隔が概ね 10～15 m である。トラクタの通路部に溝を形成すれば，通路部以外に溝の形成による潰れ地が生じないことから，農家が技術を受け入れやすいと想定した。

３）ハイブリッド水路による排水効果

C09 圃場内の Hd 区と Co 区において，播種後から積雪前までの期間測定したマトリックポテンシャルの結果を図 3-1-5 に示す。マトリックポテンシャルは Co 区に比べて Hd 区の値が低く推移し(a)，処理区内では溝間よりも溝近傍で乾燥する傾向を示した(b)。測定期間中におけるマトリックポテンシャルの平均値は，Hd 区で-3.5 kPa，Co 区で-2.3 kPa であった。このことからハイブリッド水路により圃場内の余剰水が水路未施工の圃場に比べて速やかに消失し，排水が促進されることを確認できた。

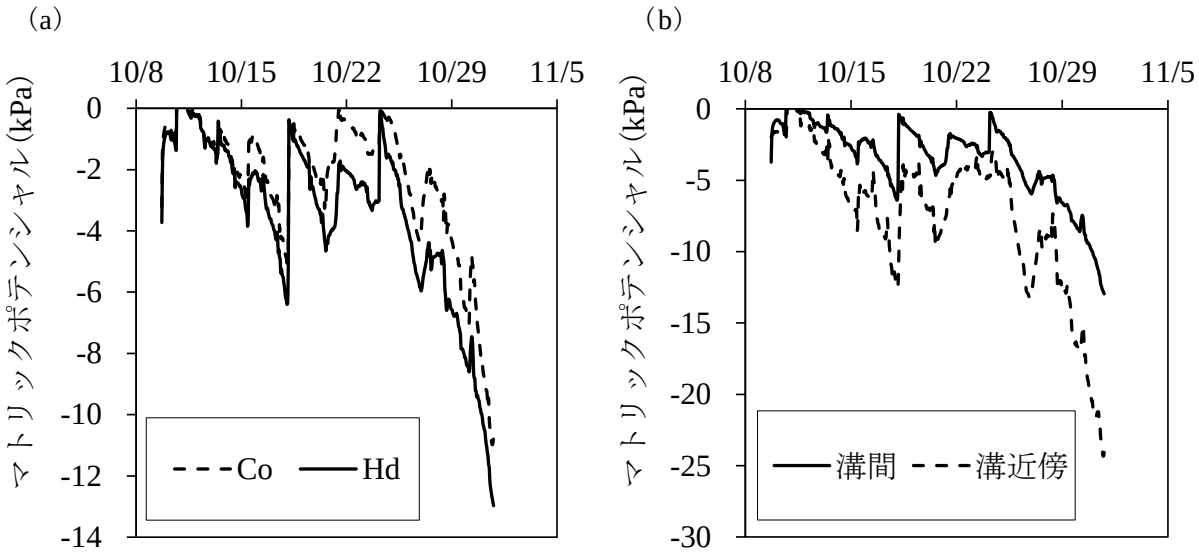


図 3-1-5　播種後から積雪前までの期間におけるハイブリッド水路施工区ならびに対照区の地表下 10 cm 位置におけるマトリックポテンシャルの変動（調査圃場：C09，調査年：2009，a：ハイブリッド水路施工区の溝間の値とハイブリッド水路未施工の対照区の値，b：ハイブリッド水路施工区内における溝間の値と溝近傍の値）

C09 圃場内の Hd 区と Co 区の作土の地温を測定した結果を図 3-1-6 に示す。越冬前，融雪後ともに Hd 区の地温が Co 区に比べて高い傾向にあり，特に融雪後春先の地温に関しては明らかに Hd 区で高くなる傾向を示した。測定期間中における地温の平均値は，Hd 区で 7.5 ℃，Co 区で 6.5 ℃であった。

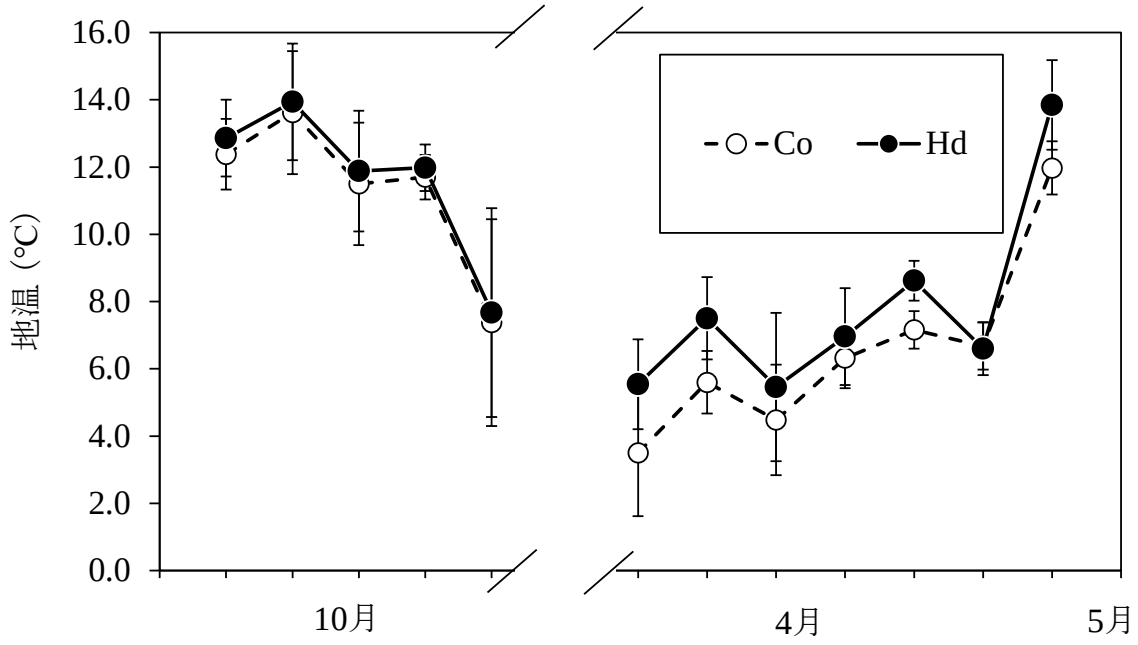
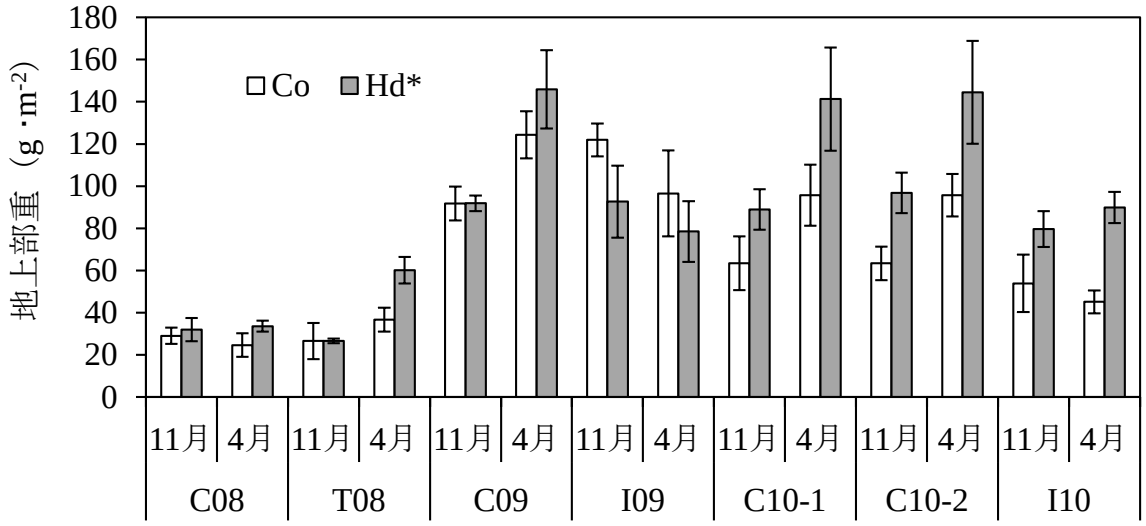


図 3-1-6　播種後から翌年春までの期間におけるハイブリッド水路施工区ならびに対照区の地表下 10 cm 位置における地温の変動（調査圃場：C09，調査年：2009～2010 年，地温は 5 日ごとの平均値として示す。エラーバーは標準偏差（n = 5））

中央農試内圃場ならびに現地圃場の各処理区における，越冬前の 11 月と越冬後起生期に該当する 4 月の秋まきコムギ地上部重を図 3-1-7 に示す。I09 以外の圃場の地上部重は，Co 区に比べて Hd 区で高い傾向を示し，特に 4 月の値は有意に高かった。I09 圃場では 11 月，4 月の値ともに Co 区に比べて Hd 区で低い値を示したが，ハイブリッド水路の施工時期が 2 葉期であったため，溝堀機により飛散した掘削土による影響を受けたことが一因と考えられた。



1）*：4 月における Hd 区と Co 区との間に分散分析により有意差あり（$p < 0.05$）

図 3-1-7　ハイブリッド水路の施工が秋まきコムギの初期生育に与える影響
（調査年：2008～2010 年，エラーバーは標準偏差（$n = 3$））

北海道において，土壌が湛水しやすい越冬前や融雪期は，秋まきコムギの個体も小さく湛水による影響を受けやすい。そのため秋まきコムギの播種直後に溝を形成することは，地表排水を促進し，地温が上昇してコムギの初期生育が良好になることがわかった。

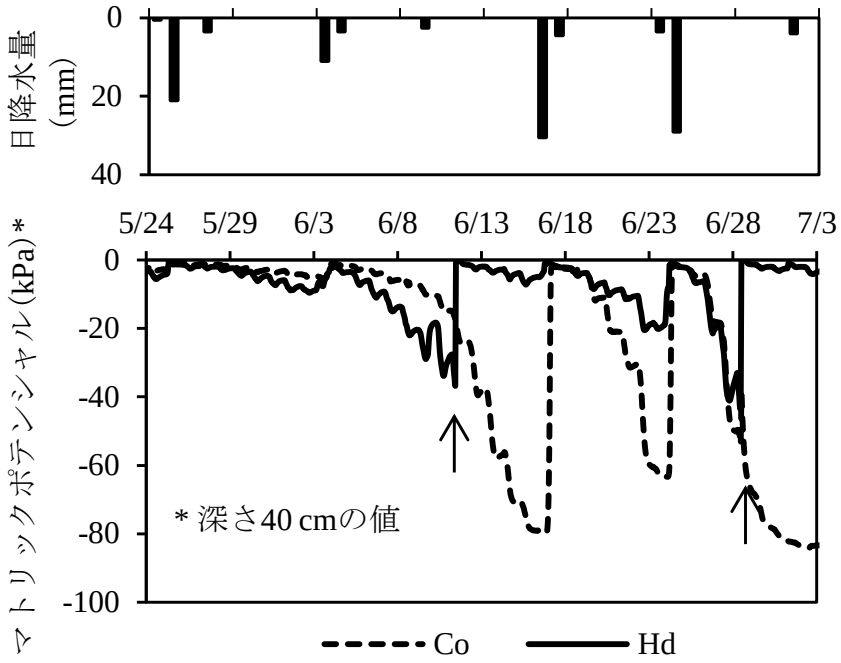
北海道では作物の栽培可能な期間が短いことから，排水により春先の早い段階から地温を高めて作物生育を促進させ,作物の生育期間を長くすることが非常に重要であることを，札幌農学校で土壌を教えていた Brooks が指摘している（高井，2004）。排水促進による地温の上昇に関して篠遒（1988）は，暗渠排水の施工により排水を促進させた圃場では，未施工圃場より 3～11 月の期間の地温が高い結果を得ており，松田・向井（2009）は，圃場の緩傾斜化と表土の硬化，明渠の組み合わせにより排水を促進した圃場では，根雪終雪後の地温が上昇することを明らかにしている。

また積雪寒地の北海道では，春の耕耘作業のための地耐力確保や土壌の早期乾燥化，地温上昇により良好な作物生育を確保するために，春の融雪，排水促進は重要な営農対策となっており，本試験結果はこれまでの知見や対策を裏付けている。

４）ハイブリッド水路による灌漑効果

灌漑実施期間中，雨よけ用のビニールハウスを設置したモデル試験における，試験期間中のマトリックポテンシャルの推移を図 3-1-8 に示す。20 mm 以上の降雨が生じた際に，ハウス周辺からの雨水の流入によるものと思われるマトリックポテンシャルの上昇が見られたが，Co 区では-31 kPa 以下となる過乾燥な状態が長く続いたのに対し，Hd 区については期間を通して概ね-31 kPa 以上で推移した。

モデル試験での生育収量結果を表 3-1-3 に示す。灌漑実施前に該当する止葉期における地上部重は，Hd 区で若干高い，もしくは Co 区で高かったが，Hd 区では Co 区との比で子実重が 110 %程度となり，子実タンパク質含有率は 1 ポイント以上高く，窒素吸収量も高かった。これらのことから，秋まきコムギの水分要求量が高まる時期における寡雨時に灌漑を行うことで，コムギが効率よく土壌中の養分を吸収でき，十分な子実重やタンパク質含有率を得ることができたものと考えられた。



** 図中矢印は灌漑実施を示す。

図 3-1-8　灌漑期間中に降雨を遮断したモデル試験におけるマトリックポテンシャルの推移（調査圃場：C10-1，調査年：2010 年，）

表3-1-3　降雨を遮断した条件でのハイブリッド水路による灌漑が秋まきコムギの生育収量に与える影響

調査圃場	処理区	止葉期地上部重 (g･m^{-2})	子実重[1)] (g･m^{-2})	収量比[2)] (%)	子実タンパク質含有率(%)	収穫時窒素吸収量(g･m^{-2})
C09	Hd	797±12	567±24	111	9.8±0.1	13.1±0.5
	Co	747± 5	512± 3		8.7±0.2	11.6±0.4
C10-1	Hd	798±51	591±19	110	12.1±0.3	17.6±1.0
	Co	829±56	537±21		10.7±0.4	12.6±0.2

1）水分13.5 %換算値。

2）Co区に対するHd区の比率。

3）表中の値は平均値±標準誤差（n = 3）。

５）ハイブリッド水路による排水促進と灌漑の組み合わせ効果（実証試験）

中央農試内の圃場と現地農家圃場での，Hd 区，Co 区における秋まきコムギの収量品質結果を表 3-1-4 に示す。子実タンパク質含有率の傾向は判然としなかったが，窒素吸収量は Hd 区で高く，子実重は Hd 区で有意に高かった。ハイブリッド水路による排水促進と灌漑で子実重は Co 区との比で 107～129 %となり，ハイブリッド水路を施工したが，灌漑を行わなかった T08 および C10-2 では，排水促進のみでも Co 区比で 103～106 %であった。

子実タンパク質含有率の傾向が判然としなかった理由として，止葉期以降の窒素追肥が考えられる。止葉期以降に窒素追肥を行わなかった C08 や T08 では Co 区で高く，止葉期以降に窒素施肥を行った I09 や C10-2 では Hd 区で高かった。過去の知見では，窒素を増加させず，灌漑などにより収量ポテンシャルを増加させる処理をした場合は子実タンパク質含有率が低下する（Bole and Dubetz,1986; Eck,1988）が，特に開花期に近い生育後半での窒素施肥と灌漑を組み合わせるとタンパクが上昇する（Wuest and Cassman, 1992; Strong, 1982）ことが報告されており，本試験結果と一致する。一方で I10 は，止葉期以降に窒素追肥を行っているが Co 区のタンパク質含有率が高かった。これは増収率が 129 %と他の圃場に比べて高く，止葉期の窒素追肥量以上に子実量が増加したことが原因と考えられる。

なお，降雨を遮断したモデル試験の結果（表 3-1-3）では止葉期の窒素追肥にかかわらず，灌漑により子実タンパク質含有率が上昇した。降雨を遮断する処理により，灌漑を実施しなかった Co 区のコムギは止葉期以降に強い水分不足に遭遇し，根が土壌から窒素吸収を行うことができなかったことによるものと思われる。

ハイブリッド水路の形成により，秋まきコムギの栽培ができない損失面積が生じる。そこで損失面積について試算を行った。圃場全面に秋まきコムギを作付していると仮定して，全面積に対するハイブリッド水路部分の面積割合は，11 m 間隔，長辺 85 m，短辺 33 m，2,805 m^2 の場合（N08，N09）では 2.4 %となり，15 m 間隔，長辺 92 m，短辺 60 m，5,520 m^2（C08）で 2.0 %であった。このことから，損失面積はおよそ 2～3 %程度と考えると，灌漑を行わない場合においてもハイブリッド水路の形成による損失面積以上の増収効果が得られると考えられ，排水促進の効果のみとしても，本技術の適用は可能である。ハイブリッド水路の施工費は，労賃を含めて 500～1,000 円･ha^{-1} 程度である。この値は北海道での秋まきコムギの平均収量から算出した，ha あたり価格の 0.2～0.5 %程度であることから，ハイブリッド水路は経済性の面からも問題ないと考えられる。

以上の結果よりハイブリッド水路による排水促進および灌漑は，秋まきコムギの生育収量の向上に効果があると結論した。

表3-1-4　ハイブリッド水路による排水促進と灌漑が秋まきコムギの生育収量に与える影響

試験年（収穫年）	調査圃場	処理区	子実重[1)]（g･m^{-2}）	収量比[2)]（%）	子実タンパク質含有率（%）	収穫時窒素吸収量（g･m^{-2}）
2008	C08	Hd	594±16	107	9.2±0.1	NA[3)]
		Co	556±49		9.8±0.4	NA
	T08[4)]	Hd	747±26	106	13.2±0.1	NA
		Co	706±24		13.6±0.1	NA
2009	I09	Hd	724±25	119	13.2±0.1	23.3±0.6
		Co	610±32		12.8±0.5	18.3±0.4
2010	C10-2[4)]	Hd	594±4	103	11.0±0.2	15.8±0.6
		Co	579±37		10.0±0.4	13.8±1.4
	I10	Hd	505±35	129	12.3±0.5	15.6±1.3
		Co	391±46		13.0±0.6	13.5±0.4

