

樹木の倒伏抵抗に寄与する根系の構造に関する研究

藤堂（何森） 千景

樹木の倒伏抵抗に寄与する根系の構造に関する研究

(Study on the contribution of root system architecture to
overturning resistance of trees)

藤堂（何森） 千景
(TODO (IZUMORI), Chikage)

名古屋大学大学院環境学研究科

地球環境科学専攻学位論文

博士（理学）

2021

要旨

日本は地震やそれに伴う津波の発生しやすい地域である。また台風や前線の停滞などにより大雨や集中豪雨がもたらされ、近年、国内の1時間あたり50 mm以上の大雨の年間発生回数は増加傾向にある。このような自然災害は、森林で土砂災害や大面積の倒木災害を引き起こす。このような災害に対して被害を可能な限り減らす減災の観点からも樹木の倒木化のメカニズムを解明する必要がある。

樹木の倒木や根返りに対する抵抗力(倒伏抵抗力)は、立木の引き倒し試験で測定される引き倒しモーメントにより推定され、対象となる立木の材積、胸高幹直径(DBH)、重量など地上部特性と関係性の強いことが明らかにされている。一方で、立木密度以外に同じ地上部特性をもつ樹木においても引き倒しモーメントが異なるなど地上部特性だけでは説明できない例がある。これらの場合、土壌の種類や水分など土壌条件や樹木の根系など地下部の構造が、引き倒しモーメントに関与していることが示唆される。樹木の根は、風などの物理的ストレスに対して構造を適応させることで、根返りに対する抵抗力を高める。このような根系構造の特性は、例えば土壌断面あたりの根断面積合計や、垂直根、水平根、斜出根といった根の成長方向による分類、根の本数や成長方向の傾きなどを用いて表現されてきた。しかし、野外に生育する樹木の根系構造と倒伏抵抗力との関係性および根系の寄与するメカニズムには未解明な点が多く、樹種や生育地で異なる根系構造の違いにより、それぞれの倒伏抵抗への寄与過程が異なることが推察される。

本研究の目的は、樹木の倒伏抵抗に根系構造がどのように寄与しているのかを明らかにすることとした。特に (i) 樹木の地上部特性と比較して水平根や垂直根など地下部の根系構造の違いが、倒伏抵抗にどのように寄与しているのか? (ii) 異なる根系構造をもつ樹種の間倒伏抵抗の差がどのように表れるのかを明らかにすることを具体的な目的とした。

2章では、国内の主要人工林樹種であるスギを対象として、根系構造のうち水平根の広がりに着目し、間伐が引き倒しモーメントに与える影響を明らかにすることを目的とした。間伐後17年経過した間伐区と無間伐の対照区を設定し、スギの引き倒しモーメントと水平根の広がり指標である根鉢半径を測定した。スギの材積を示す指標である樹高(H)×DBH²と引き倒しモーメントとの関係には強い正の相関が認められた。同じH×DBH²を持つスギでは間伐区の引き倒しモーメントが対照区に比べて有意に大きくなった。さらに間伐区の根鉢半径も有意に大きくなった。両区は同じ立地環境であり垂直根を示す指標に差が認められなかったことから、同じH×DBH²における引き倒しモーメントの両区間の差異には根鉢半径すなわち水平根の広がり関与

していることが示唆された。

3章では、根系構造を構成する垂直根の深さと倒伏抵抗力の関係性を明らかにすることを目的とし、前半では垂直根の深さを示す簡易な指標の検討を行った。簡易な指標とは、樹木倒伏における回転中心の深さ (**Dcp**)である。垂直根の深さは根系の破壊的な掘り取りにより測定されるが、**Dcp** は引き倒し試験時の連続画像を解析することで推定可能である。対象樹種として日本の海岸林における主要樹種のクロマツを選択した。クロマツ対象木の引き倒しモーメントと **Dcp** を計測した後、**Dcp** の値を検証するために根系全体の掘り取りにより垂直根の深さを計測した。その結果、**Dcp** と垂直根の深さの関係に有意な強い正の相関関係が認められ、**Dcp** が垂直根の深さを示す簡易な指標となることを明らかにした。

3章の後半では、津波による倒木被害が懸念されるクロマツ林において、垂直根の深さの倒伏抵抗力への寄与程度を明らかにすることを目的とした。調査林分として、クロマツの垂直根の異なる 2 林分、地下水位が高く汀線近くの海側クロマツ林(海側区)と、地下水位が低く汀線から離れたクロマツ林 (陸側区)を設定した。引き倒しモーメントと重量モーメントの双方を考慮した倒伏モーメントと垂直根の深さ指標である **Dcp** との関係性を検討した。両区の平均 DBH に差はないものの、海側区の平均 **H** は陸側区のほぼ半分であった。倒伏モーメントと $H \times DBH^2$ の関係に両区とも強い正の相関関係が認められたものの、両区の回帰直線に有意差は認められなかった。海側区では **H** および $H \times DBH^2$ の小さい個体が多く、倒伏モーメントの小さい個体が多かった。巨大地震で想定される津波水位や DBH を用いて算出された津波モーメントと両区の倒伏モーメントとを比較したところ、海側区では波高の低い津波でクロマツは倒伏することが予測された。一方、両区におけるクロマツの根鉢半径に有意差はないものの、陸側区の **Dcp** は有意に大きかった。すなわち、海側区では **Dcp** および垂直根の深さが、高い地下水位のために浅くなり、倒伏抵抗力の小さい個体が多く存在した。本結果は、垂直根の深さにより樹木の倒伏抵抗が変化することを示唆した。

4章前半では、倒伏抵抗力に関連する根特性を 3次元根系構造のデータから取得するため、3次元レーザスキャナで取得した根系の点群データから、根の 3次元位置座標と直径で示される根のポイントデータを容易に得るための新たな手法を提案すること、さらにこの根のポイントデータを手動計測から算出された根特性値と比較し精度を検証することとした。3次元レーザスキャナは、樹木地上部へ適用されているものの、根系構造にはほとんど用いられてない。3次元レーザスキャナで根系は根の表面を表す点群データとして取得されるため、直径や長さなど根特性値を直接抽出することはできない。神経細胞形態の構造解析ために開発されたフリーソフトウェア **neuTube** を使用して、根系の点群データを根のポイントデータに変換し 3次元構造を復元する方法を提案した。また 3次元レーザスキャナ計測と手動計測法について、それぞれ復元された 3次元根系構造を検証するため、根のポイントデータ、根の細り、

幹中心からの水平及び深さ距離別の根断面積合計について比較した。その結果、本提案法によりそれぞれ両法で取得されたデータから復元された3次元根系構造、根特性である根のポイントデータおよび細りは良く類似し、ほぼ同様な精度が得られることが明らかとなった。幹中心からの距離別の根断面積合計は、幹中心からの水平距離が600 mm以上離れると2つの計測法で良く合致した。一方で、幹に近い距離の根断面積合計が計測法により異なった。これは、3次元レーザスキャナのレーザ光が幹付近内の根に届かず、幹近くの混みあった根の点群データが得られないためと推察された。

4章後半では、上記で提案された3次元根系構造データと引き倒しモーメントとの関係性について明らかにすることを目的とした。対象樹種は、根系構造の違いから斜出根型のスギ、水平根型のケヤキ、垂直根型のクロマツとした。3樹種の試験木について引き倒し試験を行い、その後、根系全体を掘り取り、手動計測により根系構造データを取得し、根特性を算出した。その結果、3樹種の掘り取りデータから復元された3次元根系構造は、樹種特性を示すそれぞれの根系型を良く反映していた。斜出根型のスギでは引き倒しモーメントと根鉢周囲の根断面積合計や垂直根の体積との間に強い相関が認められた。垂直根型のクロマツでは引き倒しモーメントと垂直根の体積の間に、個体数の少なさのため有意ではないものの正の相関が認められた。水平根型を示したケヤキでは引き倒しモーメントと垂直根の特性に相関は認められないものの、幹中心から1000 mmまでの水平根の体積との間に強い相関が認められた。これらの結果から、引き倒しモーメントに寄与する根系の部位が根系構造によって異なること、すなわち根系の倒伏抵抗に寄与するプロセスも異なることが明らかになった。

5章では、2章から4章までの内容を総括し、樹木の3次元根系構造と倒伏抵抗の関係性および今後の根系構造データ取得法における課題をまとめた。

樹木の根系構造は樹種によって異なる根系型をもち、その生育する環境に適応し変化する。斜出根型をもつスギでは、4章の結果から水平根および垂直根が双方とも倒伏抵抗に寄与するが、2章の結果から間伐による森林管理では水平根の成長が促進されることで倒伏抵抗を高めることが示唆された。垂直根型を持つクロマツでは、3章と4章の結果から垂直根の寄与すなわち深い垂直根ほど倒伏抵抗が高まるが、高い地下水位により垂直根の成長できない生育環境下では、クロマツは水平根型に根系構造を適応する可塑性を示していた。このような水平根型のクロマツでも、波高の低い津波に対しては垂直根型のクロマツと同じ程度の倒伏抵抗を持つことが明らかとなった。水平根型を持つケヤキでは、4章の結果から垂直根とは関係なく、水平根を土壌と緊縛し一体化させた根鉢を大きく作り上げることで倒伏抵抗を高めることが示唆された。

本研究では、実際に掘り取られた樹木個体根系から手動計測などにより取得された根系構造のデータを用いて3次元根系構造を復元し、さらに新たに提案した方法で根特性を抽出することで、倒伏抵抗に寄与する根系構造の特性を異なる根系型の3樹

種で明らかにした。今後の課題として、効率的および非破壊的な根系構造のデータ取得法の発展や根系構造の倒伏抵抗へ寄与する詳細な過程の解明が、様々な根系型を持つ樹種で明らかにされる必要性を指摘した。本研究で解明された樹木の根系構造と倒伏抵抗に関する知見は、水平根の広がりを促進する間伐施業や垂直根の伸長を促進する盛り土施業など、減災を念頭に置いた持続可能な森林管理のための整備提案に貢献できるであろう。

Abstract

Japan is a region that experiences earthquakes and resulting tsunamis. In addition, typhoons and stationary fronts bring heavy rains and torrential downpours, and in recent years, the annual number of heavy rains (50 mm precipitation or more per hour) in Japan has increased. These natural hazards can cause landslides and fallen trees in forests. To reduce the damage caused by such disasters, it is necessary to understand the mechanisms that drive tree fall and overturning.

The resistance of trees to overturning is estimated by the critical turning moment measured in tree-pulling experiments, and is related to above-ground traits such as stem volume, diameter at breast height (DBH), and weight of the test trees. However, the overturning resistance of some trees cannot be explained only by above-ground traits. In these cases, soil conditions such as soil type and moisture content, as well as belowground tree structures, such as the root system architecture, can determine the critical turning moment. Tree roots increase their overturning resistance by adapting their shapes and structures to physical stresses such as wind. The traits of root system architecture have been expressed, for example, using the total root cross-sectional area (CSA) per soil profile, the classification by root growth direction such as vertical, horizontal, and heart roots, the number of roots, and the slope of the growth direction. However, the relationship between root system architecture and overturning resistance remains unclear, and it is assumed that different root system architectures in different tree species under different site conditions can contribute differently to overturning resistance.

The purpose of this study was to clarify the contribution of root system architecture to tree overturning resistance. In particular, (i) how much do differences in belowground root system architecture, such as horizontal and tap roots, contribute to overturning resistance relative to aboveground traits of trees? and (ii) how does overturning resistance differ among tree species with different root system architectures?

In Chapter 2, the growth of horizontal roots in the root system of *Cryptomeria japonica*, a major plantation forest species in Japan, was examined in order to quantify the effect of thinning on critical turning moment. The thinned plot was set up 17 years after thinning, and the control plot was set up without thinning. There was a strong positive correlation between the critical turning moment and tree height (H) \times DBH², an index of stem volume. For *C. japonica* trees with the same H \times DBH², the critical turning moment in the thinned plot was significantly greater than that in the control plot. Furthermore, the root-soil plate radius of the thinned plot was significantly large. Because site conditions were similar and there was no difference in tap root depth between the sites, the root-soil plate radius (i.e., the extended growth of the horizontal root) may have been responsible for the difference in critical turning moment between same-sized trees in the two plots.

The purpose of Chapter 3 was to quantify the relationship between the depth of the tap

root and overturning resistance. In the first half of Chapter 3, a simple index was developed to serve as a proxy measure of the depth of tap roots. The proposed index was the depth at the center point of rotation (Dcp) in the overturning of the tree. The depth of the tap root is typically measured by destructive digging of the root system, but Dcp can be estimated by analyzing continuous images collected during the tree-pulling experiment. *Pinus thunbergii*, a common tree species in the coastal forests of Japan, was selected as the test tree species for this index. After measuring the critical turning moment and estimating Dcp of *P. thunbergii* trees, the depth of the tap root was measured and Dcp verified by digging up their entire root systems. A significant and strong positive correlation was observed between Dcp and tap root depth, indicating that Dcp can serve as a simple index of tap root depth in *P. thunbergii*.

The purpose of the latter half of Chapter 3 was to clarify the contribution of tap root depth to overturning resistance in *P. thunbergii* forests, which are at risk of damage by tsunamis. Two plots in coastal forests were constructed; one at the shoreline with a high groundwater table (sea-side plot), and one away from the shoreline with a low groundwater table (land-side plot). The relationship between the overturning moment and Dcp was examined. Although there was no difference in the average DBH between the two plots, the average H in the sea-side plot was almost half of that in the land-side plot. There was a strong positive correlation between the overturning moment and $H \times DBH^2$ in both plots, and this relationship did not differ between the plots. Most *P. thunbergii* trees in the sea-side plot had smaller H, $H \times DBH^2$, and overturning moment than did trees in the land-side plot. Tsunami moments were calculated using tsunami wave height and DBH expected in a large earthquake, and a comparison of these to the overturning moments of the two plots showed that *P. thunbergii* trees in the sea-side plot were predicted to fall under a tsunami with a low wave height. Although there was no significant difference in root-soil plate radius of *P. thunbergii* between the two plots, the Dcp of trees in the land-side plot was significantly larger. In other words, Dcp and tap root depth were shallower for trees in the sea-side plot because of the higher groundwater level, and these trees showed a lower overturning resistance. These results suggest that the overturning resistance of *P. thunbergii* varies with tap root depth.

In the first half of Chapter 4, a new method to easily obtain root point data from the point cloud data of the root system acquired using a 3D laser scanner was proposed. Root point data is indicated by the 3D position coordinates and diameter of roots, and describes root traits related to the critical turning moment. Although 3D laser scanners have been applied to aboveground parts of trees, they are rarely used for root system architecture. 3D laser scanners acquire data on root system architecture as point clouds representing the root surface; therefore, root traits such as diameter and length cannot be extracted directly. Using neuTube, a free software developed for structural analysis of brain neurons, a new method was developed to convert the point cloud data

of the root system architecture into root point data and reconstruct the 3D structure. The root point data, root taper, and CSA at different horizontal and depth distances from the center of the stem were compared to validate the reconstructed 3D root system architecture between the 3D laser scanner and manual measurement methods. The 3D root system architecture, root point data, and root taper obtained using the two methods were very similar, and the two methods were nearly equally accurate. The CSAs at different distances from the stem center were also similar between the two measurement methods when the horizontal distance from the stem center was more than 600 mm. However, the CSAs at distances closer to the stem differed between the measurement methods. This was probably because the laser beam of the 3D laser scanner could not reach roots in close proximity to the stem, thus the point cloud data of roots crowded near the stem could not be obtained.

The purpose in the latter half of Chapter 4 was to quantify the relationship between the 3D root system architecture data described above and the critical turning moment. 3D root system architecture was reconstructed from the excavated data of three tree species, and reflected different root system forms and tree species traits. In *C. japonica*, which has a heart root system, there were strong correlations between the critical turning moment and both the CSA around the root-soil plate and the volume of tap roots. In *P. thunbergii*, which has a tap root system, there was a positive correlation between the critical turning moment and the volume of tap roots, though this correlation was not significant due to the small number of test trees. In *Zelkova serrata*, which has a horizontal root system, there was no correlation between the critical turning moment and the tap root traits. However, there was a strong correlation between the critical turning moment and the volume of the horizontal roots up to 1000 mm from the stem center. These results indicate that the root system components that contribute to the critical turning moment vary with root system architecture and suggest that different processes contribute to overturning resistance of the root system.

In Chapter 5, the relationship between the 3D root system architecture of tree species and their overturning resistance, and the issues to be addressed in future methods of obtaining root system architecture data were summarized. The root system architecture of trees differs among species and can adapt to the growth environment. The results of Chapter 4 suggest that for *C. japonica* both horizontal and tap roots contribute to overturning resistance, but the results of Chapter 2 suggest that forest management by thinning promotes the growth of horizontal roots and thereby increases overturning resistance. The results of Chapters 3 and 4 suggest that for *P. thunbergii* deeper tap roots lead to greater overturning resistance, but when the high groundwater table inhibits tap root growth, *P. thunbergii* can adapt its root system architecture to the horizontal root system. The horizontal root system of *P. thunbergii* had the same overturning resistance as the tap root system in a tsunami with a low wave height. In *Z. serrata*, the results of Chapter 4

suggest that regardless of tap roots, overturning resistance is increased by creating a large root-soil plate in which the horizontal roots are integrated with the soil.

In this study, 3D root system architecture was reconstructed using manual or 3D laser scanner measurements of root point data from excavated root systems. Furthermore, by extracting root traits using a newly proposed method, the traits of root system architecture that contribute to overturning resistance were clarified in three tree species with different root system types.

Future work includes the development of efficient and non-destructive methods for obtaining data on root system architecture, and the elucidation of the detailed processes that contribute to overturning resistance in trees with various root system forms. The findings in this study will contribute to the implementation of sustainable forest management practices for disaster mitigation, such as thinning practices that promote horizontal root growth and embankment practices that raise the ground level and promote tap root growth.

樹木の倒伏抵抗に寄与する根系の構造に関する研究

Study on the contribution of root system architecture to overturning resistance of trees

目次

1章 序論	1
1-1 背景.....	1
1-2 本研究の目的.....	3
1-3 本論文の構成.....	3
図.....	5
2章 樹木の水平根の広がり引き倒しモーメントに与える影響	6
2-1 はじめに.....	6
2-2 材料と方法.....	6
2-2-1 調査地.....	6
2-2-2 立木引き倒し試験.....	7
2-2-3 引き倒しモーメント発現時の回転中心の深さ (Dcp).....	8
2-2-4 統計解析.....	9
2-3 結果.....	9
2-3-1 引き倒しモーメントと地上部特性との相関.....	9
2-3-2 引き倒しモーメントと地下部特性との相関.....	10
2-3-3 根鉢半径と回転中心の深さ (Dcp)に対する間伐の影響.....	10
2-4 考察.....	10
2-4-1 スギ林の間伐の有無による引き倒しモーメントの変化.....	10
2-4-2 引き倒しモーメントに対する地下部の寄与の可能性.....	12
表.....	14
図.....	16
写真.....	19
3章 樹木の垂直根の成長が引き倒しモーメントに与える影響	21
3-1 垂直根の深さに関する評価指標の検討.....	21
3-1-1 はじめに.....	21
3-1-2 材料と方法.....	22
3-1-2-1 回転中心の深さ (Dcp)の考え方.....	22
3-1-2-2 調査地.....	23
3-1-2-3 クロマツの引き倒しモーメント及び垂直根の最大深さの測定	

	.....	24
3-1-2-4	回転中心の深さ (Dcp)および回転中心 (Cp)変位の測定.....	24
3-1-2-5	樹高と根の最大深さの関係.....	25
3-1-2-6	データ整理および統計解析.....	25
3-1-3	結果.....	25
3-1-3-1	引き倒し試験時における回転中心 (Cp)の変位.....	25
3-1-3-2	カメラレンズ補正前、補正後の回転中心深さ (Dcp).....	26
3-1-3-3	引き倒しモーメントと根系の最大深さ.....	26
3-1-3-4	引き倒しモーメントと回転中心深さ (Dcp)、地上部特性および根の最大深さ.....	26
3-1-3-5	根の最大深さと回転中心深さ (Dcp)および地上部特性との関係.....	26
3-1-4	考察.....	27
表	.....	30
図	.....	33
3-2	汀線からの距離が異なる海岸林に生育するクロマツの倒伏モーメント.....	44
3-2-1	はじめに.....	44
3-2-2	材料と方法.....	45
3-2-2-1	調査地.....	45
3-2-2-2	調査対象木.....	45
3-2-2-3	土壌水分および地下水位.....	46
3-2-2-4	立木引き倒し試験.....	46
3-2-2-5	引き倒しモーメント(M _{crit})、倒伏モーメント(M _o)の算出.....	47
3-2-2-6	津波のモーメントの算出.....	47
3-2-2-7	統計解析.....	48
3-2-3	結果.....	48
3-2-3-1	陸側区と海側区における地下水位の深さおよび地上部特性.....	48
3-2-3-2	倒伏モーメント (M _o)と地上部特性との関係.....	48
3-2-3-3	陸側区と海側区の地下部特性および倒伏モーメント (M _o)との関係.....	49
3-2-3-4	倒伏モーメント (M _o)と津波モーメント (M _t)との関係.....	49
3-2-4	考察.....	50
表	.....	53
図	.....	56
写真	.....	63

4章 樹木根系構造が引き倒しモーメントに与える影響	64
4-1 根系構造モデル作成の検討.....	64
4-1-1 はじめに.....	64
4-1-2 材料と方法.....	65
4-1-2-1 調査対象木.....	65
4-1-2-2 3D レーザスキャナによる計測.....	66
4-1-2-3 手動計測.....	66
4-1-2-4 根のポイントデータからの根系構造 (RSA)の再構築.....	67
4-1-2-5 根系構造 (RSA)データのキャリブレーション.....	67
4-1-2-6 異なる方法で得られた根系構造 (RSA)データの比較.....	67
4-1-3 結果.....	68
4-1-3-1 手動および 3D レーザスキャナ計測における根系構造 (RSA)の再構築.....	68
4-1-3-2 手動計測と 3D レーザスキャナ計測の根のポイントデータの比較.....	68
4-1-3-3 手動計測と 3D レーザスキャナ計測の根の細りと根系断面積合計 (CSA)の違い.....	69
4-1-4 考察.....	69
4-1-4-1 点群データから根系構造 (RSA)を再構築する重要なステップ.....	69
4-1-4-2 3D レーザスキャナを利用するための課題.....	70
4-1-4-3 根系構造 (RSA)測定の今後の展望.....	71
表.....	72
図.....	73
写真.....	84
4-2 異なる根系型を持つ3樹種の根系構造と引き倒しモーメント.....	86
4-2-1 はじめに.....	86
4-2-2 材料と方法.....	86
4-2-2-1 調査地.....	86
4-2-2-2 引き倒しモーメントと根系構造 (RSA)データの取得.....	87
4-2-2-3 引き倒しモーメントと根系特性.....	88
4-2-2-4 統計解析.....	89
4-2-3 結果.....	89
4-2-3-1 引き倒しモーメントと DBH、 $H \times DBH^2$ 、根鉢半径および回転中心深さ (D_{cp})との関係.....	89

4-2-3-2	根系構造の樹種間差.....	90
4-2-3-3	引き倒しモーメントと根系断面積合計 (CSA)との関係.....	91
4-2-3-4	引き倒しモーメントと全根系、垂直根、水平根体積との関係.....	91
4-2-3-5	引き倒しモーメントと幹を中心に浅い同心円柱内の水平根体積との関係.....	92
4-2-3-6	3樹種の地上部スケールを合わせた模式図と根系特性の比較.....	92
4-2-4	考察.....	92
4-2-4-1	3樹種の引き倒しモーメントと地上部および地下部特性.....	92
4-2-4-2	3樹種の根系構造と引き倒しモーメント.....	93
4-2-4-3	根系分布と樹種内の引き倒しモーメントの個体差.....	96
4-2-4-4	根系構造 (RSA)データ取得法のさらなる検討.....	97
	表.....	98
	図.....	105
	写真.....	120
5章	総合考察.....	124
5-1	はじめに.....	124
5-2	樹木の根系構造と倒伏耐性.....	124
5-3	樹木の根系構造に関するデータ取得についての展望.....	126
5-4	高い倒伏抵抗をもつ根系構造を発達させるための森林施業の提案.....	128
	表.....	130
	図.....	131
	謝辞.....	132
	引用文献.....	134

1 章 序論

1-1 背景

日本は、太平洋プレートやフィリピン海プレートといった海のプレートと、北米プレートやユーラシアプレートなど陸のプレートとのぶつかり合う地点にあり、地震の多発や津波の発生のしやすい地域である (気象庁 2021a)。また大陸と大洋に挟まれているため、台風や前線の停滞などが大雨や集中豪雨を降らせることがある (気象庁 2021b)。近年、国内の1時間あたり50 mm以上の大雨の年間発生回数は増加傾向にあり、気候変動との関連性が指摘されている (気象庁 2021c)。このような自然災害は森林で土砂災害や倒木を引き起こす。2018年9月には台風21号が、関西地方を中心に森林地帯だけでなく平野部において大量の樹木の倒伏を引き起こした (Tanikawa et al. 2021)。このような災害に対して、樹木倒伏の災害を減らす減災の観点からも樹木倒伏化のメカニズムを解明する必要がある。樹木の倒伏は、幹が根元付近または途中で折れる「幹折れ」と、根系基盤が周囲の土壌から引きはがされるように樹体が完全に転倒する「根返り」に分類される (飯塚・船久保 2019)。本研究では、このうちの根返りについて検討し、以下これを樹木の倒伏と呼ぶこととする。

樹木の倒伏に対する抵抗力、土石流の衝撃エネルギーの吸収効果 (水山ら 1990) や土石および流木の捕捉効果 (水山ら 1989) など土石流に対する抵抗力 (芝ら 2003; Nicoll et al. 2005) は、立木の引き倒し試験で測定される引き倒しモーメントにより推定される (Nicoll et al. 2005; Tanaka 2012)。

引き倒しモーメントの作用は二段階に分けられる (Coutts 1986)。第一段階は風などにより地上部に負荷された力に対して根と土壌の抵抗する力であり、第二段階は倒伏に伴う樹木地上部の自重による力である (Coutts 1986)。本研究では、立木引き倒し試験によって記録される最大引き倒し抵抗力に荷重位置であるワイヤー高を乗じた力を引き倒しモーメントとし、倒伏時の樹木地上部の自重による力を質量モーメント、引き倒しモーメントと質量モーメントを足し合わせた力を倒伏モーメントとした。引き倒しモーメントは、根返り発生モーメント (野々田ら 1996)、根元の最大回転モーメント (茅島・佐々木 2010)、最大引き倒し抵抗モーメント (深見ら 2011; 宮田ら 2013; 島田・野々田 2017)、倒伏限界モーメント (今井ら 2013) などと、また倒伏モーメントは回転モーメント (野口ら 2014) などとも呼ばれる。

引き倒しモーメントや倒伏モーメントは、対象となる立木の材積、胸高幹直径 (Diameter at breast height, DBH)、地上部重といった地上部の特性との高い正の相関関係を示す (玉手ら 1965; Peltola et al. 2000; Cucchi et al. 2004; Nicoll et al. 2005, 2006; 深見ら 2011; Kamimura et al. 2012)。風に伴う引き倒しモーメントはこれまでも良く調べられており、例えば、カイガンショウ (*Pinus pinaster*) において風の比較的良好にあたる林縁木

では林内木に比べて引き倒しモーメントが高いこと (Cucchi et al. 2004)、また立木密度の影響は受けないこと (Nicoll 2009)などが報告されてきた。また引き倒しモーメントは風の強さに比例して強くなること (Nicoll et al. 2008; Hale et al. 2012)や、樹木の地上部材積を表す 樹高 (Stem height, H)×DBH² と強い関係にあること (Peltola et al. 2000; Cucchi et al. 2004; Lundström et al. 2007a,b; Hale et al. 2012)も報告されている。他にも、樹種の違い (Blackwell et al. 1990)や、樹木の生育する土壌斜面の方向の違い (茅島・佐々木 2010、Nicoll et al. 2005)などの要因が引き倒しモーメントに与える影響について解析がなされてきた。

このような既存報告の中には、立木密度以外は同じ地上部特性をもつ樹木であっても、引き倒しモーメントが異なるといった上述した地上部特性だけの説明では不十分な事例 (Cucchi et al. 2004; Lundström et al. 2007b)がある。これらの場合、土壌の深さや種類 (Nicoll et al. 2006)、土壌水分 (水山ら 1990; 深見ら 2011; Kamimura et al. 2012)といった土壌条件の違いや、樹木の根系など地下部構造が引き倒し抵抗力に關与する可能性がある。樹木の根は、風などの物理的ストレスに対して根系構造を適応させ、根返りに対する抵抗力を発揮する (Lundström et al. 2007a,b; Nicoll et al. 2008)。このような根系構造の特性は、例えばある土壌断面における根系断面積合計 (Total root cross sectional area, CSA) (Coutts et al. 1999)や垂直根、水平根、斜出根といった根の成長方向による根の分類 (Danjon et al. 2005)、根の本数や成長方向の傾き (Fourcaud et al. 2008)などを用いて表現されてきた。

樹木の倒伏に伴う根返りに対する地下部構造を反映させた特性として根鉢のサイズがよく議論されている (Peltola et al. 2000; Cucchi et al. 2004; Nicoll et al. 2005; Nicoll et al. 2006; Lundström et al. 2007a, b)。根鉢の深さは根系の最大深さに応じて深くなり (Nicoll et al. 2005)、根鉢のサイズは土壌型により異なる (Fourcaud et al. 2008)など、根鉢は根系構造と土壌特性の両方を反映させる。したがって、地下水位などによって根鉢サイズが変化すると引き倒しモーメントも変化することが報告されている (Ray and Nicoll 1998)。引き倒しモーメントと關連する4つの根鉢の指標として、根鉢の重さや、根鉢周囲に存在する倒れる方向 (風下側)またはその反対側 (風上側)における根系の力、風上風下以外のせん断力が挙げられる (Coutts 1986; Blackwell et al. 1990)。このような地下部の根系構造と關連する特性が樹木個体の引き倒しモーメントに關与することは過去の知見からもよく指摘されているが (Peltola et al. 2000; Cucchi et al. 2004; Nicoll et al. 2005; Nicoll et al. 2006; Lundström et al. 2007a, b)、根系構造との関係性およびその寄与するメカニズムにはまだ未解明な点が多い。

樹木の根系型には垂直根型 (Tap root system)、水平根型 (Horizontal root system、Plate system)、斜出根型 (心根型、Heart root system)があり (Polomski and Kuhn 1998; Ennos 2000)、これら根系型と倒伏抵抗力との関係性が整理されているが (Ennos 2000)、実測データによる詳細な根系構造と倒伏抵抗力との関係性までは議論されていない。Mattheck et al.

(2015)は、風荷重を受ける樹木根系の倒伏抵抗について、根系全体の重量による抵抗、せん断に対する抵抗、風上側の引張に対する抵抗、風下側の圧縮に対する抵抗、土壌の抵抗の5つがあるとしている(図1-1、飯塚・船久保 2019)。これは、先ほど挙げた Coutts (1986)の4つの根鉢の指標とほぼ同等であり、先ほどの風上風下以外のせん断力(Coutts 1986)の中に Mattheck et al. (2015)によるせん断に対する抵抗と土壌の抵抗が含まれる。せん断に対する抵抗力の発揮される樹木は、垂直根型や斜出根型の根系を持つ(Mattheck et al. 2015)。水平根型の根系を持つ樹木は、おもに樹体自身の質量と根鉢の質量で樹体の安定を保つ(Mattheck et al. 2015)。せん断に対する抵抗には垂直根が、風上側の引張に対する抵抗および圧縮に対する抵抗には水平根が大きく関与すると考えられ、樹種や生育地で異なる根系構造の違いにより、それぞれの倒伏抵抗への寄与度が異なることが推察される。

1-2 本研究の目的

本研究の目的は、根系構造が樹木の倒伏抵抗にどのように寄与しているかを明らかにすることとした。特に、(i)樹木の地上部特性と比較して、地下部特性である水平根や垂直根などの根系構造の違いが、倒伏抵抗にどのように寄与しているのか？(ii)異なる根系構造をもつ樹種の間倒伏抵抗の差がどのように表れるのかを明らかにすることを具体的な目的とした。

1-3 本論文の構成

本論文は5つの章によって構成されている。

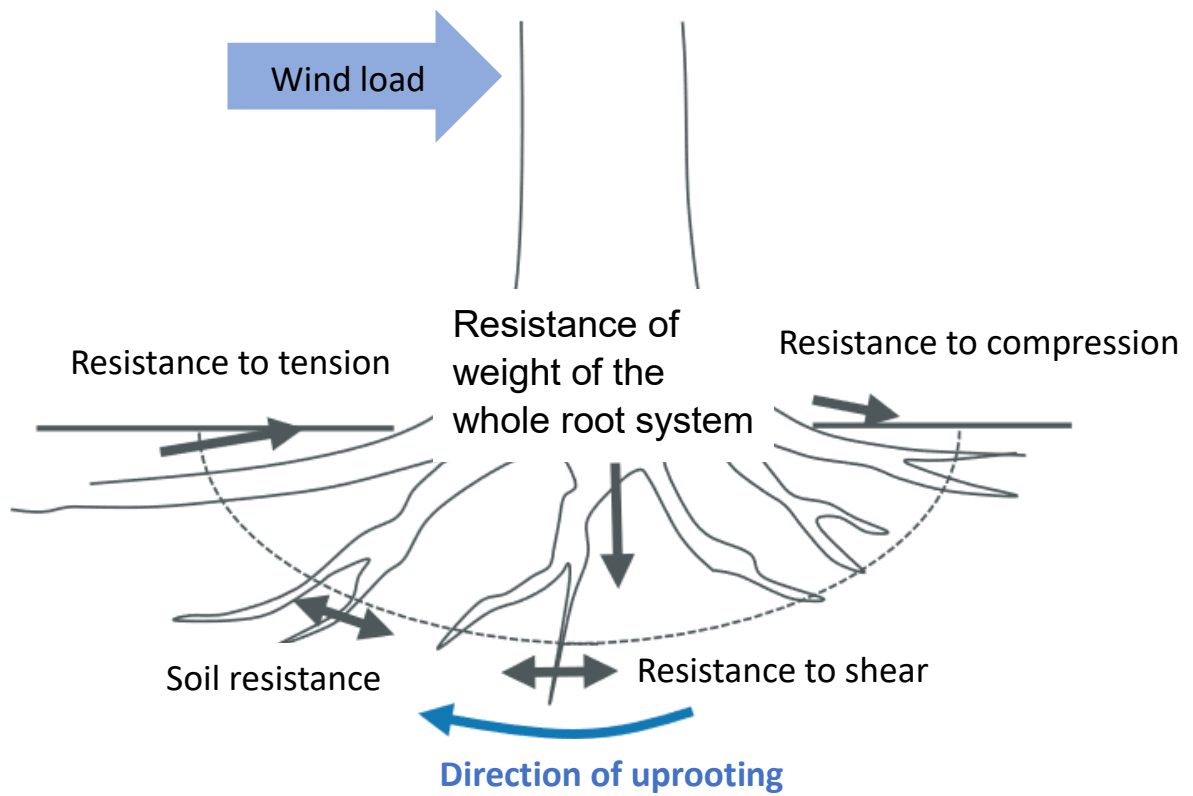
序章では、樹木の倒伏抵抗に関する既存研究について、背景とともに簡潔に説明し、倒伏抵抗に樹木地下部が関係していること、およびそれらに関する残された課題や本研究の目的について述べる。

2章では、樹木の地下部根系において水平方向の広がり(水平根の広がり)と倒伏抵抗の関係について検証する。具体的には、根系の水平方向に異なる広がりを持つと予想される間伐林分と無間伐林分において、引き倒しモーメントと水平根の広がりを示す根鉢の半径との関係性をスギ(*Cryptomeria japonica*)において明らかにする。

3章では、樹木の地下部根系において深さ方向の広がり(垂直根の深さ)と倒伏抵抗の関係について着目する。垂直根の深さの直接測定は、時間と労力もかかり通常困難であるため、垂直根の深さを示す指標を3-1にて提案し、3-2では海岸に生育するクロマツ(*Pinus thunbergii*)を対象として垂直根の深さと倒伏モーメントとの関係性について、地下水位など生育環境を含めて検証する。

4章では樹木の地下部根系構造と倒伏抵抗について着目し、まず4-1で樹木の3次元 (Three dimensional, 3D)根系構造のデータ取得および構造の復元化について提案する。また3D根系構造のデータを用いて、異なる根系型を持つ3樹種において引き倒しモーメントと根系構造指標との関係性を調査し、根系構造の異なりが倒伏抵抗に与える影響を明らかにする。

5章では、2章から4章で明らかにした根系構造と倒伏抵抗の関係性について5-1でまとめ、異なる根系型をもつ樹種特性に着目しながら総合的に考察する。また5-2において、今後さらに根系構造と倒伏抵抗の研究を進めるために、根系構造データの取得方法の展望について議論する。5-3では、これまで明らかにされた樹木根系と倒伏抵抗の知見から導き出される、高い倒伏抵抗力を持つ根系構造を育成するための森林施業の提案をし、その現場への導入性を議論する。



☒ **1-1** Resistance to uprooting of root systems subjected to wind loads (Partly modified of Iizuka and Funakubo (2019)).

