J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 150, p.93 ～103 (2022)

JpGU 特集
論　文
Original Paper

不耕起栽培と人工マクロポア導入が石垣島サトウキビ畑における土壌保水と有機物蓄積へ与える効果

岡香菜子 [1]·Bui Thanh Long[1]· 森也寸志 [1]· 大澤和敏 [2]· 干川 明 [3]

Artificial macropore installation and no-tillage practice in subtropical sugarcane field to conserve water and organic matter in soils

Kanako OKA[1], Thanh Long BUI[1], Yasushi MORI[1], Kazutoshi OSAWA[2] and Akira HOSHIKAWA[3]

Abstract: Artificial macropore introduction and no-till practices were conducted in the subtropical red soil of a sugarcane field on Ishigakijima Island, Japan, to increase the storage of soil water and carbon. The examined fields were suffering from heavy rain, typical of the subtropical climate, the intensity of which is increasing because of climate change. Heavy rain causes surface runoff and soil erosion, which decreases sugarcane field. Soil particles were being delivered directly into the sea, potentially affecting coral reefs. Therefore, the storage of soil water and soil carbon is crucial for protecting the natural subtropical environment. Artificial macropores with bamboo fibers were installed at 1 m intervals to enhance vertical infiltration. In addition, no-tillage agriculture with the retention of plant residues was conducted to protect the surface soil from the impact of heavy rain. Field management trials were conducted under no-tillage with/without macropores (NT-M and NT-X, respectively) and conventional tillage with/without macropores (CT-M and CT-X, respectively). Rainfall, surface runoff, soil erosion, soil moisture, and total soil carbon were measured. As a result, the macropore installation fields (CT-M and NT-M) had greater soil moisture contents than the fields without macropore installation (CT-X and NT-X). The average soil moisture values of each profile revealed that NT-M retained more soil water than CT-X ($p < 0.01$). Moreover, the calculated soil profile total carbon decreased under NT-X, CT-M, and CT-X. This is normal for a tropical climate with a relatively high temperature. However, the NT-M treatment showed an increase in soil carbon by $+0.45$ t-C·ha^{-1}·yr^{-1}. This value corresponded well with that of conservative practices in such agriculture fields. This result indicates that macropore installation in combination with no-tillage practices increases the total carbon in the soil profile, even in tropical climates. We recommend macropore installation with no-tillage practices with plant residue retention as an effective measure for enhancing the retention of soil water and soil carbon.

Key Words : artificial macropore, no-tillage, surface runoff, soil erosion, soil carbon

1. はじめに

現在，世界各地で土地荒廃が進行し，世界の耕作地の 20 %，森林の 30 %，草地の 10 % が劣化しており，また 15 億人がそこで生活しているとされている（FAO, 2008）．特に強い降雨による水食は，環境及び農業上の重大な問題であり，土壌劣化の中でも大きな割合を占めている（Pimentel et al., 1995）．耕地において表層土壌を失うことは生産性の低下を引き起こし，大きな課題となっている．例えば，米国の土壌保全試験地において長期耕作試験を行うと，10 年間で約 15 cm の表土が失われ，土壌有機炭素量が 1/4 に低下し，それに伴いトウモロコシの収量は 2.7 Mg ha^{-1}y^{-1} 減少した（Borst et al., 1945）．また，フィリピンでは侵食によって 15 年間でトウモロコシの生産性が 80 % 減少したという報告がある（Dregne, 1992）．環境的側面から見れば，1600 Mha もの農地が土壌流亡に曝されており，それに伴って陸域から失われる炭素相当量は 24.9 Pg にもなり（Lal, 2001），農地というレベルだけでなく，陸域レベルでの喫緊の課題と言える．

沖縄県石垣島でも，陸域から海域への赤黄色の土壌（以下，「赤土」）の流出が大きな問題となっており，栄養塩の動態も含めた包括的な考察がされている（池田 · 菅, 2014）．赤土流出は，農地における肥沃な土壌の流出による生産性の低下だけでなく，海域における微細な土砂によるサンゴ礁の死滅 · 劣化を引き起こす．サンゴは貧栄養場での生育を好み，また海底に堆積した赤土はサンゴと共生する褐虫藻の光合成を阻害するため，赤土流出はサンゴの生育環境を劣化させる（山里, 1991）．石垣島

[1]Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University, 3-1-1 Tsushimanaka, Okayama 700-8530, Japan, Corresponding author: 森 也寸志 岡山大学大学院環境生命科学研究科, 〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1, yasushim@cc.okayama-u.ac.jp
[2]Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, 350 Minemachi, Utsunomiya 321-8505, Japan.
[3]Sekiseishouko Coral Reef Fund, 221 Ishigaki, Ishigaki 907-0023, Japan.
2021 年 9 月 13 日受稿　2021 年 12 月 27 日受理

周辺のサンゴ礁は 363 種類にのぼり，世界屈指のサンゴ礁海域を形成している（石西礁湖自然再生協議会, 2007）ため，重要な観光資源でもある．

石垣島では 1950 年代から圃場整備事業や各種インフラ事業等が顕著になり，土地利用が森林から畑地等へ大幅に改変された．石垣島には高い受食性を持つ赤土等の熱帯性土壌が広く分布しており，雨で容易に分散し流出する（翁長 · 宜保, 1984）．亜熱帯性気候がもたらす降雨強度の強い雨は土壌に衝撃を与え，流出を助長させる．また石垣島では傾斜 3 % 以上の急勾配圃場が農地全体の 5 割を占めている（沖縄県八重山支庁農林水産整備課, 2008）．これら土壌，降雨，地形条件が加わり土壌侵食が増大したため，沖縄県は 1994 年に「赤土等流出防止条例」を制定し，各種開発に伴う排水基準を最大 200 mg L^{-1} と規定した．その結果各種開発による赤土流出は減少したものの，主な発生源である農地からの流出は規制されていないため，栄養塩を含む土砂が流亡する課題が報告されており，農林地管理のあり方が議論されている（大澤ら, 2004a; 大澤ら, 2004b）．

一方，沖縄県では，石垣島の主要作物であるサトウキビの栽培における具体的な営農的流出抑制対策として，畑面被覆や圃場周辺部の保護，裸地期間の短縮，斜面長の短縮，心土破砕，不耕起栽培の回数を増やすなどを挙げている他，沈砂池を設けるなどの対策が行われている（沖縄県農林水産部, 2014）．圃場での赤土流出量削減率を不耕起栽培，間作作物による被覆，植生帯の設置の 3 つで比較すると，植生帯の設置，間作作物による被覆，不耕起栽培の順に効果が大きくなった（大澤 · 池田, 2007a; 大澤 · 池田, 2007b; 乃田ら, 2009）．

