J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 136, p.27 ～ 35 (2017)

論　文
Original Paper

水稲乾田直播栽培における ローラによる地表面鎮圧が作土の間隙構造に及ぼす影響

中野恵子[1]，深見公一郎[1]

Soil pore-structure in a surface layer compacted with a roller for the dry-seeded rice cultivation

Keiko NAKANO[1] and Koichiro FUKAMI[1]

Abstract: To prevent water leakage from direct-sown dry paddy rice fields, a compaction roller 2 m in width with a total load of 9.4 kN was developed. Even when the soil was dry, and thus difficult to compact, the roller successfully decreased permeability after five times compactions. However, the mechanism of the observed permeability decrease has not been well investigated. We therefore studied the progressive changes in the pore size distributions based on the water retention curves as a result of the roller compactions. Observations of the soil profile and measurements of penetration resistance identified a densely compacted layer less than 2 cm above the plough pan. Position markers inserted in the soil profile revealed that the soil at several centimeters below the surface was highly compacted. The pore size distributions had three stages as the number of roller compactions increased. Firstly, the volume of the larger pores and the total porosity decreased. Secondly, the pore size distribution shifted from larger pores to smaller pores while keeping the total porosity almost constant. Lastly, the pore size distribution did not change anymore regardless of the further roller compactions. Although water infiltration decreased steeply in the first stage, the compaction was insufficient to prevent leakage. In the second stage, infiltration reduced sufficiently to stop leakage. At this stage, the ratio of pores larger than 0.2 mm decreased, whereas macropores larger than 0.1 mm still remained in the compacted soil layers.
Key Words：pore size distribution, the number of roller compactions, leakage prevention technique, dry-seeded rice cultivation, soil compaction

1. はじめに

農業の担い手の高齢化や後継者不足への対応策として，今後一層の省力的な圃場管理が望まれており，そのための有効な手法として，水稲作では直播栽培の導入が増加傾向にある（農林水産省, 2008）．直播の方式は，湛水状態で播種する湛水直播と畑状態で播種する乾田直播の大きく二つに分かれるが，北部九州では，湛水状態において移動性が高まるスクミリンゴガイによる食害問題が大きく，これを回避できる乾田直播に対する期待が高まっている．

一般に乾田直播では，代かき作業を省略するため圃場の漏水が問題となる．この漏水問題は，愛知県で開発された V 溝直播栽培（愛知県農業総合試験場, 2007）や東北農業研究センターで開発されたプラウ耕・グレーンドリル播種体系（東北農業研究センター, 2016）などでは回避できることが報告されている．しかし，北部九州の二毛作（水稲 – 麦，大豆 – 麦）地帯においては，水稲作準備期間の短さ，農家保有の機械種・サイズや圃場サイズ，未団地化地区で必要とされる圃場間の移動性から，既開発技術の導入が困難な場合が多く見受けられる．そこで，深見ら（2014）は特に圃場内外の移動性を考慮して 3 点リンク直装の鎮圧ローラを開発した．また，これを用いた鎮圧により，作土の貫入抵抗が大きくなるとともに間隙率が低下すること，北部九州で乾田直播栽培を実施してきた農家の圃場と同程度の透水性（ベーシックインテークレート）になることも示した．しかしながら，作付け切り替え期間での鎮圧作業の実施に向けては，作業速度の向上・鎮圧回数の削減等の効率化が課題として残された．

鎮圧による透水性低下の程度は，機械走行回数，機械走行速度，土壌の水分条件等の影響を受けることが知られている．また，透水性は，間隙の総量が同じであっても，その連続性，屈曲度，間隙径分布により異なる（仲谷ら, 1983; 加藤, 1989）．営農現場の条件は多様であり，広く役立つ技術を構築するには，漏水を防止しうる間隙構造がどのようなものであるかを示す必要があり，間隙の質的変化に踏み込んだ情報が必須である．

積極的に土壌を圧縮するローラ鎮圧（転圧）については，盛り土や堤体・ため池等での漏水防止に関係して古くから多くの研究がある（例えば，佐々木, 1963; 冨士

[1]Kyushu Okinawa Agricultural Research Center, NARO, Izumi 496, Chikugo, Fukuoka, 833-0041 Japan, Corresponding author: 中野恵子, 農研機構九州沖縄農業研究センター
2016 年 6 月 23 日受稿　2017 年 5 月 30 日受理

岡ら, 1971; ローラ設計指針作成委員会, 1999）．このとき，ローラにより締め固められた層には，強度・剛性・不透水性が求められる．これらの確保については，いずれとも関係が深い密度によって整理・基準化が進んだ．土壌変化の調査項目として透水性を取り扱った事例はあるが，間隙径分布に言及したものはほとんど見られない．他方，土中応力は地表面近くほど大きく，ローラ直下の土の動きについては二次元土層や土中のマーカーにより詳細な検討がなされている（例えば，Wong, 1967; 岡安ら, 2001; James and Shipton, 2012）．中でも James and Shipton（2012）は，植栽される状況を念頭において解析を行っている．しかし，土の動きに伴い変化すると思われる間隙の質的変化については実測されていない．

農家圃場管理でのローラ鎮圧の活用は，播種後の軽い鎮圧による出芽安定があるが，この場合，透水性等に過剰な影響を与えることは避けられる．仲谷ら（1983）は水稲作での活用に向けて室内試験を行い，沖積土および黒ボク土について，鎮圧により漏水を抑制できるレベルまで透水性を低下させうることを示した．また，足立・井上（1990）は，火山灰土壌の水田において，塑性限界に近い土壌水分条件で実際にローラによる鎮圧を 10 回繰り返し，その浸透抑制効果について代掻きと比較した．彼らは，間隙径分布について言及しており，鎮圧後も作土内に粗大間隙が残ったこと，このとき浸透抑制としては十分ではなかったこと，土壌は作土下層から耕盤上部にかけて表層よりも硬く締まったことを報告している．冠ら（2012, 2015）は圃場で牽引式のローラ（カルチパッカ，ケンブリッジローラ）による鎮圧を実施し，黒ボク土や黒泥土においても十分な浸透抑制が可能であることを実証し，鎮圧作業の必要量の現場診断に硬度を用いることを提案したが，間隙の質的詳細には触れていない．

