

客土により造成された柁畑圃場の土壌硬度, 保水性および排水性

鈴木伸治*・渡邊文雄*・高橋 悟*・三井ともみ**・飯塚圭子**・邵 莉**

(平成 24 年 11 月 22 日受付/平成 25 年 3 月 11 日受理)

要約: 降雨や乾燥の長期的な傾向を考慮した場合, 畑地の排水や保水に関して, 今後一層の注意が必要である。また畑地における適切な土壌管理の在り方を考えた場合, 土壌の保水性や排水性, および土壌硬度に及ぼす耕耘の影響を評価することも重要である。そこで東京農業大学生産環境工学科試験圃場において, 地下水位の影響を受けない条件で, 柁畑圃場表層の土壌硬度, 保水性, 排水性を調査した。明らかになったことは以下の通りである。①耕耘は粗間隙率の増加, およびそれに伴う飽和透水係数の増加と, 土壌硬度の減少に寄与した。また, それらのばらつきを小さくし, 均一にする効果があった。②十分な降雨があっても表層は過湿にはならず, 降雨翌日ないしは翌々日の地表面付近のマトリックポテンシャルは -0.30 m となり, 表層での排水が終了して上向きの水移動が生じる際のマトリックポテンシャルは $-0.30 \sim -0.40\text{ m}$, 飽和度は $74 \sim 75\%$ であった。表層の排水が終了するのに6日を要した。③粗間隙率のわずかな減少によって飽和透水係数が大きく低下することから, 排水性を悪化させないよう注意する必要がある。④乾燥が続いた場合, 地表面近くでは土壌のマトリックポテンシャルが生長阻害水分点近傍まで低下したことから, 土壌面蒸発を防ぐマルチの施用などが有効であると考えられる。

キーワード: 浸透, 乾燥, 土壌管理, 粗間隙, 易有効水分

1. はじめに

畑地土壌を作物との関係で見た場合, 不十分な排水は圃場内での水の停滞を引き起こし, 根腐れなどによる生育不良(湿害)の原因となる。一方で土壌の保水性は, 水分量だけでなくマトリックポテンシャルとの関係で論じられるが, マトリックポテンシャルが大きく減少すると, 作物根による吸水が困難となる。そのため畑地では, 多量の降雨があっても迅速に排水が進み, 作物根に酸素が供給されるとともに, 作物の生育に適切な水分状態を保つことが求められる。また排水性や保水性は, 地下水位にも依存する。

降雨や乾燥といった気象・気候を長期的に見た場合, 我が国では降水量がおおむね増加するとの予測が報告されている一方で, 夏季(7月)には東日本で年々の変動が大きくなり, 無降水日数が増加することが懸念されている¹⁾。このような長期予測は不確実性を含むものではあるが, 農地土壌の排水や保水に関して, 今後一層の注意が必要であることを示唆している。我が国における畑圃場の排水性に関する研究はおもに, 転換畑²⁾や粘性土壌³⁾, 硬盤(耕盤)層を有する畑圃場⁴⁾の排水性の改善や, 排水性に対する粗間隙の役割の評価⁵⁻⁷⁾について進められてきた。また保水性については, 灌漑用水量策定のための保水性の評価⁸⁾の研究や⁹⁾, 特殊土壌の保水性改善についての報告⁹⁾などが挙げられる。しかし, 畑圃場の排水性と保水性の両者

に対し, 実測値を用いて同時に評価した例は少ないため, 今後の土壌管理の在り方を考えるうえで, 知見を整理し, 蓄積することは重要である。

さらに, 作物根の伸長には土壌水分だけでなく, 土壌硬度も関係し, 一般に, 土壌の貫入抵抗が 2.0 MPa を超えると, 作物根の伸長が困難になると言われている¹⁰⁻¹¹⁾。耕耘は本来, 硬度, 排水性, 保水性といった土壌の物理的性質を改善する目的があるが, 土壌を適切に管理するうえで, 耕耘によって排水性, 保水性, 土壌硬度のそれぞれがどのような変化を生ずるのかを明確にすることも重要である。

そこで本研究では, 客土によって造成された畑圃場を対象に, 土壌硬度や水分の保持, および排水に関する特性を明らかにするとともに, 耕耘がこれらの特性に及ぼす影響について検討することを目的とした。なお本研究では, 地下水位の影響を受けない条件で, 圃場の表層部分, おもに地表から深さ 0.35 m までを対象とした。また排水性の指標として, 飽和状態での水移動の良否を示す飽和透水係数を用い, 土壌硬度については貫入抵抗を指標とした。さらに排水や保水については, 土壌の間隙径分布との関係から整理するとともに, 水分動態を観測することによって評価した。

* 東京農業大学地域環境科学部生産環境工学科

** 東京農業大学大学院農学研究科農業工学専攻

2. 試料および方法

(1) 試験圃場の概要

東京農業大学世田谷キャンパス内にある生産環境工学科試験圃場の柵圃場で調査を行った。この試験圃場は2008年7月に新設され、柵圃場の他に、柵水田圃場、ライシメーター、自動気象観測システム、ガラス温室、人工降雨装置などを備え、生産環境工学に関する実験・演習科目や、卒業論文・修士論文等の研究の場として運用されている。柵圃場は、土壌と水との相互関係や、作物根による土壌からの吸水、および蒸発散等に着目し、灌漑方法や、土壌の物理的特性を明らかにする手法などを学ぶための対象として利用されており、目的に応じて種々の作物が栽培されている。研究のみならず、教育の場として本試験圃場を将来にわたって利用していくためにも、新設されて間もない時期における土壌の特性を明らかにすることは、土壌を適切に管理するうえで有益な情報を与えられられる。