不耕起栽培とは，通常行われる耕耘を行わず，作物の刈り株，わらなどの作物残渣を畑地表面に残した状態で次の作物を栽培する方法である．作物残渣が雨滴の衝撃を弱め，降雨時の土壌クラストの形成を抑制し，雨水の土壌中への浸透を維持するため，土壌流出抑制対策として効果があるとされている（Tebrügge and Düring, 1999）．海外では，一つには重機の転圧による土壌の締め固めを軽減するために（Richard et al., 2001），また地球温暖化の軽減という意味から，土壌団粒を破壊し，酸素との接触を増大させ，有機物分解を促進しがちな耕耘ではなく，不耕起で栽培する技術が普及しつつある（Six et al., 2000）．先に述べたように，不耕起栽培は赤土流出抑制に効果があり，その実施が望まれるが，実際に不耕起栽培を行う営農農家は通常栽培を行う農家よりも少ない（石垣市, 2016）．理由として，雑草が生えやすい状態になること，また，農家としては放置に見える管理をあまり望まないなどがあげられる．

亜熱帯における表面流の発生そしてそれに伴う赤土流出は，土壌の透水性を越えて強雨が降る，または土壌表層に不透水膜ができて浸透が抑制されることが原因と考えられる．従って，透水性の改善または透水性を維持する工夫ができれば表面流の発生や赤土流出を軽減できると考えられる．不耕起栽培で一定の効果が観察されるのは，植物残渣が雨滴の衝撃を和らげ，不透水膜の形成を防止することによると考える．そこで本研究では，土壌間隙構造を疑似的に作る人工マクロポア（Mori et al., 2014）を土壌に設置して透水性を改善し，表面流の発生を軽減することを考えた．人工マクロポアとは，自然中の土壌構造である粗大間隙を人工的に作り，構造維持のために竹繊維などを挿入したものである．これまでの研究で，浸透時の目詰まりを回避しつつ（Mori et al., 2013），下方浸透が促進されること（Mori and Hirai, 2014），表面流が発生しがちな貧栄養土壌で下方浸透を改善し，根群域での水分を増加させることで植物バイオマスと土壌有機物量が増加する成果が得られている（Mori et al., 2014）．

農家の事情によって不耕起栽培が実施しにくい場合，もし慣行農法に代わる選択肢を示すことができれば今後の保全的農地管理に非常に有効である．よって，本研究では，技術開発の初期段階として土壌水分と土壌有機物を保全することを目的とし，沖縄県石垣島において実際に営農活動が行われているさとうきび畑に不耕起栽培と人工マクロポア導入を実施しその効果を調べた．具体的には，土壌水分，雨量，表面流量，土壌流亡量，土壌有機物量を計測し，不耕起栽培の効果と人工マクロポア導入の効果を比較，検証した．

2. 試験方法

2.1 試験地の概要と人工マクロポアの設置

石垣島南西部に位置するサトウキビ畑（北緯 24° 21’ 56”, 東経 124° 07’ 34”）を試験圃場とした．1981 ～ 2010 年の年平均気温は 24.3 °C，年平均降水量は 2106.8 mm（気象庁, 2011）であった．試験期間の 2013 年は 2161.0 mm で平年通りだが, 2014 年は 1300.5 mm と非常に少なかった（気象庁, 2021）．

試験地の概要図を Fig. 1 に，営農スケジュールを Table 1 に示す．土壌は礫質黄色土（カーラ岳系）（沖縄県, 2021）または風化変質赤黄色土（農研機構, 2021）で，試験圃場は，斜面長約 80 m，畝幅は約 1.4 m で 8 列，図の上から下方向（西から東）へ 3 % の傾斜があり，石垣島では標準的に見られる圃場であった．2013 年 2 月から畝 4 列分を不耕起区，畝 4 列分を耕起区として栽培を行った．2014 年 3 月に耕起 · 不耕起それぞれの区の畝間 1 列に人工マクロポアを設置し（マクロポア区），隣接する畝間 1 列を対象区（無処理区）とし，不耕起マクロポア区（No-Tillage with Macropore, NT-M），不耕起無処理区（No-Tillage without Macropore, NT-X），耕起マクロポア区（Conventional Tillage with Macropore, CT-M），耕起無処理区（Conventional Tillage without Macropore, CT-X）の 4 つの試験区を設けた．人工マクロポアの設計については次の項で説明する．

不耕起区は 2013 年 2 月から耕起を行わず，前作のサトウキビの株を栽培し，2014 年 2 月に収穫した．さらに

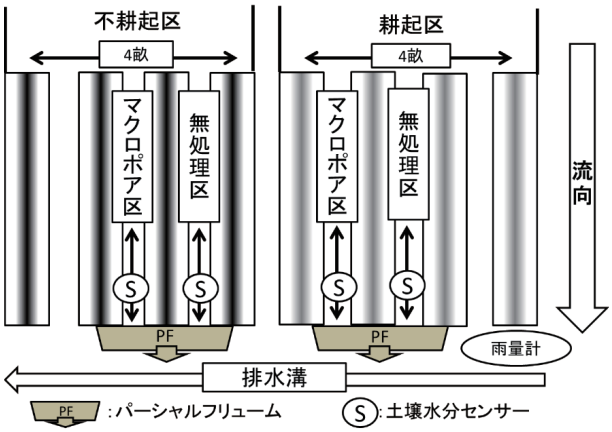


Fig. 1　試験地概要図.
Schematic design of the field.

Table 1　営農スケジュール.
Cultivating schedules.

不耕起		耕起	
作業日	内容	作業日	内容
2013/2	前年の株から栽培		
2013/6	施肥 A		
		2013/7	耕起
2013/8	施肥 B	2013/8	苗植付, 施肥 B
		2013/11	施肥 A，培土
2014/2	収穫，植物残渣		
2014/3	土壌採取，人工マクロポア・水分センサー設置		
2014/3	前年の株から栽培	2014/3	高培土
2014/9	調査，データ回収		
2015/3	収穫	2015/3	収穫
2015/4	土壌採取，データ回収		

施肥 A: BB877, 施肥 B: 世美がえり

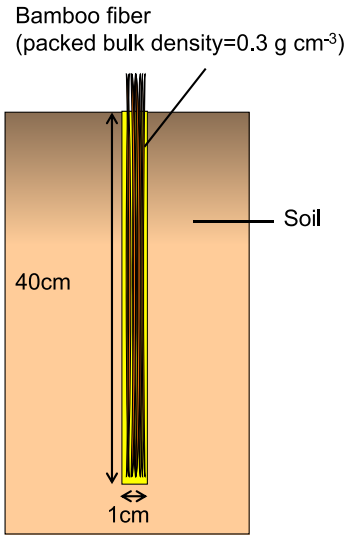


Fig. 2 人工マクロポアのモデル図.
Schematic representation of artificial macropore.