1）Hd区とCo区との間に分散分析により有意差あり（$p < 0.05$）。水分13.5 %換算値。

2）Co区に対するHd区の比率。

3）NA：未分析のため該当データなし。

4）ハイブリッド水路を施工したが，灌漑は未実施の圃場。

5）表中の値は平均値±標準誤差（$n = 3$）。

第２節　転換畑での暗渠清掃用施設「集中管理孔」を利用した地下灌漑技術

１．はじめに

北海道内の水田地帯に設置が進められている暗渠清掃用の施設「集中管理孔」は，暗渠排水機能の維持・向上に役立つとともに，地下灌漑として利用できる。近年の豪雨と寡雨が頻発しやすい気象条件において，集中管理孔を用いた地下灌漑手法が確立できれば，圃場に排水機能と灌漑機能を同時に具備することとなり，農作物の安定生産への貢献が期待できる。

一戸あたりの経営耕地面積や大区画圃場が増加する状況下において，集中管理孔による地下灌漑技術を農家に普及させるには，土壌水分計などの測定機器を使用せず，栽培作物ごとに地下灌漑の実施を判断できる方法を示すことが必要である。作物の吸水量が多い時期に寡雨となると，水不足による生育阻害が生じる可能性が高い。そのため作物の吸水量が多い時期を地下灌漑実施期間とし，実施期間中のまとまった降雨後や灌漑後の土壌の乾燥推移から，間断日数を明らかにすることで，土壌水分計による計測を行わず，降雨条件のみで灌漑実施の要否の判断が可能と考える。

本節では，北海道における主要な転作作物としてダイズ，秋まきコムギを供試し，集中管理孔を用いた地下灌漑による効果を明らかにするとともに，作物栽培期間中における土壌水分の変動と降水量との関係を解析することで，降雨条件から地下灌漑実施の要否を判断する方法を示す。

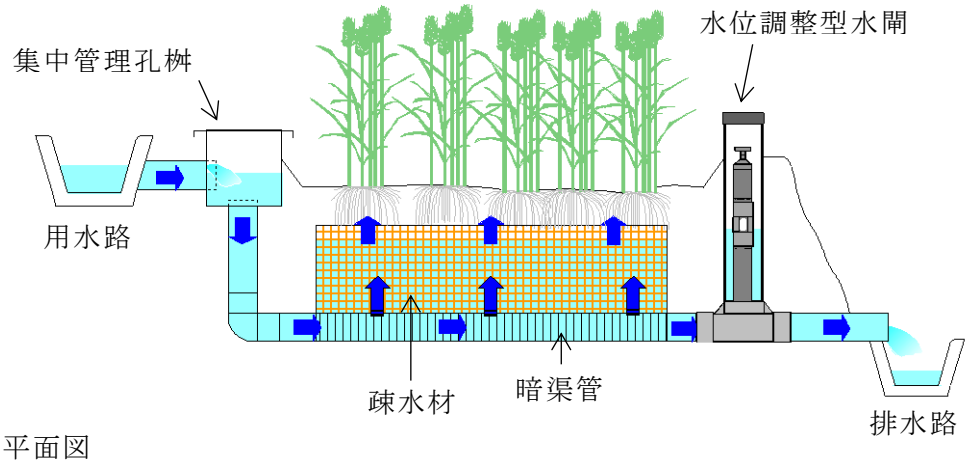
２．試験方法

１）集中管理孔の施設概要

集中管理孔の施設概要を図 3-2-1 に示す。集中管理孔は暗渠管の清掃（フラッシング）用の施設である。開水路や管水路から暗渠管へ接続する桝が設置され，暗渠管内に用水を流入することで，暗渠管内を清掃できる構造になっている。暗渠配線はこれまでの設計指針と変わらないことから，既存の暗渠に設置することも可能である。

地下灌漑用に整備された圃場では，地表下の水位が調節できるよう，止水栓のパイプに一定間隔の穴が空いた暗渠水閘（水位調整型水閘）が排水路側の畦畔に設置されており，水位が設定位置に到達すると流入水は排水路に排出される構造になっている。地下灌漑として利用する際，暗渠管へ流入した水は暗渠上にある疎水材や土壌中の亀裂などの孔隙を伝わり上昇し，作物の根域へ直接水分を供給できる。

(a) 施設横断図



(b) 施設平面図

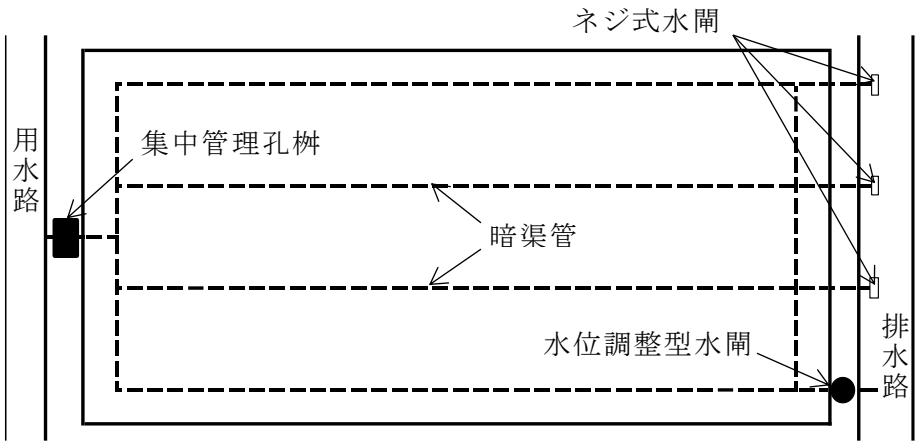


図 3-2-1　集中管理孔の施設概要

２）集中管理孔を利用した転作作物への地下灌漑手法

（１）地下灌漑時の給水流量，水位持続時間，設定水位

地下灌漑時における集中管理孔桝への流入量は，地上部への吹き出しが生じない 180 L･min^{-1} とした。灌漑を持続する時間は，水位調整型水閘の設定水位到達から 1 日（24 時間）とした。これは，地下灌漑によって地表下の水位（測水管による測定水位）を一定に維持した試験において，土壌が還元化し，作物の生育に悪影響を及ぼしたことを考慮している（塚本・唐，2020 a）。灌漑を終了する時は，水閘を開放して排水を行う。なお設定水位への到達は，前述のとおり，水位調整型水閘から流入水が排出されることで確認が可能である。

設定水位は，地下灌漑時に農作業用機械による防除作業などの支障にならず，かつ，作物の主要根域に水分を供給できるような水位が望ましい。本施設を用いて地下灌漑を実施する際，設定した水位と圃場内の地表下の水位は，概ね 5 cm 前後の差がみられる。そのため設定水位を 30 cm よりも浅い位置にすると，作土が湿潤状態になる可能性が高まり地下灌漑実施中における農作業機械の走行に支障をきたす恐れがある。

また，北海道内の転換畑におけるダイズ，秋まきコムギの株元に土壌断面を形成し，断面上に露出した根をスケッチして根張りを確認した結果，ダイズの根は深さ 30 cm までに多く分布しており，秋まきコムギの根は深さ 40 cm 程度まで多く分布していた（図 3-2-2）。そのため，それぞれ 30 cm 程度の水位設定で根域に水分を供給できる。

さらに北海道内の転換畑は，ダイズと秋まきコムギの交互作が多く，永年転換畑の圃場が多い。畑作物栽培期間中，水位調整型水閘は年間を通して開放したままの状態で，水閘の操作は行わない。水位調整型水閘は 1 ha あたりに 2～5 箇所の割合で配置されているため，1 ha 以上の圃場が多い北海道の転換畑において，地下灌漑を行う際にダイズと秋まきコムギで異なる水位を設定した場合，毎年多くの水閘止水栓の穴の位置を調整する必要が生じ煩雑となる。地下灌漑の方法として，設定水位到達後は 1 日後に排水することから，根域が過湿によるストレスを受ける可能性は低いと考え，ダイズ，秋まきコムギともに 30 cm の設定水位とした。なお，地表下 30 cm の位置は，北海道内の転換畑では耕盤層下部もしくは耕盤層直下に該当する（塚本ら，2020 b）。

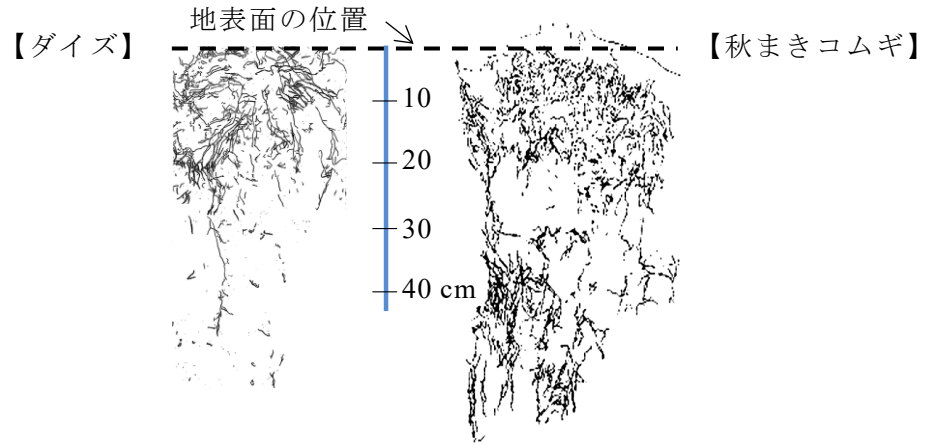


図 3-2-2　道央転換畑でのダイズ，秋まきコムギの根の分布

（２）集中管理孔を利用した地下灌漑による作物への効果

試験は中央農試内の圃場ならびに長沼町，栗山町内の農家圃場にて 2011～2012 年に実施した。調査圃場の概要を表 3-2-1 に示す。中央農試の圃場では，ダイズは品種「ユキホマレ」を用いて 5 月下旬に畝間 60 cm，株間 20 cm，1 株に 2 粒ずつ播種した。秋まきコムギは品種「きたほなみ」を用いて 9 月下旬に畝間 18 cm，170 粒･m^{-2} を目標に播種した。ダイズの施肥量は 1.5 g N，12.5 g P_2O_5，6.5 g K_2O･m^{-2} とし，秋まきコムギは 14.0 g N，12.5 g P_2O_5, 5.0 g K_2O･m^{-2} とした。中央農試，現地農家圃場ともに地下灌漑を実施する地下灌漑区，および地下灌漑区と隣接した地下灌漑未実施の対照区を設置し，各処理区内の中央部の暗渠直上部近傍に，テンシオメータ（大起理化工業製 30 cm 用：DIK-3160-11，40 cm 用：DIK-8334-11）をダイズ栽培時には深さ 30 cm に，秋まきコムギ栽培時には深さ 40 cm に 1 箇所設置し，地下灌漑実施前後のマトリックポテンシャルを 1 時間間隔で測定した。なお，北海道における畑地灌漑では，灌漑を開始するマトリックポテンシャルは，ダイズ，秋まきコムギともに作土（地表下 15 cm）のマトリックポテンシャルが-31 kPa（pF 2.5)以下としている（畑地かんがい試験研究会，1997）。本試験で目的としている，水不足による生育阻害への対策として地下灌漑を行う場合，主要な根域に適度な土壌水分が存在していれば水不足による影響を回避できると考えた。そのため各作物の主要根域としてダイズは深さ 30 cm，秋まきコムギは深さ 40 cm のマトリックポテンシャルが-31 kPa 以下となった時点で地下灌漑を行うこととした。

中央農試内の圃場では，ダイズ，秋まきコムギへ地下灌漑を行う時期に，降雨の影響を遮断したモデル試験を実施した。モデル試験では，雨よけ用のビニールハウスを地下灌漑区および対照区内の一部に幅 7.2 m，長さ 20 m の範囲で暗渠埋設位置と交差する方向に設置した。気象条件として，2011 年は 7 月下旬から 8 月中旬にかけて寡雨傾向で，2012 年は 6 月から 7 月にかけて寡雨傾向であった。

表 3-2-1　地下灌漑実施圃場の耕種概要

試験年（収穫年）	調査圃場	土壌型	土性（国際法）	栽培作物	品種	窒素施肥量（g･m^{-2}）	処理区面積（m^2）	地下灌漑実施日	灌水量[2)]（mm）
2011	長沼町	灰色低地土	LiC	ダイズ	ユキホマレ	1.5	地下灌漑：5,800 対　照：5,800	8/2，8/11	44.7
		グライ低地土	LiC	ダイズ	トヨムスメ	1.3	地下灌漑：8,000 対　照：8,000	8/2，8/11	32.1
	中央農試[1)]	灰色低地土	LiC	ダイズ	ユキホマレ	1.5	地下灌漑：700 対　照：1,050	7/26，8/1 8/5，8/9	62.5
2012	栗山町	褐色森林土	CL～LiC	ダイズ	いわいくろ	1.5	地下灌漑：5,700 対　照：5,200	7/28，8/29	30.5
	長沼町	グライ低地土	LiC	秋まきコムギ	きたほなみ	7 - 6 （止葉期まで-止葉期以降）	地下灌漑：8,000 対　照：8,000	6/6，6/15 6/30	43.2
	中央農試[1)]	灰色低地土	LiC	秋まきコムギ	きたほなみ	10 - 4 （止葉期まで-止葉期以降）	地下灌漑：700 対　照：1,050	6/6，6/27	62.5

1）処理区の一部に雨よけ用のビニールハウスを設置し降雨を遮断したモデル試験を実施。

2）各灌漑実施時における灌水量の平均値（灌水量の算出は，灌漑開始時の設定取水強度と灌水時間から算出した概算値）。

（３）生育特性と降雨条件による地下灌漑判断手法の検討

本試験では，作物の吸水量が多い時期を地下灌漑実施期間として設定した。ダイズは開花期以降の水分要求量が高く（有原，2000），秋まきコムギは穂ばらみ期から乳熟期にかけて水分要求量が高く水不足が収量に大きく影響を及ぼす（Loper, accessed 2019.10.19; FAO, accessed 2019.10.19）。

図 3-2-3 に北海道内の転換畑で測定したマトリックポテンシャルの事例として，ダイズは 2003 年に岩見沢市（泥炭土）の農家圃場，秋まきコムギは 2005 年に奈井江町（褐色森林土）の農家圃場で測定した結果を示す。ダイズは開花期に該当する 7 月中旬以降，子実肥大期に該当する 8 月下旬にかけて，秋まきコムギでは穂ばらみ期に該当する 6 月上旬から 7 月の成熟期にかけて，マトリックポテンシャルが-31 kPa 以下となり多くの土壌水分を吸収しており，これらの時期に寡雨であると，生育への影響を大きく受けることが想定される。

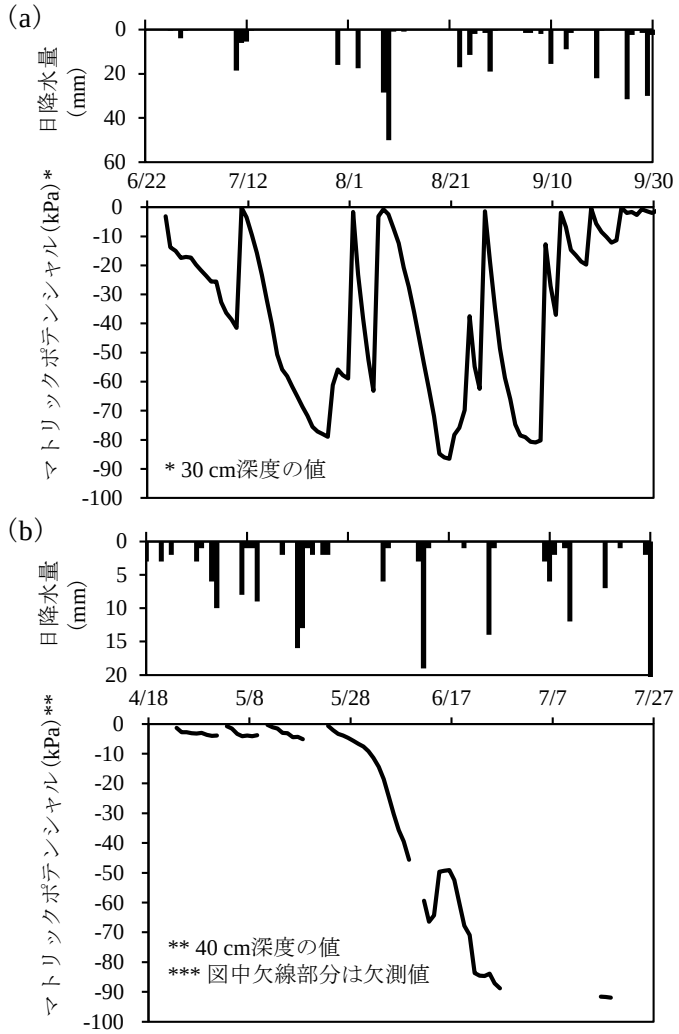


図 3-2-3　道央転換畑でのダイズ，秋まきコムギ栽培期間中における
マトリックポテンシャルの推移
（（a）ダイズ，2003 年岩見沢市，（b）秋まきコムギ，2005 年奈井江町）

一方で，北海道内の水田地帯における用水の通水期間は長くても 8 月末までであることから，本試験ではダイズに対する地下灌漑実施期間を 7 月中旬から 8 月末までに設定した。秋まきコムギに関しては，7 月以降も吸水量の多い時期が続くが，早ければ 7 月中旬から始まる収穫作業に向けた登熟，乾燥促進を考慮して，6 月初めから 6 月末までとした。

次に，地下灌漑実施期間中において，地下灌漑が必要となる降雨条件を明らかにするため以下の解析を行った。試験圃場近傍におけるアメダスの日別降水量のデータを元に，一雨降水量を算出した。一雨降水量と，降雨後，作物栽培期間中のマトリックポテンシャル（ダイズは深さ 30 cm，秋まきコムギは深さ 40 cm で測定）が上昇した際の最大値との関係から，作物根域のマトリックポテンシャルが-1.0 kPa 以上となり，十分に水分が供給されたと判断される一雨降水量を求めた。また十分に水分が供給されたと判断される降雨後，ならびに地下灌漑実施後に，再びマトリックポテンシャルが-31 kPa 以下の乾燥状態に至るまでの日数を，マトリックポテンシャルの観測結果から算出した。以上の結果から，地下灌漑実施期間中において，十分な水分が供給されたと判断される降雨後から地下灌漑実施の要否を判断するまでの日数と，地下灌漑実施後に再度灌漑実施の要否を判断するまでの日数の設定を試みた。