試験圃場 (N 35°38'33", E 139°38'4", 標高 47m) の位置を図1に示す。柵圃場は網室の中にあり、圃場内の土壌が他の土壌と混じることのないよう、コンクリートで仕切られている。畑地として利用している柵圃場は2区画あり(図2)、両区画ともコンクリート柵上端面から2.00~2.30mの深さに砂利(粒度調整碎石 M-40)を敷き、その上に、埼玉県深谷市から採取した褐色低地土が客土されている。土壌表面からコンクリート柵上端面までの高さはおよそ0.2mであり、地表面の傾斜はない。一方は6.90m×6.95mの区画で、地表から2.30mの深さに水平なコンクリートの底を設けている。他方は6.90m×7.80mの区画で、底を設けていない。以降、前者を有底、後者を無底として区別することとする(図2)。

有底の柵圃場の底部では、図2に示すように暗渠による排水を行っている。暗渠は76mmの塩化ビニルパイプを使用し、底に敷いた砂利が疎水材となるように埋設している。また無底と有底の両者に、地下水位の観測抗がある。調査期間中、有底柵圃場の暗渠の排水口は常時開放していたため、地下水位はできなかった。また無底柵圃場においても、試験圃場が排水性の良い関東ローム層の上に立地していることから¹²⁻¹³⁾、地下水位は認められなかった。

表層から深さ0.35mまでの乾燥密度、土粒子密度、粒径分布を表1に示す。有底と無底の間、および深さ方向における差異について、二元配置分散分析によって検討したところ、土粒子密度と粒径分布に関しては、有意な差(有意水準5%)は認められなかった。土性は軽埴土である(国際土壌学会法)。なお土壌に含まれる主要な粘土鉱物は、クローライト、パーミキュライト、イライトである。

無底および有底の柵圃場はともに、2008年には雑草を除去したのみであり、2009年にはネリカ(New Rice for Africa)等の作物を栽培した。2010年には、無底柵圃場ではテフ(*Eragrostis tef*)、有底柵圃場ではネリカを栽培した。

(2) 耕耘

2010年7月8日、無底柵圃場において、手押し式の小



図1 生産環境工学科試験圃場の位置

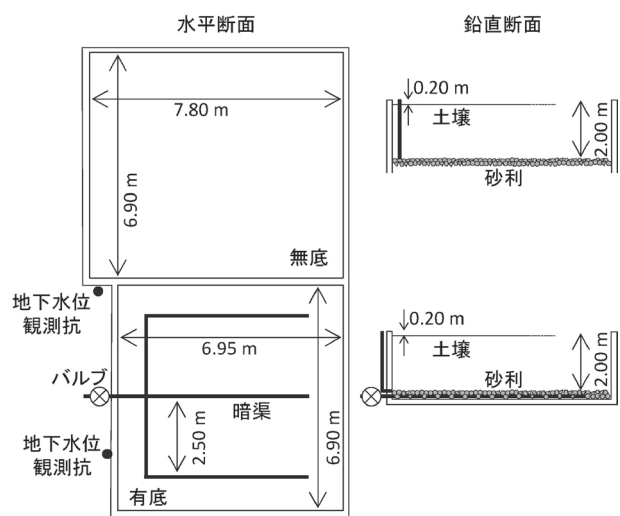


図2 柵圃場の概要

表1 試験区土壌の乾燥密度、土粒子密度、粒径分布

| 試験区 | 深さ m | 乾燥密度 Mg m ⁻³ | 土粒子密度 Mg m ⁻³ | 粒径分布* | | |
|-----|---------|----------------------------|-----------------------------|-------|-----|-----|
| | | | | 砂 | シルト | 粘土 |
| 無底 | 0.05 | 1.13 | 2.692 | 364 | 346 | 290 |
| | 0.15 | 1.21 | 2.696 | 367 | 315 | 318 |
| | 0.25 | 1.16 | 2.692 | 365 | 322 | 313 |
| | 0.35 | 1.29 | 2.699 | 353 | 328 | 319 |
| 有底 | 0.05 | 1.36 | 2.707 | 355 | 375 | 270 |
| | 0.15 | 1.30 | 2.698 | 389 | 354 | 257 |
| | 0.25 | 1.31 | 2.698 | 403 | 330 | 267 |
| | 0.35 | 1.22 | 2.702 | 403 | 343 | 254 |

*: 国際土壌学会法による。

型耕耘機(EL20, 三菱ガス)を用い、表層0.10mまで全面を耕起した。2011年7月26日には、有底柵圃場の全面をレイキとスコップを用いて深さ0.10mまで碎土した。

表 2 不攪乱土壌試料を採取した年月日

| 深さ (m) | 試験区 | |
|-----------|----------------|----------------|
| | 無底 | 有底 |
| | 2010/6/11 (7) | 2010/6/11 (2) |
| 0.05 | 2010/7/8 (7) | 2010/11/11 (5) |
| | 2010/11/11 (5) | 2011/8/1 (3) |
| 0.15 | 2010/7/10 (3) | 2011/8/1 (3) |
| 0.25 | 2010/7/10 (3) | 2011/8/1 (3) |
| 0.35 | 2010/7/10 (3) | 2010/7/19 (2) |