株を残し栽培を行い，1 年経過した 2015 年 3 月に再度収穫した．耕起区では夏植え栽培を行い，2013 年 7 月に耕起，8 月にサトウキビを植え付け，2015 年 3 月に収穫した．夏植え栽培では苗の植え付けを 7–9 月に行うため，栽培期間は 1 年半となる．

2.2 人工マクロポアの設計

Fig. 2 に人工マクロポアの模式図を示した．人工マクロポアは，サトウキビの畝間に畝に沿って 1 m 間隔で 10 カ所設置した．検土杖で直径 1 cm 深さ 40 cm の穴を設け，その穴に竹繊維を埋設した．竹繊維は直径 1 cm の束にし，長さ 50 cm，密度 0.3 g cm^{-3} のものを埋設し，地上に竹繊維が突出するようにした．これは地上部に先端を出すことで，後にクラストが形成されたり，土砂が流れ込んでも小孔としての構造を維持し下方浸透機能を維持するためである（Mori et al., 2014）．なお，人工マクロポアの水平方向の影響範囲はおよそ半径 50 cm である（崎川, 2016）．

2.3 調査方法

耕起区，不耕起区の下端にパーシャルフリューム（3 インチ型，ウイジン）とフロート式水位計（UNZ-GY30, ウイジン）を設置し，2 つの畝間から流れ出る表面流出量の水位を計測し，流量に換算した．また，パーシャルフリューム下部には濁度計（COMPACT-CLW，JFE アドバンテック）を設置し，流量と濁度から流出土砂量を計測できるようにした．

4 つの処理区それぞれのパーシャルフリュームから上流側 6 m 地点に，土壌水分センサー（プローブ長さ 12.4 cm，センサー基盤部の直径 4.2 cm，HydraProbe II, Stevens）を埋設した．深さは 10 cm，30 cm であり，畝間の中央（人工マクロポア設置部分）とサトウキビの株の中央に，合計 8 本設置し，体積含水率を 1 時間ごとに計測，24 時間平均水分量を解析に用いた．

2014 年 3 月時点の現地の様子は Photo 1 のようであり，不耕起区は植物残渣で圃場が覆われており，耕起区は地面が露出していた．

畝間の中央で，深さ 0 cm（表層），30 cm において



Photo 1 不耕起区（左）と耕起区（右）の外観（2014. 3）.
Field view of no-tillage (left) and tillage (right) management.

Table 2 試験地の土壌物理特性.
Soil physical characteristics of examined field.

Management	No tillage			Tillage		
Depth（cm）	0	10	30	0	10	30
Sand （%）	42.4	47.8	50.6	43.0	49.6	50.5
Silt （%）	32.6	26.9	21.5	32.8	20.3	18.8
Clay （%）	25.0	25.3	27.9	24.2	30.1	30.7
TC （%）	1.16	0.798	0.935	1.305	1.41	0.928
TN （%）	0.14	0.110	0.110	0.120	0.10	0.120
Bulk density（g cm^{-3}）	1.44		1.46	1.45		1.49
K_s （cm s^{-1}）	1.35×10^{-4}		1.50×10^{-3}	8.30×10^{-5}		1.34×10^{-3}

Table 3 シミュレーションに使用したパラメータ.
Input parameters for simulation.

Management	No tillage				Tillage	
Initial water content （mm^3 mm^{-3}）	0.20					
Rainfall intensity （mm h^{-1}）	20.0					
Evaporation （mm d^{-1}）	10.0					
van Genuchten parameters	θ_r	θ_s	α	n	K_s （cm d^{-1}）	l
Bulk soil*	0.050	0.448	0.015	1.233	33.5	0.5
Macropore**	0.037	0.832	0.154	2.103	222912	0.5
Plant residue	0.045	0.430	0.145	2.68	712.8	0.5
Air**	0.001	1	24	3	23846.4	−3.0

*: characteristics of bulk soil was estimated from measured data in Fig. 3
**: referred from Sakikawa (2016)

100 mL コアサンプラーで不攪乱土壌を採取した．表層から採取する試料とは 0–5 cm，また深さ 30 cm の試料とは 27.5–32.5 cm の試料である．透水性は変水位透水試験法で，保水性は加圧板法（0, 50, 100, 200, 500, 1000 cmH_2O）とサイクロメータ法で調べた．

また，攪乱土を深さ 0 cm（表層，0–5.0 cm），10 cm（7.5–12.5 cm），30 cm（27.5–32.5 cm）から採取し，粒度分析（SALD-3100，島津）と全炭素 · 全窒素分析（2400II, PerkinElmer）に供した．

粒度分析，全炭素 · 全窒素，乾燥密度，飽和透水係数については Table 2 に示した．

2.4 Hydrus2D による浸透現象の推定

本研究では，植物残渣を残した不耕起栽培，鉛直管状孔隙であるマクロポアを圃場に導入し，その効果を評価している．土壌水分センサーで水分計測を行うが，浸透の形態については詳細が明らかにならないため，二次元シミュレーション（Hydrus2D，PC-PROGRESS）によって浸透現象を評価した．まず，100 cm × 100 cm の土壌領域を設定し，実測された土壌水分特性曲線（Fig. 3）から van Genuchten パラメータ（van Genuchten, 1980; Mualem, 1976）を取得し，土壌の水分移動特性値とした（Table 3）．マクロポア区では，領域の中央に直径 10 mm 長さ 40 cm の透水性が高いパラメータを持つ繊維材料が挿入されており，人工マクロポア（Mori et al., 2014）とした．不耕起栽培区では植物残渣層が土壌表層に 5 cm あるものとした．植物残渣層は降雨時には浸透性が高く，乾燥時には蒸発遮断層になる特性があり，実際に植物残渣を円筒カラムに入れて試験をすると砂の特性値に近かった．亜熱帯の強い雨が降ってからの一週間を想定して，20 mm h^{-1} の降雨を 6 時間降らせ，その後重力排水と 10 mm d^{-1} の蒸発の影響を受けた 1 週間の水分移動を計算した．初期水分量は観測地を参考に 0.20 cm^3 cm^{-3} とした．なお，土壌の直上に空気の層を設け，強い降雨で湛水した場合は領域からこれを速やかに排除した（崎川, 2016）．

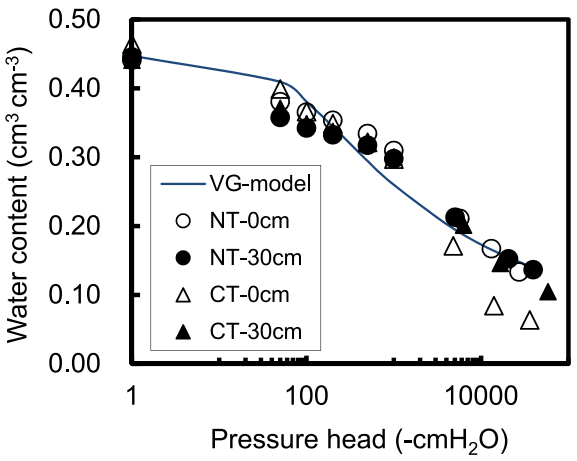


Fig. 3 試験圃場の土壌水分特性曲線.
Soil water retention curve for examined field.

