

〔農工研技報 214〕
209～220, 2013〕

直径45cmの円筒を用いたシリンダーインテークレート 試験による転換畑の排水性評価

福本昌人*

*農村基盤研究領域資源情報担当

キーワード：シリンダーインテークレート試験, 転換畑, 透水性, 亀裂, 土壌水分張力

I 緒言

農林水産省は、新たな食料・農業・農村基本計画（平成22年3月30日閣議決定）において、「水田の有効活用による麦・大豆の生産拡大を実現する農地の排水対策を重点的に推進する」という施策を掲げている。転換畑において麦、大豆等の畑作物を安定的に栽培する上で、圃場の排水性が良好であることが重要（古畑ら、2011）であるためである。圃場の排水性が不良である場合には、暗渠の施工が有効であることから、長年にわたって土地改良事業で暗渠排水の整備が進められてきている。しかし、整備が行われていても、老朽化等により暗渠排水の機能低下が生じている地区が見られるようになり、暗渠排水の機能回復が大きな課題になっている（北川、2012）。このため、農林水産省は、平成23年度に汎用化水田機能再生支援事業を立ち上げ、暗渠排水の機能低下要因の簡易な診断手法の確立等を進めている。本研究は、その診断手法の確立に資するものである。

水田を畑転換すると、土壌の乾燥化が進み、下層土に亀裂が発達しやすくなる。暗渠が施工されている場合には、その亀裂は暗渠への水みちとして機能し、特に粘土質な転換畑ではその亀裂の発達状況が暗渠排水特性に大きく影響している（足立ら、2002）。そのため暗渠排水の機能診断を行う際には、亀裂の影響を反映した下層土の透水性の試験データが基礎資料として必要になる。

土壌の透水性の良否は、室内透水試験による飽和透水係数の測定値をもとに論じられることが多い。その試験は、一般に100cc採土円筒に採取した直径5cmの小さな土壌サンプルを用いて行われているが、例えば、亀裂が井桁状に20cm間隔で発達している場合には、圃場を代表しうるデータを得ようとすると直径50～60cmの大きな土壌サンプルを用いる必要がある（井上、1994）。しかし、そのような大きな土壌サンプルを採取して室内透水試験を行うのは実用的ではない。

現地で透水性を調べる方法に、オーガーで掘った孔に注水して現場透水係数を測定するドライオーガーホール

法と呼ばれる現場透水試験や、土中に打ち込んだ円筒の内側に湛水して水の浸入速度（インテークレート）を測定するシリンダーインテークレート試験がある（土壌物理性測定法委員会編、1972）。ドライオーガーホール法は、孔の直径が一般に10cm程度で測定スケールはそれほど大きくはなく、また、掘孔時に孔壁が練り返されて亀裂の開口部がつぶれてしまうという問題があり（永石、1981）、亀裂が発達した圃場には適用が難しい。シリンダーインテークレート試験も、よく用いられている直径30cmの円筒は亀裂等の粗孔隙を有する土壌に対しては十分なサイズではないと言われている（佐久間・増谷、1989）。しかし、シリンダーインテークレート試験は、掘孔を行わないため亀裂部がつぶれてしまうという問題がないことから、径の大きい円筒を用いて、大きな測定スケールで試験を行えば、亀裂が発達した圃場にも適用が可能である。

シリンダーインテークレート試験は、一般には、普通畑の畑地灌漑計画の際に行われる試験として知られており、普通畑においては、試験結果に与える測定条件の影響等、適用に関する検討がいくつか行われている（例えば、島田・加納、1988；翁長ら、1993）。しかし、転換畑においては、弾丸暗渠の排水効果の持続性に関する調査（冠ら、2007）や、シリンダーインテークレート試験で求まるベーシックインテークレートと転換畑の大豆収量との関係の調査（塚本ら、2008）等で利用されているものの、適用に関する検討はまだ十分に行われていない。

そこで、本研究では、転換畑の排水性診断手法の一つとしてシリンダーインテークレート試験のさらなる活用を図るため、土性の異なる3つの転換畑においてシリンダーインテークレート試験を適宜行い、下層土の土壌水分条件が試験結果に与える影響等を調べた。また、シリンダーインテークレート試験が終了してから24時間後に円筒内の深さ10cmの土壌水分張力を測定する、という付加的な試験を考案・実施した。その試験は、下層土の影響を反映した作土の排水特性を把握するための試験（以下、作土排水特性試験と称する）である。

II 調査方法

1 調査圃場の概要

調査は、農村工学研究所の構内にある3つの水田ライシメータ圃場（30m×70m区画、有底）において2011年7月～10月と2012年7月～8月に行った。圃場はコンクリート側壁で囲まれ、ビニールシート（敷設位置は深さ62～65cm）の上にそれぞれ火山灰土、沖積粘土、沖積壤土が充填されている（以下、それぞれを火山灰土圃場、沖積粘土圃場、沖積壤土圃場と称する）。

火山灰土圃場と沖積壤土圃場では、10年間以上水稻が作付けられた後、2008年から作付けは行われていない（つまり調査年は畑転換後3～4年目）。沖積粘土圃場では、10年間以上水稻が作付けられた後、2006年～2008年の3年間に大豆が作付けられ、2009年から作付けは行われていない（つまり調査年は畑転換後6～7年目）。

各圃場とも暗渠が施工されていて、大雨時にはコンクリート側壁から突き出ている暗渠末端のパイプから多量の排水が見られる。その排水は、圃場造成時（1977年）に長辺に沿って圃場中央に埋設された暗渠管を通じたものではなく、それ以降に施工された暗渠管を通じたものと考えられるが、施工記録が残っていないため、その暗渠管の埋設位置は不明である。

調査に先立って2010年11月に各圃場に弾丸暗渠（無材）を深さ25～35cmに施工し、その施工位置を測量した。一般には弾丸を1個のみ装着した施工機が用いられるが、ここでは、2個の弾丸を1.5m離して装着した2連式の施工機を用い、その施工機（トラクターで牽引）による弾丸暗渠の2本同時施工（その2本の施工間隔が1.5m）を3m間隔で行った。そのため、弾丸暗渠の各施工ラインは、隣接する2つの施工ラインとそれぞれ1.5m、3m離れている（つまり、施工ラインに端から順に通し番号をつけると、1番目と2番目の施工ラインの間隔は1.5m、2番目と3番目の施工ラインの間隔は3m、3番目と4番目の施工ラインの間隔は1.5m、4番目と5番目の施工ラインの間隔は3m、・・・）。また、2011年6月9日と2012

年4月26日に各圃場の一部をアップカットロータリーで耕起し、除草剤を適宜散布して裸地状態（多少雑草あり）とした。なお、耕起エリアの作土の厚さは、火山灰土圃場と沖積壤土圃場が18cm、沖積粘土圃場が16cmであった。