括弧内の数字は反復個数を示す。

(3) 貫入抵抗の測定と土壌の採取

無底柵畑圃場において、貫入式土壌硬度計 (DIK-5521, 大起理化学工業) を用い、耕耘前の 2010 年 6 月 11 日、および耕耘後の同年 7 月 15 日に、互いに 3 m 以上離れた任意の 4 点において貫入抵抗を測定した。測定深さは地表から 0.60 m までである。無底および有底の柵畑圃場のそれぞれにおいて、直径 50 mm、高さ 51 mm のステンレス製円筒容器を用い、深さ 0.05, 0.15, 0.25, 0.35 m より不攪乱土壌を採取した。採取日および反復の個数を表 2 に示す。2010 年 6 月 11 日に、無底および有底柵畑圃場のそれぞれにおいて深さ 0.05 m より採取した不攪乱土壌は、互いに 2 m 以上離れた任意の点において採取した。同年 7 月 8 日の無底柵畑圃場における土壌採取も、耕耘直後に同様の方法で行った。さらに同年 11 月 11 日の有底と無底柵畑圃場のそれぞれにおける土壌採取も、作物の収穫後に同様の方法で行った。その他の不攪乱土壌については、圃場のほぼ中央に土壌断面を設けて採取した。

(4) 飽和透水係数、間隙径分布の測定

無底柵畑圃場の深さ 0.15, 0.25, 0.35 m、および有底柵畑圃場の深さ 0.35 m の試料を除く不攪乱土壌に対し、飽和透水係数を測定した。無底柵畑圃場の深さ 0.05 m より 2010 年 7 月 8 日 (耕耘後) に採取した試料については定水位法で、その他の試料については変水位法で測定した。

土壌の飽和状態における水移動は、粗間隙が大きく寄与している。粗間隙は一般に、飽和からの脱水過程において、マトリックポテンシャルが $-0.32 \sim -1.00$ m で平衡した際の空気間隙とされている⁶⁾。一方で作物の生育にとっての保水性の指標として、易有効水分量が挙げられる。易有効水分量は圃場容水量と生長阻害水分点の水分量の差として表されるが、圃場容水量に相当するマトリックポテンシャルはおおむね $-0.32 \sim -0.63$ m、生長阻害水分点のマトリックポテンシャルはおおよそ $-0.50 \sim -10.00$ m である¹⁴⁾。以上のことより本研究では、土壌の間隙を、排水性に寄与する粗間隙、易有効水分が保持される細間隙、および間隙径がそれ以下の微細間隙に分類し、飽和からの脱水過程において、マトリックポテンシャルが -0.32 m で平衡した際の空

気間隙の体積割合を粗間隙率、マトリックポテンシャルが $-0.32 \sim -10.00$ m で水分が保持される間隙の体積割合を細間隙率、マトリックポテンシャルが -10.00 m で水分が保持される間隙の体積割合を微細間隙率とした。ジュレンの式¹⁴⁾より等価間隙径に換算すると、粗間隙の直径は 0.1 mm 以上、細間隙の直径は 0.003~0.1 mm、微細間隙の直径は 0.003 mm 以下となる。

飽和透水係数を測定した後に (無底柵畑圃場の深さ 0.15, 0.25, 0.35 m、および有底柵畑圃場の深さ 0.35 m については試料の採取後)、長谷川 (1998)¹⁵⁾ を参考に、水頭法でマトリックポテンシャルを -0.32 m に調節し、その後、加圧板法でマトリックポテンシャルを -10.00 m に調節して、平衡した際の体積含水率を求めた。最後に 105°C で試料を 24 時間乾燥させ、乾燥密度 (B_d Mg m⁻³) を求めるとともに、以下の式で間隙率 (f_i m³ m⁻³) を算出した。

$$f_i = 1 - \frac{B_d}{P_d} \quad (1)$$

ここに、 P_d は表 1 に示す土粒子密度 (Mg m⁻³) である。粗間隙率 (f_c m³ m⁻³)、細間隙率 (f_f m³ m⁻³)、微細間隙率 (f_m m³ m⁻³) はそれぞれ、以下の式より求めた。

$$f_c = f_i - \theta_{0.32} \quad (2)$$

$$f_f = \theta_{0.32} - \theta_{10.00} \quad (3)$$

$$f_m = \theta_{10.00} \quad (4)$$

ここに、 $\theta_{0.32}$ と $\theta_{10.00}$ はそれぞれ、マトリックポテンシャルが -0.32 m および -10.00 m の体積含水率 (m³ m⁻³) である。

(5) 耕耘の影響の評価

無底柵圃場において、耕耘の前後 (2010 年 6 月 11 日と同年 7 月 8 日) に深さ 0.05 m から採取した不攪乱試料で測定した間隙径分布に対し、t 検定を行った。また貫入抵抗についても、深さ 0.025 m ごとに耕耘の前後で t 検定を行った。有意水準は 5% である。

(6) 水分動態の観測

有底柵圃場において、2011 年 8 月 1 日に圃場の中央に土壌断面を設け、深さ 0.05, 0.15, 0.25 m に誘電土壌水分センサー (10HS, Decagon Devices, Inc.) を埋設し、10 分間隔で出力電圧 (mV) をデータロガー (Em50, Decagon Devices, Inc.) に記録した。その際、あらかじめ実験室内にて土壌水分センサーの出力電圧と体積含水率 (m³ m⁻³) の関係を求めておき、5 次の較正曲線で近似して野外での観測値を当てはめ、体積含水率を導いた¹⁶⁾。測定した体積含水率は、それぞれセンサーを埋設した深さの上下 0.05 m の土層を代表する値とし、以下の式で地表から深さ 0.30 m までの土層の土壌水分貯留量 (S mm) を算出した。

