

局所耕うん栽培による人工マクロポア周囲の 水分移動に関する実験的研究

丸山 佳太・徳本 家康

(地圏環境学研究室)

平成27年12月1日 受理

Experimental Study on Water Flow around an Artificial Macro-pore with the Shaft Tillage Cultivation

Keita MARUYAMA, Ieyasu TOKUMOTO

(Laboratory of Environmental Subsurface Science)

Accepted December 1, 2015

Summary

The shaft tillage cultivation method is one of no-tillage methods for transplanting seedlings in an artificial macro-pore that is called shaft tillage to facilitate the crop roots much deeper than weeds. With the shaft tillage method to grow a Chinese cabbage, we observed the process of root growth and water flow around the artificial macro-pore under the drip irrigation. When the amount of evapotranspiration was 4 mm d^{-1} , exceeding the irrigation of 1 mm d^{-1} , the decline in water storage and the water stress of the crop were confirmed. Under the irrigation of 4 mm d^{-1} , corresponding to the evapotranspiration, the water stress of crop was decreased, although preferential flow was occurred around the artificial macro-pore. The macro-pore was not filled with many roots, but development of root system was confirmed at the bottom of the macro-pore. Understanding the development of the root system is important for plant growth, suggesting that root water uptake could be high efficient with preferential flow around the macro-pore.

Key words: The shaft tillage cultivation method, Macro-pore, Root uptake, Preferential flow

1. はじめに

持続可能な栽培法の試みとして、低環境負荷に配慮した不耕起栽培の関心が高まっている。不耕起栽培は、元来、土壌および水の保全の観点から注目された農法¹⁾であり、土壌侵食の防止効果が高い栽培法として位置づけられる²⁾。不耕起栽培は、一連の圃場作業から耕うんや整地の工程を省略する栽培法であり、その圃場作業には、①播種工程、②肥料と除草剤の施用工程、③収穫残渣の土壌還元工程がある³⁾。畑地における不耕起栽培では、表層土壌の緊密化により土壌の固層率、仮比重や貫入抵抗が増大するため^{4,5)}、不耕起栽培用の農機具を用いて、播種溝や播種穴を形成させる手法が一般的である⁶⁾。近年、不耕起栽培の土壌保全の有効性に加えて、カバークロップ⁷⁾や刈り込みした雑草残渣によるマルチ栽培(雑草リビングマルチ)⁸⁾

の併用により、減農薬や減化学肥料に繋がる低環境負荷型農法の導入も行われている⁹⁾。

これまでの不耕起栽培に対して、田島ら¹⁰⁾は不耕起畑に人工的に鉛直方向の空洞（人工マクロポア）を形成させ、人工マクロポアの上部へ苗移植を行う栽培法を提案した。その栽培法は局所耕うん法と称され、雑草リピングマルチを前提とした農法として提唱された¹¹⁾。栽培法の特徴として、定植させた苗の根は人工マクロポア内へ伸びるため、雑草と対象作物の水や養分の競合が少ないことが挙げられる¹²⁾。また、定期的な雑草刈り込みにより、自生できる雑草の種類が限定されるため、丈の高い雑草などのある種の有害雑草の駆除効果も期待できる。

局所耕うん法を適用したチンゲンサイの露地栽培において、除草剤を散布しなくても苗の定植に対する雑草リピングマルチの有効性は認められ、収穫時に人工マクロポア内の密集根群の形成が確認されている⁹⁾。これは、雑草リピングマルチと局所耕うん法の併用効果により、作物の生産性を維持しながら除草剤の無施用が可能であることを示唆する。局所耕うん法の作業効率を上げるため、田島ら¹³⁾は車輪型農作業ロボットの開発にも成功しており、圃場での局所耕うんの自動作付による実用化を検討している。

局所耕うん法のさらなる可能性として、点滴灌漑による作物の水利用効率の増大が見込まれる。慣行法における根の生育形態に対して、人工マクロポア内に密集した根群への水分・肥料の供給に点滴灌漑は適している。しかし、局所耕うん法に点滴灌漑を適用した研究例は少なく、人工マクロポア周囲の根の伸長および土壌水分移動に着目して局所耕うん法による根の吸水効果を評価した例が見当たらないのが現状である。