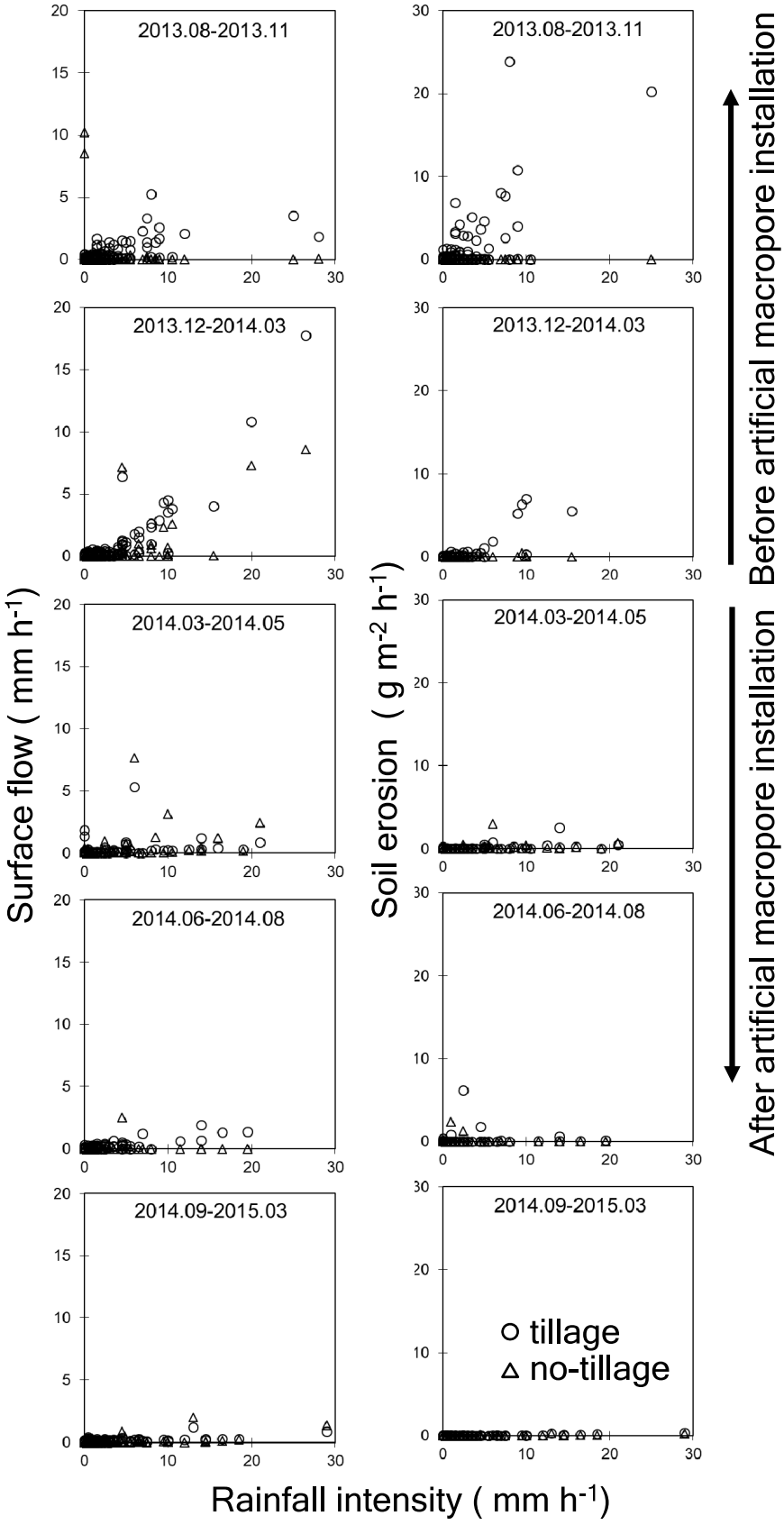


Fig. 4 降雨強度に対する表面流と土壌流亡の発生.
Surface flow and soil erosion related to rainfall intensity.

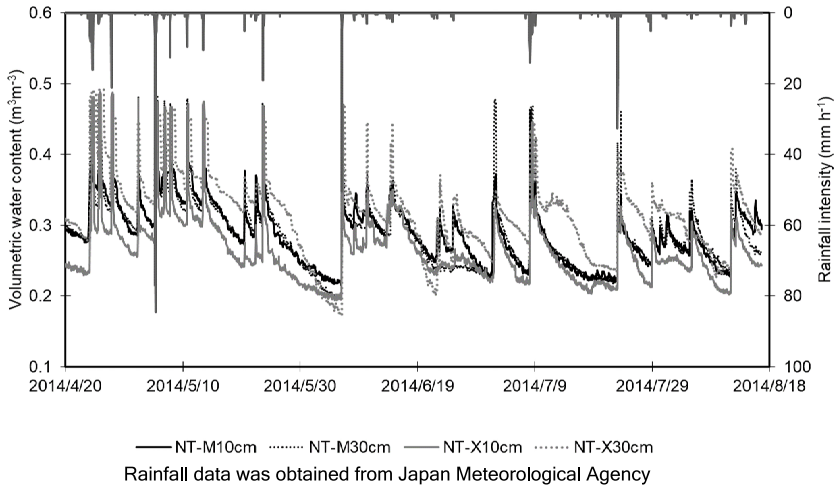


Fig. 5 不耕起栽培区における土壌水分.
Soil moisture at no-tillage management.

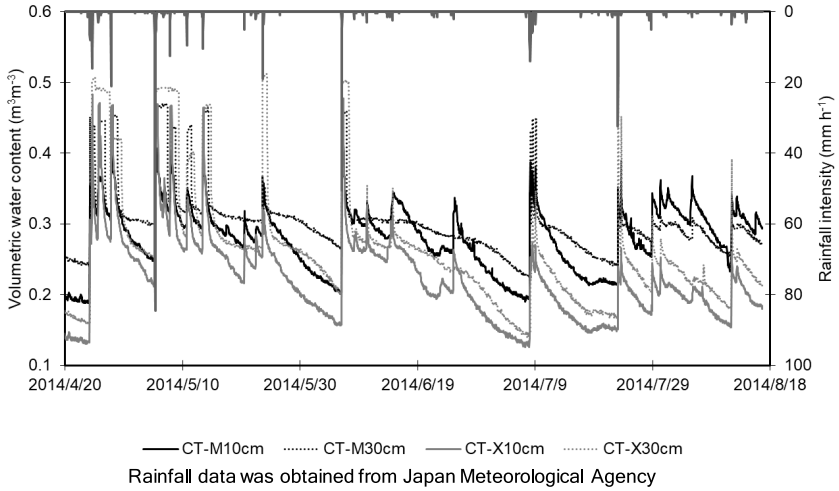


Fig. 6 耕起栽培区における土壌水分.
Soil moisture at conventional tillage management.