$$S = \sum \theta \times h \times 10^3 \quad (5)$$

ここに、 $\sum \theta$ は深さ 0.05, 0.15, 0.25 m で測定した体積含水率の和 (m³ m⁻³)、 h は 1 つの土壌水分センサーが代表する土層の厚さ (0.10 m) である。さらに、地表から深さ 0.30 m までの土層の飽和度 (S_r %) を以下の式で求めた。

$$S_r = \frac{s}{\sum f_i \times h \times 10^3} \quad (6)$$

ここに、 Σf_i は深さ 0.05, 0.15, 0.25 m の土壌の間隙率の和 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) である。また、深さ 0.05, 0.15, 0.25, 0.35 m にテンシオメーターを埋設し、長谷川・粕淵 (1988)¹⁷⁾を参考に、毎日午前 10 時と午後 6 時にデジタルマノメーター (PG-100N-102R, 日本電産コパル電子) を用いて深さごとのマトリックポテンシャルを測定した。さらに、網室内に転倒ます式雨量計 (S-RGB-M002, Onset Computer Co.) を設置し、降雨量を 10 分間隔でデータロガー (H21-001, Onset Computer Co.) に記録した。観測期間は 2011 年 8 月 10 日～同年 12 月 24 日である。その間、圃場の表面を除草のため適宜レイキで碎土し、裸地として管理した。なお本研究では、マトリックポテンシャルを圧力水頭の単位 (m) で表すこととする。

3. 結果および考察

(1) 間隙径分布, 貫入抵抗, 飽和透水係数

無底枠圃場における深さ 0.05 m の土壌について、耕耘前に $0.14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった粗間隙率が、耕耘によって $0.31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ まで 2 倍以上の有意な増加を示し、また微細間隙率については、耕耘によって $0.33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ から $0.27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ となり、有意な減少が認められた (図 3)。一方で細間隙率については、耕耘の前後を通して $0.06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 程度 (間隙率全体の 9~12%) と少なく、有意な変化が認められなかった。つまり、耕耘による間隙率全体の増加は、粗間隙率の増加に起因するものであった。図には示していないが、耕耘前の粗間隙率、細間隙率、微細間隙率の標準偏差がそれぞれ 0.07, 0.01, $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であったのに対し、耕耘後の粗間隙率、細間隙率、微細間隙率の標準偏差はそれぞれ 0.04, 0.01, $0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ となった。つまり、耕耘によってばらつきが小さくなり、間隙径の分布が面的に均一になったと言える。

無底枠圃場では深さ 0.15 m 以深の間隙径分布についても、深さ 0.05 m の耕耘前の土壌と同様に、粗間隙率は $0.06 \sim 0.16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (間隙率全体の 12~29%) であったのに対し、細間隙率は $0.05 \sim 0.07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (間隙率全体の 9~13%) と少ない一方で、微細間隙が間隙率全体の半分以上を占めていた (図 4a)。有底枠圃場における間隙径分布についても図 4b に示す通り、無底枠圃場と同様に、粗間隙率は $0.06 \sim 0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (間隙率全体の 11~18%)、細間隙率は $0.04 \sim 0.07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (間隙率全体のわずか 9~13%) であった。無底、有底ともに細間隙率が少ないのは (図 3, 4)、土壌の粒径組成を反映して (表 1)、砂粒子間の空隙に入り込んだ粘土粒子やシルト粒子が、おもに微細間隙の形成に寄与したためと考えられる。なお無底と有底の間、および深さ方向における間隙率や間隙径分布の違いは、枠圃場造成時における客土の充填程度の違いや、その後の実験科目、および卒業論文・修士論文での土壌に対する働きかけ (耕耘, 掘削, 水管理など) の違いによるものと推察される。

耕耘前、無底枠圃場における貫入抵抗は、地表から深さ 0.15 m までの間で $0.96 \sim 1.82 \text{ MPa}$ 、0.15 m 以深では $0.60 \sim 1.30 \text{ MPa}$ であり、地表面付近において大きい値を示した (図 5)。耕耘によって、耕耘機の爪が届いた深さ 0.10 m までの貫入抵抗が著しく減少し、とくに、深さ 0.05~0.10 m

