

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18380095

研究課題名（和文） 新しい機器を用いた樹木根系の空間分布及び動態の解明

研究課題名（英文） Assessing the dynamics and spatial distribution of tree root systems with new instruments.

研究代表者

金澤 洋一 (KANAZAWA YOICHI)

神戸大学・大学院農学研究科・教授

研究者番号：40101092

研究成果の概要：

樹木根系の現存量及び空間分布を明らかにするための新しい方法として、非破壊的で簡便な地中レーダ法の開発を試みた。マサ土実験区において、スギの根は地中レーダにより検出可能であり、レーダの波形パラメータ値と根直径との間に正の相関があること、根の重なりや土壌と根の水分比がレーダによる根の検出に大きく影響することが明らかになった。アカマツ林内でも、レーダにより太いアカマツ根の検出が可能であった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：地球温暖化・樹木根系・炭素蓄積量・地中レーダ・スギ・アカマツ・森林土壌

1. 研究開始当初の背景

森林の樹木根系の成長発達・枯死・分解といった動態の解明は、近年の地球温暖化防止の観点から森林の二酸化炭素収支に関連して注目を集めている。樹木のおよそ2割から4割の部分は地下部根系に配分されているといわれており、太い根を主とした根系は、地下部に炭素を蓄積する炭素固定機能をもつ。またこの炭素固定機能とともに、生きている根とくに細根は呼吸活動によりCO₂を放出する。すなわち根系は炭素の吸収源でもあり放出源でもあるといえる。

森林の吸収によるCO₂削減を進める上で、京都議定書の上でも、地下部バイオマスのモニタリングは必須項目となっており、正確に推定することが求められている。根系に関連した課題では、これまで掘り取りが主要な調査手段であり、また同時にネックでもあった。掘り取りでは、ある時間断面、空間断面の状態の把握しかできないこと、根系全体を完全な形で掘り出すことは困難であり、また労力的に試料数が限られてしまうことが大きな欠点であった。このため、地下部根系に関する十分なデータは蓄積されておらず、地上部からおおまかに推定されることが多かった。

これらの点について、本課題では、地中レーダにより地中内部の樹木根を非破壊的に調べる手法の開発により、上記手法の欠点を補うことを試みた。レーダを用いた地下部探査手法は、地中における電磁波の反射・屈折・透過などの物理現象を利用して地下構造を探査する方法であり、主に、道路の空隙や、水道管・地下パイプ位置等埋設物の位置の検出、地下水位の測定、凍土面の検出などに使用されてきた。測定器はレーダ送信アンテナと受信アンテナからなり、境界面からの反射時間と反射波の特徴から深さ、位置、大きさを求めるものである（図1）。

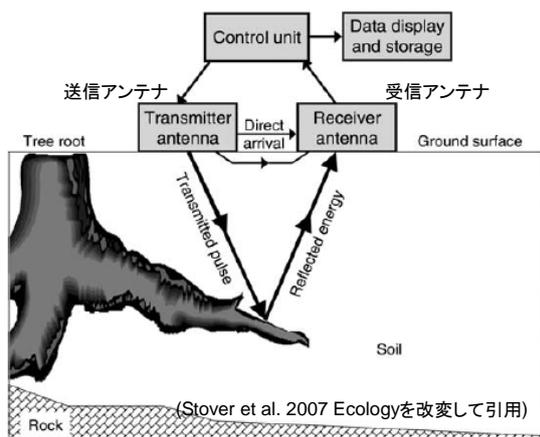


図1 地中レーダによる樹木根の検出

2. 研究の目的

- (1) 地中レーダによる樹木根系の検出は可能か
- (2) 地中レーダによる樹木根系の検出に、樹木根の含水率、直径、根の重なりが影響するか
- (3) 実際の林内において、地中レーダによる根現存量および分布の推定ができるか、さらに既存の測定手法による結果と比較可能あるか

以上主に3点を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

- (1) レーダによる樹木根系の検出の可能性
兵庫県農林水産技術センターにおいて、3 × 1.5 m の方形の実験区を作成した。深さ 1.3 m を掘削し、均一であるマサ土を用いて埋め戻した。用いた土砂の粒系は 6 mm 以下に調整した。

判別対象の樹木根として地中レーダ探査実験前日に 20 年生のスギの根系を掘り出し、長さ 1 m のなるべく真っ直ぐな 5 本の根系を選定した。これらサンプル根の平均直径はそれぞれ 1.5, 3.0, 3.3, 3.9, 5.0 cm であつ