2章 樹木の水平根の広がり引き倒しモーメントに与える影響

2-1 はじめに

近年、ゲリラ豪雨や台風等の暴風雨に起因する山地災害が多発しており、山腹崩壊や土石流およびそれに伴う流木により甚大な被害が起きている (末次 2019)。国や都道府県においては「災害に強い森林づくり」をキーワードにした森林整備事業が行われており (岡山県農林水産部林政課 2005; 長野県林務部 2008; 兵庫県 2010; 奈良県農林部 2014)、主たる整備として間伐が行われている。森林の災害に対する抵抗力と間伐の関係のうち、表面侵食防止機能は、間伐による林床の光環境の好転とそれに伴う林床植生の繁茂により、増加することが明らかになっている (荒木・阿部 2005)。また、間伐によって根系の表層崩壊防止力が増加すること (伴ら 2009; 今井ら 2009)も明らかになりつつある。しかし、樹木の災害に対する抵抗力の一つである引き倒しモーメントについては、間伐との関係を研究した例はあるものの、間伐がなぜ引き倒しモーメントを変化させるのかという機構については未解明である。現在、間伐林で風倒被害が少ないといった災害報告 (稲垣 1999; 鳥田 2006)や、立木密度と引き倒しモーメントの研究事例 (深見ら 2011; Urata et al. 2012)から、間伐による立木密度の低下が引き倒しモーメントに影響することが示唆されている。既存報告では、バルサムモミ (*Abies balsamea*)における間伐は引き倒しモーメントに影響しないという結果 (Achim et al. 2005)もあり、間伐と引き倒しモーメントの関係には未だ不明な点が多い。

本章の目的は、間伐が引き倒しモーメントに与える影響について明らかにすることとした。具体的には、山地溪流の堆積区間、すなわち山地斜面の下部に植栽されることの多いスギ (*Cryptomeria japonica*)を対象樹種とし、同所的な林内における間伐林分と対照区とした無間伐林において、土石流に対する抵抗力を念頭に置いた立木引き倒し試験を行った。特に、間伐に伴う根系の水平方向における成長と樹木の倒伏抵抗について検討した。

2-2 材料と方法

2-2-1 調査地

調査地には、兵庫県神崎郡神河町 (35°08'06"N、134°40'23"E、889 m asl、斜面方位 S) に位置する 49 年生のスギ林 (吉野・前田 2006)を選定した。調査地における土壌型は林野土壌分類における火山灰由来の適潤性黒色土 (B1_D)である。本林分は、約 3,000 本/ha の密度で 1963 年に植栽され、1995 年まで 2 回から 3 回の間伐の実施により 1,700 本/ha 程度の密度に管理されてきた。スギ 32 年生時である 1995 年 10 月に、林分の一部を材積間伐率 45.5%に相当する本数間伐率 55.5%の間伐を行ない、本数密度を 723 本/ha と

した。本章ではこの林分を間伐区 (Thinning)とした (写真 2-1)。一方、間伐を行わず 1,700 本/ha を維持した無間伐林分を対照区 (Control)とした (写真 2-2)。32 年生時の間伐区および対照区の平均 DBH (胸高幹直径)はそれぞれ 25.9 ± 4.4 cm (Mean \pm SD、以下同様)、 24.6 ± 3.8 cm であり、平均値に差はみられなかった (Student's t-test、 $P > 0.05$)。

2-2-2 立木引き倒し試験

立木引き倒し試験は、対象木にワイヤーを掛け、重機もしくは手動ウィンチにて引張り、その抵抗力を測定する試験である (図 2-1)。試験は、間伐後 17 年の経過した 2012 年 10 月に行った。間伐 17 年後 (49 年生時)の間伐区、対照区の平均 DBH はそれぞれ 34.9 ± 5.8 cm、 29.9 ± 4.9 cm であり、平均値に有意差がみられた (Student's t-test、 $P < 0.001$)。

今回の引き倒し試験は、測定する目的を土石流抑止力としたため、ワイヤー高は同様の目的で行われた試験 (深見ら 2011)や過去の土石流の波高 (土屋ら 2009)を参考にし、波高の 1/2 の高さである地上高 1 m または 2 m の地点とした。使用した重機 (バックホー)はバケットサイズ 0.8 m³、重機重量約 20 t で、バケットフックにワイヤーの片端を固定した後、重機のアームを縮め、地面とワイヤーが平行になるようにスギ個体を引っ張った。重機と対象木をつなぐワイヤーの間には引張力測定用のロードセル (最大荷重 100 kN、日計電測)を設置した。ロードセルで測定したデータは、ブリッジユニット DBU-120A (共和電業)を介してパソコンに集積した。重機がワイヤーを引くと同時に引き倒し荷重の測定を開始し、引き倒し荷重がピークに達したことを確認した後、測定を終了した。

対象木の本数は、間伐区 20 本、対照区 21 本であり、2 つの調査区における対象木の DBH の範囲がほぼ同様になるよう直径 20 cm 以上の個体を選択した。また、対象木が隣接している場合には、隣接木の引き倒し試験の影響が無いと判断できる個体を選択した。

引き倒しモーメント (M)は、引き倒し荷重 (F)[kN]にワイヤー高 (h)[m]を掛け合わせた式 (2-1)で算出される (深見ら 2011)。

$$M = F \times h \quad (2-1)$$

引き倒しモーメントの算出には立木のたわみを考慮に入れる方法 (茅島・佐々木 2010)もある。今回の試験では対象木の直径が太く、ワイヤー高が 1 m および 2 m と比較的低いいため、立木のたわみがほとんどみられなかったことから、立木のたわみについては考慮していない。また、ワイヤー高が高く、ワイヤーと地面が成す角度が大きい状態での試験の場合には、引き倒し荷重を水平成分と垂直成分に分力し、水平成分だけを抽出して解析する手法 (Cucchi et al. 2004; Nicoll et al. 2005; Nicoll et al. 2006; 鳥田ら 2011)が用いられるが、今回の試験ではワイヤーと地面の成す角度がほぼ 0 度であるため、引き倒し荷重を分力せずにモーメントを算出した。

引き倒し試験を行う前に、樹木個体の地上部特性として立木位置、DBH、H、枝下高、樹冠幅を測定した。立木位置として、対象木および対象木より半径 10 m に存在するすべての林冠木 (いずれもスギ) を記録した。立木位置の記録には、レーザ距離計 TruPulse200 (LASER TECHNOLOGY, USA) と GNSS デバイス MobileMapper 100 (Ashtech, USA) を使用した。立木間距離として、対象木から最も近い立木までの距離を算出した。枝下高は、地面から樹冠を形成する生存枝の最下部までの高さとした。測定した DBH、H と枝下高から、形状比 (H/DBH)、樹冠長 ($H - \text{枝下高}$) および樹冠長率 ($\text{樹冠長}/H$) を算出した。樹冠幅は東西および南北の 2 方向を計測し、2 方向の長さを平均した。また、対象木の地下部特性として、地表から 0.6 m までの深さにおける土壌硬度を、長谷川式土壌貫入計を用いて測定した。土壌硬度の測定位置は、対象木北側の距離 0.5 m の地点とした。長谷川式土壌貫入計を用いて計測された土壌硬度は、落錐 1 打撃ごとの貫入深さ S 値 (cm/drop) で表される (日本造園学会緑化環境工学研究委員会 2000)。土壌硬度と根系分布密度には密接な関係があり (日本造園学会緑化環境工学研究委員会 2000)、S 値が 0.7 以下の場合、固結層が存在し根系の発達が妨げられる可能性のある基準とされている (日本造園学会緑化環境工学研究委員会 2000)。本章では S 値 0.7 以下の地点を固結層の存在とし、土壌硬度の特性として示した。固結層の定義は、10 回連続して S 値が 0.7 以下となる場所とし、最も表層に近い固結層の深さを固結層深として地下部特性に用いた。

さらに地下部特性として、対象木の根鉢半径を測定した。今回取り扱う根鉢とは、既存の文献 (Coutts 1986; 苧住 2010) に従い、立木の倒伏する際に根系と土壌が密着した状態で鉢状となっている状態のことと定義した。本試験では、対象木が完全に根返りを起こす状態までは引き倒さないため、根の水平方向の広がり指標として、根鉢半径を使用した。引き倒し時に根系が地面を持ち上げることで地面の亀裂が生じ、この亀裂が根鉢の縁であることが示唆されている (Coutts 1986)。したがって本章における根鉢半径は、引き倒し方向と反対側の根系に生じる根鉢の縁から対象木の中心までの距離と定義した。測定箇所は対象木 1 本につき 10 カ所とし (図 2-2 a)、10 カ所の平均値を算出した。

2-2-3 引き倒しモーメント発現時の回転中心の深さ (Dcp)

地下部特性の一つである対象木の回転中心 (Cp) の位置および地表面からの深さ (Depth at the center point of rotation, Dcp) を推定するため、対象木の横にビデオカメラを設置した。ビデオカメラのレンズ角度は、引き倒し方向と直交する角度とし、対象木の根元が撮影できる距離に離して設置した。あらかじめ対象木の幹表面には根元から 1 m の高さまで 20 cm 間隔で直線状に印をつけ、ビデオ画像により対象木の位置変化を追えるようにした (図 2-2 b)。

撮影した画像から Cp の位置、地表面からの深さ Dcp を推定する方法としては、傾斜

線公会法 (森岡 1983)を用いた。画像処理ソフトにおいて試験開始時画像と試験終了時画像を重ね合わせ、各画像中の対象木の幹に付けられた印を直線的に結び地面方向に延長させ、試験開始時の直線と試験終了時の直線が交差したところを C_p とした。この C_p から地表面までの距離を D_{cp} とした (図 2-2)。傾斜線公会法は、幹のたわみが大きい場合や対象木が引き倒し試験時に横移動をする場合には誤差を生じる可能性があるが (森岡 1983)、本試験では対象木の直径が比較的大きくワイヤー高が低いことから、このたわみの影響は少なく、画像判定で横移動がほとんどみられなかったため、この方法を採用した。

2-2-4 統計解析

対象木の地上部特性、地下部特性と引き倒しモーメントとの関係を調べるため、Kolmogorov-Smirnov test を使用してデータの正規性を確認し、Pearson's correlations test および共分散分析 (ANCOVA)を行った。また、引き倒しモーメントに関与する根鉢特性が間伐の有無により変化するかどうかを検討するため、一般化線形モデルを構築した。根鉢特性は根鉢半径と D_{cp} とし、根鉢半径および D_{cp} を応答変数、説明変数候補としては地上部特性である DBH、H、立木間距離および地下部特性である固結層深を使用した。立木間距離は間伐の有無を示す変数として使用した。樹冠幅および樹冠長、樹冠長率は立木間距離と高い相関をもち ($r > 0.50$)、多重共線性が疑われるため説明変数候補から除外した。モデル選択方法としては AIC (赤池情報量基準)が最も小さいモデルを選出した。使用した分布は正規分布で、使用したリンク関数は、根鉢半径モデル、回転中心モデルともに identity とした。これらの解析には R (ver 3.6.2) (R Core Team 2017)を使用した。

2-3 結果

2-3-1 引き倒しモーメントと地上部特性との相関

引き倒し試験を行ったスギ対象木は、間伐区、対照区 (無間伐)ともにすべての個体で幹折れを起こさず、根返りの挙動を示した。対象木の地上部特性の値は表 2-1 のとおりである。間伐区と対照区でスギ対象木の胸高幹直径 (DBH)に差異が見られないが、樹高 (H)に有意差がみられた (表 2-1)。間伐の有無にかかわらず立木の体積の指標である $H \times DBH^2$ および DBH との相関が高かった ($H \times DBH^2$: $r = 0.85$ (間伐区)、 $r = 0.88$ (対照区)、DBH : $r = 0.84$ (間伐区)、 $r = 0.84$ (対照区)、表 2-1)。引き倒しモーメントには H や樹冠幅とも正の相関がみられたが、 $H \times DBH^2$ や DBH との関係ほど強い相関はみられなかった。形状比との関係には負の相関がみられた。引き倒しモーメントと樹冠長および樹冠長率との関係には一部で弱い相関がみられた (表 2-1)。

最も相関関係の高かった引き倒しモーメントと $H \times DBH^2$ の関係について共分散分析

を行ったところ、間伐の有無により関係式の傾きが有意に異なり ($P < 0.05$ 、図 2-3)、同じ立木サイズでは、間伐区におけるスギで対照区よりも引き倒しモーメントは高いことが明らかとなった。

2-3-2 引き倒しモーメントと地下部特性との相関

引き倒し試験時に見られた根系の土壌を持ち上げることによるの地表面の亀裂は、すべて引き倒し方向の反対側に見られた。根鉢半径は、間伐区で 111.60 ± 16.60 cm、対照区で 103.82 ± 15.62 cm となり、平均値に有意差がみられた (Student's t-test、 $P < 0.05$ 、表 2-1)。根鉢半径と引き倒しモーメントの間には正の相関 (間伐区： $r = 0.74$ 、 $P < 0.001$ 、対照区： $r = 0.46$ 、 $P < 0.05$) がみられ (表 2-1)、引き倒しモーメントが大きくなるほど根鉢サイズが大きくなることがわかった (図 2-4a)。

土壌の固結層は、間伐区 20 箇所、対照区 21 箇所のうち、表層から 20 cm 未満の深さに間伐区で 1 箇所、深さ 20 cm 以上 40 cm 未満に間伐区で 4 箇所、対照区で 4 箇所見られた。固結層の最も多くみられた深さは 40 cm 以上 60 cm 未満であり (間伐区：9 箇所、対照区 13 箇所)、60 cm 以上の深さに存在した箇所 (間伐区 6 箇所、対照区 2 箇所) もあった。

画像解析から引き倒し時の回転中心の位置を推定したところ、引き倒しモーメント発現時の回転中心は立木のほぼ真下に存在していた。その深さは間伐区で 34.70 ± 8.13 cm、対照区で 32.82 ± 10.38 cm であり (表 2-1)、間伐区では引き倒し抵抗力と弱い正の相関 ($r = 0.49$ 、 $P < 0.05$) がみられた (表 2-1、図 2-4b)。

2-3-3 根鉢半径と回転中心の深さ (Dcp) に対する間伐の影響

根鉢半径の大きさに間伐の有無が関与しているかどうかを検討するため、一般化線形モデルによる説明変数選択を行ったところ、根鉢半径を説明する変数として選択された要因は DBH と立木間距離であり、いずれも正であった (表 2-2)。また、H および固結層深は選択されなかった。

回転中心の深さ (Dcp) に間伐の有無が関与している可能性を一般化線形モデルにて検討したところ、Dcp を説明する変数として H のみが選択され、立木間距離、固結層深、DBH は選択されなかった (表 2-2)。

2-4 考察

2-4-1 スギ林の間伐の有無による引き倒しモーメントの変化

本章では、スギ林における間伐の有無により、引き倒しモーメントと地上部、地下部特性との関係性の変化を調べた (表 2-1)。スギの地上部特性のうち、間伐により樹高 (H) の低下がみられ、間伐個体では無間伐個体よりも樹高成長速度が低いという報告

(正木ら 2013)を支持した。材積を示す樹高 (H)×胸高幹直径 (DBH)²について、間伐の有無による差異は認められなかった。高い相関関係を示した引き倒しモーメントと H×DBH²との関係において、間伐の有無による関係式の変化がみられた (図 2-3)。引き倒しモーメント (y)と H×DBH² (x)の関係式 (y=ax)の傾き (a)は間伐区で 33.61、対照区で 26.79 となり、その傾きの比は 1.25 となった。これは、立木密度 1,700 本/ha から 728 本/ha に間伐され 17 年経過したスギでは、無間伐の同じ材積を持つスギと比較すると引き倒しモーメントが 25%程度大きくなったことを示している。

間伐により立木密度は低下するが、深見ら (2011)は立木密度が異なるカラマツ (*Larix kaempferi*)林分 (800 本/ha、1,600 本/ha、2,000 本/ha)において、引き倒しモーメントと DBH の関係式が有意に異なることを明らかにした。すなわち間伐されたカラマツは、無間伐の同じ DBH を持つカラマツに比べて引き倒しモーメントが大きくなったことを示した。アカエゾマツ (*Picea glehnii*)において立木密度の高い林分 (2,525 本/ha、1,778 本/ha)と低い林分 (889 本/ha)では、引き倒しモーメントと幹重量の関係式が異なり、立木密度の低い林分で同じ幹重量をもつ引き倒しモーメントが有意に高かった (Urata et al. 2012)。また、林縁木と林内木という生育場所の違いについて、引き倒しモーメントと H×DBH²との関係を調べたカイガンショウ (*Pinus pinaster*)の報告では、関係式の傾きの比が 1.26 (林縁木 a=44.6、林内木 a=33.5)と、立木密度の小さい林縁木における引き倒しモーメントは林内木と比べ 26%程度大きくなることを報告している (Cucchi et al. 2004)。以上の結果は、本章におけるスギ間伐における引き倒しモーメントの増加を支持する。

対照的に、立木密度 2,400 本/ha の林分を 500、1,000、2,000 本/ha に間伐し 14 年後のシトカトウヒ (*Picea sitchensis*)林 (Nicoll et al. 2009)や、8,475 本/ha から 4,200 本/ha に間伐し 15 年後および 6,300 本/ha から 1,200 本/ha に間伐し 10 年後のバルサムモミ林 (Achim et al. 2005)では、いずれも引き倒しモーメントと幹重量との関係に間伐の影響はないことを報告された。すなわち、間伐されたシトカトウヒやバルサムモミでは、幹重量の増加に伴う引き倒しモーメントの増加のみであって、本章のスギや、既報のカラマツ、アカエゾマツでみられた同じサイズ (DBH、幹重量、材積)において間伐による引き倒しモーメントの増加は確認されなかった。

以上のように、間伐および立木密度の違いにより引き倒しモーメントと地上部特性の関係性が異なる理由として、地上部と地下部における成長特性の樹種間の差が示唆される。間伐による立木密度の減少は立木の地上部/地下部比 (T-R 比)を減少させる、すなわち立木密度の低い林分ほど地上部成長を優先させるが、この比の減少程度は樹種間で異なる (荻住 1974)。本章で対象としたスギでは、カラマツ、スギ、アカマツ (*Pinus densiflora*)、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*)の 4 樹種でカラマツに次いで T-R 比が減少しやすい (荻住 1974)。これらの T-R 比の反応の違いが、立木密度の違いや間伐の有無により、引き倒しモーメントと地上部特性との異なる関係を導いた可能性がある。カイガ

ンショウにおける引き倒しモーメントは地上部特性 $H \times DBH^2$ と最も強い関係性を示した (Cucchi et al. 2004)。この報告では、 $H \times DBH^2$ は幹重量と比較して、直接測定する際に誤差の少ない有効な指標であるが、欠点として $H \times DBH^2$ のみでは地下部の特性を説明できないことを指摘している (Cucchi et al. 2004)。したがって、間伐が地上部特性と引き倒しモーメントの関係に影響する要因を明らかにするためには、地上部以外の特性である地下部特性の変化も検討する必要がある。

2-4-2 引き倒しモーメントに対する地下部の寄与の可能性

引き倒しモーメントと地下部特性との関係を解析した既存研究 (Coutts 1986; 野々田ら 1998; Cucchi et al. 2004; 茅島・佐々木 2010; Mattheck et al. 2015) を整理すると、樹木根系の倒伏抵抗としては、根系全体の重量による抵抗、せん断に対する抵抗、風上側の引張に対する抵抗、風下側の圧縮に対する抵抗、土壌の抵抗の 5 つがあるとしている。Coutts (1986) は、特に根系全体の重量による抵抗と風上側の引張に対する抵抗の 2 つの寄与が大きく、その寄与率は 85% 程度と報告している。本章では、この寄与の高い地下部特性である根鉢に着目した。根鉢の指標として、根鉢重量、根鉢の水平方向および垂直方向への広がりがあるが、本章では根鉢の広がりがあることが引き倒しモーメントに関与していることが示唆された。カイガンショウにおいても、引き倒しモーメントの大きい林縁木で根鉢が有意に大きいことが報告されている (Cucchi et al. 2004)。本章では、根鉢半径は間伐の有無を表す立木間距離に有意に影響され、立木間距離が広がるほど根鉢半径が大きくなった (表 2-2)。また、間伐区と対照区では DBH に有意差がみられなかったが、根鉢半径に有意差がみられた (表 2-1)。この要因として、間伐を実施することで水平根の成長が促進されたことが示唆される。個体周囲に多数の隣接木のある場合、水平根の成長は制限されるため、根系の水平分布の範囲は立木密度の低い林分と比較して小さくなる (苅住 2010)。しかし、間伐を実施して水平根成長の阻害となる隣接木を取り除くと、水平根の成長が良好になることが推測される。トドマツ (*Abies sachalinensis*) では間伐により水平方向の根の広がりがあることが確認されている (佐藤ら 2001)。この報告と樹種は異なるものの、本章におけるスギでも同様の現象により、間伐による水平根の伸長促進が根鉢半径を拡大したものと推察される。また対象とした間伐区および対照区において、対象木から一定距離の地点における土壌垂直断面 1 m^2 当たりの水平根の本数を調べたところ、根直径 5 mm 以上の根の本数に、間伐区と対照区の間には有意差は認められなかった (Yamase et al. 2019)。間伐区では対照区と比較して低い立木密度にもかかわらず、水平根の本数がほぼ同じであるこの結果は、この土壌断面における個体あたりの根の本数は間伐区で多いことを示唆する (Yamase et al. 2019)。この結果からも間伐によりスギ水平根の成長が促進されたことが強く示唆される。

本章では根鉢の垂直方向への広がりについて、引き倒し試験時に推定された回転中心

の深さ (D_{cp})で表せるものとして評価した。本章の結果で回転中心 (C_p)が立木の真下に存在したことで、 C_p が立木の真下にある場合には D_{cp} を根鉢の底部として考えられること (林ら 1998; 野々田ら 1998; 荻住 2010)から、 D_{cp} を根鉢の垂直方向の広がりとした。本章では根鉢の深さに対して間伐の影響を見ると、 H のみが有意に影響を与え、間伐の有無を表す立木間距離は根鉢の垂直方向の広がりには有意な影響を与えなかった (表 2-2)。このことは、間伐の有無によりスギの垂直根の深さが変わらないこと (掛谷ら 2016)を支持する。深さが変わらない理由として、間伐では地下水位の高さや岩盤の高さといった垂直根の成長を妨げている要因を取り除くことはできないことが推察される。クロマツ (*Pinus thunbergii*)の稚樹では、立木密度の地下部に対する影響は、垂直方向よりも水平方向の広がりの方が大きいことが報告されている (荻住・寺田 1963)。一方で間伐に伴う H の低下 (表 2-1)が根鉢の垂直方向への広がりには影響を与えた可能性もあるが、間伐区と対照区で D_{cp} に差異が無いこと (表 2-1)から、その影響は小さいものと推察された。

引き倒しモーメントの増大に関与する、根鉢以外の地下部特性のうち、根系の緊縛力に関与するものとして、根量や根系構造が考えられる。根量が引き倒しモーメントに関与することは多くの報告があり、特に引き倒す方向と反対側の根系の寄与が大きいとされている (Coutts 1986; 野々田ら 1998)。引き倒し試験における引き倒しモーメントでは、引き倒しと反対の方向に伸びる根の引張力の合力が大きな役割を果たしている (野々田ら 1996)。根の引張力は1本の根を引き抜く抵抗力 (引き抜き抵抗力)であり、これは根の直径と強い正の相関があることが知られている (伴ら 2009; 今井ら 2009)。間伐の実施に伴う水平根の直径成長の増加 (佐藤ら 2001; 伴ら 2009; 今井ら 2009)は、間伐が根の引き抜き抵抗力の増加を導くことを示唆している。樹木の根系が表層崩壊など災害を防ぐ役割を見た既存研究では、垂直根に比べ水平根の役割が過小評価されてきた (木下ら 2013)ものの、近年、水平根の働きの重要性が報告されている (北原 2010; 木下ら 2013)。本章では、引き倒しモーメントに水平根の成長が重要な役割を果たす可能性を示した。今後さらに、引き倒しモーメントと水平根の分布、緊縛力、体積といった指標との関係性を検討する必要があるだろう。また、根鉢の広がりや重さ (Tanikawa et al. 2021)などを測定することにより、さらに根系に特性に関するデータを得ることで、引き倒しモーメントに与える根系の寄与度を明らかにできるであろう。

表 2-1 Average of above- and below-ground traits and Pearson's correlation between critical turning moment and each trait.

traits of test trees	thinning			control			t-test
	Ave.	SD	r	Ave.	SD	r	
above-ground traits							
DBH (cm)	31.09	3.86	0.84 **	28.45	4.66	0.86 **	n.s
H (m)	20.68	1.88	0.62 **	21.92	1.78	0.59 **	*
H×DBH ² (m ³)	2.06	0.63	0.85 **	1.85	0.75	0.88 **	n.s.
Slenderness ratio	66.95	5.61	-0.48 *	78.30	9.43	-0.68 **	***
Crown width (cm)	306.45	44.20	0.55 *	186.83	34.59	0.53 *	***
Crown length (m)	8.20	1.39	0.42 n.s.	6.22	1.25	0.27 n.s.	***
Crown length /H (%)	39.41	4.09	0.45 *	28.26	4.69	0.37 n.s.	***
Distance between trees (m)	2.96	0.63	0.24 n.s.	1.78	0.22	-0.20 n.s.	***
below-ground traits							
Root-soil plate radius (cm)	111.60	16.60	0.74 ***	103.82	15.62	0.46 *	*
Depth at center point of rotation (cm)	34.70	8.13	0.49 *	32.82	10.38	0.22 n.s.	n.s.

DBH: diameter at breast height, H: tree height, Slenderness ratio: H (m)/ DBH (m),

SD: standard deviation

r: Pearson's correlation coefficients between critical turning moment and each trait.

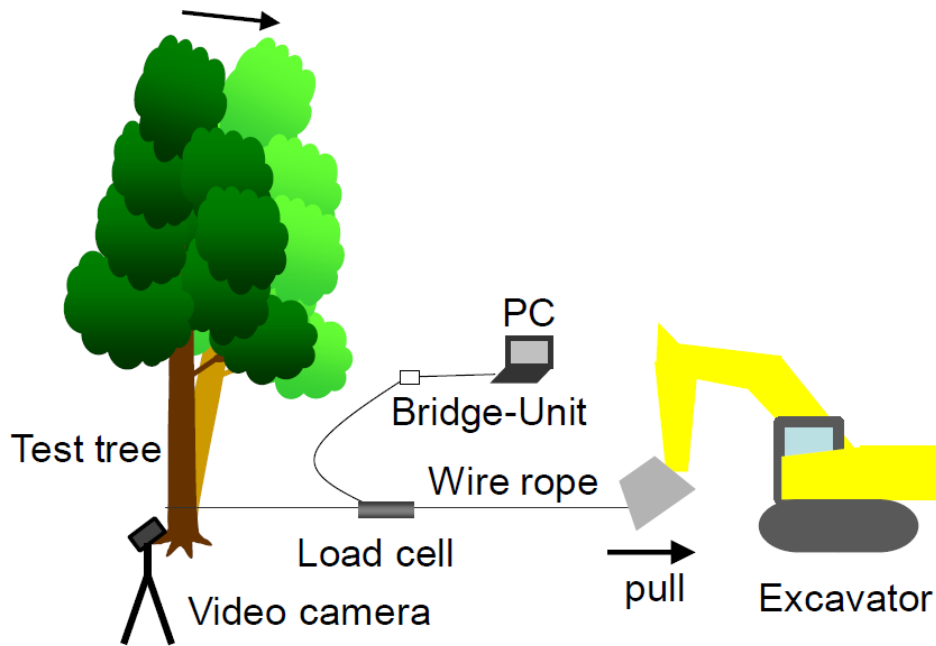
*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, n.s. $P > 0.05$

t-test: Student's t-test or Welch's t-test for each trait between treatments of thinning and control.

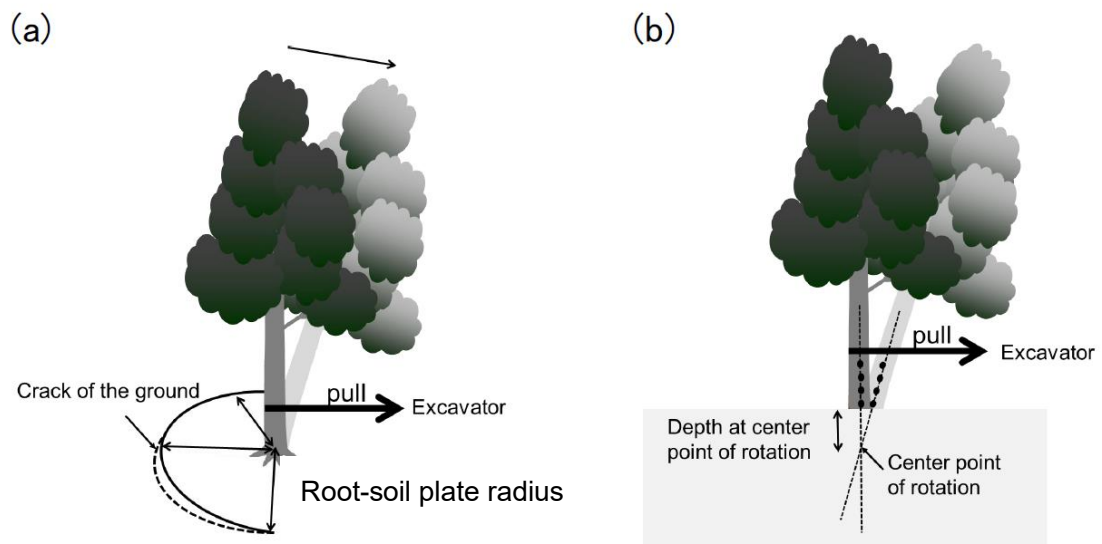
*** $P < 0.001$, * $P < 0.05$, n.s. $P > 0.05$

表 2-2 Explanations variable that were chosen by Generalized Linear Model.

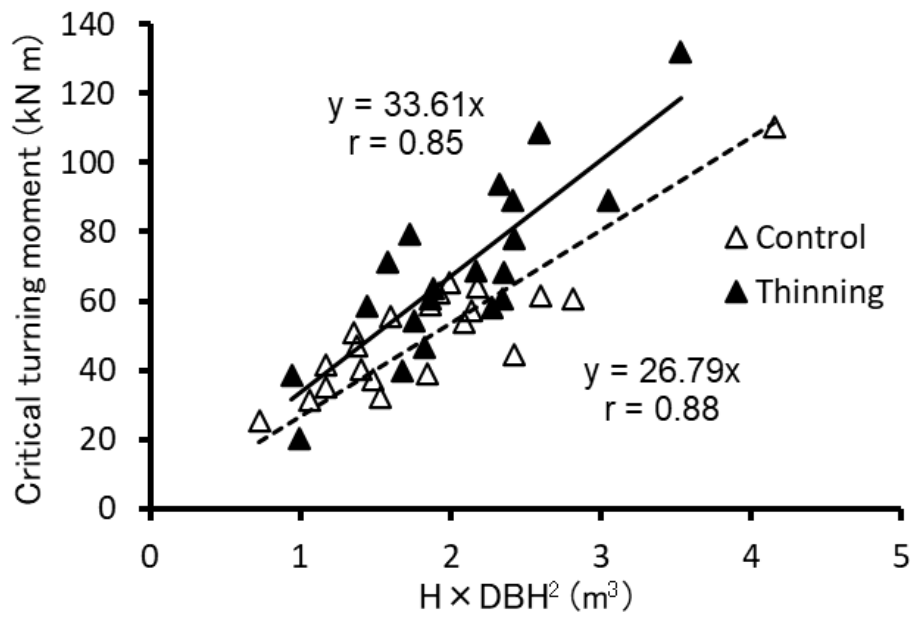
Response variable	AIC	Explanatory variable	Estimate	<i>P</i> -value
Root-soil plate radius	294.30	DBH	1.0970	<i>P</i> < 0.001
		Distance between trees	4.9482	<i>P</i> < 0.01
Depth at center point of rotation	289.12	H	1.9723	<i>P</i> < 0.01



☒ 2-1 Tree-pulling experiments.



☒ 2-2 Measuring method of the root-soil plate radius (a) and of the depth at the center point of rotation (b).



☒ 2-3 Relationships between the critical turning moment and $H \times DBH^2$ (ANCOVA $P < 0.05$). All regression lines are fitted through zero.

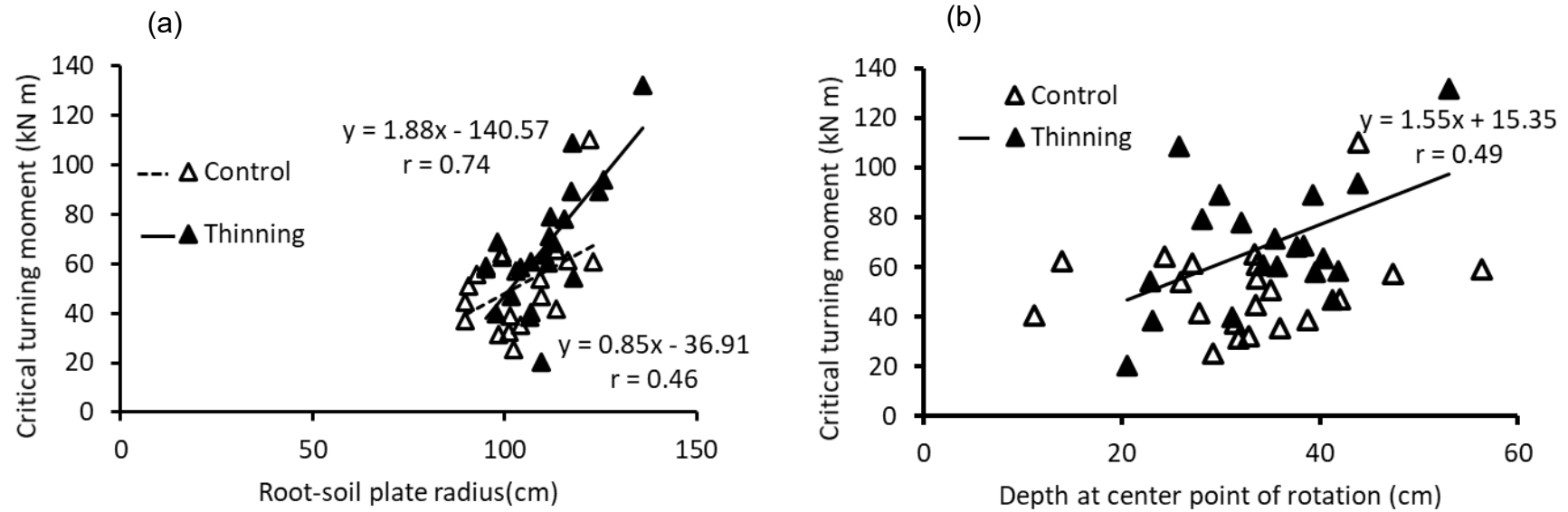


图 2-4 Relationships of the critical turning moment with root-soil plate radius (a) and with the depth at center point of rotation (b) of *Cryptomeria japonica*.



写真 2-1 The study site of *Cryptomeria japonica* stand where 17 years passed after the treatment of thinning (the thinning plot).



写真 2-2 The study site of *C. japonica* stand where 17 years passed after without thinning (the control plot).

