

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：16101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22656104

研究課題名（和文） 風荷重を受ける樹木の根系周辺地盤の緩みの評価に基づく風倒木と斜面崩壊の関係

研究課題名（英文） Slope failure induced by windfall tree due to ground softening around root of tree subjected to wind load

研究代表者

渦岡 良介 (UZUOKA RYOSUKE)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：40333306

研究成果の概要（和文）：

台風時などによる風倒木が発生した箇所では斜面崩壊が発生する場合がある。本研究では樹木の振動を受ける根系周辺地盤の緩みを力学特性の変化と考え、模型実験および現場実験により、この力学特性の変化のメカニズムと影響因子との関係を明らかにすることを目的とする。実験の結果、細粒分の多い緩い地盤で風荷重による振動によって根系周辺地盤の緩みが生じやすいことがわかった。

研究成果の概要（英文）：

Slope failures sometimes occurred with windfall trees during typhoon. It is possible that the slope failures were due to ground softening around trees subjected to large wind load. This study clarified the mechanism of ground softening using model tests and in-situ tests. The experimental results showed that ground softening occurred in loose ground with fine contents around the tree root after cyclic loading.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	800,000	0	800,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,000,000	660,000	3,660,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤防災、斜面崩壊、風倒木

## 1. 研究開始当初の背景

2004年に各地で大きな被害をもたらした台風23号では、都市部での河川堤防の決壊などの被害に加えて、山地では多くの風倒木被害が発生した。倒木が発生した斜面では表層崩壊が発生しており、表層崩壊に対する風倒木の影響が指摘されている<sup>1)</sup>。このように風倒木が発生した地域において斜面崩壊が発生することは従来指摘されており、現地調査により風倒木が発生した根系周辺地盤の緩みが報告されている<sup>2)</sup>。しかしながら、強風時の

樹木の振動による根系周辺地盤の緩みについては、定性的な理解もなされていないことから、根系周辺地盤のせん断強度の低下や斜面崩壊との関係は明らかになっていない。

## 2. 研究の目的

風倒木と斜面崩壊の関係として次のようなことが考えられる。

① 強風時の樹木の振動により根系周辺地盤に緩みが生じ、降雨の浸透が促進されるなどして地盤のせん断強度が低下して斜面崩壊が

発生する。この場合、倒木より先に斜面崩壊が発生する可能性もある。

② 根系を含む樹木全体の強風時の転倒により、根系によるせん断抵抗が失われるとともに雨水などが根系跡から浸透し、地盤のせん断強度が低下して斜面崩壊が発生する。この場合、倒木の後に斜面崩壊が発生し、強風後も雨水の浸透に伴い斜面崩壊が継続的に発生する可能性がある。

このうち、②については降雨浸透時の斜面安定問題であり、これまでも地盤工学上の重要な課題として研究が進んでいる。また、倒木後の現象が対象となるため、比較的対策が施しやすい面もある。一方、①の強風時の樹木の振動による根系周辺地盤の緩みについては、倒木地帯のサウンディング試験より貫入抵抗の減少が確認されている<sup>2)</sup>ものの、そのメカニズムについては定性的な理解もなされていない。

本研究では①に着目し、樹木の振動を受ける根系周辺地盤の緩みを力学特性の変化と考え、模型実験および現場実験を実施して、この力学特性の変化のメカニズムと影響因子との関係を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 模型実験 (その1)

2004年の台風23号による兵庫県での風倒木被害の事例(例えば図1など)<sup>1), 2)</sup>をもとに、対象樹種とその樹齢、斜面の崩壊深さを決定し、文献4)を基にスギの大きさを決定した。また、根の曲げ剛性を根の曲げ試験によって推定した。樹木模型は、根と同様に曲げ試験を行い曲げ剛性を確認した。実験には徳島県三好市山城町の山林の土を用いた。この土は密度・粒度試験の結果、土粒子密度  $2.638 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ 、細粒分含有率は  $54.8\%$ であった。樹木が受ける風荷重を文献5)によって算出し、算出した風荷重による樹木根の先端の周りのモーメントを求めた。以上のように求めた実物モデルを、井合の相似則<sup>6)</sup>に従って模型化した。実物と模型の諸元を表1に示す。