た。根の切り口は乾燥を防ぐためシリコンを塗布した。

5 本の根系サンプルは作成したマサ土実験区の深さ 30cm に埋設した。サンプル間の距離はおおよそ 50 cm である。実験には、900 MHz の地中レーダ (SIR SYSTEM 10H, Geophysical Survey Systems, Inc., North Salem, NH, USA) を用いた。7 本のレーダ探査用測線を 10cm 幅で設定し、レーダを走査させた。解析には中央部分の 4 本の値を用いた(図 2 (a))。レーダ測線直下におけるサンプル根の直径および、正確な埋設位置を記録し、100 cc の土壌コアを採取することによって測線上 5ヶ所の土壌含水率を測定した。実験後にサンプル根を掘り取り、体積および乾燥重量を求め含水率を算定した。

レーダから得られた画像は、解析専用ソフト RADAN for Windows (Geophysical Survey Systems Inc.) によって背景除去やマイグレーション処理を行った。レーダ波形パラメータである最大振幅や振幅面積なども抽出し、根直径との関係を解析した。

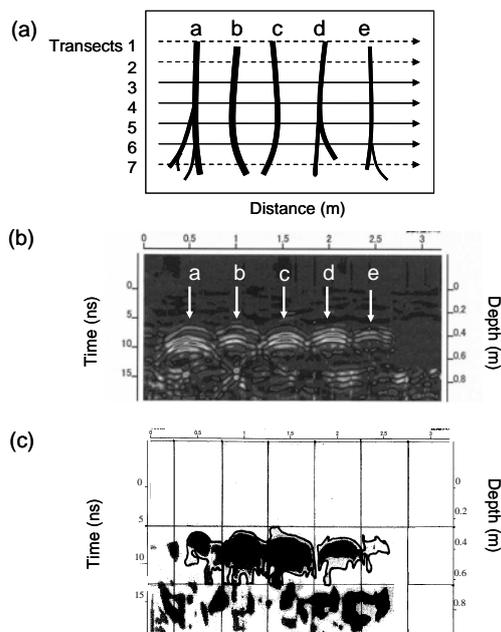


図2 根系サンプル及びレーダ探査用測線の位置 (a) と地中レーダにより得られたレーダ画像 (b, c)

- (2) レーダ探査時の含水率による影響
レーダ探査は、比誘電率の異なる媒質の境界で生じた電磁波の反射を解析する。そのため媒質の比誘電率のコントラストが大きい程、反射係数が大きくなり強い反射が境界部で生じることになるが、物質の比誘電率は含水率により大きく異なる。そこで、サンプル含水率がレーダによる検出に与える影響を明らかにするために、レーダ実験区を作成し、

サンプル根を埋設してレーダ走査を行った。兵庫県農林水産技術センターにおいて(1)で作成された3×1.5mの実験区を使用した。長さ1m、直径7.5cmのスギ丸太5本を乾燥サンプルとして使用した。直径5cm、10cmの丸太をそれぞれ6本、浸水させて湿潤サンプルを作成した。またスギの根系サンプルを5本使用した。根系サンプルの長さは約1m、平均直径はそれぞれ1.5, 3.0, 3.3, 3.9, 5.0cmであり、走査前日に採取したものである。サンプルは深さ30cmに埋設した。サンプル間の距離はおおよそ50cmである。実験には900MHzの地中レーダ(SIR SYSTEM 10H, Geophysical Survey Systems, Inc., North Salem, NH, USA)を用いた。

レーダ測線直下で100ccの土壌コアを採取することによって土壌含水率を測定した。レーダ走査実験終了後に掘り取った各サンプル根からサブサンプルを切り出し、体積および乾燥重量を求め含水率を算定した。

レーダ画像の解析は前の(1)と同様に行い波形パラメータの抽出を行った。

(3) 根の重なりがレーダによる検出に与える影響

実際の樹木根系は複雑に重なり合っている。根の重なりがレーダ検出に与える影響を調べるために、森林総合研究所関西支所内に3.5m×2.0m×深さ1.2mのマサ土実験区を作成し、レーダ探査実験を行った。前の(1)実験と同様に長さ1m、平均直径36mmのスギ根サンプルを8本用意して、深さ30cmの地点に2本ずつ、水平間隔が0, 10, 20, 30cmとなるように埋設した。

埋設したスギ根の垂直方向に11本のレーダ用測線を設定し、900MHz地中レーダ(SIR SYSTEM 10H, Geophysical Survey Systems, Inc., North Salem, NH, USA)で探索を行った。レーダ探索後、スギ根のサンプルを掘り出し埋設位置、含水率を測定した。測線下の土壌含水率も(1)と同様に測定した。レーダ画像の解析は中央5測線を用いて前の(1)と同様に行い波形パラメータの抽出を行った。

