特集「防災緑化と土砂災害」

同心円状レーダ探索による海岸に生育するクロマツ個体の水平根の広がり の検出

大橋瑞江¹⁾・柿添哲也¹⁾・池野英利¹⁾・山瀬敬太郎²⁾・谷川東子³⁾・
檀浦正子^{4,5)}・青野健治⁶⁾・藤堂千景²⁾・平野恭弘⁷⁾

- 1) 兵庫県立大学環境人間学部 School of Human Science and Environment, University of Hyogo
- 2) 兵庫県立農林水産総合技術センター Hyogo Prefectural Technology Center for Agriculture, Forestry and Fisheries
- 3) 森林総合研究所関西支所 Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute
- 4) 京都大学大学院地球環境学堂 Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University
- 5) 京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University
- 6) 株式会社環境総合テクノス The General Environmental Technos Co., Ltd.
- 7) 名古屋大学大学院環境学研究科 Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

摘要：海岸に生育するクロマツについて、津波や防風に対する機能を評価するうえで重要となる水平根の広がりを、地中レーダ探査を用いて抽出することを試みた。ここでは同心円状にレーダ測線を配置し、(1)レーダ画像からの樹木根の抽出、(2)根のつながりを意識した水平根系の抽出、(3)根を掘り出して得られた鳥瞰図との比較による抽出精度の評価、の3つを目的として実験を行った。得られたレーダ画像について、コントラストと円弧波形から根を抽出したところ、そのうちの76%の抽出波形について、実際に同じ場所に根が存在していた。また、抽出点同士のつながりを考慮して抽出した根系と鳥瞰図とを比較したところ、7本の水平根のうち5本が、全体的あるいは部分的に実際の水平根を示していた。したがって、地中レーダは主要な水平根の潜在的な広がりを予測するツールとして利用可能だと言える。また得られた波形の情報と抽出精度の関係を検討したところ、円弧の形が美しいあるいはコントラストが強いという2基準のうち1基準でも満たしている場合、70%を超える高い正答率が得られた。よって波形の情報が根の検出に有効であると考えられた。

キーワード：水平根、鳥瞰図、根回り、防潮、防風

OHASHI, Mizue・KAKIZOE, Tetsuya・IKENO, Hidetoshi・YAMASE, Keitaro・TANIKAWA, Toko・DAN-
NOURA, Masako・AONO, Kenji・TODO, Chikage and HIRANO, Yasuhiro: **Detection of horizontal root distribution of a black pine in a sea coast by concentrically searching of ground penetrating radar**

Abstract: Horizontal root distribution of a black pine in a sea coast was detected by ground penetrating radar because it is important information for evaluating disaster reduction function of a tree. In this study, we aimed to (1) extract roots from radargram collected by concentrically searching line, (2) estimate horizontal root distribution by taking root connection into account, (3) evaluate root extraction accuracy by comparing the results with birdseye view of the dug up pine roots. We extracted roots from the radargram using contrast and waveform information, and found that real roots existed under the 76% of the extracted locations. Horizontal root distribution estimated from the connection of root extraction points indicated 5 of 7 horizontal roots matched with real roots wholly or partly. These results suggest that ground penetrating radar is a useful tool for estimating potential distribution of horizontal roots of black pine in sea coast. We also examined the influence of wave-

form shape and clearness of waveform contrast on extraction accuracy. Our results showed that more than 70% of the waveform that had strong contrast and/or parabolic waveform, successfully extracted roots. This suggests the information of waveform is effective for extract roots from radargram.