2 土壌の物理性

作土から土壌を採取し、粒径組成（国際土壌学会法）をピペット法で測定して土性を判定した。また、作土（深さ10cm）と下層土（深さ30cm）から土壌を100cc採土円筒に各5点採取し、乾燥密度、飽和透水係数（室内透水試験；変水位法）、粗孔隙量・有効水分量（加圧板法）を測定した。さらに、下層土に亀裂が発達しているか否かを確認するため、下層土が乾燥していた時に、作土を少し剥いでから直径45cmの円筒を打ち込み、円筒内に水で薄めた白色ペイントを注水して一日後に掘削しながら着色状態を観察した。

3 シリンダーインタークレート試験

耕起エリアの弾丸暗渠施工ライン上および同ラインから1.5m離れた地点（3m離れた2本の同ラインの中間地点）において、円筒の設置場所を毎回変えて適宜、シリンダーインタークレート試験を行った。Fig.1にその試験の状況を示す。試験には直径45cmの鉄製の円筒を用いた。その円筒は、直径30cmの円筒の周囲に緩衝池を設けるためにオプション（外枠シリンダ）として市販（大起理化工業、DIK4200-51）されているものである。その円筒を、Fig.1(a)のように、専用の打ち込み板（同、DIK4200-52）とランマー（同、DIK4200-15）を用いて下層土に達するまで打ち込み（打ち込み深は21～23cm）、緩衝池を設けずに円筒内の一気に注水した。そして、適宜給水（水の補給）を行いながら65分間湛水（湛水深は3cm～7cm）を行った。

2011年の試験では、Fig.1(b)のように、円筒内にフロート式水位計（ウイジン、UIZ-GY030）を設置して30秒毎に水位を自動計測し、30秒間の各時間帯の浸入量（水

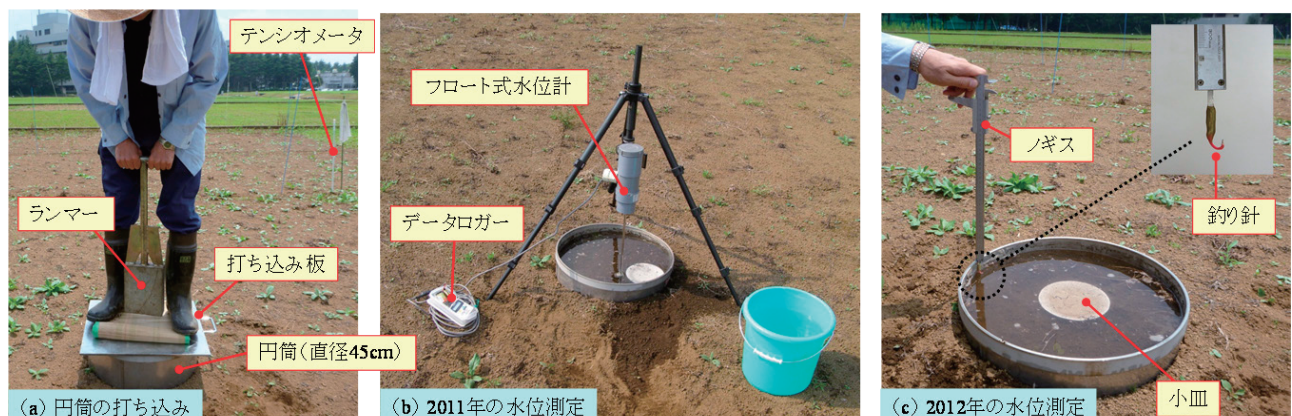


Fig.1 シリンダーインタークレート試験の状況
Photograph of the cylinder intake rate tests

位低下量)を求めた。なお、給水を行った時間帯の浸入量については、その一つ前の時間帯の浸入量と一つ後の時間帯の浸入量の平均値を与えた。そして、その浸入量のデータを用いて、湛水開始から湛水開始65分後までの5分間毎のインタークレート(インタークレートの経時変化を調べるために計算)、および、湛水開始55分後から65分後までの10分間のインタークレート(以下、60分後のインタークレートと称する)を求めた。また、湛水開始から湛水開始65分後まで5分刻みで積算浸入量を求めて、ベーシックインタークレート(インタークレートの変化率がインタークレートの10%になった時のインタークレート)の計算も行った。具体的には、まずその積算浸入量の実測データを用いて、湛水開始からの経過時間(T , min)と積算浸入量(D , mm)の関係を表す式(1)の係数 c 、 n の値を決定し、次にそれらの値を式(2)に代入してベーシックインタークレート(I_b , mm/h)を算出した(岩間・奥山, 1988)。

$$D = cT^n \quad (1)$$

$$I_b = 60cn [600(1-n)]^{n-1} \quad (2)$$

2012年の試験では、Fig.1(c)のように、釣り針を取り付けたノギスを用いて、湛水開始55分後と65分後に水位を測定し(ただし、水位低下が速い場合には、65分後になる前に水位測定を実施)、60分後のインタークレートのみを求めた。

4 下層土の土壤水分張力の測定

耕起エリアの深さ30cm(1地点)に簡易なテンシオメータを設置し、シリンダーインタークレート試験時に下層土(深さ30cm)の土壤水分張力を測定した。Fig.2にその状況を示す。測定方法は、長谷川・粕淵(1988)の方

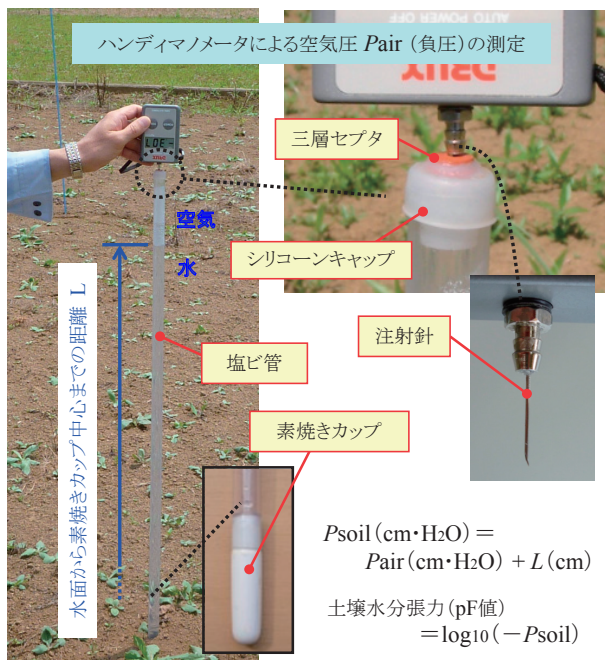


Fig.2 土壤水分張力測定の様相
Photograph of measuring the soil moisture suction

法に準拠したもので、次の通りである(福本, 2013)。素焼きカップを取り付けた透明の塩ビ管を、素焼きカップが所定の深さに位置するように鉛直に設置し、管内に水を注いで一部空気を残してシリコンキャップ(二重栓)を取り付ける。シリコンキャップには、ガスクロ用の三層セプタ(HAMILTON, 76004)をシーリング剤(信越シリコン, KE42T)で接着している。注射針を取り付けたハンディマノメータ(コパル電子, PG100)を用い、Fig.2のように、その注射針を三層セプタを通じてシリコンキャップに突き刺して、管内の空気圧(負圧)を測定する。その測定値と管内の水面から素焼きカップ中心までの距離を用いて土壤水分張力を算出する(Fig.2にその計算式を示した)。

