

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K21330

研究課題名（和文）森林生態系炭素循環における最後のブラックボックス：土壌中の樹木細根を可視化する

研究課題名（英文）Visualization of tree fine roots in forest soil

研究代表者

平野 恭弘（Hirano, Yasuhiro）

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：60353827

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、森林の炭素循環を評価する上で最後のブラックボックスである樹木細根の生態を非破壊に明らかにするため、1. 超高周波数の地中レーダを用いて土壌中の細根の可視化は可能か？ 2. 可視化可能な最小直径をもつ細根から、形態や成長の生態プロセスを推定することが可能か？について明らかにすることである。根を非破壊で検出する地中レーダ法で近年2700 MHzという超高周波レーダが実用化された。超高周波地中レーダを用いて土壌に再埋設した直径1 mmから10 mm以下の根を非破壊探査した結果、直径5 mm以上の根は高い確率で検出されたが、細根の定義である2 mm以下の根は検出されなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

樹木の根は樹体支持の太い根と養水分吸収を担う細根に分類される。細根は直径2 mm以下の根と定義され、光合成産物のうち2割から7割もが細根に配分される。細根生態を明らかにすることは森林の炭素循環を評価する上で極めて重要であるが、森林生態系における最後のブラックボックスといわれるほど未解明である。根を非破壊検出する地中レーダで近年実用化された超高周波地中レーダを用いた結果、本研究では細根の定義である直径2mm以下の根は検出できなかったが、直径5 mm以上の根が高い確率で検出された。掘らなければ見えない土壌中の空隙など構造や根特性など可視化の可能性が開けた意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：Evaluation of the dynamics of tree fine roots is needed because fine roots status are the last black box in assessing the forest carbon cycle. The aims of this study are to answer the questions: 1. Is it possible to visualize fine roots in soil using ultra-high frequency ground-penetrating radar? 2. Is it possible to infer morphology and growth ecological processes from fine roots with the smallest diameter that can be visualized? Recently, a 2700 MHz ultra-high-frequency ground-penetrating radar method that can detect roots nondestructively has been put to practical use. The results of nondestructive scanning of roots between 1 mm and 10 mm in diameter re-buried in soil using ultrahigh-frequency ground-penetrating radar showed that roots larger than 5 mm in diameter were detected with a high probability, but roots smaller than 2 mm, the definition of fine roots, were not detected.

研究分野：森林科学

キーワード：樹木根 細根 地中レーダ 森林土壌 人工林

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

樹木の根は、樹体支持の太い根と養水分吸収を担う細根に分類される。細根は直径2mm以下の根と定義され、その多くは落ち葉のように1年で成長・枯死し土壌へ脱落する(Finer et al. 2011)。このため、樹木個体は葉で1年間に生産された光合成産物のうち2割から7割もを、個体バイオマス数%の細根に配分する。細根生態を明らかにすることは森林生態系の炭素循環を評価する上で極めて重要である。しかし細根生態は森林生態系における最後のブラックボックスといわれるほど未解明である。

土壌中の細根生態を明らかにするため、専用のカメラ(ミニリゾトロン)や市販のスキャナを土壌中に埋め込み直接観察する手法が用いられている。しかし、これらの設置には「100年で厚さ1cm形成されるといふ土壌層の破壊」を伴うため、森林土壌中の細根生態を真に評価できているかどうかについて国際的にも多くの議論がある。すなわち、森林土壌を破壊することなく細根生態を評価することは現時点では未だ不可能である。

道路舗装下の穴や建物の柱内の鉄筋などを非破壊で評価する方法として、地中レーダを用いた電磁物理探査法がある。この方法は地中の樹木根に応用されているが(Hirano et al. 2009, 2012)、細いものが検出できる高周波レーダは1600MHzという周波数の限界のため、これまで根直径5mm以上の根が検出可能であり、直径2mm以下の細根は不可能であった。2016年に米国のグループが「小麦の細根を地中レーダで検出する」(Liu et al 2016)という論文が発表されたが、これは細根量を1600MHzのレーダ反射波指標と掘り取り後の根量との回帰線から推定する方法であり、直径や形態など根を直接可視化できたわけではない。しかしながら近年、2700MHzという超高周波高性能小型地中レーダが実用化され、さらに細いもの、すなわち直径2mm以下の細根まで可視化できる可能性がでてきた。しかし、この超高周波数レーダを細根の非破壊検出に試された例は未だない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、森林生態系の炭素循環を評価するうえで最後のブラックボックスである樹木の「細根(図1)」について、成長や枯死、形態など生態を非破壊で明らかにするため、