Key words: horizontal root, bird-eye view, uprooting, tide prevention, wind prevention

1. はじめに

クロマツ (*Pinus thunbergii* Parl.) はマツ目マツ科に分類される二葉松類である。一般にクロマツの小・中径根は表層部に集中し、根株の下に長大な垂下根を持つ。そこから真下に伸びる垂直根で樹木を支えるような根系構造を持つ¹⁰⁾。日本では砂浜の保護や飛砂防止、風致目的で海岸砂防林が随所に作られているが、クロマツは潮風に強く、乾燥しがちで貧栄養である海岸でも良好に生育することから、ニセアカシア (*Robinia pseudoacacia* L.), ネムノキ (*Albizia julibrissin* Durazz.) などと共に、日本で海岸林として利用されてきた。しかし近年、管理不足やマツ材線虫病によるマツ枯れ被害が多発し、海岸クロマツ林は減少しつつある。このため、飛砂防止、飛塩防止、防風、防潮といった海岸林の機能を維持するために、海岸クロマツ林の保存が叫ばれている^{3,5)}。また、2011年の東日本大震災では津波により、地中深くまで垂直根の成長していない海岸クロマツが根返りを起こして流木化し、各地に被害をもたらした。根返りを起こしたマツの根系調査によって、海岸などの砂地ではクロマツの垂直根は2 m程成長するものの、根返りしたクロマツでは高い地下水位によって深さが制限され、根が土壌を保持する力も弱かったことが報告されている¹³⁾。このことから、海岸クロマツ林の災害に対する強度を知るためには根の構造を把握することが重要である。しかしながら一般に樹木は個体サイズが草本と比べてはるかに大きいので、根を掘り出して構造を調査することは容易ではない。クロマツにおいてもまた、直接、地下部を掘り出して、根系構造と個体の持つ機能との関係を明らかにするには、多くの労力と時間が必要であった。

このような状況の中、近年、掘り取りをせずに根を非破壊的に検出する方法として地中レーダ法が注目を集めている^{14,7,15)}。地中レーダは、送信アンテナから電磁波を照射し、土壌と異なる物質との境界部からの反射波を受信アンテナで捉え、表層からの深さ、位置、大きさを求めるもので、これまで、主に地下の空洞や地盤の緩み、埋設管の存在を推定する目的で使用されてきた。樹木根の調査に用いる場合は、根系の有無やバイオマスを求めるために用いられるほか、個体の根の広がりをレーダで再現した例が報告されている¹⁶⁾。しかしながら、これらの研究は、レーダで検出しやすい特殊な場所や低木を対象にしたものが多く、クロマツなどの海岸林の高木に関する情報は未だ蓄積されていない。だが、野外の海岸クロマツにおいてレーダによる根の検出が可能であることは、先行研究ですでに確認されている⁸⁾。そのため、クロマツを対象にその個体の根の深さや分布を調べることができると期待される。

根系調査におけるレーダ法は、1.土を掘り返す必要がない、2.樹木を生かしたまま調査することができるので長期的

な観察が可能である、3.短時間で労力が少なく調査を行うことができる、など多くの長所が挙げられる。一方、1.レーダアンテナを走行させることができるスペースが必要である、2.対象木以外の根も検出してしまう、3.実験例があまりなくデータが少ないためレーダによる根の検出調査方法が確立していない、など問題点も多い。レーダで非破壊に樹木根を抽出する場合、レーダの測線は平行な直線²⁾やメッシュ状⁹⁾、同心円状¹⁶⁾などが用いられてきた。これらのなかで孤立している単木を測定する場合には、同心円状の測線が根と直交するため検出できる可能性も高いとされている^{1,6)}。また、根の分布を再現する場合、レーダ測線から抽出した根の候補点を何らかのルールに基づいてつないでいく必要がある。そこで先行研究では、根の構造をモデル化するためのアルゴリズムが用いられてきた¹⁶⁾。ただし、津波や防風に対する根系の機能を評価する場合は、このような詳細な根系の分布よりも、垂下根や水平根などの主根に焦点を絞り、その広がりを評価することが重要になる。東日本大震災で流木化したクロマツの根系を調べた研究では、流木化したクロマツとしなかったクロマツとでは、主根の形状が違っていたことを指摘している¹²⁾。また、レーダによる根系抽出の成否は、主に抽出点下の根の掘り取りによる評価^{7,14)}が一般的であるが、このような主根の広がりを評価する場合、鳥瞰図などの全体像を用いた簡易な形状評価が有効であろう。