ローラ鎮圧による浸透抑制とそのときのローラと耕盤に挟まれた作土中の間隙構造の詳細な変化については十分に明らかにされておらず，本報では，鎮圧作業を重ねることにより，作土中のどの部分で圧縮が進むのかを作土内に設置したマーカーの移動，作土厚や全間隙率から，また，この時圧縮が間隙構造にどのような影響を及ぼすのかを水分特性曲線に基づく間隙径分布から明らかにしようとした．さらに，これらの変化を乾田直播水稲作における湛水維持の点から評価した．

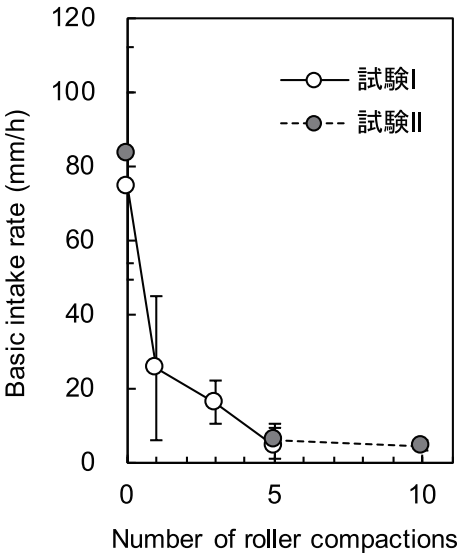
2. 方法

2.1 試験場所および条件

九州沖縄農業研究センター（福岡県筑後市）内の灰色低地土圃場（土性：軽埴土（LiC））において，自作ローラによる鎮圧試験を行った．このローラは，トラクタの 3 点リンクに直装して用いるもので，3 点リンク取り付け部，ローラフレーム部，ローラ部，ウエイト台等で構成される．トラクタに装着した外観を Photo 1 に示した．ローラ部にはドラム缶を利用しており，ローラ面は平滑（ただしローラ補強材により斜めに走る凸部がある），作業幅約 2 m，接地荷重 9.4 kN である．適応トラクタは，47.8 kW（65 PS）である（深見ら, 2014）．ロータリで圃場全体を正転耕うんした後，当該ローラの走行回数を変え，鎮圧強度が異なる帯状の区を設けた．試験 I（2011. 4. 11 実施）で設けた鎮圧区は，0，1，3，5 回，試験 II（2011. 5. 17 実施）では，0，5，10 回であった．走行速度は鎮圧強度に影響を及ぼすため，3.6 km h^{-1} に定めて作業した．なお，本試験で使用したローラは，走行速度 4 km h^{-1} まで安定した鎮圧作業を実施できる．以上は深見ら（2014）と同一の試験区であり，このときのインテークレート，固相率および貫入抵抗分布は，それぞれ Fig. 1，2 の通りであった（深見ら（2014）のデータを図



Photo 1 使用ローラの背面図.
Rear view of a compaction roller.



図中誤差棒は標準偏差（n＝3）を示す

Fig. 1 鎮圧回数とインテークレートの関係（深見ら（2014）より作図）.
Basic intake rate vs. the number of roller compactions (Data from Fukami et al., 2014).

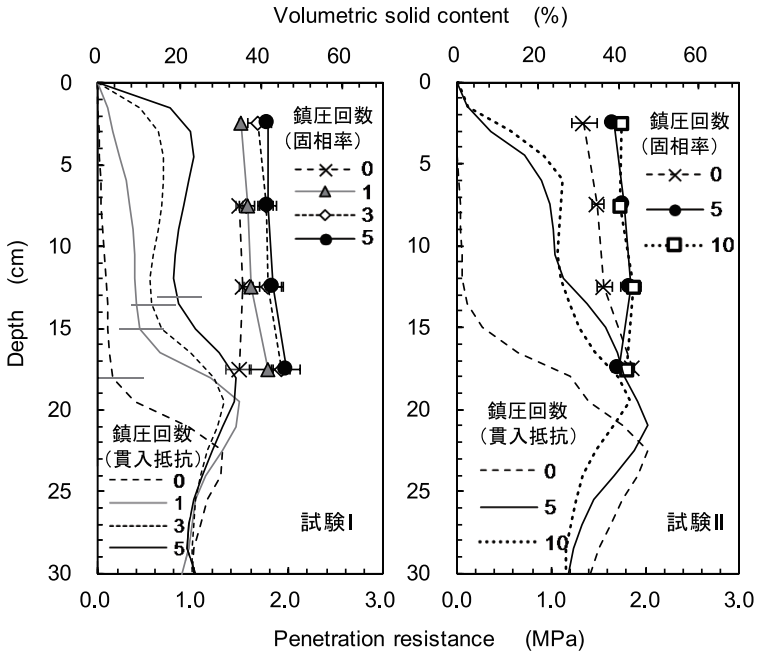


Fig. 2　鎮圧による固相率および貫入抵抗の鉛直分布の変化（深見ら（2014）より作図）左試験 I，右試験 II.
Volumetric solid content and penetration resistance profiles for compaction tests I (left) and II (right) (Data from Fukami et al., 2014).