【目的1】超高周波数の地中レーダを用いて、森林土壌中の「細根の可視化」は可能かどうか？

【目的2】可視化可能な最小直径をもつ細根から、形態や成長・枯死の生態プロセスを推定することが可能かどうか？

の2点について明らかにすることである。

3. 研究の方法

(1) ヒノキ林土壌における根埋設後の高周波地中レーダ探査

高周波地中レーダの取り扱いおよび探査法を新たに取得し、土壌中に存在する直径の小さい既知の対象物が高周波地中レーダで反射するか否かを検証するため、根および対照物の森林土壌中への埋設後レーダ探査実験を行った。ヒノキ林の土壌に、対照物として直径4.6mm程度のドライバ、および直径0.5mmから10.8mm程度のヒノキ根を、深さ5cm程度に埋設した。ドライバや根の方向と直交するように2700MHzの超高周波数地中レーダを探査した。さらにヒノキ林から手のひらサイズの無傷の細根系を掘り取り、それらを深さ5cm程度に再埋設して、同様に高周波地中レーダを用いた探査を行った。

(2) スギ林土壌における根の高周波地中レーダ探査

国内主要造林樹種のスギ細根について高周波地中レーダを用いて非破壊で検出可能かどうかを明らかにするため、スギ林の土壌における探査実験を行った。直径1mmから10mm程度で5cm以上の長さを持つ根を掘り出し、水系でマークした後、再埋設した。それぞれの根が埋設された地表面において高周波地中レーダ探査を行った。

4. 研究成果

(1) ヒノキ林土壌における根埋設後の高周波地中レーダ探査

ヒノキ林土壌に生育するヒノキ根を掘り出し、根の長さを15cm程度にそろえて、異なる直径の根を現場の森林土壌でほぼ一様に整地した後に再埋設して、超高周波地中レーダ探査された反射波形図の一例を図1に示す。対照物として埋設した直径4.6mmのドライバは、レーダ波に反射し明瞭な双曲線波形を示した(図1白点線丸)。また直径10.8mmのヒノキ根も明瞭な双曲線波形が認められた(図1白丸)。一方で直径3.3mmや1.8mmといった根については、双曲線波形が認められなかった。同様な探査実験を異なる直径を持つヒノキ根を再埋設して行ったが、ほぼ同様に直径5mm以下になると根の反射波形は認められなかった。

これらのヒノキ林の実験から直径5mm以下の根、また特に直径2mm以下と定義される細根の検出は困難であることが示唆された。地中レーダを用いた根の検出は、用いる周波数や、土壌と根との水分状態によって左右される。したがって、ほかの森林土壌や樹種で試験する必要性がある。

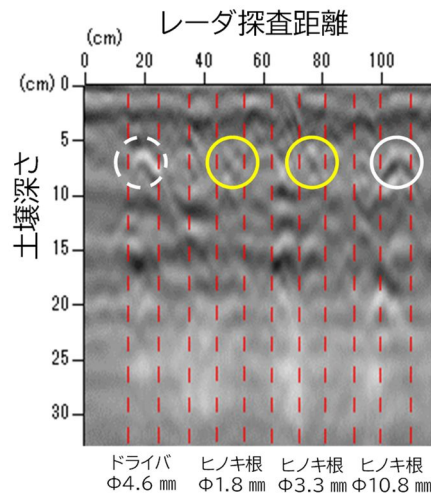


図1 ヒノキ林土壌に異なる直径のヒノキの根を深さ6-9 cm程度に再埋設した地表面について、超高周波地中レーダを用いて探査した反射波画像。

白点線丸：直径4.6 mmのドライバに反射した双曲線波形
 黄色丸：直径1.8 mm, 3.3 mmの根の反射波が認められなかった位置
 白丸：直径10.8 mmの根に反射した双曲線波形

(2) スギ林土壌における根の高周波地中レーダ探査

スギ林土壌でスギ根を掘り出し、根をスギ個体から切断することなく、位置と直径を測定した後、土壌をできるだけかく乱せずに再埋設し、高周波地中レーダ探査を行った。その結果、図2で一例を示す通り、直径10 mm程度の根は明瞭な双曲線波形を示したものの、直径5 mm以下の根では双曲線波形が認められなかった。

すなわち先のヒノキ林と異なる土壌条件で異なる樹種においても、直径5 mm以下の根、また細根の検出は困難であると結論した。一方で土壌表層の空隙や根などの違いが現場の反射波画像を解析することで、掘らなければ評価できない特性を見出す可能性は示されるかもしれない。今後のさらなる反射波解析が必要であろう。