なお解析に用いたマトリックポテンシャルのデータについては，表 3-2-1 の調査圃場に加え，過去に測定した値として，ダイズは 2003 年岩見沢市（泥炭土），長沼町（グライ低地土）の農家圃場，2010 年中央農試（灰色低地土）のデータを用いた。秋まきコムギは Tsukamoto et al.（2017）がハイブリッド水路による灌漑の試験で得た，2008 年奈井江町（褐色森林土），2009 年岩見沢市（泥炭土）の農家圃場，2009 年，2010 年は中央農試（灰色低地土）のデータを用いた（国際法土性は全て LiC）。いずれも地域の標準的な栽培管理を行った圃場であり，使用機器や設置方法は本試験での方法と同様である。

（４）作物生育収量調査

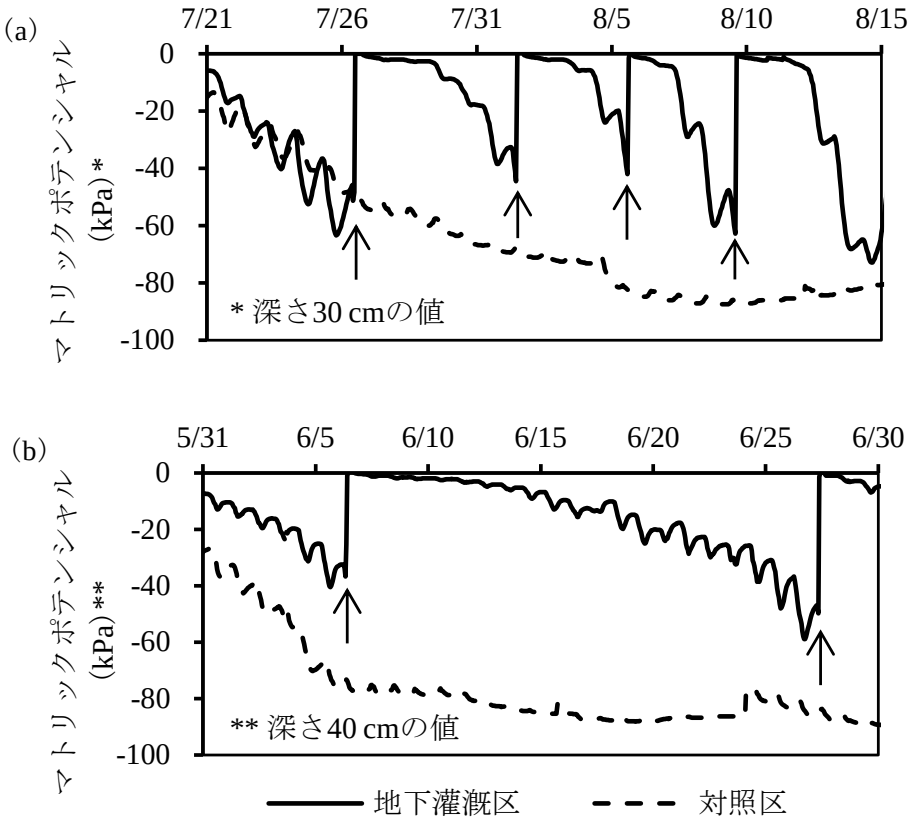
各処理区における地下灌漑実施前の生育量を把握するため，ダイズは開花期に該当する 7 月中旬に，秋まきコムギは止葉期に該当する 5 月下旬に生育調査を実施した。各処理区内の 3 箇所において，ダイズは 1 畝につき 2 m 内に生育している本数を数えた後に地上部を刈り取り，秋まきコムギは 1 畝につき 1 m 内の地上部を刈り取り，それぞれ 70℃で 1 週間通風乾燥させ，ダイズの地上部重（$g \cdot m^{-2}$），ならびに秋まきコムギの地上部重（$g \cdot m^{-2}$）を求めた。

収量調査は，ダイズは 10 月中旬から下旬にかけて，秋まきコムギは 7 月下旬に実施した。各処理区内の 3 箇所において，ダイズは 2.6 m^2 内の本数を数えた後に地上部を刈り取り，秋まきコムギは 2.0 m^2 内の地上部を刈り取り，それぞれ 1 週間以上通風乾燥させた。その後重量を測定し総重（$g \cdot m^{-2}$）とし，脱穀後に秋まきコムギは 2.2 mm 篩通過分を排除し，ダイズは屑粒を取り除き，子実水分の測定後，秋まきコムギは 13.5 %水分に，ダイズは 15 %水分に換算した値を子実重（$g \cdot m^{-2}$）とした。子実タンパク質含有率は Infratec 1221 Grain Analyzer（FOSS Analytical A/S 社製）を用いて近赤外線分光法により測定した。また収量調査で採取した作物体は硫酸－過酸化水素分解法により全窒素を定量し，窒素吸収量を求めた（北海道立総合研究機構農業研究本部，2012）。

３．結果および考察

１）集中管理孔を利用した地下灌漑による作物への効果

地下灌漑実施期間中，雨よけ用のビニールハウスを設置したモデル試験における，試験期間中のマトリックポテンシャルの推移を図 3-2-4 に示す。灌漑開始の目安としたマトリックポテンシャルの値が-31 kPa よりも乾燥した状態での灌漑となり，また秋まきコムギでは，測定開始時の値が地下灌漑区に比べて対照区で若干低い傾向を示したが，ダイズ，秋まきコムギともに対照区は-31 kPa 以下となる過乾燥な状態が長く続いたのに対し，地下灌漑区については対照区に比べて-31 kPa 以下となる期間が短かった。



*** 図中矢印は灌漑実施を示す。

図 3-2-4　降雨を遮断したモデル試験におけるマトリックポテンシャルの推移
（(a) 2011 年ダイズ栽培圃場，(b) 2012 年秋まきコムギ栽培圃場）

モデル試験での生育収量結果を表 3-2-2 に示す。ダイズは，地下灌漑実施前の開花期地上部重が地下灌漑区に比べて対照区で高かった。一方，収穫時の総重や子実重，子実タンパク質含有率，窒素吸収量は地下灌漑区で高く，特に子実重は対照区比で 164 %となった。秋まきコムギは，地下灌漑実施前における地下灌漑区の止葉期地上部重が対照区とほぼ同じ値であるが，収穫時にはダイズの結果と同様に地下灌漑区の値が高く，子実重は対照区比で 122 %となった。これらの結果から，作物の水分要求量の高まる時期における寡雨時に地下灌漑を行うことで，十分な生育収量を得ることができたものと考えられた。

表 3-2-2　降雨を遮断した条件での地下灌漑がダイズならびに秋まきコムギの生育収量に与える影響

栽培作物	試験年	処理区	地下灌漑実施前地上部重[1)] (g･m^{-2})	収穫時総重 (g･m^{-2})	子実重[2)] (g･m^{-2})	収量比[3)] (%)	子実タンパク質含有率 (%)	収穫時窒素吸収量 (g･m^{-2})
ダイズ	2011	地下灌漑	174 ± 5.4	716 ± 17.8	398 ± 19.1	164	40.0 ± 0.22	27.5 ± 0.45
		対照	209 ± 3.6	624 ± 30.4	243 ± 19.2		38.5 ± 0.36	23.7 ± 0.82
秋まきコムギ	2012	地下灌漑	589 ± 1.0	1,491 ± 46.5	766 ± 20.0	122	10.2 ± 0.63	18.0 ± 1.70
		対照	591 ± 64.5	1,171 ± 47.3	629 ± 16.7		9.5 ± 0.20	13.9 ± 0.65

1）ダイズは開花期，秋まきコムギは止葉期の値。
2）ダイズは水分15 %，秋まきコムギは水分13.5 %換算値。
3）対照区に対する地下灌漑区の比率。
4）表中の値は平均値±標準誤差（n = 3）。

中央農試内および現地農家圃場において，地下灌漑を実施した際の生育収量結果を表 3-2-3 に示す。地下灌漑区の総重や子実重はダイズ，秋まきコムギともに対照区に比べて高く，秋まきコムギは圃場数が少ないこともあり有意差が認められないが，ダイズの子実重は対照区に比べて有意に高かった。子実重の対照区比はダイズで 110～129 %，秋まきコムギは 102～105 %であった。

子実タンパク質含有率は，ダイズでは対照区に対して子実重が高かった地下灌漑区においても，対照区と同程度の含有率あるいは高い値であった。一方，秋まきコムギに関しては対照区に比べて地下灌漑区の値が 0.2～0.4 ポイントと若干低かった。ダイズは根粒菌により窒素固定が可能であるため，総重や子実重の増加に伴い窒素固定量が増え，窒素吸収量が増加したものと考えられるが，コムギについては灌漑などで子実重が増加した場合，子実タンパク質含有率の低下が懸念される。この点に関しては，通常の営農管理で実施されている，低タンパクが懸念される圃場への止葉期以降の生育診断による施肥対応（北海道米麦改良協会，2019）で対応可能である。なお表 3-2-2 に示しているモデル試験の結果では，地下灌漑区の子実タンパク質含有率が対照区よりも高い。その理由として，対照区では止葉期以降に極度の水不足となり，根が土壌中の水分や窒素吸収を行うことができなかったこと（Tsukamoto et al., 2017）が考えられる。

本研究では，地表下 30 cm 位置に水位を設定し，設定水位到達後は暗渠出口を開放して排水する方法で地下灌漑を行った。地下灌漑の方法や特徴については，農水省構造改善局が平成 2 年に「地下かんがいの手引き」（農水省　構造改善局計画部資源課，1990）としてまとめており，作土層までの水位上昇を前提としている。作土層には多くの根が存在するため，作土層までの地下灌漑は確実に作物へ水分供給ができる。しかし作土層まで浸潤させると，地下灌漑期間中に農作業機械の走行ができず，防除や除草などの営農管理の調整が必要になるとともに，地表面に滞水部が生じると，土壌病害の蔓延や作物体が濡れることによる病気の発生が懸念される。Hasegawa and Sato（1987）は，圃場による調査と数値モデルを用いて亀裂に伸長した根からの吸水量を定量的に解析し，亀裂沿いに伸長した根からの吸水が作物の水消費に大きく寄与していることを明らかにしており，圃場調査時における同様の傾向を高橋ら（1991）や福本ら（1992）も指摘している。本研究においても，地表下 30 cm までの水位上昇により，ダイズでは 30 cm 深，秋まきコムギでは 40 cm 深のマトリックポテンシャルは正圧まで上昇し，その後速やかに負圧に転じ，再び-31 kPa 以下まで低下している（図 3-2-4）。この現象から，作物根が作土下に供給した水を利用していることがわかる。

以上のことから，ダイズ，秋まきコムギの吸水量が多い時期に寡雨となり土壌が乾燥した時に，集中管理孔を利用した地下灌漑により作土下に水分供給を行うことは，生育収量の向上，安定化に有効であることがわかった。

表 3-2-3　地下灌漑がダイズならびに秋まきコムギの生育収量に与える影響

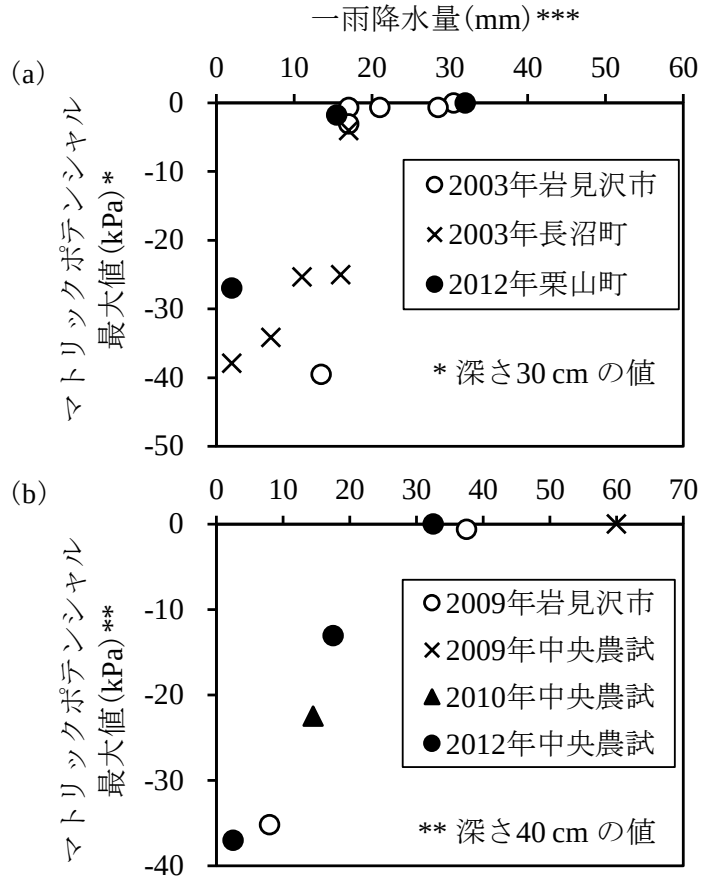
栽培作物	試験年（収穫年）	調査圃場	土壌型	処理区	総重 ($g \cdot m^{-2}$)	子実重[1] ($g \cdot m^{-2}$)	収量比[2]	子実タンパク質含有率 (%)
ダイズ[3]	2011	長沼町	灰色低地土	地下灌漑	552 ± 23.5	309 ± 11.5	110	41.9 ± 0.22
				対照	521 ± 33.5	282 ± 29.8		41.6 ± 0.26
			グライ低地土	地下灌漑	858 ± 18.5	503 ± 9.9	114	42.8 ± 0.12
				対照	829 ± 0.9	441 ± 8.0		42.7 ± 0.10
		中央農試	灰色低地土	地下灌漑	841 ± 12.7	403 ± 8.2	128	40.0 ± 0.21
				対照	809 ± 27.4	316 ± 10.7		40.0 ± 0.39
	2012	栗山町	褐色森林土	地下灌漑	672 ± 9.1	407 ± 4.6	129	40.3 ± 0.09
				対照	518 ± 12.4	315 ± 7.1		36.5 ± 0.20
秋まきコムギ	2012	長沼町	グライ低地土	地下灌漑	1,481 ± 100.8	620 ± 23.1	102	10.5 ± 0.12
				対照	1,479 ± 63.7	606 ± 56.5		10.9 ± 0.22
		中央農試	灰色低地土	地下灌漑	1,558 ± 173.2	718 ± 37.8	105	9.5 ± 0.10
				対照	1,271 ± 67.1	684 ± 40.9		9.7 ± 0.45

1）ダイズは水分15 %, 秋まきコムギは水分13.5 %換算値。
2）対照区に対する地下灌漑区の比率。
3）子実重について分散分析により処理区間に有意差あり（$p < 0.05$）。
4）表中の値は平均値 ± 標準誤差（$n = 3$）。

２）生育特性と降雨条件による地下灌漑判断手法の検討

（１）作物根域に十分な水分供給が行われる降水量

地下灌漑実施期間中における一雨降水量と，降雨後マトリックポテンシャルが上昇した際の最大値との関係を図 3-2-5 に示した。なお降雨前のマトリックポテンシャルは，地下灌漑を開始する値として設定した値である-31 kPa 以下とした。図 3-2-5 では，ダイズ，秋まきコムギともに一雨降水量がおおむね 20 mm 以上であると，マトリックポテンシャルが -1.0 kPa 以上の湿潤状態となる傾向を示していることから，20 mm 以上の一雨降水があった場合は，根域が湿潤状態になり，十分な水分が供給されていると考えられた。



*** 日単位で継続した期間に生じた総降水量

図 3-2-5　一雨降水量と降雨後のマトリックポテンシャル最大値との関係
（(a) ダイズ栽培圃場，(b) 秋まきコムギ栽培圃場）

（２）降水後ならびに地下灌漑後再び土壌が乾燥状態になるまでの日数

まとまった雨により，根域の土壌が-1.0 kPa 以上の十分な湿潤状態となった後，再び-31 kPa 以下の乾燥状態に至るまでの日数について，ダイズ栽培圃場ならびに秋まきコムギ栽培圃場において測定した結果を表 3-2-4 に示す。なお降雨後-31 kPa 以下の乾燥状態に至るまでの間に雨が降り，マトリックポテンシャルの値に変化が生じたデータは省いた。秋まきコムギでは，20 mm 以上の一雨降水量が生じた後，全ての調査圃場でマトリックポテンシャルが-31 kPa 以下となる前にマトリックポテンシャルの値に変化が生じる雨が降り，目的とするデータを得ることができなかったため，Tsukamoto et al.（2017）でのハイブリッド水路へ流水することによる灌漑を実施した際のデータを用いた。解析の結果，ダイズではグライ低地土，褐色低地土で 11 日，灰色低地土で 9 日とおおむね 10 日程度であり，秋まきコムギでは褐色森林土で 12 日，灰色低地土で 17 日と 5 日ほど土壌タイプにより異なった。

表 3-2-4　降雨後（ダイズ）または地表灌漑（秋まきコムギ）後に再び根域土壌が乾燥状態に至る日数

栽培作物	測定年 調査圃場	土壌型	降水量 灌水量[2)] (mm)	①降雨終了日時	②降雨後 -31 kPa 到達日時[3)]	②－① (d)
ダイズ	2003年 長沼町	グライ低地土	115	8/9 19:00	8/20 13:00	11
	2010年 中央農試	灰色低地土	65	8/12 3:00	8/21 14:00	9
	2012年 栗山町	褐色森林土	226	9/11 10:00	9/22 16:00	11
秋まきコムギ[1)]	2008年 奈井江町	褐色森林土	103	6/19 2:00	6/30 14:00	12
	2009年 中央農試	灰色低地土	105	6/3 19:00	6/20 16:00	17

1）Tsukamoto et al.（2017）での灌漑時の測定データを引用。
2）ダイズは一雨降水量，秋まきコムギは灌漑時灌水量。
3）ダイズは地表下30 cm，秋まきコムギは40 cm での測定値。