化．試験 II の固相率分布については初出データ）．試験は機械オペレータが耕うんに適すると判断する状態で実施し，試験 I，II ともに砕土率（耕うん後に 2 cm 篩を通過した土壌の割合）は 90 % であった．土壌はある程度湿っているときに圧縮されやすいが，圃場において土壌水分が高すぎると機械走行や操作性に不具合が生じる．当該ローラの場合，明確な境界値は明らかでないが，少なくとも塑性限界以上に湿ると土壌がローラに付着して作業不可となった．鎮圧直前の深さ 0 ～ 15 cm の土壌の平均含水比は，試験 I，II のときそれぞれ 29，27 % で，当該圃場作土の塑性限界 38（%）よりも 10 % 程度乾燥していた．

2.2 測定項目

当該ローラを走行させると，(1) ローラを動かすトラクタのタイヤ通過に重ねてローラが通過する部分，(2) ローラのみが通過する部分, および (3) 一部踏み残す部分が生じる（Photo 1）．漏水を防止するには，低透水性の層が面的に切れ目なく広がっている必要があるが，そのための作業工程等の検討は別におこなうこととし，ここでは，ローラ鎮圧の効果にのみ注目した．従って，(2) のトラクタのタイヤ跡と重ならないローラ直下を調査した．

2.2.1 作土圧縮量の調査

ロータリ耕うん直後とその後のローラ鎮圧後の作土厚の差から圧縮量を評価した．作土厚は地表面から耕盤までの深さであり，耕盤の位置は簡易に土壌断面を観察して判定した．各区内 3 カ所，同じようにローラのみ通過部分で行われた深見ら（2014）のインテークレート測定の近傍でおこなった．

試験 II の 10 回鎮圧区内の 2 ヶ所では，ロータリ耕うん後，深さ 5，10，15，24 cm に位置マーカーとして金属ねじ（直径 6 mm，長さ 104 mm）を埋設し（Photo 2），鎮圧後に掘り起こして地表面からこのねじの頭位置までの距離を計測した．鎮圧前後の各マーカーと直上のマーカーとの相対距離（5 cm 設置マーカーについては地表面との距離）の比較から圧縮が集中した箇所を特定した．また，圧縮の程度については，鉛直圧縮ひずみ（%）（＝鎮圧によるマーカー間距離の変化量 / 鎮圧前のマーカー間距離 × 100）によっても評価した．

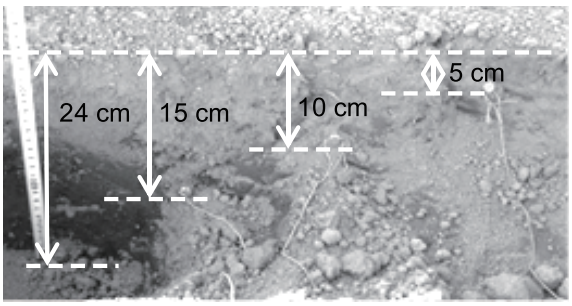


Photo 2　位置マーカー設置の様子.
Position markers inserted in the soil profile.

土壌内の位置変化の検知に埋設物を用いる場合，その挙動が土壌と一体化しているかが問題とされるが，米川ら（1988）によって開発された圧縮時の土壌内応力・変位計測用のセンサーを参考に，これを超えないサイズのねじを選択した．

2.2.2 水分特性曲線に基づく間隙径分布の調査

耕うん後（鎮圧前）は地表面から深さ 25 cm まで，鎮圧後は深さ 20 cm まで 5 cm 毎の不撹乱試料を各区内 3 ヶ所，作土厚を判定した近傍で採取し，水分特性曲線を得た．試料の採取には 100 cm^3（直径 5 cm，高さ 5.1 cm）の金属円筒を用いた．鎮圧前には作土全体を耕うんし，その砕土率は 90 % であったことから，大きな土塊同士の隙間等のマクロポアの存在を考慮する必要はないと考えた．また，ローラ面は平滑であった．よって，この試料直径でローラ走行による土壌の変化を捉えられると判断した．これら試料を一昼夜かけて下方から飽和したあと，脱水過程での体積含水率を測定した．脱水時の設定圧（h）は，−0.49，−0.98，−1.5，−2.9，−5.9，−9.8，−49 kPa，−0.29，−1.5，−9.8 MPa の 10 段階とした．−5.9 kPa までは吸引法（メンブレン吸引装置，長谷川，1998）で，−9.8，−49 kPa，−0.29 MPa は加圧板法（多容量土壌 pF 測定器および広域土壌 pF 測定器，大起理化製）で測定した．−1.5 および −9.8 MPa については，試料を乾かしながらポテンシャル値と含水比の関係を数段階サイクロメータ法（WP4-T，Decagon 社製）で測定し，この近似式とサンプルの乾燥密度から設定圧に相当する体積含水率を算出した．

間隙径が大きいと保水力は小さく，わずかな圧力で間隙内の水は脱水されるので，各設定圧間の区分を間隙サイズによる区分とみなし（以下，区分と省略．Table 1），区分ごとの脱水量，すなわち体積含水率の変化を間隙率として並べたものを間隙径分布として扱った．$0 \leqq |h| \leqq 0.49$ kPa（区分 1）の間隙量については，設定圧 0 kPa の体積含水率に全間隙率を用い，これから設定圧 −0.49 kPa 時の体積含水率を引いて算出した．区分 1 ～ 5 は，圃場容水量の測定では脱水されて空隙となる部分で，一般に中の水が排水されやすいサイズの間隙とみなされている（土壌環境分析法編集委員会, 1997）．また，Soil Science Society of America（2008）は，直径 0.075 mm 以上をマクロポア，直径 0.03 mm 以上をメソポアと間隙を分級している．これらを参考に，設定圧 $|h|$（kPa）から等価間隙径 d（mm）を次式に基づいて計算し，

$$|h| \times 10.2 = 3/d$$

ここでは区分 1 ～ 4 をマクロポア（0.1 mm $\leqq d$），区分 5 ～ 6（0.03 $\leqq d <$ 0.1 mm）をメソポアと分級した．