図2のような境界値問題における樹木1本を想定する。実験ケース、実験手順を以下に示す。実験ケースはcase1: 飽和状態、case2: 締固め層数を増やした飽和状態、case3: 湿潤状態の3ケースを行い、再現性の確認のためにcase1は3回、case2, 3はそれぞれ2回ずつ実験を実施した。case1における地盤の乾燥密度の平均値は  $1.34\text{g/cm}^3$ であった。単調載荷時、載荷時には地盤の様子をビデオ撮影した。case1, 3での実験は載荷荷重  $250\text{g}$  (風速約  $27\text{m/s}$ に相当)、 $500\text{g}$  (風速約  $38\text{m/s}$ に相当)、case2のみ載荷荷重  $250\text{g}$ 、 $500\text{g}$ 、 $750\text{g}$  (風速約  $47\text{m/s}$ に相当)まで載荷した。実験装置を図3に示す。飽和状態のcase1では間隙水圧計、変位計を設置し計測を行い、締固



図1 2004年台風23号による風倒木と斜面崩壊<sup>1)</sup>

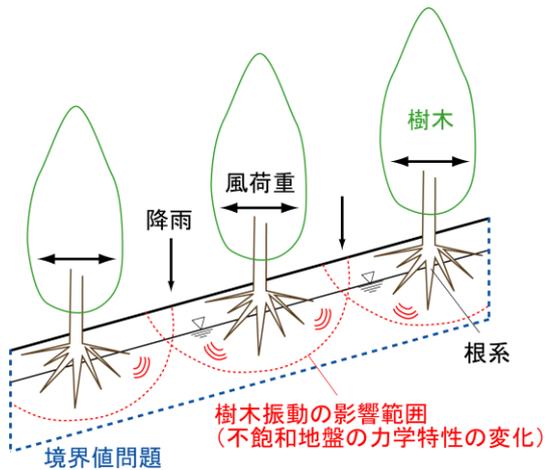


図2 強風と降雨浸透の影響を受ける根系周辺地盤の境界値問題

表1 実物と模型の諸元

項目	変位	実物	模型
載荷	周期 $T$ (s)	1.64	0.52
	変位 $y$ (m)	0.21	0.02
	モーメント $M$ ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )	$1.45 \times 10^4$	1.45
	風荷重 $W$ (N)	$1.30 \times 10^3$	1.30
樹木	幹の高さ $L$ (m)	11.13	1.11
	胸高直径 $d$ (m)	0.26	0.03
	幹の曲げ剛性 $E_t I_t$ ( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ )	$1.65 \times 10^6$	$1.65 \times 10$
	樹木の密度 $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	330	330
	根の長さ $R$ (m)	1.8	0.18
	根の直径 $d_r$ (m)	0.1	0.01
	根のヤング係数 $E_r$ ( $\text{N/m}^2$ )	$1.00 \times 10^{10}$	$1.00 \times 10^9$
	根の曲げ剛性 $E_r I_r$ ( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ )	$4.91 \times 10^4$	$4.91 \times 10$
地盤	深さ $z$ (m)	2	0.2
	密度 $\rho_d$ ( $\text{g/cm}^3$ )	1.14	1.14
	間隙率 $n$	0.57	0.57

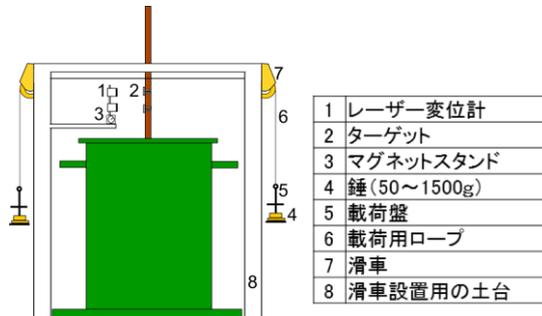


図3 模型実験の実験装置

め層数を増やした case2 と湿潤状態で行った case3 では、変位のみの計測を行った。すべてのケースで、各荷重段階で 200 回振動を加え、載荷前と各荷重段階の載荷終了後に小型コーン貫入試験を行った。貫入位置を図 4 に示す。図中の土槽縁についている番号は各貫入ポイントのライン名を示し、y 軸方向に載荷した。

(2) 模型実験 (その 2)

