

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26292127

研究課題名(和文)人工マクロポアを利用した下方浸透促進による土壌・植生環境の修復と有機物貯留

研究課題名(英文)Artificial macropore installation in degraded soils to enhance vertical infiltration and increase organic matter.

研究代表者

森 也寸志 (MORI, Yasushi)

岡山大学・環境生命科学研究所・教授

研究者番号：80252899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：人工マクロポアという疑似間隙構造を土壌内に作る時、充填物に縦方向に長い繊維を使い、充填率30%であったときに最も効果的に下方浸透を促すことができた。土壌カラム実験では、土壌水分と有機物量に逆相関がみられ、栄養塩をよりも水分が有機物分解に影響すること、また、土壌下方にある有機物は酸素が遮断され、かつ水分が減ると上方移動が不能になるため分解を免れる傾向にあり、根や浸透有機物の分解が逆に促進されることはなかった。亜熱帯土壌では畑圃場で地表流の発生が抑制され、結果的に農地土壌の流亡が抑制されることがわかった。このため、分解が優勢な高温化でも有機物については保全傾向が見られた。

研究成果の概要(英文)：Artificial macropores were created in the degraded soils to enhance vertical infiltration. Numerical simulation of infiltration with surface flow was successfully achieved when we assume "air space" above the soil surface. Infiltration was effectively improved when fibrous materials were used, with the filling density of 30%. Column experiments showed that organic matter which was infiltrated into deeper profile has resistivity to decomposition, because of less air and water availability at this profile. Field experiment at subtropical region showed surface runoff and also sediment loss were reduced effectively with the artificial macropore application. The resultant total carbon at this field slightly increased.

研究分野：土壌環境工学

キーワード：土壌物理 炭素固定 環境修復 浸透現象 劣化土壌

1. 研究開始当初の背景

土壌は陸域最大の炭素貯蔵庫であり、植物の3倍、大気の2倍の貯蔵量を有する。二酸化炭素削減の要である植物の培地でもあり、表層(0-1m)が最も肥沃で有機物質に富む。しかしこの肥沃な表層が不適切な管理や気候変動の影響で劣化し、透水性不良から流亡する問題も報告されている。このような条件下で透水性改善のために耕耘をすれば土壌流亡に加えて有機物の分解を促しかねない。また、一般に溶液は表層で多量に吸収され深部には到達しにくい。

土壌間隙をX線透過像で観察すると植物根によって形成された鉛直方向に卓越した間隙群が見られたため、耕耘せずに下方浸透を促進する技術としてこれを人工的に作った構造、人工マクロポア、を新たに考えた。土壌を耕さずに土壌の深い部位にまで有機物を含む溶液を浸透させることができれば、植栽である土壌環境を修復しながらの炭素貯留技術になる。例えば有機物量1%の土壌を2%に改善するだけでも土壌の面積の広さから、温暖化軽減には大きな成果を上げることになる。これまでの研究から、 $0.0005\text{g-C/gSoil/yr.}$ を実現しており、大規模植林と同等の炭素貯留効果があることが分かってきた。

2. 研究の目的

基礎的な知見は得られたが、しかし、人口マクロポアの最適設計、また下方浸透を促進しても逆に有機物分解を促す懸念もある。さらに広域での実践など未知の課題が多かったが、本研究の目的は、

- (1) シミュレーション技術を構築し構造の最適化について効果的な研究を行うこと、
 - (2) 下方浸透に伴う水、栄養塩、有機物の移動と有機物の蓄積に与えるそれぞれの因子の影響を明らかにすること、
 - (3) 現地において実践的課題解決に取り組みその評価を行うこと、
- として研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 数値シミュレーションによる人工マクロポア技術の再現

仮想大気による表面流の再現

人工マクロポアの効果を表現するには表面流の発生を再現する必要がある。しかし、計算領域内に土壌の浸透能以上の降雨が降った場合、数値計算は強制的に停止する。そこで、計算領域内の土層直上に余剰水の発生を計算する領域(仮想大気)を作り、表面流の発生を再現することを考えた。5, 20, 80 mmh^{-1} の降雨を降らせた実実験を行い、逆解析によって仮想大気パラメータの同定を行った。

異なる土性に対する人工マクロポア技術の効果

仮想実験では縦・横100 cmの土層を想定し、縦50 cm、横1 cmの人工マクロポアを作成した(処理区)。土層直上に2 cmの仮想大気を設定しており、表面流の発生を再現できる。比較として人工マクロポアを作成しない対照区で同様の実験を行う。また、実実験では表面流の発生が考えられる降雨強度20 mm h^{-1} の降雨が実験開始後6 時間発生するように設定し、実験期間は30時間で計算した。土層の初期水分量は圃場容水量に当たる $h=-10\text{kPa}$ 相当の水分量とした。実験には砂、壤土、粘土質壤土を用い、マクロポア構造内に充填する竹繊維のパラメータは実測値をもとに算出した。