3章 樹木の垂直根の成長が引き倒しモーメントに与える影響

3-1 垂直根の深さに関する評価指標の検討

3-1-1 はじめに

樹木の倒れにくさである倒伏抵抗力を示す引き倒しモーメントには、根の構造、根の最大深さ、根と土壌が密着した状態である根鉢の大きさや深さなど地下部の特性も影響する (Coutts 1986; Ray and Nicoll 1998; Moore 2000; Peltola et al. 2000; Cucchi et al. 2004; Nicoll et al. 2005, 2006; Lundström et al. 2007b; Nicoll et al. 2008; Yang et al. 2017)。スギ (*Cryptomeria japonica*)では間伐の有無によって同じ材積であっても引き倒しモーメントに異なりを生じ、間伐されたスギの根鉢直径は無間伐のスギよりも大きくなった (2章、藤堂ら 2015)。この結果は、引き倒しモーメントを評価するにあたり必ずしも地上部特性だけでなく地下部特性も検討する必要性を示唆する。したがって、引き倒しモーメントの測定及びメカニズムを評価するにあたり、地下部特性も同時に測定することは重要である。

しかし野外の森林環境において、根系など地下部特性の測定は容易でない。特に深さ方向の地下部特性を取得するためには、引き倒し試験時に樹木を完全に根返りさせて根鉢の深さを測定したり、破壊的な掘り取り調査を行う必要がある。根鉢の深さは、根の最大深さよりも浅い (Nicoll et al. 2005)。地下部の深さ方向の指標の一つである樹木の根の最大深さは樹種特性、硬い岩盤の存在や地下水位の高さに影響を受ける (Yang et al. 2017)。泥炭地では冬季の地下水位が低いほど46年生のシトカトウヒ (*Picea sitchensis*)の根系深さが深く、引き倒しモーメントが強くなった (Ray and Nicoll 1998)。マツ属においては垂直根の最大深さが引き倒しモーメントに強く影響する (Yang et al. 2017, 2018)。また浅い根と同じ幹体積を持つ深い根のシトカトウヒは10-15%引き倒し抵抗が増加した (Nicoll et al. 2006)。モデル的な根系を仮定した樹木の倒伏抵抗力のシミュレーションでは、垂直根の存在するモデル根系で引き倒しモーメントが大きい (Dupuy et al. 2005)。これらのことから、樹木の倒伏抵抗に関する地下部特性として、根系の最大深さを推定することは重要である。

根系の最大深さの測定には破壊的に掘り起こす必要があるが非破壊的もしくは間接的に推定することができれば、倒伏抵抗の予測がこれまで以上に進み、強風や津波に対する樹木の減災効果の評価が可能となる。荻住 (1974)はスギの根の最大深さは、地上部材積を示す樹高 (H)×胸高幹直径 (DBH)² との強い関係性を示すものの、アカマツ (*Pinus densiflora*)ではこの関係性を示さないと報告している。クロマツ (*Pinus thunbergii*)では、東日本大震災以降、引き倒し抵抗や根の最大深さの報告 (Hirano et al. 2018; Ono et al. 2018; 新田ら 2021)が増えつつあるが、このような関係性の試みはされていない。

深さ方向の地下部特性を間接的に推定する指標として、引き倒し時の回転中心を示す地表面からの深さ (Depth at the center point of rotation, Dcp)が提案されている (森岡 1983, 1984; 野々田ら 1996; 藤堂ら 2015; 島田・野々田 2017; Okada 2019)。架線集材時にワイヤーロープの支柱として用いる立木にかかるモーメントは、力×長さで検討することができる(森岡 1983)。この指標は、モーメント算出のための長さを検討するために、ワイヤーロープの横荷重に対する立木の回転中心の深さを推定したことから考案された(森岡 1983)。

この方法の利点は、樹木の引き倒し試験開始から引き倒しモーメントを示す直後—この時点ではまだ完全な根返りはしていない—までの間、対象木を側面から画像撮影することで比較的短時間に算出できること (森岡 1983; 藤堂ら 2015)、また完全な根返りを必要としない点である。Dcp の算出には、根鉢が根鉢の外側土壌との境界面に沿って回転することから (苅住 1979)、横荷重を受けた立木は樹幹中心線上の一点を中心として回転することが仮定されている (森岡 1983; 野々田ら 1986)。しかし Dcp が根の最大深さを表しているかを実際の掘り取り等により検証した例はほとんどない。さらに引き倒しモーメントの関係性の検証も限られている (2章、藤堂ら 2015; 島田・野々田 2017)。また Dcp の算出にはビデオカメラによる画像解析を使用しているが、2章で報告した Dcp はカメラのレンズの歪みを十分に考慮していない。したがって、カメラレンズの歪みがどの程度 Dcp の変動に影響するのかを明らかにしておく必要もある。また Dcp は回転中心 (Cp)の変位が収束する位置と考えられ、Dcp の報告された研究では (森岡 1983, 1984; 野々田ら 1996; 藤堂ら 2015; 島田・野々田 2017; Okada 2019)、収束した回転中心の深さのみを報告し、それらの変位については明らかにされていない。Dcp を根の最大深さ指標として用いるためには、Cp の変化過程とともにどの時点での Dcp を指標とすべきかを明らかにする必要がある。

本節の目的は、樹木の引き倒し試験において (i)回転中心深さ Dcp が引き倒しモーメントの予測指標となるかどうか、(ii)Dcp が根の最大深さの間接的な指標となるかどうか、その時回転中心 Cp はどのような変動をするのか、を明らかにすることである。本節では、津波や風害が予測される海岸の砂質土壌に生育する温帯のクロマツ林 (田中ら 2017; Hirano et al. 2018)を対象とした。特に引き倒し試験による回転中心深さと、掘り取りによる根系最大深さおよび引き倒しモーメントとの関係性を検証することとした。さらに様々なクロマツ林におけるデータとともに地上部特性と根系の最大深さの関係性も検討した。

3-1-2 材料と方法

3-1-2-1 回転中心の深さ (Dcp)の考え方

森岡 (1983) で報告された外力を受けた樹木における回転中心の深さ (Dcp)の理論は

以下の通りである。横荷重を受けた立木が倒伏する際、立木は根鉢と外側土壌との境界面に沿って回転するため (荻住 1979)、比較的小さな傾き θ 範囲では、樹幹中心線またはその延長線上の 1 点を中心として回転するものと仮定する (図 3-1-1 a)。また荷重による立木全体の横移動が十分に小さく、根元近くの樹幹の曲がりは無視できるほど小さいことを仮定した。測点 P_1 、 P_2 は、無負荷時の供試木の幹の中心を通る垂直な直線上に、地表からの高さを変えて設定した。横方向の力の負荷後、測点の新しい位置である P_1' 、 P_2' を計測すれば、 P_1 と P_2 を通り、 P_1' と P_2' を通る線が回転中心 (C_p) で交わり、地表から C_p までの深さを回転中心の深さ D_{cp} と定義した (図 3-1-1 a、森岡 1983)。

森岡 (1983) は、胸高幹直径 (DBH) 6 cm から 21 cm のスギでは D_{cp} が 13 cm から 52 cm であることを示し、この範囲は根鉢の深さを反映している可能性がある結論づけた。野々田ら (1996) は引き倒し試験中におけるヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) 樹幹の変位は、引き倒し前の樹幹直下 1 点を回転の中心として傾いていくことを森岡 (1983) と同様に実証した。Kamimura et al. (2012) は、横荷重を受けたヒノキの横移動は数 mm 程度であり、無視できるほど小さいことを報告し、森岡 (1983) の上述した仮定を支持している。

3-1-2-2 調査地

調査地は愛知県田原市の渥美半島西端部の海岸に 8 km ほど続く海岸クロマツ林 (坂本ら 2013; 田中ら 2017; Hirano et al. 2018) である。調査地周辺のクロマツ林は 1959 年の伊勢湾台風により大きな被害を受け、それ以降に再造林された林分である (坂本ら 2013)。土壌は砂質で未熟土であり、Regosols に分類され (FAO-UNESCO 1990)、1981 年から 2010 年までの年平均気温は 16.0°C、年平均降水量は 1602.6mm である (気象庁 2019)。調査地付近の地下水面の高さは、汀線から内陸に向かってほぼ一定であるが (田中ら 2017)、標高は汀線から内陸に向かって高くなっているため、地表面からの地下水位は内陸に向けて深くなっている。

本研究では調査地内に設置した 3 つの調査区を対象とした (図 3-2-2、田中ら 2017; Hirano et al. 2018)。比較的汀線に近く (汀線からの距離 : 188 m から 199 m) クロマツの平均樹高 (H) の高い区を Plot A (400×15 m、田中ら 2017)、比較的汀線に近く (汀線からの距離 : 189 m から 261 m) クロマツの平均 H の低い区を Plot B (120×180m)、最も汀線からの距離の遠い (679 m から 734 m) 区を Plot C (170×120 m) とした (図 3-1-2)。Plot B と Plot C は愛知県栽培漁業センター (34°38'N、137°03'E) 内である。Plot A の海拔は 0.88 m から 1.42 m、Plot B の海拔は 0.48 m から 1.61 m、Plot C の海拔は 1.88 m から 2.83 m である。クロマツの平均樹齢は 45 年であり、クロマツの立木密度は、Plot A で最も低く 100-200 本/ha であり、Plot B で 200-400 本/ha、Plot C では 400-1000 本/ha と最も高かった。

3-1-2-3 クロマツの引き倒しモーメント及び垂直根の最大深さの測定

引き倒しモーメントと D_{cp} および根の最大深さの関係を検討するため、3つの Plot から計 10 本クロマツの調査木を選出した (表 3-1-1)。

Plot A の調査木 3 本の胸高幹直径 (DBH) と H のデータは田中ら (2017) により、Plot B および Plot C における根の最大深さは、Hirano et al. (2018) で報告されたものを使用した (表 3-1-1)。Plot A の 4 本の調査木の引き倒しモーメント、根の最大深さ、Plot B と C の各調査木の DBH、 H 、 $H \times DBH^2$ 、引き倒しモーメント、およびすべての調査木の D_{cp} と回転中心 C_p の水平・垂直変位のデータを本節で新たに取得して解析した (表 3-1-1)。

選定された調査木は海岸の汀線からの距離 188 m から 734 m に生育し、平均 DBH は 18.8 cm で、Plot 間に有意な差はなかった ($P > 0.05$ 、表 3-1-1)。平均 H は Plot A と Plot C で Plot B よりも有意に大きかった ($P < 0.05$ 、表 3-1-1)。

引き倒し試験は 2 章と同様な方法で行った。対象木の根元から 1 m の高さにワイヤーを掛け、重機を用いて地表面に対して平行に荷重をかけた (図 3-1-3)。引き倒し試験は、重機の荷重がピーク (引き倒し抵抗) に達し下降し始めた時点で測定を中止したため、各個体は完全な根返りまで至っていない。引き倒し試験終了後、Plot A の調査木も、Plot B と C と同様な方法で (Hirano et al. 2018)、エアースコップを用いて全根系を掘り出し、垂直根の最大深さを測定した。掘り取り法の詳細については、Hirano et al. (2018) に記載されており、本節における垂直根の最大深さは直径 2 cm の根が到達した深さとした (Hirano et al. 2018)。なお、Plot B と Plot C における根の最大深の平均値は、 55.8 ± 11.6 cm、 212 ± 19.4 cm であり、この深さの違いは異なる地下水位の高さによるものと報告されている (Hirano et al. 2018)。

3-1-2-4 回転中心の深さ (D_{cp}) および回転中心 (C_p) 変位の測定

引き倒しモーメント発揮時の回転中心深さ (D_{cp}) や回転中心 (C_p) の位置の測定は、2 章と同様に森岡 (1983) の方法を用いた (図 3-1-1 a)。すなわち、引き倒し方向と直行するように対象木の横に設置されたビデオカメラにて、対象木の倒れる様子を最大モーメントが発揮されるまで動画撮影を行った (図 3-1-3)。対象木には根元から 1 m の高さまで幹中心線の表面に 20 cm 間隔で印をつけ、ビデオ画像上で対象木の位置変化を測定した。対象木の横にスケールとして紅白ポールを設置した (図 3-1-1)。

またビデオカメラレンズの歪みについての補正を検討した。ビデオカメラレンズの歪みの補正は Brown (1971) の手法により行った。レンズの歪みを補正するパラメータはフリーソフトである Lens (Agisoft LLC, Russia) を入手して使用した。また各個体の撮影時にカメラ位置は動かしておらず、ズーム機能も使用していない。

C_p の位置の変位の測定には、撮影した動画から 1 秒間隔で静止画を抜き出し、それぞれの静止画において対象木の幹上にある印の xy 座標を抽出した。抽出した印のうち

静止画で確認できた 2 点を通り地中方向に延伸した直線を描いた (図 3-1-1 b, c)。引き倒し試験開始前から引き倒しモーメントの最大値を示すまでの静止画を重ね、引き倒し試験開始前の静止画上の直線とそれぞれの静止画上の直線が交差する位置を C_p と定義した (森岡 1983)。対象木の幹上の印の x 座標および回転中心の地表面と平行方向の水平変位は、引き倒し試験開始時の C_p の位置を 0 として測定した。対象木の印の y 座標や深さ方向の変位は地表面の位置を 0 として測定し、引き倒しモーメントが最大となる時の地表面から回転中心までの鉛直距離である C_p の深さを D_{cp} と定義した (図 3-1-1 c)。 C_p の水平変位や深さは、同時に撮影したスケールを基にピクセル当たりの長さを計測して算出した。なお、引き倒し試験時にワイヤーをかける位置が、地上高 1 m と低いため、立木の幹は剛体と仮定した。画像処理、計測にはオープンソースソフトウェアである ImageJ (Schneider et al. 2012) を使用した。

3-1-2-5 樹高と根の最大深さの関係

クロマツの根の最大深さと H の関係性については、様々なクロマツ林のデータと比較するため、既報 (表 3-1-3、小田 2001; 荻住 2010; Ono et al. 2018; Nanko et al. 2019) で発表されたクロマツの根の最大深さと樹高の値を抽出し解析を行った。既報で図中のみに示されたデータについては、画像解析ソフト Digital Curve Tracer (1.0.0) (<https://www.vector.co.jp/soft/win95/business/se174822.html>) を用いて数値化した。これらの抽出したデータと本節のデータを組み合わせて、クロマツの根の最大深さと H の関係を解析した。

3-1-2-6 データ整理および統計解析

解析に用いたクロマツ根系 10 本の引き倒しモーメント、根の最大深さ、 D_{cp} 、DBH、 H および $H \times DBH^2$ は、Kolmogorov-Smirnov test を使用して正規性を確認した。各特性の Plot 間における差異を検出するために Tukey-Kramer 法を用いた。カメラレンズ補正前と補正後の D_{cp} の差異を調べるために Student's t-test を用いた。また特性間の関係性を調べるため Pearson's correlations test を行った。これらの解析には R (ver. 3.6.2) (R Core Team 2017) を使用した。

3-1-3 結果

3-1-3-1 引き倒し試験時における回転中心 (C_p) の変位

3 つの Plot における引き倒し試験中の回転中心 (C_p) の水平変位 (3.1 cm) は、深さ方向の変位 (28.3 cm) に比べ有意に小さかった (図 3-1-4, 5, 6)。 C_p は、引き倒しモーメントの最大値に達した時、試験木の傾きが大きくなっても横方向にも縦方向にも変位せず (図 3-1-5, 6, 7 a, b)、幹のほぼ真下の 1 点に集中していた (図 3-1

－ 7 c)

3-1-3-2 カメラレンズ補正前、補正後の回転中心深さ (Dcp)

クロマツ試験木 10 本の回転中心深さ (Dcp)は、レンズの歪み補正前に 3.1 cm から 41.3 cm、補正後 5.4 cm から 56.0 cm の範囲であった (表 3-1-1)。カメラレンズ補正前の Dcp は、Plot B で Plot A と C よりも有意に浅かった ($P < 0.05$ 、表 3-1-1)。補正後の Dcp は、Plot C で Plot B よりも有意に深かった ($P < 0.05$ 、表 3-1-1)。カメラレンズ補正前と補正後の Dcp の値に有意な差は見られなかった (Student's t-test、 $P = 0.45$)。

3-1-3-3 引き倒しモーメントと根系の最大深さ

試験木 10 本の引き倒しモーメントは 12.7 kN m から 84.3 kN m の範囲であった (表 3-1-1)。Plot A における引き倒しモーメントの平均値は、Plot B と C よりも有意に小さかった ($P < 0.05$ 、表 3-1-1)。

Plot A における根の最大深さは 44 cm から 126 cm の範囲であり、Plot C よりも浅かった ($P < 0.05$ 、表 3-1-1)。

3-1-3-4 引き倒しモーメントと回転中心深さ (Dcp)、地上部特性および根の最大深さ

10 本の試験木の引き倒しモーメントはレンズの歪み補正前後の Dcp との間に有意な正の相関関係を示した ($r = 0.79$ 、 $P < 0.01$ 、図 3-1-8 a, b)。また引き倒しモーメントは材積指標である樹高 (H)×胸高幹直径 (DBH)² と最も強い正の相関関係を示した ($r = 0.86$ 、 $P < 0.01$ 、図 3-1-9 a)。引き倒しモーメントと DBH との間には有意な関係が見られたが ($r = 0.82$ 、 $P < 0.01$ 、図 3-1-9 b)、H との間には有意な関係は見られなかった ($r = 0.45$ 、 $P = 0.19$ 、図 3-1-9 c)。また、引き倒しモーメントと根の最大深さとの関係は有意であったが ($r = 0.81$ 、 $P < 0.01$ 、図 3-1-9 d)、H×DBH² との関係と比較すると弱かった。

3-1-3-5 根の最大深さと回転中心深さ (Dcp)および地上部特性との関係

根の最大深さと Dcp の間には強い正の相関があり ($r = 0.93$ 、 $P < 0.001$ 、図 3-1-8 c)、レンズの歪み補正前後の Dcp との間にも正の相関があった (図 3-1-10)。Dcp をレンズ歪み補正すると、引き倒しモーメントや根の最大深さとの相関が改善され、さらにその関係性が強くなった (図 3-1-8 b, d)。

根の最大深さは、樹高 H および材積指標 H×DBH² と有意な相関関係を示したが (H : $r = 0.77$ 、 $P < 0.01$ 、H×DBH² : $r = 0.78$ 、 $P < 0.01$ 、表 3-1-2)、DBH との間には有意な相関を示さなかった ($r = 0.42$ 、 $P = 0.23$ 、表 3-1-2)。

本節と既報のクロマツのデータを合わせてみると、根の最大深さと H の間に有意な相関関係が見られた ($r=0.86$ 、 $P<0.01$ 、図 3-1-11)

3-1-4 考察

本節では、クロマツの引き倒しモーメントを予測する際、引き倒し試験で測定される回転中心深さ (D_{cp}) が指標として有効であることを示した。また本節の結果は、引き倒しモーメントが材積指標である樹高 (H) \times 胸高幹直径 (DBH)² の地上部特性と最も密接な関係にあるという既報の報告を支持した (Peltola et al. 2000; Cucchi et al. 2004; Nicoll et al. 2005; Lundström et al. 2007a; Hale et al. 2012)。一方でこの引き倒しモーメントと $H\times DBH^2$ の関係には劣るものの、 D_{cp} と根の最大深さという樹木地下部特性は、その関係性から引き倒しモーメントへの寄与を説明できることを示唆した。したがって、樹木の引き倒し試験で D_{cp} を測定することは、根系を掘り出すよりも少ない土壌の攪乱で根の最大深さを容易に推定できる優れた方法であると言えるだろう。引き倒しモーメントのメカニズムなどを検討するにあたり 2 章で示した根鉢など既報の地下部における寄与要因からも (Coutts 1986)、 D_{cp} という地下部特性の一つを加えることは有効であろう。この D_{cp} の測定法は、樹木の引き倒し試験時にビデオカメラを設置するという比較的簡単であり、室内解析もビデオ画像から推定することができる (森岡 1983; 野々田ら 1996)。

また根の最大深さに関する本節の結果 (図 3-1-9d、表 3-1-2) は、引き倒しモーメントが根の深さに関係するという報告 (Danjon et al. 2005, 2008; Yang et al. 2017, 2018) を支持するものである。根の最大の深さは、通常破壊的な作業により根系を掘り出すことで測定されるが、これには時間と労力がかかり、さらに調査地の土壌を攪乱する。本節では、 D_{cp} が根の最大深さと正の相関関係を現場の実測により初めて示した研究であり (図 3-1-8)、引き倒し試験時の測定において D_{cp} が根の最大深さの指標となることを示した。

2 章や既報で示された D_{cp} の解析ではレンズの歪み補正が十分でなかった。そのため本節ではレンズの歪み補正を行い、補正後の D_{cp} を算出した (図 3-1-8)。レンズ歪み補正前後の D_{cp} を比較すると有意な差はないものの (図 3-1-10)、 D_{cp} と引き倒しモーメント、根の最大深さとの関係性は D_{cp} 補正後に補正前よりも強くなった (図 3-1-8)。この結果から、 D_{cp} を算出する際、カメラレンズの歪み補正を行う方がより根の最大深さを反映することが示唆された。

クロマツ対象木の回転中心 (C_p) は、引き倒し初期段階には地上部も含め比較的浅いところに存在し、水平垂直変位共に初期に大きな変動を見せた (図 3-1-5, 6)。この原因として、引き倒し試験開始時に樹幹のしなりが働いたこと (森岡 1983) が考えられる。引き倒しモーメントが最大値に達した初期段階以降、 C_p は幹の直下の一点に集中しており (図 3-1-5, 6, 7)、このことは、スギ (森岡 1983) やヒノキ (野々田ら

1996)の C_p が幹直下の位置に存在したという結果と一致していた。同様に、Ennos (2000) は樹幹の直下の 1 点を中心に根返りが起きることを報告している。本節の結果ではクロマツの D_{cp} は根の最大深さよりも浅かった (図 3-1-8、表 3-1-1)。苅住 (1979) では C_p は一般的に根鉢の底に位置すると報告している。本節の結果は、根鉢の深さが根の最大深さよりも浅いという報告 (Nicoll et al. 2005) を支持するものであるが、シトカトウヒ (Coutts 1986) で報告された幹の倒伏方向側における根鉢の端に C_p は位置することを支持しない。これは、Coutts (1986) のシトカトウヒでは完全倒伏時の後半段階に着目したのに対し、本節では試験木の完全倒伏前に引き倒しモーメントと C_p を測定したためであると考えられる。これらの結果から、 C_p は倒伏の前半段階では幹の直下に存在するが、後半段階では根鉢の端に移動することが示唆される。Crook et al. (1997) は、板根を持つ *Aglaia affinis* の倒伏の際、 C_p が幹の直下から倒伏方向である風下側の端に移動したと報告している。このことは、クロマツを完全に倒伏させた際に当てはまるかもしれない。これらの結果は、引き倒し試験の初期段階で推定される D_{cp} が根の最大深さの指標となり得ることを示唆する。

本節では、海岸砂質土壌におけるクロマツの C_p の変位に着目した。Fourcaud et al. (2008) は、魚骨型根系 (herring bone root system、1 本の主軸から直接生じた側根をもつもの) を持つ樹木が倒伏した際の C_p の位置を有限要素法でシミュレーションし、粘土質と砂質の土壌で比較した。その結果、倒伏時、粘土質土壌よりも砂質土壌で C_p が風下側に移動しやすく、また垂直根のないモデル根系では D_{cp} が浅くなることが示された (Fourcaud et al. 2008)。これと同様に本節でも C_p の水平方向の変位は引き倒し方向であった (図 3-1-5)。Plot A と C とは対照的に Plot B では地下水位が高くクロマツは垂直根を持たずに水平根を発達させており (Hirano et al. 2018)、本節の結果でも C_p の垂直方向の変位は Plot A と C に比べて浅かった (図 3-1-6)。また、Fourcaud et al. (2008) は、樹木の倒伏耐性に対する垂直根の影響は、粘土質よりも砂質の土壌で高いと報告している。したがって、海岸林に生育するクロマツの倒伏耐性を検討する上で、 D_{cp} を用いて根の最大深さを推定することは有意義であるといえる。一方、粘土質の土壌では、根鉢の底部に存在する C_p は樹木の直下からほとんど動かないため、 D_{cp} は垂直根と水平根を含む幹から根系の先端までの長さに応じて深くなるとしている (Fourcaud et al. 2008)。すなわち D_{cp} および根鉢の大きさは垂直根の深さよりも、水平根と垂直根の長さの比率に依存することを示した (Fourcaud et al. 2008)。したがって、土壌型の違いにおけるクロマツの根の最大深さと D_{cp} の関係も今後、他の土壌型を含めて本節と同様に明らかにする必要がある。

本節の結果から、クロマツの H は根の最大深さを示すもう一つの間接的な指標となり得ることが提案できる。根の最大深さと H の間には有意な正の相関関係が認められた (表 3-1-2)。褐色森林土、火山性堆積土 (苅住 2010)、海岸砂質土 (小田 2001; 苅住 2010; Ono et al. 2018; Nanko et al. 2019) におけるクロマツの H と根の最大深さに関

する既報データを加えると、有意な正の相関関係が確認された (図 3-1-11)。この結果から、クロマツの H は、異なる生息地における根の最大深さを反映していると考えられる。一方、クロマツの H が 10 m 以下になると根の最大深さのばらつきが大きくなった (図 3-1-11)。これは低い H をもつ生育地では、根の最大深さが地下水位 (Hirano et al. 2018) や土壌硬度 (小田 2001; Ono et al. 2018) などの土壌環境によって制限されたためと考えられる。10 m 以下と比較的低い H をもつ 40 年生のクロマツでは、地下水位の高さのため Plot B で垂直根の発達が抑制されていた (Hirano et al. 2018)。いくつかの調査条件下で H との関係を用いて根の最大深さを推定するには、様々な土壌型や土壌特性などの生育地において、さらなる研究が必要である。

表 3-1-1 Age, H, DBH, $H \times DBH^2$, critical turning moment, maximum root depth, and Dcp in the 10 *Pinus thunbergii* trees (mean \pm SE).

Plot	Tree No.	Age (years)	H (m)	DBH (cm)	$H \times DBH^2$ (m ³)	Critical turning moment (kN m)	Maximum root depth (cm)	Dcp before lens distortion correction (cm)	Dcp after lens distortion correction (cm)
Plot A	1	50	11.4	18.5	0.39	33.6	126.0	29.7	39.7
	2	45	10.8 ^a	19.5 ^a	0.41	25.5	106.0	23.3	30.4
	3	40	9.3 ^a	15.9 ^a	0.23	12.7	44.0	17.0	8.4
	4	51	10.1 ^a	16.4 ^a	0.27	16.4	86.0	18.0	18.0
	Mean		46.5 \pm 2.5 ^x	10.4 \pm 0.5 ^x	17.6 \pm 0.9 ^x	0.33 \pm 0.04 ^x	22.1 \pm 4.7 ^x	90.5 \pm 17.5 ^x	22.0 \pm 2.9 ^x	24.1 $\pm$ 6.9^{x,y}
Plot B	1	36 ^b	7.4 ^b	17.0 ^b	0.21 ^b	25.7	75.0 ^b	12.9	18.5
	2	39 ^b	7.1 ^b	22.8 ^b	0.37 ^b	41.2	57.5 ^b	3.1	6.8
	3	44 ^b	4.4 ^b	16.9 ^b	0.13 ^b	17.8	35.0 ^b	5.2	5.4
	Mean		39.7 \pm 2.3 ^x	6.3 \pm 1.0 ^y	18.9 \pm 2.0 ^x	0.24 \pm 0.07 ^x	28.2 \pm 6.9 ^{x,y}	55.8 \pm 11.6 ^x	7.1 \pm 3.0 ^y	10.2 $\pm$ 4.1^{x}
Plot C	1	32 ^b	8.9 ^b	18.7 ^b	0.31 ^b	48.3	175.0 ^b	24.7	35.4
	2	51 ^b	13.8 ^b	18.3 ^b	0.46 ^b	50.4	240.0 ^b	34.7	43.4
	3	58 ^b	11.7 ^b	23.7 ^b	0.66 ^b	84.3	222.0 ^b	41.3	56.0
	Mean		47.0 \pm 7.8 ^x	11.5 \pm 1.4 ^x	20.2 \pm 1.7 ^x	0.48 \pm 0.10 ^x	61.0 \pm 11.7 ^y	212.3 \pm 19.4 ^y	33.6 \pm 4.8 ^x	44.9 $\pm$ 6.0^{y}

DBH: stem diameter at breast height. H: stem height. Dcp: depth at the center point of rotation.

^a Data from Tanaka et al. (2017).

^b Data from Hirano et al. (2018).

^{x,y} Same letters in a column indicate no significant difference among the three plots (Tukey–Kramer method, $P > 0.05$)

表 3-1-2 Pearson's correlation coefficients between maximum root depth and aboveground traits in the 10 *Pinus thunbergii* trees.

	Maximum root depth (cm)
DBH (cm)	0.42 ^{ns}
H (m)	0.77**
H×DBH ² (m ³)	0.78**

DBH: stem diameter at breast height.

H: stem height.

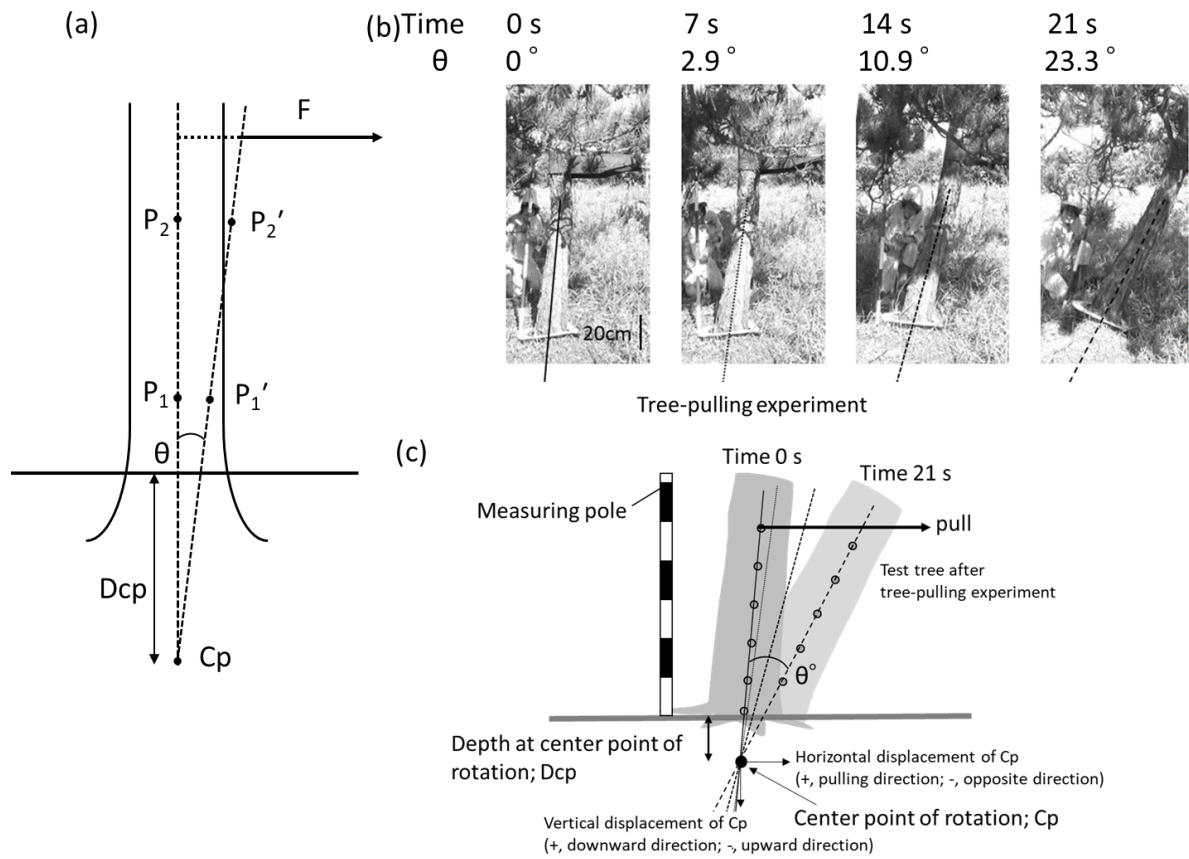
** $P < 0.01$, ^{ns} $P > 0.05$

表 3-1-3 H, DBH, maximum root depth, and soil types in *Pinus thunbergii* trees from previous studies.

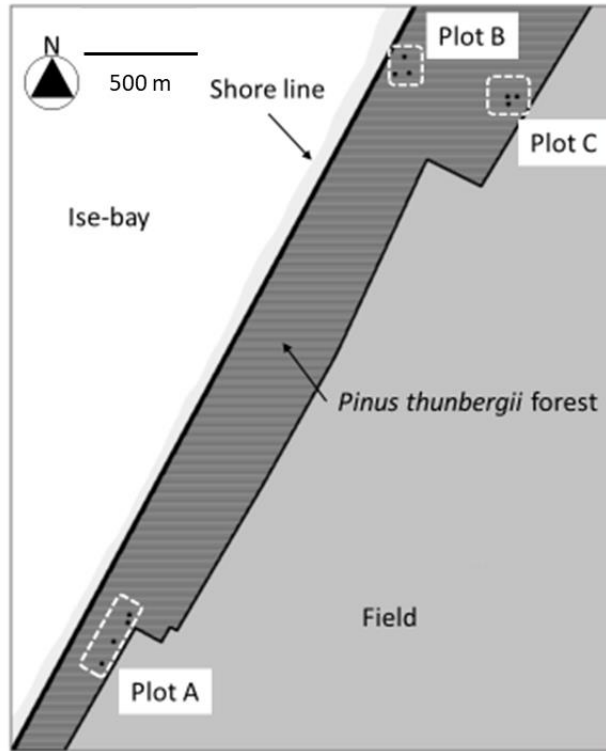
Tree No.	H (m)	DBH (cm)	Maximum root depth (cm)	Soil type	Reference
1	15.0	25.0	230	Volcanic sedimentary soil	Karizumi (2010)
2	16.0	30.0	330	Volcanic sedimentary soil	
3	18.0	34.0	430	Brown forest soil	
4	17.0	24.0	430	Brown forest soil	
5	13.0	30.0	250	Brown forest soil	
6	8.0	24.0	210	Sand	
7	9.0	26.0	60	Sand	
8	4.5	5.2	68	Sand	Oda (2001)
9	4.8	5.5	54	Sand	
10	5.1	6.3	61	Sand	
11	5.3	6.2	76	Sand	
12	5.0	6.3	115	Sand	
13	5.1	5.7	36	Sand	
14	5.8	6.8	46	Sand	
15	6.1	6.5	38	Sand	
16	5.9	9.9	110	Sand	Ono et al. (2018)
17	4.7	13.0	145	Sand	
18	5.4	12.0	123	Sand	
19	14.4	24.5	320	Sand	Nanko et al. (2019)
20	10.5	20.1	190	Sand	
21	11.1	28.5	200	Sand	
22	15.3	30.1	200	Sand	
23	11.7	23.8	240	Sand	
24	14.5	28.4	250	Sand	

H: stem height.

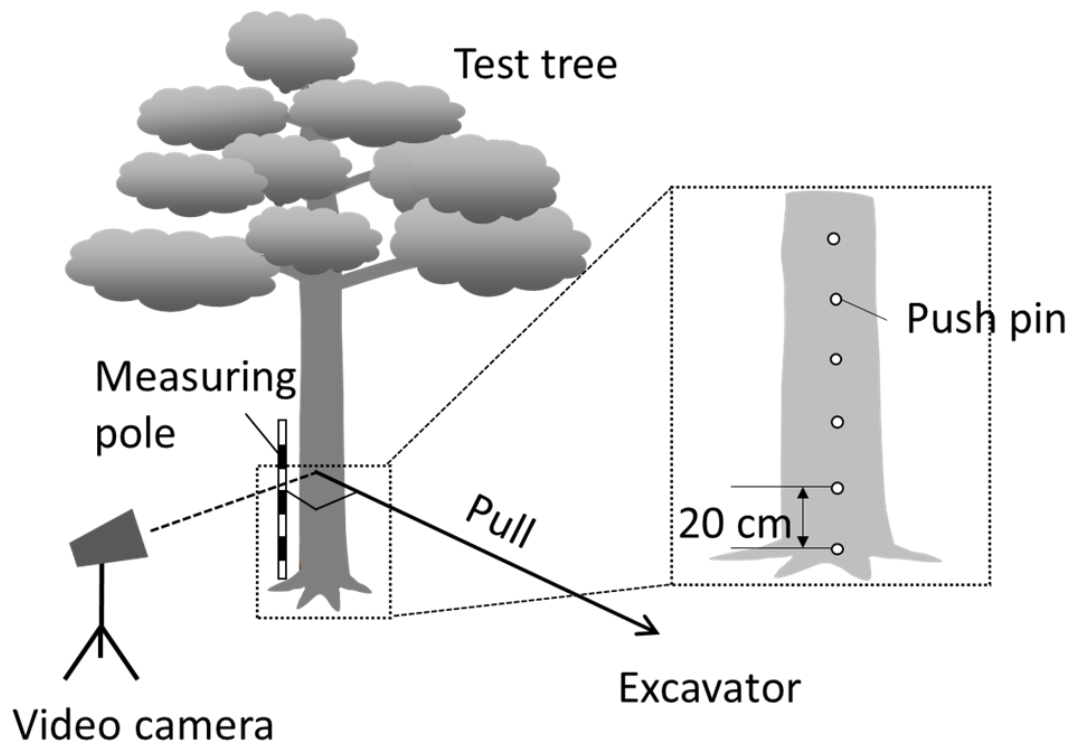
DBH: stem diameter at breast height.



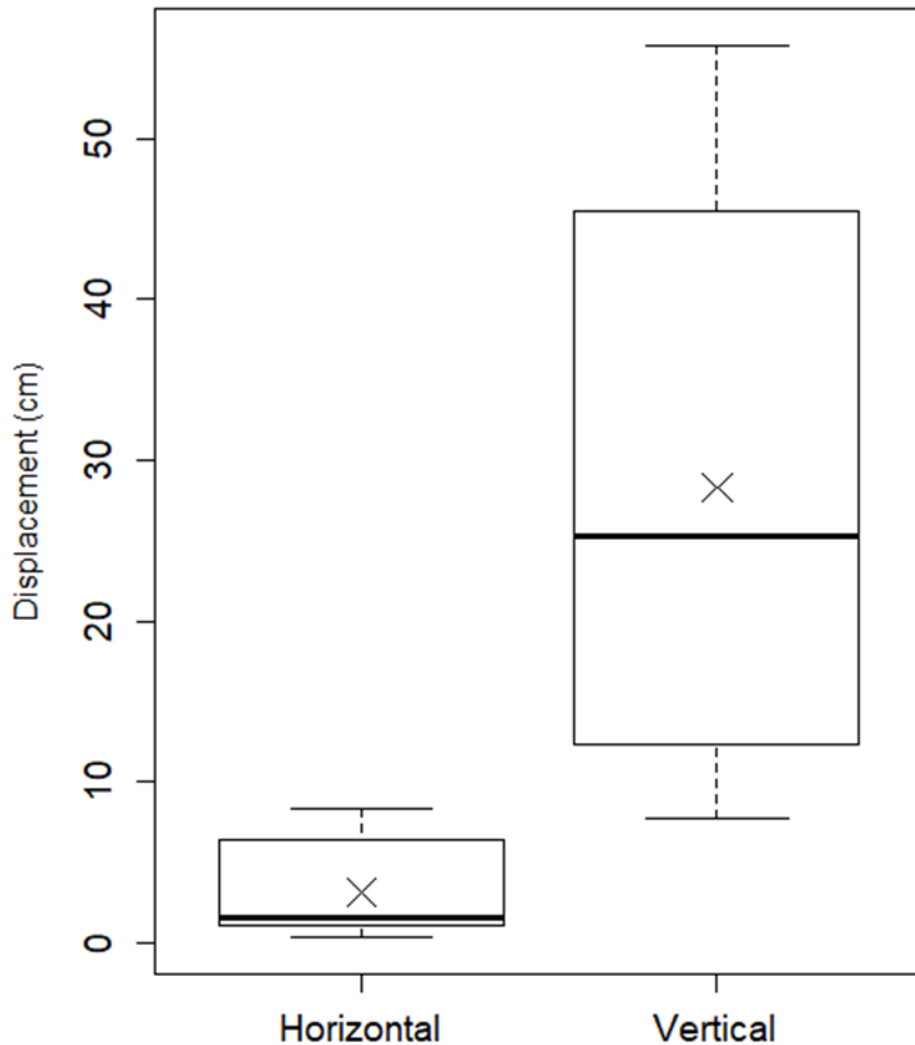
☒ **3-1-1** Measurement method for the center point of rotation (C_p) and depth at the center point of rotation (D_{cp}) during a tree-pulling experiment (modified from Morioka 1983). General scheme (a), tree inclination and positions of straight vertical lines on the stem surface every 7 s (b), and details of the measurements (c).