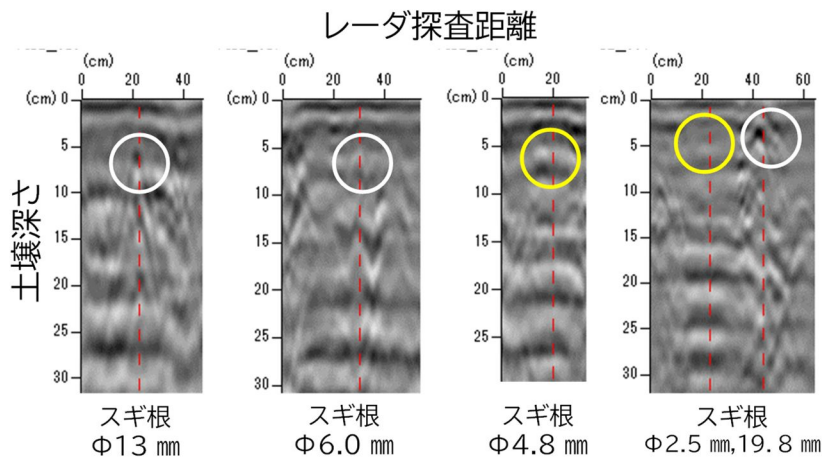


図2 スギ林土壌における再埋設された異なる直径のスギ根の地中レーダ反射画像。

白丸：双曲線波形として根が検出された反射波画像。

黄色丸：根が検出されなかった位置。

<引用文献>

Finer L, Ohashi M, Noguchi K, Hirano Y. 2011 Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *Forest Ecology and Management* 262 : 2008-2023.

Hirano Y, Dannoura M, Aono K, Igarashi T, Ishii M, Yamase K, Makita N, Kanazawa Y. 2009 Limiting factor in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. *Plant Soil* 319:15-24.

Hirano Y, Yamamoto R, Dannoura M, Aono K, Igarashi T, Ishii M, Yamase K, Makita N, Kanazawa Y. 2012 Detection frequency of *Pinus thunbergii* roots by ground-penetrating radar is related to root biomass. *Plant Soil* 260:363-373.

Liu X, Dong X, Xue Q, Leskovar DI, Jifon J, Butnor JR, Mareket T. 2018 Ground penetrating radar (GPR) detects fine roots of agricultural crops in the field. *Plant Soil* 423:517-531.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 平野恭弘	4. 巻 31
2. 論文標題 樹木根研究者 苅住昇先生を偲ぶ 文献調査から	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 根の研究	6. 最初と最後の頁 122-126
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 平野恭弘
2. 発表標題 地中レーダ探査技術を利用した樹木根構造の非破壊解析に関する研究
3. 学会等名 第58回根研究集会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hirano Y, Miyatani K, Doi R, Makita N, Tanikawa T
2. 発表標題 Fine roots of Japanese plantation trees are sensitive to soil acid buffering capacity
3. 学会等名 10th International Conference on Acid Deposition（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柳瀬亮太・谷川東子・杵山哲矢・黒見信輔・金子祥也・山瀬敬太郎・藤堂千景・池野英利・大橋瑞江・檀浦正子・平野恭弘
2. 発表標題 土壌表層から根系最大深さに至るまでのスギ細根形態特性
3. 学会等名 第135回日本森林学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 柳瀬亮太、谷川東子、杵山哲矢、黒見信輔、金子祥也、山瀬敬太郎、藤堂千景、池野英利、大橋瑞江、檀浦正子、平野恭弘
2. 発表標題 表層から深さ1.5mまでの土壌物理特性の変化がスギ細根形態に与える影響
3. 学会等名 第58回根研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柳瀬亮太・谷川東子・杵山哲矢・黒見信輔・金子祥也・山瀬敬太郎・藤堂千景・池野英利・大橋瑞江・檀浦正子・平野恭弘
2. 発表標題 異なる土壌環境に生育するスギ個体根系内の深さ別細根特性
3. 学会等名 第57回根研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柳瀬亮太・谷川東子・杵山哲矢・黒見信輔・金子祥也・山瀬敬太郎・藤堂千景・池野英利・大橋瑞江・檀浦正子・平野恭弘
2. 発表標題 スギ根系における土壌深さ別の細根呼吸速度と形態特性
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 平野恭弘 分担著 (中野明正 小泉光久 著)	4. 発行年 2023年
2. 出版社 文研出版	5. 総ページ数 47
3. 書名 根っこのふしぎな世界 根っこってなんだろう 大きな木の根っこはどうなっているの？	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------