(4) アカマツ林の根現存量と垂直分布の推定
兵庫県農林水産技術センター内のアカマツ林において、地中レーダ法、ブロックサンプリング法、トレンチ法を用い、根現存量および根の垂直分布を推定し比較した。

① 地中レーダ法

アカマツ林内に長さ110cmの地中レーダ用測線を5本設置し、レーダを走査させた。実験には900MHzの地中レーダ(SIR SYSTEM 10H; Geophysical Survey Systems Inc., North Salem, NH, USA)を用いた。レーダ画像の解析は前の(1)と同様に行い波形パラメータの抽出を行った。

土壌体積含水率を求めるため、5測線直下で各1点ずつ表層の土壌コア(100cc)を採取した。

② ブロックサンプリング法

各レーダ測線上から1箇所の採掘位置を選び、縦20cm×横20cm×深さ10cmのブロックを、深さ50cmまで計25土壌ブロック(5測線×5深度)採掘した。採掘した土壌ブロックは実験室に持ち帰り、根をすべて土壌から取り出し水で洗い、土を落とした。生きている根と枯死根を区別し、直径2mm以下、2-5mm、5-10mm、10-20mm、20mm以上の5つの直径階級に分類した。サンプル根は、105℃、48時間で乾燥させて、乾燥重量を測定した。

③ トレンチ法

各レーダ測線下にある樹木根の位置を確認するため、長さ110cm、深さ50cmの土壌断面を作成した。次に、土壌断面に透明なアクリル板を貼り付け、確認できる根の位置および根直径を記載した。直径2mm以下、2-5mm、5-10mm、10-20mm、20mm以上の5つの直径階級に分類した。また直径10mm以上の石の位置情報も記載した。

各土壌断面にある根の本数分布から現存量を推定するために、ブロックサンプリング法で採取した根をサブサンプルとして根直径0.4-30.4mmのさまざまな太さの根100本を選択し、それぞれの根の直径、根長、乾燥重量を測定した。次に根直径(D; mm)と比根重(根長1.0cmあたりの乾燥重量; $g\ cm^{-1}$)との関係式を作成し、トレンチ法によって得た根直径を代入して、比根重を推定した。

また、根の体積含水率をもとめるため、各測線上で各直径階級のサブサンプル根を採取し、その場で湿潤重量を測定した。その後、実験室に持ち帰ったサブサンプル根は105℃、48時間で乾燥させて、乾燥重量を測定した。

4. 研究成果

(1) 樹木根系の検出可能性

スギ根系は地中レーダにより検出が可能であった。図2(b)に得られたレーダ画像の一例を示す。5本の半円形の曲線は30cmの深さに根が存在することを示している。根直径の違いは、振幅の大きさの違いとなって示された。

レーダ反射波形の振幅と最大振幅面積は探知できた根の直径と正の相関があった(図3(a)(b))。第一振幅の反射時間と探知直径にも相関がみられたが、第二振幅および第三振幅のそれとは相関がみられなかった。ヒルベルト変換(図3(c))の結果と探査根直径にも有意な相関が見られた。

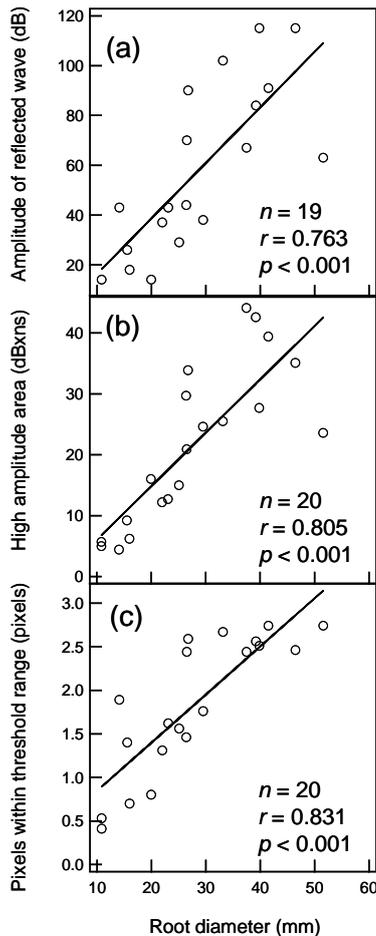


図3 根直径とレーダのパラメータの関係

(2)レーダ探査時の含水率による影響
 スギ丸太の平均体積含水率は、乾燥サンプルで15.2%であり、湿潤サンプルでは58.1%であった。乾燥丸太は地中レーダでは検出できなかったが湿潤サンプルは検出が可能であった。すべてのサンプルと埋設地点の土壌との体積含水率を図4にプロットすると、体積含水率の高い場合に検出が可能であることが示された。根の体積含水率が低い場合には、土壌の比誘電率とのコントラストが小さくなり、反射強度が大きく低下したものと考えられる。