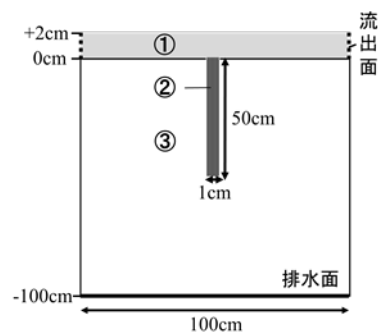


図1 人工マクロポアを設置した模擬土層

(2) 下方浸透に伴う有機物の蓄積と分解

下方浸透に伴う有機物の蓄積と分解

アクリル土壌槽（内寸法：幅30×奥行2×高さ24cm）に豊浦標準砂を乾燥密度 1.50 g cm^{-3} で充填し、2箇所に人工マクロポアを深さ150mmまでガラス繊維を挿入した。そこに表層の全面からフラックス 60 mm h^{-1} で安息香酸（ 500 mg L^{-1} ）と500倍に希釈した無機塩類（N:P:K=6:10:5）混合溶液を100mL滴下し、気温 30°C 、湿度60%で管理した。滴下から1、3、6日後にそれぞれの土壌槽を20mm四方ずつに切断し、採取した。含水比と安息香酸濃度、電気伝導度を測定し、濃度分布をsurfer11で描画した。

土壌水の上方移動が有機物の分解に与える影響。

豊浦標準砂を30cmの鉛直カラムに入れ、有機物として 500 mg/L 安息香酸溶液と500倍に希釈した無機塩類（N:P:K=6:10:5）の混合液を均一に分布させた。不耕起区と耕起区、人工マクロポア区の3つの区を設け、人工マクロポア区には20cmのグラスファイバーを挿入し、耕起区は3日ごとに表層10cmを耕耘した。不耕起区には特別な処理は行わなかった。あえて微生物活性を促すため、 30°C に設定したインキュベーター内で2週間管理した。3日ごとに5cmの層ずつにカラムを解体し、各試料の有機物量、含水比、EC、蒸発量を計測した。これらのデータから、人工マクロポアが有機物分解に与える影響について考察した。

(3) 下方浸透促進が亜熱帯土壌環境の保全に与える影響評価

石垣島の近海は日本のサンゴ礁の源であるが、温暖化、食害、農地からの表土流亡によりその生存が脅かされている。ここでは人工マクロポアを発展させた線状マクロポアをサトウキビ畑に導入し、下方浸透を促すことで地表流の発生を軽減し、表土流亡を防止することを考えた。初めに述べたように農地は表層が最も肥沃であり、この部分の流亡を防止

することは、農地における有機物の保全と水環境の富栄養化の防止につながる。

耕耘・夏植を対照区とし、中空の線状マクロポア、繊維充填型線状マクロポア、不耕起栽培の4管理を設け、深さ10、30cmの土壌含水量、降雨、地表流量、土砂流量を一年にわたって計測した。

4. 研究成果

(1) 数値シミュレーションによる人工マクロポア技術の再現

仮想大気による表面流の再現

図1からカラム実験における表面流量および排水量の実測値と予測値は同じ傾向を示していることがわかる。また、降雨強度 $5, 20, 80 \text{ mm h}^{-1}$ に対して、誤差RMSEはそれぞれ $9.59, 9.69, 16.73 \text{ cm}^3$ 、全降雨量に対する誤差の比率である全体比率はそれぞれ $4.07, 4.11, 7.11\%$ となり、誤差は10%を下回った。以上より、仮想大気を用いることでHYDRUS-2D上で表面流を高い精度で再現することが可能であると判断できる。

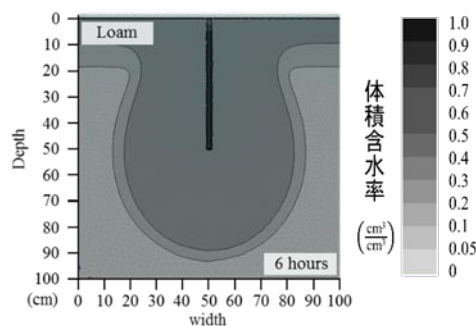


図2 降雨開始6時間後の土層内水分分布

異なる土性に対する人工マクロポア技術の効果

数値実験における表面流出と排水の結果を見るとSandでは、処理区・Control区ともに表面流の発生が観測されなかった。また、処理区では人工マクロポアによるバイパス流が観測され下端からの急激な排水がみられた。Loam区では、Control区のみ表面流の発生が観測され、処理区において人工マクロポアによ

