

最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書

研究課題名	人工マクロポアによる土壌水下方浸透の促進と有機物貯留による劣化土壌環境の修復
研究機関・部局・職名	国立大学法人岡山大学・大学院環境生命科学研究科・准教授
氏名	森 也寸志

【研究目的】

土壌は陸域最大の炭素貯留源であるが、土地管理の粗放化と劣化が進み、水貯留や植物の培地、環境負荷の緩衝など本来の機能が果たせていない。本研究の目的は、課題担当者のこれまでの成果である「移流・分散制御による土壌中への効果的な溶質拡散」を劣化土壌に施し、土壌表層にわずかに薄く存在する有機物を下方かつ土壌体全体に浸透させ、土壌の有機質化による炭素貯留と二酸化炭素削減効果、また植栽としての土壌環境の修復を図ることである。人工マクロポアの中には地域未利用資源である竹繊維を挿入し、構造・機能の長期維持と毛管力による自発的な下方浸透を促す。

具体的には、下記に掲げる3つの達成目標を設定して研究課題に取り組む。

- ①人工マクロポアによる効率的物質輸送、
- ②有機物貯留促進技術の開発、
- ③広域土壌における適地探査と有機物貯留の現場実験およびその効果の評価

【総合評価】

<input type="checkbox"/>	特に優れた成果が得られている
<input type="radio"/>	優れた成果が得られている
<input type="checkbox"/>	一定の成果が得られている
<input type="checkbox"/>	十分な成果が得られていない

【所見】

① 総合所見

当該研究課題は土壌有機物の下方浸透による土壌の炭素貯留により、植栽としての土壌環境の改善・修復を目指す研究で、地球環境の劣化が叫ばれる今日、その改善に向けたユニークな対応策を提示しようとする意義深い研究である。劣化土壌において、継続的に下方浸透を促す人工マクロポアを構築し、有機物を深く貯留させ、炭素貯留を可能にしようとするもので、アイデアそのものに新規性がある。

実験室レベルでの制御条件下の実験で得られたデータに基づいて充填剤の選定、検証を進めた。さらに、現場での詳細な解析も進めて、土壌水分と有機物量に正の相関があること、人工マクロポア設置区において有意な下方浸透が促進されることを確認

している。

また、有機物貯留の際には、その分解と貯留のバランスが重要であるが、土壌を乱さずに下方浸透させる限り分解は限定的であることから、人工マクロポアの利点を確認している。さらに、長期調査を継続していた現場において、当初の達成目標の2倍に当たる0.001 g-C/g-Soil/yを超える高い有機物貯留量を示し、ほぼ本プロジェクトの目的を達成出来ることを確認するとともに、**土壌環境を改善すると、下方浸透による有機物の蓄積以上に、同時に植生が回復する例が顕著であり、当初目的以上にプラスアルファの効果が得られることも示している。**この時、植物の多様性も大きくなるなど、**当初予想もしなかったプラスの効果**をみとめている。

また、不要な竹林を整備しながら、その竹繊維を充填材として検討しており、複合的なメリットを創出できる可能性もある。

本研究課題の性質上、自治体や海外を含めた実際のフィールド（日本、中国、米国、インドネシア）での取り組みや経済性に関するデータ取得が極めて重要であるが、インドネシアの同じサイトで同時に実施した不耕起管理では透水性に改善が見られ、30、50cmでの有機物の増加を確認し、米国テキサスでは等高線溝切りと呼ばれる下方浸透技術で流亡土砂の9割近くを削減できることを確認するなど成果が蓄積されつつある。

今後研究をさらに発展させ、本研究成果の具体的な社会貢献を明確に意識した研究成果の整理・発信に期待したい。

② 目的の達成状況

・ 所期の目的が

(全て達成された ・ 一部達成された ・ 達成されなかった)

下記に述べるように、設定した目標を達成し、所期の目的はおおむね達成された。

①人工マクロポアによる効率的物質輸送：人工マクロポア処理区において、降雨時の下方浸透が対照区に比べて有意に促進されていると判断されることから、所期の目標は達成された。