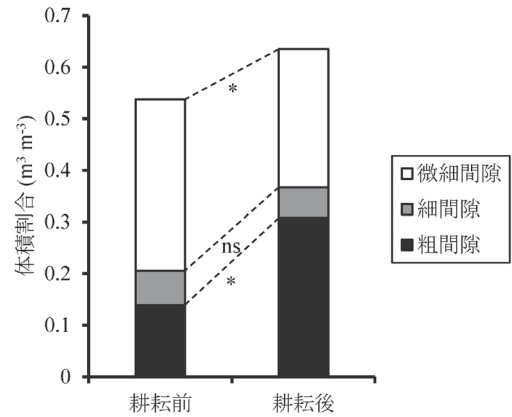


図 3 耕耘による深さ 0.05 m の土壌の間隙径分布の変化。*は有意水準 5% で有意差が認められ、ns は有意差が認められなかったことを示す。

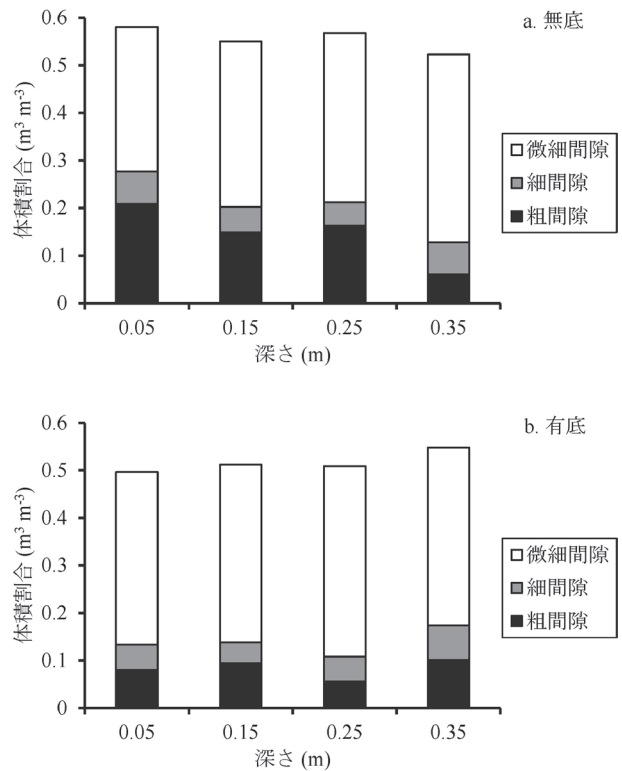


図 4 無底および有底枠圃場の間隙径分布。無底枠圃場における深さ 0.05 m の値は採取したすべての試料の平均。

の貫入抵抗の減少が有意であった (図 5)。図には示していないが、地表から 0.10 m までの深さにおいて、耕耘前の貫入抵抗の標準偏差は $0.50 \sim 0.79 \text{ MPa}$ であったのに対し、耕耘後の標準偏差は $0.07 \sim 0.31 \text{ MPa}$ と小さくなった。つまり間隙径分布と同様に、耕耘は土壌硬度に対してもばらつきを少なくする効果があったものと言える。

表 1 より、有底、無底にかかわらず、また深さにかかわらず、土壌の粒径分布に有意な差が認められなかったことから、間隙径分布の違いは、土粒子の充填の程度とその配列の結果であると考えられる。そこで、飽和透水係数を測定したすべての試料について、飽和透水係数と粗間隙率との

関係を検討した(図6)。両者の間には明瞭な正の相関がみられた。粗間隙率が $0.10\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ 以上では飽和透水係数が 10^{-5} m s^{-1} 以上であったのに対し、粗間隙率が $0.10\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ を下回ると、飽和透水係数が急激に減少するという傾向がみられ、粗間隙率 $0.10\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ 以下では、わずか $0.04\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ の粗間隙率の減少に対し、飽和透水係数が1オーダー減少

した。この結果は、耕耘によって粗間隙率を増加させることによって排水性の改良が可能であることを示唆する一方で、土壌圧縮等によって排水性が悪化しやすいと推察された。

(2) 水分動態

図7に、2011年に観測した降雨量と土壌のマトリックポテンシャルの結果を表す。簡単のため、マトリックポテンシャルは深さ0.05、0.35mのものを示した。観測期間中、降雨が589mmあり、連続した降雨の合計が50mmを超えた日(およびその際の降雨量)は8月26日(88.6mm)、9月19~21日(147.2mm)、11月19日(64.2mm)であった。深さ0.05mでは、8月22日にテンシオメーターの測定値が正圧を示すことがあったものの、その他の期間では、降雨後のマトリックポテンシャルの最大値はおおむね -0.20 m であった。また降雨の翌日ないし翌々日には、マトリックポテンシャルが粗間隙の境界に近い -0.30 m まで低下し