3. 結果と考察

3.1 作土厚からみる圧縮量

試験 I と試験 II の鎮圧前の作土厚はそれぞれ 20 cm，17 cm と判定された．これと鎮圧後の作土厚から，鎮圧による作土厚の変化量を Fig. 3 に示した．鎮圧回数 1 回では −1.3 cm，3 回では −3.2 cm と圧縮が進み，5 回では 3 回鎮圧と大きな違いはなかった．また，10 回での変化量は −3.5 cm であった．3 回まで大きく圧縮され，それ以上鎮圧回数を増やしてもあまり変化がなかったことは，固相率分布（Fig. 2）の変化傾向と同じであり，また，初め変化が大きく，鎮圧回数が増えるほど変化が小さくなることはインテークレート（Fig. 1）の結果も同様であった．鎮圧 3 回までは，主として固相率の増大，すなわち間隙総量の減少が浸入能に影響したと考えられた．ただし，3 回と 5 回では作土厚および固相率に明瞭

Table 1 水分特性曲線に基づく間隙径の区分．
Classifications of the pore size based on the water retention curve.

間隙区分	設定圧力 (h) 区間 (kPa)	区分内最狭の等価間隙径 (d) (mm)	間隙の分級
1	$0 \leqq \lvert h \rvert \leqq 0.49$	0.6	マクロポア
2	$0.49 < \lvert h \rvert \leqq 0.98$	0.3	
3	$0.98 < \lvert h \rvert \leqq 1.5$	0.2	
4	$1.5 < \lvert h \rvert \leqq 2.9$	0.1	
5	$2.9 < \lvert h \rvert \leqq 5.9$	0.05	メソポア
6	$5.9 < \lvert h \rvert \leqq 9.8$	0.03	
7	$9.8 < \lvert h \rvert \leqq 49$		
8	$49 < \lvert h \rvert \leqq 0.29 \times 10^3$		
9	$0.29 \times 10^3 < \lvert h \rvert \leqq 1.5 \times 10^3$		
10	$1.5 \times 10^3 < \lvert h \rvert \leqq 9.8 \times 10^3$		
11	$9.8 \times 10^3 < \lvert h \rvert$		

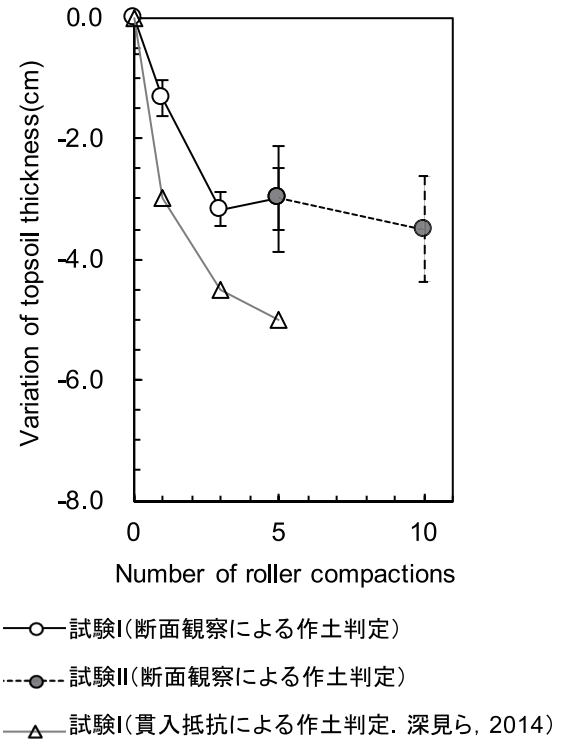


Fig. 3　鎮圧による作土層の厚さの変化.
Variations of thickness of the topsoil as a result of the roller compactions.

Table 2　10 回鎮圧による位置マーカーの土中深さの変化.
Depths of position markers in a soil profile after 10 times compactions.

鎮圧前のマーカー深さ（cm）	鎮圧後のマーカー深さ＊（cm）	鎮圧後の直上のマーカーとの相対距離（cm）	鉛直圧縮ひずみ（%）
5	4.5	4.5**	10
10	7.3	2.8	44
15	12.8	5.5	−10
24	20.8	8.0	11
地表面沈下量（cm）	3.2		

＊ 2 ヶ所の平均
** 地表面との距離

な変化はなかったものの，インテークレートは低下して漏水防止には 5 回以上の鎮圧が必要と判定された（深見ら, 2014）．これは，間隙の総量ではなく連続性やサイズ分布等の質的変化が漏水防止のために必要であったことを示唆する．