同様に，地下灌漑によるマトリックポテンシャルの上昇から，再び-31 kPa 以下の乾燥状態に至るまでの日数について，マトリックポテンシャルの観測結果から求めた結果を表 3-2-5 に示す。なお地下灌漑後-31 kPa 以下の乾燥状態に至るまでの間に雨が降り，マトリックポテンシャルの値に変化が生じたデータは省いた。その結果，土壌タイプによる大きな違いはみられず，ダイズで 4～6 日程度であり，秋まきコムギでは 4～7 日程度であった。

表 3-2-5　地下灌漑後再び根域土壌が乾燥状態に至る日数

栽培作物	測定年 調査圃場	土壌型（データ数）	地下灌漑後-31 kPa 到達日数[1)] (d)		
			平均値	最大値	最小値
ダイズ	2011年 中央農試	灰色低地土（n = 3）	5	6	4
	2012年 栗山町	褐色森林土（n = 2）	5	5	4
秋まきコムギ	2012年 長沼町	グライ低地土（n = 2）	5	6	4
	2012年 中央農試	灰色低地土（n = 2）	6	7	5

1）ダイズは地表下30 cm，秋まきコムギは40 cmでの測定値。

（３）ダイズ，秋まきコムギに対する降雨条件による地下灌漑判断手法

以上の結果を元に，北海道におけるダイズ，秋まきコムギに対して降雨条件による地下灌漑判断手法を設定する。

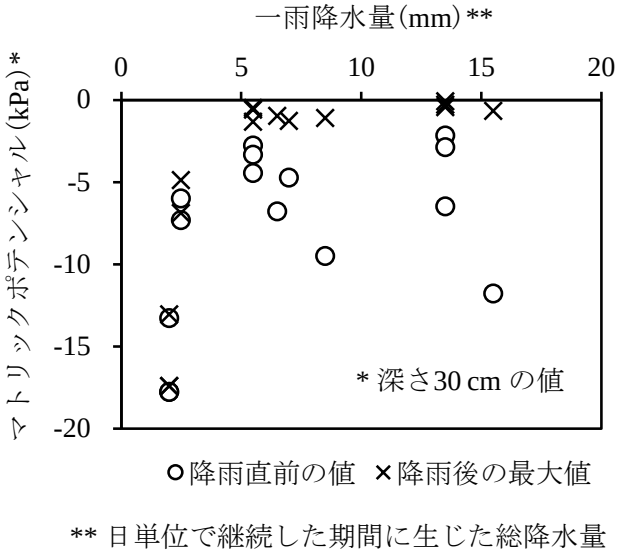
地下灌漑実施期間は，ダイズ，秋まきコムギそれぞれの水分要求量が高まる時期と，北海道における水田用水の使用期間を考慮して，ダイズは開花期に該当する 7 月中旬から用水停止時期である 8 月末まで，秋まきコムギは穂ばらみ期に該当する 6 月初めから 6 月末までとした。

次に，①地下灌漑実施期間中に，初めて地下灌漑を実施する際の要否を判断するための降雨条件（十分な降雨のない日が何日続けば地下灌漑を実施するか），ならびに②地下灌漑実施後，再度灌漑実施の要否を判断するまでの日数（地下灌漑実施後，十分な降雨のない日が何日続けば再度実施の要否を判断するか）の設定を行う。日数の設定に関しては，地下灌漑を実施する農家の利便性を考慮して，なるべく区切りの良い日数に設定した。

①は，根域土壌が-31 kPa 以下の乾燥した条件下で，根域に十分な水分供給が行われる一雨降水量は図 3-2-5 より 20 mm 以上であった。20 mm 以上の降雨後，根域の土壌が再び -31 kPa 以下の乾燥状態に至るまでの日数は，ダイズで 9～11 日とおおむね 10 日程度であった。そのため，ダイズに対して地下灌漑実施を判断する降雨の条件は，20 mm 以上の一雨降水が 10 日以上ない場合とした。秋まきコムギは 12～17 日と若干の幅が認められたが日数を 15 日とした。いずれも観測事例数が少ないため，今後さらに事例を積み重ねて精査する必要があるが，おおむねの傾向は捉えているものと考える。

本試験で示した集中管理孔を用いた地下灌漑は，深さ 30～40 cm のマトリックポテンシャルの値が-31 kPa まで乾燥した場合に水分供給を行うこととしていることから，作土の土壌水分は測定深度の値以上に乾燥していると予想される。秋まきコムギを栽培した灰色低地土の圃場では，20 mm 以上の灌水後，深さ 40 cm のマトリックポテンシャルが再び -31 kPa 以下の乾燥状態に至る日数は 17 日であり（表 3-2-4），15 日経過時のマトリックポテンシャルは-20 kPa（pF 2.3）以下であった。このため，20 mm 以上の一雨降水の後，15 日後に地下灌漑を実施しても，過湿による生育阻害のリスクは小さいと推察される。

20 mm 以上の一雨降水の後，根域土壌が-31 kPa 以下になる前に生じた 20 mm 未満の降雨による影響について，2011 年中央農試と 2012 年栗山町におけるダイズ栽培圃場での観測結果を図 3-2-6 に示す。5 mm 以上の降雨があった後のマトリックポテンシャルは，概ね -1.0 kPa 以上に上昇する傾向を示した。秋まきコムギに関しても同様のことが想定されるため，20 mm 以上の一雨降水があった後，ダイズでは 10 日，秋まきコムギでは 15 日経過する前に 5 mm 以上の雨が生じた場合は，降雨後からダイズでは 10 日，秋まきコムギでは 15 日経過した後を地下灌漑実施日とした。



** 日単位で継続した期間に生じた総降水量

図 3-2-6　一雨降水量が 20 mm 以上発生後，根域土壌が-31kPa に達する前に生じた 20 mm 未満の降水量とマトリックポテンシャルとの関係

なお，地下灌漑実施を判断する際の翌日以降の降雨について，農家が手軽に取得できる情報は天気予報であるが，現状では詳細な降水量を把握するのは難しい。天気予報で示される情報は，主に傘マークなどによる雨の強弱と降雨が継続する時間の予想である。図 3-2-5 より，20 mm 以上の一雨降水は，作土が十分に湿るような降雨であることから，地下灌漑の実施を判断する際の翌日以降の降雨条件は，天気予報で 1 週間以内に傘マークが一日中付いている，強い雨マークが付いているなどの予報が見られず，まとまった降雨が期待できない場合とした。

②は，ダイズで 4～6 日程度であり，秋まきコムギでは 4～7 日程度であったことから，地下灌漑実施後はダイズ，秋まきコムギともに 1 週間（7 日）以上経過すると，再び根域の土壌が乾燥状態になっていると考えられる。そのため，地下灌漑実施後に再度灌漑実施の要否を判断するまでの日数は，ダイズ，秋まきコムギともに 7 日経過後とした。

なお地下灌漑実施後 7 日以内に生じた 20 mm 未満の降雨の影響について，事例が少なく詳細な解析は未検討であるが，前述同様，降雨によるマトリックポテンシャルの低下が考えられる。そのため 5 mm 以上の雨が生じた場合は，降雨後から 7 日経過した後に地下灌漑実施の要否を判断することとした。

これまでの結果から，ダイズ，秋まきコムギに対して地下灌漑を実施する際の降雨条件による判断方法を表 3-2-6 にまとめた。

ダイズでは，開花期に該当する 7 月中旬から用水停止時期である 8 月末まで期間，秋まきコムギでは，穂ばらみ期に該当する 6 月初めから 6 月末までの期間を地下灌漑実施期間とする。この期間中，ダイズでは過去 10 日以上，秋まきコムギでは過去 15 日以上，一雨降水量が 20 mm 以上となる降雨がない日を灌漑を実施する予定日とし，予定日以降，天気予報で 1 週間以内にまとまった降雨が期待できない場合に地下灌漑を実施する（表 3-2-6 での判断手順①）。

地下灌漑実施後は，20 mm 以上の一雨降水が 7 日以上ない日を再度地下灌漑を実施する予定日とし，その日以降，天気予報で 1 週間以内にまとまった降雨が期待できない場合に再度地下灌漑を実施する（表 3-2-6 での判断手順②）。地下灌漑実施後 7 日以内に 20 mm 以上の一雨降水が生じた場合には最初の判断方法（表 3-2-6 での判断手順①）に戻り，ダイズでは 10 日以上，秋まきコムギでは 15 日以上，一雨降水量が 20 mm 以上となる降雨がなく，かつ予報で 1 週間以内にまとまった降雨が期待できない場合に地下灌漑を実施する。

表 3-2-6　ダイズ，秋まきコムギに対する降雨条件による地下灌漑判断手法

作物	地下灌漑実施期間	地下灌漑実施判断方法[1)]	
		判断手順① （初めて地下灌漑を実施する際ならびに地下灌漑後7日以内に20 mm以上の一雨降水が生じた場合）	判断手順② （再度灌漑の要否を判断する際の降雨条件）
ダイズ	7月中旬 （開花期） ～8月末	20 mm以上の一雨降水が10日以上ない日を灌漑予定日とし，予定日以降天気予報で1週間以内にまとまった降雨[2)]が期待できない場合に実施する。	灌漑後，20 mm以上の一雨降水が7日以上ない日を再灌漑予定日とし，予定日以降天気予報で1週間以内にまとまった降雨[2)]が期待できない場合に実施する。 灌漑後7日以内に20 mm以上の一雨降水が生じた場合は判断手順①に戻る。
秋まきコムギ	6月初め （穂ばらみ期） ～6月末	20 mm以上の一雨降水が15日以上ない日を灌漑予定日とし，かつ天気予報で1週間以内にまとまった降雨[2)]が期待できない場合に実施する。	

1）一雨降水量で 20 mm以上生じた後，ならびに地下灌漑実施後，所定の判断日数以内に5 mm以上の降雨が生じた場合は，降雨後からの所定の日数経過後とする。

2）まとまった降雨とは天気予報で傘マークが一日中付いている，強い雨マークが付いているなどの状況を示す。

第３節　要　約

水田での高生産畑作のための水環境制御技術として，主要な転作作物である秋まきコムギを栽培する転換畑を対象に，土壌が湿潤時の排水促進と乾燥時の灌漑を兼ねるハイブリッド水路を考案し，その施工方法と施工効果を明らかにした。

ハイブリッド水路は，排水対策として農家が使用している溝掘機を用いて，幅，深さともに 30 cm 程度の溝を圃場内の畦畔沿いならびに長辺方向に形成する。施工時期は秋まきコムギ播種直後が適しており，溝の間隔は 15 m 以内が適していた。ハイブリッド水路の施工により，秋から春にかけての湿潤な時期に排水が促進され，地温が高まり秋まきコムギの生育が良好になった。

また秋まきコムギの吸水量が多く寡雨傾向にある 6 月に，地表下 40 cm 位置のマトリックポテンシャルが-31 kPa 以下になった時点でハイブリッド水路を利用した灌漑を行った。灌漑期間に降雨を遮断した試験における灌漑区の子実重は，灌漑未実施の対照区との比で 110 %程度となり，子実タンパク質含有率は対照区より 1 ポイント以上高かった。排水促進と灌漑を組み合わせた現地実証試験では，ハイブリッド水路による排水と灌漑により，子実重が対照区比で 107～129 %と高く，排水促進のみでも 103～106 %であった。溝の形成による秋まきコムギ栽培面積の損失は排水促進による増収率より低く，溝形成のコスト面からみても，ハイブリッド水路は転換畑における秋まきコムギの生育収量の向上に有効な技術であった。

次に，道内の水田圃場に設置されている暗渠清掃用施設「集中管理孔」を，転作作物への地下灌漑として利用する技術を検討するため，ダイズ，秋まきコムギへ地下灌漑を行いその効果を検証するとともに，地下灌漑実施の要否の判断として，農家が利用しやすい降雨条件による判断手法の検討を行った。

ダイズ，秋まきコムギの吸水量が多い時期に主要根域（ダイズは 30 cm，秋まきコムギは 40 cm）のマトリックポテンシャルが-31 kPa 以下になった時点で，設定水位を地表下 30 cm にし，設定水位到達から 1 日後に暗渠出口を開放して排水する方法で地下灌漑を行った。灌漑期間に降雨を遮断した試験における地下灌漑区の子実重について，ダイズは灌漑未実施の対照区比で 164 %，秋まきコムギで 122 %となり，現地実証試験でも，ダイズで 110～129 %，秋まきコムギで 102～105 %となった。これらの結果から，両作物ともに水不足となりやすい時期に集中管理孔を利用した地下灌漑を行うことの有効性が認められた。

またマトリックポテンシャルの観測データを用いて，降雨後や地下灌漑後に再び主要根域のマトリックポテンシャルが-31 kPa 以下の乾燥状態に至るまでの日数を算出した。その結果を用いて，ダイズでは，開花期に該当する 7 月中旬から用水停止時期である 8 月末までの間に 10 日以上，秋まきコムギでは，穂ばらみ期に該当する 6 月初めから 6 月末までの間に 15 日以上，一雨降水量が 20 mm 以上となる降雨がない場合に地下灌漑を実施するという判断手法を示した。

第４章　総　合　考　察

第１節　水田における高生産な畑作栽培に向けた土壌環境制御

本研究ではまず，水田において依然として問題となっている不良な土壌物理性による畑作物の低い生産性を改善するため，作物の生育収量を制限する土壌物理性の要因を定量評価し，要因に沿った対策を講じるための改善指標値の設定を試みた。改善指標に用いる測定法は，営農者や農業技術指導者が自ら行い，判断できる方法として検討した。検討は，代表的な転作作物であるダイズを用いて，収量構成要素である出芽から苗立ちと，苗立ち以降の生育期間に分けて実施した。

出芽から苗立ち時に，ダイズに影響を及ぼす土壌物理性の代表的な要因として取り上げた，土壌クラストの硬化とダイズの出芽との関係では，土壌クラストの硬化に伴い明らかな出芽抑制が認められた。クラスト硬度計値が 10 mm（0.35 MPa）以上では出芽率が 60 % を下回る結果となり，種子の発芽を妨げる土壌クラストの硬さは，クラスト硬度計値で概ね 10 mm 以上であった。このことから，播種後に形成した土壌クラストの硬度を市販のクラスト硬度計を用いて測定することで，ダイズの出芽への影響程度をその場で把握することが可能となる。また，粒径組成や土壌中の有機物含量との関係も明らかになったことから，土壌クラストの生じやすい土壌を事前に把握することもできる。

土壌クラストにより硬化した表層への対策は，ソイルクラストクラッシャによる物理的な破砕（北海道農政部，2007）があるが，安定的な出芽，苗立ちを得るためには，播種した種子近傍の土壌が出芽を妨げないような状態であることが望ましい。土壌クラスト形成を回避する手法としては，砂質土の客土（岩間・石井，1974；竹内・大山，1994；横井，2006）や，種子直上への砂質土の投入が可能な播種機利用（竹中，1994）などといった，種子近傍の粒径組成を変える方法が挙げられ，これらは即効的で持続性も高い。しかしながら客土はコストが高く，生産者が自ら行うには困難な面がある。

一方，本研究では，土壌クラストによる硬化により出芽阻害が生じやすい土壌においても，植物遺体などの粗大有機物を含めた有機物含量を高めることで，出芽への影響を軽減できることが示唆された。土壌中への有機物の施用は，バーク堆肥，モミガラ堆肥などの C/N 比が高めの堆肥や麦稈，泥炭，高 C/N 比の緑肥など土壌への炭素集積の高い繊維質的なものが望ましいと考えられる。これらの施用により，団粒形成の促進や孔隙量の増加を促して土壌物理性を改善することが報告されており（橋本，1994；北川ら，2001；北海道農政部，2011），土壌クラストによる土壌の硬化を低減することが可能と思われる。水田地帯では堆肥の入手が困難である場合が多いことから，緑肥，ならびに稲わら，麦稈といった圃場副産物の利用が生産者の実施しやすい取組みとなろう。転換畑では主にダイズ－秋まきコムギの交互作が行われているが，秋まきコムギ収穫後の 8 月上旬から 10 月にかけて，緑肥を栽培して土壌物理性を改善する取組みが行われている（北海道農政部，2011）。圃場副産物の利用に関しては，前作の麦稈を浅耕により作土浅くにすき込む方法（中央農業総合研究センター，2005）や，地表面の麦稈被覆により土壌クラストを回避する技術（糸川ら，1989；Singh, 2009）が府県で開発されているが，1 年 1 作である北海道において，作

付体系上ダイズ播種時の麦稈利用は困難である。今後は粘質な作土を有する圃場での，地域における有機物供給の実態や栽培体系を考慮した，有機物の利用による新たな畑作物の出芽向上技術について開発する余地があると言える。

ダイズの苗立ち以降の生育を制限する土壌物理性の要因に関しては，土壌の浸透能に着目して検討した。現場透水試験である，シリンダーインテークレート法による I_b が 100 mm･h^{-1} 未満では，子実収量が 300 g･m^{-2} を下回り，I_b を 100 mm･h^{-1} 未満に低下させる要因は，影響度が大きい順に，無構造出現深 38 cm 未満，飽和透水係数 10^{-5} cm･s^{-1} 未満，乾燥密度 1.24 Mg･m^{-3} 以上，粗孔隙量 0.04 m^3･m^{-3} 未満となった。これらの結果から，土壌構造が未発達で亀裂や孔隙の少ない環境が I_b を 100 mm･h^{-1} 未満に低下させ，ダイズの生育収量を低下させる要因であることがわかり，シリンダーインテークレート法による I_b が土壌物理環境の指標値となり得ることが明らかになった。

これまで現場の普及指導員や営農指導者は，転作作物を栽培する際に，作物生育に問題ない土壌物理環境であるかを把握するための簡易な手法がなく，専門家による土壌断面調査，ならびに採取試料による室内結果との総合判断で実施されてきた。シリンダーインテークレート法は，土壌断面を掘削することなく比較的簡易にその場で測定できるため，改善指標値と比較して改善の必要性を判断することが可能となる。また解析の結果，転換畑でのダイズの良好な生育には，十分な作土厚の確保以上に地表下 40 cm 深程度まで亀裂や孔隙を形成させ，土壌構造を発達させる必要があることがわかった。これにより，不良な土壌物理環境改善のための具体的な対策を行うことが可能になった。本研究結果はダイズに対する解析結果であるが，福中（1980）は重粘土牧草圃場において，心土破砕の施工間隔や深度を変えた処理による土壌物理性や作物生育への影響について調査し，施工深度は 40 cm で十分であることを述べている。このことからも，本研究で明らかになった結果はダイズ以外の畑作物に対しても適用可能と考える。