本研究では、局所耕うん栽培に点滴灌漑を適用して、人工マクロポア内外における根の伸長について調べるため、室内カラム栽培実験を行った。そして、実験カラムの重量変化から日蒸発散量を明らかにするとともに、人工マクロポア周囲の吸引圧 (h) および体積含水率 (θ) の計測に基づき、土壌水分移動に対する考察を行った。

2. 実験方法

2.1 定植前の苗栽培

供試作物にはチンゲンサイ (*Brassica chinensis* L.) を用いた。育苗培土 (タキイ種苗社、成分: チッソ 310 mg l^{-1} , リンサン, 210 mg l^{-1} , カリ 300 mg l^{-1}) を充填したセルポット (縦 2.5 cm , 横 2.5 cm , 深さ 4.5 cm) に種植えをした後、室温 25°C の恒温室で苗を育てた。植物育成用の蛍光灯 (FL20SBR-HG, NEC ライティング社) を用いて、点灯時間を午前 6 時から午後 6 時に設定した。

セルポットには播種時に十分な灌水を行い、その後は霧吹きで定期的に灌水を行った。育苗期間は、片井¹⁴⁾が推奨する 1 ヶ月程度とした。定植直前の苗丈は 5 cm 程度であった (図 2 a)。発達した苗の根によって苗と培土の密着性は高いため、苗を容易に取り出すことができた (図 2 b)。

2.2 カラム実験

供試土には 2 mm 篩いにかけた佐賀大学農学部圃場の土 (砂 63% , シルト 20% , 粘土 17%) を使用した。土の乾燥密度および飽和透水係数は、それぞれ 1.38 g cm^{-3} と 3.22 cm d^{-1} であった。吸引法および遠心分離法で求めた供試土の水分特性曲線を図 1 に示す。供試土の飽和体積含水率は $0.418 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であり、飽和土壌の吸引圧の増加に伴い空気が侵入する吸引圧 (空気侵入値) は、 100 cm 程度であった。

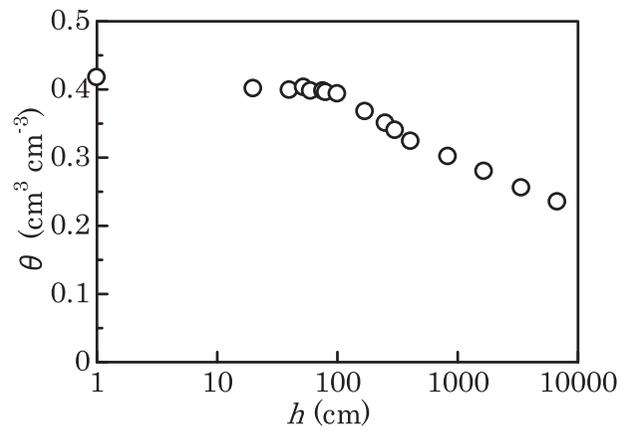


図1 供試土の水分特性曲線

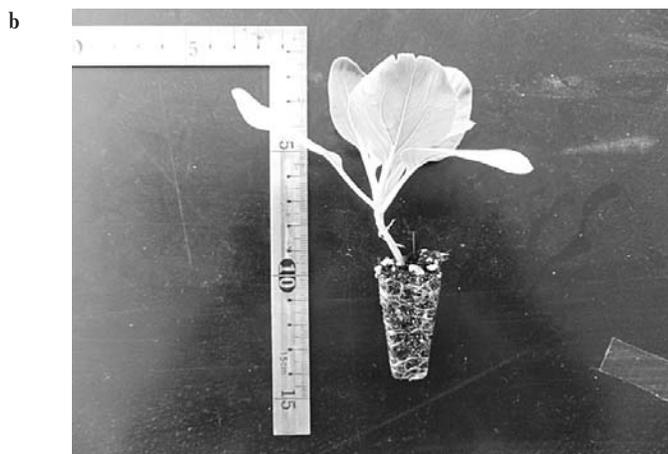


図2 定植直前の育苗の様子 (a) とセルポットから取り出したチンゲンサイの様子 (b)