る表面流出の抑制がみられた。Clay loam区では、処理区・対照区ともに表面流の発生が観測されたが、処理区における表面流出の積算流量はControl区に比べて約4割小さくなった。本実験により土性に応じた人工マクロポアの効果の違いを観察することができた。まず、Sandでは表面流の抑制を目的とした人工マクロポア技術の適用は必要ない。また、Loam・Clay loamでは人工マクロポアによる表面流の抑制が確認され、特にLoamでその効果が顕著にみられた。以上のことから、設置する土壌の透水性がマクロポア構造部から土壌基質への浸潤に影響を与え、その効果を決定すると考えられた。

(2) 下方浸透に伴う有機物の蓄積と分解

下方浸透に伴う有機物の蓄積と分解

マクロポア土壌槽では、滴下から90分後に、マクロポア下端部でスポット的な浸潤部が観察された。フィンガー流は表層から下方へと浸潤が進んだ。

滴下から1日後は水の下方浸透に伴って表層と下層で安息香酸、無機塩類が存在したが、表層に多く留まった。そのため6日後でも表層の安息香酸濃度の方が高かった。またマクロポアとフィンガー流とで下方の安息香酸量に明確な差は見られなかった。しかし含水比は、フィンガー流よりもマクロポアの下層で高くなった。ここから、マクロポアには効率的な下方浸透、蒸発抑制効果があると分かった。

上層と下層に分けて行った重回帰分析では、ECと特に含水比が大きく安息香酸濃度に寄与していると分かった。また含水比の偏回帰係数は、上層では負なので水分増加に伴い安息香酸は減少するが、下層では正なので水分増加により安息香酸も増加する傾向が見られた。これは水分増加により微生物活性が高くなることで分解促進傾向になり、また下層よりも上層で酸素暴露量が多いためと考えられる。

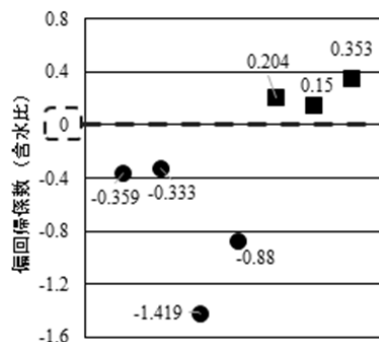


図3 含水比の偏回帰係数

土壌水の上方移動が有機物の分解に与える影響。

有機物量の分布に関して、不耕起区では下方浸透型の分布となり最も貯留効果が高く、耕起区では耕耘を行った表層から10cmまでの層で激しい分解が見られた。一方、マクロポア区では3, 6日目の5~15cmの層で分解を免れている層が見られた。また、実験最終日のカラム内の安息香酸総量は不耕起区 > マクロポア区 > 耕起区となり、マクロポア区で過剰な分解は見られなかった。水分量に関して、マクロポア区では不耕起区とほぼ同じ含水比となり、マクロポア挿入部からの過剰な蒸発は見られなかった。これは蒸発量の結果からも確認することができる。栄養塩類は分解促進の原因になるが、マクロポア区は耕起区よりも表層の塩類濃度が低く、栄養塩類の集積に大きく寄与しないことが明らかになった。