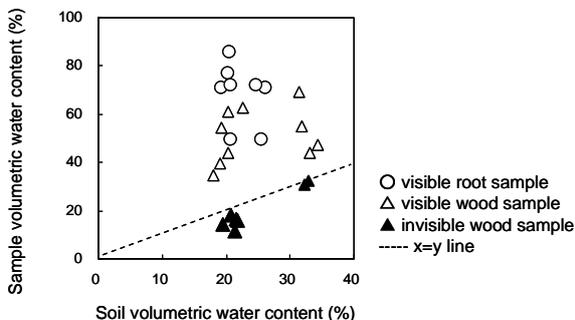


図4 地中レーダ探査時の土壌体積含水率と根の体積含水率による根の検出の違い

(3)根の重なりがレーダによる検出に与える影響

根と根の水平間隔が20 cmまでは、レーダにより1つの根として判別することが可能であった。しかしながら水平間隔が0, 10 cmの時には、2つの根を1つの根と検出してしまうことが明らかとなった(図5)。垂直方向の間隔も同様な実験を試みたところ、間隔20 cm未満では、2つの根を1つの根と検出してしまうことが明らかとなった。これらの知見は、海外で報告されている事例で25 cmまたは31 cm間隔で埋設された根がそれぞれ1つの根と区別できていることを支持するものである。本結果は、間隔が20 cm未満である根についてレーダはすべて一塊として捉えてしまうことを示しており、とくに根の重なりが複雑な根株付近では、それらを大きなレーダ波形として捉え、根の大きさが過大評価される可能性を示唆している。

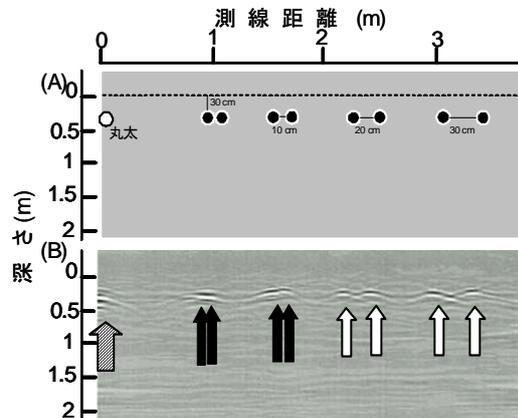


図4 根の埋設間隔位置 (A) と検出されたレーダ波形 (B) . 白矢印はレーダで1つの根として検出可能だが、黒矢印では2つの根を1つの根として検出している。

(4)アカマツ林の根現存量および分布の推定
 根現存量合計はブロックサンプリング法では1338 g m⁻²、トレンチ法では939 g m⁻²であった。また、直径2 mm以下の根現存量は、ブロックサンプリング法では163 g m⁻²、トレンチ法では18 g m⁻²であった。ブロックサンプリング法とトレンチ法とでは、同じ調査地点にもかかわらず、根現存量の推定値にばらつきがあった。これは根現存量の測定手法の違いおよび対象とする掘り取り面積の違いが反映したためだと考えられる。

地中レーダ法により直径20 mm以上のいくつかの根では、明確な反射波形が確認できた。しかしながら、直径20 mm以下の根では、その分布を推定するために不十分な波形が多く確

認められた(図6)。特定できる根、特定できない根、そして異質な土壤条件による反射波形も存在した。

近年欧米では、砂地など単純土壤条件で地中レーダ法を用いて樹木根の位置を検出しバイオマスを推定する方法が導入され始めている。これまでは、どのような樹木根の条件で検出できるのか明らかにされていなかった。本研究では、根の含水率や重なり方がレーダによる根の検出に大きな影響を与えることを明らかにした。

本研究は、実際の野外で地中レーダを用いた樹木根系分布評価の応用例として、国内で初めての報告である。今後の課題として、実験区や実際の野外の森林土壤環境下においての実験を繰り返しながら、地中レーダ法がどのような場所に適しているかなど、地中レーダ法適用の利点および欠点をひとつずつ明らかにしていくことがあげられる。