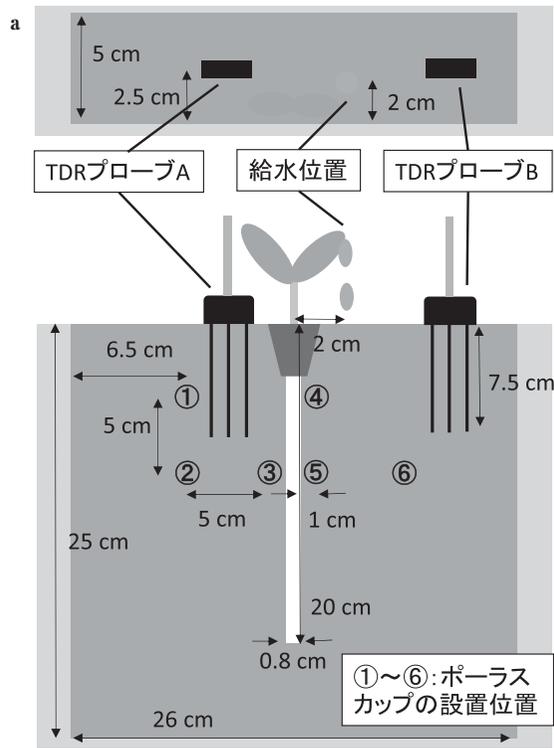


図3 実験装置の概略図 (a) および土壌カラムに定植後のチンゲンサイの様子 (b)

室内栽培実験では、透明アクリルカラム（高さ25.5 cm，幅26 cm，厚さ6.5 cm，容積3250 cm³）（図3 a）に風乾させた供試土を，乾燥密度1.38 g cm⁻³で均一に充填し，下端から水道水（水道水の電気伝導度 10.03 mS m⁻¹）を用いて3日ほどかけて毛管飽和させた．毛管飽和後に重力排水させ，重力排水後にはカラム下端に設けたすべての穴をゴム栓で塞ぎ，給排水が生じないようにした．その初期条件の下，カラムにはドリルで深さ20 cm，直径8 mmの人工マクロポアを1か所形成させた．定植部にはセルポットサイズの穴を開け，苗植えたチン

ゲンサイ（図2b）を培土とともに人工マクロポア上部へ移植した（図3b）. 定植時覆土や鎮圧は行わないものとした.

チンゲンサイの水管理には、マリOTT管（内径1.1 cm, 高さ50 cm）を用いた. 水道水（水道水の電気伝導度 10.03 mS m^{-1} ）をマリOTT管に接続した注射針から試料表面に滴下して与えた. 灌漑強度はおおよそ 4.6 mm h^{-1} であり、灌水による試料表面の土壌侵食が生じないようにした. 灌水の目安は、2日1回程度の頻度で午前11時とした. 定植後1週間の日灌水量は 1 mm d^{-1} 程度とし、それ以降の日灌水量には日蒸発散量に相当した 4 mm d^{-1} 程度を用いた. 施肥管理では、マリOTT管を用いて、1週間に1回、水道水で1000倍に希釈した液肥（住友化学園芸社、N-P-Kの成分比：5：10：5）を試料表面に与えた. カラム下端にロードセル（LCB03K010M, A&D社製）を設置し、15分間隔における重量変化をデータロガー（CR10X, キャンベル社製）に記録した. 実験カラムの重量減少量に基づき、日蒸発散量を求めた. 日灌水量の計測については、マリOTT管の目盛りの読みによって、マリOTT管から土壌表面に与えた滴下量を算出する手法を用いた. なお、マリOTT管の目盛りから算出した日灌水量に対して、ロードセルの重量変化から求めた日灌水量を比較した場合、相関係数は0.997 ($n = 7$)であった.

定植後のチンゲンサイの生育条件は、育苗条件と同様に室温 25°C において、植物育成用の蛍光灯（FL20SBR-HG, NECライティング社製）による12時間の点灯（午前6時から午後6時）とした. カラム側面からのデジタルカメラ撮影を定期的に行うことで、根の伸長過程の観察した. また、苗の活着の評価方法として、生長点に近い第3本葉の葉幅による計測¹²⁾を用いた. 定植後22日にカラムを解体して、人工マクロポア内のチンゲンサイの根分布を観察した.