5 作土排水特性試験

Fig.3に作土排水特性試験の様相を示す。シリンダーインタークレート試験が終わり次第、円筒内から水を除去し、前節に記した簡易なテンシオメータを円筒中心の深さ10cmに設置した。そして、円筒にビニール袋を被せて土壌面蒸発を抑制した状態で放置し、24時間が経過してから、ビニール袋をはがして数分後に作土(深さ10cm)の土壤水分張力を測定した。その際に前節に記した下層土(深さ30cm)の土壤水分張力の測定もあわ



24時間後



Fig.3 作土排水特性試験の様相
Photograph of the tests to examine drainage properties of plowed soil

Table 1 土壌の物理性
Physical properties of the soil of the study fields

		火山灰土圃場	沖積粘土圃場	沖積壤土圃場
作土厚		18 cm	16 cm	18 cm
土性(砂,シルト,粘土)		SiL (42%, 47%, 11%)	HC (35%, 19%, 46%)	L (48%, 38%, 14%)
乾燥密度	深さ 10cm	0.60 g/cm ³	1.18 g/cm ³	1.21 g/cm ³
	深さ 30cm	1.01 g/cm ³	1.47 g/cm ³	1.53 g/cm ³
飽和透水係数	深さ 10cm	2×10^{-2} ($1 \times 10^{-2} \sim 4 \times 10^{-2}$) cm/s	4×10^{-2} ($3 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$) cm/s	2×10^{-3} ($5 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3}$) cm/s
	深さ 30cm	2×10^{-4} ($5 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^{-4}$) cm/s	2×10^{-7} ($6 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-7}$) cm/s	4×10^{-4} ($4 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-3}$) cm/s
粗孔隙量 (pF1.5以下)	深さ 10cm	30.3 %	13.9 %	17.4 %
	深さ 30cm	12.2 %	3.0 %	6.0 %
有効水分量 (pF1.5~pF3)	深さ 10cm	11.3%	9.3 %	10.2 %
	深さ 30cm	7.8 %	3.6 %	6.3 %

※ 乾燥密度、飽和透水係数(変水位法)、粗孔隙量・有効水分量(加圧板法)は、100cc土壌サンプルを用いた5点の測定値の平均値
 ※ 飽和透水係数の()内は、5点の測定値の最小値~最大値

せて行った。なお、試験位置(シリンダーインタークレート試験と同じ位置)は、弾丸暗渠施工ライン上および同ラインから1.5m離れた地点である。

III 結果と考察

1 土壌の物理性

Table 1に耕起エリアの土壌の物理性を示す。土性は、火山灰土圃場がSiL(シルト質壤土)、沖積粘土圃場がHC(重埴土)、沖積壤土圃場がL(壤土)であった。

作土(深さ10cm)の飽和透水係数(5点平均値)は、各圃場とも $10^3 \sim 10^2$ cm/sオーダーと非常に大きかった。また、下層土(深さ30cm)の飽和透水係数は、火山灰土圃場と沖積壤土圃場では 10^4 cm/sオーダーとやや大きかったが、沖積粘土圃場では 10^7 cm/sオーダーと非常に小さかった。

白色ペイントの着色状態を観察した結果、火山灰土圃場と沖積粘土圃場では下層土に亀裂が確認されたが、沖積壤土圃場では下層土に亀裂は確認されなかった(植物根が集まっていた大孔隙群が不定形かつ柱状に着色)。

2 インタークレートの経時変化

一般にインタークレートは、時間の経過とともに小さくなり、やがてほぼ一定になる。Fig.4にインタークレートの経時変化(2011年)を示す。沖積壤土圃場では、湛水開始直後に大きな値を示してもすぐに大きく減少し、かつ、ほとんどの場合において湛水開始からわずか10分程度で経時的な減少は非常に緩やかになった。火山灰土圃場でも、ほとんどの場合において湛水開始からわずか10分程度で経時的な減少は非常に緩やかになったが、沖積壤土圃場のように、湛水開始直後に大きな値を示してもすぐに大きく減少するという事はなかった。沖積

粘土圃場では、弾丸暗渠施工ライン上で行った7月13日の試験において他の試験と大きく異なる変化が見られ、湛水を行っている間、インタークレートは大きく減少し続けた(湛水開始後25分間は、水の補給が追いつかずインタークレートは測定できなかった)。

なお、2011年7月11日と2011年7月13日の試験に限り、試験終了24時間後(作土排水特性試験終了直後)に再度円筒に注水して同じ位置で再試験(2回目の試験)を行った。Fig.5にその結果を示す。特に沖積粘土圃場では、2回目にはインタークレートは湛水開始直後から1回目よりかなり小さい値で推移した。沖積粘土圃場では、亀裂(弾丸暗渠孔上部の施工亀裂を含む)がインタークレートに大きく関与している。その亀裂が、作土の土粒子の流下により目詰まりしたり、下層土の膨潤により縮小あるいは閉塞したりしたためにそのような結果になったと考えられる。

3 ベーシックインタークレート

経時的な減少がほとんどなくなって、ほぼ一定になった時のインタークレートの値がベーシックインタークレートである。しかし、インタークレートがほぼ一定になるまでに一般に長時間を要するため、便宜上、II.3に記したように、短時間(1時間程度)の積算浸入量の実測データを用いてベーシックインタークレートの算出が行われている(岩間・奥山, 1988)。

Fig.6に、ベーシックインタークレート(I_b)の計算値と60分後のインタークレート(I_{60})の測定値との比較(2011年)を示す。本来ならば I_b は I_{60} の値以下になるはずであるが、火山灰土圃場では I_{60} の測定値の方が I_b の計算値よりも小さかった。岩間・奥山(1988)は、ベーシックインタークレートの問題点を指摘し、普通畑の土壌診断においては、 I_{60} や60分間の積算浸入量といった、実