そこで本研究では、海岸クロマツの根の構造について、同心円状にレーダ測線を配置し、(1)レーダ波形からの樹木根の抽出、(2)根のつながりを意識した水平根系の抽出、(3)鳥瞰図との比較による抽出精度の評価、の3つを目的として実験を行った。なおCox et al.(2005)は、根系反射波の抽出精度について、抽出できた根の波形は円弧とコントラストの程度に関係があると報告した。そこでこの基準によりレーダ波形を4クラスに分類し、根系を精度よく抽出できる波形について検討を行った⁴⁾。

2. 材料と方法

2.1 試験地

実験は、2013年11月に愛知県田原市小中山町一膳松にある愛知県栽培漁業センター(東経137.059, 北緯34.644)に生育する海岸林のクロマツ1本を対象に行った。気象庁の報告では、この地域の過去20年間の年平均気温と年間降水量はそれぞれ16.0℃, 1602.6 mmであり¹¹⁾、土壌は円礫混じりの砂質土である。同センター内の近隣するクロマツ林では、地下水位は1.5 m付近に存在し、変動は少ない¹¹⁾。対象としたクロマツは樹高8.1 m、胸高直径18.6 cm、根元直径25.2 cmであった。対象木周辺の下草および落葉落枝は、作業の効率化と、ノイズを減らしレーダ探査の精度を高めるために除去した。

図-1 同心円状の測線同士のつながりを考慮したレーダ画像からの根の抽出(A)と、コントラストと波形の形状を用いたレーダ波形の分類(B)

レーダ波形は、a (コントラスト強、円弧良)、b (コントラスト弱、円弧良)、c (コントラスト強、円弧悪)、d (コントラスト弱、円弧悪) の4クラスに分類した (Cox et al. 2005)。画像内の矢印は根の抽出点を示す。半径距離 0.75 m の拡大画像に書かれた矢印上部にあるアルファベットは、大文字が根のつながり (図-4 を参照) を、小文字が波形の分類結果を示す。

Figure 1 Root extraction from the radar image, which take root connection between concentric transects into account (A) and classification of root image by contrast and waveform (B).

The waveform was classified into 4 groups; a (strong contrast and parabolic), b (poor contrast and good parabolic), c (strong contrast and non-parabolic), d (poor contrast and non-parabolic) (Cox et al. 2005). Arrows in the images indicate the waveforms extracted as roots. Upper and lower-case letters in the enlarged image of radius 0.75 m show connection of each root (see Figure 4) and classification of waveforms, respectively.

2.2 レーダ探査

対象とするクロマツを中心に、25 cm 間隔で6本、直径3 m まで同心円状に測線を引いた。その後、各測線に沿って地中レーダ (SIR SYSTEM 3000; Geophysical Survey Systems, Inc., North Salem, U.S.) によるレーダ探査を行った。本実験では900 MHz のアンテナを使用した。得られたレーダ画像には、前処理としてRADAN for Windows NT (Geophysical Survey Systems Inc.) を用いて地表面からの反射を取り除く前処理 (背景除去処理) を行った。その後、レーダ画像から根を表すと思われる波形を選択して、波形の位置情報を抽出した。今回は以下の二つの条件を用いて波形を選択した。