2.2 土壌水分計測

人工マクロポア周囲の土壌水分移動を把握するために、テンシオメータによる吸引圧の測定を行った. テンシオメータは、脱気水で満たしたアンギオチューブで連結させたポーラスカップ（外径2 mm, 長さ10 mm）と圧力センサー（HTV-0P5N, Hi-Techs社製）によって構成される. 人工マクロポアの両側にポーラスカップを6つ挿入し（図3a）、データロガー（CR10X, キャンベル社製）を用いて、土壌の吸引圧を1時間間隔で連続計測した. ポーラスカップの空気侵入値は、吸引圧500 cm程度であり、本稿では吸引圧470 cm以下のデータを用いた.

表層土壌水分量の計測には、電磁波を利用した計測法として広く普及しているTDR土壌水分測定システム（TDR100, キャンベル社製）を使用した. 地表面から鉛直方向深さ7.5 cmまでTDRプローブを挿入して、平均の比誘電率（ ϵ ）を計測し、次式のTopp式¹⁵⁾に比誘電率の実測値を代入することで体積含水率を求めた.

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3 \quad (r^2 = 0.988) \quad [1]$$

3. 結果と考察

3.1 根の伸長過程

チンゲンサイは双子葉植物であり、根の発達は主根と側根によって生じる. 本実験の定植後、培土に密集していた根（図2b）が徐々に人工マクロポア外において発達する様子が観察された. 図4は、定植後5日および8日における側根の伸長過程の観察例である. 2本の側根は、図3aの①のポーラスカップの位置に向かって伸びた. このように、定植後の根の伸長過程では、

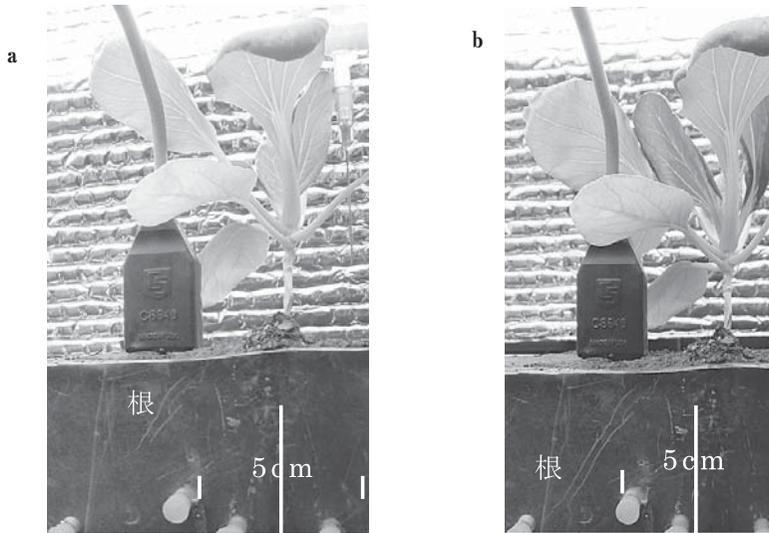


図4 根の伸長の様子：定植後5日の根 (a) および定植後8日の根 (b)