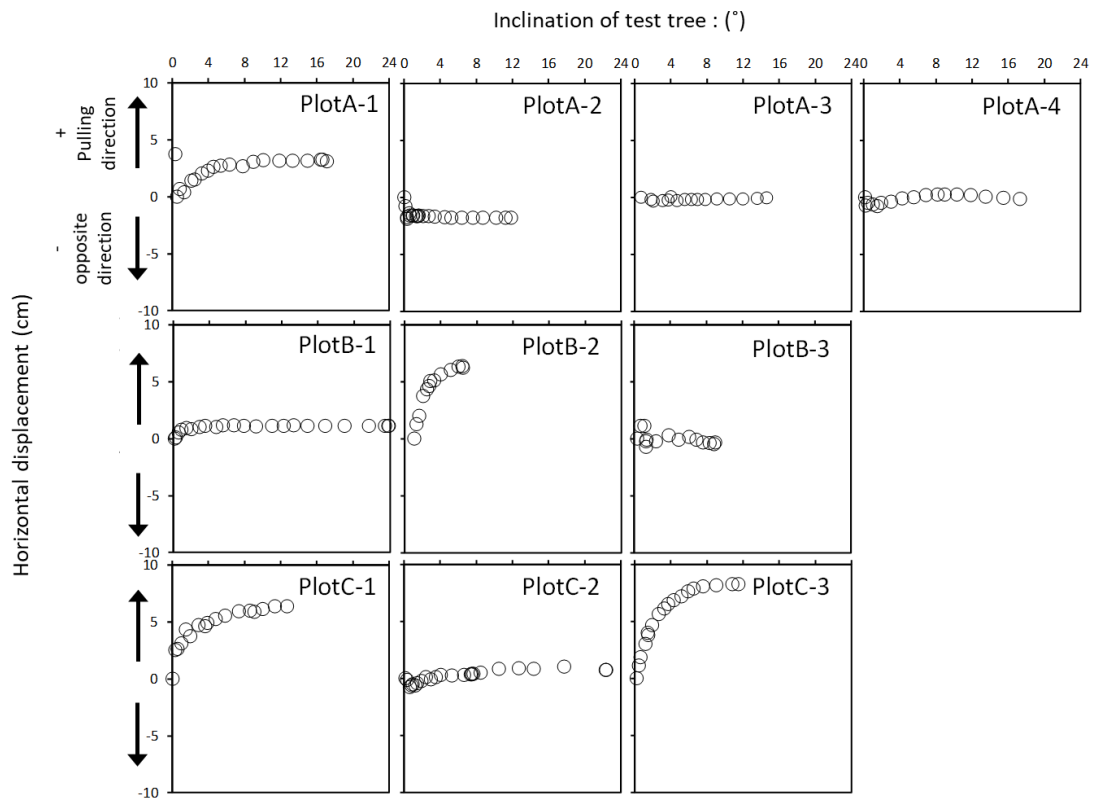
☒ 3-1-2 Location of experimental plots A–C in a coastal *Pinus thunbergii* forest.



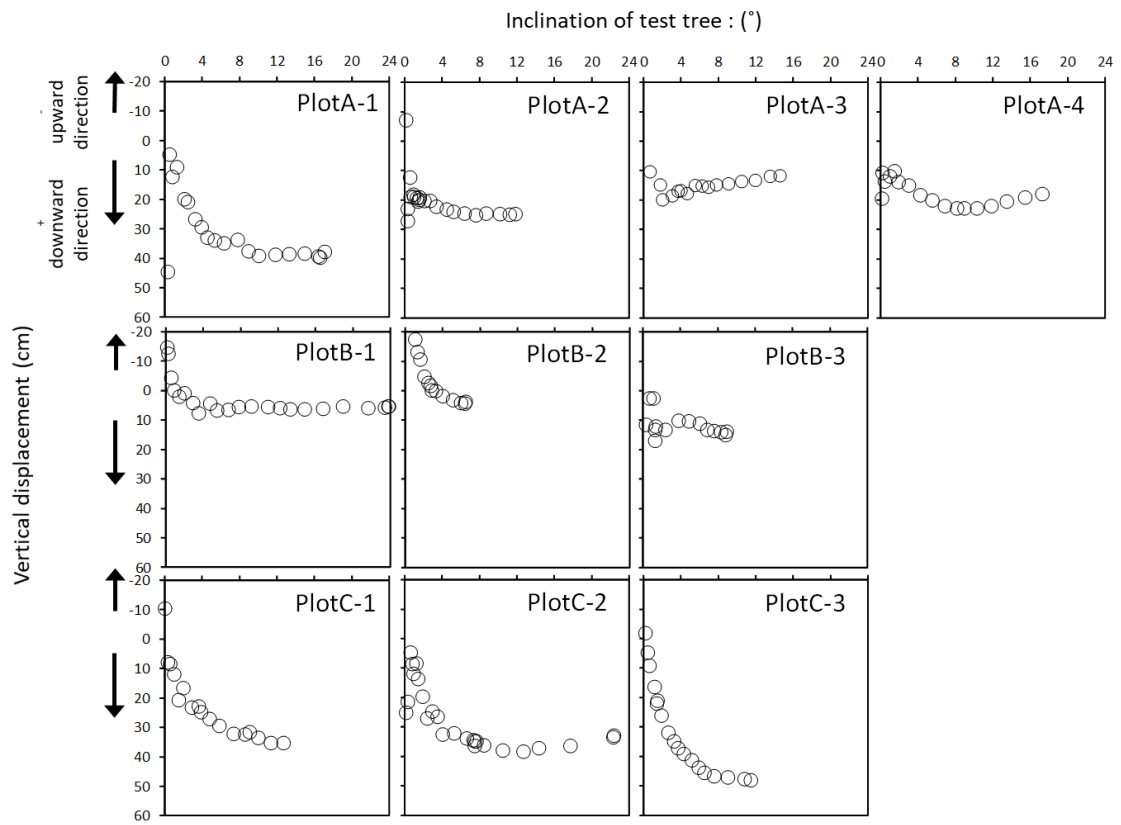
☒ 3-1-3 The video shooting method to measure the depth at the center point of rotation (Dcp) in *Pinus thunbergii* trees in a tree-pulling experiment.



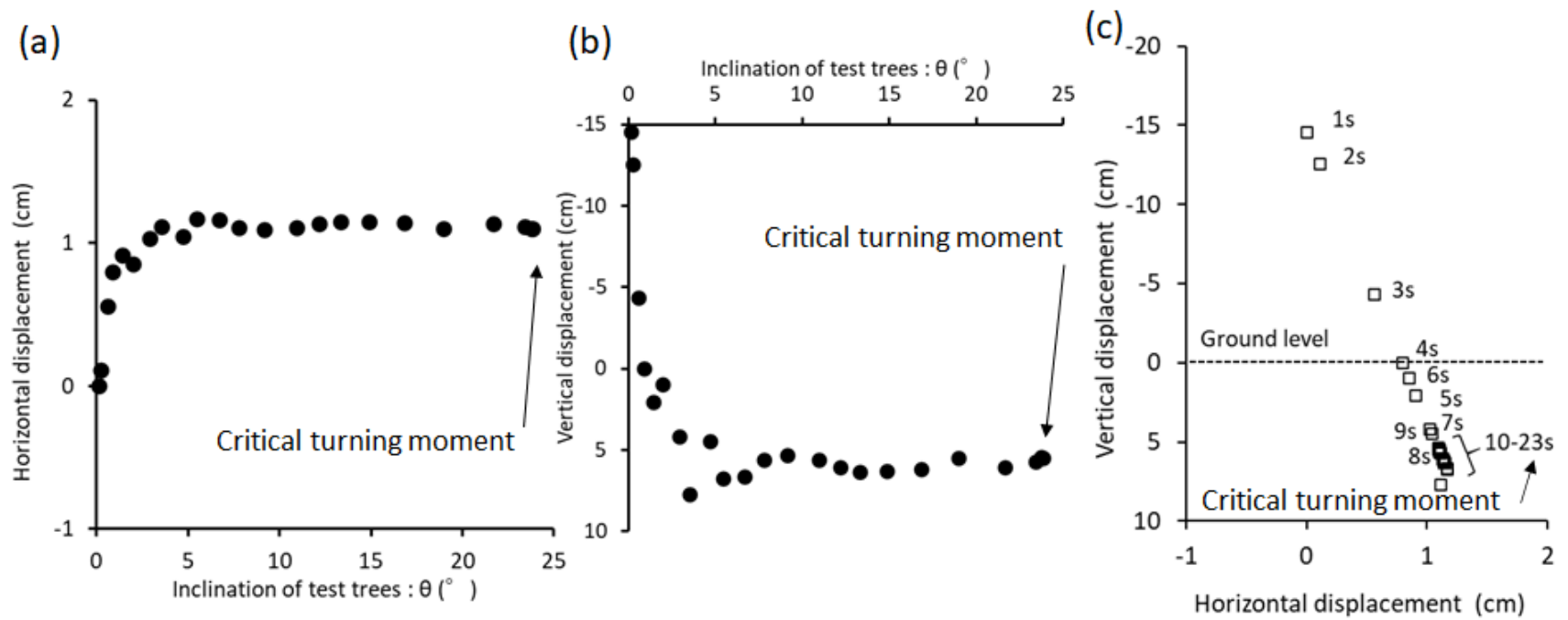
☒ 3-1-4 Box-and-whisker plots of the maximum horizontal and vertical displacements from the beginning of the tree-pulling experiment until reaching the maximum critical turning moment in *Pinus thunbergii* trees. The median value is shown as a horizontal black line inside the box and the first and third quartiles are the bottom and top of the box, respectively. Each line extending vertically from the box represents 1.5 times the interquartile distance. The mean is shown as an x-mark.



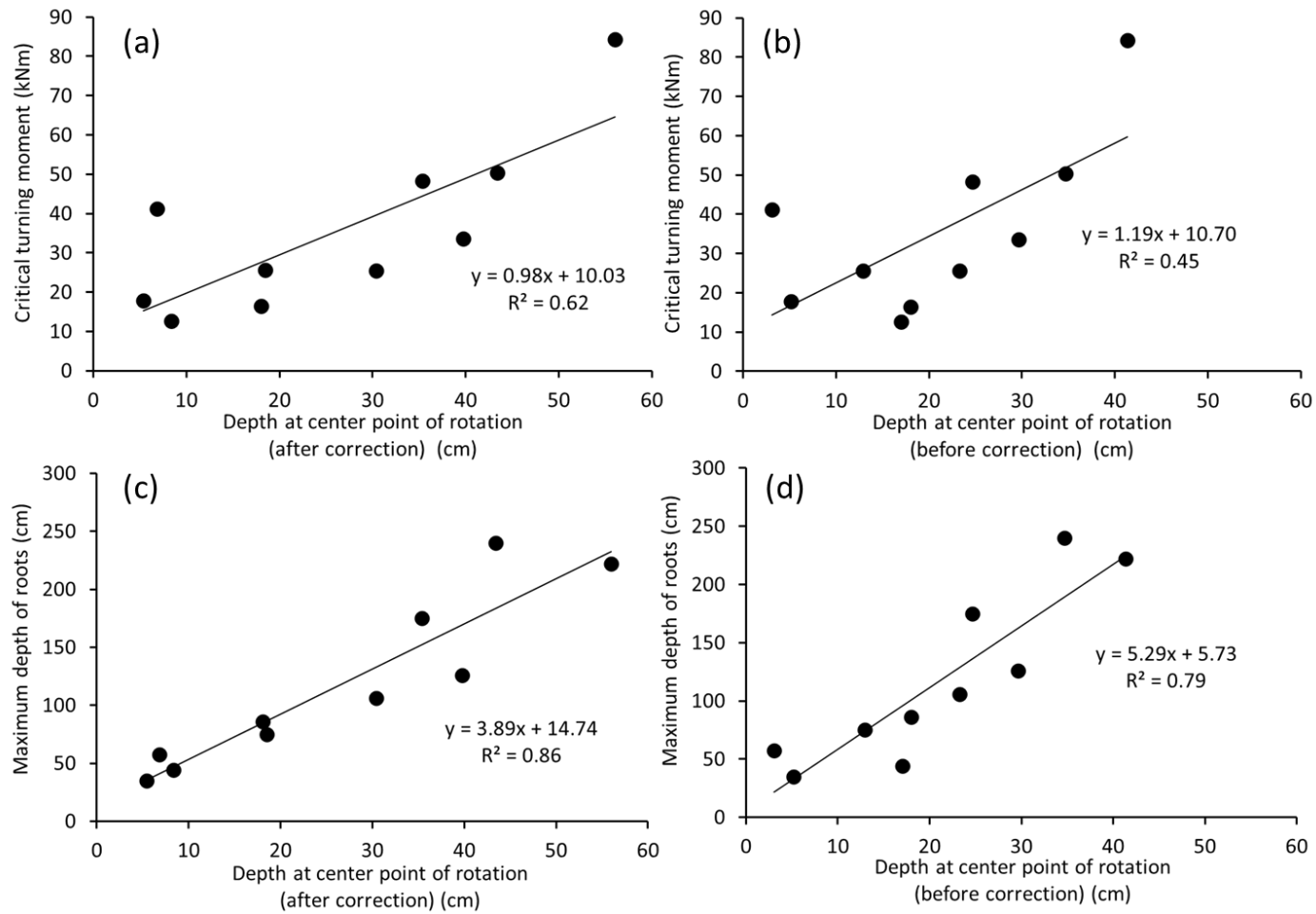
☒ 3-1-5 Relationships between stem inclination and horizontal displacement in all 10 test trees.



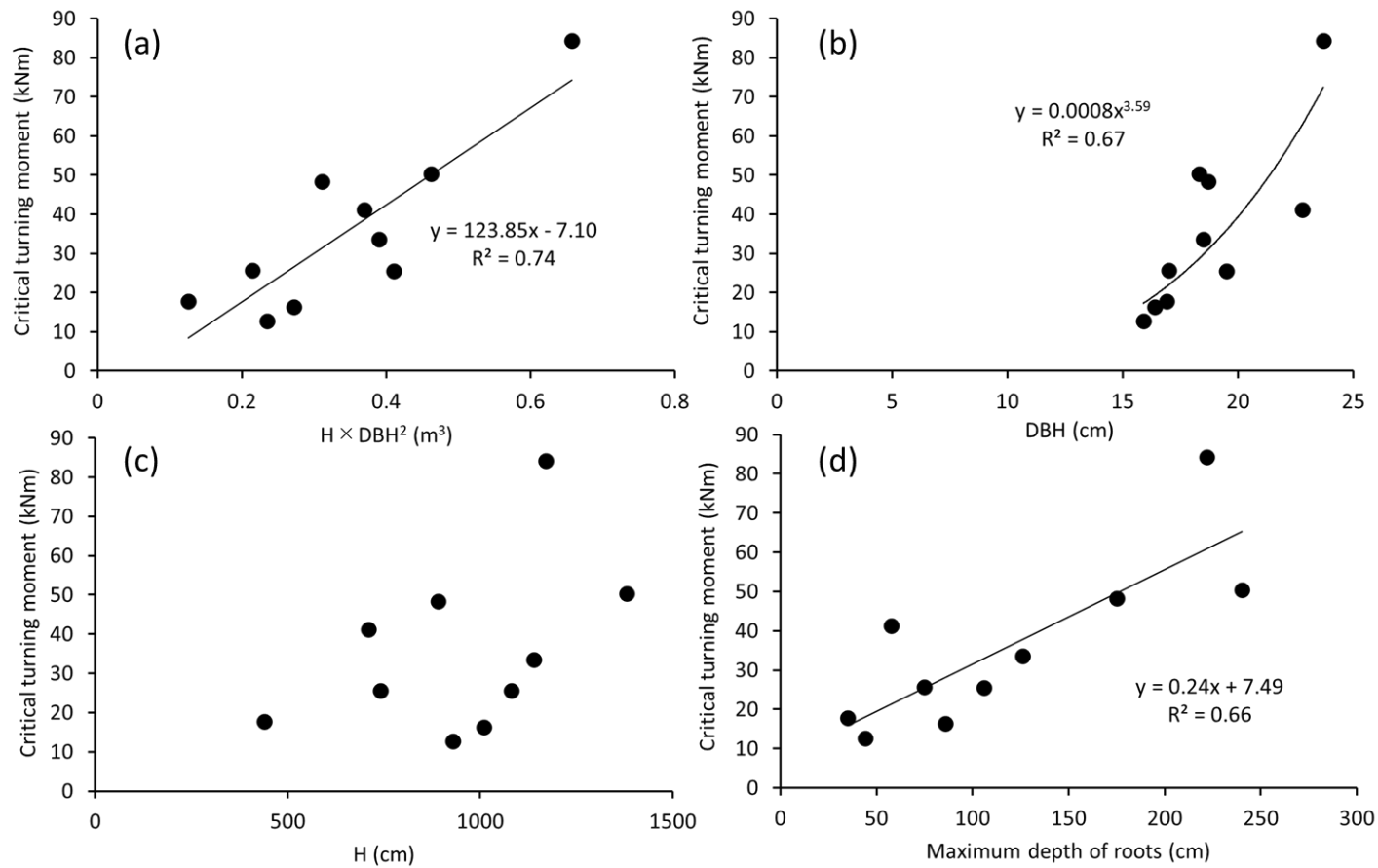
☒ 3-1-6 Relationships between stem inclination and vertical displacement in all 10 test trees.



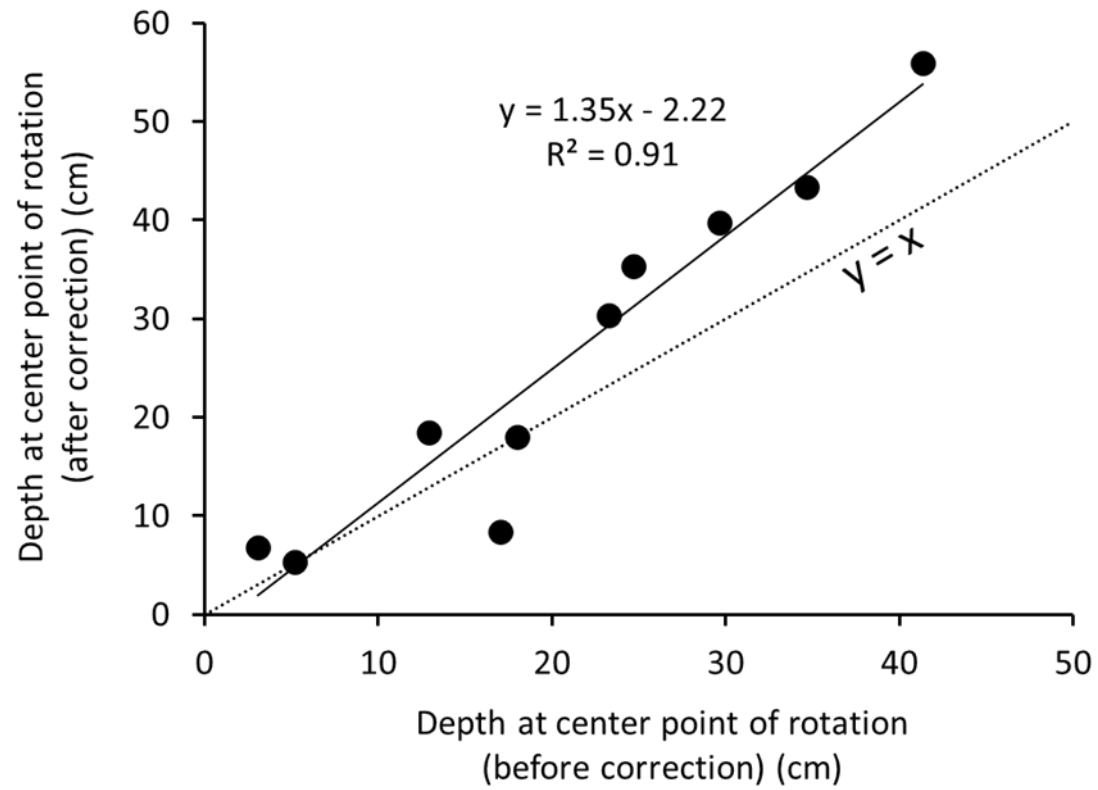
☒ 3-1-7 Displacement of the center point of rotation (Cp) at 1 s intervals from the start of the tree-pulling experiment until the critical turning moment was reached (1–23 s) in a representative tree. The relationship between inclination of the test tree and horizontal displacement (a) and vertical displacement (b), and the relationship between horizontal and vertical displacement (c) are shown.



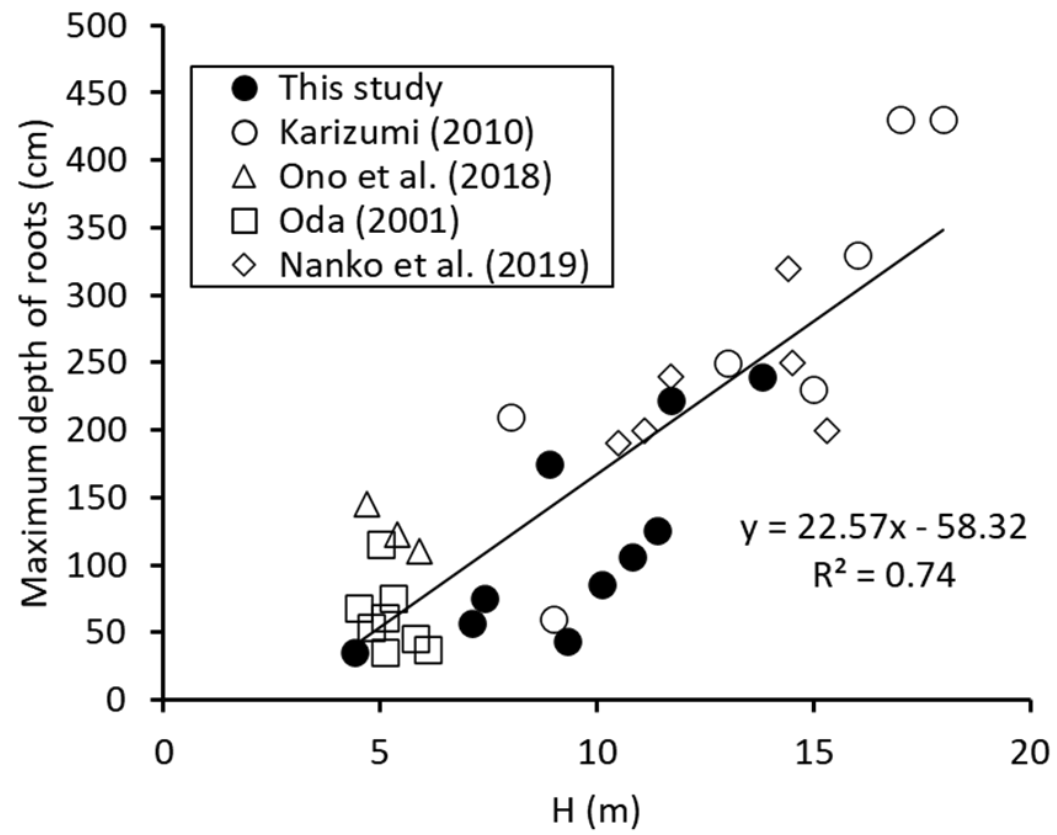
☒ 3-1-8 Relationships between depth at the center point of rotation (D_{cp}) and critical turning moment (a, b) and between D_{cp} and maximum root depth (c, d) before (b, d) and after (a, c) the correction of lens distortion.



☒ **3-1-9** Relationships between critical turning moment and $H \times DBH^2$ (a), DBH (b), H (c), and maximum depth of roots (d) in the 10 trees in all three plots.



☒ 3-1-10 Relationship between depth at the center point of rotation (D_{cp}) before and after correction of video camera lens distortion.



☒ 3-1-11 Relationship between H and maximum root depth in *Pinus thunbergii* trees based on the data from this and other studies (Oda 2001; Karizumi 2010; Ono et al. 2018; Nanko et al. 2019)

3-2 汀線からの距離が異なる海岸林に生育するクロマツの倒伏モーメント

3-2-1 はじめに

海岸林は、飛砂防止機能や防潮機能、防風機能などさまざまな災害の防止機能を期待されている (村井ら 1992; Zhu et al. 2000)。日本では古来より、耐塩性が高く砂地の生育に適したクロマツ (*Pinus thunbergii*)による海岸林の造成が行われてきた (小川 1979; 近田 2001)。2011年、日本の東北地方を襲った東日本大震災が起因となり、クロマツ海岸林は津波を受けた。津波によるクロマツ被害の少なかった海岸林がある一方、幹折れ、根返りなどクロマツに被害が生じた海岸林では、これらが流木化し、居住地域にさらなる被害を与えたことが報告されている (林野庁 2013, 2014)。津波により根返りし流木化したクロマツでは、垂直根の発達が悪化したが、クロマツ本来の垂直根の発達した個体は津波により流されなかった (Forestry and Forest Products Research Institute, Japan 2012; 林野庁 2014)。クロマツ海岸林でも局所的に成長や林分密度に違いのある場所もあり、津波による倒伏抵抗性を持つクロマツ個体は同じ海岸林内でも局所的な環境で異なることが示唆された (Forestry and Forest Products Research Institute, Japan 2012)。汀線からの距離による林分内環境、すなわち風や地下水位などの違いによりクロマツに成長差が生じれば、個体の倒れやすさが異なり、汀線に近い海岸林では津波に対する海岸林機能が果たせないかもしれない。

津波や台風などの強風などにより引き起こされる樹木の倒伏に対する抵抗力は、立木引き倒し試験で測定される引き倒しモーメントにより推定される (Nicoll et al. 2005; Tanaka 2012)。引き倒しモーメントは樹木の地上部サイズだけでなく、樹木の地下部構造や土壌条件の違いが関与することは2章や3章3-1でも述べてきた。樹木の根は、風などの物理的ストレスに対して根系構造を適応させ、倒伏に対する抵抗力をつける (Lundström et al. 2007a; Nicoll et al. 2008)。このような根系構造の特性は、根系の断面積合計 (Total root cross sectional area, CSA) (Coutts et al. 1999) や垂直根、水平根や斜出根など根の成長方向による分類 (Danjon et al. 2005)、根の本数や傾き (Fourcaud et al. 2008) などを用いて表現されてきた。さらに倒伏に対する地下部構造を反映させた地下部特性として根鉢についても2章および既存文献で議論されてきた (Peltola et al. 2000; Cucchi et al. 2004; Nicoll et al. 2005, 2006; Lundström et al. 2007a, b)。

本節では、垂直根の深さと樹木の倒れにくさである倒伏抵抗の関係を調べるために、汀線から距離の近いところと遠いところに設置された環境の異なる海岸クロマツ林の2調査地間において、(i) 海岸の環境に適応してきたクロマツ個体の倒伏抵抗力に差はあるのか? (ii) 津波による倒伏からどの程度耐えることができるのかを明らかにすることを目的とした。具体的には、次の仮説を検証することとした: 汀線からの距離の近い場所に生育するクロマツでは、地下水位の高さや強風などからクロマツの樹高成長が低下することにより、引き倒しモーメントも低下し、津波に対する倒伏抵抗力が弱い。本節

で明らかにされる結果は、津波や台風などに対する引き倒し抵抗力を高める海岸林の管理や育成に役立つことが期待される。

3-2-2 材料と方法

3-2-2-1 調査地

調査地は、3-1-2の調査地と同様に、愛知県田原市の渥美半島西端部の海岸に8 kmほど続く海岸クロマツ林である。伊良湖特別地域気象観測所 (34°37.7'N, 137°05'E)で観測された30年間 (1981-2010年)の年間平均風速は3.8 m/s、最大風速は26.2 m/s、最多風向は6月から9月 (夏季)に南から東南東、10月から5月 (春・秋・冬季)に西北西から北北西であった (気象庁 2017)。

調査区として、汀線からの距離の異なるクロマツ林内に2カ所設置した。汀線からの距離が150 mから270 mであり、標高1.2 mから1.9 mで地下水位が比較的浅く、比較的風が強いと想定される調査区を海側調査区 (以下、海側区; 3章3-1のPlot B、写真3-2-1 a)、汀線からの距離が620 mから740 mであり、標高2.7 mから3.9 mで地下水位が比較的深く、比較的風が弱いと想定される調査区を陸側調査区 (以下、陸側区; 3章3-1のPlot C、写真3-2-1 b)とした (図3-2-1)。

陸側区では、クロマツだけでなくウバメガシ (*Quercus phillyraeoides*)やクスノキ (*Cinnamomum camphora*)が上層木を構成し、上層木の立木密度は400-1000本/haであった。クロマツは本数割合で43%を占め、クロマツの平均胸高幹直径 (DBH)は11.7 cm、平均樹高 (H)は7.0 m、それ以外の樹種の平均DBHは3.1 cm、平均Hは3.2 mであった。海側区では、クロマツとニセアカシア (*Robinia pseudoacacia*)が上層木を構成し、上層木の立木密度は200-400本/haであった。クロマツは本数割合で76%を占め、平均DBHは11.3 cm、平均Hは4.6 m、クロマツ以外の樹種としてニセアカシア、トベラ (*Pittosporum tobira*)、アカメガシワ (*Mallotus japonicus*)が混交し、これらの平均DBHは5.2 cm、平均Hは2.9 mであった。調査地付近の地下水面の高さは、汀線から内陸に向かってほぼ一定であるが (田中ら 2017)、標高は汀線から内陸に向かって高くなっているため、地表面から地下水位は、内陸に向けて深くなっている。

3-2-2-2 調査対象木

引き倒し試験の調査対象木数は、DBH 6.0 cmから26.6 cmのクロマツ個体から選定し、海側区で17個体、陸側区で24個体の全41個体とした。DBHの上限設定は、海側区におけるもっとも大きな個体を考慮した。選定された対象木について、DBH、H、樹冠幅、生枝下高、樹木間距離を測定した。樹冠幅は東西および南北の2方向で計測し、平均を算出した。樹木間距離は、対象木から最も近いクロマツ立木までの距離 (最近接クロマツ距離)と、対象木から最も近いクロマツ以外の樹木までの距離 (最近接樹木距

離)を測定した。

3-2-3-2 土壌水分および地下水位

両調査区における土壌水分を測定するため、2015年10月に海側区で13箇所、陸側区で14箇所において2種類の深さ(0-10 cm、20-30 cm)、いずれも選定された個体から水平距離1.5 mの地点にて100 ccの土壌円筒を採取した。採取した円筒土壌試料は105°Cで24時間乾燥させ、土壌体積含水率を算出した。地下水位の測定は、2015年11月に海側区では3地点、陸側区では1地点で行った。測定方法は、重機(SK135SR、KOBELCO Construction Machinery Co., Ltd、Tokyo、Japan)を用いて地面を掘削し、地下水が染み出した時点で掘削を終了し、地表面から地下水位までの深さを測定した。

3-2-2-4 立木引き倒し試験

選定されたクロマツ41個体について、引き倒し試験を2015年11月に行った。引き倒し試験の方法は、2章のとおりである。対象木の根元から1 m(材積が0.5 m³以上の個体は2 m)の高さにワイヤーに繋いだスリングを掛け、重機(SK135SR、KOBELCO Construction Machinery Co., Ltd、Tokyo、Japan)を用いて地表面に対して平行に荷重をかけた(図3-2-2 a)。対象木とワイヤーの間には50 kN用のロードセル(LT-50KNG56 NIKKEI Electronic Instruments Co., Ltd、Tokyo、Japan)を挟み、得られた荷重データはブリッジユニット(DBU-120A、KYOWA Electronic Instruments Co., Ltd、Tokyo、Japan)を通してPCに0.1秒間隔で記録した。

引き倒し試験のデータ取得は、重機がワイヤーを引き始めると同時に測定を開始し、重機の荷重がピークに達し、下降し始めた時点(図3-2-3)で測定を終了した。対象とした各個体は完全な根返りまでは至っていない。今井ら(2013)はクロマツの引き倒し試験において、根返りまでした時の引き倒しモーメントは、引き倒しから増加し続けピークに達し、その後減少することを報告している。野々田ら(1996)はヒノキの倒伏試験において荷重点の水平移動距離の小さい段階で引き倒しモーメントは急激に増加し、その後緩やかな増加の後ピークに達することを報告している。すなわち樹幹が傾き始めた比較的初期に荷重のピークを迎えるとしている(野々田ら1996)。これらから本節では、他の研究と同様に(宮田ら2013; 藤堂ら2015)、試験時に記録された引き倒しモーメントの減少前におけるピーク時の荷重を最大引き倒し荷重とし、引き倒しモーメントの最大値として使用した。引き倒し方向は、津波等の進行方向を考慮して汀線から陸側方向に引くこととし、汀線の方角が南北に近いことから方位角60-150度の範囲に引き倒し方向を設定した。

2章と同様に回転中心深さ(Depth at the center point of rotation, Dcp)を測定するため、引き倒し方向と直交方向にビデオを設置しクロマツ個体の引き倒し前後の様子を撮影した。引き倒し前の個体が傾いている場合には、その傾き(θ)をビデオ画像から算出し

た (図 3-2-2 a)。また、同じビデオ画像を用いて、試験開始時から終了時に荷重点が水平に移動した距離 x を計測した (図 3-2-2 c)。

本節の試験では、対象木が完全な根返りに至るまでは引き倒さず根鉢を直接計測することは困難なため、2章と同様に根の広がり の指標として根鉢半径を測定した。測定箇所や測定方法についても2章のとおりである。

根の深さの指標としては、2章および3章3-1と同様に対象木における D_{cp} を用いた (図 3-2-2 c: 森岡 1983, 1984; 野々田ら 1996; 藤堂ら 2015; 島田・野々田 2017; Okada 2019)。本節では、3章3-1から D_{cp} 値の傾向はレンズ歪み補正前後でほぼ同様であるため、レンズの歪みは考慮していない。

3-2-2-5 引き倒しモーメント (M_{crit})、倒伏モーメント (M_o)の算出

本節では、津波のモーメントとの比較を行うため、樹木倒伏時に係るモーメントとして樹体の質量も考慮に入れた倒伏モーメント (M_o)を算出した。倒伏モーメントは、引き倒しモーメント M_{crit} と質量モーメント M_m を足し合わせた次式 (3-1)により算出できる (Peltola et al. 2000; Cucchi et al. 2004; Nicoll et al. 2006)。

$$M_o = M_{crit} + M_m \quad (3-1)$$

引き倒しモーメントは、回転中心の深さとスリング高さの和 (h)に、試験開始前の対象木と地面に対する垂直線とが成す角度 θ を求め、最大引き倒し荷重 (F)に $\cos\theta$ を乗じた以下の (3-2)式で算出した。

$$M_{crit} = F \times h \times \cos\theta \quad (3-2)$$

質量モーメントは、樹体質量 m (N)と引き倒しモーメントが発揮されるまでの水平移動距離 x (m)の積である式 (3-3)により算出した (Peltola et al. 2000; Cucchi et al. 2004; Nicoll et al. 2006)。

$$M_m = m \times g \times x \quad (3-3)$$

樹体質量 m (kg)は、DBH (cm)を用いたクロマツの幹・枝・葉の器官別乾重量の推定式 (3-4)、(3-5)、(3-6)(荏住 2010)を使用して乾燥重量 md (ton)を推定した後、本調査地から得られたクロマツの幹および枝葉の生重/乾重比、 $stem_{cf}$ 、 $branch$ and $leaf_{cf}$ を用いて (3-7)式にて樹体質量 m を推定した。重力加速度 g は、 9.8 (m/s²)を使用した。

$$md_{stem} = 92 \times DBH^{2.38} \times 1000^{-1} \quad (3-4)$$

$$md_{branch} = 109 \times DBH^{1.54} \times 1000^{-1} \quad (3-5)$$

$$md_{leaf} = 356 \times DBH^{0.85} \times 1000^{-1} \quad (3-6)$$

$$m = md_{stem} \times stem_{cf} + (md_{branch} + md_{leaf}) \times branch \text{ and } leaf_{cf} \quad (3-7)$$

3-2-2-6 津波のモーメントの算出

対象木が津波から受けるモーメント (M_t kN m)を算出するために、Tanaka (2012)で使

用された次式 (3-8) を使用した。Cd は抗力係数、 ρ (kg/m^3) は水密度、 u (m/s) は平均流速、 ht (m) は津波水位である。使用した数値は $Cd = 1.0$ 、 $\rho = 1000$ (kg/m^3) (Tanaka 2012)、 $u = 11$ (m/s) (Fritz et al. 2012) とした。DBH (cm) は引き倒し試験木の実測値を使用した。また、津波水位 ht は 1 m から想定されている巨大地震時の津波最大高 4 m (田原市 2015) の範囲で 1 m ごとに設定した。津波水位 ht が引き倒し試験木の H を超えた場合は、その個体にかかる Mt の換算に使用した ht は H とした。

$$Mt = 4^{-1} \times Cd \times \rho \times u^2 \times ht^2 \times DBH \times 100^{-1} \quad (3-8)$$

3-2-2-7 統計解析

クロマツ対象木の地上部、地下部特性、土壌水分は、調査区ごとに平均値と標準誤差を算出した。これらは Kolmogorov-Smirnov test を使用して正規性を確認し、すべてのデータに正規性が確保されていたため、海側区と陸側区の特性間の差異を Welch's t-test を用いて検出した。また、地上部特性、地下部特性と倒伏モーメントとの関係性、および地上部と地下部指標の関係性は、Pearson's correlations test を行った。倒伏モーメント (Mo) と DBH、 $H \times DBH^2$ 、根鉢幅については、海側区と陸側区間の関係式の差異を共分散分析 (ANCOVA) を用いて解析した。また、津波モーメント (Mt) と倒伏モーメント (Mo) の比のデータは、Kolmogorov-Smirnov test で正規分布が確認できなかったため、各変数について Wilcoxon 順位和検定を行い、海側区と陸側区の違いを検出した。これらの解析には、R (ver3.3.3) を用いた (R Core Team 2017)。

3-2-3 結果

3-2-3-1 陸側区と海側区における地下水位の深さおよび地上部特性

陸側区と海側区における地下水位の深さは、海側区で平均 94 cm に対して、陸側区で 240 cm とより深く、海側区と陸側区でその違いが確認された (表 3-2-1)。土壌水分率は陸側区で海側区よりも高い傾向にあり、表層で有意であった ($P < 0.05$ 、表 3-2-1)。