1. 円弧波形が見られる
2. 反射波形画像に縞状のコントラストが見られる

さらにクロマツの主要な水平根は、対象木の幹から同心円状に広がっていると仮定し、以下の四つの条件を足して、水平根の広がりについて検出を試みた (図-1 A)。

3. 対象木の根元 (幹の中心) から一番内側の測線上の抽出点がつながる。
 4. 根元から外側に向かって辿っていくと、二つ以上の隣り合うレーダ測線において、コントラストや円弧の形の似た波形が、同じぐらいの角度の位置に見られる。
 5. 1つ前の測線と同じ位置から2つの波形が見られる場合は枝分かれしたとする。
 6. 抽出点と一つ前の抽出点と結んだ線が、抽出点において、測線の鉛直線と45°以下の角度で交わる。
- つぎにレーダ波形を下記の4クラスに分類し、根系を精度よく抽出できるレーダ画像について検討を行った (図-1 B) ⁴⁾。
- a. 反射波形画像のコントラストが強く、形がきれいな円弧な円状になっている
 - b. 反射波形画像のコントラストは弱い、形はきれいな弧状になっている
 - c. 反射波形画像のコントラストは強い、形は歪みや縞模様を生じている
 - d. コントラストが弱く、形も歪みや縞模様を生じている

2.3 根系の掘り出しと鳥瞰図の作成

レーダでの計測後、土を取り除き対象木の根を露出させた。本研究では先行研究で示されたレーダ検出率と比較するために、地表面から深さ30 cmまでの水平根を対象とした。深さ30 cm以下にもクロマツ根が存在していた可能性はあるものの本研究では対象から外した。対象木を中心に3 m×3 mのプロットを作り、その中の土壌を、エアスコップを用いて取り除いた。ここでは、コンプレッサーで圧縮空気を作り、地面に吹きつけて土を飛ばし、一方で、ジェクターで余計な土を吸引、排出することで、根系だけを残して土を取り除くことができた。

土を取り除いた後、上空から鳥瞰図作成のための写真撮影を行った。まず、水糸で3 m×3 mのプロット内に、25 cmメッシュのラインを作成した。プロットの真上から、写真を撮影するため、高さが2 m、アームの長さが70 cmのL字型ポールの先端にUSBカメラ (LifeCam Studio, Microsoft) を取り付け付けた。このカメラ付きポールを用いて、プロットの4隅と4辺の中央からそれぞれプロット中央に向けて、計8枚の上空写真を撮影した (図-2 A)。また、木の枝が伸びて写真が取れない部分については、高さ70 cmのスタンドにより、上空写真を撮影した。撮影後、これらの写真はパソコンに取り込み、メッシュラインや根の分布状態を使って方角と位置を補正し、高さ2 mからの1枚の全体写真に合成した。このとき、写真全体の明暗が均等になるように調整を加えた。さらに、合成した全体写真を用いて、セグメンテーションソフトウェア (ITK-SNAP, ver. 3.2) により根の部分をマニュアルで抽出して、根の水平方向の広がり示す鳥瞰図を作成した (図-2 B)。

2.4 データ処理

レーダ画像から抽出された根と掘り出した根の鳥瞰図を重ねて、抽出の成否を求めた。まず根の鳥瞰図に、対象木を中心に25 cm間隔でレーダ測線を描き、これらの測線上に

図-2 エアスコップで掘り出したクロマツ根系の上空写真(A)と根の部分の鳥瞰図(B)

中央上部の画像が欠損している部分は、枝が貼り出して画像が取得できなかった部分である。根株は図の中央に存在する。根の部分は目視で抽出した。

Figure 2 Picture of root excavation by air spade (A) and birds-eye view of the pine roots (B).

We could not take any images for the missing part of the picture. Stump located in the center of the picture. Root area was extracted manually.

レーダ画像から抽出した根をプロットした。本研究では、測線上の位置を決めるために、15°間隔で位置マーカーを入れながらレーダ測定を実施したが、マーカーの入力は手作業だったため、15°に達した時点とボタンを押す時点のタイムラグによって、±10 cm 程度の誤差が生じていたと予想される。そこで根の抽出点から半径 10 cm 以内に実際の根が存在した場合、その根をレーダで抽出できたものとした。そして、根を検出することが出来たレーダ波形の個数を正当数 (Nr)、根が存在しなかったレーダ波形の個数を失敗数 (Nf)、レーダ測線と交差しているにも関わらず、レーダで抽出できなかった根の数を見落とし数 (No) とした。これらの値を用いて、プロット内の根をどれほど検出することができているのかを検討する指標として該当率 (DR , Detection Rate, %) と正答率 (AR , Accuracy Rate, %) を以下のように算出した。ここで、該当率の分母は根と測線の交叉の総数、正答率の分母はレーダ画像から抽出した根の総数となる。