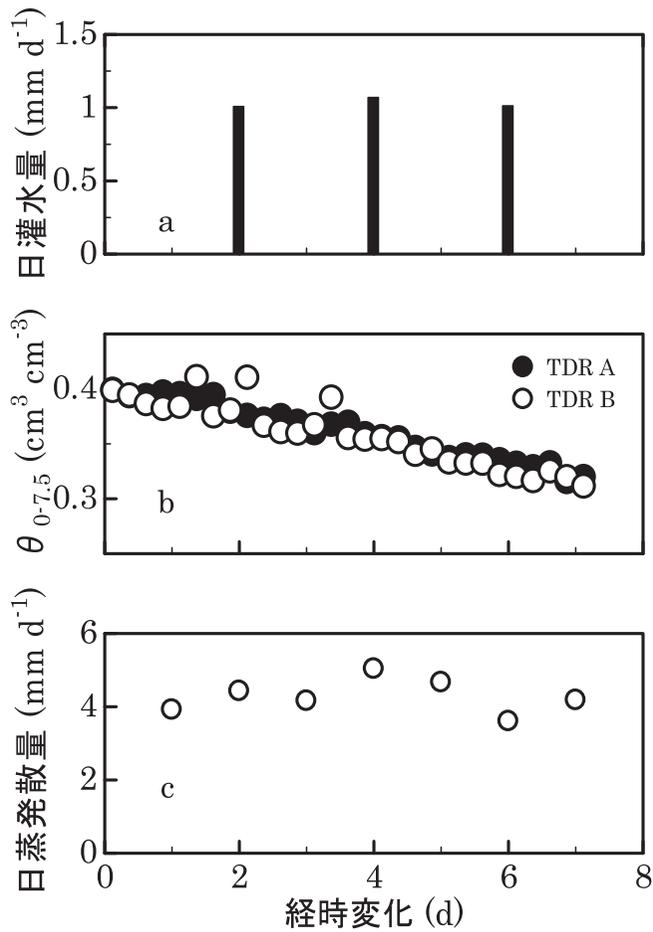


図5 定植後1週間における日灌水量 (a), 体積含水率 (b), および日蒸発散量 (c) の経時変化

地上部の作物を支えるのに人工マクロポア外へ根を伸ばす傾向がみられた。

一方、人工マクロポア内外における主根の伸長の観察は困難であった。主根の伸長抑制の原因として、チンゲンサイへの施肥不足が考えられる。田島ら¹²⁾は、チンゲンサイの無施肥露地栽培において、人工マクロポア内の下端まで主根の伸長が確認されても密集根群の形成には至らないため、十分な施肥の必要性を明らかにしている。

定植直後の苗の活着状態は、根の伸長過程に影響するため、発根に対する重要な要因の一つである。本研究で定植した苗の葉数は7枚であり、最大生長点から第3本葉の葉幅計測を行った結果、定植2日後の葉幅長は44.0 mm、4日後の葉幅長は51.6 mmであった。これは、露地栽培におけるチンゲンサイの葉幅の生長¹²⁾と比較しても良好な成長であることを示した。以上のことより、本実験ではアクリルカラム断面における2次元の根分布の目視観察だけでなく、活着評価によって定植後の順調な苗の初期生長を確認できた。

3.2 土壤水分移動

図5に、定植後1週間における日灌水量、体積含水率、日蒸発散量の経時変化を示す。日灌水量が 1 mm d^{-1} の灌水条件（図5a）において、土壌深さ0 cmから7.5 cmにおける平均の

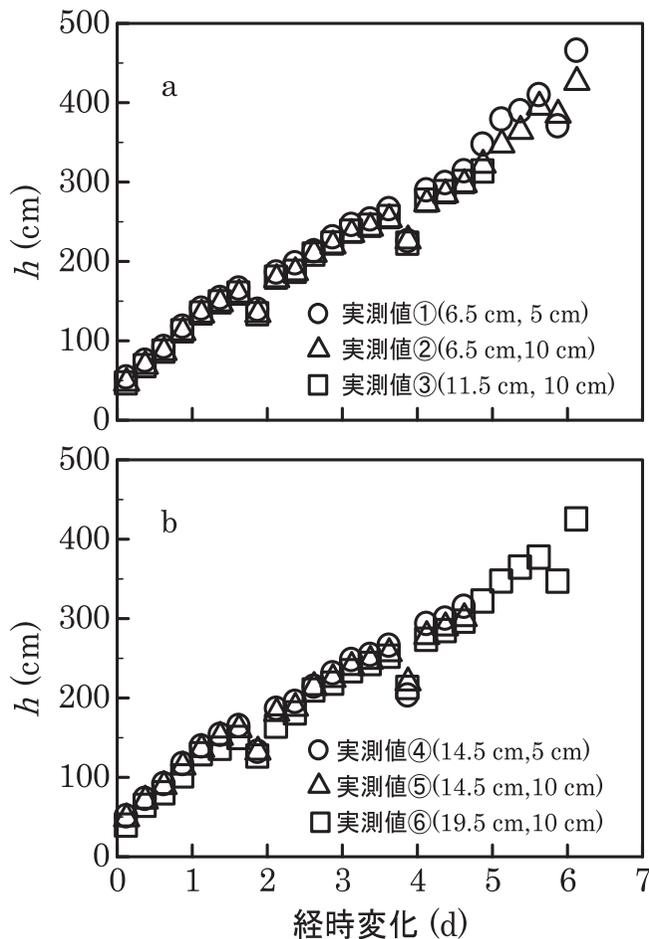


図6 定植後における土壤吸引圧の経時変化（実測値の番号は図3aの観測位置に対応）



図7 定植後のチンゲンサイの生育状態：定植後10日に観察したカップング症状 (a) および定植後16日に日灌水量を 4 mm d^{-1} にした際の葉の回復状態 (b)

体積含水率 ($\theta_{0-7.5}$) は減少傾向を示した (図5 b). これは日灌水量に対して, 日蒸発散量が $4 \sim 5 \text{ mm d}^{-1}$ と大きいと推察される (図5 c).

