

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25252027

研究課題名(和文) 減災の観点から樹木根系の広がりを非破壊的に評価する方法の確立

研究課題名(英文) Non-destructive estimation of tree root system to mitigate natural disaster

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) 31,500,000円

研究成果の概要(和文)：樹木根系の高い減災効果を期待するために、根の広がりや強度を評価する必要がある。本研究の目的は、地中レーダを用いて土を掘らずに根の広がりを推定し、それらを用いて根の強度を非破壊的に推定する方法を提案することである。

地表面リターの厚さやレーダ探査角度は根の検出の制限要因となった。海岸林クロマツの根の広がり、特に水平根系は地中レーダにより精度高く推定できた。地下水位の高いクロマツでは浅い根系が確認された。根系の引き倒し抵抗力は根鉢深さと関係があった。地中レーダを用いた根直径の推定から根の強度を推定する手法が示唆された。

研究成果の概要(英文)：Evaluation of development and resistance of tree root system is needed to enhance the effect of mitigation disaster in forest ecosystems. This study aimed to estimate development of root system using ground penetrating radar (GPR) and further to propose the method for estimating root system resistance nondestructively.

Thickness of leaf litter and angle between root growth and radar scanning are limiting factors for tree root detection using GPR. Development of horizontal root systems in coastal *Pinus thunbergii* could be estimated using GPR. Plate root systems were found in soils with shallower water table. Critical turning moments were significantly correlated with the depth of root-soil plate. The results in this study can propose a nondestructive method to estimate of root system resistance using estimated root diameter by GPR.

研究分野：農学

キーワード：林学 土壌 森林工学 減災 樹木根 地中レーダ 津波 根系強度

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災の津波により被災した海岸林では、根が深くまで伸びていないクロマツで根返り・流木化したものが多く、根系の未発達原因として地下水位の高さが指摘された。根系が浅く表層に集中すると、樹木は根返りを引き起こすだけでなく、根系の持つ表層浸食や表層崩壊防止機能を低下させる可能性がある。したがって、樹木根系の減災効果を発揮させるためには、まず「根の広がり」と強度」を評価する必要がある。しかし、これらの評価には破壊的掘り取り方法が用いられており、その評価は容易ではない。

近年、土を掘らずに樹木根系を検出する方法として、地中探査レーダを用いる非破壊的な手法が提案されてきた。研究代表者らは先行科研費課題(18380095, 22380090)において、地中レーダを用いた海岸林クロマツの根系検出や根の検出を制限する要因および検出精度について明らかにし、根のバイオマス推定も試みた。しかし、地中レーダを用いた「根の広がり」と強度」の評価には、根の直径や根のつながり、根系構造の推定が必要なため現状では至っていない。

2. 研究の目的

樹木根系の発達状況を非破壊的に評価する方法を確立するために、本研究では、「根系の広がり」と強度」について、以下の2点の解明を目指す。

(1) 根を検出した土壌垂直断面におけるレーダ波形から根の広がりを推定すること

(2) 地中レーダでは直接評価困難な根の強度についてレーダ反射波形を用いた間接的推定方法を提案すること

具体的に(1)の目的達成のため、個体レベルで地中レーダ探査を行い、根系構造の推定を試みるとともに、根系の掘り取りも行うことで検出精度の検証を行う。また地中レーダの反射波パラメータを用いて根直径を推定する際の制限要因についても検討を行う。

(2)の目的達成のため、個根の強度を引き抜き試験により、個体根系強度を引き抜き試験により評価し、レーダで推定できる根直径との関係性を評価する。

3. 研究の方法

(1) 調査地

クロマツ根系のレーダ探査、掘り取り、引き抜き試験、個根の引き抜き試験の調査地として、愛知県田原市の海岸クロマツ林を対象とした。調査地には汀線からの距離が異なる海側と陸側の二つのプロットを設けた。海側プロットは汀線から200 m程度、陸側プロットは汀線から700 m程度の距離であり、海側プロットの地下水位は90 cm程度と浅いが陸側プロットは240 cmの掘削でも確認できずそれよりも深い。クロマツの樹齢は伊勢湾台風以降に再植栽されたものが多く、30-60年生である。上層に生育するクロマツの立木密度