$$DR = 100 \times [Nr / (Nr + No)] \quad (1)$$

$$AR = 100 \times [Nr / (Nr + Nf)] \quad (2)$$

3. 結 果

3.1 同心円測線からの根の波形の抽出

同心円状の測線から得られたレーダ画像から、抽出条件 1 と 2 を元に、根とみなせる波形を全て抽出したところ、全部で 66 個の波形が根として抽出された (図-3)。測線上の抽出点は 8—13 個で、一番内側の測線が最も少なく、外側から 3 番目 (内側から 4 番目) の測線から最も多くの根が抽出された。抽出した根を鳥瞰図上にプロットしたところ、全部で 50 点の抽出点について半径 10 cm の範囲内に根が存在し、正答率は 76% となった。一方、レーダ測線と根の交差点は全部で 101 個あったことから、51 個の根はレーダで

図-3 根の鳥瞰図とレーダ画像からの根の抽出点

Figure 3 Birds-eye view of the pine roots and root extraction points of roots from the radar image.

検出されなかったこととなり、該当率は 50% となった。

抽出した水平根のレーダ波形をコントラストと形状から 4 つに分類したところ、66 個の抽出点のうち、a (コントラスト強, 円弧良) は 19 個, b (コントラスト弱, 円弧良) は 8 個, c (コントラスト強, 円弧悪) は 22 個, d (コントラスト弱, 円弧悪) は 17 個であった。これらの抽出点について実際に根が存在した波形は、a は 17 個, b は 7 個, c は 17 個, d は 9 個となり、正答率は a, b, c, d の順に、89%, 88%, 77%, 53% であった。

3.2 根のつながりを意識した根系の抽出

次にレーダ画像に抽出条件の 3 から 6 を加えて、樹木の根元からつながっていることを条件として得られた 40 点のみを用いて、主要な水平根を抽出した。その結果、対象としたクロマツ個体では、7 本の水平根が再現できた (図-4, A-G)。根の鳥瞰図と比較したところ、7 本中 2 本の抽出根 (図-4, D と G) について、抽出点下に連続した根が同様に存在した。これら 2 本の根については測線上の 6 点全てにおいて、根の抽出に成功していた。残りの 5 本の中で、水平根 B については測線上の 6 点のうち 5 点で、水平根 C と F については 4 点において、連続的な根が実際に存在し、部分的に抽出に成功していた、また、水平根 E についても、測線上 6 点のうち 3 点で連続した根がそこに存在していた。したがって、レーダ波形から抽出した水平根の 30% は、ほぼ完全に抽出に成功しており、40% は部分的に抽出に成功した。

抽出した水平根のレーダ波形をコントラストと形状から 4 つに分類した結果、40 個の抽出点のうち、a (コントラスト強, 円弧良) は 13 個, b (コントラスト弱, 円弧良) は 7 個, c (コントラスト強, 円弧悪) は 11 個, d (コントラスト弱, 円弧悪) は 9 個であった。これらの抽出点について実際につながりを持つ根が存在したのは、a は 11 個, b は 5

図-4 根の鳥瞰図とレーダ画像からつながりを考慮して抽出した水平根

Figure 4 Birds-eye view of the pine roots and horizontal roots extracted from the radar image by considering root connection among transects.