3. 結果と考察

3.1 降雨強度と表面流出，土壌流亡

はじめにで示したように，表面流出や土壌流亡には降雨強度が影響するため，Fig. 4 では試験期間全体をおよそ 3，4 ヶ月毎に分け，降雨強度に対する表面流と土壌流亡を示した．なお，2014 年 9 月から 2015 年 3 月の期間は非常に数値が小さいため半年をまとめた．また，Fig. 1 に示したように，パーシャルフリュームに流れ込む地表流と流亡土砂は，マクロポア処理 · 未処理が混在しており，限定した考察を行う．

グラフを見ると，不耕起区は表面流 · 土壌流亡ともに小さく，これは植物残渣が土壌表面を覆っているから（Photo 1 左）と推測された．従ってマクロポアの導入の効果は限定的である．一方，耕起区は，2014 年 3 月を境に表面流 · 土壌流亡に減少が見られる．作物の生育による被覆度増加の影響ならばもう少し徐々に減少すると推測されたが，3 月を境に大きく減少している． 2014 年 3 月はまだ地面がかなり露出しているため（Photo 1 右），人工マクロポア設置によってある程度の下方浸透促進が行われ，表面流と土壌流亡の抑制が見られたものと判断した．

3.2 不耕起およびマクロポア設置が土壌水分の変動に与える影響

4 管理の違いを精査するために，比較的雨量が多く，管理の違いがわかりやすい 2014 年 4 月 ～ 8 月の土壌水分の変動について考察する．Fig. 5 に不耕起栽培管理の土壌水分の変動を，Fig. 6 に耕起栽培の土壌水分の変動を示した．管理区の略号については調査方法に示したとおりである．なお，センサーを設置した時点での土層断面の平均土壌水分は不耕起区では 26.9 %（$n = 4$），耕起区では 23.9%（$n = 4$）であり，植物残渣で覆われている不耕起区の水分がわずかに多かった．

Fig. 5 を見ると NT-X 区では，深さ 10 cm では降雨に対する素早い水分上昇と素早い下降が見られる．一方深

さ 30 cm ではピークを見せた後，緩やかに減少をしている．NT-X 区では植物残渣が表層にあるためこれが雨水をとらえ，表層での一時的な保水と，深部への浸透，そして緩やかな水分減少が観察されたものと考えられる．これが結果的に Fig. 4 で観察された表面流と土壌流亡の少なさにつながっていると考えられた．

一方，NT-M 区では，同様のピークを見せた後，深さ 10 cm も 30 cm も類似した水分減少傾向が観察できる．マクロポア区で断面の水分が異なる深さでも類似するのは Mori and Hirai（2014）の報告と一致し，植物残渣からの土壌深部への緩やかな水供給と下方浸透促進の効果，そして植物残渣による蒸発遮断による保水の効果（Derpsch et al., 1986）が断面で平均化しやすいからだと推測された．ちょうど NT-X 区の中間の水分が観察されており，土壌断面における保水量は類似するが，浸透の形が異なると考えられる．

一方 Fig. 6 では，降雨に対する反応は，CT-M 区，CT-X 区ともに深さ 10 cm は変動が大きく，深さ 30 cm では緩やかに排水され，両者は類似した排水傾向を見せている．CT-M 区，CT-X 区の大きな違いは，深さ 10 cm, 30 cm それぞれの深さのピーク後の水分の減少幅にある．深さ 10 cm においては降雨後の最大値が同じ水分量であっても減少幅はマクロポア区の方が小さく，未処理区の方が大きい．また深さ 30 cm においては減少が緩やかであるが，未処理区の方が傾斜が大きく，マクロポア区の方が小さいことがグラフから観察される．耕起区は土地被覆が小さく，雨滴の衝撃を和らげるものがないため，表面流が発生しやすく，雨水を土壌内にとらえきれないことが水分の増減の特徴として現れていると考えられた．一方，マクロポア区は，下方浸透機構を持つため，深部土壌が雨水をとらえており，深さ 10，30 cm 両深度で，未処理区と比較してゆっくりとした排水をしていると考察できる．なお，マクロポア区は土壌断面の上部と下部の水分が異なり，NT-M で考察したような均等分布ではない．これは表層に植物残渣のように雨水をとらえるものがなく，表面流として流れてしまうために上部と下部の差を緩やかに埋めていくプロセスが存在しないからだと考えられた．

ここでセンサーで計測している 24 時間毎の土壌水分量をまとめると Fig. 7 のようになった（2014/3/15–2014/8/16, $n = 154$）．深さ 10，30 cm の平均値を計算して Tukey 法による多重比較を行うと，NT-M 区，NT-X 区，CT-M 区では土壌水分が違うとはいえず，CT-X 区は他の管理に比べて土壌水分が有意に少ないという結果（$p < 0.01$）になった．耕起という管理形態は不耕起より土壌水分の保持が少ない（CT-X<NT-X）が，耕起でもマクロポア構造を持つと耕起だけの畝より水分が多く（CT-M>CT-X），これは不耕起と変わらない水分を維持できると説明できる．

3.3 土壌間隙構造が雨水貯留に与える影響の推定

前項で考察した水分分布の違いがどのように発現するのかを考察するために，Fig. 8 に Hydrus2D で行った降雨 7 日後の水分分布を示した．

Fig. 8 の右半分が表層処理の違いを示している．不耕起栽培（Fig. 8 上）では，表層に植物残渣をおいており，浸透性が高く，蒸発遮断として働く．図から観察されるように短時間でも表層で水を保全できる不耕起栽培の方が耕起栽培（Fig. 8 下）に対して保水量が多く，水分到

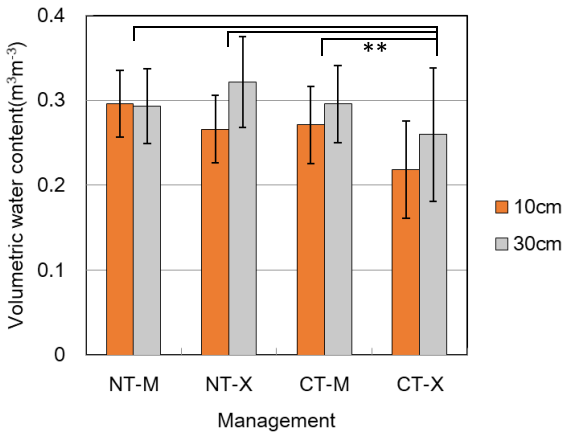


Fig. 7 管理区毎の試験期間の土壌断面の平均水分量（深さ 10，30 cm のセンサー計測による．** は Tukey 法による 1 % 有意水準，$n = 154$）．
Averaged soil water content for each management. (sensor measurement for 10 and 30 cm, ** means 1 % significance by Tukey test, $n = 154$).