ところで，上記の作土厚とその変化量の値は，同一試験下であるにもかかわらず，深見ら（2014）の報告（鎮圧前の作土厚を 18 cm，15 cm，試験 I のときの鎮圧による変化量を 1 回鎮圧で −3 cm，3 回で −4.5 cm，5 回で −5 cm と報告）と異なった．本報値とこれらとの差異は，本報では土壌断面観察に基づいて作土を判定したのに対し，深見ら（2014）では貫入抵抗の鉛直分布で抵抗値が上昇を始める深さ（Fig. 2 中の横棒位置）までを作土と判定したことに起因すると考えられた．深見ら（2014）は，鎮圧により土壌の間隙率が減ぜられたこととともに，これが貫入抵抗と相関関係にあったことを指摘した．断面観察では鎮圧前後で耕盤面の位置判定は変わらなかったのに対し，貫入抵抗の鉛直分布では鎮圧に伴う耕盤直上の間隙率減少，すなわち固相率の増大を検知して，これにより耕盤面の位置判定が鎮圧前より浅くなったと考えられた．深見ら（2014）の作土厚の変化量にはこれが含まれた可能性がある．つまり，断面観察に基づく圧縮量と貫入抵抗に基づく圧縮量の差は，耕盤直上に鎮圧の影響が集中した圧縮層が形成されたことを示唆する．地表面から土を締め固めると，表層ほど土中応力は大きく，深くなるほど減衰するが，圧力の伝播範囲に支持層となる耕盤があったためにこの上にも変化が大きい層ができたと考えられた．ただし，この部分の厚さは計算上 2 cm に満たず，5 cm 毎の平均である固相率分布（Fig. 2）には特異的な値としては現れなかった．

3.2 位置マーカーの土中深さ変化からみる圧縮量

10 回鎮圧による土中の位置マーカーの深さの変化を Table 2 に示した．鉛直圧縮ひずみ（鎮圧前のマーカー距離に対する鎮圧によるマーカー距離の変化の割合）は，鎮圧前 5 ～ 10 cm の層で 44 % と高かった．これは，明瞭な圧縮の集中を示すものである．固相率分布（Fig. 2 右図）は，5 回鎮圧によって地表から深さ 15 cm まで一様に増加し，地表際（0 ～ 5 cm）については，10 回鎮圧によってさらに増加したようにみえた．一般的に，ローラ直下の土の移動が大きいことが示されており（ローラ設計指針作成委員会, 1999），固相率の変化には移動によって土の充填が高まっていく様子が現れたと考えられた．ただし，鎮圧を重ねることにより圧縮が集中する層は地表際よりもやや深くに生じたことが，マーカーの位置変化により示された．足立 · 井上（1990）らの火山灰土水田におけるローラ鎮圧後の 1 cm 厚毎の乾燥密度分布でも同様の傾向が読み取れる．

3.3 鎮圧による間隙径分布の変化

Fig. 4 は，試験 I の鎮圧前後の間隙率をサイズ区分毎に並べて間隙径分布を表したものである．耕うんの影響がそのまま残る鎮圧前については，深さ 0 ～ 5 cm では試料採取の際に構造が維持できず，深さ 5 ～ 10 cm では飽和の際に目に見えて構造が崩れて体積維持が難しかったため，全間隙率のみを示した．鎮圧前の耕盤は，区分 1（0.6 mm $\leqq d$ ）を除いてマクロポアとメソポアは少なかった．無鎮圧のときの透水性（Fig. 1）から，耕盤の間隙径分布では漏水抑制効果として十分でなかったことは明らかであり，区分 1 の間隙の存在が，その原因と考えられた．なお，試験実施圃場内には耕盤に若干違う土質のものが混じった部分があり，それが 1.5 MPa 以上の負圧をかけなければ脱水しない領域（区分 10 および 11）

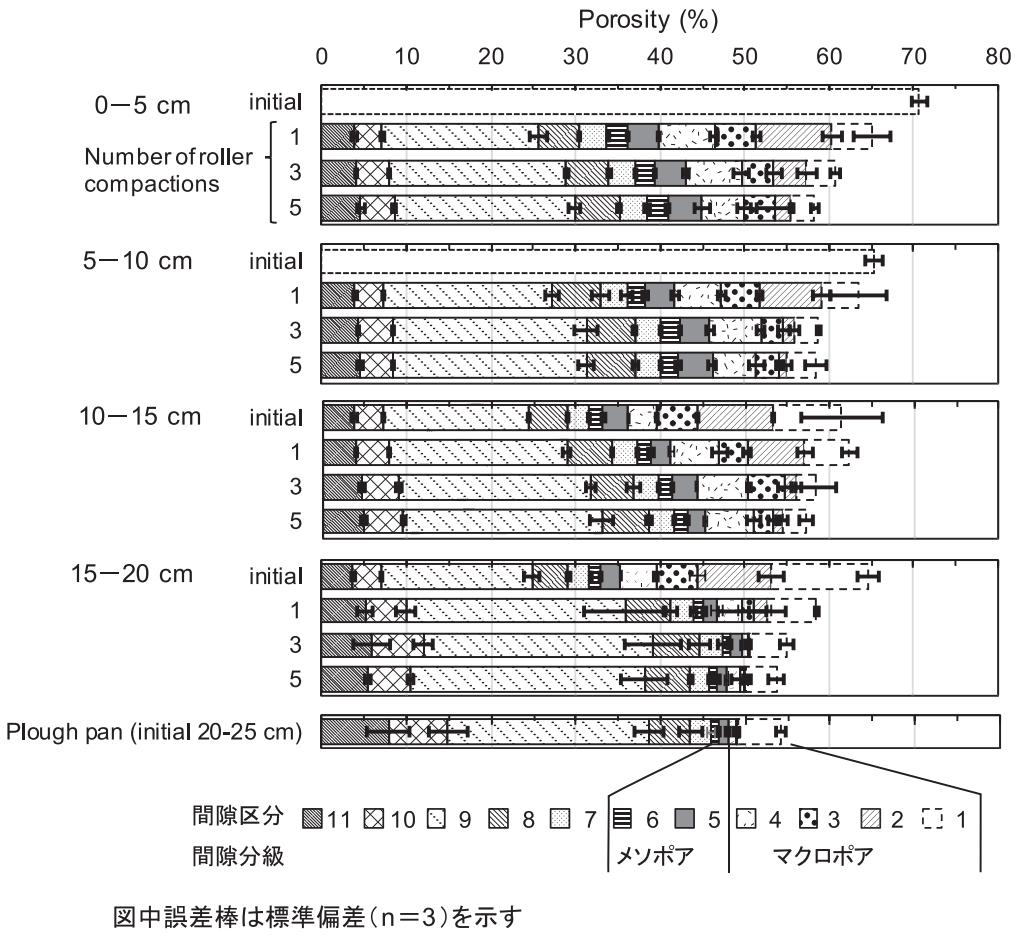


Fig. 4 試験 I における鎮圧前後の土壌の間隙径分布.
Pore size distributions before and after roller compactions for Test I.