は海側で200-400本 ha^{-1} 、陸側では400-1000本 ha^{-1} と陸側で高い。

(2) 地中レーダ探査

クロマツ個体の根系を非破壊的に推定するために、海側プロット15個体、陸側プロット17個体について地中レーダ探査を行った。探査測線は各個体を中心に25 cm間隔の同心円状に6本設置した。探査は900 MHzの地中レーダを用いて行った。

レーダ波形について、根の反射と判断される半円弧上の反射波の位置を抽出した。これらの反射波の振幅と波長から根直径を推定し、根の分布を推定した。

(3) クロマツ個体の引き倒し試験

クロマツ個体の引き倒し抵抗力を測定するために、海側プロット17個体、陸側プロット24個体について、引き倒し試験を行った。樹高1 mにワイヤーをかけ重機で地表面に対し平行に荷重を書けた。荷重データはロードセルで測定し、荷重がピークに達した時点で終了した。引き倒し抵抗力は引き倒しモーメントとして、幹への平行荷重モーメントと個体の自重モーメントの和として算出した。

(4) クロマツ根系の掘り取り

クロマツの根系構造を明らかにするために、海側プロット3個体、陸側プロット3個体についてエアースコップを用いて根系の掘り取りを行った。根直径1 cm以上の根を対象とした。また根直径3 cmまでの水平根の最大長さおよび根直径2 cmまでの最大深さを測定した。

(5) クロマツの個根の引き抜き試験

クロマツの個根の引き抜き抵抗力を明らかにするために、海側プロットおよび陸側プロット内およびその周辺で、土壌断面からの根の引き抜き試験を行った。引き抜いた根系形態指標と引き抜き抵抗力の関係性を検証した。

(6) 地中レーダから根直径推定の制限要因
地中レーダを用いた根直径推定の精度を向上させるため、その制限要因となる根の成長方向に対するレーダ探査の方向、地表面におけるリターの状態の影響を評価した。

マサ土で作成した実験区に根に模したスギ材を埋め、材の方向とレーダ探査方向との角度15度刻みにレーダ探査を行った。またスギの根を埋設したマサ土地表面に異なる厚さのスギリターを被せ、その上からレーダ探査を行った。いずれも900 MHzの地中レーダを用いた。

レーダ反射波への影響を明らかにするために、スギ材やスギ根の埋設位置における反射波の振幅及び波長解析をおこなった。

4. 研究成果

(1) 地中レーダを用いた根の広がり の推定

①根系検出の制限要因

制限要因としてレーダの探査方向と根の成長方向との角度を検証した結果、それらの角度が 90 度で直交する時に最も明瞭な半円弧状反射波形が検出され、90 度以上 135 度までまた 90 度以下 45 度まででは半円弧の高さが低くなり比較的扁平になることが明らかとなった (図 1)。

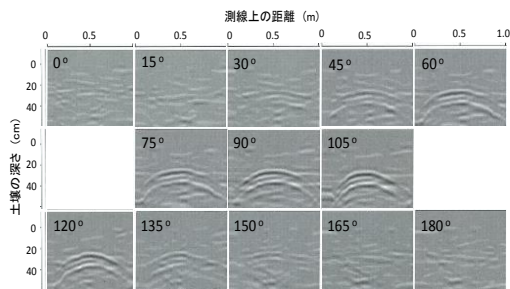


図 1. 地中レーダ探査方向とスギ材 (根) の方向との角度が検出に与える影響

これらの角度は反射波の振幅面積 (振幅×半波長 dB×s) に大きな影響を与える一方、振幅時間 (半波長 dB) には影響を与えない、すなわち振幅時間は根直径推定パラメータとして適していることを明らかにした。

他の制限要因として、地表面におけるリターの厚さを検証したところ、リターの厚さが増加するにつれて、半円弧状反射波形が見えにくくなるすなわち振幅が低下することが明らかとなった。一方で振幅時間はリターの厚さによらず一定であり、根直径を推定する反射波パラメータとしての振幅時間の有効性が支持された。

②海岸林クロマツの根の広がり推定

海岸林クロマツで幹を中心に同心円状にレーダ探査を行ったところ、すべての個体で半円弧上反射波が検出された (図 2a)。半円弧状反射波の位置を抽出し根系推定を試みた。また根系の一部掘り取りによりその推定位置における根の有無を確認し精度推定を検証したところ、対象としたクロマツ個体では 9 割程度の正答率を得た (図 2b)。