低栄養で植生に乏しい赤黄色土壌の斜面において、人工マクロポアを設置し、センサーによって水分をモニターし、季節毎、深さ毎の土壌調査を行った。人工マクロポア区では降雨に連動して土壌水分が増減し、対照区に比べて下方浸透が促進されていることが裏付けられた。土壌水分と有機物量には正の相関があり、下方浸透促進で有機物の増加が期待できると判断された。また、繊維の充填密度が0.3 g cm⁻³の時、2-20 mmの浸透強度(弱雨～台風)において下方浸透の促進と不飽和時の毛管力の発現がほぼ最大となることも明らかとなり、所期の目標を達成した。

②有機物貯留促進技術の開発：人工マクロポアを設置した土壌に有機物のマーカーとしてセルロースを混合し、無機栄養塩を表層に散布して意図的に分解促進されやすい条件を作り、30℃のインキュベータ内に1ヶ月静置した。物質の分布と有機物の分解過程を追跡すると、無機栄養塩は蒸発と共に表層に集積する傾向があり、耕耘区で特に顕著だった。一方有機物が再移動する傾向は見られず、表層で鋤込むと分解しやすいのに対し、一度下方で蓄積された有機物は分解されにくく、人工マクロポアによる

下方蓄積が有効であることが示され、所期の目標を達成したと判断した。

③広域土壌における適地探査と有機物貯留の現場実験、及びその効果の評価：
0.0005g-C/g-Soil/y. を当初実現数値としているが、これを倍以上に引き上げるこ
と。を達成目標に研究を進め、おおむね所期の目標を達成した。

長期調査を継続していた現場において、0.001 g-C/g-Soil/y. を超える高い有機物貯留量を示し、ほぼ本プロジェクトの当初目的を達成出来ることがわかった。また、植生の回復が期待できるサイトについては植物バイオマスと土壌有機物量を併せて評価する方が妥当であると判断した。新たな指標作りに役立つ成果が得られたと判断している。

一方、より広域かつ条件の厳しい土地で人工マクロポアの効果を継続的に検証することについては、現在、インドネシアの赤色土壌で実証実験を実施中である。ここでは、人工マクロポアを施すと有機物量の鉛直分布が変わり、マクロポア近くほど地表より深部に有機物が行き渡ることが明らかになっている。

また、米国テキサスでは等高線溝切りと呼ばれる下方浸透技術で流亡土砂の9割近くを削減できることがわかった。

③ 研究の成果

・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が
(ある ・ ない)

・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が
(創出された ・ 創出されなかった)

・当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

本研究課題においては、

①人工マクロポアによる効率的物質輸送、

②有機物貯留促進技術の開発、

③広域土壌における適地探査と有機物貯留の現場実験およびその効果の評価
の3つの達成目標を掲げて研究を展開した。その成果を下記に要約する。

①栄養で植生に乏しい赤黄色土壌の斜面において、人工マクロポアを設置し、センサーによって水分をモニターし、季節毎に深さ毎の土壌調査を行った。人工マクロポア区では降雨と連動するように土壌水分が増減し、対照区に比べて下方浸透が促進されていることが裏付けられた。この時マクロポア区では土壌水分量と土壌全炭素量 (Total carbon、TC) には正の相関があり、下方浸透によって有機物を輸送・貯留するという本研究の基本的なプロセスを示すことが出来た (図1)。シミュレーションと実験により、繊維の充填密度が 0.3 g cm^{-3} の時、2-20 mm の浸透強度 (弱雨～台風) において下方浸透の促進と不飽和時の毛管力の発現がほぼ最大となった (図2)。

②下方浸透の促進による有機物貯留の際には、同時に発生する可能性のある有機物の不用意な分解を防がなければならない。人工マクロポアを設置した土壌に有機物のマーカーとしてセルロースを混合し、無機栄養塩を表層に散布して意図的に分解促進しやすい条件を作り、30℃のインキュベータ内に1ヶ月静置した。物質の分布と有機