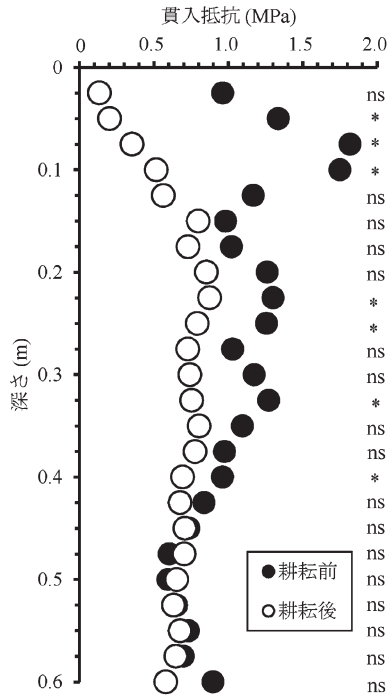


図5 耕耘が貫入抵抗に及ぼす影響。*は有意水準5%で有意差が認められ、nsは有意差が認められなかったことを示す。

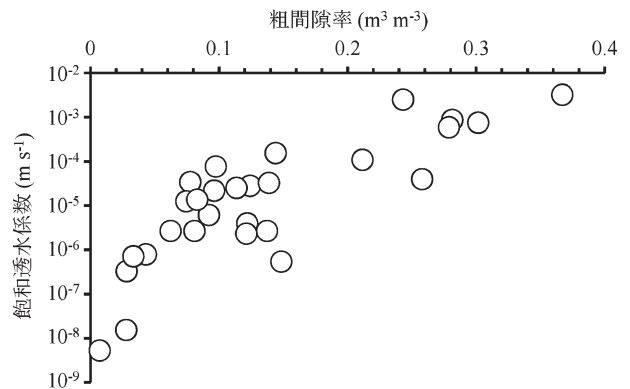


図6 粗間隙率と飽和透水係数の関係

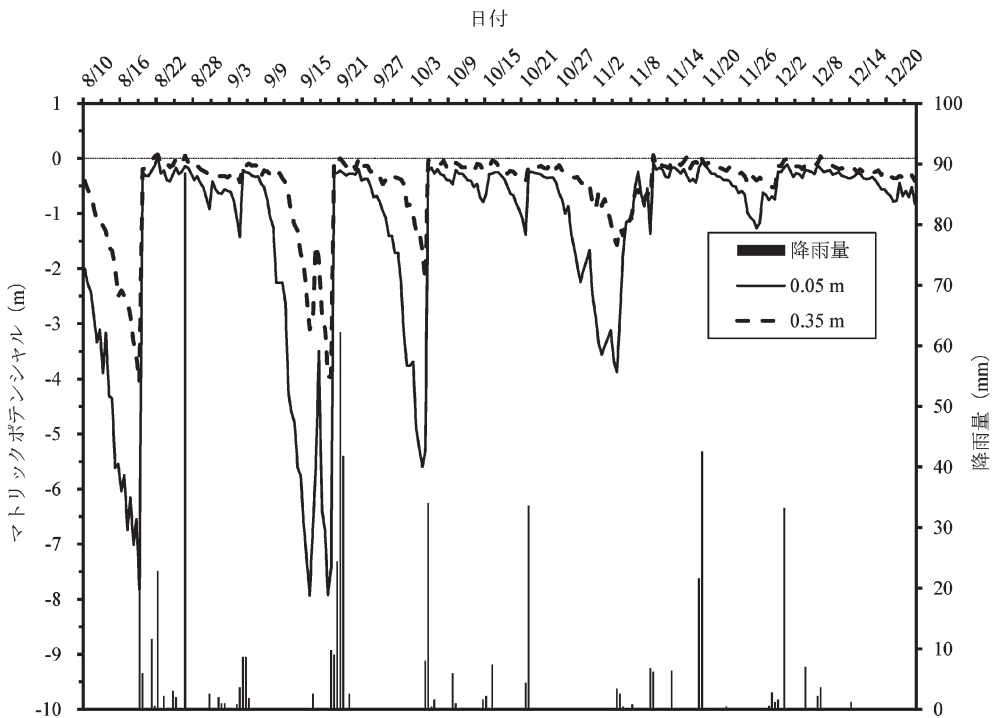


図7 降雨量と土壌のマトリックポテンシャルの経時変化

たため、過湿な状態は認められなかった。一方で8月および9月に無降雨の期間(11~14日間)が続いた際には、マトリックポテンシャルが生長阻害水分点に近い -8.00m まで低下した。これは、土壌の微細間隙が少ないため(図4b)、易有効水分量の範囲では、わずかな水分の減少でマトリックポテンシャルが下がるとともに、下層からの水分の供給が乏しいためと考えられる。深さ 0.35m では、テンシオメーターの測定値が正圧を示す頻度が深さ 0.05m よりも多くなり、 50mm 未満の降雨でも正圧を示す場合があった。マトリックポテンシャルが -0.30m まで低下するまでに、深さ 0.05m よりも3~5日の遅れが生じた。また、無降雨時のマトリックポテンシャルの低下は -4.00m までであり、相対的に潤湿な状態が続いた。

9月19~21日には 147.2mm 、10月21~22日には 38mm のまとまった降雨があり、その後連続した降雨が観測されず乾燥が続いた(図7)。そこで、これらの降雨後のマトリックポテンシャルの鉛直分布の変化をもとに、柵畑圃場での不飽和での水移動が、鉛直一次元で生じるものと仮定して、排水の様子を検討した¹⁴⁾。図8において、マトリックポテンシャルが深さ方向で一定となる場合には、導水勾配が1となり、土壌水が重力のみによって下方へ浸透することを表す。マトリックポテンシャルの鉛直分布が負の勾配を示した場合には、導水勾配が1よりも小さくなり、その傾きが 45° のときに水移動が止まる(導水勾配はゼロ)。傾きが 45° よりも浅い場合は、上向きの水移動が生じる(導水勾配が負)。

9月19~21日の降雨翌日から4日目(9月22~26日)には、日が経つにつれてマトリックポテンシャルが徐々に低

下するものの、ほぼ全層で下向きの水移動(排水)が行われていた。降雨の6日後(9月27日)には地表面付近で上向きの水移動が生じており、深さ $0.25\sim 0.35\text{m}$ で動水勾配がゼロとなり、排水が終了したことを示していた。その後全層で上向きの水移動に転じた(9月30日)(図8a)。10月21~22日の降雨後の変化も類似しており、排水が停止し、その後全層で上向きの水移動に転じたのは降雨の6日後(10月28日)であった(図8b)。深さ 0.25 および 0.35m において、水移動の向きが上向き(動水勾配が負)になるとき、これらの深さのマトリックポテンシャルは、両期間とも $-0.30\sim -0.40\text{m}$ 程度であり、粗間隙の境界にほぼ相当する値であった。

さらに、地表から深さ 0.30m までの土壌水分貯留量と飽和度について、降雨後の変化を深さ $0.25\sim 0.35\text{m}$ における水移動の向きと合わせて表3に示す。これによると、降雨直後の貯留量(および飽和度)は両期間でそれぞれ 128.8mm (83.9%)と 127.0mm (82.8%)であり、排水が終了し、深さ $0.25\sim 0.35\text{m}$ における水移動が上向きに転じたときの貯留量(および飽和度)は両期間でそれぞれ、 114.9mm (74.8%)と 113.7mm (74.1%)であった。このように、直前の降雨量に違いがあったものの(147.2mm と 38mm)、降雨後の貯留量の変化は、マトリックポテンシャルの鉛直分布の変化(図8)と同様に両期間で類似していた。

両期間で示した水分動態は、十分な(本研究では飽和度が 80% を超える程度の)降雨があり、その後無降雨日が続く場合における、柵畑圃場の貯留量の変化と排水の特徴を示していると考えられる。長谷川(2000)¹⁸⁾は、排水性の良い黒ボク土畑で深さ 1m までの水分動態を追跡した結