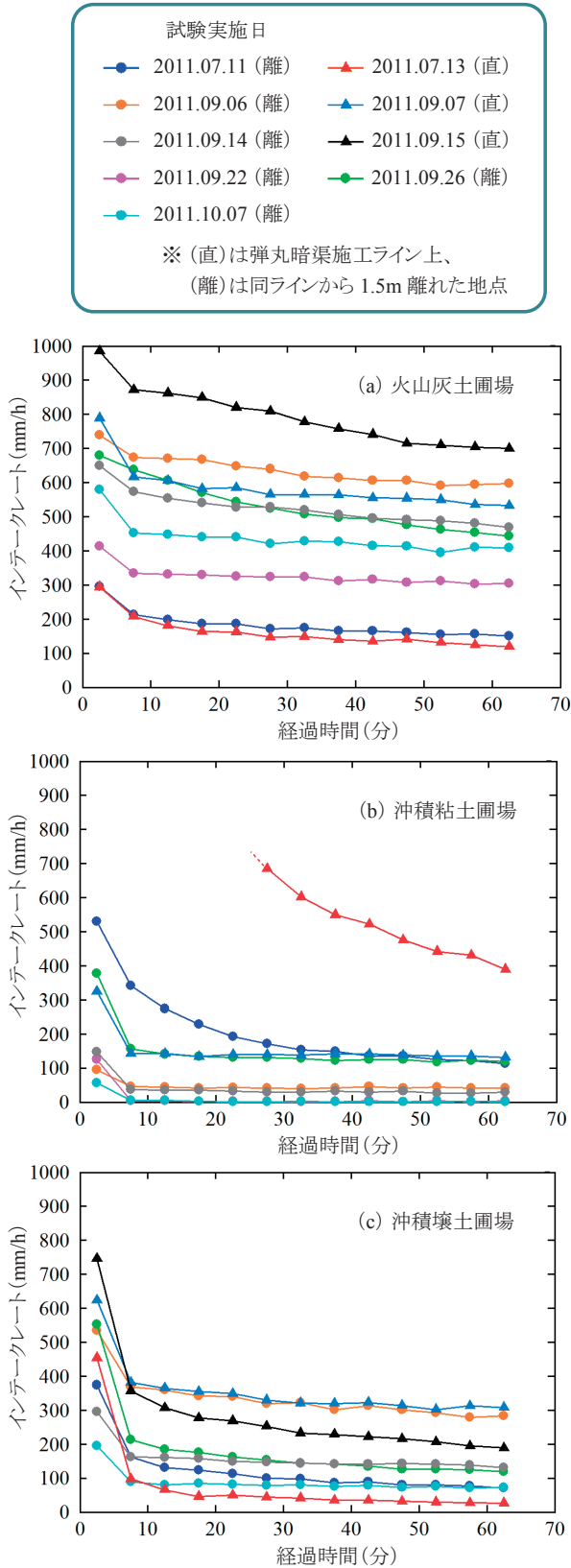


Fig.4 インタークレートの経時変化 (2011年)
Changes in the intake rate over time (2011 year)

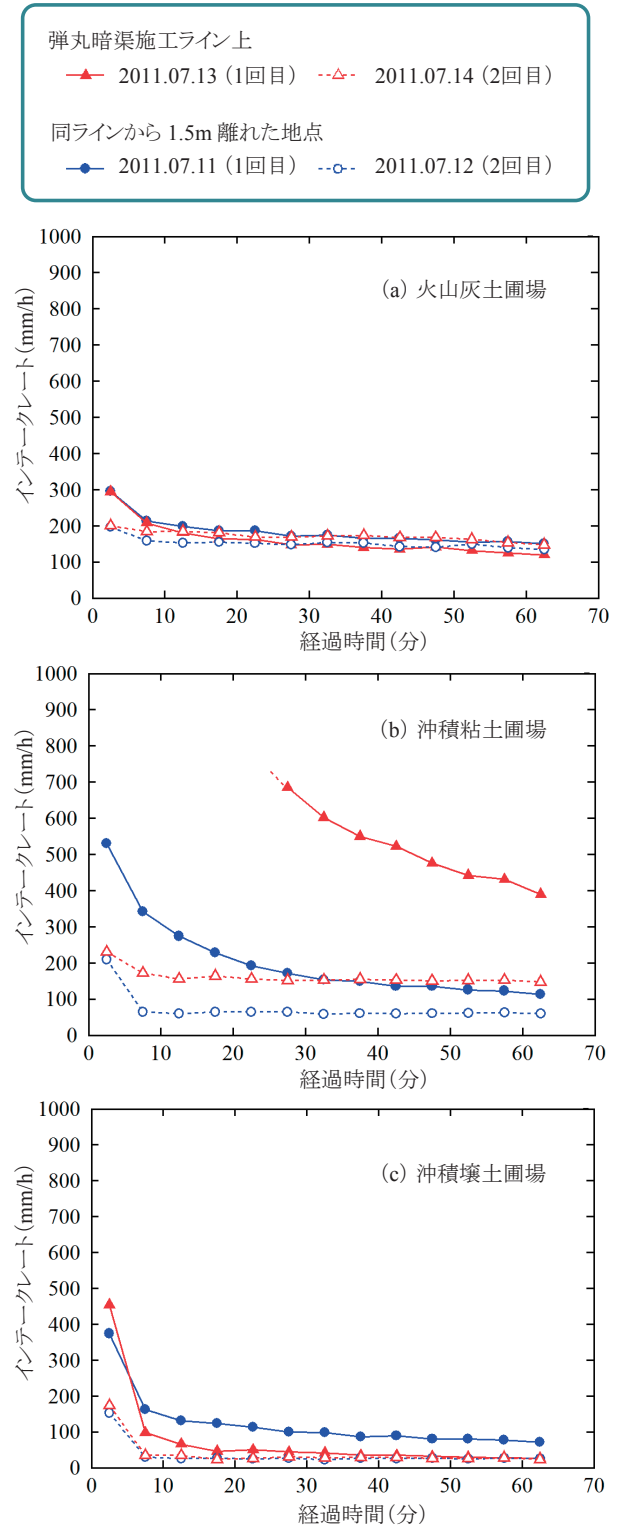


Fig.5 24時間後に同じ位置でシリンダーインタークレート試験を繰り返して行った結果
Results of the cylinder intake rate tests repeated at the same positions 24 hours after the cylinder intake rate tests

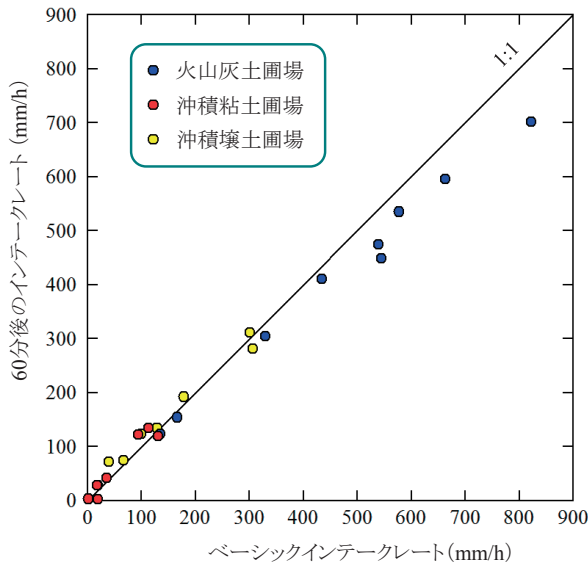


Fig.6 ベーシックインテークレートと60分後のインテークレートの測定値との比較 (2011年)

Comparison between the calculated values of the basic intake rate and the measured values of the intake rate after 60 minutes of flooding