陸側区と海側区の対象クロマツの平均胸高幹直径 (DBH) には有意差がなかったが ($P = 0.55$)、平均樹高 (H) は有意に異なり、陸側区で 2 倍程度高かった ($P < 0.001$ 、表 3-2-1)。平均樹冠高は陸側区で海側区よりも有意に高かった ($P < 0.001$ 、表 3-2-1)。

対象木とそれから最も近いクロマツおよび木本植物との平均距離は、海側区で 2 倍および 3.5 程度それぞれ大きかった ($P < 0.01$ 、表 3-2-1)。

3-2-3-2 倒伏モーメント (Mo) と地上部特性との関係

引き倒し試験を行ったクロマツは、すべての個体で幹折れを起こさなかった。倒伏モ

ーメント (M_o)と地上部特性の相関を調べたところ、両調査区において DBH と $H \times DBH^2$ との相関が高かった ($P < 0.001$ 、表 3-2-2)。 M_o と DBH の間には累乗関係が、 M_o と $H \times DBH^2$ の間には直線関係が見られた (図 3-2-4 a, b)。 陸側区と海側区において M_o と DBH および $H \times DBH^2$ の関係性について共分散分析を行ったところ、 M_o と DBH との関係性において関係式が有意に異なった ($P < 0.01$) (図 3-2-4 a)。 一方、 M_o と $H \times DBH^2$ の関係においては調査地間に有意差が見られず ($P = 0.95$ (傾き)、 $P = 0.46$ (切片))、同じ材積であれば両調査区間での倒伏モーメントに差異は認められなかった (図 3-2-4 b)。

陸側区のみで、 M_o が樹冠高と正の相関、隣接木本の距離と負の相関関係を示した ($P < 0.05$ 、表 3-2-2)

3-2-3-3 陸側区と海側区の地下部特性および倒伏モーメント (M_o)との関係

根鉢半径には両調査区間に有意差が見られなかった ($P = 0.51$ 、図 3-2-5 a)。 一方、回転中心の深さは海側区に比べ陸側区で有意に深かった ($P < 0.001$ 、図 3-2-5 b)。

根鉢半径と M_o との間には両調査区において有意な相関関係が見られた ($P < 0.001$ 、表 3-2-2)。 一方、 M_o と回転中心の深さとの間には陸側区のみで有意な正の相関が見られた ($P < 0.01$ 、表 3-2-2)。 また、すべての個体において回転中心の深さが対象木のほぼ真下にあることを確認した。

M_o と根鉢半径との間には調査区間で有意に異なる直線関係が見られた (図 3-2-6 a) (ANCOVA、 $P < 0.01$)。 すなわち同じ根鉢半径をもつクロマツの M_o は陸側区で大きくなった (図 3-2-6 a)。 一方、 M_o と回転中心の深さとの関係性には、陸側区でのみ直線関係が見られた ($P < 0.01$)。 すなわち陸側区で回転中心の深さが大きくなると M_o も大きくなった (図 3-2-5 b)。

陸側区では根鉢半径および回転中心の深さは、DBH、H、 $H \times DBH^2$ 、樹冠高と有意な関係にあったが、海側区では根鉢半径のみにこれらの関係性が認められた ($P < 0.05$ 、表 3-2-3)。

3-2-3-4 倒伏モーメント (M_o)と津波モーメント (M_t)との関係

クロマツ対象木の受ける津波モーメント (M_t)について、津波の波高 (ht)を 1 m、2 m、3 m、4 m の 4 段階に想定したところ、津波の波高が高いほど、対象木の受ける M_t は大きくなった (図 3-2-7)。クロマツ対象木の倒れにくさを示す M_o と津波によって受ける M_t の関係性を見たところ、 $ht = 1$ の時では全個体で M_o が M_t よりも大きくなった。しかし、 $ht = 2$ の場合に海側区 17 本中 14 本、陸側区 24 本中 8 本で、 $ht = 3$ の場合に海側区ではすべての個体、陸側区では 24 本中 6 本の個体で、 $ht = 4$ の場合に海側区と陸側区のすべての個体で、 M_o よりも M_t が上回った (図 3-2-7)。 $ht = 4$ の時の両区

の Mt/Mo はすべての個体で 1 を超えた。これはすべての個体が津波により倒伏することを示している (図 3-2-7b)。

3-2-4 考察

本節では、最初に立てた仮説とは異なり、地下水位が高く、より風の強い、低い林分密度で樹高成長の悪い海側区のクロマツでも、陸側区と比較し倒伏モーメント (Mo) と材積指標である樹高 (H) \times (胸高幹直径) DBH^2 の関係に差異が見られなかった (図 3-2-4b)。すなわち同じ材積を持つクロマツ個体の倒れやすさは、汀線の異なる二つの対照的なプロットで変わらなかった。これは海側区における樹高成長の悪いクロマツが、50 年の成長期間にこれら海岸汀線の環境に適応してきた結果であろう。この結果は、材積指標 $H \times DBH^2$ が樹木の倒れにくさを表すとても良い指標であるという既存研究を支持するものである (Peltola et al. 2000; Cucchi et al. 2004; Lundström 2007a,b; Hale et al. 2012)。Hale et al.(2012)は $H \times DBH^2$ が風に対する倒伏抵抗性と強い関係性を持つことを示した。強風が樹木の倒伏抵抗性を強くすることはよく知られており (Nicoll et al. 2008)、風が強い林分の外側ほど倒伏抵抗性が強いこと (Cucchi et al. 2004)も明らかにされている。

既存研究では、クロマツの引き倒しモーメントや倒伏モーメントは DBH と強いべき乗関係をもち、1.95 乗から 3.3 乗の式でよく示されてきた (今井・鈴木 2005; 今井ら 2013; 宮田ら 2013; 野口ら 2014)。野口ら (2014)は海岸砂質土壤に生育する DBH 9 cm から 14 cm のクロマツ 3 個体について、根返りするまでの引き倒し試験を行い、3 kN m から 13 kN m と本節の同じ大きさの個体と同程度のモーメント値を報告している。本節における $H \times DBH^2$ と Mo との直線関係の傾きは 103.09 から 104.36 の間で、野口ら (2014) で報告された傾きは 81.7 であった。クロマツ同様に海岸林の構成種であり、海岸の砂地に育つカイガンショウ (*Pinus pinaster*)ではその傾きが 35.46 から 44.85 の範囲であったことから (Cucchi et al. 2004)、クロマツはカイガンショウよりも倒れにくい樹種であることが示唆される。

海側区におけるクロマツの樹高成長の悪さの要因としては、強い風だけでなく浅い地下水位の影響が考えられる。泥炭湿地に生育するシトカトウヒ (*Picea sitchensis*)において地下水位が浅いと倒伏モーメントが小さくなる報告 (Ray and Nicoll 1998)がある。本節の結果は、地下水位の深さが異なる生育場所であるにもかかわらず同じ $H \times DBH^2$ ならば、その倒伏抵抗性は同様であることを意味している。一方で、 Mo と DBH の関係を見ると、海側区と陸側区において関係性が異なった (図 3-2-4 a)。一般的に DBH は相対成長関係から根重量を示す (Drexhage and Colin 2001)ため、この結果は海側区と陸側区におけるクロマツ根系の違いを示唆している。実際に根の最大深さを示す回転中心は陸側区で有意に深かった (図 3-2-5)。このことから、陸側区に比べて海側区のクロマツでは、根の深さ方向すなわち垂直根の成長が地下水位により阻害されている可能

性がある。実際に陸側区と海側区で本節の対象木を含む DBH の近い 3 個体ずつ掘り取られたクロマツの根系は、陸側区では元来クロマツの種特性を示す垂直根の発達した垂直根型で最大深さ 175 cm から 240 cm を示したが、海側区では最大深さ 35 cm から 75 cm と垂直根の発達しない水平根のより広く成長した水平根型を示した (3 章 3-1、Hirano et al. 2018)。この他にも海岸クロマツの汀線に近く地下水位の浅いところでは水平根系が定性的に観察されている例もあり (小田 2001)、実際に東日本大震災の津波後には東北でこのような水平根型根系が観察されている (Forestry and Forest Products Research Institute, Japan 2012)。これらの結果は、高い地下水位では根が浅くなると報告した Boggie (1972) や Ray and Nicoll (1998) と調和的である。

本節における回転中心の深さ (Dcp) は陸側区のみで M_o との関係性を示した (表 3-2-2、図 3-2-5 b)。根の深さすなわち垂直根の発達は M_o と大きく関係する (Danjon et al. 2005; 2008; Fourcaud et al. 2008)。このことは、砂質土で垂直根の深さが倒伏への抵抗に重要であるとした Fourcaud et al. (2008) の結果と一致する。一方で、海側区ではこのような関係は見られなかった。本節では根の水平的な広がりを示す根鉢半径が海側区で M_o との強い関係性を示した。 M_o は水平根の断面積合計 (CSA) と関係性が強いことも報告されており (Coutts et al. 1999; Lundström et al. 2007a,b)、このことから海側区では垂直根よりも水平根の発達した根系が示唆される (表 3-2-2、図 3-2-6 a)。これらのことは、陸側でクロマツは元来持つ垂直根型の根系を持ち、垂直根の深さと水平根の広がりの方により M_o を支配するが、地下水位などの環境要因により垂直根が伸ばせなくなった場合、水平根の広がりの方において M_o を支配する水平根型 (Plate system、Ennos 2000) へと根系を変化させ、水平根の発達により M_o の低下を補っていることが示唆される (Hirano et al. 2018)。既存研究においても、根系は風による機械的なストレスに適応した成長をするとされてきたが、その一つとして土壌の浅い部分での根系の広がりの変化が指摘されている (Coutts et al. 1999; Danjon et al. 2005)。本節の結果と同様に、Lundström et al. (2007a) はドイツトウヒ (*Picea abies*) とヨーロッパアカマツ (*Pinus sylvestris*) を対象に風によるストレスが根の成長方向を変えたにもかかわらず、根鉢サイズと M_o との関係が M_o と材積指標 $H \times DBH^2$ との強い関係を改善させるものではなかったことを報告している。

海岸クロマツ林の津波に対する抵抗性は、DBH と津波高または H に依存するため、海側区と陸側区で異なり、クロマツ個体の倒れない津波波高は陸側区で高い結果となった (図 3-2-7)。本節では、海側区と陸側区において $H \times DBH^2$ と M_o の関係式に差はなかった。受ける津波のモーメント M_t は DBH に依存するため、同じ DBH ならば陸側区および海側区で M_t は同じにもかかわらず、海側区では陸側区よりも H が低いため倒伏モーメントが低く、津波に対するモーメントを下回る。本節における海側区の個体では水平根型が示唆されたが、これは東日本大震災時に津波災害を受けたクロマツ海岸林の根返りを起こした個体の多くも水平根のみであった (Forestry and Forest Products

Research Institute, Japan 2012; 林野庁 2014)とする報告と合致する。また、海岸林における津波に対する抵抗力は高い立木密度の林分で高くなる (Iimura and Tanaka 2012; 野口 2015)。本節における海側区では低い立木密度からも、クロマツ林分としての津波に対する倒伏抵抗性も低いことが示唆される。

海側区のクロマツ林分において、津波に対する抵抗性を向上させるためには、まず樹高成長を促進させ、高い地下水位による垂直根の伸長阻害を改善する必要がある。そのために、地下水面までの深さ距離を十分確保できるような盛り土を行うことはアイデアの一つである。現在、林野庁は東北地方で、地下水面からの距離を 2 m から 3 m 程度確保するための盛り土の事業を行っている (林野庁 2013)。また、海岸林の主林木であるクロマツを補完するために、海側区のみで確認された耐塩性の高い樹種、例えば小高木であるトベラを捕植し (伊東・吉崎 2013; 井上ら 2015)、林分密度を高めることで海岸林の面的な機能を向上させることも提案できる。樹木の立地環境に応じた根の構造の把握やその可塑性に関する研究、さらに根の特性と倒伏抵抗力との関係をさらに明らかにすることは、災害に強い海岸林の育成やその管理のための基礎的なデータとして役立つだろう。

表 3-2-1 The depth of the water table below ground level, soil water content and characteristics of *Pinus thunbergii* trees at the land- and sea-side plots (mean values \pm SE).

	Land-side	Sea-side	<i>P</i> value ^a
Ground water depth ^b (cm)	>240	94 \pm 28	-
Soil water content ^c (%)			
0-10 cm depth	6.8 \pm 1.0	14.8 \pm 2.9	*
20-30 cm depth	2.5 \pm 0.3	5.8 \pm 0.3	0.07
<i>P. thunbergii</i> trees ^d			
DBH ^e (cm)	16.4 \pm 1.2	15.4 \pm 1.1	0.55
H ^f (m)	10.2 \pm 0.7	5.5 \pm 0.3	***
Crown width (m)	3.2 \pm 0.2	3.8 \pm 0.3	0.07
Crown height (m)	5.3 \pm 0.6	1.7 \pm 0.3	***
Distance (m)			
to adjacent <i>P. thunbergii</i>	2.3 \pm 0.3	4.1 \pm 0.6	**
to adjacent trees	0.9 \pm 0.1	3.2 \pm 0.6	**

^a Welch's *t*-test between the land- and sea-side plots, ****P* < 0.001, ***P* < 0.01, **P* < 0.05

^b Land-side (*n* = 1), Sea-side (*n* = 3)

^c Land-side (*n* = 14), Sea-side (*n* = 13)

^d Land-side (*n* = 24), Sea-side (*n* = 17)

^e DBH: stem diameter at breast height

^f H: stem height

表 3-2-2 Pearson's correlations between the overturning moments and each trait in *P. thunbergii* at the land- and sea-side plots.

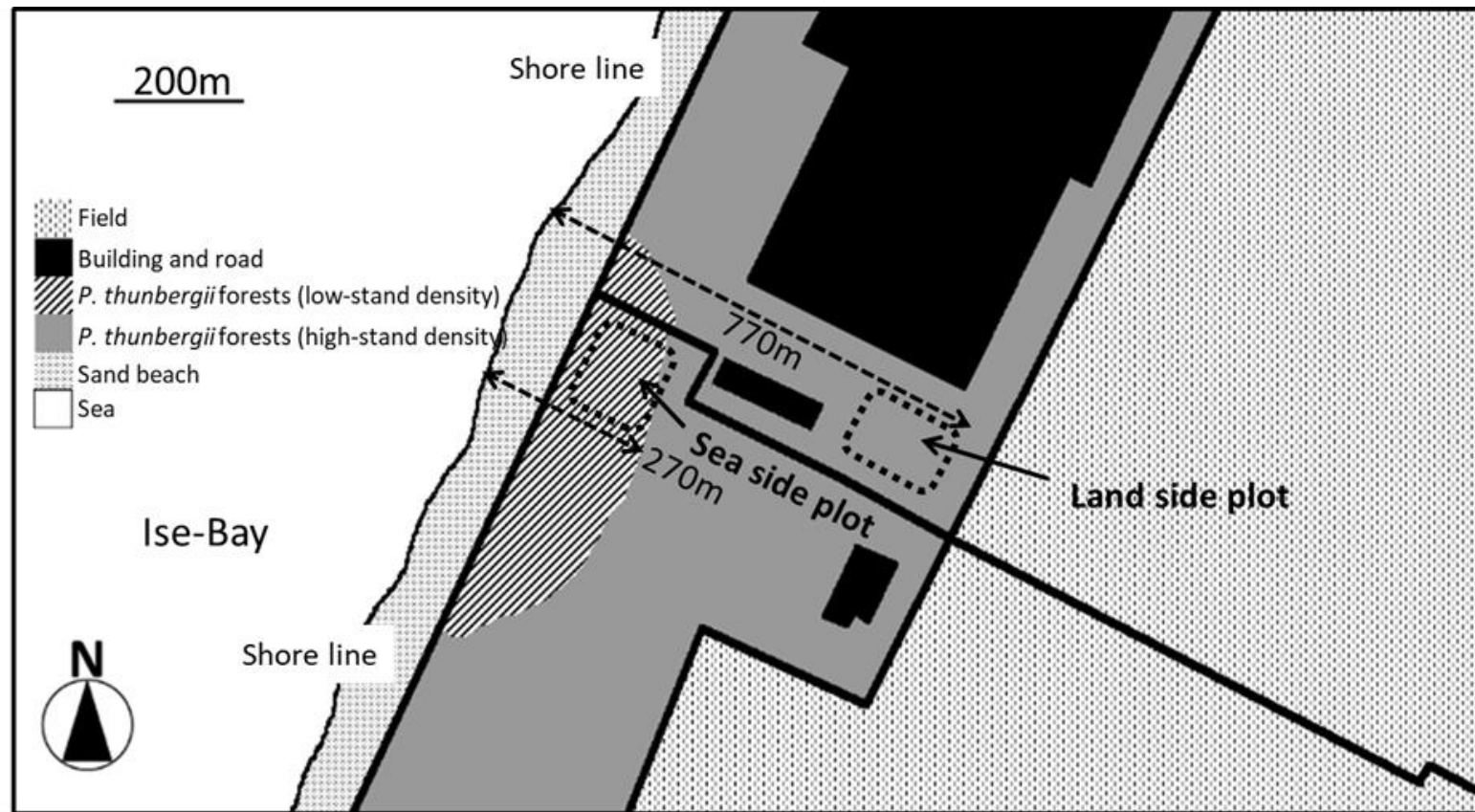
Traits in <i>P. thunbergii</i> trees	Land-side	Sea-side
Aboveground		
DBH (cm)	0.92***	0.88***
H (m)	0.66***	0.75***
H × DBH ² (m ³)	0.92***	0.93***
Crown width (m)	0.61**	0.69**
Crown height (m)	0.42*	0.10
Distance		
to adjacent <i>P. thunbergii</i>	0.13	-0.01
to adjacent tree	-0.48*	-0.16
Below ground		
Root-soil plate radius (cm)	0.68***	0.90***
Depth at center point of rotation (cm)	0.60**	0.41

*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

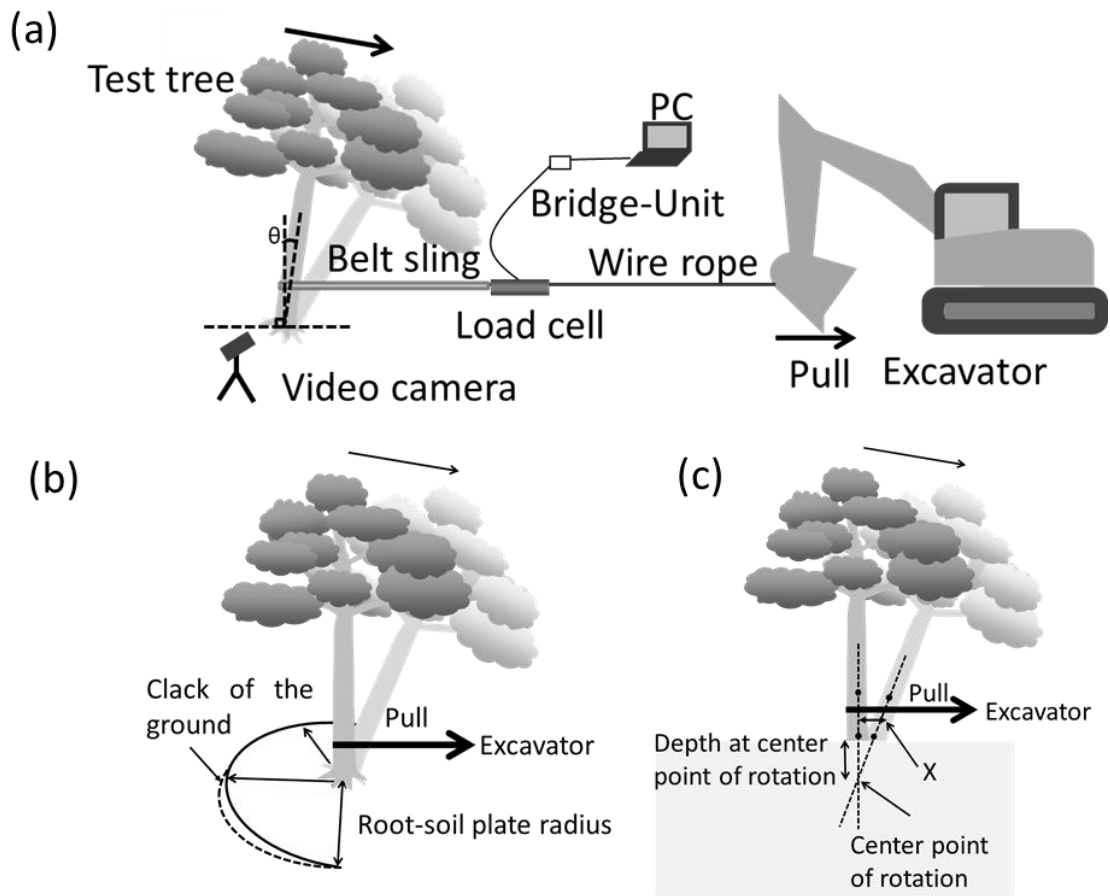
表 3-2-3 Pearson's correlations between the above- and belowground traits in *P. thunbergii* trees at the land- and sea-side plots.

Aboveground traits	Below ground traits	Root-soil plate radius (cm)		Depth at center point of rotation (cm)	
		Land-side	Sea-side	Land-side	Sea-side
DBH (cm)		0.80***	0.84***	0.67***	0.44
H (m)		0.51*	0.69***	0.60**	0.41
H x DBH ² (m)		0.75***	0.86***	0.55**	0.46
Crown width (m)		0.67***	0.54*	0.41*	0.10
Crown height (m)		0.32	0.08	0.36	0.65**
Distance (m)					
to adjacent <i>P. thunbergii</i>		0.46*	-0.02	0.28	-0.37
to adjacent tree		-0.30	-0.08	-0.10	-0.35

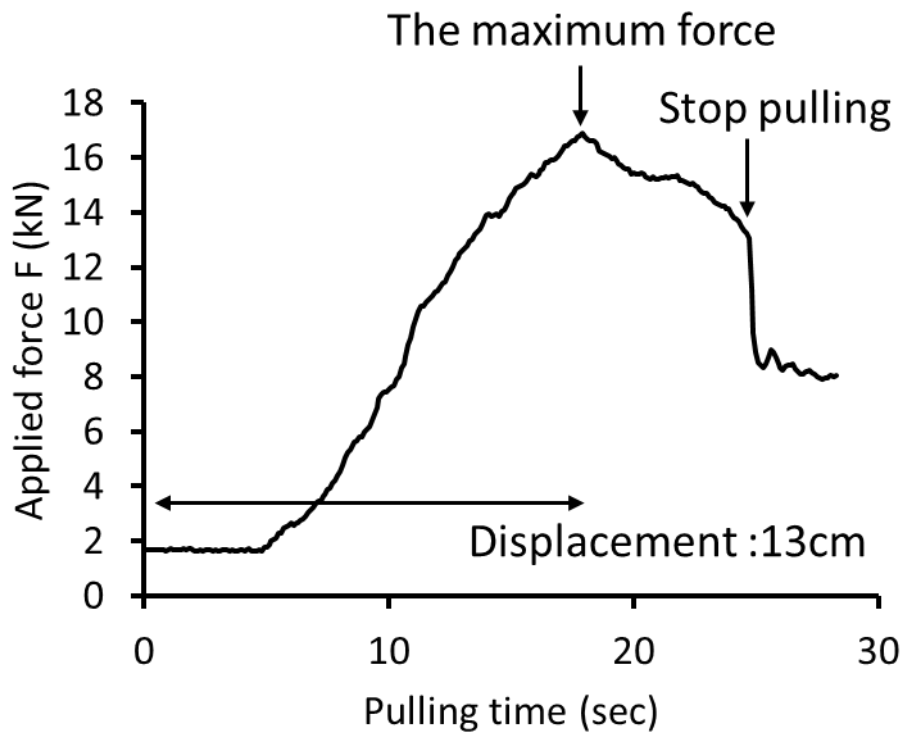
*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$



☒ 3-2-1 Location of the sea-side and land-side plots in a coastal *Pinus thunbergii* forest in this study (modified from Hirano et al. 2018). The sea-side and the land-side plots were located between 150 and 270 m, and between 620 and 770 m from the shoreline, respectively.



☒ 3-2-2 Tree-pulling experiments; measuring methods of: (a) the root-soil plate radius, and (b) the depth at the center point of rotation (c) in *P. thunbergii* trees.



☒ 3-2-3. An example of change in applied force with the pulling time and horizontal displacement in a *P. thunbergii* tree during the pulling experiment.

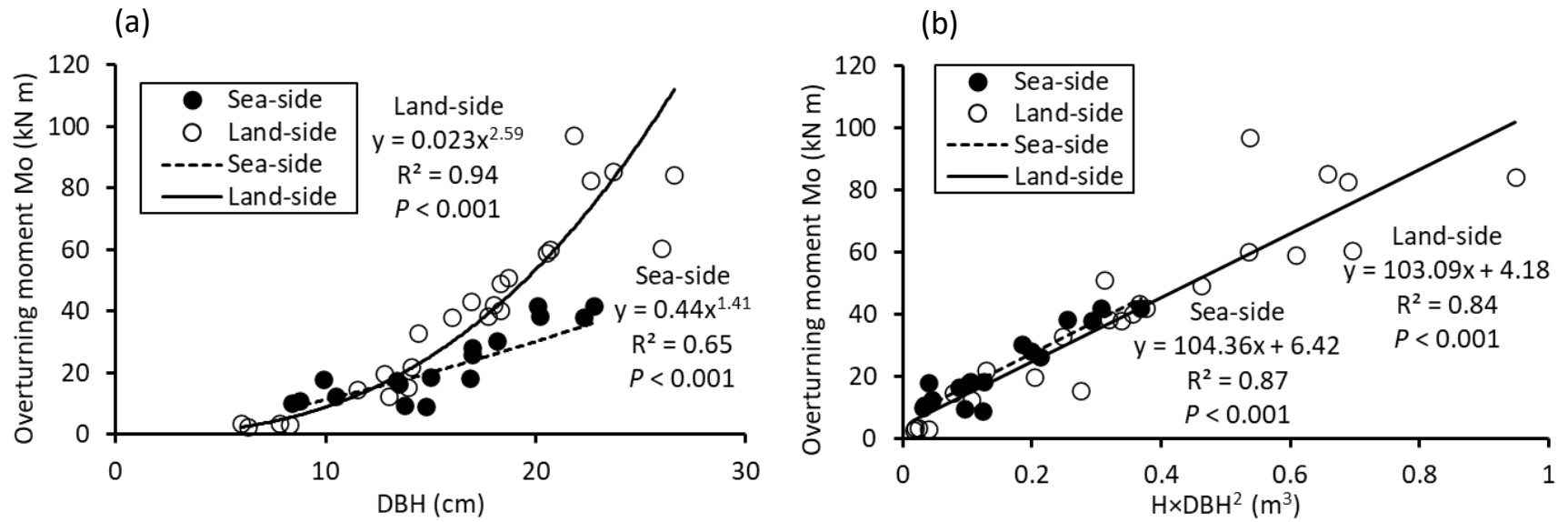
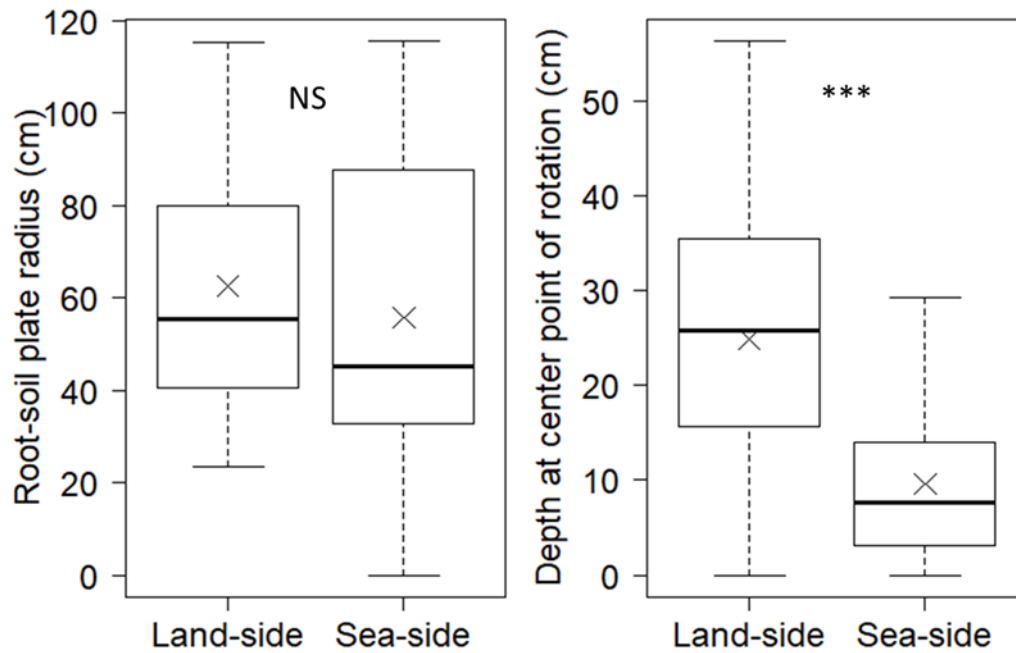
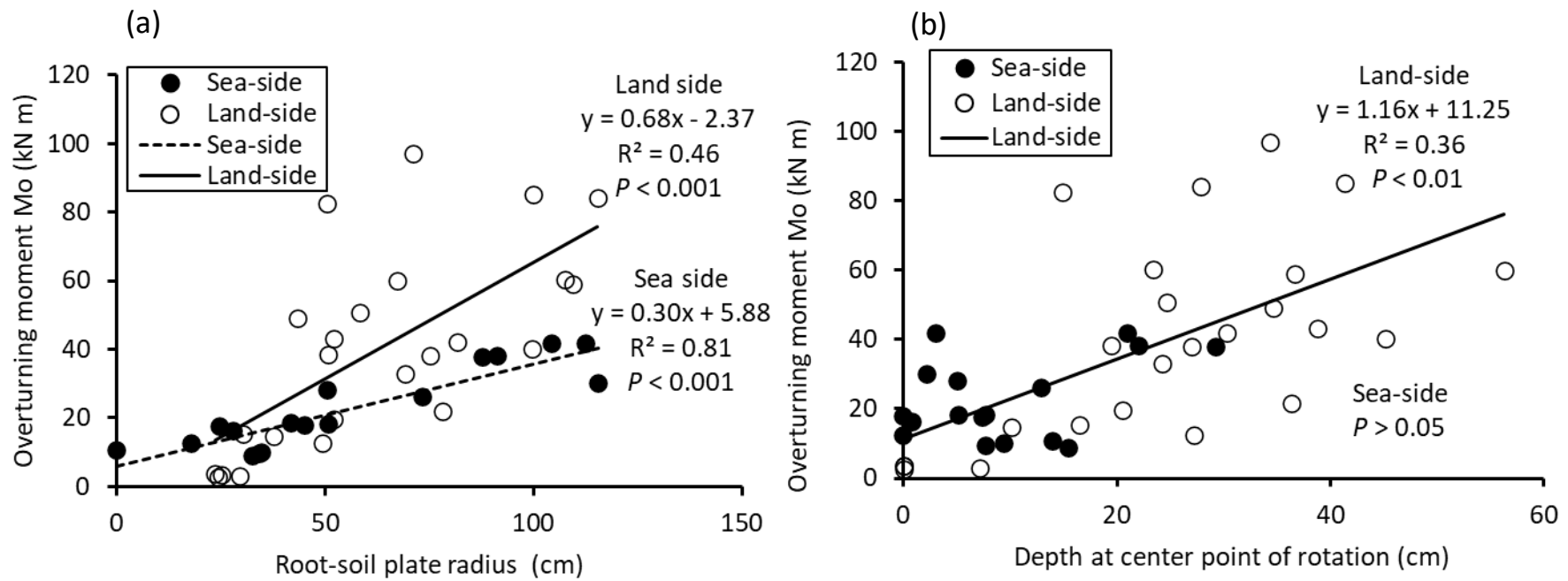


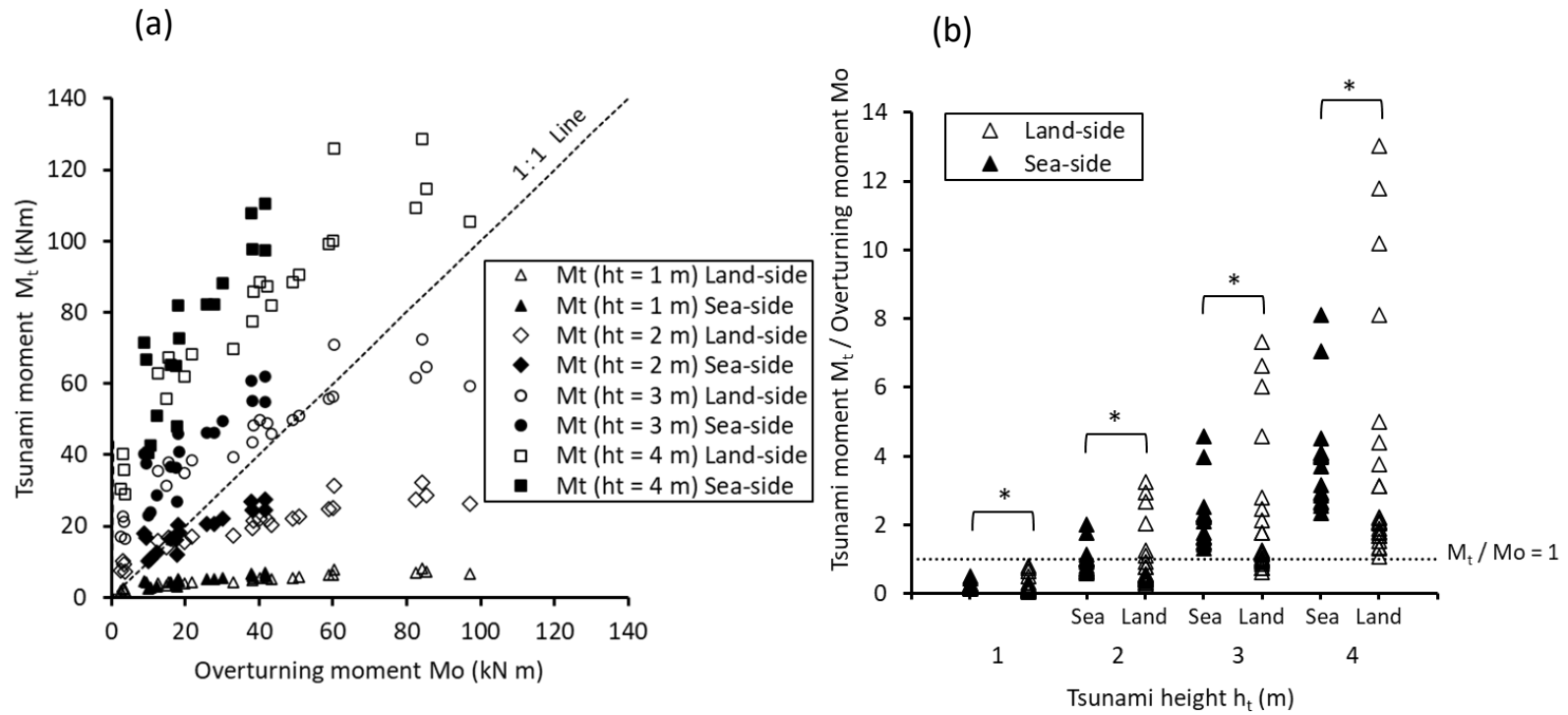
Fig 3-2-4 Relationships between the overturning moment and DBH (a), and $H \times DBH^2$ (b) in *P. thunbergii* trees at the land- and sea-side plots. The difference in the relationships in Fig 3-2-4 (a) was significant between the land- and sea-side plots (ANCOVA, $P < 0.01$).



☒ 3-2-5 Box and whisker plots of root-soil plate radius (a) and depth at the center point of rotation (b) in *P. thunbergii* trees at the land- and sea-side plots. Significant differences were analyzed by Welch's t-test, NS: not significant $P > 0.05$, *** $P < 0.001$. The median value is shown as a horizontal black line inside the box, and the first and third quartiles are the bottom and top of the box, respectively. Each line extending vertically from the box represents 1.5 times of the interquartile distance. The mean is shown as an x-mark.



☒ 3-2-6 Relationships between the overturning moment and root-soil plate radius (a), and depth at the center point of rotation (b) in *P. thunbergii* trees at the land- and sea-side plots. The lines in Fig 3-2-6(a) were significantly different between the land- and sea-side plots (ANCOVA, $P < 0.01$).



☒ 3-2-7 Relationships between overturning moment (M_o) and tsunami moment (M_t) (a) and the ratio of tsunami moment (M_t) to overturning moment (M_o) (b) on the selected *P. thunbergii* trees at wave height (h_t) ranging from 1 m to 4 m at 1 m intervals. The ratios in each wave height of tsunami were significantly high between the land- and sea-side plots (* $P < 0.05$).



写真 3-2-1 The study site of *Pinus thunbergii* at (a) the sea-side plot and (b) the land-side plot.