物の分解過程を追跡すると、無機栄養塩は蒸発と共に表層に集積する傾向があり(図3)、耕耘区で特に顕著だった。分解中間生成物としてのグルコースも耕耘区は多く(図4)、有機物は表層で鋤込むと分解しやすい理由の一つに可溶性塩類の分布特性があると推測された。一方有機物が再移動する傾向

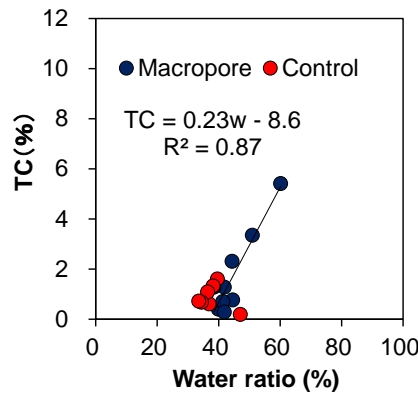


図1 水分と土壤有機物量の連動
土壤水分量と有機物量には正の相関があり、下方浸透が有機物輸送に効果を示しているとわかる。

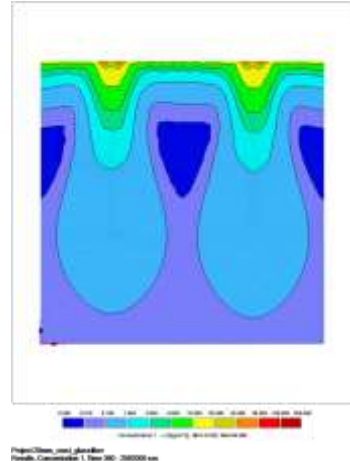


図2 実験とシミュレーションで示された下方浸透促進の様子

は見られず、一度下方で蓄積された有機物は、分解されにくいと推測された。なお、対照区はグルコースの生成は少ないが、下方浸透による有機物供給もないため、フィールド実験では全体としては有機物貯留は貧弱となる(③へ)。人工マクロポアは土壤の細粒化と空気への暴露を防ぎつつ土壤の透水性改善をし、また可溶性塩類が集積する表層を避けて有機物が蓄積されるため、有機物貯留に有利で、これが耕耘や鋤込みと自然の土壤における炭素貯留のプロセスの根本的な違いであると推測された。

③フィールドで実証実験をしていたところ、 $0.001 \text{ g-C (g-soil)}^{-1}\text{yr}^{-1}$ を超える高い有機物貯留量を示し(例:図5)、本プロジェクトの当初目的を達成できることがわかった。図5のグラフを見ると対照区では表層だけ全炭素量が多く、下方浸透が促されないサイトの特徴を有している。表層以外では下方浸透が促進された試験区の方が全層にわたって炭素量が多くその成果は明らかである。また、土壤環境を改善すると、下方浸透による有機物の蓄積に加えて、同時に植生が回復する例が顕著であった。栄養塩の添加があっても(植物成長に有利だが、土壤有機物分解の可能性)、降雨のみでも、マクロポア区では土壤有機物・植生ともに対照区より多くなり、下方浸透という非常にシンプルな処置が土壤環境全体の回復に大きな影響を与えていることが推測された。特に植生の早い回復が観察された事