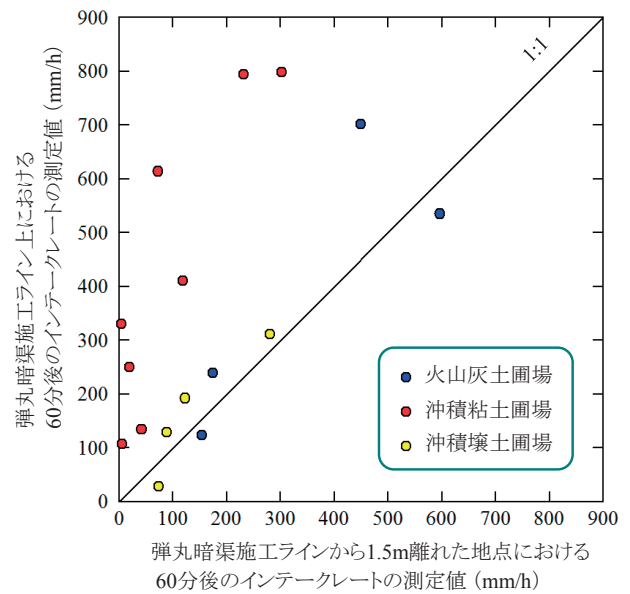


Fig.7 弾丸暗渠施工ライン上における60分後のインテークレートの測定値と同ラインから1.5m離れた地点における測定値との比較

Comparison of the measured values of the intake rate after 60 minutes of flooding between the positions of the lines with a mole drain constructed and at 1.5 m from the lines

Table 2 下層土の土壌水分張力と60分後のインテークレートの測定値
Measured values of the soil moisture suction (at 30 cm in depth) of the subsoil and the intake rate after 60 minutes of flooding

実施日	火山灰土圃場			沖積粘土圃場			沖積壤土圃場			備考
	深さ30cmの土壌水分張力(pF)	試験位置	60分後のインテークレート(mm/h)	深さ30cmの土壌水分張力(pF)	試験位置	60分後のインテークレート(mm/h)	深さ30cmの土壌水分張力(pF)	試験位置	60分後のインテークレート(mm/h)	
2011.07.11	2.72	離	154	1.77	離	119	2.40	離	74	
2011.07.13	2.81	直	123	2.25	直	410	2.59	直	28	
2011.09.06	1.54	離	596	1.11	離	42	1.46	離	281	
2011.09.07	1.58	直	535	1.00	直	134	1.48	直	311	
2011.09.14	2.35	離	449	1.30	離	122	2.21	離	123	
2011.09.15	2.31	直	702				2.33	直	192	
2011.09.22	0.48	離	304	0.30	離	3				前日に127mmの降雨あり
2011.09.26	1.62	離	475	1.16	離	28	1.36	離	134	
2011.10.07	1.18	離	410	0.85	離	2	0.48	離	72	前々日に74mmの降雨あり
2012.07.25	2.26	離	175	1.67	離	6	1.70	離	89	
	2.28	直	239	1.72	直	107	1.75	直	129	
2012.07.26	2.37	離	394	1.64	離	4	1.78	離	90	
				1.70	直	330				
2012.07.30	2.73	離	509	1.77	離	20	2.26	離	96	
				1.79	直	250				
2012.08.02	2.87	離	169	1.91	離	73	2.61	離	52	
				1.92	直	614				
2012.08.06				2.47	離	232				
				2.47	直	794				
2012.08.08				2.48	離	308	2.88	離	21	
				2.52	離	302				
2012.08.09				2.52	直	798				
				2.84	離	485				

※ 試験位置の「直」は弾丸暗渠施工ライン上、「離」は同ラインから1.5m離れた地点

測値に基づく指標を用いることが適当であると述べている。①火山灰土圃場では I_{60} の測定値の方が I_b の計算値よりも小さかったこと、②沖積粘土圃場と沖積壤土圃場では I_{60} の測定値と I_b の計算値はほぼ等しかったこと (Fig.6)、および、③ I_{60} を求める方が試験が簡易であることから、転換畑の透水試験においても、計算値であるベーシックインタークレートではなく、実測値である I_{60} を排水性の指標にする方が良いと判断される。

4 試験位置による60分後のインタークレートの違い

Table 2に、下層土(円筒外;深さ30cm)の土壌水分張力の測定値と60分後のインタークレート (I_{60}) の測定値を実施日・試験位置別に示す。2011年は頻繁に雨が当たったため、沖積粘土圃場では下層土が十分に乾いた時の I_{60} の測定値は得られなかったが、2012年は雨が少なく、沖積粘土圃場でも下層土が十分に乾いた時(pF2.47 (28.9kPa) ~ pF2.84 (67.8kPa))の I_{60} の測定値を得ることができた。

弾丸暗渠施工ライン上での試験は、同ラインから1.5m離れた地点で試験を行った日、またはその1~2日後に行った。そこで、弾丸暗渠施工ライン上における I_{60} の測定値(A)を、同日または1~2日前に得た、同ラインから1.5m離れた地点における測定値(B)と比較した。Fig.7にその比較を示す。沖積粘土圃場では、試験位置によって測定値が大きく異なっていたが(AとBの比は2.6~82.5)、火山灰土圃場と沖積壤土圃場では試験位置による差は小さかった(AとBの比は火山灰土圃場が0.8~1.6、沖積壤土圃場が0.4~1.6)。このことから、火山灰土圃場と沖積壤土圃場では、2010年11月に行った弾丸暗渠施工の排水性改善の効果は翌年まで持続していなかったと考えられる。このため以下では、沖積粘土圃場の試験結果のみを試験位置によって区別することにする。

5 下層土の土壌水分条件が60分後のインタークレートに与える影響

Fig.8に、下層土(円筒外;深さ30cm)の土壌水分張力と60分後のインタークレート (I_{60}) の関係を示す。図中のラインはフリーハンドで描いたものである。

火山灰土圃場と沖積壤土圃場では、両者の間に明瞭な関係は見られなかったが、下層土がpF2.5 (31.0kPa)以上になると I_{60} の測定値は小さくなるという傾向が見られた。下層土が非常に乾燥している時に円筒内に注水すると、多くの空気が土壤中に封じ込まれやすくなること(その結果、水移動に有効な間隙量が少なくなる)が、このことに関係していると考えられる。

一方、沖積粘土圃場では、弾丸暗渠施工ライン上、同ラインから1.5m離れた地点とも、下層土のpF値が大きくなるほど I_{60} の測定値も大きくなるという傾向が見られた。これは、下層土の亀裂が沖積粘土圃場のインター