模型実験(その 1)の case1 を基本として、地盤の細粒分および表層土の層厚を変えた実験を行った。ここで用いた土の細粒分含有率は 36.9%、地盤の乾燥密度の平均値は 1.58g/cm<sup>3</sup> であり、模型実験 (その 1) と比較して、細粒分は少なく、乾燥密度は大きくなっている。実験ケースは case4 : 層厚 15cm、飽和状態、case5 : 層厚 10cm、飽和状態 (根入れ深い)、case6 : 層厚 10cm、飽和状態 (根入れ浅い) である。その他の実験条件は模型実験 (その 1) と同様である。

(3) 現場実験

現場実験は、徳島県立農林水産総合技術支援センター森林林業研究所の協力のもと、スギの木を使用させていただき振動実験を行った。実験では、腰高径 18cm、樹幹高さ 4.4m、幹のみの高さが 9.7m の全長 17.5m のスギの木を用いて実験を行った。樹木の振動が根系周辺地盤に与える影響をポータブルコーン貫入試験、簡易動的コーン貫入試験、表面波探査の結果を用いて評価する。

振動実験を実施した場所の近くで、30cm、70cm の深さの位置でサンプラーを使用し、不攪乱試料を採取し、粒度、密度試験を実施した。土質分類は SF あるいは SF-G である。

実験装置の全体図を図 5 に示す。ロープを巻き取り載荷する装置は、林内作業車の側面についている自動ウインチを使用した。ロードセルは、最大 2.5t まで測ることができるものを使用し載荷時の荷重を確認しデータシートに記入した。最大 100mm まで測定することができる変位計を 1m の間隔に 2 つ設置し、データロガーを使用し記録した。

実験中は、地表面の様子を確認するためにデジタルカメラで実験の様子を記録する。また、ロードセルの表示を目で確認し記録し、樹木の変位を 1m の間隔につけた 2 つの変位計で計測する。実験は、樹木を振動させる前に簡易動的コーン貫入試験、ポータブルコーン貫入試験を行った。載荷装置で、載荷、除荷を 100 回繰り返し、樹木が自由振動に近い振動となるようにした。その後、簡易動的コーン貫入試験、ポータブルコーン貫入試験を行った。貫入試験位置をそれぞれ図 6 に示す。矢印の方向が載荷方向である。貫入試験全体の計測ラインは 8 本あり、すべてのラインで

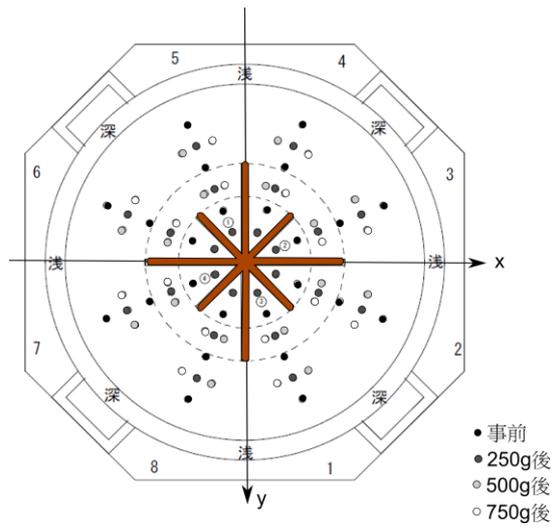


図 4 模型実験のコーン貫入位置

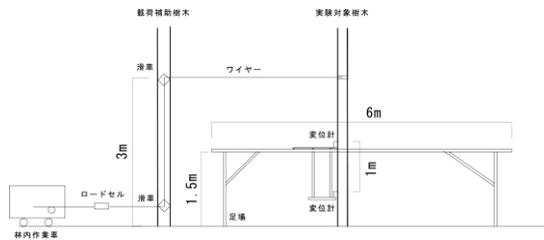
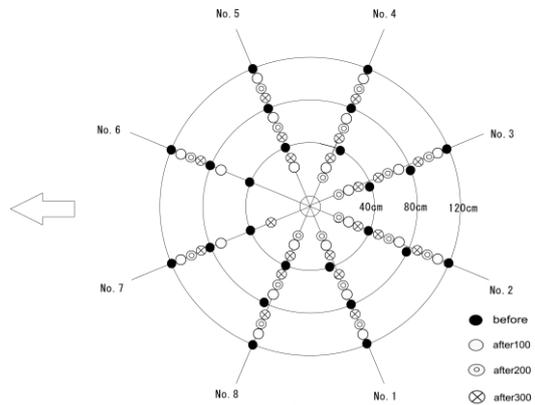
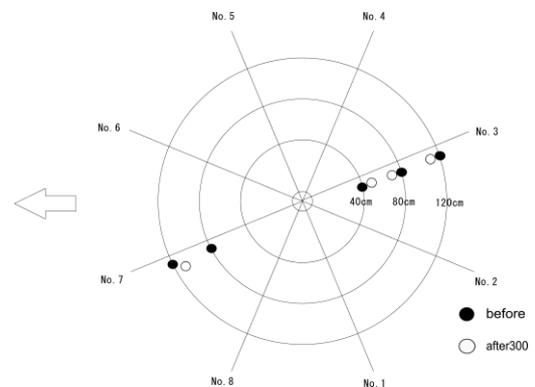