抽出された根の位置と推定された根直径の点情報について点と点をつなぐプログラムを作成し、根系推定を行った。推定された根系を掘り取りされた全体根系と比較してみると、主要な水平根系のうち 8 割程度がレーダによる検出と反射抽出およびプログラムからの根系推定で可能となることが明らかとなった。

汀線からの異なる距離すなわち異なる高さの地下水位を持つ土壤に生育するクロマツで掘り取った個体根系構造の比較を行ったところ、汀線に近い海側プロットでは垂直根の未発達な平均最大深さ 56 cm の浅い根系

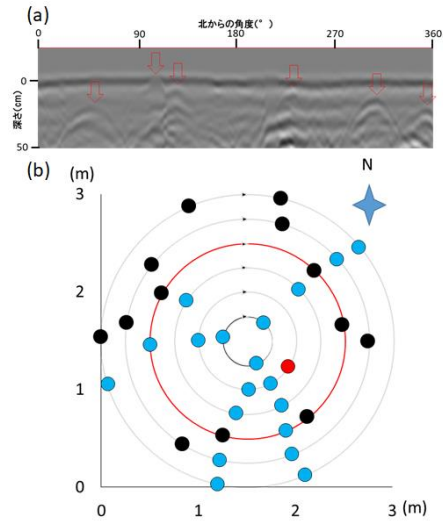


図 2. (a) 海岸クロマツ林のレーダ反射波形と (b) クロマツ水平根系の推定 (●: 掘り取りで根が有り, ●: 掘り取りで根が無し, ●: 掘り取りせず)

が、汀線から遠い陸側プロットでは対照的に垂直根の発達した平均最大深さ 212 cm の根系が観察された。これらの結果から地下水位の違いがクロマツ根系の深さに大きく影響していることを明らかにした。

(2) 根系強度の評価

①個根の引き抜き抵抗力と根系形態

個体根系を構成する根直径 3 cm 程度以下の個根系について、土壤断面からの引き抜き抵抗力を測定し、根元直径や分岐数、分岐角度、根長など根系形態との関係性を検証した。その結果、根元直径 (D mm) は、分岐角度や根の長さ、表面積、体積に相関が認められるものの、引き抜き抵抗力 (T N) と最も関係性が強いことから、引き抜き抵抗力を推定する指標となることを明らかにした。またクロマツの場合、根元直径 (D mm) と根の引き抜き抵抗力 (T N) との関係性は、海側と陸側の調査地だけでなく、兵庫県の一調査地でも以下の関係式で表せることも明らかにした。

$$T = 19.4 \times D^{1.5} \quad (R^2 = 0.716)$$

②個体根系の引き倒し抵抗力

クロマツ個体の引き倒し抵抗力を、地下水位の高い海側プロットと地下水位の低い陸側プロットで検証した。その結果、同じ胸高直径のクロマツでは海側の方が引き倒し抵抗力が有意に低いこと、一方で同じ材積のクロマツでは海側と陸側で差のないことを明らかにした (図 3a, b)。また両プロットの引き倒し抵抗力には根鉢半径との間にも有意な正の相関が認められた。一方で根鉢の深さは陸側プロットのみ引き倒し抵抗力と有意な関係性が認められた。

浅い地下水位に生育する海側クロマツでは垂直根よりも水平根を発達させることで

引き倒し抵抗力を高めてその環境に適応してきたことが示唆された。しかし津波に対する抵抗力は、津波高により荷重が異なるため、樹高の低い海側クロマツでは津波に対する根返りの脆弱性が高いことが示唆される。