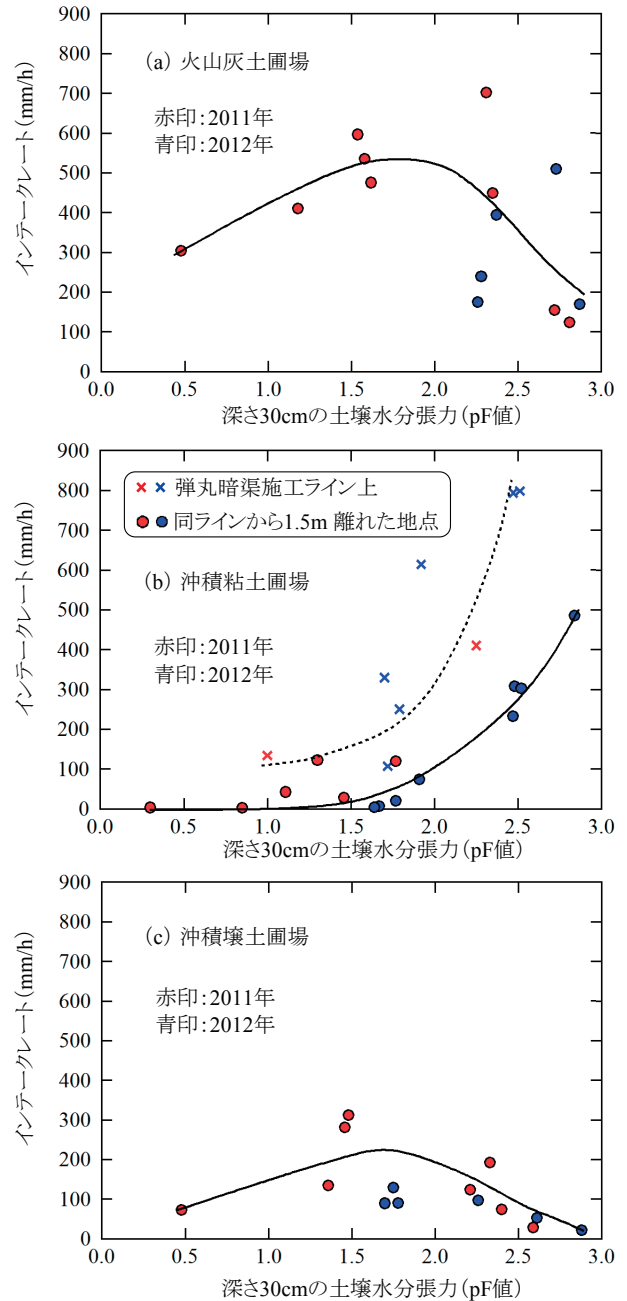


Fig.8 下層土の土壌水分張力と60分後のインタークレートの関係

Relationship between the soil moisture suction of the subsoil and the intake rate after 60 minutes of flooding

クレートに大きく関与するとともに、その亀裂の発達の程度(亀裂幅や亀裂の発生密度)が下層土の乾湿に伴って(下層土の膨潤・収縮により)大きく変化しているためであると考えられる。また、下層土のpF値がほぼ同じ時に、弾丸暗渠施工ライン上の I_{60} の測定値の方が同ラインから1.5m離れた地点の I_{60} の測定値よりも大きな値を示した。このことには、亀裂と弾丸暗渠の連結に加えて、同ライン上の方が亀裂が強く発達していたことが関係していると考えられるが、定量的なことは不明である。さらに、下層土がpF0.5 (0.3kPa)前後の時に、弾丸暗渠施工ラインから1.5m離れた地点の I_{60} の測定値

は2~3mm/hと非常に小さな値を示した。同じ状態の時に火山灰土圃場の I_{60} の測定値は304mm/hと大きな値を示したことから、このことには、下層土が飽和に近い状態で水の流れの駆動力である動水勾配が小さかったことよりも、1~2日前にあった多量の降雨によって亀裂が閉塞してしまっていたことの方が強く関係していると考えられる。沖積粘土圃場では、下層土の透水性自体が亀裂の発生・消失に伴って日々変化していることに留意する必要がある。

6 亀裂の発達した下層土の透水性評価

井上(1988)は、本研究で供試した沖積粘土圃場において、圃場内に設けた大型の不攪乱土壌ブロックを用いて透水試験を行い、亀裂がよく発達した下層土の飽和透水係数は 10^{-2} cm/sオーダーと非常に大きな値であったと述べている。一方、シリンダーインテークレート試験でも、沖積粘土圃場の弾丸暗渠施工ラインから1.5m離れた地点で、下層土がpF2.84(67.8kPa)と非常に乾燥した時に I_{60} の測定値は485mm/h(1×10^{-2} cm/s)と非常に大きな値を示した(Fig.8)。シリンダーインテークレート試験による I_{60} の測定値を飽和透水係数に換算することは難しいので、両者を直接比較することはできないが、非常に大きな I_{60} の測定値を得ることができたことから、直径45cmの円筒を用いてシリンダーインテークレート試験を行えば、亀裂の発達した下層土の透水性を評価することができるかと判断される。

7 円筒の大きさ

冠ら(2007)は、弾丸暗渠の排水効果の持続性に関する調査において、シリンダーインテークレート試験による、湛水開始30分後から60分後までの30分間のインテークレートの測定値を透水性の指標として用いている。その試験では、直径30cmの円筒が用いられているが、測定は3箇所で行われ、3点の測定値の平均値が指標として用いられている。

本研究では、直径30cmの円筒を用いた試験は行っていないが、直径30cmの円筒を用いても、彼らのように測定数を増やせば、沖積粘土圃場における亀裂の発達した下層土の透水性を評価できる可能性がある。直径30cmの円筒を用いた3点の測定値の平均値と、直径45cmの円筒を用いた1点の測定値のどちらが圃場の代表値として適しているかについては、ここでは議論できないが、①直径45cmの円筒を用いる方が測定数が少なくても安定したデータが得られる可能性が高いこと、および、②直径45cmの円筒は打ち込み板とともに市販されていることから、特に粘土質な転換畑でシリンダーインテークレート試験を行う際には、直径45cmの円筒の方が有用であると考えられる。

8 下層土内での水平浸潤

シリンダーインテークレート試験では、水の浸潤が鉛直方向と仮定して測定が行われているが、浸潤水が円筒を通過すると水平方向への浸潤も始まる。この水平浸潤を抑制するために通常、円筒の周囲に緩衝池が設けられるが、緩衝池の幅が10cm程度と小さい場合には、緩衝池を設けても水平浸潤の抑制効果はほとんど期待できないと言われている(島田, 1988; 翁長ら, 1993)。本研究では、①円筒を下層土に達するまで打ち込んでいるため、作土層内で水平浸潤が生じる心配がないこと(実際、試験が終わって円筒をスコップで掘り出す時に、作土層内で水平浸潤が生じていた形跡は観察されなかった)、②試験が簡易になること、および、③次に述べるように転換畑では下層土内での水平浸潤が重要であることから、緩衝池は設けなかった。

円筒を下層土に達するまで打ち込んでいるので、水平浸潤は下層土内で生じるが、沖積粘土圃場では、そのほとんどは亀裂を通じて行われていると考えられる。すなわち、設置した円筒の直下にある下層土の部分(円領域)に亀裂があれば、浸潤水はその亀裂に入り込み、亀裂の底に達してから(それ以深に鉛直方向に移動することなく)亀裂の内部を水平方向に移動していると考えられる。ここで、その亀裂が周囲の亀裂と連結していなければ、その亀裂が満水になった時点で水の浸入は止まってしまうであろう。したがって、沖積粘土圃場で大きな I_{60} の測定値が得られた時には、下層土内に連続した亀裂がよく発達している、つまり、暗渠までの水みちが十分に形成されていると判断できる。暗渠までの水みちが十分に形成されていないと、暗渠排水が十分に機能しないので、暗渠排水の機能低下の原因を検討する際に I_{60} の測定値は大いに役立つであろう。