4章 樹木の根系構造が引き倒しモーメントに与える影響

4-1 根系構造モデル作成の検討

4-1-1 はじめに

根系は樹木の体を固定するだけでなく、資源の取得や貯蔵を行い、さらに環境を感知する (Jackson et al. 1999)。根系は、樹木の倒伏抵抗や土壌侵食の防止に貢献し、斜面の安定性を支えている (Schwarz et al. 2010; Yamase et al. 2021)。

三次元 (Three dimensional, 3D)の根系構造 (Root system architecture, RSA)は、樹木の倒伏抵抗を説明する主な要因となりうる (Ennos 2000; Ghestem et al. 2014; Dorval et al. 2016)。RSA から得られる根系の特性には、幹から一定の距離にある根の断面積合計 (Total root cross sectional area, CSA) (Liang et al. 2017)、垂直根と水平根の総量と形状 (Toral et al. 2011)、根の直径から計算される根の引き抜き抵抗 (Yamase et al. 2019)などがある。このような根系特性の調査のためには、根系を土壌から掘り出す必要があり、その大きな根系構造から効率的にデータを得ることが必要となる。

樹木の RSA (Danjon and Ruebens 2008)のデータ取得法として、特徴的な根の点について 3D の xyz 位置座標 (地表面の位置と深さ)と直径 (これを以下、根のポイントデータと定義する)を測定し、これらに根のつながりの情報を加味することで根系構造を復元し、そこから根の特性値を計算することが多い。Danjon and Ruebens (2008)は、根のポイントデータの取得法をレビューし、それらを手動、半自動、自動に分類した。手動測定が最も一般的であるが、労力と時間がかかる (Danjon and Ruebens 2008; Ohashi et al. 2019)。Henderson et al. (1983)は、アルミフレーム上の T 字型定規を移動させることで根の x および y 座標を、下げ振りを下ろすことで z 座標を決定し、胸高幹直径 (DBH)が 9.0 cm から 11.5 cm のシトカトウヒ (*Picea sitchensis*)の RSA のデータを取得した。Mulatya et al. (2002)は、センダン属の落葉高木であるメリア (*Melia volkensii*)の周囲に水平な格子を作り、根の枝分かれや角度の変化する地点の座標を測定することで RSA のデータを得た。半自動の方法として、デジタルコンパスと傾斜計 (Oppelet et al. 2000)、あるいは接触式デジタルライザーと AMAPmod ソフトウェア (Godin et al. 1997; Danjon et al. 1999; Sorgonà et al. 2018)を用いて、3D の根のポイントデータを測定する方法がある。これらの方法は、根のポイントデータから RSA を求め、そこから直径、長さ、CSA など根特性を容易に算出できるため多用されている。

一方、RSA データ取得の自動化された方法では、根の表面のみを表す非常に多くの点からなる点群データ (Point cloud data)が迅速に収集される。Lontoc-Roy et al. (2005)は、コンピュータ断層撮影を用いて樹木苗について根系の点群データを取得したが、この方法は野外に生育する大きな樹木には使えず、点群データから根直径を計算する根のポイントデータへの変換も困難である。比較的大きな樹木に適用できる自動化手法として、

3D レーザスキャナがある。3D レーザスキャナは高価であるが、非接触で高精度に 3D 物体の表面における点群データを収集できるため、樹木の地上部の計測に利用されている (Calders et al. 2015; Dassot et al. 2011; Raunonen et al. 2013; Seidel et al. 2011; Srinivasan et al. 2015)。Gärtner et al. (2009)は、3D レーザスキャナを用いて、樹齢 80 年のドイツトウヒ (*Picea abies*)の根系全体の点群データを取得した。Smith et al. (2014)は、点群データをコンピュータ支援設計ソフトウェアでポリゴンデータに変換することで、ドイツトウヒの根系バイオマスを測定した。しかし、3D レーザスキャナを根系の評価に使用した研究はほとんどなく (Liski et al. 2014)、一般的に行われてきた根系の手動計測された値とレーザスキャナで推定された値を定量的に比較した研究もない (Smith et al. 2014)。これは、3D レーザスキャナは、根の表面の形状をデータ化するために最良の手法であるものの、根系の特性を算出するために多くの作業工程を必要とする (Danjon and Ruebens 2008)ためである。したがって、3D レーザスキャナで測定した根表面の点群データを、根のポイントデータに変換するためにさらに自動化されたステップが必要である。

本節の研究目的は、3D レーザスキャナで取得した根系点群データから、3D 座標と根の直径という根のポイントデータを容易に得て、根特性値を算出するための新たな手法を提案すること、および、点群データから変換された根のポイントデータの精度を手動計測から算出された根特性値と比較することである。

対象樹種として、2011 年の東日本大震災後に海岸林復興のために植栽されたクロマツ (*Pinus thunbergii*)における津波への耐性 (Forestry Agency of Japan 2011)を評価するための端緒として、クロマツに着目した。掘り出したクロマツの根系を 3D レーザスキャナでスキャンし、根系表面の点群データを根のポイントデータに変換し、そこから RSA データを再構築した。また、手動計測により根系を計測しそこから根特性値の算出も行った。これらの 2 つの方法で得られた RSA データを比較し、根の断面積合計 CSA を比較することで両データセットの再現性を調べた。

4-1-2 材料と方法

4-1-2-1 調査対象木

本節では 3 章 3-1 で対象としたクロマツ 2 個体の根系 (Root 1、Root 2)を対象とした (写真 4-1-1)。これらの対象木は、愛知県田原市の渥美半島の西端から 8 km にわたって広がる海岸林に生育しており (坂本ら 2013; 田中ら 2017; Hirano et al. 2018; Todo et al. 2019)、その位置は 3 章 3-1 の Plot A である。

対象木の樹高 (H)と胸高幹直径 (DBH)を測定した後、2 章と同じ方法で樹木の引き倒し試験において引き倒しモーメントを測定し、地面の高さで樹木を切断した。切り株の年輪から樹齢を測定し、エアースコップで根系全体を掘り出した (田中ら 2017;

Hirano et al. 2018)。2本の対象木は樹齢45年と50年、DBHは19.5 cmと18.5 cm、Hは10.8 mと11.4 mであり、地上部のサイズはほぼ同じであった(表4-1-1)。根の最大深さは、Root 1で126 cm、Root 2で106 cmであった(表4-1-1)。一方、Root 2における引き倒しモーメントは、Root 1の約1.3倍であった(表4-1-1)。掘り出した根は、3D根系構造(RSA)データを取得するために室内に持ち込んだ。

4-1-2-2 3D レーザスキャナによる計測

3D レーザスキャナ(FARO Focus3D S120、FARO Technologies, Inc.)を用いて、根系全体の表面における点群データ(図4-1-1、2、3)を収集した(写真4-1-1)。このスキャナの仕様として、スキャナの位置とターゲットとの間の誤差が2 mm、最適平面スキャンにおける標準偏差が2 mm以下と規定されている(FARO 2013)。根系は、伐採表面の切り株面を上に向けて吊り下げ、可能な限り土壌中のRSAを維持するようにいくつかの地点で支持を行った。根系全体を陰影なくスキャンするため、根系の周囲8カ所において順にスキャナを設置し撮影を行った。

スキャナで取得した画像データから根系構造モデルを作成するために、脳神経細胞ニューロンの形態をデジタル再構築するために設計されたフリーソフトウェア neuTube (Feng et al. 2015)を使用した。複雑な分岐構造をもつ脳神経細胞の形態を計測する方法として、蛍光染色した神経細胞について焦点面を変えながら連続して撮影し(共焦点顕微鏡画像)、3D構造を再構築する方法がある(Feng et al. 2015)。このneuTubeは、その共焦点画像データから神経細胞の分岐3D構造を再現し解析するために開発されたものであり、樹木の根系データにも適用できる可能性がある。

まず、視覚的に明らかに根系の表面以外に存在する点群データを手動により削除し、根系表面だけを構成する点群データを抽出した。次に、この根系点群データを深さごとに階層化し、深さ1 cmごとに一連の2次元点群画像データを作成した。点群データは根の表面のみを表すため、各画像には根の横断面の外周が点群として示される(図4-1-1)。そこで、それぞれの根の横断面の外周を示す領域の内側である根断面内をソフトウェア ImageJ で埋めた。スライスした一連の画像を neuTube に読み込み、自動追跡機能により各円を長軸方向に追跡し、分岐点での直径や、根と根のつながりに関するデータを出力した。本ソフトウェアでは、各セグメントの断面は円と仮定されている。

4-1-2-3 手動計測

3D スキャナ計測と同じクロマツ2個体の根系構造について、根の位置であるポイントデータを、手動においても計測を行った。手動計測の手法は Ohashi et al. (2019)に準じた。100 mm×100 mmの格子線が描かれたシートの上に、各根系を逆さまにして固定し、xおよびy座標のガイドとした(写真4-1-2)。逆さにしたことでz座標のずれた根の位置は、台の上に乗せることで調整した。直径5 mm以下の細い根を切り取った後、

根の端点、分岐点、格子線と根が交差する位置で、根の 3D 座標 (x, y, z) と直径を測定した (写真 4-1-2)。それぞれの根の測定点には ID 番号を付け、測定間のつながりを記録した。格子線を基準にコンベックスで水平座標 (x, y) を測定し、x 座標と y 座標を決定した。z 座標は、根系の測定点から地面までの距離を鉛直線に沿って測定して求めた。根の直径は、デジタルノギスを用いて垂直方向と水平方向に測定し二方向の平均値とした。

4-1-2-4 根のポイントデータからの根系構造 (RSA) の再構築

点群データから算出した根のポイントデータ、または手動で計測した根のポイントデータを用いて、RSA を再構築した (図 4-1-2、3)。RSA を再構築した根系構造モデルは、根の点 (ノード) 間の接続関係を下記のフォーマットで記述した。

ノード ID	ノードタイプ	x 座標値	y 座標値	z 座標値	ノード半径	接続先ノード ID
--------	--------	-------	-------	-------	-------	-----------

このフォーマットは、ニューロンの形態記述に使われている SWC と呼ばれるフォーマットで、構造をこの形式でモデル化することによって、様々なソフトウェアで表示、解析することが可能になった (Feng et al. 2015)。ノード ID は根系モデル構築の際に、実測した根の点 (ノード) に対して一意の番号を付与することによって設定し、ここではノードタイプは全て 0 とした。隣接する根の点 (ノード) 間は、近似的に円柱として接続された。neuTube は、接続された根のポイントデータを解析し、根を表示するために使用された。neuTube は SWC ファイル形式に基づいた形態モデルをインポートすることができるので (Feng et al. 2015)、スキャナと手動計測の両方の RSA データを SWC 形式で保存した。

なお根系構造の再構築にあたり、幹中心の根株部分については、本節では詳細な計測が行われていないため含めておらず、根系を構成する垂直根や水平根などそれぞれの根の部分 (セグメント) のみを再現した。

4-1-2-5 根系構造 (RSA) データのキャリブレーション

RSA データはピクセルとして取得される。各根系の特徴のある根の点 (根の終点と変曲点) を 10 点選び (図 4-1-4)、それらの 3D の xyz 位置座標と根の直径を 3D レーザスキャナのデータ (ピクセル) と手動による直接計測 (mm) と比較し、スキャナのデータを長さ単位 mm に変換する式を構築した (表 4-1-2)。

4-1-2-6 異なる方法で得られた根系構造 (RSA) データの比較

根のポイントレベルで再構築される RSA の違いを評価するために、各根系の上記の

特徴点とは別の 10 点について両手法で得られた 3D の xyz 位置座標と根の直径を比較した (図 4-1-5)。また、各根系における RSA データ全体の違いを評価するために、点群データの上面図と側面図を、レーザスキャナのデータから再構成した RSA と比較し、再構築された RSA は手動で計測したポイントデータと比較した。さらに両測定手法ともに、隣接する根の点を neuTube により円柱としてつないだ RSA を再構築し、それらを両測定手法間で比較した。

また、根の伸長方向における根直径の変化 (根の先細りの度合い)を両測定手法間で比較した。再構成された RSA (図 4-1-6)から、主要な根の部分 (セグメント)を各個体 10 個選び、測定方法の違いによる根直径の変化を比較した。また、再構築した RSA において、幹の中心から一定の水平距離にある垂直方向の根の CSA について、測定方法による違いを比較した。幹から一定距離の CSA を計算した理由は、根鉢の風上側の外周に存在する 1 本 1 本の根の引張強度が、強風時に樹木の倒伏防止に役立つ可能性があるためである (Coutts 1986)。根鉢は模式的に楕円柱や円柱に近似して考えられるため (Blackwell et al. 1990; Tanikawa et al. 2021)、円柱 (根鉢)側面の根の数、直径、CSA を、根鉢周囲の根特性として抽出した。幹の中心から水平距離で 300 mm から 1800 mm までの 100 mm ごとに同心円状の円柱側面における根の直径から、再構築した RSA の総根の CSA を算出した。

4-1-3 結果

4-1-3-1 手動および 3D レーザスキャナ計測における根系構造 (RSA)の再構築
ソフトウェア neuTube を使用して、クロマツ 2 個体の 3D 根系構造 (RSA)を再構築することに成功した (図 4-1-2、3)。3D レーザスキャナによる RSA の上面 (図 4-1-2B, 2C, 3B, 3C)と側面 (図 4-1-2B, 2c, 3B, 3c)の形状は、点群 (図 4-1-2A, 2a, 3A, 3a)と非常によく似ており、主要な根もほぼ再現されていた。しかし、幹近くの根の密度はスキャナにより再構築された RSA のポイントデータと点群データではやや異なっており、再構成された RSA は点群データの RSA よりもまばらで単純であった。

手動計測由来の RSA (図 4-1-2D, 2E, 2d, 2e, 3D, 3E, 3d, 3e)は、3D レーザスキャナ由来の RSA (図 4-1-2B, 2C, 2b, 2c, 3B, 3C, 3b, 3c)と同程度に再構成されていた。同様に、主要な根もよく再現されていた。しかし、手動計測由来の RSA は、3D レーザスキャナ由来の RSA に比べて、やや単調でまばらであった (図 4-1-2A, 2a, 3A, 3a)。

4-1-3-2 手動計測と 3D レーザスキャナ計測の根のポイントデータの比較

選ばれた 10 点の根の 3D の xyz 座標位置と根の直径は、Root 1 と Root 2 の両方で、

3D レーザスキャナ計測と手動計測の間に有意な正の相関が認められた ($P < 0.01$; 図 4-1-7)。ただしその中でも z 座標の相関はやや低かった (Root 1: $R^2 = 0.95$ 、Root 2: $R^2 = 0.89$ 、図 4-1-7 c)。また、3D レーザスキャナ由来のポイントデータにおける根の直径は、直径 7 mm から 50 mm 程度の範囲であったが、実測値と同様に算出されていた (図 4-1-7 d)。

4-1-3-3 手動計測と 3D レーザスキャナ計測の根の細りと根系断面積合計 (CSA) の違い

クロマツ 2 個体の根系における 20 個の根セグメントの細り傾向について、3D レーザスキャナ計測と手動計測の間で、多少の違いはあるものの、ほぼ類似していた (図 4-1-8 a, 9)。測定方法による根直径の差は、平均で 3.6 mm (図 4-1-8 b)、最大で 16.0 mm (図 4-1-10) であった。

根の断面積合計 (CSA) は、どちらの方法でも幹の中心からの距離が長くなるにつれて減少する傾向にあり (図 4-1-11 a, b)、幹からの距離 500 mm 未満の Root 1 では特に顕著であった。両計測手法による CSA の値の間には正の相関があり、その傾きは 0.82 であった (図 4-1-11 c)。これは、3D レーザスキャナで推定された CSA が、手動計測で推定されたものよりも小さいことを示した。

4-1-4 考察

4-1-4-1 点群データから根系構造 (RSA) を再構築するための重要なステップ

本節では、3D レーザスキャナで取得した根系表面の点群データから変換した根のポイントデータを用いて、3D 根系構造 (RSA) を再構築し、根の先細りや根の断面積合計 (CSA) などの根の特性を算出する新たな方法を提案した。本節の提案手法は脳神経細胞の 3D 構造を再構築するために開発されたソフトウェア neuTube (Feng et al. 2015) を樹木の RSA に適用した最初の例である。3D スキャナから算出された根特性の精度は、手作業で取得した根のポイントデータと非常によく似ていた。掘削した根系を 3D レーザスキャナでスキャンした既存研究は存在するものの (Gärtner et al. 2009; Smith et al. 2014; Liski et al. 2014)、結果として得られた根系モデルの精度を、手動による根の測定値と比較した定量的な評価はこれまでにされていなかった (Smith et al. 2014)。3D レーザスキャナによる RSA の計測には、根系の表面の点群データとして得られ、その後の計算に扱いにくいという欠点があった (Danjon and Ruebens 2008)。しかし、本節で提案した方法では、点群データを根のポイントデータ、さらには RSA データに比較的簡単に変換し、RSA の特性を算出することを可能とした。このような分析は、樹木の根返りや地すべりに対する樹木の倒伏耐性を調べる上で重要である (Coutts 1986; Danjon et al. 2005; Schwarz et al. 2010)。根の特性に関する情報は、通常掘り出した根系を直接測定すること

によってのみ得られる。しかし、根のポイントデータや点群データを RSA データに変換できれば、必要に応じて保存された RSA データから、その後でもさらに詳細な根特性情報を解析し得ることができる。

3D レーザスキャナによる計測のもう一つの利点は、手動や半自動の方法に比べてはるかに少ない労力と時間で済むことである (Danjon and Ruebens 2008)。本節では、手作業にて 10 cm 間隔で根の 3D の xyz 位置座標を収集したり、根の分枝や根端部分のデータを取得したりするために、1つの根系につき3人で5日の作業量であった。これに対し、複数の地点に設置した 3D レーザスキャナは、1つの根系をおよそ 60 分でスキャンした。根系表面の多くの点群データを収集し、それらから根のポイントデータに変換することで、手作業では解析の難しい微妙な根の凹凸や根直径の変化を再現することができる。

4-1-4-2 3D レーザスキャナを利用するための課題

3D レーザスキャナ計測による点群データの取得・解析には課題が残る。まず、根系をスキャンする際に、掘削した根の位置をできるだけ土壌中の位置と一致させる必要がある、特に垂直方向の位置は重要である。本節の結果では、根の深さを示す z 座標が、xy 座標に比べて手法間でわずかに異なっていた (図 4-1-7)。この理由として、根系を直立させて 3D スキャンしたにもかかわらず、上下を逆にして手動計測したことなど、測定された根系の再設置の違いによることが考えられる。水平方向の細い根は、プレートにボルトで固定したり (Henderson 1983)、台やポールに縛り付けたりすることができるが (Gärtner et al. 2009)、このような作業にはさらに十分なスペースと時間及び労力が必要となる。

また、幹に近い根、特に幹から水平距離 500 mm 以内に存在する根について、データ取得手法により CSA 値が異なる傾向にあった (図 4-1-11)。この理由として、幹近くにある根は隣接する根と重なり合っており、レーザ光が根の表面全体に届かないためと考えられる。実際、2つの方法の CSA 値間の関係式の傾きは、幹の中心から 600 mm から 1800 mm の水平距離ではほぼ 1.0 であったが、幹近くを含む 300 mm から 1800 mm の距離では 0.82 にとどまった。3D レーザスキャナによる測定よりも、手動による測定で幹近くの根の CSA が大きくなる傾向にあった。この差を改善する方法として、(i)これらの誤差の生じやすい場所では、より詳細なスキャンを行うか、点的に明かりを入れるランプ (Gärtner et al. 2009) を使用する、(ii)根の直径が顕著に変化する場所を見つけて補正を行う、などが考えられる。

本節で新たに用いた neuTube は円形の断面形状を想定しているため、各根のセグメントは円筒状である。この仮定は、根の断面の不均一な形状、特に強いストレス下で形成される T 字型や I 字型 (Nicoll and Ray 1996)の根を表現する時には適していないであろう。そのため、様々な根の形を持つ樹種にこの方法を適応させることや円筒以外を仮定

した適用を考慮する必要がある。

4-1-4-3 根系構造 (RSA)測定の今後の展望

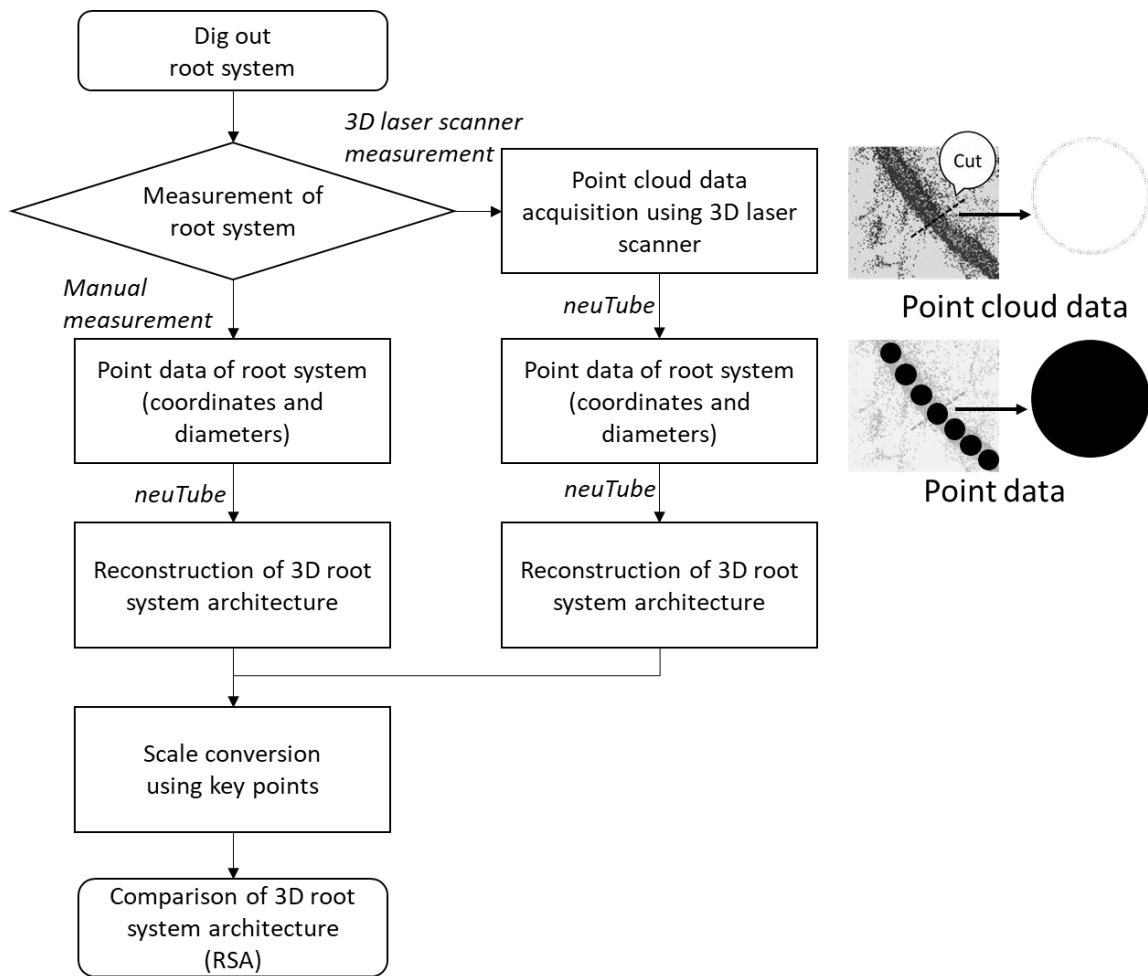
RSA の計測では、根系全体を掘り出す必要があるため、時系列データを取得することができない。また地中レーダ (Hirano et al. 2012)などの非破壊調査で得られた根の位置と直径といったポイントデータは、それらの根のつながりを示していないため、接続アルゴリズムを用いなければ RSA データに変換することは困難である (Kaestner et al. 2006)。最近、スギの根のポイントデータに対する接続アルゴリズムにより RSA を再構築する手法が考案されている (Ohashi et al. 2019)。このような方法は、接続情報のない根のポイントデータの処理にも利用できる。ただし、これらの接続アルゴリズムを考案する前に、根系を掘削し、根の位置、直径、接続を手作業で測定する必要がある (Ohashi et al. 2019)。本節の結果では、根系表面の点群データから変換された根のポイントデータと再構築された RSA データは、手動計測により再現された RSA データと非常によく似ていることが確認された。したがって、3D レーザスキャナのデータを用いて、他の樹種の根系の接続アルゴリズムを開発することで、様々な樹種においても RSA の再構築ができるであろう。

表 4-1-1 Properties of *Pinus thunbergii* trees.

Properties	Root 1	Root 2
Age (year)	45	50
Height (m)	10.8	11.4
Stem diameter at breast height (cm)	19.5	18.5
Critical turning moment (kN m)	25.5	33.6
Maximum depth of root (cm)	126	106

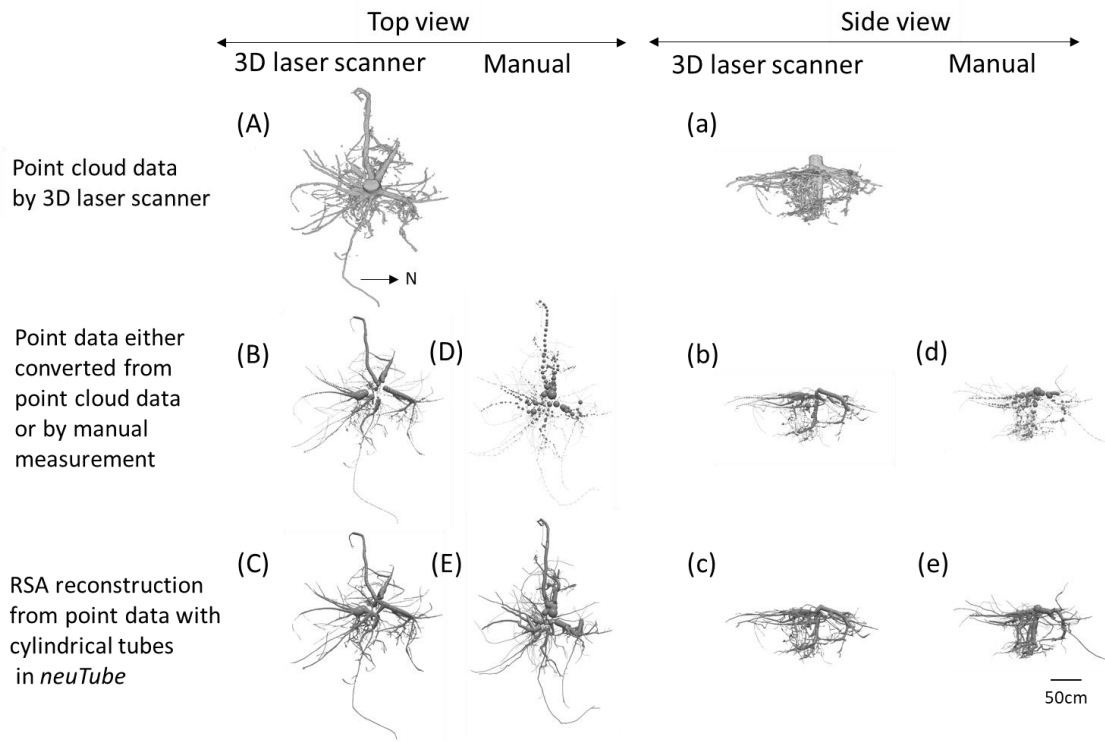
表 4-1-2 Conversions of root point data from 3D laser scanner to scale based on the relationships in the coordinates or diameter of roots between manual measurement data (x_m, y_m, z_m, d_m) and 3D laser scanner measurement data ($x_{3D}, y_{3D}, z_{3D}, d_{3D}$).

	Root 1	Root 2
x -coordinate	$x_{1m} = -5.111 x_{13D} + 1328.6$	$x_{2m} = -8.020 x_{23D} + 2066.9$
y -coordinate	$y_{1m} = -5.043 y_{13D} + 1293.8$	$y_{2m} = -6.054 y_{23D} + 2227.2$
z -coordinate	$z_{1m} = 5.219 z_{13D} - 99.6$	$z_{2m} = 9.920 z_{23D} - 211.32$
Diameter	$d_{1m} = 4.889 d_{13D} - 5.12$	$d_{2m} = 6.465 d_{23D} - 12.22$

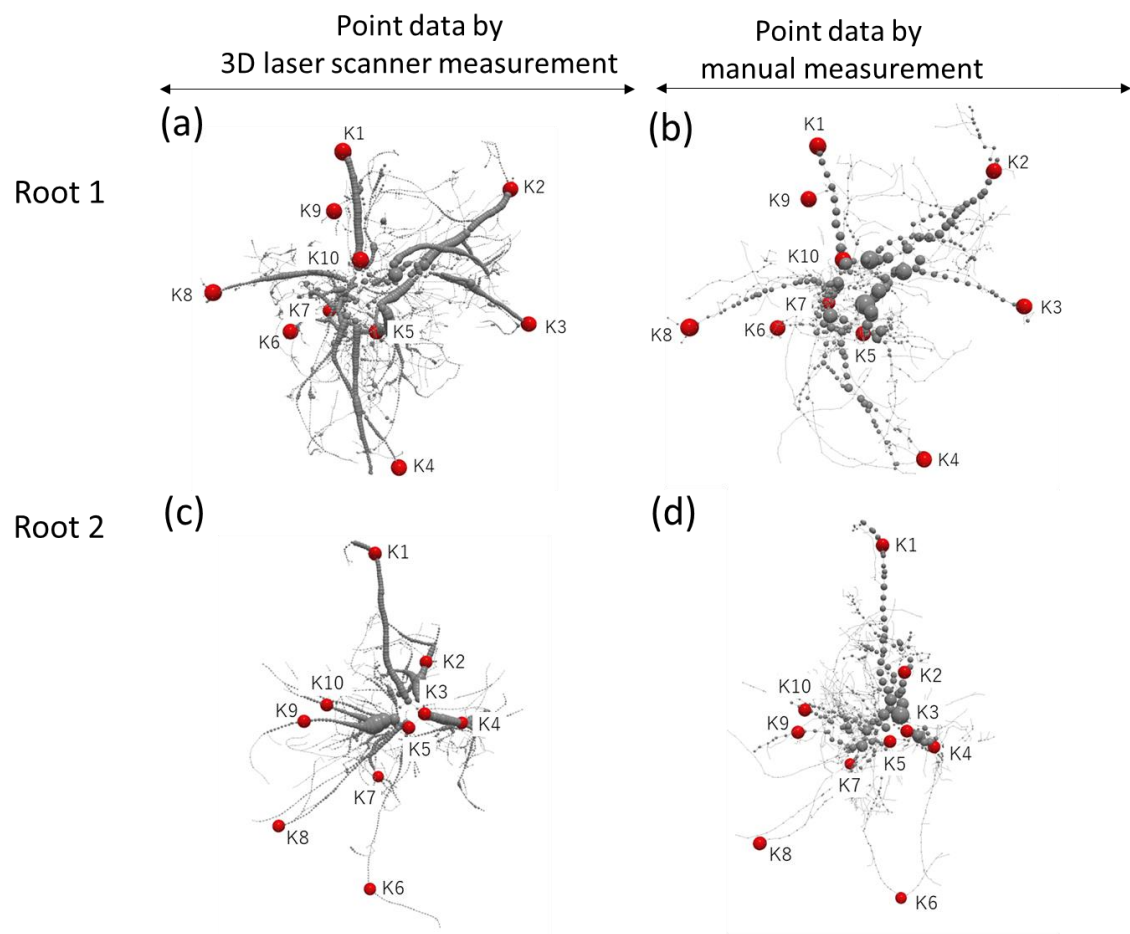


☒ 4-1-1 Acquisition of point cloud data and root point data and reconstruction of root system architecture (RSA).

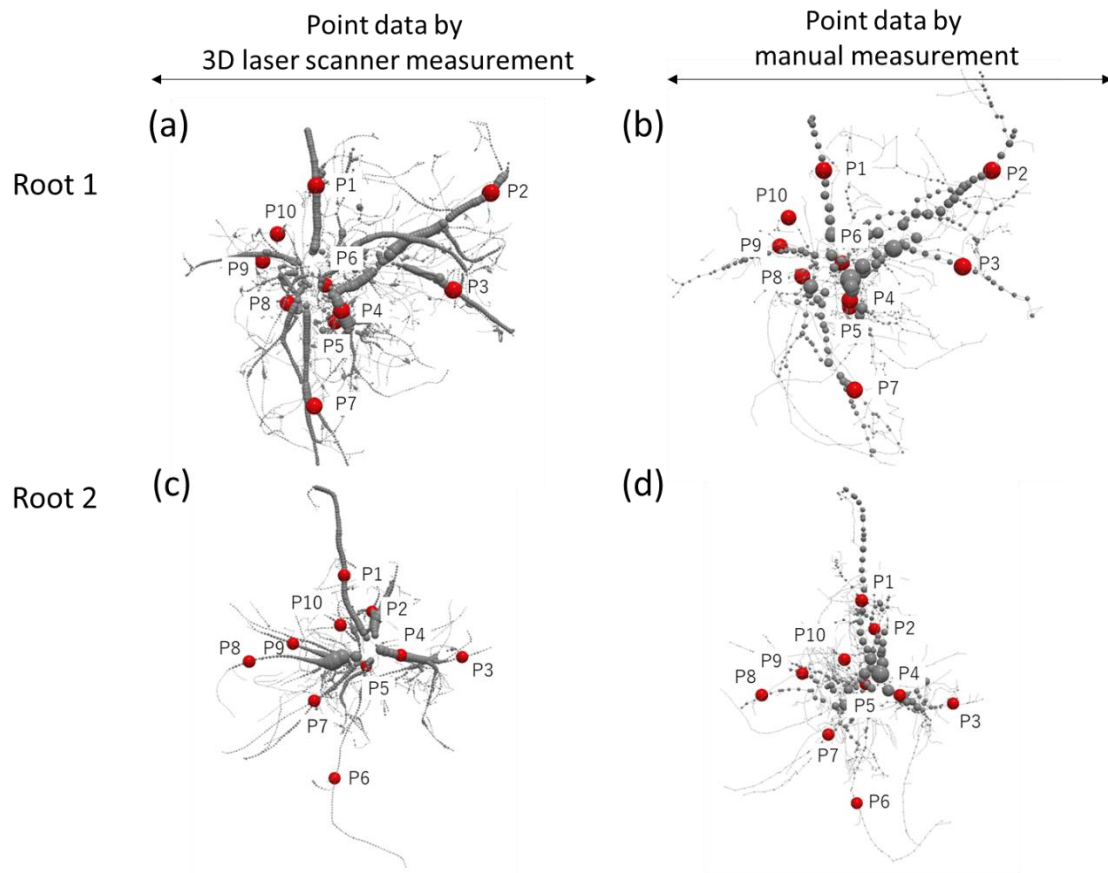
Root 2



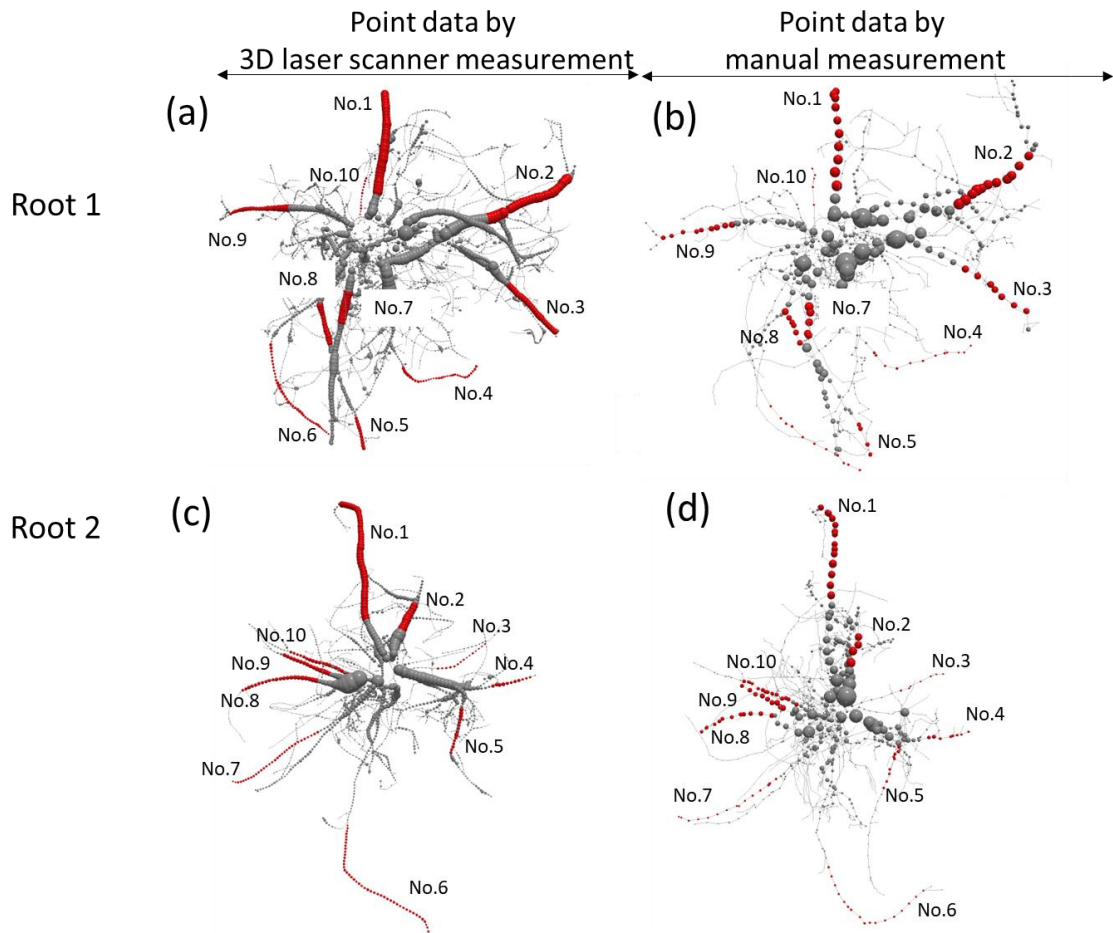
☒ **4-1-3** (A–E) Top and (a–e) side views of Root 2 drawn from (A, a) point cloud data collected by 3D laser scanner; root point data (B, b) converted from point cloud data or (D, d) gathered by hand; and (C, E, c, e) RSA reconstructed by *neuTube* software.