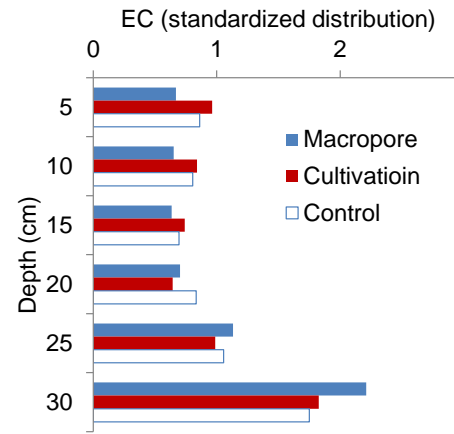


図3 深さ毎のEC分布図
蒸発に伴い栄養塩が表層に集中し、特に耕耘区で顕著な傾向を示した。表層を避けて有機物があれば貯留には有利とわかる。

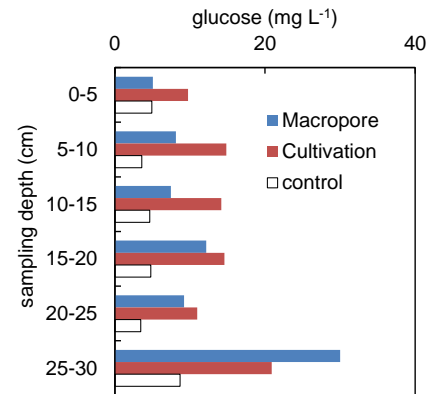


図4 土壤管理毎の有機物分解特性
グルコース量が多いほど有機物の分解が進むことを示す。

なお、図3,4とも25-30cmはカラム下端の不連続部分であるため評価対象とはしない

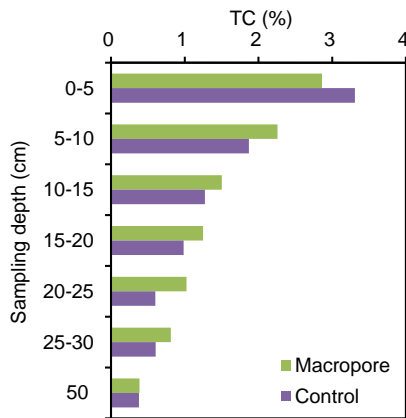


図 5 人工マクロポア処理後の土壤全炭素量 (1 年後) 対照区で表層のみ TC が多いのは、透水不良の劣化土壤の特徴

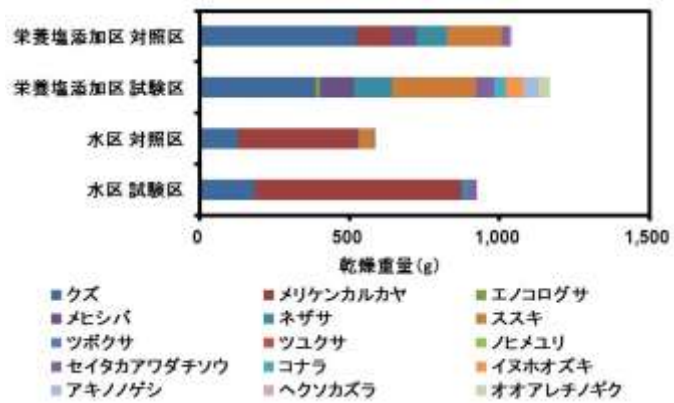


図 6 人工マクロポアによって修復した土壤の地上部植生 (1 年後). 栄養塩を与えても栄養塩がなくても植生の回復についてはマクロポア区の方が有利であった.

実は当初目的以上のプラスアルファの効果であると考えられた。この時、植物の多様性も大きくなる (図 6) など、当初予想もしなかったプラスの効果があり、従って植生の回復が期待できるサイトでは植物バイオマスと土壤有機物量を併せて評価する方が妥当であると判断した。

海外ではインドネシアにおいて、人工マクロポアからの距離を指標にその効果を比較した。熱帯で気温が高く、炭素貯留には極めて不利な状況であるが、全体での炭素量は変わらないものの人工マクロポア区直近では土壤深部での炭素貯留が多いことがわかった。熱帯の気温の影響を受けにくく貯留には有利な鉛直分布形状が得られていることがわかる。つまり下方浸透を促すため表層の炭素が減り、長期蓄積に有利な深部の炭素に増加が見られ (図 7)、数年のスパンでこれを続けていくことでより顕著な効果が見られるものと期待している。インドネシアの同じサイトで同時に実施した不耕起管理では透水性に改善が見られ、30、50cm での有機物の増加が見ら