9 ドライオーガーホール法

参考までに、シリンダーインテークレート試験で485mm/hと非常に大きな I_{60} の測定値を得た直後に、その測定地点(沖積粘土圃場の弾丸暗渠施工ラインから1.5m離れた地点)の近傍の3地点でドライオーガーホール法(直径10cm、深さ50cmのオーガー孔に深さ20cmまで注水し、1時間後に水位低下速度を測定)による現場透水試験を行ってみた。その結果、現場透水係数の測定値は最小値が 9×10^{-6} cm/s、最大値が 7×10^{-5} cm/s、平均値が 3×10^{-5} cm/sであり、小さい値しか得られなかった。このことから、ドライオーガーホール法では亀裂の発達した下層土の透水性を評価することはできないと判断される。

10 作土排水特性試験の結果

Fig.9に作土排水特性試験の結果を示す。シリンダーインテークレート試験終了24時間後に測定した円筒内の作土(深さ10cm)の土壌水分張力(S_{24})を縦軸にとり、

その測定時の下層土（円筒外；深さ30cm）の土壤水分張力を横軸にとっている。図中のラインはフリーハンドで描いたものである。

S_{24} の測定値は、火山灰土圃場では、下層土がpF1.5 (3.1kPa) 未満の時を除くとpF1.8 (6.2kPa) 前後、沖積粘土圃場では、試験位置によらずpF1.3 (2.0kPa) 前後、沖積壤土圃場ではpF1.5 (3.1kPa) 前後であり、火山灰土圃場、沖積壤土圃場、沖積粘土圃場の順に大きかった。この S_{24} の測定値は、24時間容水量（十分な灌水または雨水が供給された後、ほぼ24時間経過後に土壤中に保留される水分量）に対応する土壤水分張力にほぼ相当していると考えられる。

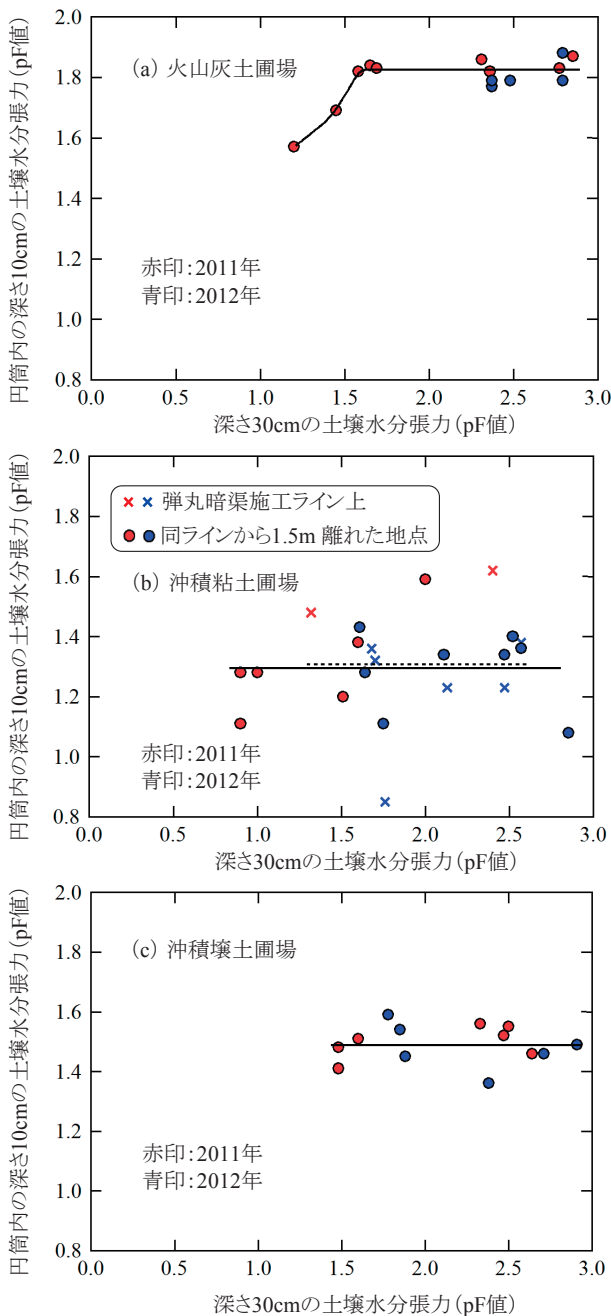


Fig.9 作土排水特性試験の結果

Results of tests to examine the drainage properties of plowed soil

11 排水性の評価指標

下層土の亀裂は、飽和状態の時に水みちとして機能し、特に沖積粘土圃場では暗渠を通じた地下排水に大きく寄与する。しかし、地下排水が進んで下層土が不飽和状態になると、亀裂は水みちとして機能しなくなり、土壤水は土壤マトリックス（基質）内のみを移動するようになる。そのため、亀裂が発達していても、下層土の不飽和時の透水性が不良であると、大雨の後、曇天が続いて土壤面からの蒸発がほとんどなければ、作土内に過剰水の一部がしばらく残留し、過湿状態がやや長く続くことになる。したがって、作物生育の面から圃場の排水性を評価しようとするならば、大雨があっても冠水が生じにくいかなどという点だけでなく、大雨後に作土の過湿状態が長く続くことがないかなどという点についても検討する必要がある。その後者の点に作土排水特性試験が関係している。

Fig.10に、シリンダーインタークレート試験の結果と作土排水特性試験の結果の組み合わせを示す。横軸に60分後のインタークレート (I_{60})、縦軸にシリンダーインタークレート試験終了24時間後に測定した円筒内の作土の土壤水分張力 (S_{24}) をとり、下層土（円筒外；深さ30cm）の土壤水分張力がpF2.0以上であった時の測定値のみをプロットしている。 I_{60} と S_{24} は、下層土のそれぞれ飽和時、不飽和時の透水性に対応していると考えられる。すなわち、①火山灰土圃場は I_{60} 、 S_{24} とも大きく、下層土の透水性は飽和時、不飽和時とも良好であること、②沖積粘土圃場（ただし、亀裂が閉塞していない

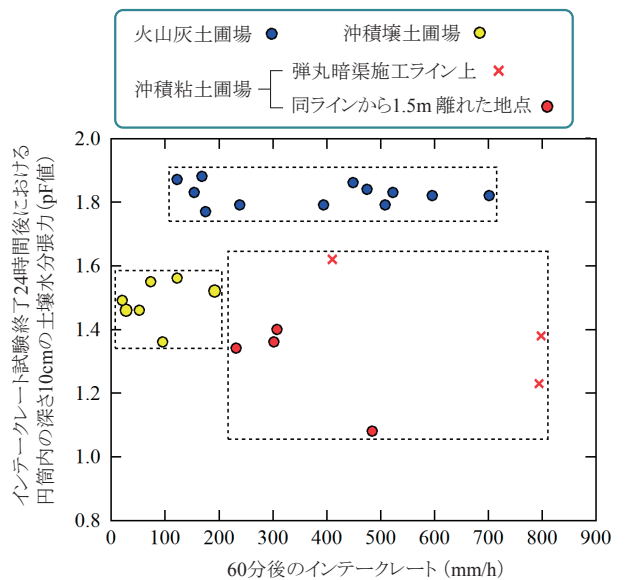


Fig.10 インタークレート試験の結果と作土排水特性試験の結果の組み合わせ（深さ30cmの土壤水分張力がpF2.0以上の時の測定値）

Combination of the results of the cylinder intake rate tests and the results of the tests to examine drainage properties of plowed soil. Only data obtained when the soil moisture suction of the subsoil was more than pF 2.0 are plotted.