水田土壌構造下において作土下に亀裂や孔隙を形成させる手段としては，地下排水を促進させて土壌中の余剰水を圃場外に排出できる状態にし，余剰水が排除された上で心土破砕を行うことが効果的である。さらに，作物根の水分吸収は多くの小さな亀裂を発生させ，根からの浸出液や根の腐朽により土壌微生物の活動が活発化し，腐植接着剤を生産する（ヒレル，2001）。そのため深根性の緑肥や作物を栽培する方法（伊藤ら，1992；佐藤ら，2007；北海道農政部，2011），作土下に堆肥や有機物を混和，埋設する方法（北川，2001；北川ら，2017）も作土下の土壌構造の発達に寄与する。これらの具体的な方法は，これまで全国の研究機関で研究開発されてきた，転換畑の排水改良や土壌物理性の改良に関する技術で対応できる。

地下排水を促進させるためには，圃場外に排水路や疎水材を使用した暗渠排水の整備が前提となるが，弾丸暗渠や近年開発された穿孔暗渠（北川ら，2017），有材補助暗渠を用いた組み合わせ暗渠（根岸，1981）が有効である。組み合わせ暗渠により土壌中の余剰水が排除された状態で，心土破砕を行い，緻密化した土壌を破砕し亀裂や孔隙を形成させる。その施工深さは本研究結果から 40 cm 深までは必要であるが，現在市販されているサブソイラなどの農作業用の心土破砕機で十分到達可能な深さである。

施工幅については，作物の根域に亀裂や孔隙が存在することが望ましく，作土下の緻密化した土壌が全体的に破砕される必要がある。サブソイラやパンブレーカを用いた心土破

砕により形成される亀裂の範囲は，破砕刃を中心に 1 m 以内であることが多く（福中，1980；永石・原口，1986），土層改良計画の考え方においても，全層破砕を重視する場合は 0.7～1.0 m 程度とするのが一般的と述べている（内山，1983）。近年では，低馬力トラクタでもけん引可能な破砕刃が 2～3 本装着されたサブソイラや，破砕効果の高い全層心土破砕機（農研機構　農村工学研究部門，2020；塚本ら，2020 a）が販売されていることから，農家が自ら地表下 40 cm 深さ程度までの土壌物理性を改良することは十分可能である。

なお，圃場内に亀裂や孔隙を形成させる対策を行ったとしても，周囲からの余剰水の流入や排水路，暗渠出口の閉塞など排水機能が不良な場合は改善効果が発揮されない。圃場内に流入する余剰水を排除するための排水溝の形成による地表排水の促進や，暗渠排水，排水路の維持管理も生産性を高めるための重要な手段である。

有機物の利用技術に関しては，佐藤ら（2007）がダイズの前作に緑肥として越冬性のヘアリーベッチを植栽することによる土壌物理性の改善とダイズの生育向上効果を示している。また道央転換畑地帯の栽培体系において，秋まきコムギ収穫後の 8 月から秋季の 10 月にかけて，後作緑肥として緑肥を栽培し，すき込むことで作土，作土下の土壌物理性改善とダイズの生産性を高める方法（北海道農政部，2011）や，農家が自ら堆肥や有機物を作土下 60 cm ほどの深さまで縦溝状に埋設できる機械が開発されている（北川ら，2017）。土壌中への有機物の施用は団粒の安定化，土粒子間の密な充填・結合の抑制効果など土壌クラストによる出芽阻害の低減にもつながる。

以上のことから，水田土壌構造下において畑作物の生産性を高めるためには，土壌への有機物施用による有機物含量を高めることと，作土下 40 cm ほどまで亀裂や孔隙を形成させて土壌構造を発達させることが重要であることが本研究により明らかになった。本研究で提示した指標値を用いて圃場の状態を確認し，上述の対策を行うことで，畑作物の栽培に適した土壌物理環境を創出でき，低収からの脱却が可能になると考える。

第２節　水田の高生産な畑作栽培に向けた水環境制御技術の開発

水田土壌が有する干湿害の生じやすい環境や，近年の多雨と干天が頻発しやすい気象条件において，畑作物の高い生産性を実現するには，排水と灌漑を兼ねた圃場を創出する必要がある。その際には，農家が取り組みやすいよう，新たな灌漑施設を導入せずに，既存の水田の用排水施設を有効利用した技術として示すことが望まれる。本研究では，既存の用排水施設を利用した水環境制御技術として，農家が営農管理で使用する溝掘機を用いて，圃場内に排水と灌漑を兼ねた溝を形成するハイブリッド水路による灌漑排水技術，ならびに道内に普及している暗渠清掃用の施設「集中管理孔」を利用した地下灌漑技術を開発した。集中管理孔は，暗渠管内に堆積した泥土などを洗浄することができ，暗渠の排水機能の回復，維持に役立つ。そのため集中管理孔を地下灌漑として利用することで，排水と灌漑を兼備した技術になる。

地下灌漑技術では，灌漑実施の要否判断を，農家が利用しやすいよう土壌水分計などの測定機器を使用せず降雨条件のみで行う方法としたが，本判断方法はハイブリッド水路による灌漑の判断にも使用可能である。すなわち，表 3-2-6 で示した地下灌漑実施時期と，

実施を判断する降雨条件をそのまま適用し，再度実施の要否を判断するまでの日数は，実施を判断する降雨条件と同一とすれば良い。本判断方法は降雨のみを参照していることから，農家が自ら所有圃場周辺の気象情報を携帯端末などで確認することで判断が可能となる。さらに今後は，灌漑実施の要否を自動で判断できるアプリを開発するなどして，農家が簡単に把握できれば，水田地帯での畑作物に対する灌漑技術の普及促進が図られる。

これら 2 つの水環境制御技術の特徴として，ハイブリッド水路による灌漑は，地表面への入水であるため，地表面並びに作物体が濡れる。営農管理や土壌病害の点から，地下灌漑は農家が利用しやすく，より普及させやすい技術と考える。しかしながら 2018 年度現在において，集中管理孔が設置された圃場は，北海道内の全水田面積 221,900 ha の 8 %ほどと依然として少ない（塚本ら，2020 a）。そのためハイブリッド水路は集中管理孔などの地下水位制御施設を有しない圃場で実施可能な水環境制御技術として位置づける。このことで，圃場の整備状況に合わせた水環境制御技術として普及を推進できる。

どちらの水環境制御技術も圃場内に水が行き渡った後は，その状態を維持せず速やかに排水する方法とした。これは湿潤状態を維持することによる土壌の還元化に伴う土壌物理性，ならびに作物への負の影響を回避するためである。また，灌漑後の速やかな排水を行うために作土下に亀裂や孔隙を形成させ,迅速な排水が可能な圃場状態にする必要がある。ハイブリッド水路の排水機能は地表排水であるため，地下排水機能である組み合わせ暗渠の整備や心土破砕は灌漑実施前の前提条件となる。集中管理孔による地下灌漑も同様で，暗渠管の清掃により暗渠管自体の排水機能の維持，改善は図られるが，粘質な圃場では，地下灌漑時に暗渠渠間部への水移動が困難である場合が多い。このような圃場に対しては組み合わせ暗渠により，排水促進と地下灌漑時における暗渠渠間部の速やかな水位上昇を得ることができる（塚本ら，2020 a）。

また本研究で示した地下灌漑の方法は，作土まで水位を上昇させず，地表下 30 cm の位置とした。そのため地下灌漑により供給した水を作物根が利用できるよう，あらかじめ作土下に亀裂や孔隙を形成させ，作物の根が作土下に伸長している状態が求められ，本章第 1 節で述べた土壌物理環境の創出が事前に必要となる。すなわち，作土下の土壌構造を発達させ，作物根の伸長と排水を促進する土壌物理環境を作る（低収を改善，多雨への対応）ことが前提条件であり，このような土壌物理環境が創出された状態において，寡雨への対応としての灌漑の効果が発揮される。粘質な水田土壌環境下において高生産な畑作物を安定的に栽培するためには，まずは排水性と保水性の高い圃場づくりを進めていくことが望ましい方向性と考える。しかしながら，作土下の有効水分量が高まるような土壌が形成されるまでには相当の時間を要するため，排水と灌漑を併用した技術による対応が必要となる。

本研究における灌漑の利用目的は，作物の生育を制限するような気象や土壌水分環境になる時に水分供給を行い，生産性の低下を抑えることとした。特に地下灌漑では設定水位を地表下 30cm にしているため，地下灌漑により作土が湿潤状態になることはない。そのため作物の生育過程において，常に作土を適水分に維持して収量ポテンシャルを高める灌漑や，地表面に施肥した肥料の作物への吸収を促進するための灌漑方法とは異なる。北海道の水田地帯では，5 月から 6 月にかけて寡雨傾向にあり（表 1-1-4），この時期はダイズの播種やタマネギの定植時期に該当するため,寡雨による出芽不良や活着不良が散発する。

作土まで湿潤させるような地下灌漑は，出芽や苗立ち，苗の活着促進に寄与する技術にもなり得るが，灌漑に要する時間や圃場の均平度，漏水や地耐力の問題など検討すべき内容が多い。これらの点において，転換畑での灌漑技術はさらなる検討が必要であろう。

その他の灌漑に関する前提条件として，水を溜めることのできる圃場である必要がある。「地下かんがいの手引き」（農水省，1990）では，地下灌漑の適用条件として，暗渠管の埋設深より下の土層が緻密で透水性の低いことを挙げており，原口・若杉（2016）は，暗渠管埋設深の飽和透水係数が 1×10^{-5} cm･s^{-1} 以上では地下灌漑困難であることを示している。暗渠管の埋設深以浅の土壌に関しても，圃場外に流出するような透水性の大きな砂礫層が存在しないことが必要で，圃場の法面や旧暗渠から漏水が生じないことも前提条件となる。原口らが示している暗渠管埋設深の透水性が良好な圃場への対応は困難であるが，その他の灌漑困難な条件は，圃場整備時に旧暗渠の閉塞と圃場内への遮水シートの埋設で対応可能と考える。漏水による浸透損失を防ぐことで適用効率が高まり，過大な水の損失を生じることなく灌漑を行うことができる。

なお本研究では，灌漑を行うことによる適用効率に関する検討は行っていない。本研究で実施した地下灌漑時の灌水量は，概算となるが 30～60 mm であり，ハイブリッド水路による地表灌漑（70～110 mm）の半分程度であった。灌水量に関して，慣行の地表灌漑よりも地下灌漑の方が小さいとする報文（原口・若杉 2016）もあるが，灌漑方法や土壌水分，土壌中の亀裂の状態や漏水の程度で大きく変わることが想定される。水稲栽培時では，最も多く使用する代かき時で 100 mm 程度の水を使用している（長谷川, 1995 ; 阿南ら, 2006）が，転換畑での畦間灌漑で 100 mm 程度（例えば，千家ら，2001），ハイブリッド水路でも同程度，地下灌漑の報告でも総用水量で 400～600 mm ほど使用されており（原口・若杉，2016），畑で消費する灌漑水量は水田用水量に比べて決して無視できる量ではない。

年間降水量の少ない乾燥地域に比べて，日本の水田地帯では豊富な水資源という意識が強く，潤沢な水を灌漑に利用してきた。しかしながら水田の用水利用の現状は，農業人口の高齢化と人口減少に伴う圃場の大区画化，省力化を背景に，水稲直播栽培や無代かき移植栽培といった水稲の無代かき栽培が広がり始めている。無代かき栽培はこれまでの代かき栽培に比べて用水量が増大し（坂田ら，2001 ; 李ら，2003），加えて畑作物への灌漑利用が広がると，水稲栽培時との競合による用水供給不足が懸念される。さらに気候変動による温暖化が進むと，灌漑施設では渇水の頻度が高まることが指摘されている（伊藤ら，2015）ことからも，水田地帯における水稲や畑作物の灌漑効率を定量化するとともに，灌漑効率を高める灌漑方法や，気候変動に対応した用水量の管理に関する更なる検討が今後の課題として残されている。

以上，本研究では，水田土壌環境下において畑作物の生産性を高めるために必要な土壌物理性の状態を，作物生産を制限する土壌物理性の要因を解析することで明らかにした。また，土壌物理性の改善指標値を設定するとともに，簡易な土壌物理性の評価法を示した。さらに，干湿害の生じやすい気象条件ならびに水田土壌環境下において，水田の用排水施設を利用した灌漑排水技術を圃場の整備状況に応じ，農家が利用しやすい技術として開発することにより，水田における高生産畑作のための土壌・水環境制御技術として確立した。

第５章　要　約

我が国では，水田への畑作物や園芸作物導入による高収益な農業を推進することが急務である。しかしながら，依然として排水不良による湿害の発生など土壌物理性に起因するコムギやダイズの低収や，野菜導入の困難性を打破できずにいる。そのため，畑作物の不良な土壌物理性による低収からの脱却が必要であり，水田の抜本的な土壌・水環境の改善とその制御技術の確立が望まれている。

これまで本州で実施されている，短期の田畑輪換による復田を前提とした水稲作中心の技術では，畑作物に適した土壌物理環境の創出に限界がある。そのため今後は，北海道で推進している永久転換を含めた中長期の畑輪作を前提に，まずは作物生産を制限する土壌物理性の要因を解明し，生産性を向上するための改善指標値として提示する必要がある。この指標値を用いて，おおむね確立されている土壌物理性改良や排水改良の技術を行うことで,水田における畑作物の栽培に適した土壌物理環境の創出と技術の普及が可能となる。

また，水田での畑作物生産を畑作地帯の水準まで高めるためには，水田地帯特有の干湿害の受けやすい土壌や気象条件，さらには近年の多雨と干天の両極端化が懸念される気候変動に対応できるよう，水田の用排水施設を有効利用した水環境制御技術が求められる。その際には，新たな灌漑施設を導入せずに既存の用排水施設を有効利用し，農家が利用しやすい方法として技術開発する必要がある。

そこで本研究では，北海道を事例に，水田土壌環境下において畑作物の生産性を高めるための土壌物理性の改善指標値を設定するとともに，干湿害の生じやすい土壌や気象条件下において，高生産な畑作栽培を実現する灌漑排水技術を開発することを目的とした。

得られた結果は以下のとおりである。

１．水田の高生産な畑作栽培に向けた土壌物理性改善指標の設定

代表的な転作作物であるダイズを用いて，水田土壌で畑作物を生産する際に不良な土壌物理性が作物に与える影響程度を明らかにし，その改善指標値や簡易な評価法を示した。

１）ダイズの出芽，苗立ちに影響を与える土壌物理性の要因として，土壌クラストに着目した。土壌クラストによる土壌の硬化がダイズの出芽に与える影響に関して，クラスト硬度計による土壌硬度が 10 mm 以上ではダイズの出芽率が 60 %を下回り，出芽を阻害することを明らかにした。また土壌の性質として，粘土含量が 0.20 kg･kg^{-1} 以上，シルト含量では 0.30 kg･kg^{-1} 以上，砂含量では 0.50 kg･kg^{-1} 未満になるとクラスト硬度計値が 10 mm 以上となる土壌が多くみられたが，そのような土壌においても強熱減量が 0.13 kg･kg^{-1} 以上，全炭素含量 0.06 kg･kg^{-1} 以上であるとクラスト硬度計値が全て 10 mm 未満となった。

これらのことから，ダイズの良好な出芽，苗立ちを得るための土壌物理性の改善指標値は，クラスト硬度計値で 10 mm 未満とした。また，土壌クラストによる出芽抑制を受ける可能性の高い土壌条件は，砂含量が 0.50 kg･kg^{-1} 未満でかつ強熱減量が 0.13 kg･kg^{-1} 未満，全炭素含量 0.06 kg･kg^{-1} 未満であるのとともに，粗大有機物を含めた土壌中の有機物含量を高めることで，土壌クラストを軽減する可能性が示唆された。

２）ダイズの苗立ち以降の生育を制限する土壌物理性の要因として土壌の浸透能に着目した。粘質な転換畑で土壌理化学性の現地実態調査を行い，シリンダーインテークレート法による基準浸入能 I_b とダイズの生育収量，ならびに土壌物理性や土壌断面の状態との関係を解析した。実態調査の結果，転換畑の土壌は作土が薄く，土壌物理性の不良な土層が作土下の浅い位置から出現する傾向が認められた。また，I_b が 100 mm･h^{-1} 未満では，子実収量が 300 g･m^{-2} を下回り，I_b を 100 mm･h^{-1} 未満に低下させる要因は影響度が大きい順に，無構造出現深 38 cm 未満，飽和透水係数 10^{-5} cm･s^{-1} 未満，乾燥密度 1.24 Mg･m^{-3} 以上，粗孔隙量 0.04 m^3･m^{-3} 未満となった。この結果から，土壌構造が未発達で亀裂や孔隙の少ない環境が，I_b を 100 mm･h^{-1} 未満に低下させ，ダイズの生育収量を低下させる要因であることが明らかになり，転換畑でのダイズの良好な生育には，十分な作土厚の確保以上に地表下 40 cm 深程度まで亀裂や孔隙を形成させ，土壌構造を発達させることが必要であった。

これらの結果より，転換畑での苗立ち以降の土壌物理性の評価法として，亀裂や孔隙の状態を反映しているシリンダーインテークレート法の I_b を用いることが有効で，土壌物理性の改善指標値は I_b が 100 mm･h^{-1} 以上とした。

２．水田の高生産な畑作栽培に向けた水環境制御技術の開発

水田地帯において新たな灌漑施設を導入せず，農家が利用しやすい水環境制御技術を開発するため，農家が営農管理で使用する溝掘機を用いて，圃場内に排水と灌漑を兼ねた溝を形成する技術であるハイブリッド水路，ならびに道内に普及している暗渠清掃用の施設「集中管理孔」を利用した地下灌漑技術を検討した。