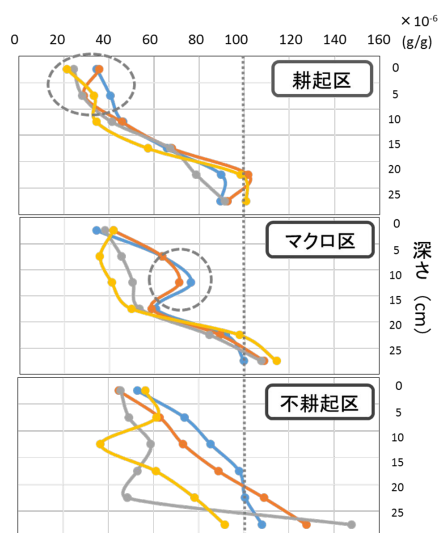


図4 安息香酸の分解傾向

(3) 下方浸透促進が亜熱帯土壌環境の保全に与える影響評価

図5を見ると地表面流の発生は、多い順に中空マクロポア、夏植え、不耕起、繊維充填マクロポアの順になった。一方、土壌流亡は、中空マクロポア、夏植え、繊維充填マクロポア、不耕起となった。不耕起は地表の植物残渣によって雨滴の衝撃を和らげ、土砂流亡を軽減し、一方、繊維充填型人工マクロポアは下方浸透によって地表流を軽減して表土流亡を防いでいると考えられた。表1は土壌有機物の増減を示したもので気温30℃を越える亜熱帯気候では基本的に有機物は分解傾向となる。従って耕起管理の有機物量は一般に言われるようにマイナスであった。しかし、不耕起管理で有機物量は保全的で分解傾向が弱まり、さらに人工マクロポア区の方が保全的管理となることがわかった。なお、繊維を充填しないマクロポアすぐに目詰まりし、かえって表土流亡を助長しているため、その構造は理論に沿って構築することが必要であるとわかった。今回実践した繊維充填型マクロポアは通常の夏植えをした状態からマクロポアを作っており、農家が実践する土壌環境保全の一手法になりうると判断した。

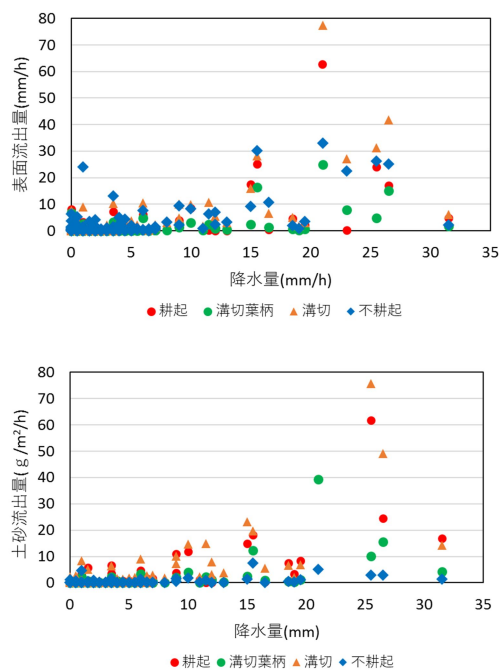


図5 降水量に対する表面流出量，土砂流出量

表1 管理の違いによる土壌有機物の増減

深さ (cm)	不耕起		耕起	
	マクロポア	無し	マクロポア	無し
0	0.36	0.18	0.26	0.17
10	0.1	0.18	-0.39	-0.4
30	-0.15	-0.19	-0.1	-0.08
加重平均	0.0075	-0.005	-0.164	-0.169

*単位:g-C/100g-soil,**0-5cm,5-20cm,20-40cmで加重平均,***圃場管理1年後の増減を耕起・不耕起の違いで表示

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

Tsunoda, T., Suzuki, J.-I. and Kaneko, N., Fatty acid analyses to detect the larval feeding preferences of an omnivorous soil-dwelling insect, *Anomala cuprea* (Coleoptera: Scarabaeidae). *Applied Soil Ecology* 109, 1-6. (2017) 査読有

金子信博, 三浦季子, 南谷幸雄, 荒井見和, 藤江幸一, 一次生産の持続可能性のための土壌管理—熱帯プランテーションにおける保全管理の効果—. *環境科学会誌*. (2017) 査読有

Miura, T., Owada, K., Nishina, K., Utomo, M., Niswati, A., Kaneko, N. and Fujie, K., The Effects of Nitrogen Fertilizer on Soil Microbial Communities Under Conventional and Conservation Agricultural Managements in a Tropical Clay-Rich Ultisol. *Soil Science* 181, 68-74. (2016) 査読有

Miura, T., Niswati, A., Swibawa, I.G., Haryani, S., Gunito, H., Arai, M., Yamada, K., Shimano, S., Kaneko, N. and Fujie, K., Shifts in the composition and potential functions of soil microbial communities responding to a no-tillage practice and bagasse mulching on a sugarcane plantation. *Biology and Fertility of Soils* 52, 307-322. (2016) 査読有

Hobara, S., S.Fukunaga-Yoshida, T.Suzuki, S. Matsumoto, T. Matoh and N. Ae, Plant silicon uptake increases active aluminum minerals in root-zone soil, Implications for plant influence on soil carbon, *Geoderma* 279, 45-52 (2016) 査読有

森也寸志, 宗村広昭, ジューン・ウォルフ, 野中資博: テキサス水環境プロジェクトから「地域資源循環型社会」へ. *農業農村工学会誌* 83(1), 7-10 (2015). 査読無

Mori, Y. and Y. Hirai, Effective Vertical Solute Transport in Soils by Artificial Macropore System. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. 18(2), DOI:10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000192 (2014). 査読有

Ide, J., H. Somura, T. Nakamura, Y. Mori, I.