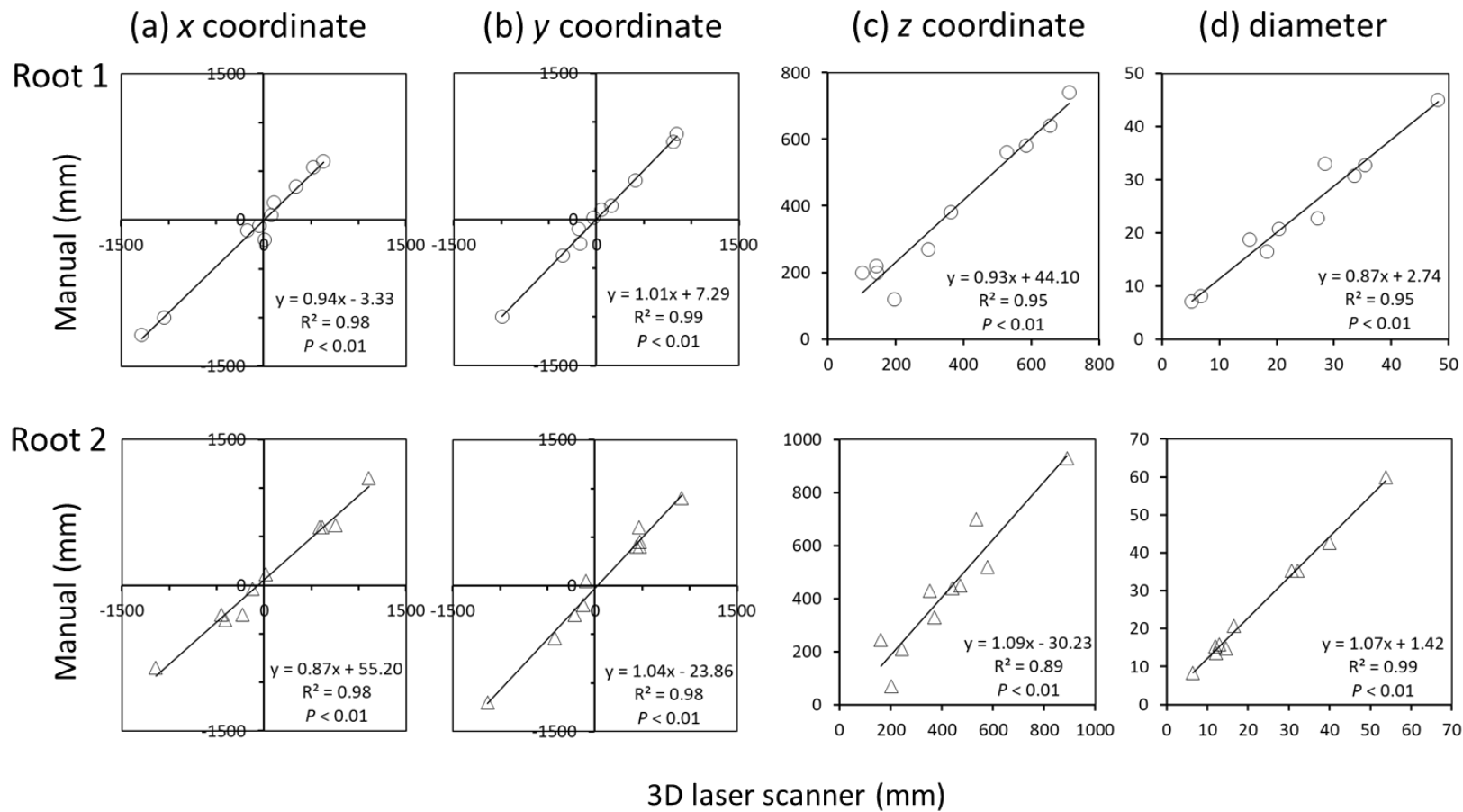
☒ 4-1-4 Positions of 10 points (K1–K10) set to relate locations of roots to actual scale.



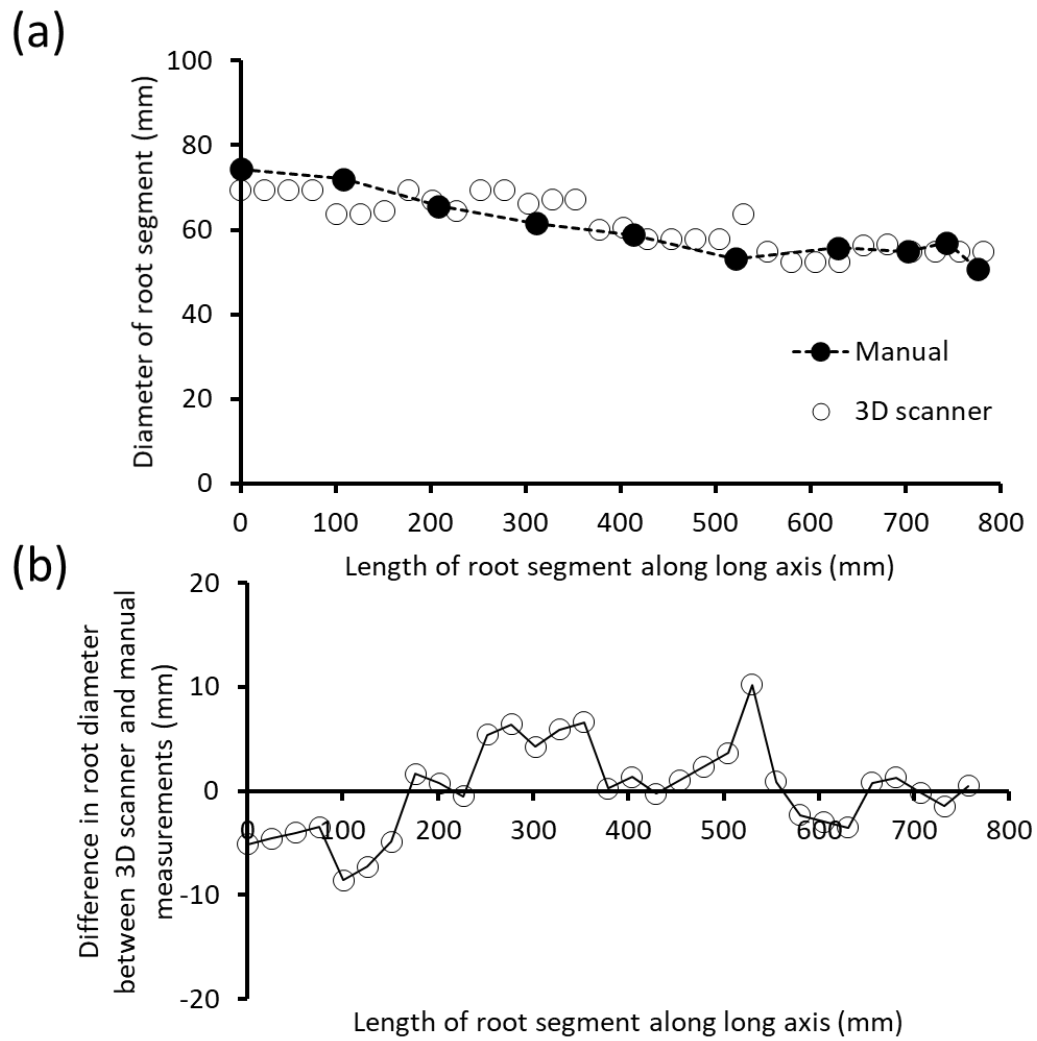
☒ **4-1-5** Positions of 10 points (P1–P10) set to evaluate the accuracy of the *xyz* coordinates and root diameters in root point data collected in (a, b) Root 1 and (c, d) Root 2 by (a, c) 3D laser scanner and (b, d) hand.



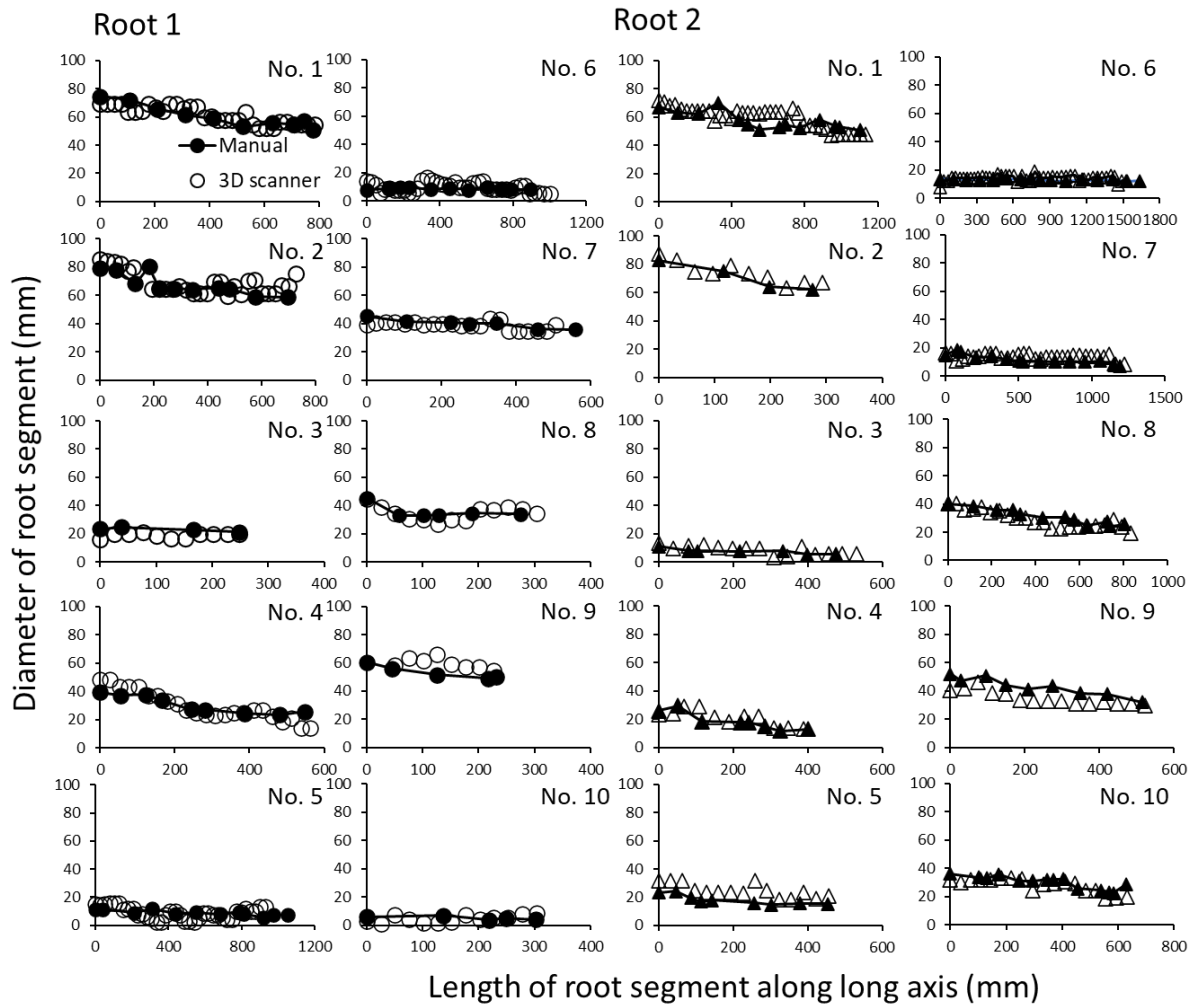
☒ 4-1-6 Ten main roots in each root system selected to compare tapering between (a, b) Root 1 and (c, d) Root 2 measured by (a, c) 3D scanner and (b, d) hand.



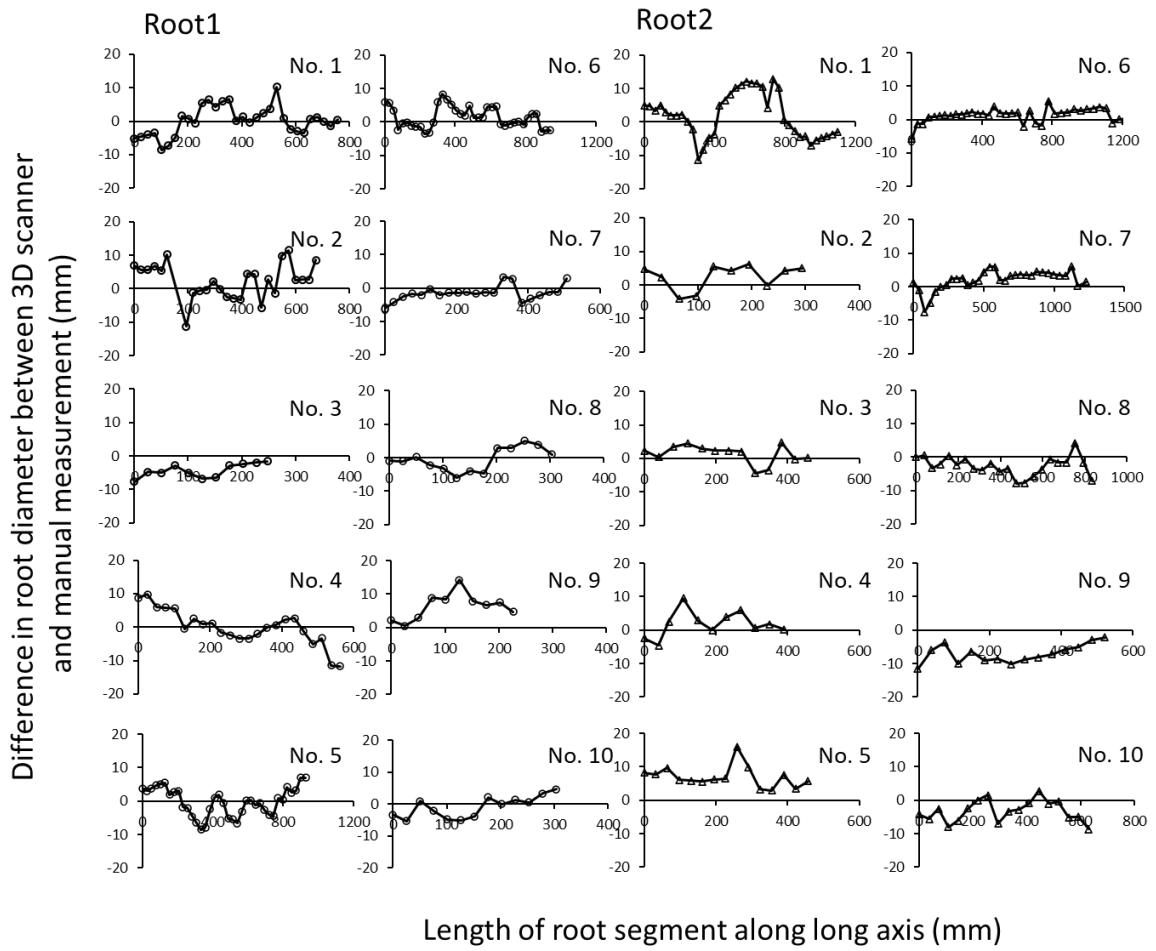
☒ 4-1-7 Relationships of (a) x, (b) y, (c) z coordinates, and (d) diameter of 10 selected root points between 3D laser scanner and manual measurements.



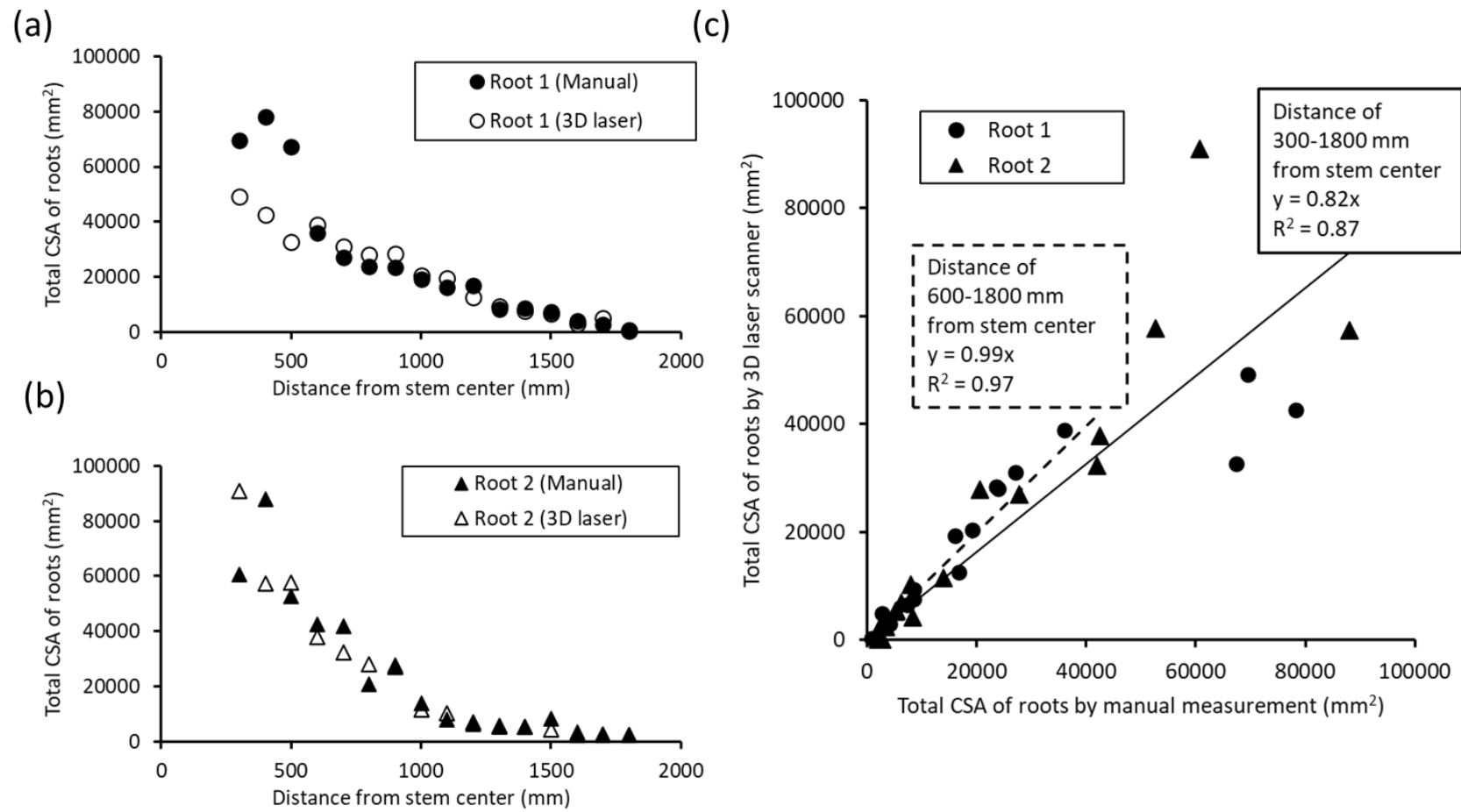
☒ 4-1-8 (a) Changes and (b) differences in the diameter of one root segment on the long axis (Root 1 No. 1 in Fig. 5a) between the 3D laser scanner and manual measurements.



☒ 4-1-9 Changes in the diameters of 10 root segments along the long axis in each root system by 3D laser scanner and manual measurements.



☒ **4-1-10** Differences in the diameters of 10 root segments along the long axis in each root system between 3D laser scanner and manual measurements.



☒ **4-1-11** Total cross-sectional area (CSA) of (a) Root 1 and (b) Root 2 with distance from the stem center by 3D laser scanner and manual measurements. (c) Relationship of the total CSA of both root systems between 3D laser scanner and manual measurements.

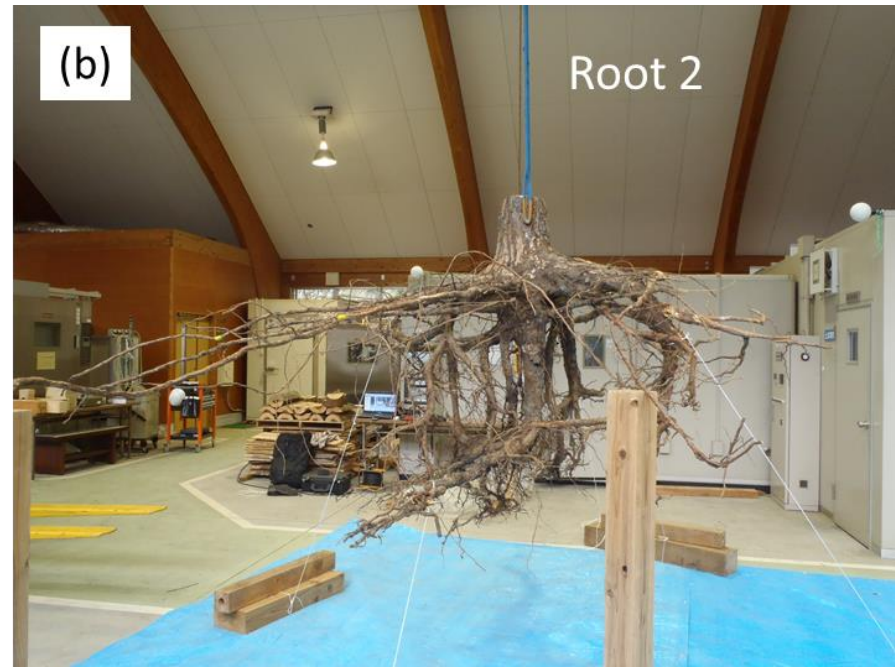
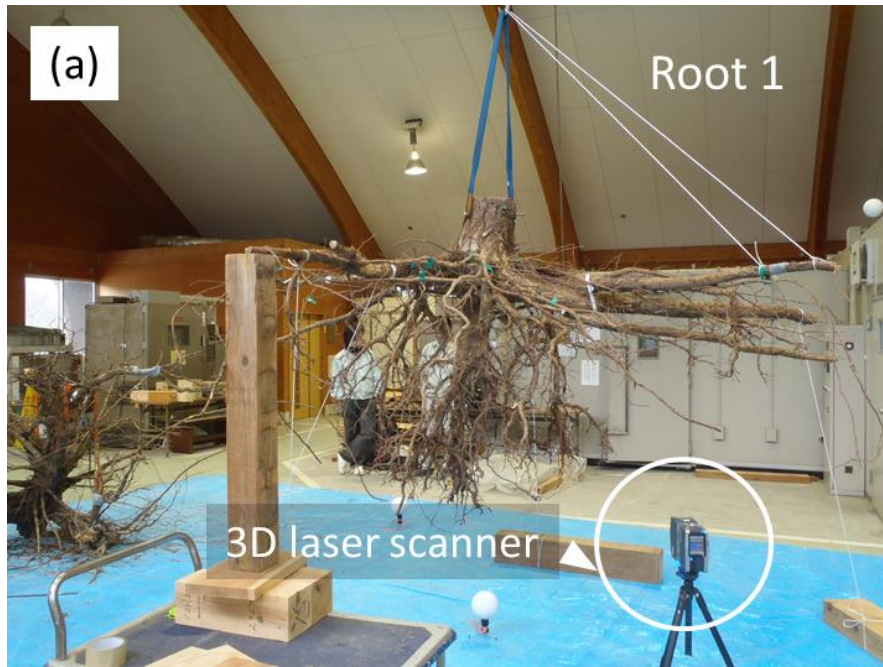


写真 4-1-1 How we measured (a) Root 1 and (b) Root 2 by 3D laser scanner.



写真 4-1-2 How we measured the root system by hand against a 100 mm × 100 mm grid. This photo shows *Cryptomeria japonica*.

4-2 異なる根系型を持つ3樹種の根系構造と引き倒しモーメント

4-2-1 はじめに

2章から3章では、樹木の地下部である根系や根鉢が倒伏抵抗力に寄与することを明らかにしてきた。しかし、根系構造の中でどの部分のどのような根特性が倒伏抵抗力に寄与するのか、また、異なる根系構造を持つ樹種ではその寄与部分が異なるのかといったことはまだ明らかにされていない。

4-1では、樹木の三次元 (Three dimensional, 3D)根系構造 (Root system architecture, RSA)に関するデータについての取得法と解析法を提案した。これらの手法を活用することで、RSA データと倒伏抵抗力との関係性を解析することが可能である。1章でも触れた通り、樹木の倒伏抵抗には、根系全体の重量による抵抗、せん断に対する抵抗、風上側の引張に対する抵抗、風下側の圧縮に対する抵抗、土の抵抗が関係しており (Mattheck et al. 2015)、それぞれの抵抗の寄与率は異なる根系構造を持つ樹種ごとに変化する可能性がある。樹木で根系構造の違いは、根系型で表現されることが多い (平野ら 2020)。2章では、垂直な根よりもむしろ斜め下方に成長する根を持つ斜出根型といわれるスギ (*Cryptomeria japonica*) (荻住 2010)について、同じ垂直根深さの場合には、水平根の成長促進が倒伏抵抗を高めることを明らかにした。3章では、樹種特性として深い真っ直ぐ下方へ伸長する根をもつ垂直根型を示すクロマツ (*Pinus thunbergii*)について、深い垂直根を持つクロマツは樹高も高いため、津波に対する倒伏抵抗が高いことを示した。一方で、高い地下水位に生育するクロマツは垂直根の代わりに水平根の成長を優先させ、樹高の低い個体でも、同じ材積を示す樹高の高い個体と倒伏抵抗が同様であることを明らかにした。本節ではこれら2樹種に加え、水平根型をもつケヤキ (*Zelkova serrata*)を対象とする。ケヤキは落葉広葉樹であり、里山の樹種として森林で利用されるだけでなく、街路樹としても植栽されている (茂木ら 2000)。

本節では、異なる根系型を持つ3樹種の3D根系構造と倒伏抵抗力との関係性を明らかにすることを目的とした。具体的な目的として、(i)異なる根系型を持つスギ、ケヤキ、クロマツ (荻住 2010)について、成木の掘り取りにより3D根系構造を再現し、根系構造の樹種間差を評価すること、(ii)これらの3D根系構造から、任意断面における根の断面積合計 (Total root cross sectional area, CSA)や根系体積といった根特性を算出し、倒伏抵抗を示す引き倒しモーメントとの関係性を明らかにすることとした。さらにそれぞれの樹種の倒伏抵抗と関係性を持つ根特性から、これら3樹種がどのように根系を介して倒伏抵抗を発揮するのか、そのメカニズムを考察した。

4-2-2 材料と方法

4-2-2-1 調査地

調査地は対象樹種に伴い2箇所設定した。試験地1は、兵庫県宍粟市山崎町川戸の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川戸実習舎敷地内の植栽された林分である。本試験地の土壌は未熟土であり、深さ約30 cmに礫混じりの層がある。傾斜はほとんどなく、ほぼ水平である。試験地2は、3章3-1のPlot Aおよび4章4-1と同じ愛知県田原市の海岸林であり(田中ら 2017)、土壌は海岸性砂質土で未熟土およびRegosolsに分類される(FAO-UNESCO 1990)。

対象樹種は、苅住(2010)を参考に、根系構造の違いから斜出根型のスギ、水平根型のケヤキ、垂直根型のクロマツの3種を選定した。スギとケヤキの対象木は試験地1の中に生育する隣接したスギ林(26年生、平均樹高(H):12.2 m、平均胸高幹直径(DBH):13.7 cm、3,500本/ha、写真4-2-1)とケヤキ林(20年生、平均H:9.2 m、平均DBH:9.6 cm、2,000-4,000本/ha、写真4-2-2)から選定した(表4-2-1)。クロマツは試験地2のクロマツ林すなわち3章3-1におけるPlot Aから選定した(写真4-2-3、表4-2-1)。

4-2-2-2 引き倒しモーメントと根系構造(RSA)データの取得

各試験地から選ばれたスギ15個体、ケヤキ32個体、クロマツ13個体について、H、DBHを測定した後、引き倒し試験を行い、引き倒しモーメントを計測した。引き倒し試験時には、根鉢半径および回転中心の深さ(Depth at the center point of rotation, Dcp)も同時に計測した。引き倒し試験の方法は、2章および3章と同様であり、対象木の地上高1mにワイヤー及びベルトスリングをかけ地面と平行に重機で引っ張った。対象木とワイヤーの間には50 kN用のロードセル(LT-50KNG56 NIKKEI Electronic Instruments Co., Ltd, Tokyo, Japan)を挟み、得られた荷重データはブリッジユニット(DBU-120A, KYOWA Electronic Instruments Co., Ltd, Tokyo, Japan)を通してPCに0.1秒間隔で記録した。引き倒し試験におけるデータの取得は、引き倒しモーメントの最大値を記録するまで行われ、完全に根返りする前に試験は終了した。根鉢半径は2章と同様の方法で、最大引き倒しモーメントを計測した際の根鉢の亀裂を根鉢の端として、試験木1本当たり10箇所を計測した。回転中心の深さDcpも2章と同様(森岡 1983)にビデオカメラを使った方法で計測した。ただし3章3-1で行ったレンズ歪みの補正は、その補正前後で有意な違いは認められなかったため(3章3-1)、本節では行っていない。

引き倒し試験の終了後、各個体の地上部を切断し、エアースコップを用いて根系全体を掘り出した。掘り出した根系は、根系構造を測定するため、森林林業技術センターの室内に持ち帰った。根系を掘り出した試験木の個体数について、スギは7個体、ケヤキは5個体、クロマツは3章3-1で調査したPlot Aの4個体である(表4-2-1)。

室内に持ち込まれた根系は、4章4-1の手動計測と同様の方法(Ohashi et al. 2019)で3D根系構造(RSA)データを取得した。RSAデータはSWCフォーマットで記録し、フリーソフトウェアneuTube(Feng et al. 2015)を使用して3D構造を再現した。

4-2-2-3 引き倒しモーメントと根系特性

手動計測にて取得した RSA データから、引き倒しモーメントに関係すると考えられる根系の特性を算出した。根系特性は、①根鉢周囲の水平根及び垂直根の根系指標として、幹を中心とした半径 300 mm から 1000 mm (クロマツのみ 1900 mm)まで、および上記で測定された根鉢半径における同心円状測線下、地表面からの深さ 300 mm から 750 mm (クロマツのみ 1100 mm)までの各深度における根系断面積合計 (CSA)、②根系全体の体積及び水平根と垂直根の体積、③幹周囲の根鉢内における水平根密度の指標として、幹を中心とした半径 300 mm から 1000 mm までおよび深さ 300 mm から 400 mm までの同心円柱内の水平根の体積である。垂直根は地表面からの深さ 30cm 以深に存在する根とした。なお4章4-1の通り、本節の根系体積には幹中心部分を含めた根株分は含まれていない。

本節でも4章4-1と同様に根系構造モデルを根の点 (ノード)間の接続関係を下記のフォーマットで記述した。

ノード ID	ノードタイプ	x 座標値	y 座標値	z 座標値	ノード半径	接続先ノード ID
--------	--------	-------	-------	-------	-------	-----------

このフォーマットで記述したモデルについて、①同心円状測線下の根の断面積を求めするため、注目しているノードが同心円内にあり、接続先ノードは同心円外にある場合、「ノード間の距離」に対する「注目しているノードと同心円測線との距離」の割合で x, y, z 座標及びノード半径を補正し、同心円測線下に新たなノードを設定した。この補正したノード半径に基づき同心円測線下におけるこの根の断面積を求めた。また、注目しているノードが同心円外にあり、接続先ノードは同心円内にある場合についても、同様にして同心円測線下の根の断面積を算出した。こうして得られた同心円測線下の各根の断面積を加算し、根断面積合計 (CSA)を算出した。地表面からの深さ別の CSA の算出方法も同様とした。

一方、②や③のような同心円内の根系、特定の深さまでの根系など、特定範囲の根系の体積については、まず、注目しているノード及びその接続先ノードの両方が範囲外にあるときにはこれらのノード情報を消去した。いずれかが範囲内にあるときには、先ほどと同様の方法で特定範囲の境界に新たなノードを設定し、範囲内の根系のみからなる根系モデルを取得した。この根系モデルについて、各ノードとその接続先ノードをつなぐことで構成される両端の半径が異なるチューブの体積を算出し、その総和により特定範囲の根系体積を求めた。

上記の方法で算出された①幹中心からの距離別の CSA と根鉢半径における CSA、②根系体積、③同心円柱内の水平根体積といった根系指標と4-2-2-2で取得した根

鉢半径、Dcp について引き倒しモーメントとの関係性を検討した。

4-2-2-4 統計解析

3 樹種の地上部および根系特性は、Kolmogorov-Smirnov test を使用して正規性を確認した。根系特性と引き倒しモーメントとの関係を調べるため、Pearson's correlations test を行った。これらの解析には R (ver. 3.6.2) (R Core Team 2017) を使用した。

データ解析の1つとして、スギ、ケヤキ、クロマツの3樹種の地上部サイズを統一した地下部体積の比較を行った。3樹種の対象木には、平均地上部サイズに違いがあるため、そのままのスケールで地下部体積の違いを検討すると、地上部の大きさが地下部体積に影響する。したがって、3樹種のスケールを統一するため、スギ1個体(個体No. 1)の $H \times DBH^2$ (0.15 m^3 、表4-2-1)を基準に、3樹種の地上部体積を統一した。またスケールの統一に使用した換算比を用いて地下部の体積も換算した。スケールを統一した H と DBH は、それぞれの個体の H と DBH の関係性と、統一した $H \times DBH^2$ から算出した。

4-2-3 結果

4-2-3-1 引き倒しモーメントと DBH、 $H \times DBH^2$ 、根鉢半径および回転中心深さ (Dcp) との関係

地上部材積を示す $H \times DBH^2$ の平均値は、クロマツで最も大きく (0.33 m^3)、スギ (0.2 m^3)、ケヤキ (0.07 m^3) の順であったものの、ケヤキの引き倒しモーメントは平均で 30.9 kNm であり、クロマツ 22.1 kNm 、スギ 7.5 kNm と比較して最も大きかった(表4-2-1)。根鉢の平均半径は、ケヤキ、スギ、クロマツで 53.7 cm 、 50.4 cm 、 69.6 cm となり、それぞれ DBH の 5.9 倍、3.9 倍、4.0 倍であった。すなわちケヤキにおいて胸高幹直径 (DBH) に対する根鉢半径が最大となった(表4-2-1)。一方、回転中心の深さ (Dcp) は、ケヤキ、スギ、クロマツで 7.2 cm 、 17.7 cm 、 22.0 cm で、ケヤキで最も浅くクロマツで最も深くなった(表4-2-1)。

スギ、ケヤキ、クロマツの引き倒しモーメントと DBH の関係では、有意な累乗関係が見られた(スギ: $r=0.91$ 、 $P<0.001$ 、ケヤキ: $r=0.89$ 、 $P<0.001$ 、クロマツ: $r=0.78$ 、 $P<0.01$ 、図4-2-1 a, b)。同様に、引き倒しモーメントと $H \times DBH^2$ の関係には有意な強い正の相関関係が見られた(スギ: $r=0.90$ 、 $P<0.001$ 、ケヤキ: $r=0.87$ 、 $P<0.001$ 、クロマツ: $r=0.79$ 、 $P<0.01$ 、表4-2-2、図4-2-1 c, d)。

地下部特性である根鉢半径と Dcp について、3樹種の引き倒しモーメントとの関係を見たところ、根鉢半径との関係ではケヤキにおいて最も正の相関が強く、スギとクロマツにも有意な正の相関が認められた(スギ: $r=0.67$ 、 $P<0.05$ 、ケヤキ: $r=0.86$ 、 $P<0.001$ 、クロマツ: $r=0.70$ 、 $P<0.01$ 、表4-2-2、図4-2-2 a-c)。Dcp との関係で

は、スギとクロマツにおいて強い有意な正の相関が見られたが、ケヤキには相関は見られなかった (スギ : $r=0.75$ 、 $P<0.01$ 、ケヤキ : $r=0.36$ 、 $P<0.05$ 、クロマツ : $r=0.79$ 、 $P<0.01$ 、表 4-2-2、図 4-2-2 d-f)。

4-2-3-2 根系構造の樹種間差

本節で実際に掘り取られたスギ (写真 4-2-4)、ケヤキ (写真 4-2-5)、クロマツ (写真 4-2-6) 3 樹種について、手動計測された根のポイントデータとつながりの情報から再現されたすべての根系構造を図 4-2-3 に、樹種ごとの代表的な根系構造を図 4-2-4 に示した。スギの根系構造は斜出根型、ケヤキでは水平根型、クロマツでは垂直根型を示した。

3 樹種の幹中心から距離別の同心円測線下に存在する水平根の根系断面積合計 (CSA) の変化を見ると、3 樹種とも幹から遠ざかるにつれて CSA は減少した (図 4-2-5)。樹種間差を見ると、スギやケヤキでは幹からの距離が 400 mm を超えたあたりから急激に CSA が減少した。しかし、クロマツの CSA は比較的なだらかに減少し、幹からの距離 1900 mm を超えても水平根が存在した (図 4-2-5)。3 樹種の X 軸スケールを揃えたグラフでは、スギやケヤキに比べてクロマツでは水平根の CSA が全体的に大きかった (図 4-2-6)。これは 3 樹種の地上部サイズの差が影響したことが推察される。

地表面からの深さ別における垂直根の CSA の変化を見ると、3 樹種とも地表面から深くなるほど CSA が減少した (図 4-2-5)。ケヤキの垂直根の CSA は深さ 500 mm で 0 になり (図 4-2-5)、他樹種と比べると CSA の値が著しく小さくなった (図 4-2-6)。スギにおける垂直根の CSA はケヤキと比較すると、ゆるやかに減少し比較的深いところ (地表面からの深さ 650 mm) まで認められた (図 4-2-5)。クロマツと比較するとスギ垂直根の CSA は全体的に小さかった (図 4-2-6)。クロマツにおける垂直根の CSA は深さ 1000 mm よりも深くまで存在し、ケヤキやスギと比較しても深かった (図 4-2-5、6)。

3 樹種とも幹中心から水平距離 300 mm までに根系体積の多くが存在したが、その割合は樹種ごとに変化した。スギでは幹中心近くに根系体積が最も多く、全根系の 70% が幹中心から 300 mm までに存在した。幹中心から 300 mm までにケヤキでは 60% 程度、クロマツでは 30% 程度が存在した (図 4-2-7)。クロマツでは DBH など地上部サイズが他樹種と比べて大きく、幹中心から 1000 mm 以上に存在する根の割合が比較的高かった。ケヤキの DBH はスギよりも小さい傾向にあったが、根系体積はスギよりも幹からの距離の遠いところまで比較的多く存在した (図 4-2-7)。