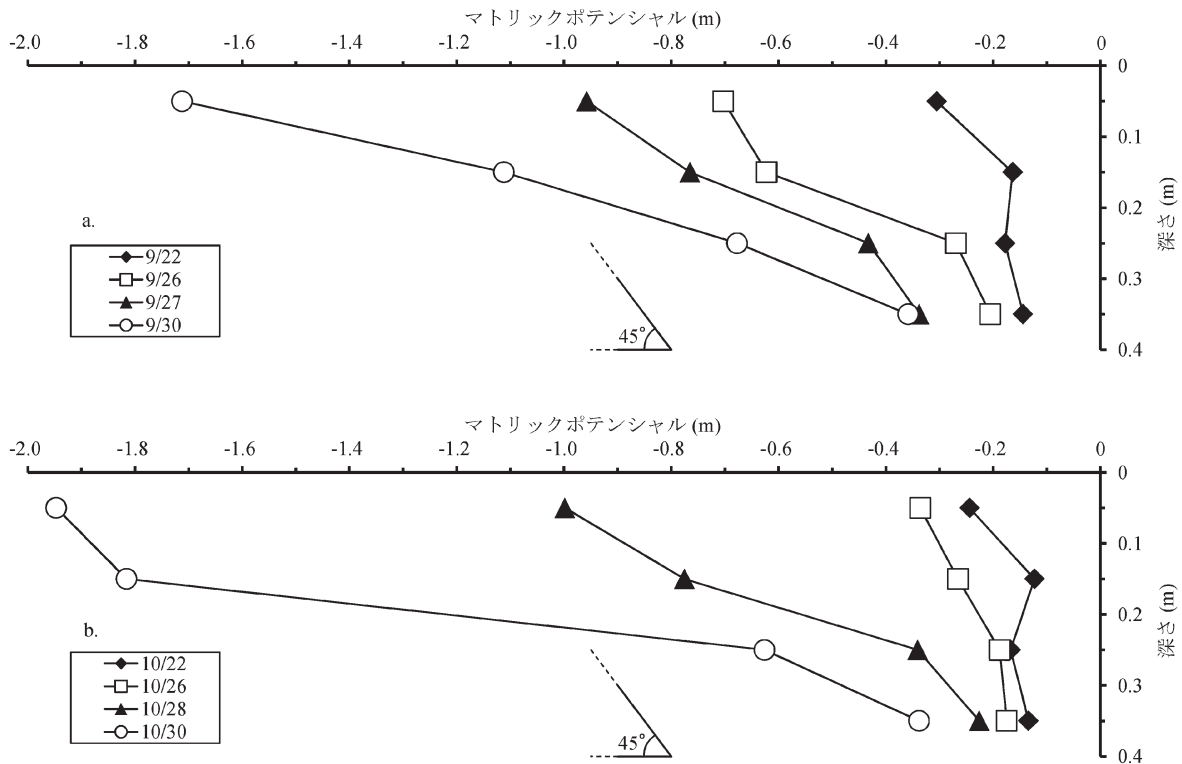


図8 マトリックポテンシャルの鉛直分布

表 3 降雨後の土壌水分貯留量と飽和度の変化

| 日付 | 9/21 | 9/23 | 9/25 | 9/27 | 9/29 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 地表から深さ0.30 mまでの貯留量 (mm) | 128.8 | 122.8 | 116.8 | 114.9 | 111.7 |
| 飽和度 (%) | 83.9 | 80.0 | 76.1 | 74.8 | 72.8 |
| 深さ0.25~0.35 mにおける水移動の方向 | 下 | 下 | 下 | 上 | 上 |

| 日付 | 10/22 | 10/24 | 10/26 | 10/28 | 10/30 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 地表から深さ0.30 mまでの貯留量 (mm) | 127.0 | 123.4 | 117.4 | 113.7 | 111.0 |
| 飽和度 (%) | 82.8 | 80.4 | 76.5 | 74.1 | 72.3 |
| 深さ0.25~0.35 mにおける水移動の方向 | 下 | 下 | 下 | 上 | 上 |

果、大きな降雨のあった2日後には、下方への排水が継続しているものの、深さ0.20~0.30 mのマトリックポテンシャルが-1.00 mまで低下したと述べている。この例と比べた場合、図7、8で示した結果から、柾畑圃場では粗間隙率が少ないことに伴って（図4b）、飽和透水係数が相対的に小さいため（図6）、不飽和な状態での透水係数がさらに小さくなり、排水に時間を要するとともに、また湿潤な状態で排水が停止するものと考えられる。

この柾畑圃場は客土によって造成され、まだ間もないため、植物根や土壌動物による孔隙、あるいは乾燥亀裂などの構造が発達していない。そのため排水性を悪化させないよう注意が必要があるとともに、地表面付近の乾燥については、土壌面蒸発を防ぐマルチなどの施用が有効であると考えられる。

4. ま と め

新設された東京農業大学生産環境工学科試験圃場において、地下水位の影響を受けない条件で、柾畑圃場表層の土壌硬度、保水性、排水性を調査した。明らかになったことは以下の通りである。

- ① 耕耘は粗間隙率の増加、およびそれに伴う飽和透水係数の増加と、土壌硬度の減少に寄与した。またばらつきを小さくし、均一にする効果があった。
 - ② 十分な降雨があっても表層は過湿にはならず、降雨翌日ないしは翌々日の地表面付近のマトリックポテンシャルは-0.30 mになった。表層での排水が終了して上向きの水移動が生じる際のマトリックポテンシャルは-0.30~-0.40 mであり、飽和度は74~75%であった。また表層の排水が終了するのに6日を要した。
 - ③ 粗間隙率のわずかな減少によって飽和透水係数が大きく低下することから、排水性を悪化させないよう注意が必要がある。
 - ④ 乾燥が続いた場合、地表面近くでは土壌のマトリックポテンシャルが生長阻害水分点近傍まで低下した。
- ③については、土壌圧縮を避けることや、耕起により改善する対策が考えられる。また④については、マルチの施