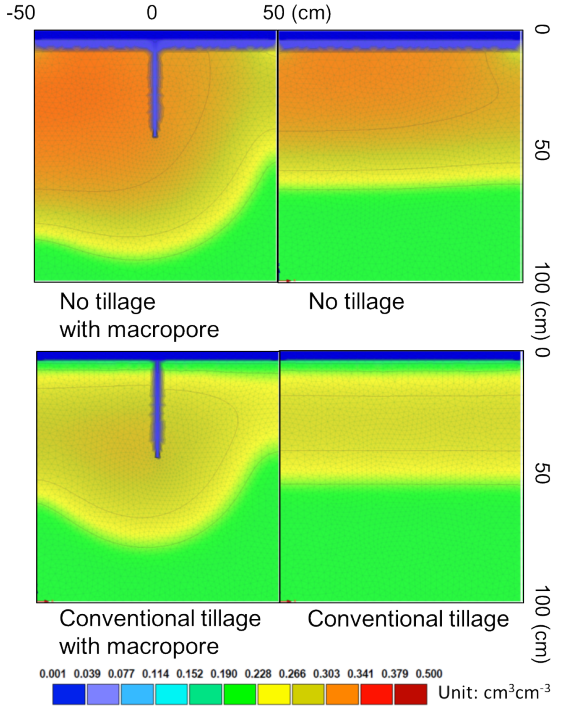


Fig. 8 シミュレーションによる降雨後 7 日の土壌水分分布（100 cm × 100 cm 断面）．
Simulated soil moisture distribution for 7th day after the rainfall (100 cm by 100 cm profile).

達深度も大きいことがわかる．Fig. 5，6 では不耕起栽培の方が水分減少は緩やかであるが，この様子は Fig. 7 では不耕起の方が水分が多い図として観察できる．

Fig. 8 の左右の違いはマクロポアの有無を示しており，不耕起 · 耕起共に下方浸透促進の結果として紡錘状に広がる水分分布が水浸透に加わり，土壌深部まで水が到達していることがわかる．これは不耕起 · 耕起という表層処理の違いによらず観察され，圃場内への水分保全という目的ではどちらの圃場でもマクロポア導入は水分保全に効果的に働くことがわかる．

Fig. 8 の左半分は表層処理の違いがある上でのマクロポア導入の効果を示している．紡錘状の水分浸透が深いところまで見られることは前述の通りだが，植物残渣層の水分保持量が不耕起栽培で大きかった（Fig. 8 上右）ため，マクロポアを導入したときの土壌断面は不耕起処理の方が濃い色の部分の広がりが大きく，効果的な保水になっていることがわかる．

ここでシミュレーション領域の中に中央から左右に 10，30 cm，土壌表層から 20，40，60，80 cm，計 16 点の観測ポイントを置いてシミュレーション結果としての水分を抽出した．計算上ではあるがこの地点でサンプリングを行えば 16 地点の空間分布上の水分ととらえられる．そこで土壌断面としての水分の平均を算出すると，7 日後の断面平均水分量は，NT-M 区，NT-X 区，CT-M 区，CT-X 区の順に 0.292，0.261，0.256，0.234 cm^3 cm^{-3} となった（Fig. 9）．Tukey 法による多重比較をすると NT-M 区は CT-X 区より水分が多い（$p < 0.01$）という結果になった．NT-M が NT-X に比べて水分が多めであり，CT-M は NT-X とあまり変わらない水分量になり，CT-X が最も水分が少ない傾向は，先の Fig. 7 の傾向と一致する．

不耕起栽培はシミュレーション上は植物残渣の層が雨水を一時的にとどめる層として機能しており，それが水分増加につながっていると考えられた．そしてマクロポア導入は浸透形態の違いとして現れた．一方，耕起栽培は雨水が深さ 30 cm 以下に充分に届いておらず，表面流の影響が大きいと推測できる．そこにマクロポア構造を導入すると深さ 30 cm 以下の水分にも増加が見られ，プロファイルとしての水分増加は不耕起栽培と差が無くなってくることがわかった．不耕起区は植物残渣が土地被覆として，雨滴の衝撃を和らげ，土壌流亡を防止するだけでなく，水分保全的であり，耕起区もそのままでは地表面流が発生するために土壌水分について保全的ではないが，下方浸透を促進するマクロポア構造を有すると土壌断面に水分保持ができることを示している．

農地を放置しているように見えることから不耕起栽培を望まない農家があったときに，代替の方法として土壌中に疑似孔隙を作るという方法が提案できる可能性があると考えられた．今後，畝ごとに表面流出量や土壌流亡を計測できるようにすればより的確な考察が可能になると考えられた．

3.4 土壌中の全炭素量

最後に，人工マクロポアの導入を行った 2014 年 3 月から収穫後の 2015 年 4 月の間の 4 管理の土壌中の全炭素量を分析し，2015 年 4 月の結果を Fig. 10 に示した．

どの管理区も地表の有機物が最も多く，大きなギャップを経て，10，30 cm と全炭素量は減っていく．この傾向は 4 管理区で変わることはなかった．栽培期間中，耕起区では高培土が行われ，土が乱されていることによる影響が考えられたが，収穫後の 2015 年 4 月の全炭素分布にはこの影響は現れていないように見えた．

ここで Table 2 に示した 2014 年 3 月の全炭素量を減算し，年間の増減を Fig. 11 にまとめた．不耕起区では

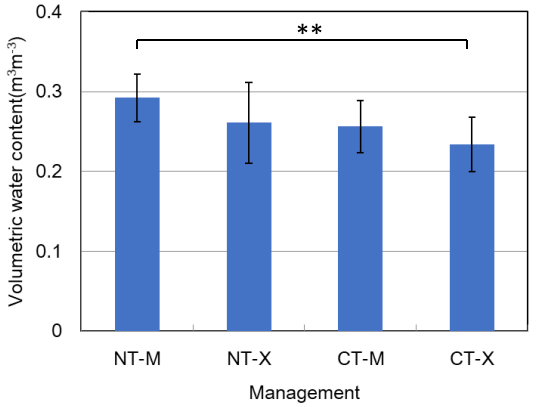


Fig. 9 シミュレーションによる土壌断面の平均水分量（20 mm h^{-1} の降雨 7 日後，断面 100 cm × 100 cm，** は Tukey 法による 1 % 有意水準，$n = 16$）．
Simulated soil water profile for each management. (7 days after 20mm h^{-1} rainfall, 100 cm by 100 cm profile, ** means 1 % significance by Tukey test, $n = 16$) .