個, c は 7 個, d は 5 個となり, 正答率は a, b, c, d の順に, 85%, 71%, 64%, 56% となった。

4. 考 察

本研究の実施により, 海岸に生育するクロマツの根系を地中レーダによって探知できることが確認された。正答率は 76% と高く (図-3), レーダ反射波の円弧波形とコントラストの二つの条件から抽出した波形の大半で, 実際に根が存在していた。これは海岸に広く分布する砂質土が, 地中レーダによる根の抽出に適していたことによると予想される。Hirano et al.(2012) もまた, 兵庫県の南あわじ市にあるクロマツ海岸林で地中レーダによるクロマツ根系の抽出に成功しており⁸⁾, 地中レーダを用いた探査は, 海岸に生育するクロマツ根系の抽出に利用できることを示している。しかし, 掘り取りにより確認されたレーダ測線と交差したクロマツ根系 101 個の点の内, レーダで探知できた点は 50 本に過ぎなかった。本研究では根がなるべく測線と直交するようにレーダ測線を同心円状に配置したにもかかわらず, レーダで検出できる根は全体の約半分程度であり, 平行測線を用いた Hirano et al.(2012) 論文と同程度であった⁸⁾。先行研究からレーダで探知できる根は, 太さ, 深さ, 測線との交叉角によって変わると報告されている^{8, 15)}。本研究では, 測線と直交した根は, 直径が小さい, 深さが深い, 測線との交叉角が急である, と言った理由により, 検出できなかったと考えられる。

本研究では津波や防風機能に関連する根系として, 主要な水平根の抽出に焦点を絞った。そのため, レーダ反射の円弧波形とコントラストに加えて, 抽出点同士のつながりを考慮

した根系抽出を試みた。その結果, 7 本の水平根を抽出し, そのうちの 2 本は実際に水平根が抽出箇所が存在することが確認された。また, 残りの 5 本中 3 本も, 部分的に水平根が存在していた。鳥瞰図によると, このクロマツ個体の場合, 半径 1.5 m を超えて発達した水平根は少なく, つながりを考慮した抽出根は発達した水平根の大部分と, 根の密集箇所や短い水平根を抽出したことが見て取れる。したがってつながりを考慮して抽出する場合, 地中レーダは, 主要な水平根の潜在的な広がりを予測するツールとして利用可能だと言える。

また本研究では, 根の抽出精度を評価するために, エアスコップで根を掘り出し, 上空からの写真を用いて根系鳥瞰図を作成した。エアスコップによる土壌の除去は, マニュアルによる根の掘り出し作業よりもはるかに労力と時間が少なくて済むうえに, かく乱による根の切断も少ない。エアスコップは, 細根が密集する草地や大きな礫が発達する山地土壌では使用が困難であるが, 砂質性の海岸林では根を露出させるのに適した方法であると言える。地中レーダ法による水平根の抽出とエアスコップを用いた根の露出作業を併用することで, 少ない労力で精度よくクロマツの根系分布を観測, 評価できると期待される。

なお, 本研究では抽出したレーダ波形をコントラストと波形の形状から 4 種類に分類し, 得られた波形と抽出精度との関係を検討したところ, 円弧の形が美しい, あるいはコントラストが強いという 2 基準のうち 1 基準のみでも満たせば (すなわち a, b, c のうちどれかに該当すれば), 70% を超える高い正答率が得られた。同様の結果は Cox et al.(2005) によって報告されており⁴⁾, 波形の情報が根の検出に有効であると言える。一方, d (コントラスト弱, 円弧悪) の正答率が 53% 程度であったことから, この形状の波形の約半分は, ノイズである可能性がある。今後, 円弧が d になる環境条件や根の形状を解明する必要がある。

本研究では, 地中レーダを用いてクロマツ根系の主要な水平根の抽出を試みた。しかしこの結果を対象木がもつ防風, 防潮機能に関連付けるには, これらの機能と根系の広がりを数値化し同時に解析する必要がある。将来, 樹木の引き倒しや根の引き抜き試験などによって立木の力学的な特徴を数値化することが出来れば, 根系の分布と樹木の防災機能との関連について, より理解を深めることができ, 地中レーダを用いた根系抽出の意義も高まるであろう。