吸引圧の経時変化では, 定植後5日までのどの深さにおいても, 吸引圧は同程度の増加傾向を示した (図6). 5日以降の観測位置① (6.5 cm, 5 cm) における吸引圧では, 深さ10 cmの観測位置の吸引圧よりも徐々に増加し, 差異が生じた (図6 a). これは, 3.1節で述べたように, チンゲンサイの生長に伴い, 観測位置①付近に伸長した根によって吸水が生じたためと考えられる.

日蒸発散量が日灌水量を大きく上回る条件では, 土壌の水分貯留量の減少は明らかであり, チンゲンサイが受ける水分ストレスにより, 生育障害が起こりうる. 吉田ら¹⁶⁾は, 水分ストレスによって生じる葉の湾曲症状 (カップング) を調査しており, 吸引圧が250 cm程度に達するまでに灌水する水管理を推奨している. 本研究では, 1 mm d^{-1} の灌水条件において, 定植

後10日にカップリングの症状を観察しており（図7a）、日灌水量を日蒸発散量に相当する 4 mm d^{-1} 程度まで増やすことでカップリングの症状が著しく減少した（図7b）。そのため、定植後における適切な灌水量の設定は今後の課題である。

3.3 人工マクロポア周囲における選択的な水流れ

水分ストレスによるカップリング症状を防ぐため、定植後16日から日灌水量を 4 mm d^{-1} 程度に増加させた。なお、灌漑中に土壌と育苗培土の接地面から人工マクロポア内へ向う直接的な水の流入は観察されていない。その日灌水量の適用において、点滴灌漑後には選択的な水流れが人工マクロポアの周囲に生じながら、人工マクロポアの下端まで到達する様子が観察された（図8）。テンシオメータの不具合により、吸引圧の取得はできなかったが、目視では灌漑後の土壌の色の濃淡によって選択流の有無の判別が可能であった。

選択的な水流れが生じる要因には、植物根や亀裂が考えられる。慣行法の耕起栽培に比べて、不耕起栽培の土壌では土壌の緊密化の影響によって根系が浅くなることが知られている¹⁷⁾。しかし局所耕うん法では、人工マクロポアを設けることにより、深層への根系の発達を促すため¹⁸⁾、作物の根に沿った選択的な水分移動が生じる可能性はある。本研究では、人工マクロポア内の密集根群を形成できなかったため、根の伸長と選択流の関連性について検証できなかった。しかし、作物の水利効率や肥料溶脱の観点から、根の伸長と選択流の関連性を明らかにすることは重要であり、今後の継続実験の結果が待たれる。



図8 日灌水量 4 mm d^{-1} の灌漑後における人工マクロポア周囲の選択流

3.4 カラム解体前後の根の分布

定植22日後のカラム解体時には、人工マクロポア外および壁面に沿って伸長した側根や毛細根が確認された（図9a）。とりわけ、栽培期間中において、人工マクロポア内に伸長した毛細根を目視で観察するのは困難であった。図9bは、人工マクロポアの下端における毛細根の