１）秋まきコムギに対するハイブリッド水路の施工時期，施工間隔を検討した結果，播種直後に圃場内の畦畔沿い，ならびに長辺方向に幅，深さともに 30 cm 程度の溝を 15 m 以内の等間隔で形成することが適していた。ハイブリッド水路により秋から春にかけての湿潤な時期に排水が促進され，地温が高まり秋まきコムギの生育が良好になった。

また秋まきコムギの吸水量が多く寡雨傾向にある 6 月に，地表下 40 cm 位置のマトリックポテンシャルが-31 kPa 以下になった時点で，水田用水からハイブリッド水路に通水して灌漑を行った。灌漑期間に降雨を遮断した試験における灌漑区の子実重は，灌漑未実施の対照区との比で 110 %程度となり，子実タンパク質含有率は対照区より 1 ポイント以上高かった。排水促進と灌漑を組み合わせた現地実証試験では，ハイブリッド水路による排水と灌漑により，子実重が対照区比で 107～129 %と高く，排水促進のみでも 103～106 %であった。溝の形成による秋まきコムギ栽培面積の損失は排水促進のみによる増収率より低く，溝形成のコスト面からみても，ハイブリッド水路は水田における秋まきコムギの生産性を高める水環境制御技術として有効であることを実証した。

２）暗渠清掃用施設「集中管理孔」を，転作作物への地下灌漑として利用する方法として，ダイズ，秋まきコムギの吸水量が多い時期に主要根域（ダイズは 30 cm，秋まきコムギは 40 cm）のマトリックポテンシャルが-31 kPa 以下になった時点で，設定水位を地表下 30 cm にし，設定水位到達から 1 日後に排水する方法で地下灌漑を行った。灌漑期間に降雨を遮断した試験における地下灌漑区の子実重について，ダイズは灌漑未実施の対照区比で 164 %，秋まきコムギで 122 %となり，現地実証試験でも，ダイズで 110～129 %，秋まき

コムギで 102～105 %となった。これらの結果から，両作物ともに水不足となりやすい時期に集中管理孔を利用した地下灌漑を行うことの有効性が認められた。またマトリックポテンシャルの観測データを用いて，降雨後や地下灌漑後に再び主要根域のマトリックポテンシャルが-31 kPa 以下の乾燥状態に至るまでの日数を算出した。その結果を用いて，ダイズでは，開花期に該当する 7 月中旬から用水停止時期である 8 月末までの間に 10 日以上，秋まきコムギでは，穂ばらみ期に該当する 6 月初めから 6 月末までの間に 15 日以上，一雨降水量が 20 mm 以上となる降雨がない場合に地下灌漑を実施するという，降雨条件のみで灌漑実施の要否を判断する方法を開発した。

３．結　論

本研究では，水田土壌環境下において畑作物の生産性を高めるために必要な土壌物理環境を，作物生産を制限する土壌物理性の要因を解析することで明らかにした。また，土壌物理性の改善指標値を設定するとともに，簡易な土壌物理性の評価法を示した。さらに，干湿害の生じやすい土壌や気象条件下において，水田の用排水施設を利用した灌漑排水技術を圃場の整備状況に応じ，農家が利用しやすい技術として開発することで，水田における高生産畑作のための土壌・水環境制御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院教授 石黒宗秀博士には終始懇切なる御指導と御校閲を賜った。北海道大学名誉教授 長谷川周一博士には終始暖かな激励と御指導,御校閲を賜った。北海道大学大学院農学研究院講師 柏木淳一博士には,ゼミなどにおいて貴重なご助言を賜り，北海道大学大学院農学研究院教授 鮫島良次博士ならびに同研究院講師 山本忠男博士には本稿の御校閲と御助言を賜った。

本研究は,2002 年に元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（現道総研上川農業試験場研究部長）ならびに元同科 北川 巌博士（現農研機構農村工学研究部門農地基盤情報研究領域農地整備グループ長補佐）の熱心な御指導と御助言により始められたものであり,試験研究を行う上での基礎を一から教えていただいた。北川 巌博士にはその後も今日に至るまで，本研究を含め多くの試験研究に対して多大なる御指導や御助力，そして暖かなお言葉をいただいた。

秋田県立大学教授 松本武彦博士ならびに道総研道南農業試験場研究部生産技術グループ研究主幹 小野寺政行氏には,試験遂行にあたり試験設計や栽培試験の細かな技術,考え方について懇切丁寧に御指導いただいた。

道総研本部研究戦略部長 中辻敏朗博士ならびに道総研農業研究本部企画調整部地域技術グループ研究主幹 笛木伸彦博士には,本研究をとりまとめるにあたり,絶え間ない暖かな激励と御指導をいただいた。

本研究の遂行期間中に北海道立（後に道総研）中央農業試験場農業環境部（あるいは環境保全部）長として在任された，能代昌雄氏，今野一男博士，木曽誠二博士，志賀弘行博士，加藤 淳博士，長尾明宣氏，安積大治氏，中本 洋氏，同場生産システム部（あるいは生産研究部）長として在任された稲津 脩博士,桃野 寛氏,竹中秀行氏,奥村正敏博士,同場農業環境部環境保全グループ研究主幹として在任された中津智史博士，ならびに現道総研中央農業試験場農業環境部長 渡邊祐志氏には，研究途上で暖かな御指導と激励をいただくのとともに,本稿における主要論文の執筆にあたり,御校閲と御助言をいただいた。

拓殖大学北海道短期大学教授 田中英彦博士には，中央農業試験場生産研究部副部長として在任中に，研究やグループ運営に関する御指導と御助力を賜った。北見農業試験場研究部生産技術グループ研究主任 唐 星児氏，道南農業試験場研究部生産技術グループ主任主査 大橋優二氏には，共同研究者として御助力，御協力いただいた。三重大学教授 渡辺晋生博士には学生時代から御指導いただき，灌漑時のシミュレーションによる検討に関して御教授いただいた。農研機構東北農業研究センターグループ長 冠 秀昭博士，宮城大学准教授 千葉克己博士，秋田県農業試験場主任研究員 中川進平博士，農研機構北海道農業研究センター主任研究員 根本 学博士には，地域や職場の垣根を越えた有益な議論をともにしていただいた。

現地試験の実施にあたり，北海道農政部農村振興局農村計画課主査 平沢 俊氏，空知総合振興局産業振興部調整課主査 荒川剛慶氏をはじめとする北海道農政部ならびに各振興局の農業農村整備事業実施部門担当職員，上川農業改良普及センター主任普及指導員片山正寿氏をはじめとする農業改良普及センター職員，土地改良区や農協，市町村の担当

職員ならびに生産者の方々には，現地圃場の設定や関係機関との連絡調整，圃場造成や試験処理などに多大なる御協力をいただいた。

本研究を遂行する間，中央農業試験場農業環境部環境基盤科では，草野恭文氏，須田達也氏，末久（現 濱村）美由紀氏，中央農業試験場生産研究部水田・転作科（後に同場生産研究部水田農業グループ）では，主任研究員 丹野 久博士，科長 田中一生博士，同平山裕治氏，主査 中村隆一博士，同 尾崎洋人氏，後藤英次博士，熊谷 聡氏，杉川陽一氏，菅原 彰氏，其田達也氏，佐々木 亮氏，長田 亨氏，木下雅文氏，佐藤博一氏，中央農業試験場農業環境部環境保全グループでは，研究主幹 谷藤 健氏，研究主査 甲田裕幸氏，主査八木哲生氏，藤井はるか氏，板垣英祐氏，巽 和也氏，藤田一輝博士（役職は当時のもので，職場が重複する氏名は割愛）には共同作業や有益な議論をともにしていただき，執筆への配慮をいただいた。中央農業試験場圃場管理業務に携わる職員各位には，困難な試験処理や実験装置作成の要望に対して快く実施いただき，契約職員の各位には膨大な圃場調査や分析の実施に御協力いただいた。

この他にも多くの方々の励ましや御協力を得て本研究を遂行することができた。

以上の各位に深く感謝の意を表する。

最後に，常に暖かく見守り支えてくれ，心置きなく研究に打ち込ませてくれた妻と子供たちに深謝し，本稿を捧げる。

引　用　文　献

1）　足立一日出（1988）：代かきによる浸透抑制の実験的考察－輪換田の水移動に関する研究－農土論集，135，1-8.

2）　足立一日出・吉田修一郎・増本隆夫・伊藤公一（1997）：重粘土汎用圃場における暗渠排水に関与する粗間隙量の推定法とその適用，農土論集，192，847-855.

3）　足立一日出・細川　寿・吉田修一郎・松崎守夫（2002）：重粘土転換畑における本暗渠に浅層暗渠を組み合わせた暗渠排水システムの排水特性，農土論集，220，35-41.

4）　足立一日出・吉田修一郎・細川　寿（2003）：重粘土転換畑における大豆－大麦－キャベツ作付け体系下の土壌物理性の変化，農土論集，227，699-708.

5）　秋田県農林水産部農地整備課・秋田県農業試験場（2018）：地下かんがいシステム利用マニュアル，秋田県，p. 4.

6）　阿南光政，弓削こずえ，中野芳輔（2006）：水田必要水量の決定に係る配水管理用水量の実態調査と適正量の評価，水利科学，292，38-52.

7）　安中武幸・白谷栄作（1987）：水田汎用化に伴う土壌物理性変化と土壌水分環境，農土誌，55（2），105-111.

8）　荒木肇・堀井晃・塚野治夫・佐藤俊栄・伊藤道秋（2003）：1 年および 4 年経過した重粘土水田転換畑の土壌特性の変化とナスの収量，農作業研究，38（4），215-219.

9）　有原丈二・阿江教治・岡田謙介（1991）：インドの半乾燥熱帯地域の土壌の物理性と作物生産，土壌の物理性，63，13-18.

10）　有原丈二（2000）：ダイズ安定多収の革新技術，農山漁村文化協会，p. 94.

11）　Bole, J.B. and Dubetz, S. (1986): Effect of irrigation and nitrogen fertilizer on the yield and protein content of soft white spring wheat, Can. J. Plant Sci., 66, 281–289.

12）　Bresson, L.M. (1995): A review of physical management for crusting control in Australian cropping systems - Research opportunities, Aust. J. Soil. Res., 33, 195-209.

13）　Cannell, R.Q., Belford, R.K., Gales, K., Dennis, C.W. and Prew, R.D. (1980): Effects of waterlogging at different stages of development on the growth and yield of winter wheat, J. Sci. Food Agric., 31 (2), 117-132.

14）　Chen, Y., Tarchitzky, J., Brouwer, J., Morin, J. and Bonin, A. (1980): Scanning electron microscope observation on soil crusts and their formation, Soil Sci., 130, 49-55.

15）　土壌物理研究会（1979）：土壌の物理性と植物生育，養賢堂.

16）　土壌環境分析法編集委員会（1997）：土壌環境分析法，博友社，p. 78.

17）　Eck, H.V. (1988): Winter wheat response to nitrogen and irrigation, Agron. J., 80, 902-908.

18）　FAO (1998): Topsoil Characterization for Sustainable Land Management, Land and Water Development Division Soil Resources, Management and Conservation Service, 16-18.

19）　FAO (accessed 2019.10.19): Crop water information: wheat, (online), <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/wheat/en/>

20）　FAO (accessed 2021.3.31): Land & Water: CropWat, (online), <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>

21） Ferry, D.M. and Olsen, R.A. (1975): Orientation of clay particles as it related to crusting of soil, Soil. Sci., 120, 367-375.
22） 福本昌人・深山一弥・小川茂男（1992）：粘土質転換畑における地下灌漑の適用性，土壌の物理性，64，11-20.
23） 福中　斉（1980）：心土破砕の施工法と効果に関する研究，北海道農業試験場研究報告，128，141-150.
24） 福岡県飯塚農林事務所田川普及指導センター（2008）：平成 30 年度普及活動成果集，福岡県，p. 2.
25） 後藤英次・三浦　周・野村美智子・稲津　脩（2003）：北海道の水田土壌における化学性の現状とその問題点，土肥誌，74（4），475-483.
26） 濱田千裕・釋　一郎・澤田恭彦・小島　元（2007）：ダイズ不耕起播種栽培の出芽期における冠水害の発生要因，日作紀，76（2），212-218.
27） Hanks, R.J. and Thorp, F.C. (1957): Seeding emergence of wheat, grain sorghum, and soybeans as influenced by soil crust strength and moisture content, Soil. Sci. Soc. Am. Proc., 21, 357-359.
28） 原口暢朗（1994）：麦わらを被覆した輪換畑大豆播種体系における耕盤全面心土破砕による初期生育安定効果，農土論集，171，145-151.
29） 原口暢朗・若杉晃介（2014）：水田輪作の新しいフレームワークと土壌学・植物栄養学の展開方向　5．田畑輪換を可能にする水田の基盤と排水管理，土肥誌，85（3），264-267.
30） 原口暢朗・若杉晃介（2016）：水田における暗渠管を利用した地下灌漑に及ぼす下層土の透水性の影響，農業農村工学会誌，84（3），205-208.
31） 長谷川周一（1986）：転換畑土壌中の水分移動，土壌の物理性，53，13-19.
32） Hasegawa, S. and Sato, T. (1987): Water uptake by roots in cracks and water movement in clayey subsoil, Soil Sci. 143, 381-386.
33） 長谷川周一（1992）：耕盤操作の要否判定指標の策定，“農林水産技術会議事務局編，水田利用高度化のための高品質・高収量畑作物の開発と高位安定生産技術の開発”，75-76.
34） Hasegawa, S. and Kasubuchi, T. (1993）Water regimes in fields with vegetation, In: Miyazaki, T. (Ed.), Water Flow in Soils, Marcel Dekker, p. 236.
35） Hasegawa, S. and Tabuchi, T. (1995): Well facilitated paddy fields in Japan. In: Tabuchi T. and Hasegawa, S. (Eds.) Paddy Fields in the World, Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering, 103-124.
36） 長谷川周一（1995）：水収支および水管理の違いに基づく水田の類型化，日本土壌肥料学会講演要旨集，41，p. 257.
37） 橋本　均（1994）：厚い粘質無機質層を持つ泥炭土転換畑に対する土層改良（泥炭混層耕）－石狩川下流域の泥炭土輪換田の土層改良（2）－，土壌の物理性，70，43-48.
38） 橋本岩夫（1999）：転換畑・施設畑における潅漑管理と用水量の検討，石川農短大報，29，1-28.
39） 蓮川博之・高橋有紀・鳥塚　智・河村久紀・山田善彦（2014）：地下水位制御システ

ム施工直後のダイズ圃場における環境影響評価と窒素収支の解明，土肥誌，85（6），509-514.
40） 畑地かんがい試験研究会（1997）：北海道における畑地かんがいの手引きーわかりやすい水のかけ方ー，北海道農政部，101-155.
41） 波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫（1983）：メチレンブルートレーサー法による水みちの分布状態，土肥誌，54（6），490-498.
42） Hill, K., Hodgkinson, R., Harris D. and Price P.N. (2015): Field drainage guide. Principles, installation and maintenance, Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB), p. 13.
43） Hillel, D. and Gardner, W. R. (1969): Steady infiltration into crust topped profiles, Soil Sci., 108, 137-142.
44） ヒレル著，岩田進午・内島善兵衛監訳（2001）：環境土壌物理学　耕地生産力の向上と地球環境の保全　I　土と水の物理学，農林統計協会，144-145.
45） 北海道米麦改良協会（2019）：北海道の小麦づくり，北海道米麦改良協会，p. 17.
46） 北海道農政部（2011）：道央転換畑での後作緑肥や密植・培土・追肥によるダイズ生産性向上技術，平成 23 年普及奨励ならびに指導参考事項，169-171.
47） 北海道農政部（2019）：てんさい直播栽培における風害およびソイルクラストによる初期生育障害の軽減対策，平成 19 年普及ならびに指導参考事項，286-288.
48） 北海道農政部（2020）：北海道施肥ガイド 2020，36-37.
49） 北海道立中央農業試験場（2004）：水田転作技術ガイド，3-5；7-8.
50） 北海道立中央農業試験場（2006）：平成 18 年度　北海道立中央農業試験場年報，16-18.
51） 北海道立中央農業試験場（2007）：平成 19 年度　北海道立中央農業試験場年報，p. 16
52） 北海道立総合研究機構農業研究本部（2012）：土壌・作物栄養診断のための分析法 2012.
53） 北海道立総合研究機構中央農業試験場（2013）：平成 25 年度　農業研究本部中央農業試験場年報，15-17.
54） 北海道立総合研究機構中央農業試験場（2019）：令和元年度　農業研究本部中央農業試験場年報，15-17.
55） 本間香貴・御子柴北斗・白岩立彦（2008）：「丹波黒」ダイズの特産地域における土壌環境の圃場間変異，第 225 回日本作物学会講演要旨集，340-341.
56） 本間香貴・白岩立彦（2009）：水稲群落を基準とした群落表面温度の計測による転換畑ダイズ圃場の水ストレス評価，日作紀，78（3），387-394.
57） 細川　寿（2004）：大豆の耕うん同時畝立て作業機による重粘土転換畑の湿害回避技術，農業機械学会誌，66（5），14-16.
58） 飯田周治・吉野　喬・猪原明成・岡山清司・鎌仲一夫（1990）：灰色低地土水田の心土破砕による畑地化，土肥誌，62（1），27-34.
59） 伊地知　仁・徳田明彦（2017）：熱画像によるチャ樹冠面温度評価およびその品種間差異と灌水効果，茶業研究報告，123，1-7.
60） 稲熊利和（2014）：米の生産調整見直しをめぐる課題，立法と調査，354，33-42
61） 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.
62） 井之上　準・陳　日斗（1981）：作物の出芽に関する研究.－ダイズにおける粒重と芽ばえの抽出力－，日作紀，50，344-350
63） 石黒宗秀（1989）：水田耕盤・心土粗間隙の期別変化－白色塗料浸透調査によるクロボク土水田の一例－，農土論集，142，107-108
64） 伊藤邦夫・大西　将（1988）：大豆作における地下かん水法，農業技術，433, 127-129.
65） 伊藤暢男・中村和正・酒井美樹・越山直子（2015）：温暖化に対応した灌漑用水供給システムの構築を目指して，農業農村工学会誌，83 (9)，739-742.
66） 伊藤滋吉・塩谷哲夫・納口るり子・古賀野完爾（1992）：熱帯マメ科作物セスバニアを利用した重粘土転換畑の土壌改良，北陸農試報，34，27-41.
67） 糸川信弘・岡崎紘一郎・宮崎昌宏・川崎　健（1989）：転換畑の麦後大豆栽培における出芽安定播種技術の開発，農作業研究，24 (1)，47-54.
68） 岩渕哲也・尾形武文・田中浩平（2006）：ダイズの出芽・苗立ち安定のための 3 粒点播栽培に関する研究，日作紀，75 (2)，132-135.
69） 岩間秀矩・石井和夫（1974）：重粘性土壌対する砂客土の易耕性改善効果，土壌の物理性，30，7-14.
70） 岩崎光徳・深町　浩・今井　篤・野中圭介（2011）：中晩生カンキツ‘はれひめ’における夏秋季の水ストレスが葉実品質に及ぼす影響，園学研，10 (2)，191-196.
71） 泉　正則・武田　忠（1982）：転換畑における溝堀機を利用した麦，大豆の栽培法　第１報　営農排水技術，東北農業研究，31，147-148.
72） Jat, M.L., Singh, S., Rail, H.K., Chhokar, R.S., Sharma, S.K. and Gupta, R.K. (2005): 稲・小麦体系の多様化を目的とした畝立て灌漑栽培技術（FIRB），国際農林業協力，28 (1)，25-42.
73） 鎌田健造（1983）：土壌型，土壌水分の実態，“青森県農業試験場，転換畑における主要畑作物の栽培法の改善ならびに湿田地帯における新転換作物の開発”，4-5.
74） 金田吉弘，佐藤　孝，古田規敏，生野みどり，小林ひとみ，太田　健，進藤勇人，佐藤　敦（2004）：重粘土転換畑における土壌水分環境がダイズの根圏活性に及ぼす影響，土肥誌，75 (2)，185-190.
75） 兼子健男・村川雅己・竹本眞吾・穴井浩二（2000）：用排兼用水路における汎用化水田のための水管理システム，農土誌，68 (10)，41-46.
76） 冠　秀昭・千葉克己・石川　毅・加藤　誠（2008）：本暗渠内の水位を調節した転換畑の土壌水分動態について，農業農村工学会誌，76，813-818.
77） 関東東海北陸農業試験研究推進会議　中央農業総合研究センター（2005）：小明渠作溝同時浅耕播種と耐倒伏性品種を基軸としたダイズの浅耕栽培法，関東東海北陸農業　研究成果情報　平成 16 年度　III，10-11.
78） Kemper, W.D. and Koch, E.J. (1966): Aggregate Stability of Soils from Western United States and Canada. Technical Bulletin No.1355, Agricultural Research Services. USDA in cooperation with Colorado Agricultural Experiment Station.
79） Kirby, E.J.M. (2002) (Accessed 2021.4.8): Botany of the wheat plant. In: Curtis B.C., Rajaram S. and Gómez Macpherson H. (Eds.) Bread wheat: improvement and production.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Corporate Document Repository, Agriculture and Consumer Protection, (online), <http://www.fao.org/3/y4011e/y4011e05.htm#bm05>