謝辞: 本研究を行うにあたり, 愛知県森林・林業技術センターの山下昇氏, 中島寛文氏, 愛知県栽培漁業センターの皆様には試験地使用の許可をいただきました。名古屋大学農学部森林利用学研究室及び京都大学地球環境システム学講座の学生には, 野外調査に多大なご協力をいただきました。及び兵庫県立大学生物システムグループの皆様には, 論文の取りまとめの際に有効な助言を頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。本研究は JSPS 科研費 25252027 の助成を受けて行われました。

引用文献

- 1) Butnor, J.R., Barton, C., Day, F.P., Johnsen, K. H., Mucciardi, A.N., Schroeder, R. and Stover, D.B. (2012) Using ground-penetrating radar to detect tree roots and estimate biomass, *Measuring roots, Measuring Roots*, (ed. Mancuso, S.) pp. 213–245, Springer, New York.
- 2) Butnor, J.R., Doolittle, J.A., Johnson, K.H., Samuelson, L., Stokes, T. and Kress, L. (2003) Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67: 1607–1615.
- 3) 近田文弘 (2001) 日本の海岸林の現状と機能, *海岸林学会誌* 1: 1–4.
- 4) Cox, K.D., Scherm, H. and Serman, N. (2005) Ground-penetrating radar to detect and quantify residual root fragments following peach orchard clearing, *Hort. Tech.* 15: 600–607.
- 5) 藤原道郎・岩崎寛 (2006) 名勝としての海岸マツ林を構成するクロマツ個体の分布, サイズ構造及び被陰状況, *景観生態学*, 10: 81–88.
- 6) Guo, L., Chen, J., Cui, X., Fan, B. and Lin, H. (2013) Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: a review, *Plant Soil*, 362: 1–23.
- 7) Hirano, Y., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Yamase, K., Makita, N. and Kanazawa, Y. (2009) Limiting factors in the detection of tree roots using ground penetrating radar. *Plant Soil*, 319: 15–24.
- 8) Hirano, Y., Yamamoto, R., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Yamase, K., Makita, N. and Kanazawa, Y. (2012) Detection frequency of *Pinus thunbergii* roots by ground-penetrating radar is related to root biomass, *Plant Soil*, 360: 363–373.
- 9) Hruska, J., Cermák, J. and Sustek, S. (1999) Mapping tree root systems with ground-penetrating radar, *Tree physiol.*, 19: 125–130.
- 10) 荻住昇 (2010) 最新樹木根系図説 各論, 誠文堂新光社, 1101 pp.
- 11) 北原曜 (2012) クロマツ引き倒し試験の結果, 森林保全・管理技術研究会, 津波と海岸林に関する調査研究事業, 平成 22 年度調査報告書, pp. 121–127.
- 12) 長嶋康雄・攝待尚子 (2014) 東北地方太平洋沖地震による津波で流木化した防潮林における植栽マツ根系について, 仙台市科学館研究報告, 23: 75–81.
- 13) 林野庁 (2012) 平成 23 年度森林・林業白書, 林野庁, pp. 188.
- 14) Stover, D.B. Day, F.P., Butnor, J.R., Bert G. and Drake, B. G. (2007) Effect of elevated CO₂ on coarse-root biomass in florida scrub detected by ground-penetrating radar, *Ecol-ogy*, 88: 1328–1334.
- 15) Tanikawa, T., Hirano, Y., Dannoura, M., Yamase, K., Aono, K., Ishii, M., Igarashi, T., Ikeno, H. and Kanazawa, Y. (2013) Root orientation can affect detection accuracy of ground-penetrating radar, *Plant Soil*, 373: 317–327.
- 16) Wu, Y., Guo, L., Cui, X., Chen, J., Cao, X. and Lin, H. (2014) Ground-penetrating radar-based automatic reconstruction of three-dimensional coarse root system architecture, *Plant Soil*, 383: 155–172.

(2016. 1. 14 受理)