時)は I_{60} は大きい、 S_{24} は小さく、下層土の透水性は飽和時には良好であるが、不飽和時には不良であること、③沖積壤土圃場は I_{60} 、 S_{24} ともやや小さく、下層土の透水性は飽和時、不飽和時ともやや不良であることが伺える。直径45cmの円筒を用いてシリンダーインテークレート試験と作土排水特性試験を行って I_{60} と S_{24} を測定することにより、それらの測定値を評価指標にして転換畑の排水性の良否が評価できると考えられる。今後、試験事例を重ねて、それらを評価指標とした場合の排水性の定量的な判断基準について検討していく必要がある。

VI 結 言

本研究では、土性の異なる3つの転換畑においてシリンダーインテークレート試験を適宜行い、下層土の土壤水分条件が測定値(湛水開始60分後のインテークレート)に与える影響等を明らかにした。また、シリンダーインテークレート試験の測定値と、シリンダーインテークレート試験に引き続いて実施する作土排水特性試験の測定値との組み合わせを排水性の評価指標として提案した。シリンダーインテークレート試験には直径30cmの円筒がよく用いられているが、本研究ではそれより一回り大きい直径45cmの円筒(市販品)を用いた。特に粘土質な転換畑でシリンダーインテークレート試験を行う際には、直径30cmの円筒よりも直径45cmの円筒の方が有用であると考えられたが、データに基づいた比較検討は行っていない。その比較検討については今後行う予定である。

亀裂を含む下層土の透水性の評価は、転換畑の暗渠排水に関する調査のほか、暗渠を利用した地下灌漑に関する調査においても重要である(福本ら、1991;福本ら、1992)。直径45cmの円筒を用いたシリンダーインテークレート試験が、亀裂を含む下層土の透水性の標準的な調査方法として、今後、転換畑における暗渠排水の機能診断や地下灌漑の適否判定の際に活用されることを期待する。

参考文献

- 1) 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, 農業農村工学会論文集, 220, 35-41.
- 2) 土壤物理性測定法委員会編(1972):土壤物理性測定法, 168-190, 養賢堂, 東京.
- 3) 福本昌人・深山一弥・小川茂男・富田和正(1991):粘土質転換畑における地下灌漑技術, 水と土, 86, 30-39.
- 4) 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, 土壤の物理性, 64, 11-20.
- 5) 福本昌人(2013):ハンディマノメータを用いた土壤水分張力の測定方法, 農村工学研究所メールマガジン, 34(2013年1月号), http://www.naro.affrc.go.jp/nkk/mail_magazine/back_number/045376.html
- 6) 古畑昌巳・足立一日出・大野智史(2011):圃場排水性の良否が北陸地域のダイズの乾物と子実生産に及ぼす影響, 日本作物学会紀事, 80, 65-72.
- 7) 長谷川周一・粕淵辰昭(1988):携帯型デジタルマノメータ利用による土壤水分吸引圧の測定, 土壤の物理性, 58, 49-51.
- 8) 井上久義(1994):圃場の作業性と排水性-圃場の作業性評価の問題点, 土壤の物理性, 69, 75-82.
- 9) 井上久義(1988):亀裂が発達した圃場における水の横浸透, 農業土木論文集, 134, 51-59.
- 10) 岩間秀矩・奥山武彦(1988):インテーク・レート測定データ取り扱い上の問題点とその改善, 土壤の物理性, 57, 47-51.
- 11) 冠秀昭・岩佐郁夫・星信幸・加藤誠(2007):水田輪作における弾丸暗渠の排水効果持続性と施工意義, 農業農村工学会論文集, 250, 107-115.
- 12) 北川巖(2012):畑土壤に対する排水改良技術の動向, 土壤の物理性, 120, 15-20.
- 13) 永石義隆(1981):オーガーホール法による現場透水試験について, 農業土木学会誌, 49(4), 41-44.
- 14) 翁長謙良・吉永安俊・島袋進(1993):シリンダーインテークレートに関する一考察:沖縄の主要土壌について, 琉球大学農学部学術報告, 40, 77-86.
- 15) 佐久間敏雄・増谷雪雄(1989):湛水浸潤過程の水の挙動:重水をトレーサとしたインテークレート測定法の検討, 日本土壤肥料学会雑誌, 60(4), 307-312.
- 16) 島田清・加納利博(1988):シリンダーインテークレート試験における測定条件がベシックインテークレートに及ぼす影響について:湛水深の変動, 土層の初期含水状態および初期侵入量測定の誤差, 石川県農業短期大学研究報告, 18, 49-56.
- 17) 島田清(1988):シリンダーインテークレート試験における水平浸透と緩衝池について, 農業土木学会論文集, 133, 87-92.
- 18) 塚本康貴・竹内晴信・北川巖(2008):転換畑におけるダイズの生産力判定のためのシリンダーインテークレート法による土壤物理性評価, 農業農村工学会誌, 76(2), 46-47.

Evaluating the Quality of Subsurface Drainage of Upland Fields Converted from Paddy by Using Cylinder Intake Rate Tests with Cylinders of 45 cm Diameters

FUKUMOTO Masato

Summary

In order to study the application of cylinder intake rate tests in upland fields converted from paddy, cylinder intake rate tests were performed in three fields of different soil types under different conditions of soil moisture. In the tests, large single cylinders of 45 cm diameters were driven to a depth of 21-23 cm until they reached the subsoil (soil layer below 16-18 cm), and the soil surface confined by the cylinders was flooded for a period of 65 minutes. As a result, the measured values of the intake rate after 60 minutes of flooding (I_{60}) were more suitable than the calculated values of the basic intake rate as an indicator of water permeability of the subsoil. In the field of volcanic ash soil and the field of alluvial loamy soil, the values for I_{60} under very dry conditions of the subsoil were smaller than the values of I_{60} under other conditions, this appeared to be caused by an increase in air trapped in the subsoil. In the field of alluvial clayey soil, the values of I_{60} increased greatly as the subsoil dried, this appeared to be caused by development of cracks in the subsoil.

In addition, tests to examine drainage properties of plowed soil were performed after each cylinder intake rate test. In these tests, the cylinders were covered with a plastic bag to restrict evaporation from the soil surface after water had removed from the soil surface, and 24 hours after soil moisture suction of the plowed soil confined by the cylinders (S_{24}) was measured using tensiometers. The values for S_{24} were approximately pF 1.8 (6.2 kPa), pF 1.3 (2.0 kPa), and pF 1.5 (3.1 kPa) for the field of volcanic ash soil, field of alluvial clayey soil and field of alluvial loamy soil, respectively. In conclusion, the soil hydraulic properties of upland fields converted from paddy can be evaluated by measuring I_{60} and S_{24} with large single cylinders of 45 cm diameters.

Keywords : Cylinder intake rate test, upland fields converted from paddy, water permeability, clack, soil moisture suction