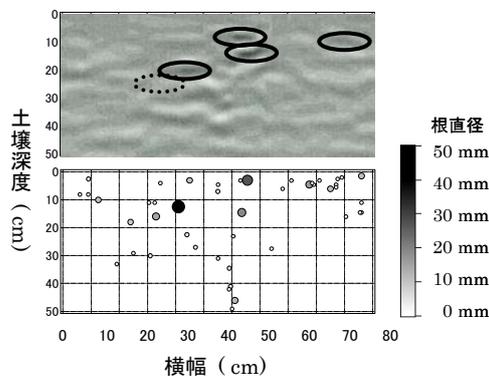


図6 地中レーダ法によるレーダ画像とトレンチ法から観察された根系の垂直分布

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Hirano, Y., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Yamase, K., Makita, N. and Kanazawa, Y. (2009) Limiting factor in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. *Plant and Soil* 139:15-24 査読有 DOI10.1007/s11104-008-9845-4
- ② 牧田直樹, 平野恭弘, 檀浦正子, 山瀬敬太郎, 青野健治, 五十嵐鉄朗, 石井政博, 金澤洋一 (2009) ブロックサンプリング法, トレンチ法, 地中レーダ法によるアカマツ林の根現存量および根系分布の推定. 根の研究 18 (印刷中) 査読有

- ③ Dannoura, M., Hirano, Y., Igarashi, T., Ishii, M., Aono, K., Yamase, K. and Kanazawa, Y. (2008)

Detection of *Cryptomeria japonica* roots with ground penetrating radar.

Plant Biosystems 142 : 375-380 査読有

DOI: 10.1080/11263500802150951

- ④ 平野恭弘 (2008)

地中レーダで根の位置を探る.

森林総合研究所関西支所研究情報. No. 88, 2008年5月. 査読無

http://www.fsm.affrc.go.jp/Joho/res_info_088.pdf

[学会発表] (計6件)

- ① 山本梨加, 平野恭弘, 檀浦正子, 五十嵐鉄朗, 石井政博, 青野健治, 山瀬敬太郎, 牧田直樹, 池田智恵, 金澤洋一. (2009) 地中レーダ法を用いた海岸クロマツ林根系の把握. 第120回日本森林学会大会. 京都大学農学部(京都), 2009年3月28日

- ② 金澤洋一, 檀浦正子, 平野恭弘, 山瀬敬太郎, 五十嵐鉄朗, 石井政博, 青野健治. (2008) 樹木根地下分布調査における地中レーダ法の適用性について. 平成20年度土木学会全国大会. 東北大学(仙台). 2008年9月11日.

- ③ Hirano, Y., Dannoura, M., Igarashi, T., Ishii, M., Aono, K., Yamase, K., Makita, N. and Kanazawa, Y. (2008) Water content of roots affects detection of tree roots with ground penetrating radar. *Woody roots and Ecosystem services*, Hotel VIP Art's in Lisbon (Lisbon, Portugal), 2008年5月17日.

- ④ 平野恭弘, 檀浦正子, 五十嵐鉄朗, 石井政博, 青野健治, 山瀬敬太郎, 牧田直樹, 金澤洋一. (2008) 地中レーダを用いた樹木根検出の制限要因. 第119回日本森林学会. 東京農工大学農学部(府中), 2008年3月28日.

- ⑤ Dannoura, M., Hirano, Y., Igarashi, T., Ishii, M., Aono, K., Yamase, K. and Kanazawa, Y. (2007) Radar detection of roots of Japanese coniferous trees. *Fourth International Symposium on Dynamics of Physiological Processes in Roots of Woody Plants*, The University of Wales (Bangor, U.K.), 2007年9月18日.

- ⑥檀浦正子, 金澤洋一, 平野恭弘 (2007)
非破壊的手法を用いた根系観察の試み.
第118回日本森林学会大会.
九州大学農学部(福岡), 2007年4月2日.

[その他]

- ①森林総合研究所ホームページ
研究最前線
土を掘らずに地表面からレーダでスギの
根系を検出する.
[http://www. ffpri. affrc. go. jp/research
/seika/21ronbun/21ronbun. html#2009-10](http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/seika/21ronbun/21ronbun.html#2009-10)
2009年4月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金澤 洋一 (KANAZAWA YOICHI)
神戸大学・大学院農学研究科・教授
研究者番号: 40101092

(2) 研究分担者

平野 恭弘 (HIRANO YASUHIRO)
独立行政法人森林総合研究所・関西支所・主
任研究員
研究者番号: 60353827