80) 気象庁（参照 2020.12.24）：北海道の雪・霜・結氷・冠雪・積雪・長期積雪（根雪）の初日，終日の観測状況，（オンライン），入手先 <https://www.jma-net.go.jp/sapporo/tenki/kansoku/snow-frost-ice/SnowFrostIce.html#end>

81) 北田敬宇（1989）：水田転作大麦の生育適正区分図の作成－金沢図幅の例－，土肥誌，60（2），81-87.

82) 北川　巌・横井義雄・後藤英次・相馬尅之（2001）：バ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.

83) 北川　巌（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.

84) 北川　巌・竹内晴信・横井義雄（2006）：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.

85) 北川　巌・竹内晴信・小谷晴夫・千葉佳彦（2010）：切断掘削方式による穿孔暗渠「カッティングドレーン工法」の効果と適用性，農業農村工学会論文集，78（3），151-156.

86) 北川　巌・後藤幸輝・露崎　浩・柏木淳一・巽　和也・塚本康貴・中川進平・進藤勇人（2017）：産学官連携による営農排水改良技術の開発・普及の取組み，農業農村工学会誌，85（6），543-546.

87) 幸田浩俊（1982）：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），茨城県農業試験場研究報告，22，25-63.

88) 古賀野完爾（1987）：2. 土壌改良と土壌管理技術　(1) 畑転換による土壌理化学性の変化，“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編，北海道地域における転換畑作研究成果情報”，16-29.

89) 小針美和（2018）：米政策の推移－米政策大綱からの15年を振り返る－，農林金融，863，45-59.

90) 古檜山雅之・中村和正・鵜木啓二・石田哲也（2014）：地下灌漑が可能な大区画水田における圃場水管理，農業農村工学会論文集，290，23-32.

91) 河野英一（1976）：転換畑における土壌水分の変化とキ裂の発達，農土誌，44（6），369-376.

92) 久保田　徹，Branco, J.L.C.，池　盛重（1983）：セラードオキシソルの圧密層によるダイズ根の伸長阻害，土肥誌，54（5），389-395.

93) 久保寺秀夫（2001）：沖縄本島中央部のマージ土壌の乾燥に伴う硬化強度に影響する要因，土肥誌，72，649-659.

94) 熊谷悦史・高橋智紀・中野聡史・松尾直樹（2016）：アメリカ合衆国ネブラスカ州の大豆研究事情，農業および園芸，91（6），608-617.

95) 草薙　浩（2018）：降水連続日数と一雨降水量から見た日本の降水特性の長期変化，天気，65（1），25-34.

96) 久津那浩三（1986）：転換畑の通気性と作物の生育，土壌の物理性，53，8-12.

97） 桑原真人（1988）：大豆根の伸長・分布および根粒活性と土壌水分，土壌の物理性，57，15-21.
98） Lado, M., Paz, A. and Ben-Hur, M. (2004): Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation, and soil loss. Soil Sci. Soc. Am. J., 68, 935-942.
99） Le Bissonnais, Y. (1996): Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. Eur. J. Soil Sci., 47, 425-437.
100）Lee, B.W., Kwon, Y.W. and Myung, E.J. (1996): Effects of soil crusting and hardening during drying after artificial rainfall on seedling emergence of rice and barnyard grass, Korean J. Crop Sci., 41, 131-138.
101）Lemos, P. and Lutz, J.F. (1957): Soil crusting and some factors affecting it, Soil Sci. Soc. Proc., 21, 485-491.
102）Loper, S. (accessed 2019.10.19): Wheat Growth Stages in Relation to Management Practices, (online), < https://cals.arizona.edu/crop/presentations/2012/ShawnaLoper.pdf>
103）李　尚奉・千家正照・伊藤健吾・林　博康（2003）：不耕起直播栽培の導入による水管理と水田用水量の変化，農土論集，224，45-52.
104）前田　要（1974）：粗大有機物連用水田の物理特性について，土壌の物理性，30，33-38.
105）前田　要（1983）：北海道の強粘質水田の理工学特性と排水不良対策に関する研究，北海道立農業試験場報告，42，p. 1
106）前田　要（1986）：転換畑の土壌構造と畑作物の生育反応，土壌の物理性，53，2-7.
107）松原利文，相川賢一郎，山崎剛太郎，杉町信幸（1985 a）地下灌漑時の土層中の水移動－重粘土転換畑における地下灌漑試験（第 1 報）－，土壌の物理性，52，18-24.
108）松原利文，相川賢一郎，山崎剛太郎，杉町信幸（1985 b）調節水路式地下灌漑の適正な施設－重粘土転換畑における地下灌漑試験（第 2 報）－，土壌の物理性，52，25-29.
109）松田　周・向　弘之（2009）：圃場面傾斜化と履帯転圧と明渠の組み合わせが根雪終日後の表土層の水分量と土壌硬度と地温に及ぼす影響, 農業農村工学会論文集, 262, 83-88
110）松田豊治（2004）：ダイズ収量向上のための農家栽培技術の解析，北陸作物学会報，39，85-87.
111）松下真一郎・浅生秀孝（1988）：転換畑大豆における畦間かん水の効果，農業技術，433，125-127.
112）御子柴公人（1990）：誰でもできる　写真図解転作ダイズ 400 キロどり，農山漁村文化協会，67-38.
113）峯村英児（2018）: 4．平成 30 年産からの米政策の見直しについて，“日本農業研究所編, 米政策の見直しに関する研究＜米政策の見直しに関する研究会報告＞”, 155-165.
114）三土正則（1988）: 畑地土壌化のための土壌診断とその測定，“農林水産技術会議事務局　農業研究センター編，水田農業の基礎技術－転換畑研究の主要成果情報”，8-9.
115）三好　洋・丹原一寛（1977）：土の物理性と土壌診断，日本イリゲーションクラブ.
116）望月秀俊・竹田博之・松森堅治・奥野林太郎・亀井雅浩（2013）：ダイズ作付け期間

中の深さ別土壌水分量の変化による地下水位制御システム（FOEAS）の機能評価，農業農村工学会論文集，286, 51-57.
117）Moldenhauer, W.C., and Kemper, W.D. (1969): Interdependence of water drop energy and clod size on infiltration and clod stability, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 33, 297-301.
118）森　友秀（2008）: 北海道の水田整備の歴史と役割，農業農村工学会誌，76（10），893-896.
119）森也寸志・渡辺紹裕・丸山利輔（1994）: 水田土壌における根成孔隙の形成と形態に関する研究，農土論集，171，13-20.
120）村上章・佐々木長市・安中武幸（2007）: 汎用水田におけるダイズ多収を目指した地下水位制御の試み，土壌の物理性，107，44-55.
121）Nabi, G., Mullins, C.E., Montemayor, M.B. and Akhtar, M.S. (2001): Germination and emergence of irrigated cotton in Pakistan in relation to sowing depth and physical properties of the seedbed. Soil Tillage Res., 59, 33-44.
122）長堀金造・高橋　強（1977）: 畑地転換に伴う土壌物理性の変化，農土誌，45（9），605-610.
123）永石義隆・原口暢朗（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）長野間　宏（1978）: 地下水位の高低による根圏の環境変化と作物の生育，“農林水産技術会議事務局，稲作転換推進対策試験”，64-66.
125）長野間　宏（1994）: 農耕地における土壌診断の研究ならびに診断指標と手法の開発．1　土壌の物理性診断，土肥誌，65（3），341-348.
126）中川進平・長谷川周一・柏木淳一・鈴木伸治（2002）: 野外土壌の透水性の簡易測定，土肥誌，73（6），783-786.
127）中原正一・井上吉雄（1997）: 赤外線放射測温によるトマトの水ストレス反応の検出－高糖度トマト栽培における低土壌水分管理への応用－，農業気象，53（3），191-199.
128）中野恵子・宮崎　毅・中野政詩（1998）: 畑地の排水性から見た土壌の物理的肥沃度，農土論集，195，465-476
129）中野啓三（1988）: 転換畑土壌の易耕性変化の指標“農林水産技術会議事務局　農業研究センター編，水田農業の基礎技術－転換畑研究の主要成果情報”，10-11
130）中野有加・東野裕広・村岡賢一・中西一泰・柳井洋介・岡田邦彦（2014）: 地下水位制御システム（FOEAS）設工ほ場における設定水位が秋まきキャベツの生育に及ぼす影響，園学研，13（2），125-133.
131）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砕による対策，土肥誌，75（2），265-268.
132）中沢伸夫・後藤和美（1988）: 転換畑ダイズに対するうね間灌漑が生育・収量に及ぼす効果，北陸作物学会報，23，87-89.
133）成岡　市・岩田幸良・駒村正治（2000）: 関東ローム下層土における粗孔隙の透水,通気および排水機能，農土論集，208，487-495.
134）根岸久雄・多田　敦・古木敏也・守屋　貢・渋谷勤次郎・上村春美（1972）: 重粘土地帯水田の土層改良と用排水組織に関する研究（1），農業土木試験場報告，10，43-

94.
135）根岸久雄（1981）: 水田利用再編のための転作技術－2．排水－，農業技術，36 (12)，529-537.
136）日本土壌協会（1986）: 農作物生育環境指標　総集　第 1 集　土壌環境，日本土壌協会，82-83.
137）日本土壌協会（2012）: 有機栽培技術の手引き（水稲、大豆等編），日本土壌協会，p. 209.
138）日本ペドロジー学会（1997）: 土壌調査ハンドブック　改訂版，博友社，p. 70.
139）西入恵二 (2001) : 着莢を左右する条件, “農山漁村文化協会，　転作全書　第二巻　ダイズ・アズキ”，農山漁村文化協会，p. 338.
140）西村　拓・中野政詩・宮崎　毅（1990）: 室内人工降雨装置による土壌クラストの形成と侵食との関連性，農土論集，146，101-107.
141）西村　拓・中野政詩・宮崎　毅（1993）: クラスト形成土層における水の定常浸透と層序特性について，農土論集，167，29-35.
142）農研機構　農村工学研究部門（2020）: 多様な土壌条件に対応できる　簡単で迅速な排水改良！　営農排水改良ラインナップ技術 新世代機「カットシリーズ」, 農研機構, 7-9.
143）農林水産技術会議事務局　農業研究センター（1988）: 水田農業の基礎技術－転換畑研究の主要成果情報－.
144）農林水産技術会議事務局（1992）: 水田利用高度化のための高品質・高収量・畑作物の開発と高位安定生産技術の確立.
145）農林水産技術会議事務局（2007）: 新鮮でおいしい「ブランド・ニッポン」農産物提供のための総合研究　2 系　大豆，109-112；169-171.
146）農林水産省（2009）: 食料・農業・農村白書　平成 20 年版，農林水産省，p. 30.
147）農林水産省（2020）: 食料・農業・農村基本計画，p. 45.
148）農林水産省（参照 2021.3.31）: 地力増進法及び関連法令等,（オンライン），入手先＜https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_dozyo/houritu.html＞
149）農林水産省　大臣官房統計部（1985, 2015, 2019, 2020）: 耕地及び作付面積統計.
150）農林水産省　大臣官房統計部（2011～2020，各年）: 作物統計（普通作物・飼料作物・工芸農作物）.
151）農林水産省　大臣官房統計部（2020 a）: 平成 30 年度食料需給表.
152）農林水産省　大臣官房統計部（2020 b）: 令和元年耕地及び作付面積統計.
153）農林水産省　構造改善局計画部資源課（1990）: 地下かんがいの手引き－平成元年度営農技術開発調査報告書－.
154）農林水産省　農村振興局（2015）: 基幹水利施設保全管理対策　農業基盤情報基礎調査報告書（平成 26 年度実績）.
155）小原　洋・高橋智紀・細川　寿（2008）: 人工降雨下で形成された水田転換畑作土のクラストの性質と土壌の諸特性の関係，土壌の物理性，109，27-44.
156）Ochs, W.J., Wenberg, R.D. and Stroup, G.W. (1995): Drainage system elements. In: Pavelis, G.A. (Ed) Farm Drainage in the United States: History, Status, and Prospects, United States

Department of Agriculture, 79-90.
157）小田原和弘・荻原武雄・鶴田正明・八重樫耕一（1991）：田畑輪換における土壌管理法，東北農業研究，44，77-78.
158）置塩康之・岸本基男・加護谷栄章・小原敏男・大西隆夫・米谷　正・土肥　誠（1987）：転換畑における地下かんがい技術の開発　第 2 報　地下かんがいによる土壌水分の分布と大豆の生育収量，兵庫県農業総合研究センター研究報告，35，25-32
159）大沼　彪（1978）：水田転換畑における大豆栽培，“東北農業試験研究協議会編，東北農業研究 第 22 号　水田利用再編の技術問題”，61-75.
160）長利　洋（1987）：圃場内排水溝による残留水の排除効果，農土誌，55（4），13-18.
161）Richards, L.A. (1953): Modulus of rupture as an index of surface crusting of soil, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 17, 321-323.
162）佐川　了・千田広幸（1991）：ダイズの出芽に対する土壌クラストの影響，日作東北支部報，34，49-51.
163）坂田　賢・堀野治彦・三野　徹（2001）：直播水田における圃場単位の水利用に関する事例的研究，農土論集，212，17-22.
164）酒寄貴範・長谷川周一・中野明正・加藤英孝・河野英一（1998）：負圧浸入計を用いた畑土壌の不飽和透水係数の測定，土肥誌，69（4），386-394.
165）桜井一男（1981）：沖積転換畑における耕盤の透水性について，土壌の物理性，44，52-56.
166）佐藤　孝・善本さゆり・渡邉俊一・金田吉弘・佐藤　敦（2007）：重粘土水田転換畑におけるヘアリーベッチ植栽が土壌物理性とダイズの初期生育に及ぼす影響，土肥誌，78（1），53-60.
167）Sayre, K.D. and Moreno Ramos, O.H. (1997): Applications of raised-bed planting systems to wheat, Wheat Program Special Report No. 31, CIMMYT.
168）Schwab, G.O., Kenneth, K.B., Richard, K.F. and Alcott, W.E. (1957): Elementary soil and water engineering, Toppan Company.
169）Seker, C. (2003): Effect of selected amendments on soil properties and emergence of wheat seedlings, Can. J. Soil. Sci., 83, 615-621.
170）世古晴美・佐村　董・加護谷栄章・二見敬三・吉倉惇一郎・沢田富雄・青山喜典（1987）：排水改良転換畑における大豆栽培の多収安定化　第 3 報　地下水位の高低と灌水の影響，兵庫県農業総合センター研究報告，35，21-24.
171）千家正照・橋本岩夫・伊藤健吾・西出　勤（2001）：転換畑の用水計画諸元に関する検討，農土誌，69（5），505-510.
172）渋谷和良・清水俊久・三沢眞一（2004）：もみ殻暗渠の機能持続性調査と管理手法の検討，農土誌，72（12），1041-1044
173）Shiel, R.S. and Yuniwo, E.C. (1993): Decreasing the impact of surface crusting on seedling emergence by wetting. Soil Use Manage., 9, 40-45.
174）島田　清・加納利博（1983）：輪換畑の保水性及びそれに関係する物理性の経年変化について，石川県農業短期大学研究報告，13，10-15.
175）Shimada, S., Kokubun, M. and Matsui, S. (1995): Effect of water table on physiological traits