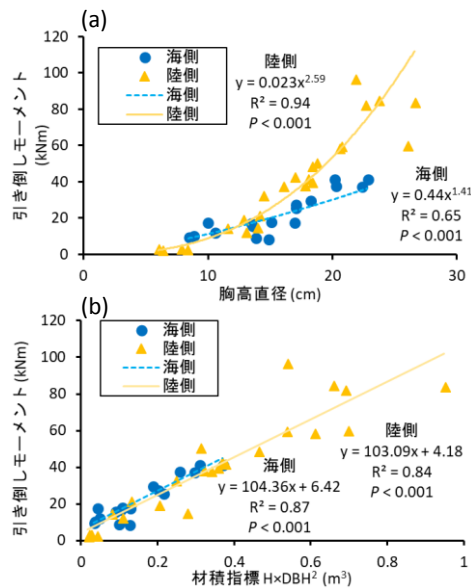


図 3. 地下水位の異なる海側と陸側プロットにおけるクロマツ根系の引き倒しモーメントと (a)胸高高さおよび(b)材積との関係

(3) まとめと今後の展望

以上から、本研究で地中レーダ探査により根系検出のみでなく個体根系構造推定の可能性が高まったこと、根系指標と根の強度である引き抜き・引き倒し抵抗力との関係性が明らかになったことから、根系構造を非破壊的に推定し、根の強度推定の実現性が高まったことが示唆される。今後、レーダ波形の自動抽出や根直径推定の精度向上、根の強度推定方法の具体的な確立と検証が望まれる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ①Todo C, Tokoro C, Yamase K, Tanikawa T, Ohashi M, Ikeno H, Dannoura M, Miyatani K, Doi R, Hirano Y. (2018) Stability of *Pinus thunbergii* between two contrasting stands at differing distances from the coastline. Forest Ecology and Management. 査読有. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.05.040
- ②Hirano Y, Todo C, Yamase K, Tanikawa T, Dannoura M, Ohashi M, Doi R, Wada R, Ikeno H. (2018) Quantification of the contrasting root systems of *Pinus thunbergii* in soils with different groundwater levels in a coastal forest in Japan. Plant and Soil 426: 327-337. 査読有. DOI: 10.1007/s11104-018-3630-9

- ③山瀬敬太郎・藤堂千景・矢倉質喜・平野恭弘 (2017) 斜面地におけるコナラ (*Quercus serrata* Murray) の根系分布と引き抜き抵抗力. 日本緑化工学会誌. 43: 133-137. 査読有. DOI: org/10.7211/jjsrt.43.133
- ④Tanikawa T, Ikeno T, Dannoura M, Yamase K, Aono K, Hirano Y. (2016) Leaf litter thickness, but not plant species, can affect root detection by ground penetrating radar. Plant and Soil 408: 271-283. 査読有. DOI: org/10.1007/s11104-016-2931-0
- ⑤大橋瑞江・柿添哲也・池野英利・山瀬敬太郎・谷川東子・檀浦正子・青野健治・藤堂千景・平野恭弘 (2016) 同心円状レーダ探査による海岸に生育するクロマツ個体の水平根の広がり検出. 日本緑化工学会誌. 41: 15-20. 査読有. DOI: org/10.7211/jjsrt.41.385
- ⑥藤堂千景・山瀬敬太郎・谷川東子・大橋瑞江・池野英利・平野恭弘 (2015) 間伐がスギの最大引き倒し抵抗モーメントにもたらす影響. 日本緑化工学会誌. 41: 308-314. 査読有. DOI: org/10.7211/jjsrt.41.308
- ⑦山瀬敬太郎・藤堂千景・平野恭弘 (2015) 低木樹種 2 種の根系による崩壊防止力の検討. 日本緑化工学会誌. 41: 15-20. 査読有. DOI: org/10.7211/jjsrt.41.15
- ⑧山瀬敬太郎・谷川東子・池野英利・藤堂千景・大橋瑞江・檀浦正子・平野恭弘 (2015) 異なる土壌環境下における根系構造と引き抜き抵抗力との関係. 日本緑化工学会誌. 41: 301-307. 査読有. DOI: org/10.7211/jjsrt.41.301
- ⑨平野恭弘・山瀬敬太郎・谷川東子・檀浦正子・大橋瑞江・藤堂千景・池野英利 (2015) 減災の観点から樹木根系を非破壊的に推定する地中レーダ法の現状と課題. 日本緑化工学会誌. 41: 319-325. 査読有. DOI: org/10.7211/jjsrt.41.319
- ⑩Guo L, Wu Y, Chen J, Hirano Y, Tanikawa T, Li W, Cui X. (2015) Calibrating the impact of root orientation on root quantification using ground-penetrating radar. Plant and Soil 395: 289-305. 査読有. DOI: 10.1007/s11104-015-2563-9
- ⑪Tanikawa T, Dannoura M, Yamase K, Ikeno H, Hirano Y. (2014) Reply to Comment on root orientation can affect detection

accuracy of ground-penetrating radar. Plant and Soil 380: 445-450. 査読有. DOI: 10.1007/s11104-014-2136-3