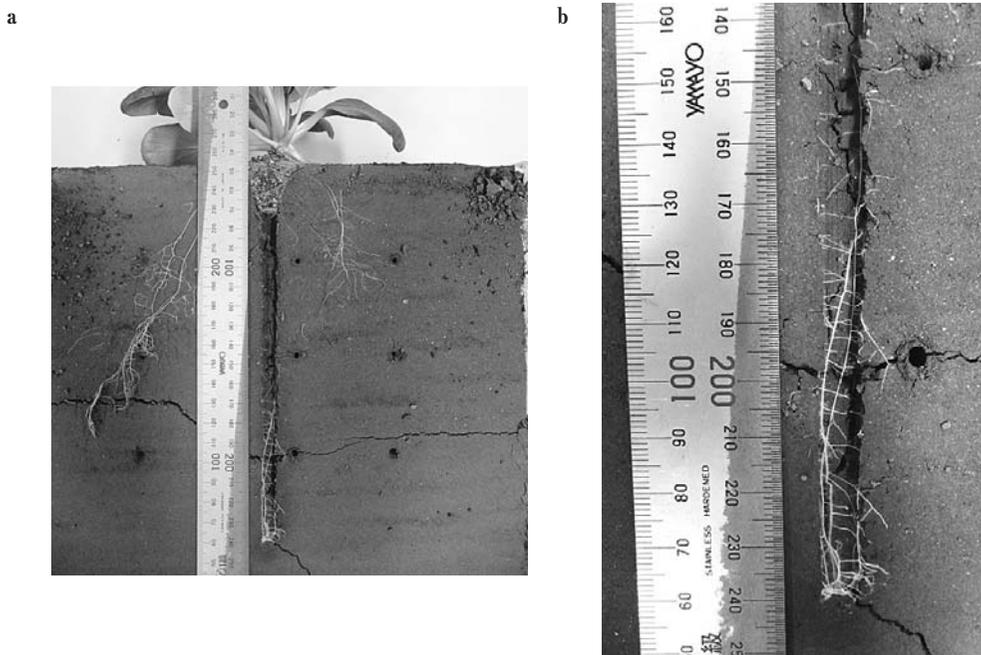


図9 カラム解体後のチンゲンサイの根の分布：カラム断面における根の分布 (a) および人工マクロポアの深層部における根分布の拡大図 (b)

拡大写真である。この毛細根は、人工マクロポアの壁面を網目状に発達しており、これは人工マクロポア下端の深さ20 cmの位置からも根の吸水が生じていた可能性を示唆した。

Jitsuno ら¹⁸⁾は、局所耕うん法によるチンゲンサイの露地栽培において、深さ30 cmの人工マクロポア内における密集根群の形成と作物の生長量の関連性を報告している。すなわち、密集根群の形成は、作物への水分・養分吸収を増加させるため、作物収量の増加に繋がる。本研究では、定植後の肥料散布の不足に加えて、過剰な水分ストレスにより、密集根群の形成は阻害されたと考えられる。しかし、密集根群が形成された条件において、作物生長に支障をきたさないように日灌水量を与える場合、人工マクロポア周囲における不均一な流れをより一層、促進させるような水分・溶質移動形態が考えられる。そのため、密集根群が形成された条件で、人工マクロポア周辺の水分移動特性を把握するような追加実験を行うことが必要である。

4. おわりに

本研究では、局所耕うん栽培に点滴灌漑を適用して、人工マクロポア内外における根の伸長過程および水分移動を観察した。日灌水量 1 mm d^{-1} に比べて日蒸発散量は 4 mm d^{-1} と大きかったため、定植後1週間において土壌深さ10 cmまでの吸引圧は400 cmを超えて、体積含水率の著しい減少がみられた。これにより、チンゲンサイに水分ストレスが生じて、葉にはカッピング症状が確認された。そのため、チンゲンサイに対する適切な日灌水量の決定が検討課題となった。日蒸発散量に相当する日灌水量 4 mm d^{-1} を適用した場合、根の伸長に伴う人工マクロポア周囲への選択的な水流れが確認された。今後は、人工マクロポア内外の根の伸長過程および選択流の発生の関連性を明らかにすることで、局所耕うん法における点滴灌漑の節水効果について検討する予定である。

謝 辞

本研究は、鳥取大学乾燥地研究センター共同利用研究（D. 若手奨励研究）により実施された。同研究センターの藤巻晴行教授には多くの助言を頂いた。また、佐賀大学農学部の鄭紹輝教授および東京農業大学の實野雅太博士には、栽培法に関する多大なるご協力を頂いた。ここに感謝致します。