and yield of soybean, Jpn. J. Crop sci., 64 (2), 294-303.
176）篠遽三郎（1988）：リンゴ園の暗渠排水，農業土木学会誌，56（6），559-565.
177）Singh, G. (2009) Effects of wheat straw and farmyard manure mulches on overcoming crust effect, improving emergence, growth and yield of soybean and reducing dry matter of weeds, Int. J. Agric. Res., 4, 418-424.
178）塩谷哲夫（1988）：我が国水田農業の発展方向と農法転換のための技術革新，農作業研究，23（2），89-93.
179）Skaggs, R.W. (1982): Field evaluation of a water management simulation model, Trans. ASAE, 25 (3): 666-674.
180）Strong, W.M. (1982) Effect of late application of nitrogen on the yield and protein content of wheat. Aust J Exp Agric Anim Husb, 22 (115), 54-61.
181）杉本秀樹，雨宮　昭，佐藤　亨，竹之内　篤（1988）：水田転換畑におけるダイズの過湿障害 第 1 報 土壌の過湿処理が乾物生産と子実収量に及ぼす影響，日作紀，57（1），71-76.
182）孫　宇梅，伊藤道秋，荒木　肇，山下米治（2004）：作物の出芽，生育に及ぼす土塊の大きさの影響，農作業研究，39（3），151-156.
183）鈴木克拓・大野智史・谷本　岳（2014）：多雪重粘土地帯の地下水位制御システム圃場における不耕起 V 溝直播水稲－冬作大麦－大豆 2 年 3 作体系下での水・窒素・リン・懸濁物質の流出，土壌の物理性，127，19-29.
184）田淵俊雄・中野政詩・住田　章・丸田　勇（1966）：粘土質水田の排水に関する研究 (6)　小区画暗キョ田の非カンガイ期の排水（長岡市），農土論集，18，39–47.
185）高橋千穂・波多野隆介・佐久間敏雄（1991）：土壌－植物－大気系（SPAC）の放射・水分レジムの影響によるコムギ畑の蒸発散の変動，土壌の物理性，62，33-41.
186）高橋　均（1988）：転換畑作物の地下水位管理基準，“農林水産技術会議事務局　農業研究センター編，水田農業の基礎技術－転換畑研究の主要成果情報－”，2-3.
187）高橋　幹（1995）：灌水と追肥による輪換畑大豆の多収技術，北海道農業試験場研究資料　53，25-33.
188）高橋智紀・細川　寿・松崎守夫（2008）：重粘質転換畑における土壌鎮圧によるダイズ種子の吸水促進効果，土肥誌，79，1-7.
189）高橋智紀・持田秀之・榊原充隆・森本　晶・小林浩幸・相場　聡（2014）：寒冷地における生産現場でのダイズ低収要因の解析，東北農研研報，116，89-118.
190）高橋保夫（1976）：畑地転換と導入作物，農土誌，44（12），42-48.
191）高井宗宏（2004）：ブルックス札幌農学校講義，北海道大学図書刊行会，71-73.
192）高山弘太郎・仁科弘重・山本展寛・羽藤堅治・有馬誠一（2009）：デジタルカメラを用いた投影面積モニタリングによるトマトの水ストレス早期診断，植物環境工学（JSHITA），21（2），59-64.
193）竹田博之・佐々木良治（2013）：転換畑ダイズ不耕起栽培における地下水位制御システムを利用した梅雨期および梅雨明け後播種栽培，日作紀，82（3），233-241.
194）竹中　肇（1975）：転換畑における土壌水分と土壌構造の変化，土壌の物理性，31，24-28.

195）竹中秀行（1994）：ソイルクラスト生成抑制による出芽阻害防止技術（第 1 報），農業機械学会誌，56（4），101-105.
196）竹ノ内　篤・芝田英明（1992）：水田転換畑における中耕培土と灌水が大豆の生育と子実収量に及ぼす影響，愛媛県農業試験場研究報告，31，73-79.
197）竹内晴信・大山　毅（1994）：北海道網走地域の畑地における軽石流堆積物客土の効果と問題点，土壌の物理性，70，55-65.
198）竹内晴信（2005）：湿潤地帯の土地利用型作物に対する灌水技術の課題，土壌の物理性，100，55-64.
199）武山絵美・高橋　強・九鬼康彰（2003）：米の生産調整政策下における水田の利用状況とその問題点，農土論集，224，1-9.
200）田中　樹（1995）：土壌クラストの形成機作とそれに影響を及ぼす諸条件，土壌の物理性，71，17-21.
201）谷脇　憲・宮沢福治（1981）：水田利用再編のための転作技術－3，農業技術，37（1），1-6.
202）徳永光一・成岡　市・深谷高俊（1984）：重液浸入法の開発とそれによる土壌間隙の軟 X 線透写像についての考察－X 線透写像による土壌と間隙に関する研究（I）－，農土論集，114，61-68.
203）Tripathi, S.C., Sayre, K.D. and Kaul, J.N. (2005): Planting systems on lodging behavior, yield components, and yield of irrigated spring bread wheat, Crop Sci., 45, 1448-1455
204）塚本康貴・竹内晴信・北川　巌（2012）：土性や有機物含量による土壌クラスト強度の違いが転換畑でのダイズ出芽に及ぼす影響，土壌の物理性，121，3-8.
205）塚本康貴・竹内晴信・中村隆一・中津智史（2016）：疎水材暗渠の排水機能簡易診断と機能回復手法，土肥誌，87（5），368-372.
206）Tsukamoto, Y., Kitagawa, I. and Nakamura, R. (2017): Drainage and irrigation performance of hybrid ditches in converted paddy fields under winter wheat cultivation in Hokkaido, Paddy Water Environ., 15 (3), 681–691.
207）塚本康貴・北川　巌・大橋優二（2020 a）：転換畑における収量品質向上のための灌漑排水技術，農業農村工学会誌，88（10），801-804.
208）塚本康貴・北川　巌・竹内晴信（2020 b）：道央転換畑でのダイズに対する現場透水試験による簡易な土壌物理性評価法，農業農村工学会論文集，310，I_1-I_9.
209）塚本康貴・唐　星児（2020 a）：北海道における暗渠清掃用施設「集中管理孔」を利用した転作作物への地下灌漑技術，北農，87（1），32-40.
210）塚本康貴・唐　星児（2020 b）：転換畑での暗渠清掃用施設「集中管理孔」を利用したダイズならびに秋まきコムギへの地下灌漑，農業農村工学会論文集，311，II_65-II_73.
211）Twitty, K. and Rice, J. (2001): Water table control, Part 624 Drainage National Engineering Handbook（Chapter 10), U.S. Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.
212）U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service (USDA SCS) (1971): Drainage of agricultural land, SCS National Engineering Handbook (Section 16), Engineering Division Soil Conservation Service U.S. Department of Agriculture.

213）内山直治（1983）：土層改良計画の考え方，農土誌，51（11），999-1005.
214）若杉晃介・藤森新作（2008）：圃場面傾斜化が田面排水や地表灌漑に及ぼす影響，農業農村工学会論文集，255，51-56.
215）若杉晃介・藤森新作（2009）：水田の高度利用を可能とする地下水位制御システムFOEAS，農業農村工学会誌，77，705-708.
216）Walker, W.R. (1989): Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems, FAO irrigation and drainage paper 45, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
217）Wang, F.H., Wang, X.Q. and Sayre, K.D. (2004): Comparison of conventional, flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China, Field Crop Res., 87, 35-42.
218）渡辺源六・高橋昌明（1982）：大豆に対する畦間灌水の効果について，東北農業研究，31，97-98.
219）渡辺春朗・松本直治・三好　洋（1974）：転換畑の土壌物理性と地下水位が根群分布に及ぼす影響，千葉県農業試験場研究報告，14，87-93.
220）Wuest, S.B. and Cassman, K.G. (1992): Fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated wheat: I. Uptake efficiency of preplant versus late-season application, Agron. J., 84, 682-688.
221）山田宣良（1991）：クラストが形成された土壌の表層の性質，農土論集，152，9-13.
222）山形県農林水産部（2020）：当面の技術対策（8 月），山形県，p. 10
223）山本隆儀・田頭玲子・田中宏明・小平尚寿（2011）：浸潤法を用いた水ストレス下の果樹葉気孔反応の測定と潅水開始時期の簡易判定，山形大学紀要（農学），16（2），69-93.
224）山崎不二夫・八幡敏雄・竹中　肇・田淵俊雄（1963）：北海道小向の重粘土地の暗キョ排水における心土キ裂の役割，農業土木研究，30（8），427-434.
225）山崎不二夫・竹中　肇・田淵俊雄・多田　敦（1964）：粘土質の水田の暗キョ排水における心土キ裂の役割，農業土木研究，32（3），151-159.
226）安田典夫（1991）：図式情報システムを利用した土壌診断による転換畑の排水対策の策定，土肥誌，62（2），171-177.
227）安田典夫・天野洋司（1994）：農業生産環境情報システムによる水田転作ダイズ生育適地図の作成と検証，土肥誌，65（3），282-289.
228）Yavas, I., Unay, A. and Aydin, M. (2012): The waterlogging tolerance of wheat varieties in western of Turkey, Sci World J. Doi:10.1100/2012/529128.
229）横井義雄（2006）：砂質火砕流堆積物の客土によるクラスト形成の抑制を主体とした畑土壌の物理性改善技術，土壌の物理性，103，3-12.
230）吉田純也・岩崎光徳（2014）：根域に対する灌水域の割合がカンキツ樹の乾燥ストレスに及ぼす影響，園学研，13（4），335-341.
231）吉田修一郎・伊藤公一・足立一日出（1997）：重粘土転換畑への冬作物の導入による圃場の排水性の改善，土壌の物理性，76，3-12.
232）吉田修一郎・足立一日出・谷本　岳（2008）：重粘土水田における暗渠排水能力の季節的・経年的変動，農業農村工学会論文集，257，51-56.

233）吉田修一郎・細川　寿・足立一日出（2013）：播種時の過湿・過乾燥リスクを伴う粘土質転換畑におけるダイズの適切な播種条件の解析，土壌の物理性，125，17-27.
234）Zotarelli, L., Rens, L., Barrett, C., Cantliffe, D.J., Dukes, M.D., Clark, M. and Lands, S. (2013) (accessed 2020.3.29): Subsurface drip irrigation (SDI) for enhanced water distribution: SDI-seepage hybrid system, (online), <http://edis.ifas.ufl.edu/hs1217>

Establishment of soil and water control technologies to increase upland field crop production in paddy fields

Yasutaka Tsukamoto

Summary

In Japan, there is an urgent need to promote highly profitable agriculture by introducing upland field crops and horticultural crops in paddy fields. However, improvements in soybean and wheat yields are limited by poor drainage and moisture damage caused by soil physics in paddy fields. Therefore, drastic improvements in soil and water conditions in paddy fields are needed, in addition to the establishment of technologies for controlling these parameters. The short-term rotation of paddy and upland crops, which is a soil control system used mainly for paddy rice cultivation, limits the establishment of suitable soil conditions for upland field crops in regions across Japan. In the future, based on the premise of mid- to long-term upland crop rotation, which includes the permanent conversion that is being promoted in Hokkaido, it is necessary to first clarify the factors of soil physical properties that limit crop production and then utilize these properties as index values for productivity. In so doing, it will be possible to create conditions that are suitable for the cultivation of upland field crops in paddy fields by using conventional technologies to improve the physical condition and drainage of the soil. Furthermore, to increase the production of upland crops in paddy fields to the levels in field cropping areas, water control technologies using irrigation and drainage facilities in paddy fields are required to cope with drought, moisture damage, and weather conditions unique to paddy fields, as well as recent climatic changes characterized by frequent heavy rainfall and dry weather. Such technologies should effectively use existing irrigation and drainage facilities and be accessible to farmers.

The aims of this study were (1) to establish index values for assessing soil conditions in order to increase the productivity of upland field crops in paddy fields and (2) to develop irrigation and drainage technologies to realize field crop cultivation with high productivity under soil and climatic conditions prone to drought and moisture damage. Our key results were as follows.

1. Establishment of index values for assessing and improving soil conditions to increase the productivity of upland field crops in paddy fields.

We used soybean, which is a typical conversion crop, to clarify the effects of poor physical properties of soil on field crop production in paddy fields. In addition, we examined index values for improved productivity and investigated a simple method for measuring those index values.

1.1. In converted paddy fields, a hard soil crust can affect soybean seedling emergence. Thus, we focused on soil crust as a physical property affecting soybean emergence. When crust strength (as measured using a crust hardness meter) was ≥ 10 mm (0.35 MPa), the emergence of soybean seedlings was < 60 %. When the clay content was ≥ 0.20 $kg \cdot kg^{-1}$, silt content was ≥ 0.30 $kg \cdot kg^{-1}$,

sand content was < 0.50 kg・kg^{-1}, and crust strength was generally ≥10 mm. However, for sand contents of < 0.50 kg・kg^{-1}, if ignition loss was ≥ 0.13 kg・kg^{-1} and total carbon content was ≥ 0.06 kg・kg^{-1}, crust strength decreased to <10 mm. Based on these results, an improvement index value of <10 mm, as determined using a crust hardness meter, was identified as the threshold for obtaining good soybean emergence. In addition, the soil conditions most likely to result in poor emergence due to soil crusting were a sand content of <0.50 kg・kg^{-1}, an ignition loss of < 0.13 kg・kg^{-1}, and a total carbon content <0.06 kg・kg^{-1}. An increase in soil organic matter, including bulky organic matter, was associated with reduced crust strength.

1.2. We focused on the poor infiltration capacity of soil as a physical property that limits soybean growth after emergence. A soil physicochemical survey was conducted on soybean fields converted from clay paddy fields in the western part of Hokkaido. Additionally, the relationships of the basic intake rate (I_b), as determined using the cylinder infiltrometer method, with the growth yield of soybean, soil physical properties, and soil cross-sectional conditions were analyzed. The soil chemistry of the surveyed fields was within the range of the diagnostic criterion; however, many of the fields showed poor soil physical conditions below the shallow topsoil. When I_b in the surveyed fields was less than 100 mm・h^{-1}, grain yield per plant was affected and the grain yield per square meter was less than 300 g・m^{-2}, irrespective of planting density. Analyzing the relationship of I_b with soil physical properties and soil cross-sectional conditions using quantification theory type II, the factors that reduced I_b to less than 100 mm・h^{-1} were, in descending order of influence, a structureless depth of <38 cm, a saturated hydraulic conductivity of < 10^{-5} cm・s^{-1}, a dry density of >1.24・Mg・m^{-3}, and a macropore porosity of <0.04 m^3・m^{-3}. An underdeveloped soil structure with few cracks and pores resulted in I_b values of <100 mm・h^{-1} and low soybean yields. Hence, to increase soybean growth and yield in converted paddy fields, it is necessary to develop the soil structure by introducing cracks and pores up to 40 cm below the ground surface, in addition to ensuring a sufficient topsoil thickness. On the basis of these results, the proposed improvement index value for soil physical properties after emergence in converted paddy fields was an I_b of ≥100 mm・h^{-1} using the cylinder infiltrometer method.

2. Development of control technologies for water conditions to realize high upland field crop production in paddy fields

To develop water control technologies that can be easily used by farmers without requiring new irrigation facilities in paddy fields, two methods were evaluated: (1) a method for creating hybrid ditches (30 cm deep) that combines drainage and irrigation in the field using a trencher used by farmers for farm management and (2) a method for utilizing the underdrain cleaning system in paddy fields as a means of subirrigation for soybeans and winter wheat.

2.1. Considering the ease of management and the impact on winter wheat growth, the optimal timing for digging hybrid ditches was determined to be immediately after sowing, and the inter-ditch spacing was set at ≤15 m to ensure that the irrigation water would be evenly distributed throughout

the field. The hybrid ditches promoted the healthy development of wheat plants by increasing soil temperatures and improving drainage during the flood-prone period. In addition, irrigation was carried out using water drawn from canals that feed the paddy fields to ditches when the matric potential at a depth of 40 cm fell below -31 kPa in June, when water demand by winter wheat is highest and rainfall is scarce. Grain yield increased both in our experimental fields under experimental irrigation conditions in which rainfall was excluded as well as in drainage and irrigation tests conducted at local farms. Furthermore, the yield increased due to improved drainage without irrigation. The expected increase in yield due to the installation of hybrid ditches, even when they were not used for irrigation, was greater than the expected reduction in yield due to the loss of land resulting from the construction of hybrid ditches. Similarly, the cost of constructing hybrid ditches, including labor, was very low compared with the price of wheat; accordingly, the strategy is expected to be economically feasible. Thus, adoption of the proposed method can be justified solely on the basis of its effect on drainage. Taken together, hybrid ditches that improve drainage and irrigation are an effective water control technology for improving the growth and yield of winter wheat.

2.2. During the period of greatest soil water uptake by soybeans and winter wheat, the set water level was 30 cm below the surface when the matric potential of the primary root zone (i.e., 30 cm below the surface for soybean and 40 cm below the surface for winter wheat) fell below -31 kPa, and subirrigation was carried out by using the underdrain system one day after the set water level was reached. An increase in grain yields of soybeans and winter wheat was observed both in our experimental fields under experimental irrigation conditions in which rainfall was excluded as well as in subirrigation tests conducted at local farms. In addition, we calculated the number of days until the matric potential in the root zone returned to -31 kPa or less after rainfall or subirrigation. Based on these results, we proposed a method in which subirrigation is conducted more than 10 days after reaching 20 mm or more of event-wise precipitation for soybean fields and more than 15 days after 20 mm or more of event-wise precipitation for winter wheat fields.

Our results clarified the soil physical conditions necessary to increase the productivity of upland field crops under paddy field soil conditions by analyzing specific properties that limit crop production. Additionally, we established index values for improving soil physical conditions and proposed simple methods for evaluating these properties. After assessing field conditions using the newly established index values, technologies for improving soil physical properties and drainage can be used to create suitable soil conditions for the cultivation of field crops in paddy fields. Furthermore, in response to soil and climatic conditions prone to drought and moisture damage, irrigation and drainage technologies using existing irrigation and drainage facilities were developed as a farmer-friendly method dependent on field consolidation conditions.

These newly established soil and water control technologies are expected to increase upland field crop production in paddy fields.