- ⑫ Tanikawa T, Hirano Y, Dannoura M, Yamase K, Aono K, Ishii M, Igarashi T, Ikeno H, Kanazawa Y. (2013) Root orientation can affect detection accuracy of ground-penetrating radar. Plant and Soil 373: 317-327. 査読有. DOI: 10.1007/s11104-013-1798-6

[学会発表] (計 25 件)

- ① 江川健太・富田隆弘・大橋瑞江・藤堂千景・山瀬敬太郎・谷川東子・檀浦正子・平野恭弘・池野英利 (2018) 鳥瞰写真から得られた水平根情報に基づく樹木根系の再構築. 第 129 回森林学会大会. 高知大学(高知).
- ② 谷河澤・池野英利・平野恭弘・藤堂千景・山瀬敬太郎・谷川東子・檀浦正子・大橋瑞江 (2018) 3D プリンタを用いた模型実験による樹木根の形状と引き倒し抵抗力との関係. 第 129 回森林学会大会. 高知大学(高知).
- ③ 藤堂千景・池野英利・山瀬敬太郎・谷川東子・大橋瑞江・檀浦正子・平野恭弘 (2018) スギ、ケヤキ、クロマツにおける根系構造と引き倒しモーメントとの関係. 第 129 回森林学会大会. 高知大学(高知).
- ④ 藤堂千景・山瀬敬太郎・谷川東子・大橋瑞江・池野英利・檀浦正子・平野恭弘 (2017) 樹木の根鉢と根系構造の関係. 第 128 回日本森林学会大会. 鹿児島大学(鹿児島).
- ⑤ 大橋瑞江・鬮橋心・池野英利・藤堂千景・山瀬敬太郎・谷川東子・檀浦正子・富田隆弘・平野恭弘 (2017) 地中レーダを用いたクロマツ根系の検出と再構築. 第 128 回日本森林学会大会. 鹿児島大学(鹿児島).
- ⑥ 山瀬敬太郎 (2017) 樹木の根系構造と引き抜き抵抗力. 第 128 回日本森林学会大会. 鹿児島大学(鹿児島).
- ⑦ Hirano Y, Tokoro C, Todo C, Yamase K, Tanikawa T, Ohashi M, Miyatani K, Doi R, Dannoura M, Ikeno H. (2017) Estimates of roots using ground penetrating radar and root anchorage in a coastal *Pinus thunbergii* forest. IUFRO 125th anniversary congress. Freiburg, Germany.
- ⑧ Hirano Y, Todo C, Yamase K, Tanikawa T, Dannoura M, Ohashi M, Doi R, Wada R, Ikeno H. (2017) Contrasting root systems of *Pinus thunbergii* in soils with

different groundwater levels in a coastal forest. Seventh International Symposium on Physiological Processes in Roots of Woody Plants. University of Tartu, Estonia.

- ⑨ Ohashi M, Ikeno H, Sekihara K, Tanikawa T, Dannoura M, Yamase K, Todo C, Tomita T, Hirano Y. (2017) Reconstruction of root systems of *Cryptomeria japonica* using coordinate points and root diameters. Seventh International Symposium on Physiological Processes in Roots of Woody Plants. University of Tartu, Estonia.
- ⑩ 平野恭弘・山瀬敬太郎・谷川東子・藤堂千景・檀浦正子・大橋瑞江・池野英利 (2017) スギ林における地中レーダ探査画像の再現性についての検討. 第 46 回根研究集会. 富山大学(富山).
- ⑪ 平野恭弘 (2017) 樹木根研究の最前線～特に減災上の観点から～. 兵庫県森林林業フォーラム. 神戸
- ⑫ 平野恭弘 (2017) 樹木の根系を掘らずに推定する. - 地中レーダを用いた非破壊的評価 -. 第 12 回道総研防災研究会. 札幌
- ⑬ 大橋瑞江・池野英利・柿添哲也・山瀬敬太郎・谷川東子・檀浦正子・藤堂千景・平野恭弘 (2016) レーダを用いた樹木根系の非かく乱調査-海岸クロマツ個体の水平根の広がり. 第 63 回日本生態学会. 仙台国際センター(仙台).
- ⑭ 藤堂千景・所千恵・谷川東子・山瀬敬太郎・池野英利・大橋瑞江・檀浦正子・平野恭弘 (2016) 海岸クロマツ林における地中レーダ法を用いた根系推測と引き倒し抵抗力. 第 127 回日本森林学会. 日本大学(藤沢).
- ⑮ 平野恭弘・所千恵・谷川東子・山瀬敬太郎・藤堂千景・大橋瑞江・檀浦正子・宮谷紘平・土居龍成・池野英利 (2016) 地中探査用レーダを用いたクロマツ水平根の予測位置と根系検出精度. 第 45 回根研究集会. 岡山大学(岡山).
- ⑯ 柿添哲也・池野英利・平野恭弘・谷川東子・檀浦正子・山瀬敬太郎・青野健治・藤堂千景・大橋瑞江 (2014) 愛知県のクロマツの海岸林における樹木根の形態の検出. 第 41 回根研究集会. 名古屋大学(名古屋).
- ⑰ Hirano Y, Dannoura M, Yamase K, Tanikawa T, Aono K, Ikeno H, Ohashi M, Kanazawa Y. (2014) Non-destructive detection of tree coarse roots using