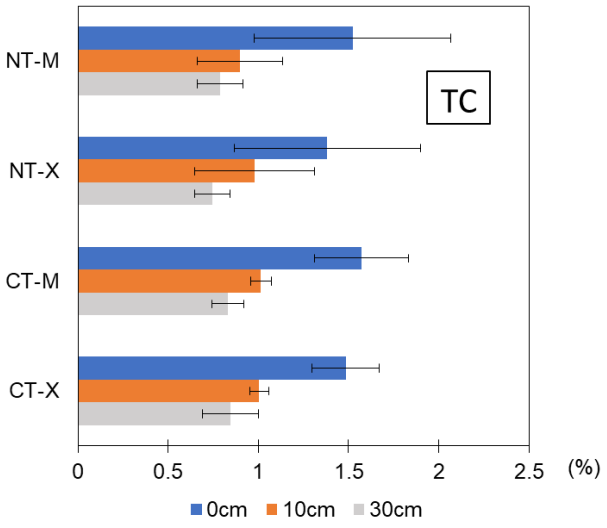


Fig. 10 管理 1 年後の土壌炭素量（$n = 5$）．
Total soil carbon after one-year management.

深さ 0，10 cm で増加が見られ，30 cm では減少している．また耕起区では表層 0 cm では増加が見られるものの，深さ 10，30 cm では減少が見られる．深さ 10 cm で大きく炭素量が減っているが，これは Table 2 に示した炭素量が深さ 10 cm で多いためである．耕起栽培では新鮮有機物が表層土壌にすきこまれ，かえって有機物が分解されてしまうこと（Fontaine et al., 2007）が大きな減少の原因のひとつであると考えられた．

ここで各数値に 5 cm，15 cm，20 cm の厚さをかけて，深さ 40 cm までのプロファイルの土壌炭素量として計算すると，0.0075，−0.005，−0.16，−0.17 g-C/100-g-soil となった．耕起区で大きく土壌炭素が減ずる結果となり，不耕起マクロポア区で土壌炭素量がわずかに増加する結果となった．現地は亜熱帯気候で多くの期間が 25 °C 以上なので有機物は分解基調になり，そのままでは有機物が増加することはない．そのため慣行農法である耕起区では有機物は減少している．一方，不耕起とマクロポアを組み合わせると一年で 0.0075 g-C·（100g-soil）$^{-1}$ の増加となった．これは 0.45 t-C·ha^{-1}·yr^{-1} と計算され，農地で可能とされる炭素増加量 0.1 ～ 0.7 t-C·ha^{-1}·yr^{-1}（Hillel and Rozenzweig, 2009）に良く合致する．不耕起区はこれまでの考察から表面流や土壌流亡抑制について成果が見られ，環境保全的であると言える．不耕起栽培を実践するだけでも亜熱帯においても有機物の損失がほぼゼロであるが，さらに，人工マクロポアと組み合わせると土壌有機物について効果的な保全が可能になると考えられた．これには，土壌を必要以上に空気にさらさないこと（不耕起）と，下方浸透の改善で，水分 · 養分 · 有機物など多くの物質を，表面流とともに流亡させずにその断面に残すことができる（人工マクロポア，例えば Fig. 8 の左半分）ことが関わっていると考えられた．

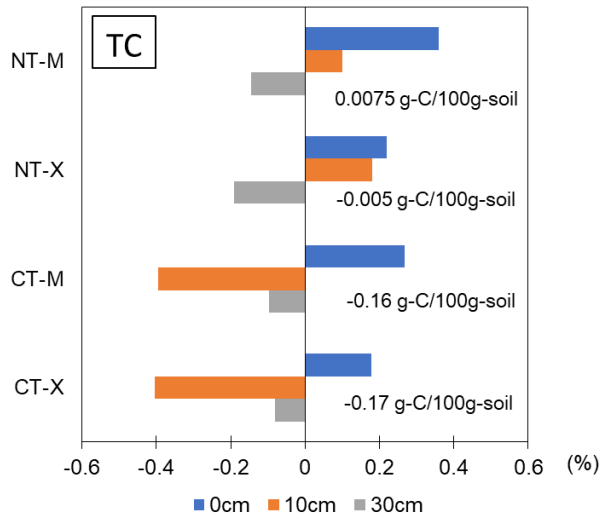


Fig. 11 土壌炭素量の増減.
Annual fluctuation of total soil carbon.

4. 結論

本研究では，表面流出，また表面土砂流出が激しい石垣島サトウキビ農地において，まず雨水を効果的に浸透させ，有機物を保全するために，不耕起栽培と人工マクロポアを施し，その効果を検証した．結果として以下のことが明らかになった．

1. 表面流と土壌流亡について耕起区と不耕起区の比較により，植物残渣による雨滴の衝撃の軽減の効果が非常に大きいことがわかった．また，マクロポアの設置も表面流と土壌流亡の抑制に有効であることがわかった．
2. 土壌水分の観測と二次元シミュレーションから，植物残渣は雨水を短時間でもとどめるために水分保全に効果的で特に深部の水分増加に貢献した．また，マクロポアも下方浸透を促進することで水分増加に貢献した．
3. 不耕起マクロポア，不耕起無処理，耕起マクロポア区は，耕起無処理区より有意に土壌水分が多かった．すなわち，不耕起処理をするかマクロポア処理を施すことで水分増加に貢献することが明らかとなった．
4. 土壌の全炭素量を計測すると亜熱帯性気候ゆえにほとんどの管理区で土壌断面の全炭素量は減少したが，不耕起でかつマクロポアを導入した管理では，保全的管理をした農地で得られる数値に近い炭素増加量が見込めた．

すなわち，不耕起管理の効果の大きさを示すことができ，かつ人工マクロポアの導入も一つの選択肢になりうることを示すことができた．さらに温暖化影響軽減など，土壌の有機質化を考えるならば，不耕起とマクロポア技術を組み合わせるとさらに効果的であることを示唆する結果が得られた．

謝辞

現地の実験 · 調査では，池原吉剋氏のさとうきび畑を使用させていただいた．また，岡山大学の学生である崎川和起氏，守分秀一氏，那須遥子さんの協力を得た．深く感謝する次第である．

なお，本研究の一部は，日本学術振興会「最先端 · 次世代研究開発支援プログラム（森 GS021，2010-2013）」，科学研究費補助金　基盤 B（森 26292127，2014-2016），基盤 A（森 17H01496，2017-2020），基盤 A（森 21H04747，2021-2024），基盤 C（大澤 16K07938, 2016-2019），また，ABRESO プロジェクト（JST）（ベルモント · フォーラム）の補助を受けて行われた．

C/N 分析は，岡山大学自然生命科学研究支援センター分析計測 · 極低温部門 分析計測分野 小林元成さん，小坂

恵さんに分析を依頼した．併せて感謝する次第である．

引用文献

Borst, H.L., McCall, A.G. and Bell, F.G. (1945): Investigations in erosion control and reclamation of eroded land at the Northwest Appalachian Conservation Experiment Station Zanesville, Ohio, 1934-42, USDA Tech. Bull. 888, Washington D.C.