用などが有効であると考えられる。本研究で考慮することのできなかった下層での排水特性や、土壌面蒸発量との関係などについては、今後更なる研究が必要である。しかし本研究によって明らかになった結果は、適切な土壌管理の指標となるとともに、研究・教育の場として実験圃場を運営していくうえで、保水性と排水性の改良や灌漑方法の考案、作物の生育に及ぼす影響、水移動と溶質移動の観測や解析など、多くの題材を提供するものであると考えられる。

謝辞：本研究の遂行にあたっては、石井ひかり氏、金刺蓉子氏をはじめ、生産環境工学科地水工学研究室専攻生に協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 気象庁 (2005) 地球温暖化予測情報 第6巻. 東京.
- 2) 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. 農業土木学会論文集 220 : 35-41.
- 3) 北川 巖 (2005) 積雪寒冷地における排水改良の現状と今後の展開. 土壌の物理性 100 : 43-53.
- 4) 丹羽勝久, 辻 修, 大淵清志, 菊地晃二 (1999) 細粒質褐色低地土に生成した耕盤層が土壌水分動態およびテンサイ根系発達に及ぼす影響. ペドロジスト 43 (1) : 7-15.
- 5) 井上久義 (1989) 亀裂が発達した粘土質圃場における水移動現象のモデル化. 土壌の物理性 59 : 35-1.
- 6) 安中武幸, 井上久義, 成岡 市 (1992) 圃場土壌の水移動を支配する粗間隙構造. 土壌の物理性 66 : 3-9.
- 7) 足立一日出, 吉田修一郎, 高木強治, 伊藤公一 (1998) 重粘土汎用圃場における粗間隙量の変化と暗渠流出水量. 農業土木学会論文集 198 : 169-174.
- 8) 駒村正治 (1987) 土壌の物理性と畑地灌漑計画用水量の検討. 土壌の物理性 54 : 36-42.
- 9) YAN C., SHINOBI Y., TAIRA M. (2010) Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality. Soil Research 48 : 526-530.
- 10) TAYLOR H.M., ROBERSON G.M., PARKER J.J. (1966) Soil strength-root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. Soil Science 102 : 18-22.
- 11) ATWELL B.J. (1993) Response of roots to mechanical impedance. Environmental and Experimental Botany 33 : 27-40.
- 12) 世田谷区都市整備部建築審査課 (2012) 世田谷の地盤について. 世田谷区, 東京.
- 13) 高須俊行, 駒村正治, 成岡 市 (1986) 南関東ローム台地における雨水の地下涵養 : 東京西南部の例. 土と基礎 34 (11) : 51-56.
- 14) 宮崎 毅, 長谷川周一, 粕淵辰昭 (2005) 土壌物理学. 朝倉書店, 東京, pp 18-53.
- 15) 長谷川周一 (1998) メンブレン吸引法. 土壌の物理性 77 : 51-52.
- 16) SUZUKI S., HIROTA T., IWATA Y. (2012) Experimental study on sample size for laboratory calibration tests of commercial dielectric soil water sensors. Japan Agricultural Research Quarterly 46 : 73-79.
- 17) 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壌水分吸引圧の測定. 土壌の物理性 58 : 49-51.
- 18) 長谷川周一 (2000) 黒ボク土畑の圃場用水量の実態. 土壌の物理性 83 : 41-46.

Soil Mechanical Impedance, Water Retention, and Drainability of the Experimental Upland Plots Established by Soil-Dressing

By

Shinji SUZUKI*, Fumio WATANABE*, Satoru TAKAHASHI*, Tomomi MITSUI**,
Keiko IDUKA** and Li SHAO**

(Received November 22, 2012/Accepted March 11, 2013)

Summary : The long term trend of both precipitation and drought suggests the necessity to pay more attention to drainage and water retention of upland fields. Further, it is required to assess effects of cultivation on those soil properties in addition to soil mechanical impedance for an appropriate soil management. Therefore, soil mechanical impedance, water retention, and drainability of top soil layer were investigated at upland plots of the Experimental Field of the Department of Bioproduction and Environment Engineering, Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture. The following was revealed. 1) Cultivation increased macro-porosity and saturated hydraulic conductivity, and decreased soil mechanical impedance. It decreased the variability of the porosity and mechanical impedance resulting in uniform soil physical condition. 2) The soil did not suffer from water-logging even after sufficient rain fall. The matric potential of surface soil was -0.30 m the next day or two days after rain. The matric potential of the bottom of the top layer was -0.30 to -0.40 m, and the saturation degree was 74 to 75% when the drainage ceased and upward water migration started. Further, it took 6 days for the top layer to cease drainage. 3) It is important to keep drainability since slight decreases in macro-porosity result in significant decreases in the saturated hydraulic conductivity. 4) Since the matric potential decreased down to near the depletion of soil moisture content for optimum growth after consecutive dry days, some measures to prevent evaporation including mulching are suggested to be effective.

Key words : Infiltration, Drying, Soil management, Macro pore, Readily available soil water for crop growth

* Department of Bioproduction and Environment Engineering, Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

** Department of Agricultural Engineering, Graduate School of Tokyo University of Agriculture