摘 要

局所耕うん法は、不耕起畑に人工的に鉛直方向の空洞（人工マクロポア）を形成させて、雑草の根よりも深くに作物の根を発達させるように、人工マクロポアへ苗移植を行う栽培法である。本研究では、局所耕うん栽培にチンゲンサイを用いて、点滴灌漑下における人工マクロポア内外の根の伸長過程および水分移動を観察した。定植後に与えた日灌水量 1 mm d^{-1} に対して日蒸発散量 4 mm d^{-1} と大きい場合、土壌貯水量の減少傾向およびチンゲンサイの水分ストレスが確認された。一方で、日蒸発散量に相当する日灌水量を適用した場合において、チンゲンサイの水分ストレスは軽減され、人工マクロポア周囲における選択的な水流れが確認された。また、人工マクロポアへの密集根群の形成は観察されなかったが、人工マクロポアの下端における根の伸長は確認された。このような局所耕うん法による根の伸長過程の把握は、人工マクロポア周囲の選択的な水流れに伴い、根による吸水効率を高める可能性があると考えられる。

引 用 文 献

1. Unger, P.W., McCalla, T.M. (1980): Conservation tillage System, *Adv. Agro.*, 33: 1-53
2. 坂井直樹・春原亘・高塚清一・衛藤邦男・角田公正(1987)：不耕起栽培の評価，*農作業研究*，22(2)：113-119
3. 金澤晋二郎（2000）：環境保全からみた不耕起栽培技術の特徴と今後の研究課題，*日本作物学会*，69：374-380
4. Heard, J.R., Klavivko, E.J., Mannering, J.V. (1988): Soil macroporosity, hydraulic conductivity and air permeability of silty soils under long-term conservation tillage in Indiana, *Soil Till. Res.*, 11: 1-18
5. Roth, C.H., Meyer, B., Ferde, H.G., Derpsch, R. (1988): Effect of mulch rates and tillage systems on infiltrability and other soil physical properties of an oxisol in Parana, Brazil, *Soil Till. Res.*, 11: 81-91
6. 松森一浩・三枝正彦・伊藤豊彰(2004)：ダイズの穴播き式不耕起播種機の開発，*農業機械学会誌*，66(1)：90-97
7. 荒木肇・藤井義晴・山岸主門・長谷川浩・小松崎将一（1999）：カバークロップの利用と農作業，*農作業研究*，34(3)：217-219
8. 原涼子・坂井直樹(2006)：持続性を目指した畑作物－雑草共生系に関する基礎的研究，*農林技術センター報告書*，19：1-19
9. 田島淳（2004）：被覆植物と耕うん，*農作業研究*，39(3)：171-173
10. Tajima, K., Tamaki, K., Tatsuno, J., Kato, M., Inagaki, T (1996): A study on the shaft tillage cultivation system for an agricultural robot, *AgEng '96 MADRID*, paper 96A-101
11. 田島淳・加藤雅義・樹野淳也（2000）：カバークロップを用いた被覆栽培のための定植器具の開発に関する研究，*農作業研究*，35(4)：223-228
12. 田島淳・加藤雅義・樹野淳也・玉木浩二（2003）：雑草リピングマルチを利用した局所耕うん栽培における元肥の施用方法とチンゲンサイの生育，*農作業研究*，38(1)：17-24
13. Lopez, N.V., Tajima, K., Tanaka, H., Thanh, D.T., Yukumoto, W., Jitsuno, M., Kato, K., Sakaguchi, E., (2013):

- Guidance of a transplanting skid steer vehicle with variable center of gravity, *International Journal of Environmental and Rural Development*, 4: 75-80
14. 片井政一 (1987) : チンゲンサイの作り方, 香農試印刷物, 1191 : 119-121
 15. Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 16: 574-582
 16. 吉田俊郎・井上満・宇田川雄二・青柳森一 (2005) : チンゲンサイ栽培における生育時期別のかん水方法がカッピング発生に及ぼす影響, 千葉農総研研報, 4 : 11-21
 17. 辻博之・山本泰由・松尾和之・臼木一英 (2002) : 火山性土壤畑におけるラッカセイ, トウモロコシ, ダイズの根系に及ぼす不耕起栽培の影響, 根の研究, 11(2) : 43-49
 18. Jitsuno, M., Tajima, K., Kato, M., Sakaguchi, E., Tatsuno, J. (2012): The Effect of the vertical shaft in the shaft tillage cultivation, Desert Technology 11 international conference, San Antonio Texas, USA