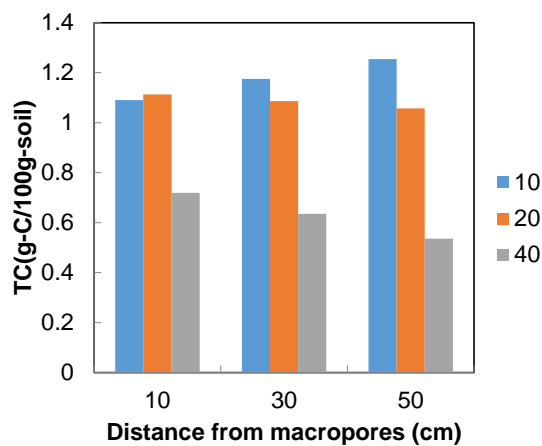


図 7 インドネシアにおける人工マクロポア実施例。表層 10cm の有機物を深部 40cm に輸送する形が伺え、相対的に有機物の分解回避に有利な土壤深部の貯留量が増加した。

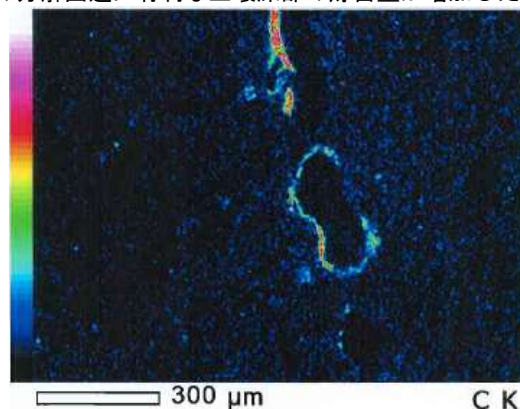


図 8 マクロポア周辺の炭素 (SEM/EDS 分析) 未攪乱土壌を採取して元素分析を行うとマクロポアの壁に炭素が集積している様子が明らかだった (ハイライト部分)。

れた。一方、米国テキサスでは等高線溝切りと呼ばれる下方浸透技術で流亡土砂の9割近くを削減できることがわかった。下方浸透によって物質が運搬され、土壤環境の回復と有機物の増加に貢献している様子が明らかであった。

ここで修復の対象地ではないが、自然の構造が発達した土壤のマクロポア周囲の元素分析を行うと、図8に見られるようにマクロポアの壁に炭素が集積している様子が明らかであった（ハイライトされた部分）。下方浸透によって有機物が輸送・貯留されていることがわかり、自然のプロセスとしても土壤の有機質化に下方浸透が貢献していることが推定される。今回の試験サイトでは期間が短いため画像としての明確な蓄積を観察できなかったが、長期的な成果としてはこのような蓄積も観察されたと考えている。

新規性・優位性

上記のように、人工マイクロポアを設置した試験区において有機物の下方浸透の顕著な促進を認めている。本本研究で用いた手法は、大がかりな土木工事を伴わず、地域未利用資源（日本では貧栄養地に生える竹の繊維、インドネシアではサトウキビの絞りかすバガス）を用いており、低コストで環境修復の技術として有利であり、また、表面流発生防止による土壤流亡の防止、続く水環境の悪化の防止にも貢献すると期待され、炭素貯留の新たな技術として、また環境保全・修復の技術として、新規性、優位性が認められる部分がある。

当初の目的外の成果

①下方浸透促進によって植生が旺盛になり、それによってバイオマス量の増加が加速した。

②本技術の応用として、東日本大震災で放射性降下物の影響を受けた宮城県南部の果樹園で、放射性物質の物質循環からの遮断を目的として人工マクロポア技術を施した。有機物に吸着しているために土壤の鉍物に固定されず、交換態のままと考えられる放射性セシウムは表層の蓄積の20%をしめると言われており、植物に吸収されやすく農作物の出荷に影響

Table1 放射能の表層集積率（単位：％）

	M w/o Nutrient	M w/ Nutrient	X w/ Nutrient	X w/o Nutrient
Average	85.92	86.88	98.20	94.19
Standard deviation	12.08	6.12	1.28	2.89

$$* \text{Surface accumulation} = \frac{0-5\text{cm radioactivity}}{\text{total radioactivity}} \text{ によって計算.}$$