の間隙量や測定値のばらつきに表れたと考えられた.

鎮圧により作土厚は変化していることから，全く同一な層の間隙変化を追っていることにはならないが，深さ 0 ～ 5 cm では，鎮圧回数が多いほどマクロポア（区分 1 ～ 4，0.1 mm ≦ d）は少なかった．特に，区分 2（0.3 ≦ d < 0.6 mm）で明瞭であった．メソポア以下のサイズの間隙，特に区分 9 は，鎮圧回数が多いほど多かった．それぞれの区分の間隙量は，より粗大な間隙が狭くなって増加した分と，もともとそのサイズであったものが消失するか，あるいはより細い間隙に潰れた減少分のバランスによって決まり，サイズの小さな区分では増加量がまさったためと考えられた．深さ 5 ～ 10 cm でも，1 回と 3 回鎮圧では，3 回鎮圧の方がマクロポアは少なかった．ただし，この深さでは 3 回と 5 回鎮圧後の間隙径分布には大きな違いはなかった．3 回鎮圧でも 0 ～ 5 cm の 5 回鎮圧と同程度のマクロポアの分布であったことから，深さ 0 ～ 5 cm よりも圧縮が早く進んだと考えられた．このことは 3.2 で述べた地表際よりやや下に圧縮集中層が形成されたことと矛盾しない．深さ 10 ～ 15 cm もまた，深さ 0 ～ 5 cm のように，鎮圧回数が多いほどマクロポアが少なかった．深さ 15 ～ 20 cm では，1 回鎮圧でもマクロポア・メソポアの領域の間隙が少なく，特に，3，5 回鎮圧については，耕盤と同等の分布となった．この深さのサンプルは，鎮圧後には耕盤の一部が含まれており，その影響を強く受けた結果と考えられた.

鎮圧後も耕盤を含まない範囲である深さ 0 ～ 15 cm までに注目する．鎮圧前の間隙径分布がとれた深さ 10 ～ 15 cm の結果によると，1 回の鎮圧では区分 2（0.3 ≦ d < 0.6 mm）の間隙量へ与える影響は小さく，主に区分 1（0.6 mm ≦ d ）が減少した．3 回鎮圧によりいずれの深さでも区分 2 の間隙が 1 回鎮圧より少なくなり，5 回鎮圧では深さ 0 ～ 5 cm の区分 2 の量，深さ 10 ～ 15 cm の区分 3 の量が少なくなった．区分 1 については鎮圧後もある程度存在したが，大きな間隙ほど透水性に与える影響が大きいにもかかわらずインテークレートは十分に小さくなったことから，実際には水移動に関与しない封入間隙を多く含んだと推察された．以上から，鎮圧回数が増えるにつれて大きな間隙サイズの区分から減少したこと，また，この変化は地表際よりやや深いところで早く進み，その後より広い範囲に及んだことが分かった．一方で，いずれの深さでもマクロポアに分級される間隙は鎮圧後も一部存在し，また，メソポアの量はほぼ変わらなかったことも判明した．仲谷ら（1983）は粗大な間隙は潰れやすいが，細い間隙になると沖積土では荷重に対する抵抗性を見せ，黒ボク土ではやはり潰れやすいことを報告した．本報では，透水性が十分に低下しても仲谷

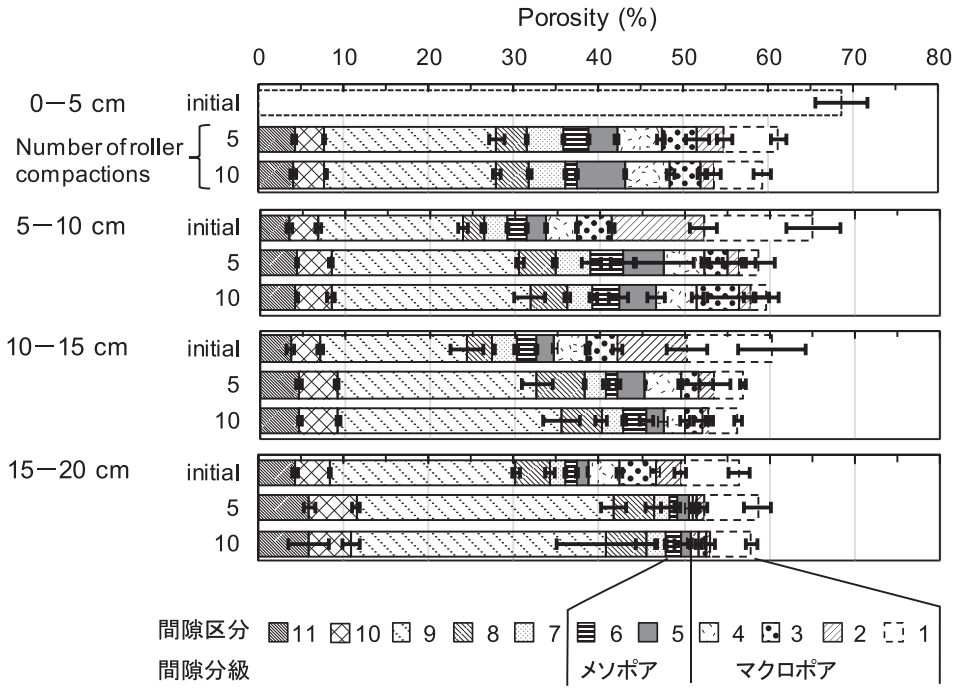


Fig. 5　試験 II における鎮圧前後の土壌の間隙径分布.
Pore size distributions before and after roller compactions for Test II.