図 5 現場実験の実験装置



(a) ポータブルコーン貫入試験



(b) 簡易動的コーン貫入試験

図 6 現場実験のコーン貫入位置

ポータブルコーン貫入試験を実施した。また、  
 載荷を行った後は、載荷前の位置より木の中心  
 に向かってライン上の点の位置を 10cm 移動し  
 貫入試験を実施した。載荷時の荷重としては、  
 風速 20m を想定した風荷重をもとに実験で載荷  
 する 3m の位置にかかる荷重を算出した。

実験は地面が乾燥しているケース (case7)、  
 地面が雨で濡れているケース (case8)、貫入試験  
 を実施せず表面波探査を実施するケース  
 (case9) の 3 ケースを行った。ケース 2、ケ  
 ース 3 については、散水した後に実験を実施  
 した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 模型実験 (その 1)

case1 と case3 について、図 4 の y 軸から  
 反時計回り 0~45° の領域についての貫入試験  
 結果を図 7 および図 8 に示す。実線が載荷前  
 に行った貫入試験結果、点線が 250g 載荷後  
 の結果を表す。図 7 から、飽和状態では載荷  
 前後で貫入抵抗が減少していること、図 8 から、  
 湿潤状態では貫入抵抗の減少がみられないこと  
 がわかる。

##### (2) 模型実験 (その 2)

case4 について、図 4 の y 軸から反時計回  
 り 90° ~135° の領域における貫入試験結果  
 を図 9 に示す。実線が載荷前、点線が 250g  
 載荷後、一点鎖線が 500g 載荷後の結果を示す。  
 結果より、地盤が緩くなっている点もあれば、  
 締め固まっている点もあり、図 7 ほど明確な  
 載荷後の緩みはみられない。これは乾燥密度  
 が模型実験 (その 1) の実験時よりも大きか  
 ったことから、今回の実験では模型実験 (そ  
 の 1) より細粒分が減っていたため、締め固  
 めることにより細粒分が減る前の土よりも密  
 な地盤ができ、載荷してもあまり変化が現れ  
 なかったのではないかと考えられる。

##### (3) 現場実験

case8 について図 6(a) のライン No. 2 にお  
 けるポータブルコーン貫入試験結果を図 10 に  
 示す。載荷前に比べ載荷 1 回目、2 回目は貫  
 入抵抗値が減少している。載荷 3 回目は載荷  
 前に比べ減少しているが、載荷 1 回目、2  
 回目よりも深度の浅い位置では貫入抵抗値が  
 増加している。これらの結果より、載荷後の貫  
 入抵抗が載荷前に比べ減少しているため、当  
 該現場実験の条件で地盤強度が減少する可  
 能性がある。ただし、図 7 ほど明瞭な貫入抵抗  
 の変化はみられない。

case8 について図 6(b) のライン No. 3 にお  
 ける簡易動的コーン貫入試験結果を図 11 に  
 示す。深度が 10cm~90cm のところでは Nd  
 値が増加しているのに対して、深度が 90cm  
 より深いところでは Nd 値が減少している。当  
 該現場