Takeda and K.Nishida : HYDROLOGICAL EFFECTS ON RELATIONSHIPS BETWEEN $\delta^{15}\text{N}$ OF RIVER NITRATE AND LAND USE IN A RURAL RIVER BASIN, WESTERN JAPAN. River Res. Applic., DOI: 10.1002/rra.2756 (2014) . 査読有

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

Somura, H., T. Masunaga, Y. Mori, I. Takeda, J. Ide, H. Sato : Estimation of nutrient input by a migratory bird, the Tundra Swan (*Cygnus columbianus*), to winter-flooded paddy fields . Agriculture Ecosystems & Environment 199(1), 1-9 (2014). 査読有

和穎朗太, 早津雅仁, 青山正和, 森也寸志, 波多野隆介, 井藤和人, 浅野真希 : 土壌団粒構造と土壌プロセス. 日本土壌肥料学雑誌 85(3), 285-290 (2014). 査読有

〔学会発表〕(計 29 件)

Mori, Y., K.Osawa, K.Oka and A.Hoshikawa, Effect of Artificial Macropore Installation in Subtropical Soils to Reduce Surface Flow at Sugarcane Field. 米国農・穀物・土壌科学学会, 2016.11.09, フェニックス(米国)

Fukumasu, J., L.J. Shaw and Y. Mori, How Does Soil Macro-Aggregation Impact on Enzyme Activity and Nitrogen Mineralization? 米国農・穀物・土壌科学学会, 2016.11.08, フェニックス(米国)

Fukumasu, J., L. Shaw, Y. Mori, How important is soil aggregation in regulating the activity of enzymes involved in the depolymerization of soil organic nitrogen? Japan GeoScience Union, 2016.05.23, 幕張メッセ(千葉)

Y. Mori and S. Moriwake, Artificial macropore effects on carbon storage in soils. Japan GeoScience Union, 2016.05.23, 幕張メッセ(千葉)

Mori, Y., K. Oka, K. Osawa and A. Hoshikawa, Effect of Artificial Macropore Installation in Subtropical Soils to Reduce Surface Flow at Sugarcane Field, Japan GeoScience Union, 2016.05.23, 幕張メッセ(千葉)

Mori, Y., T. Yamamoto and A. Fujihara, The Effect of Artificial Macropores on the Amount of Organic Matters in Soils and Plant Biomass, Japan GeoScience Union, 2015.05.24, 幕張メッセ(千葉)

Sakikawa, K., Y. Mori and T. Moroizumi, Assessment of enhanced infiltration by artificial macropore with HYDRUS-2D,

Japan GeoScience Union, 2015.05.24, 幕張メッセ(千葉)

Moriwake, S., Y. Nasu and Y. Mori, Measuring Fresh and Old Organic Matter Contents in Degraded Soils using FTIR spectroscopy. Japan GeoScience Union, 2015.05.24, 幕張メッセ(千葉)

Mori, Y., A. Fujihara and K. Yamagishi, Artificial Macropore Installation in Degraded Soils for Enhancing Infiltration to Restore Soil Environment 米国国際土壌科学学会, 2014.11.03, ロングビーチ(米国)

Mori, Y., A. Fujihara, T. Yamamoto and K. Yamagishi: Artificial Macropore Installation in Degraded Soils for Enhancing Vertical Infiltration to Restore Soil Environment, 2014World Congress of Soil Science, 2014.06.12, 済州島(韓国)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

〔その他〕

公開講座:

佐賀環境フォーラム / 陸域最大の炭素貯蔵庫・土壌環境の劣化と修復 / 佐賀県佐賀市 / 2015.07.09

岡山大学公開講座 / 陸域最大の炭素貯蔵庫・土壌の劣化と修復 / 岡山大学 / 2015.08.02

岡山大学環境管理センター公開講座 / 地域資源循環型社会の構築 / 岡山大学環境管理センター / 2015.11.07

プロジェクト・ホームページ
<http://soilenvir.org>

6. 研究組織

(1)研究代表者

森 也寸志 (MORI, Yasushi)

岡山大学・大学院環境生命科学研究所・教授
研究者番号 : 80252899

(2)研究分担者

金子 信博 (KANEKO, Nobuhiro)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授
研究者番号 : 30183271

松本 真悟 (MATSUMOTO, Shingo)

島根大学・生物資源科学部・教授

研究者番号 : 00346371