Dregne, H.E. (1992): Erosion and soil productivity in Asia. Journal of Soil and Water Conservation, 47(1): 8–13.

Derpsch, R., Sidiras, N. and Roth, C.H. (1986): Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. Soil Tillage Res., 8: 253–263.

FAO Newsroom (2008): Land degradation on the rise. http://www.fao.org/Newsroom/en/news/2008/1000874/index.htmL (2021.9.4 確認)

Fontaine, S., Barot, S., Barré, P. et al. (2007): Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. Nature, 450: 277–280.

Hillel, D. and Rosenzweig, C. (2009): Soil carbon and climate change. CSA News. 54(6): 4–11.

池田俊介, 菅 和利 (2014): 環境保全 · 再生のための土砂栄養塩類動態の制御, pp. 121–168. 近代科学社, 東京.

石垣市 (2016): 平成 27 年度 統計いしがき, 第 38 号, p. 57. 石垣市.

気象庁 (2011): 平年値（統計期間 1981 ～ 2010 年）.

気象庁 (2021): 過去の気象データ検索．https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/（2021.11.22 確認）

Lal, R. (2001): Soil degradation by erosion. Land Degrad. Dev., 12: 519–539. https://doi.org/10.1002/ldr.472

Mori, Y. and Hirai, Y. (2014): Effective vertical solute transport in soils by artificial macropore system. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 18(2).

Mori, Y., Fujiwara, A. and Yamagishi, K. (2014): Installing artificial macropores in degraded soils to enhance vertical infiltration and increase soil carbon content. Progress in Earth and Planetary Science 1, 30, 2014.

Mori Y, Suetsugu, A., Matsumoto, Y., Fujihara, A. and Suyama, K. (2013): Enhancing bioremediation of oil-contaminated soils by controlling nutrient dispersion using dual characteristics of soil pore structure. Ecol Eng, 51: 237–243.

Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resourc. Res., 12: 513–522.

農研機構 (2021): 日本土壌インベントリー．https://soil-inventory.rad.naro.go.jp/（2021.9.9 確認）

乃田啓吾, 大澤和敏, 池田駿介, 小沢 聖 (2009): サトウキビ畑における営農的浸食抑制対策の評価. 農業農村工学会論文集, 260: 47–56

沖縄県 (2021): 沖縄県地図情報システム. http://gis.pref.okinawa.jp/pref-okinawa/Portal（2021.9.9 確認）

沖縄県農林水産部 (2014): さとうきび栽培指針, p. 41. 沖縄県.

沖縄県八重山支庁農林水産整備課 (2008): 石垣島赤土等流出防止農地対策マスタープランダイジェスト版, pp. 1–14. 沖縄県.

翁長謙良, 宜保清一 (1984): 日本の特殊土壌. 農土誌, 52(6): 517–524.

大澤和敏, 池田駿介 (2007a): 農地での土壌侵食および流域圏での土砂 · 栄養塩動態 — 沖縄赤土流出問題の対策 · 評価技術 — (I). 水利科学, 51(2): 1–15.

大澤和敏, 池田駿介 (2007b): 農地での土壌侵食および流域圏での土砂 · 栄養塩動態 — 沖縄赤土流出問題の対策 · 評価技術 —(II). 水利科学, 51(3): 1–24.

大澤和敏, 酒井一人, 吉永安俊, 田中忠次, 島田正志 (2004a): 農業流域での多点同時観測による浮遊土砂動態の検討. 農業土木学会論文集, 229: 101–108.

大澤和敏, 酒井一人, 田中忠次, 島田正志, 吉永安俊 (2004b): 降雨毎の侵食予測における USLE および WEPP の検証. 農業土木学会論文集, 232: 43–50.

Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R. and Blair, R. (1995): Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. Science. 267(5201): 1117–23.

Richard, G., Cousin, I., Sillon, J.F., Bruand, A. and Guérif, J. (2001): Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. European Journal of Soil Science, 52: 49–58.

崎川和起 (2016): HYDRUS-2D を用いた人工マクロポア技術の再現 · 評価 · 最適設計. 岡山大学修士論文.

石西礁湖自然再生協議会 (2007): 石西礁湖自然再生全体構想, p. 83. 環境省.

Six, J., Paustian, K., Elliott, E.T. and Combrink, C. (2000): Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 681–689.

Tebrügge, F. and Düring, R.A. (1999): Reducing tillage intensity — a review of results from a long term study in Germany. Soil & Tillage Research, 53: 15–28.

van Genuchten, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 892–898.

山里 清 (1991): サンゴの生物学, p. 150. 東京大学出版会, 東京.

要　　旨

石垣島サトウキビ畑では，強い雨が降り，表面流出とそれに続く土壌流亡が発生している．そこで不耕起栽培また人工マクロポアを施し，土壌水分と有機物の増減に与える効果を評価した．人工マクロポアを 1 m 間隔で設置し，垂直浸透を促進した．また，強い降雨から表層土壌を保護するために，植物残渣を利用した不耕起栽培を行った．不耕起栽培と慣行耕起栽培にマクロポア区と無処理区（NT-M，NT-X，CT-M，CT-X）をそれぞれ設け，降雨量，表面流出量，土壌流亡量，土壌水分，土壌全炭素量を測定した．各プロファイルの平均土壌水分は，NT-M が CT-X より多くの水分を保持しており（$p < 0.01$），マクロポアの設置で CT-M は NT-X に近い水分になった．土壌断面における全炭素の変動は，NT-X でほぼゼロ，CT-M，CT-X で減少したが，NT-M では $+0.45$ t-C·ha^{-1}·yr^{-1} の増加が見られた．つまり，マクロポアと不耕起を組み合わせると，熱帯気候であっても水分を保持し，土壌中の全炭素量が増加する可能性を示した．

キーワード：人工マクロポア，不耕起，表面流，土壌流亡，土壌炭素