ら（1983）の試験で消失した間隙サイズ（本報の区分 1 ～ 4 に相当）は残っており，荷重に対する抵抗を見せるタイプの鎮圧結果であった.

マクロポア領域内の間隙径分布と透水性の関係について見ると，1 回鎮圧による全間隙量の低下（Fig. 2）および作土厚の減少は（Fig. 3），最大のサイズ区分（区分 1）の間隙の減少によるものであり，透水性の急減（Fig. 1）はこれに応じて起きたと考えられた．3 回鎮圧では，区分 1 の他に 1 回鎮圧では大きな変化のなかった区分 2（$0.3 \leqq d < 0.6$ mm）の間隙量の減少が明瞭となった． 1 回鎮圧から 3 回鎮圧の間の透水性の低下（Fig. 1）は，主として潰れる間隙径の範囲が広がったことによるものであり，潰れて消失した分が間隙総量の減少にあらわれたと考えられた．5 回鎮圧では，深さ 0 ～ 5 cm の区分 2 の間隙がより少なく，深さ 10 ～ 15 cm では区分 3 の（$0.2 \leqq d < 0.3$ mm）間隙にも減少が認められた．全間隙率の変化が明瞭でなくても，マクロポア領域の間隙径分布が小さいサイズ分布にシフトしたことが，鎮圧 3 回から 5 回への透水性の低下につながったと考えられた.

Fig. 5 に試験 II の鎮圧前後の間隙径分布を示した．深さ 0 ～ 5 cm については，鎮圧 10 回だと 5 回よりもやや小さい間隙径分布であったように見えるが，サンプルごとのばらつきも大きく，違いは明瞭ではなかった．深さ 5 ～ 10 cm は，マーカー埋設で認められた圧縮層（Table 2．鎮圧後深さ 4.5 ～ 7.3 cm）と重なりが大きい部分であった．5，10 回鎮圧ともに区分 1，2 の間隙量は少なく，このことも圧縮の進行により大きな間隙から消失することを示唆する．深さ 10 ～ 15 cm は，鎮圧後は一部に耕盤を含む部分であった．10 回鎮圧の方が小さな間隙径の分布になったが，鎮圧後の作土厚が 10 回鎮圧で薄いので，耕盤の影響をより強く受けたものと考えられた．以上のように，5 回鎮圧と 10 回鎮圧では間隙の質的差異は明瞭でなく，透水性への影響についても違いは判然としなかった.

3.4 乾田直播水稲作のための漏水抑制技術確立への活用

鎮圧 5 回と 10 回では透水性の変化の違いはほぼなく，間隙の質的差異も明瞭ではなかったことからすると，漏水対策としては鎮圧 3 回と 5 回の間の変化が重要であったといえよう．このとき，全間隙率および作土厚には大きな変化はなかった．よってこれらの項目を指標に漏水防止技術を確立しようとすると，十分に漏水を抑制できない場合が含まれることになる．この不安定さを排除するためには，間隙総量の変化でなく質的変化を確認する必要があることが明らかとなった.

間隙総量や作土厚の変化がなくなっても，鎮圧を重ねることによってマクロポア領域の間隙径分布はより小さい方にシフトした．これを安定的に保証できる条件を探索することが，汎用性のある漏水防止技術の確立につながると考えられる．他方，一般に排水に寄与するとされるマクロポアだが，一部は 5，10 回鎮圧した後も存在したことを確認し，この場合にも透水性は十分に低下した．仲谷ら（1983）の室内実験では，透水係数が十分低下したときマクロポアも消失したが，漏水防止においては必ずしも消失しなくてもよく，重要なのはマクロポアの潰れであることがわかった．間隙径分布が小さい方にシフ

トすることに現れた潰れは，間隙の屈曲度を高め，あるいは連続性の低下を引き起こし，また，作土全体でみれば圧縮集中層の形成も同様の変質をもたらし，その結果，透水性が低下したと推察された．また，適正回数以上の鎮圧に特段の効果はなかった．

4. まとめ

乾田直播における漏水防止を目指してローラによる作土鎮圧を圃場にて実施し，走行回数が作土内の間隙構造に及ぼす影響を見た．その結果，次のことが明らかとなった．

（1）地表面の数センチ下と耕盤の直上に圧縮集中層が生じた．
（2）鎮圧回数の増加に伴い大きな径の間隙から減少した．他方，小さな径では増加した区分もあり，間隙径分布は小さい方にシフトした．
（3）層厚に変化がなくなっても，（2）の変化は生じていた．
（4）透水性が十分小さくなった 5 回鎮圧以上では等価直径 d でいうと 0.2 mm 以上（区分 1 ～ 3）の間隙が減少していた．
（5）透水性が十分に抑制されても，マクロポア領域（$d \geqq 0.1$ mm）の間隙は存在した．また，メソポア領域（$0.03 \leqq d < 0.1$ mm）の間隙量の変化は小さかった．
（6）透水性が十分小さくなった 5 回鎮圧後と 10 回鎮圧後では間隙の質的変化は明瞭ではなかった．