**M:マクロポア区, X:無処理区

し、また雨水によって洗い流されやすいため水環境に影響しやすい。人工マクロポア技術によって下方浸透を促し、表層蓄積率の変化という指標で評価すると、このうち約50%を鉍物の多い土壤深部に約一年半で誘導・固定することが出来た。同様の室内実験では排水から放射性物質の検出は見られず、誘導後は鉍物である土壤に固定されていることが確認できた。

農作物からの吸収を軽減する技術として大きな成果で、プラスアルファの成果と捉えている。廃棄汚染土壤を発生させない優位点があり、傾斜地、狭小地などに適用で

きるので、応用範囲が広いと考えている

一方、こうした手法が放射性セシウムへの対応策として良いかどうかについては、多くの議論があると考えられ、特記すべき成果とは言いきれない。

④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が

(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が

(見込まれる ・ 見込まれない)

本研究の成果の大きな特徴は、自然の持つ土壌構造に似せた工学的モデルを作ることによって、非常にシンプルな技術ながら、微細粒子の流亡を防ぎながら下方浸透を促進させ、土壌を不用意に酸素に触れさせることなく、有機物を貯留することである。あわせて、これは強雨の影響を軽減するという2つの効果を同時に得ている。二酸化炭素から有機物へと形を変えて貯留された炭素は、資源化され次世代の植生のための植栽基盤となっており、植生回復に役立っている。二酸化炭素を削減だけの工学技術との違いが明確で、自然が元々もつ形に近づけることで自然そのものの機能回復ともなっており、土壌を用いた技術が二酸化炭素削減のためのツールとして発展できる可能性を示すことができた。

さらに本研究では、下方浸透促進によって植生が旺盛になり、それによってバイオマス量の増加が加速するという当初予想もされなかった成果を得ている。「一本の根が作る土壌間隙が炭素貯留に与えた影響」という、地球科学的な意義も含めた内容に発展する可能性がある。下方浸透でなぜ炭素貯留が促進され、植生はなぜ（考えていた以上に早く）回復するのか、自然界ならば炭素貯留はどの部位で行われるのか、など技術開発だけでなく、地球科学的な観点からの考察も可能である。新たに植物栄養・地球科学分野との連携を計りながら研究を進める可能性を拓くことができた。

ここで展開した技術は、非常にシンプルなため環境負荷が小さく、材料も地域未利用資源を使っているので材料調達に有利で、経済的に有利である。利用する人を選ばないため波及効果は大きいと考えている。実現にはもう少し時間がかかるが、土壌が持つ有機物量を安定して増加させられるようになれば、土壌の有機質度を二酸化炭素削減のツールとして使えるようになる。これは2(2) 研究成果の先進性や優位性及び特記事項で試算したとおりである。単位あたりの量としては少ないものの土壌は莫大な面積が対象となるため、その効果は非常に大きいと考える。

また、土壌の有機質化は同時に気候変動の影響を軽減する働きもあるため、強雨時の土壌流亡（植栽の消滅）、濁水発生（水質汚濁）の軽減を計ることができ、様々な点において社会の課題解決に貢献できるポテンシャルがある。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (行われた ・ 行われなかった)

研究マネジメントについては、海外を含む複数の専門家との連携がとられ、研究実施マネジメントは、概ね適切に行われていると判断される。指摘事項に対しても、努力して対応できていると言える。

助成金の活用については、当初は計画通りに執行できていない予算もあったようで

あるが、本研究課題全体を通しては、有効に利活用されていると判断できる。

成果の公表については、下記の通り適切に取り組んでいる。

雑誌論文： 合計 10 件（査読あり 7 件、査読なし 2 件、査読なし未掲載 1 件）

会議発表： 合計 38 件（専門家向け 37 件、一般向け 1 件）

雑誌・図書： 合計 1 件

知的財産権： 合計 2 件（いずれも取得済み）

国民との科学技術対話：合計 9 件（技術者向 1 件、一般向 3 件、中・高生向 5 件）

その他、自身のホームページによる公開、所属機関でシステム化された広報とサイエンスカフェを通じた公表、フロムページの夢ナビによる紹介など、積極的に取り組んでいる。