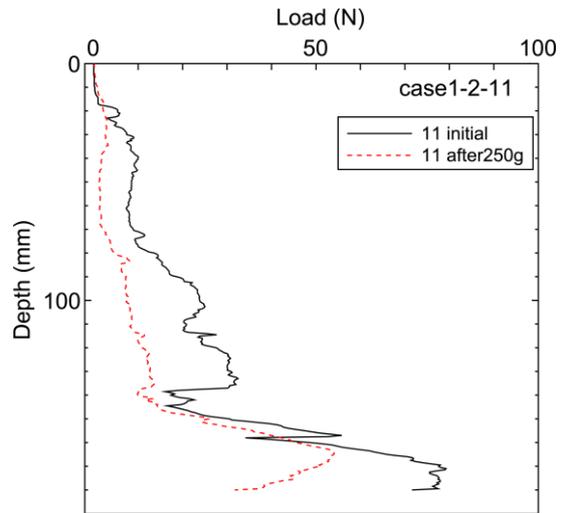


図 7 模型実験の貫入試験結果 (case1)

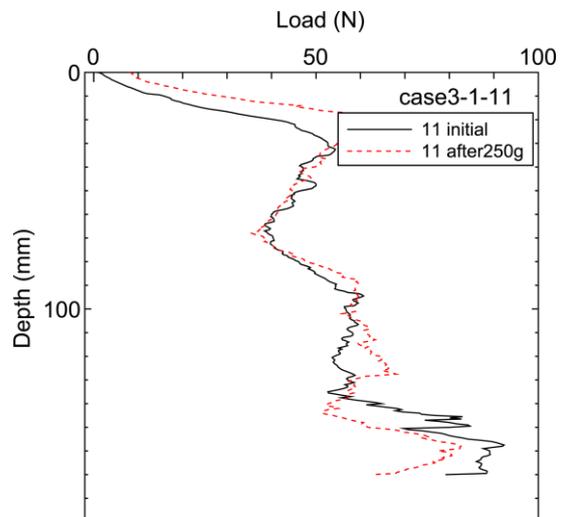


図 8 模型実験の貫入試験結果 (case3)

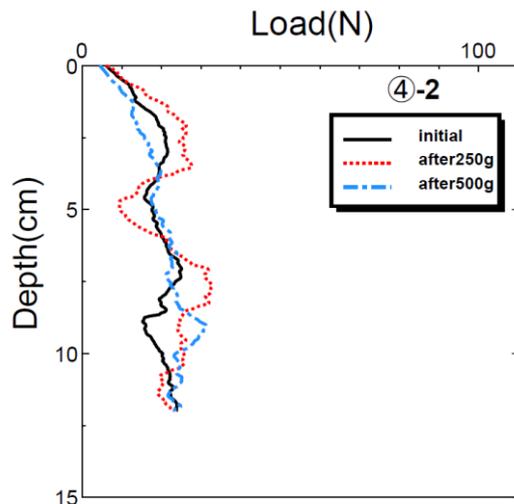


図 9 模型実験の貫入試験結果 (case4)

実験の条件では深度が浅い位置での地盤強度の減少を確認することができなかった。

(4) まとめ

模型実験および現場実験の結果、以下が明らかとなった。

- ① 模型実験の結果、実験で用いた徳島県三好市山城町の山林の土では、飽和状態では載荷前後で樹木根系周辺地盤のコーン貫入抵抗が減少し、緩みがみられたが、湿潤状態ではコーン貫入抵抗の変化はみられないことがわかった。また、細粒分が少なくなれば、地盤の層厚が薄くても、載荷によって樹木根系周辺地盤は緩みにくいという結果が得られた。
- ② 現場実験の結果、樹木の振動によって貫入抵抗値が変化した可能性があるものの、模型実験のような明瞭な変化はみられてなかった。模型実験の結果より、現場実験では散水による飽和度の上昇が十分ではなかったこと、細粒分が少ない土質であったことが考えられる。

今後の課題として、以下を検討する必要がある。

- ① 本研究ではある地域の山林の土を用い、密度や細粒分を影響因子として検討したが、幅広い土質について検討する必要がある。
- ② 樹木の根系、表層厚さなど幾何形状に関する影響因子についても検討する必要がある。
- ③ 実験で観測された根系周辺地盤の緩みの程度が斜面の安定性に与える影響を定量的に評価する必要がある。

参考文献

- 1) 地盤工学会・平成 16 年台風 23 号関西圏地盤災害緊急調査団, 平成 16 年台風 23 号による関西圏での地盤災害, 第 40 回地盤工学研究発表会, 2159-2160, 2005.
- 2) 稲垣秀輝, 植生の違いによる風倒木の発生と斜面崩壊, 応用地質, 40(4), 196-206, 1999.
- 3) 兵庫県治山林道協会: 平成 16 年台風による風倒木被害と再度災害防止対策, 2008.
- 4) 刈住昇: 最新樹木根系図説(各論), 誠文堂新光社, 123-132, 2010.
- 5) 刈住昇: 最新樹木根系図説(総論), 誠文堂新光社, 700-717, 2010.
- 6) Iai, S.: Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, Soils and Foundations, 29(1), 105-118, 1989.