鎮圧による透水性低下の程度は，鎮圧回数の他に，土壌の水分条件，機械走行速度等の影響を受ける．これらと漏水防止効果の関係の検討は今後の課題である．また，本報では，透水性低下の原因として間隙径分布の変化は示したものの，そこから示唆されるサイズの影響や間隙の屈曲度 · 連続性の変化の影響を分離し得なかった．この点については，マイクロ X 線 CT 等の三次元構造を観測できる手法が有効と思われる．

謝辞

本報に関わる調査の実施にあたっては，農研機構九州沖縄農業研究センターの三池輝幸氏，伊藤博幸氏，河原幸成氏，本部朗利氏，中尾貞子氏の協力を得た．記して，謝意を表します．

引用文献

愛知県農業総合試験場 (2007): 不耕起 V 溝直播栽培の手引き (改訂第 4 版). http://www.pref.aichi.jp/nososi/seika/singijutu/singijiyutu74-4-7.pdf (確認年月日 2016. 6. 21)

足立一日出, 井上久義 (1990): 火山灰水田土壌の物理性に与える代掻きとローラ転圧の影響の比較. 農業土木学会誌, 58: 997–1002.

土壌環境分析法編集委員会 (1997): 土壌環境分析法, pp. 48–51. 博友社, 東京.

冨士岡義一, 長堀金造, 三野 徹 (1971): 転圧工法と透水性について — 火山灰質ローム台地の開田工法に関する研究 (II) —. 農業土木学会論文集, 37: 9–16.

深見公一郎, 中野恵子, 土屋史紀, 田坂幸平, 松尾直樹, 三池輝幸, 伊藤博幸, 河原幸成, 本部朗利 (2014): 暖地乾田直播圃場の漏水防止技術 — 鎮圧ローラの開発と効果の検証 —. 農業食料工学会誌, 76: 341–347.

長谷川周一 (1998): メンブレン吸引法. 土壌の物理性, 77: 51–52.

James, I.T. and Shipton, M.R.(2012): Quantifying compaction under rollers using marker tracing image analysis. Soil & Tillage Res., 120: 40–49.

冠 秀昭, 大谷隆二, 千葉克己 (2012): 黒ボク土水田におけるプラウ耕鎮圧体系乾田直播での浸透抑制手法. 農業農村工学会論文集, 282: 69–77.

冠 秀昭, 大谷隆二, 関谷博幸, 中山壮一, 齋藤秀文 (2015): 大区画水稲乾田直播圃場における鎮圧作業による浸透抑制効果. 農作業研究, 50: 103–113.

加藤英孝 (1989): 土壌構造悪化の面からみた農耕地土壌の圧縮特性. 土壌の物理性, 59: 7–16.

仲谷紀男, A. Eduardo, G. DOS REIS, 加藤英孝, 前田乾一 (1983): 圧縮が転換畑土壌の物理性に及ぼす影響. 土壌の物理性, 48: 2–7.

農林水産省 (2008): 水稲直播栽培の現状について. http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z_genzyo/pdf/all.pdf (確認年月日 2016.6.21)

岡安崇史, 橘口公一, 尾崎伸吾, 牧瀬大二郎, 上野正実, 深見公一郎 (2001): 剛性車輪による地盤の繰り返し転圧特性に関する基礎的研究. 九大農学芸誌, 55: 205–214.

ローラ設計指針作成委員会編 (1999): 転圧ローラ工学 — 締固め性能に着目して —, テラメカニックスライブラリー 3, pp. 1–18. テラメカニックス研究会, 京都.

佐々木次郎 (1963): 盛土転圧およびその台地漏水田の地盤処理への応用に関する実験的研究. 農業土木試験場報告, 1: 409–484.

Soil Science Society of America (2008): Glossary of soil science terms 2008, p. 49. Madison, Wis.

東北農業研究センター (2016): 乾田直播栽培技術マニュアル — プラウ耕 · グレーンドリル播種体系 — Ver.3. http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/dry-seeding_rice_v3.pdf (確認年月日 2016. 6. 21)

米川智司, 木谷 収, 岡本嗣男, 坂井直樹 (1988): 耕うん時の土壌 — 機械系の力学的挙動計測法に関する研究 (第 1 報) — 圧縮時の土壌内応力 · 変位計測 —. 農業機械学会誌, 50: 19–26.

Wong, J.Y. (1967): Behaviour of soil beneath rigid wheels. J. Agric. Engng. Res., 12: 257–269.

要　　旨

水稲乾田直播栽培における漏水防止方法として，地表面からのローラ鎮圧（作業幅約 2 m，接地加重 9.4 kN）が検討され，土が変形しにくい乾いた状態でも 5 回の鎮圧で十分な効果が得られることが示された．しかし，透水性抑制の仕組みについては十分に明らかにされておらず，本報では，鎮圧回数と水分特性曲線に基づく間隙径分布の関係に着目して，このとき注目すべき土壌構造変化について明らかにしようとした．断面観察と貫入抵抗分布の 2 手法を用いた作土厚判定から，耕盤直上 2 cm 程度以内の圧縮集中層，また，作土内に埋設した位置マーカーの移動から，地表面から数センチ下の圧縮集中層が確認された．間隙径分布は，鎮圧回数の増加につれて大きなサイズの間隙から減少し，(1) 全間隙率の低下が認められる段階，(2) 全間隙率の低下は無く間隙径分布の小さい方へのシフトのみある段階，(3) 間隙径分布の変化も判然としない段階があった．(1) では透水性も著しく低下したが漏水防止としては不十分であった．(2) の時に十分低下し，このとき，等価直径 0.2 mm 以上の間隙が減少していた．ただし，十分に透水性が低下したときも，土中には等価直径 0.1 mm 以上のマクロポアの存在が確認された．

キーワード：間隙径分布，鎮圧回数，漏水防止技術，水稲乾田直播，土壌圧縮