ground-penetrating radar. Sixth International symposium on physiological processes in roots of woody plants. Nagoya University (Nagoya).

⑱ Tanikawa T, Dannoura M, Yamase K, Aono K, Ikeno H, Hirano Y. (2014) Interference of leaf litter layer with detection of tree roots by ground-penetrating radar. Sixth International symposium on physiological processes in roots of woody plants. Nagoya University (Nagoya).

⑲ Kakizoe T, Ikeno H, Hirano Y, Tanikawa T, Dannoura M, Yamase K, Aono K, Todo C, Ohashi M. (2014) Detection of coarse root structure of Japanese black pine (*Pinus thunbergii*) growing in a sea coast in Aichi. Sixth International symposium on physiological processes in roots of woody plants. Nagoya University (Nagoya).

⑳ Yamase K, Todo C, Ohashi M, Ikeno H, Tanikawa T, Dannoura M, Hirano Y. (2014) Pull-out resistance of coarse root segments is related to root architecture. Sixth International symposium on physiological processes in roots of woody plants. Nagoya University (Nagoya).

㉑ Todo C, Yamase Y, Hirano Y. (2014) Contribution of horizontal roots to tree root anchorage. Sixth International symposium on physiological processes in roots of woody plants. Nagoya University (Nagoya).

㉒ Ikeno H, Ohashi M, Kimura T, Todo C, Yamase K, Dannoura M, Tanikawa T, Hirano Y. (2014) Development of image processing scheme for morphological properties of woody root. Sixth International symposium on physiological processes in roots of woody plants. Nagoya University (Nagoya).

㉓ Hirano Y, Tanikawa T, Dannoura M, Yamase K, Aono K, Ikeno H. (2014) Root detection of various tree species using ground penetrating radar. What are we linking? The 1st annual meeting of Cost Action FP1305 Biolink. Univ of Reading, UK

㉔ Hirano Y, Dannoura M, Tanikawa T, Yamase K, Aono K, Ikeno H. (2013) Detection frequency can vary with orientation of roots in *Pinus thunbergii* forests using ground penetrating radar. Final conference COST Action FP0803, Belowground carbon turnover in European forests. Bordeaux, France.

㉕ 平野恭弘 (2013) 生態系サービスから見た樹木の根系. 2013 年生態工学会年次大会. 玉川大学(東京).

[その他]

ホームページ

① 地中レーダを使って根の広がりを知る
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/research/saizensen/2013/20130906-01.html>

② 樹木の根を掘らずに視るー地中レーダ探査の減災への応用ーを開催しました
<http://www.env.nagoya-u.ac.jp/news/pub/20161216.pdf>

公開講演会パンフレット

① 樹木の根を掘らずに視る 地中レーダ探査の減災への応用. 18 ページ.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平野 恭弘 (HIRANO Yasuhiro)
名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授
研究者番号：60353827

(2) 研究分担者

谷川 東子 (TANKIKAWA Toko)
国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・関西支所・主任研究員
研究者番号：10353765

大橋 瑞江 (OHASHI Mizue)
兵庫県立大学・環境人間学部・教授
研究者番号：30453153

池野 英利 (IKENO Hidetoshi)
兵庫県立大学・環境人間学部・教授
研究者番号：80176114

檀浦 正子 (DANNOURA Masako)
京都大学・地球環境学学・助教
研究者番号：90444570

山瀬 敬太郎 (YAMASE Keitaro)
兵庫県立農林水産技術総合センター・森林林業技術センター・研究主幹
研究者番号：90463413