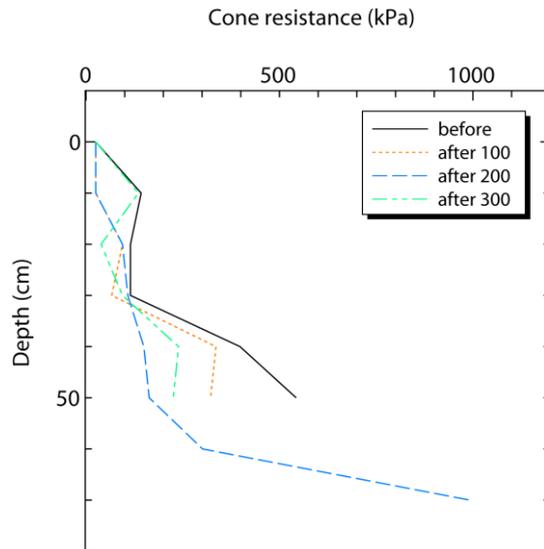


図 10 現場実験のポータブルコーン貫入試験結果 (case8)

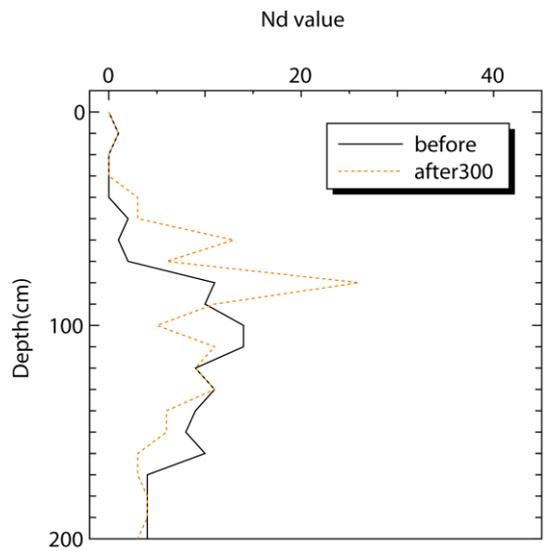


図 11 現場実験の簡易動的コーン貫入試験結果 (case8)

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)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 神田祥五、繰返し荷重前後の根系周辺地盤の緩みの実験的評価、平成 25 年度四国支部技術研究発表会、2013. 5. 11、愛媛大学 (愛媛県)
- ② 向井健次郎、樹木の水平振動による根系周辺地盤の緩みの実験的評価 (その 2)、第 47 回地盤工学研究発表会、2012. 7. 14、八戸工業大学 (青森県)

- ③ 小川真由、樹木の振動による根茎周辺地盤の緩みに関する基礎的実験、平成 23 年度地盤工学会四国支部技術研究発表会、2011. 11. 11、小豆島国際ホテル（香川県）
- ④ 渦岡良介、樹木の水平振動による根茎周辺地盤の緩みの実験的評価、第 46 回地盤工学研究発表会、2011. 7. 7、神戸国際会議場（兵庫県）

〔その他〕

徳島県立農林水産総合技術支援センター森林林業研究所にて研究報告、2012 年 3 月 21 日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渦岡 良介 (UZUOKA RYOSUKE)  
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス  
研究部・教授  
研究者番号：40333306

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

松浦 純生 (MATSUURA SUMIO)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号：10353856

### (4) 研究協力者

小川 真由 (OGAWA MAYU)  
徳島大学・大学院・博士前期課程

丸山 友也 (MARUYAMA TOMOYA)  
徳島大学・工学部・4 年生

神田 祥五 (KANDA SYOGO)  
徳島大学・大学院・博士前期課程