地表面から深さ 300 mm までに 3 樹種とも全根系体積の 60% が存在し、深くなるほどその深さに存在する根系体積は小さくなった (図 4-2-6)。300 mm より深い根系体積はケヤキで最も小さく、全根系体積の 10% 程度であった (図 4-2-7)。スギと

クロマツでは 300 mm より深い根系体積が 20-30 %と比較的多かった。スギでは深くなるにつれ急激に根系体積が減少したが、クロマツでは比較的同じ体積の根系が 750 mm の深さまで存在した (図 4-2-7)。

4-2-3-3 引き倒しモーメントと根系断面積合計 (CSA)との関係

引き倒しモーメントと幹中心からの水平距離別の根系断面積合計 (CSA)との関係は樹種により異なり、スギとクロマツでは有意な正の相関が認められた (表 4-2-3)。スギでは、幹中心からの距離 300 mm から 1000 mm における多くの同心円測線において、引き倒しモーメントと CSA に有意な正の相関が認められた (表 4-2-3)。特に各個体の根鉢半径における CSA には引き倒しモーメントと最も強い正の相関が認められた ($r=0.87$, $P<0.05$ 、表 4-2-3、図 4-2-8 a)。クロマツでは幹中心から 300 mm と 950 mm の CSA が引き倒しモーメントと有意な正の相関を示した (300 mm : $r=0.99$, $P<0.05$ 、950mm : $r=0.97$, $P<0.05$)。クロマツでは他の距離においても、4 個体と少ない試験木数のため有意でないものの、相関関係は高い傾向にあった (表 4-2-3)。一方、クロマツでは根鉢半径における CSA と引き倒しモーメントとの間に有意な関係は認められなかった ($P>0.05$ 、図 4-2-8 b)。ケヤキでは、根鉢半径またはいずれの距離における CSA においても、引き倒しモーメントと有意な関係性は認められなかった (表 4-2-3、図 4-2-8 c)。

引き倒しモーメントと深さ別の CSA との関係にも樹種間差が認められた。ケヤキおよびクロマツでは、どの深さにおいても有意な関係は認められなかった (表 4-2-4)。ケヤキでは深さ 300 mm の CSA において負の相関傾向を示した。対照的にスギではすべての深さにおける CSA が引き倒しモーメントと有意な正の相関を示した ($P<0.05$ 、表 4-2-4)。

4-2-3-4 引き倒しモーメントと全根系、垂直根、水平根体積との関係

引き倒しモーメントと根系全体積との関係性では 3 樹種とも相関係数が高い傾向にあった (スギ : $r=0.81$, $P<0.05$ 、ケヤキ : $r=0.84$, $P=0.08$ 、クロマツ : $r=0.88$, $P=0.12$ 、表 4-2-5)。

水平根を示すある深さ (400 mm から 650 mm)より浅い根系の体積合計は、スギでは引き倒しモーメントと有意な正の相関を示した ($P<0.05$)。ケヤキおよびクロマツではいずれも有意な関係性は認められなかったものの、ケヤキでは高い相関係数を示し、いずれも $P<0.07$ を示した ($P>0.05$ 、表 4-2-5)。

垂直根を示すある深さ (300 mm から 750 mm)より深い根体積と引き倒しモーメントとの関係性では、スギにおいて 300 mm から 650 mm のすべての深さで有意な正の相関が認められた ($P<0.05$ 、表 4-2-5)。クロマツの引き倒しモーメントは、700 mm および 750 mm よりも深い垂直根体積合計と有意な正の相関を示した (700 mm : $r=0.96$ 、

$P < 0.05$ 、750 mm : $r = 0.97$ 、 $P < 0.05$)。他の深さにおいてもその深さより深い根系体積と引き倒しモーメントとの間には有意ではないものの、相関係数の高い傾向が認められた (表 4-2-5)。一方、ケヤキではどの深さの根とも相関が認められなかった (表 4-2-5)。

4-2-3-5 引き倒しモーメントと幹を中心に浅い同心円柱内の水平根体積との関係

幹を中心とした半径 300 mm から 1000 mm および地面からの深さ 300 mm から 400 mm の円柱内の根系体積と引き倒しモーメントとの関係は、ケヤキのみ有意な正の相関を示した (表 4-2-6)。スギでは相関係数が高い傾向にあったものの、クロマツではほとんど関係性が見られなかった (表 4-2-6)。

4-2-3-6 3 樹種の地上部スケールを合わせた模式図と根系特性の比較

3 樹種の対象木における地上部と地下部特性の平均値を示した模式図を図 4-2-9 に示した。 $H \times DBH^2$ の最も大きい樹種はクロマツであり、最も小さい樹種はケヤキであった (図 4-2-9)。H と比較して垂直根の最も深い樹種はクロマツであった (図 4-2-9)。 $H \times DBH^2$ を 3 樹種で揃えて地上部と地下部の模式図を図 4-2-10 に示した。同じ $H \times DBH^2$ に揃えた場合に H の最も低くなる樹種はクロマツであり、同様に DBH の最も小さくなる樹種はスギであった (図 4-2-10)。

地上部スケールを揃えた 3 樹種の根系特性を比較すると、ケヤキにおける水平根の平均体積が最も大きく、クロマツ、スギの順に小さくなった (ケヤキ : 41.3 cm^3 、クロマツ : 26.6 cm^3 、スギ : 18.5 cm^3)。一方、垂直根の平均体積はクロマツで最も大きく、スギ、ケヤキの順に小さくなった (クロマツ : 14.7 cm^3 、スギ : 3.85 cm^3 、ケヤキ : 3.28 cm^3)。

4-2-4 考察

4-2-4-1 3 樹種の引き倒しモーメントと地上部および地下部特性

3 樹種の引き倒しモーメントは、既存の研究 (玉手ら 1965; Peltola et al. 2000; Cucchi et al. 2004; Nicoll et al. 2005; Nicoll et al. 2006; 深見ら 2011; Kamimura et al. 2012; 藤堂ら 2015; Todo et al. 2019) および 2 章、3 章と同様に、樹木の地上部特性である胸高幹直径 (DBH) や材積の指標となる樹高 (H) \times 胸高幹直径 (DBH)² と高い関係性が認められた (表 4-2-2、図 4-2-1)。引き倒しモーメントと $H \times DBH^2$ は正の直線の関係式で示されるが、その傾きは兵庫県 of 黒色土に生育するスギ 49 年生間伐林で 33.6、無間伐林で 26.8 (2 章) に対し、本節の兵庫県の未熟土に生育するスギ 26 年生では 30.7 と、ほぼ同じ範囲であった (図 4-2-1 c)。これは黒色土や未熟土といった土壌型や土壌粘性の違いにかかわらず、同じ地上部サイズならばスギの引き倒しモーメントが同じ程度であるこ

とを示唆する。これに対し、本節のクロマツにおける係数は 63.1 と (図 4-2-1 c)、3 章 3-2 において同じく田原市内の海岸で行った陸側区および海側区クロマツ林の 103.1 および 104.3 と比較して小さかった。これは 3 章 3-2 におけるクロマツのモーメントが質量モーメントを含む倒伏モーメントであることが一つの要因として考えられる。そこで、3 章 3-2 のクロマツの引き倒しモーメントを算出して $H \times DBH^2$ との関係性を再検討した。その結果、陸側区および海側区のクロマツの引き倒しモーメントと $H \times DBH^2$ の傾きの係数は 101.8 と 103.3 と倒伏モーメントと大きく変わらず、本節のクロマツにおける係数の方が小さくなった。すなわち、3 章 3-2 のクロマツの引き倒しモーメントは、同じ地上部材積の場合、本節の調査地よりも大きいことを意味する。宮田ら (2013) はクロマツの引き倒しモーメントは、マツノザイセンチュウによるマツ枯れ被害地で低下することを報告している。本節における試験地もマツ枯れが多発しており、これが引き倒しモーメントの違いの要因の一つかもしれない。

地下部の根系特性として 2 章および 3 章で取り扱った根鉢半径および回転中心の深さ (D_{cp}) と引き倒しモーメントとの関係には樹種間差が認められ、スギ、クロマツでは根鉢半径および D_{cp} とも有意な相関が、特に D_{cp} では高い正の相関が見られた (表 4-2-2、図 4-2-2 d, f)。これらの関係性は、2 章で示したスギにおける結果 (藤堂ら 2015) や 3 章 3-2 の陸側区におけるクロマツの結果を支持する (Todo et al. 2019)。一方、ケヤキでは根鉢半径と有意な正の相関が見られたものの、 D_{cp} との相関は認められなかった (表 4-2-2、図 4-2-2 b, e)。このことは、ケヤキの引き倒しモーメントには垂直根よりも水平根の広がりに伴う根鉢の横方向の広がりが関係性の高いことを示唆している。またスギとクロマツでは水平根および垂直根ともに引き倒しモーメントに関係があるものの、特に垂直根との関係性の高いことが示唆された。

4-2-4-2 3 樹種の根系構造と引き倒しモーメント

本節で掘り取りにより取得された根のポイントデータすなわち位置と直径情報、さらにつながりの情報を加えて再現された 3D 根系構造から、スギ、ケヤキ、クロマツは、それぞれ斜出根型、水平根型、垂直根型を示し、この結果は苅住 (2010) の樹種別根系型を支持した (図 4-2-4)。苅住 (2010) では根系の分布様式の報告では、DBH 32 cm、H 16 m のスギ個体では根系最大深さが 240 cm であり、直径 2 mm 以上の根の 56% が表層から 50 cm までの深さに分布する一方で、同所に生育した DBH 34 cm、H 15 m のケヤキ個体では、根系の最大深さが 140 cm、直径 2 mm 以上の根の 80% が表層から 50 cm までに分布した。これらの報告は、本節で対象とした個体の DBH とに差があるものの、スギと比較してケヤキで根系が浅く、土壌表層にほとんどの根が存在したという本節の結果を支持する (図 4-2-5、6、7)。阿部 (1997) は、スギの垂直根について、最大深さの 1/2 の深さまでに根系体積の 85-90% が集中するとしており、本節の結果をほぼ支持する。また本節におけるクロマツの結果は、Hirano et al. (2018) で報告された陸側の

クロマツ個体と同様に、垂直根が深くまで成長していることを支持した。

これら3樹種の根系構造と引き倒しモーメントとの関係性から、垂直根が引き倒しモーメントに関係している樹種として、斜出根型のスギおよび垂直根型のクロマツが挙げられる。スギとクロマツでは引き倒しモーメントと根の深さを示す D_{cp} 、垂直根の根系断面積合計 (CSA) および体積について強い関係性が認められた。このことは垂直根が樹木の倒伏抵抗に対して重要な役割を担うことが示唆される (表4-2-4、5)。Ennos (2000)においても垂直根型根系 (Tap root systems)が引き倒しモーメントに強く関与していることを報告している。Yang et al. (2017)は樹木の倒伏抵抗のシミュレーション試験を行い、垂直根は曲げ荷重下での破断により倒伏抵抗に関与していることを報告している。つまり、垂直根は、Mattheck et al. (2015)の示すせん断に対する抵抗により倒伏抵抗に関与することを示す。塚本 (1987)は、すべり面に侵入した垂直根がせん断に対する抵抗を発揮することで森林の表層崩壊防止に寄与するとしている。したがって、倒伏抵抗には、根鉢底部のすべり面に侵入した垂直根がせん断抵抗を発揮すると考えられる。

スギとクロマツではこの垂直根だけでなく、本節における引き倒しモーメントと水平根 CSA や体積の関係性の結果 (表4-2-3、5)から、水平根が引き倒しモーメントへの寄与することも示唆された。これは、水平根の広がりを示す根鉢半径と引き倒しモーメントとの関係からも支持される (表4-2-2、図4-2-2 a, c)。スギでは水平根の CSA および体積と引き倒しモーメントの関係に高い相関関係があり、特に根鉢半径における CSA 合計との強い関係性が顕著であった (表4-2-1、図4-2-8 a)。根1本当たりの土壌からの引き抜き抵抗力は根の断面積で表わせる (Yamase et al. 2018)。したがって、本節で明らかにされた関係性は、樹木の倒伏抵抗における説明要因の一つとされる根鉢周囲の根系の引き抜き抵抗力 (Coultts 1986)として効果を発揮していることが示唆される。クロマツでは水平根の CSA と引き倒しモーメントの関係性が幹近くで比較的高い傾向にあったものの、根鉢半径における CSA との関係性はスギとは異なり低かった (表4-2-3)。これは、水平根の引き倒しモーメントへの関与メカニズムがスギと異なることを示唆する。砂質土壌に生育するクロマツでは、根鉢周囲に存在する根の引き抜き抵抗力に寄与するよりもむしろ、水平根が幹直下の回転中心を支えるために寄与すると考えられる (Ennos 2000)。

垂直根の浅いケヤキでは引き倒しモーメントと D_{cp} には相関が見られず (表4-2-2、図4-2-2 e)、垂直根の CSA や垂直根体積との関係性も見られなかった (表4-2-4、5)。また例外的に、地面からの300 mmの深さにおける CSA との間に負の相関傾向が見られたが ($r=-0.88$ 、 $P=0.05$ 、表4-2-4)。これはケヤキの一個体で下方に成長した根が上方に再度成長した転換点で測定された断面積データを含んでいた (図4-2-1 2 a)ことに起因する。この個体において根の力がかからないと思われる上方部分の CSA を除外すると、垂直根と引き倒しモーメントにおけるこの負の相関は見られなかった (図4-2-1 2 b)。

ケヤキが浅い Dcp (表 4-2-1) をもつことは、ケヤキが水平根型 (Horizontal root systems または Plate systems) に分類されることを支持している。このような水平根型のケヤキでは、水平根と土壌が緊縛し、薄く平たく一体化することで引き倒しモーメントに強く寄与していることが考えられる。この状態は Mattheck et al. (2015) では、苗木用のコンテナと同様であると形容されている。ケヤキでは引き倒しモーメントと水平および垂直方向とも CSA との関係性は低かった (表 4-2-2、3、図 4-2-8c)。これらの結果は、根鉢周囲における根系が引き抜き抵抗力を発揮して倒伏防止力を発揮するスギとは異なる寄与のメカニズムを示している。一方、ケヤキの引き倒しモーメントには、幹を中心とした同心円柱内の水平根体積と強い正の相関傾向が見られ、この傾向は根鉢半径 (54 cm) よりも大きい円柱半径 1000 mm などでも同様であった (表 4-2-5)。水平根体積を樹種間で比較するため地上部のスケールを合わせて比較すると、ケヤキの水平根体積および幹中心から半径 1000 mm 内の水平根体積が 3 樹種で最も大きくなった (図 4-2-11)。これらの結果から、ケヤキは水平根を幹回りに大きな体積とすることで、根と土壌の一体化した根鉢を堅く大きくし、この根鉢で樹体を倒れないように支えていることが示唆された。このことは、水平根型の根系を持つ樹種は、自重すなわち根系全体の重量と根系の荷重で安定性を保つとする Mattheck et al. (2015) を支持する。

根鉢の剛性の高さは倒伏抵抗につながることを報告されている (Coultts 1986)。根鉢の高い剛性が倒伏開始時の変位を減少させ、土壌の初期破壊を防止する (Coultts 1986)。根鉢の高い剛性は、風下側の圧縮に対する抵抗 (Mattheck et al. 2015) の補強につながることも考えられる。強風による倒木災害後におけるカイガンショウ (*Pinus pinaster*) の調査では、根返りを起こした個体と正常な個体には平均 H (20.6 m と 20.7 m) や平均 DBH (38.1 cm と 37.6 cm) に大きな違いはなかったが、根返りを起こした個体と比較して、正常な個体の風下側の浅い根の体積配分が高いことが報告されている (Danjon et al. 2005)。このことは、根返りを起こした個体と正常な個体において、風下側の圧縮に対する抵抗が異なっていたことを示している (Danjon et al. 2005)。ケヤキの幹中心から半径 1000 mm 内の水平根体積は大きい (図 4-2-11) ため、引き倒し試験において引き倒す側、すなわち風下側の圧縮に対して抵抗する部分の体積は大きいことが示唆される。このこともケヤキの水平根が倒伏抵抗を発揮することを示唆している。

比較的同じ地上部サイズであるスギ 2 個体 (個体 No. 4、5) とケヤキ 2 個体 (個体 No. 2、3) の根鉢内の CSA および根系体積を比較すると、スギに比べケヤキでは幹を中心とした同心円柱内の CSA や根系体積が大きい (図 4-2-13、14)。この結果は、スギと比較してケヤキでは幹周囲に水平根が充実しており、土壌と根がより一体化している可能性をさらに支持している。またスギでは根鉢半径に近い幹中心からの距離 400-500 mm のあたりで CSA が大きく減少した。一方で、ケヤキでは幹中心からの距離が遠くなるにつれて緩やかに減少する傾向にあった (図 4-2-13)。

同様に根鉢周囲における根直径分布について、スギでは直径 10 mm 未満の比較的細

い根が多く、根鉢を境に直径 10 mm 以上の根がほとんど見られなくなった。これに対しケヤキではスギに比べて太い根が多く、根鉢の縁付近でも直径 20 mm 程度の根が見られ、根鉢より外側においても直径 20 mm 以上の根の存在が確認された (図 4-2-15)。これらの結果から、スギでは垂直根の働きに加え、水平根の数の大きく減少するあたりを根鉢の縁とし、その縁に生育する根が引き抜かれることで、倒伏抵抗に寄与する可能性が示唆される。一方ケヤキでは、幹を中心に他樹種よりも広い面積で水平根を密にし、根鉢の広がりをも大きくすることで倒伏抵抗を高めていることが示唆される。さらに、ケヤキの特徴として、スギやクロマツに比べて根 1 本当りりの土壌からの引き抜き抵抗力が非常に高いこと (北原 2010; 木下ら 2013; 平野ら 2020) が挙げられる。材の破断強度性質を示すせん断強さもスギ 6.0 N/mm^2 、クロマツ 9.0 N/mm^2 に対し、ケヤキは 12.5 N/mm^2 と高い (森林総合研究所 2004)。これらのことから、破断に強い根が土壌に入り込むことで、根系と土壌の一体化が高まるものと思われる。一方で、一般に水平根型の根系型を持つ樹木の倒伏抵抗力は、垂直根型よりも小さいことが知られている (Ennos 2000)。すなわちケヤキは水平根型を持つ樹木として例外的に、おそらくその堅く大きな根鉢と強い引き抜き抵抗力のために、倒伏抵抗力が大きいことに注意すべきである。

このように 3 樹種における根系構造及び根系の水平及び垂直分布特性を明らかにすることで、それぞれの根系構造の中で引き倒しモーメントに寄与する水平根や垂直根、根鉢など地下部に存在する部位により、倒伏抵抗への貢献度が異なることが明らかとなった。

4-2-4-3 根系分布と樹種内の引き倒しモーメントの個体差

同じ場所に生育する樹木の引き倒しモーメントには、樹木地上部特性との関係性が最も高いことが 2 章、3 章および表 4-2-2 や既存報告 (Peltola et al. 2000; Cucchi et al. 2004; Nicoll et al. 2005; Nicoll et al. 2006; 深見ら 2011; Kamimura et al. 2012) により示されてきた。しかし、樹木個体ごとのデータを見比べると、地上部特性と引き倒しモーメントの関係性から少し外れる個体が存在する。

例えば、本節におけるクロマツでは No. 1 個体の地上部 $H \times DBH^2$ は 0.39 m^3 と No. 2 個体の 0.41 m^3 よりも小さい (表 4-2-1)。しかし、それぞれの個体の引き倒しモーメントは、No. 1 で 33.6 kN m 、No. 2 で 25.5 kN m と、No. 1 で 1.3 倍大きかった (表 4-2-1)。ここで地下部の特性に着目すると、まず全根系体積は No. 1 で 112 cm^3 、No. 2 で 115 cm^3 であり、この引き倒しモーメントの違いを説明できない。しかし、地表面から 300 mm よりも深い垂直根体積は、No. 1 で 69.1 cm^3 と No. 2 の 31.6 cm^3 と No. 1 個体で 1.9 倍大きく、地上部や全根系体積の順と逆転する。クロマツでは、これまで見てきた通り垂直根の寄与が大きいため、深くに生育する垂直根体積の違いによりこれらの個体の引き倒しモーメントの違いを説明できるものと推察される。

引き倒しモーメントを実際に測定する時には、モーメントのデータ値に一定のばらつきがある。この値のばらつきには様々な原因が考えられるが、その一因として地下部特性、特に引き倒しモーメントと関係性の高い部位、本節におけるクロマツではある深さ以下の垂直根体積などの異なりが、引き倒しモーメントに寄与することが示唆された。このため、地上部特性だけではなく、本節のような 3D 根系構造の特性など地下部特性を明らかにすることで、倒伏抵抗力の要因を説明できる可能性が広がるであろう。

4-2-3-4 根系構造 (RSA) データ取得法のさらなる検討

本節では、4章4-1で説明したように根系を掘り取り後に手計測により RSA データを取得して根系構造解析を行った。このような RSA データの取得は、根系構造全体をデータ化するため多様な解析を可能とし、根系構造を表す追加のパラメータ計算も可能となるため、将来にわたり有効なデータ保存方法である。

本節における RSA 取得において今後の課題も見えてきた。一つめは細根の取扱である。本節では手動計測のデータ取得効率の点から直径 5 mm 以下の細根はあらかじめ除去して RSA データを取得した。しかし、細根量の多さは樹種により異なる (Noguchi et al. 2007)。本節で対象とした樹種のうち、ケヤキでは写真 4-2-5 のように、しなやかな細い細根が密に存在したが、本節ではこの部分の評価がされていない。Vergani et al. (2017) は、表層土壌の崩壊防止に対して粗根の貢献が細根よりも高いことを示している。一方で、Vergani et al. (2017) は、細根と粗根について引き抜き時に引き抜かれるまでの変位量が異なる、すなわち細根は粗根より先に引き抜かれることから、細根と粗根の崩壊防止に貢献する役割の異なりを指摘している。このように、樹木の倒伏抵抗に関しても細根が粗根と異なる役割で寄与する可能性がある。したがって、今後、細根特性を解析できるように細根系構造のデータも取得していく必要がある。

もう一つには、根系構造の中で最も大きな体積を持つ幹中心の根株部分のデータ化が難しいことである。根株付近では土壌中に生育する幹の部分が存在するものの、本章における RSA データの取得方法では、これらの部分が計測されていない。本節ではこの最も大きな体積部分のデータが未計測であるため、全根系量についての議論まで至らず、根系の部分的な相対評価のみが可能であった。今後、これらの幹を含めた根株部分のデータ計測および RSA データとしての取得、データ化を検討するべきである。

表 4-2-1 DBH, H, $H \times DBH^2$, M, root soil plate radius and Dcp in three tree species (*Cryptomeria japonica*, *Zelkova serrata* and *Pinus thunbergii*).

Tree species	Tree No.	DBH (cm)	H (m)	$H \times DBH^2$ (m ³)	M (kN m)	Root soil plate radius (cm)	Dcp (cm)
<i>C. japonica</i>	1	11.7	11.0	0.15	4.1	51.4	5.7
	2	12.2	13.1	0.19	7.0	49.2	7.0
	3	14.4	14.0	0.29	9.1	55.1	14.6
	4	10.8	11.3	0.13	7.6	42.5	5.4
	5	9.7	9.6	0.09	4.4	47.2	14.0
	6	15.2	12.6	0.29	9.2	44.4	11.5
	7	16.7	15.0	0.42	11.0	62.9	6.6
	Mean	13.0	12.4	0.22	7.5	50.4	17.7
<i>Z. serrata</i>	1	8.3	7.9	0.05	9.9	49.1	6.4
	2	9.7	8.6	0.08	14.6	45.4	18.3
	3	10.0	7.7	0.08	15.2	56.0	2.6
	4	8.5	7.9	0.06	11.0	43.9	6.5
	5	8.9	9.4	0.07	14.9	74.2	2.0
	Mean	9.1	8.3	0.07	30.9	53.7	7.16
<i>P. thunbergii</i>	1	18.5	11.4	0.39	33.6	90.7	29.7
	2	19.5	10.8	0.41	25.5	61.9	23.3
	3	15.9	9.3	0.24	12.7	67.1	17.0
	4	16.4	10.1	0.27	16.4	58.8	18.0
	Mean	17.6	10.4	0.33	22.1	69.6	22.0

DBH: stem diameter at breast height.

H: stem height.

M: critical turning moment.

Dcp: depth at the center point of rotation.

表 4-2-2 Pearson's correlations between critical turning moment and tree traits (DBH, $H \times DBH^2$, root soil plate radius, Dcp) in *C. japonica*, *Z. serrata* and *P. thunbergii* trees.

	DBH		$H \times DBH^2$		Root soil plate radius		Dcp	
	r	P	r	P	r	P	r	P
<i>C. japonica</i>	0.91	***	0.90	***	0.67	*	0.75	**
<i>Z. serrata</i>	0.89	***	0.87	***	0.86	***	0.36	*
<i>P. thunbergii</i>	0.78	**	0.79	**	0.70	**	0.79	**

r: Pearson product-moment correlation coefficient.

*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

表 4-2-3 Relationship between critical turning moment and total root cross sectional area (CSA) with different distances from the stem center.

Distance from stem center (mm)	<i>C. japonica</i>		<i>Z. serrata</i>		<i>P. thunbergii</i>	
	r	<i>P</i>	r	<i>P</i>	r	<i>P</i>
300	0.73	0.06	-0.02	0.98	0.99	*
350	0.79	*	0.18	0.77	0.80	0.20
400	0.75	0.05	0.29	0.64	0.81	0.19
450	0.78	*	-0.22	0.72	0.45	0.55
500	0.80	*	0.37	0.54	0.57	0.43
550	0.81	*	0.51	0.38	0.76	0.24
600	0.74	0.06	-0.05	0.94	0.93	0.07
650	0.77	*	-0.31	0.61	0.89	0.11
700	0.74	0.06	0.05	0.93	0.81	0.19
750	0.77	*	0.38	0.53	0.51	0.49
800	0.80	*	0.23	0.72	0.42	0.58
850	0.80	*	0.06	0.92	0.65	0.35
900	0.76	0.05	0.18	0.77	0.92	0.08
950	0.75	0.05	0.16	0.80	0.97	*
1000	0.75	0.05	0.20	0.74	0.48	0.52
Root soil plate radius	0.87	*	-0.45	0.45	0.24	0.76

r: Pearson product-moment correlation coefficient.

* $P < 0.05$

表 4-2-4 Relationship between critical turning moment and the total root cross sectional area (CSA) with different vertical distances from the ground surface.

Vertical distance from the ground (mm)	<i>C. japonica</i>		<i>Z. serrata</i>		<i>P. thunbergii</i>	
	r	P	r	P	r	P
300	0.84	*	-0.88	0.05	0.82	0.18
350	0.88	**	-0.07	0.91	0.78	0.22
400	0.87	*	-0.32	0.61	0.94	0.06
450	0.86	*	-0.37	0.54	0.89	0.11
500	0.87	*	—	—	0.80	0.20
550	0.83	*	—	—	0.85	0.15
600	0.85	*	—	—	0.60	0.40
650	0.85	*	—	—	0.31	0.69
700	—	—	—	—	0.60	0.40
750	—	—	—	—	0.90	0.10

r: Pearson product-moment correlation coefficient.

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

表 4-2-5 Relationship between root system volume (total root system volume, horizontal roots volume, tap root system volume) and critical turning moment.

	<i>C. japonica</i>		<i>Z. serrata</i>		<i>P. thunbergii</i>	
	r	<i>P</i>	r	<i>P</i>	r	<i>P</i>
Total root system volume	0.81	*	0.84	0.08	0.88	0.12
Volume shallower than 300mm	0.63	0.13	0.85	0.07	0.08	0.92
350mm	0.72	0.07	0.86	0.06	0.39	0.61
400mm	0.76	*	0.86	0.06	0.37	0.63
450mm	0.78	*	0.85	0.07	0.43	0.57
500mm	0.79	*	—	—	0.50	0.50
550mm	0.78	*	—	—	0.57	0.43
600mm	0.79	*	—	—	0.62	0.38
650mm	0.79	*	—	—	0.68	0.32
700mm	—	—	—	—	0.72	0.28
750mm	—	—	—	—	0.75	0.25
Volume deeper than 300mm	0.88	**	0.05	0.93	0.94	0.06
350mm	0.85	*	-0.01	0.99	0.95	0.05
400mm	0.83	*	-0.09	0.88	0.92	0.08
450mm	0.80	*	-0.14	0.82	0.90	0.10
500mm	0.78	*	—	—	0.87	0.13
550mm	0.79	*	—	—	0.88	0.12
600mm	0.78	*	—	—	0.84	0.16
650mm	0.83	*	—	—	0.90	0.10
700mm	—	—	—	—	0.96	*
750mm	—	—	—	—	0.97	*

r: Pearson product-moment correlation coefficient.

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

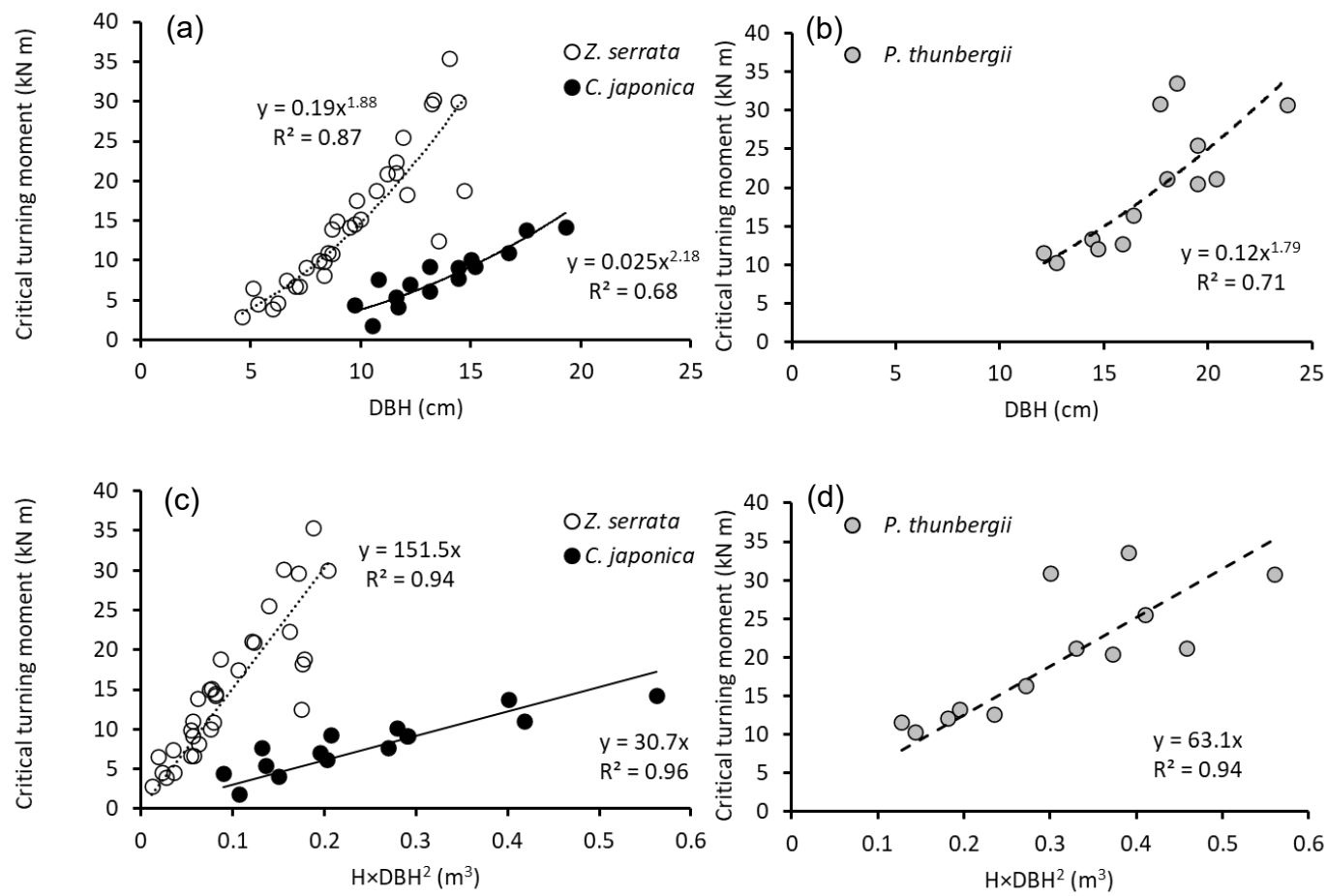
表 4-2-6 Relationship between root system volume and critical turning moment in a cylinder that imitates a root soil plate.

Radius of root soil plate (mm)	Depth of root soil plate (mm)	<i>C. japonica</i>		<i>Z. serrata</i>		<i>P. thunbergii</i>	
		r	P	r	P	r	P
300	300	0.38	0.40	0.96	*	-0.16	0.84
	350	0.47	0.28	0.96	**	0.14	0.86
	400	0.53	0.22	0.97	**	0.15	0.85
350	300	0.45	0.32	0.98	**	-0.03	0.97
	350	0.56	0.19	0.98	**	0.28	0.72
	400	0.62	0.14	0.98	**	0.26	0.74
400	300	0.52	0.23	0.97	**	0.12	0.88
	350	0.64	0.12	0.98	**	0.45	0.55
	400	0.69	0.09	0.98	**	0.43	0.57
450	300	0.55	0.20	0.96	**	0.08	0.92
	350	0.66	0.11	0.97	**	0.49	0.51
	400	0.71	0.07	0.97	**	0.47	0.53
500	300	0.56	0.19	0.93	*	0.06	0.94
	350	0.67	0.10	0.94	*	0.47	0.53
	400	0.72	0.07	0.93	*	0.46	0.54
550	300	0.57	0.18	0.92	*	0.00	1.00
	350	0.68	0.09	0.93	*	0.48	0.52
	400	0.73	0.06	0.92	*	0.45	0.55
600	300	0.58	0.17	0.91	*	-0.08	0.92
	350	0.69	0.09	0.92	*	0.48	0.52
	400	0.73	0.06	0.91	*	0.45	0.55
650	300	0.59	0.17	0.90	*	-0.12	0.88
	350	0.70	0.08	0.91	*	0.48	0.52
	400	0.74	0.06	0.90	*	0.45	0.55
700	300	0.59	0.17	0.89	*	-0.01	0.99
	350	0.70	0.08	0.91	*	0.46	0.54
	400	0.74	0.06	0.90	*	0.44	0.56
750	300	0.59	0.16	0.89	*	-0.01	0.99
	350	0.70	0.08	0.90	*	0.42	0.58
	400	0.75	0.05	0.89	*	0.41	0.59
800	300	0.59	0.16	0.89	*	-0.03	0.97
	350	0.70	0.08	0.90	*	0.41	0.59

	400	0.75	0.05	0.89	*	0.39	0.61
850	300	0.59	0.16	0.89	*	-0.07	0.93
	350	0.70	0.08	0.90	*	0.37	0.63
	400	0.75	0.05	0.89	*	0.35	0.65
900	300	0.60	0.16	0.89	*	-0.07	0.93
	350	0.71	0.08	0.90	*	0.36	0.64
	400	0.75	0.05	0.89	*	0.35	0.65
950	300	0.60	0.16	0.89	*	-0.03	0.97
	350	0.71	0.08	0.90	*	0.39	0.61
	400	0.75	0.05	0.89	*	0.37	0.63
1000	300	0.60	0.16	0.89	*	-0.01	0.99
	350	0.71	0.08	0.90	*	0.41	0.59
	400	0.75	0.05	0.89	*	0.39	0.61

r: Pearson product-moment correlation coefficient.

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$



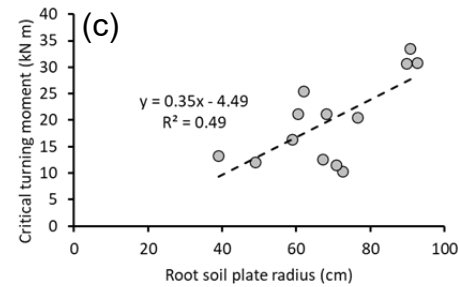
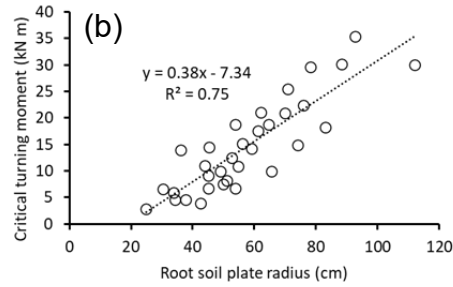
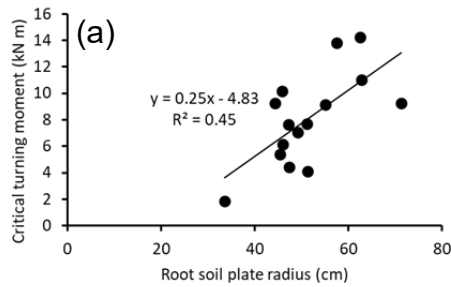
☒ 4-2-1 Relationship between critical turning moment and the aboveground traits (DBH and $H \times DBH^2$) of three tree species (*Cryptomeria japonica*, *Zelkova serrata* and *Pinus thunbergii*).

Cryptomeria japonica

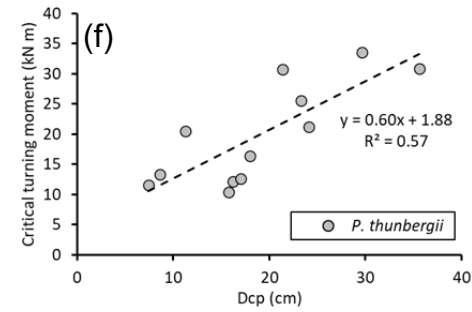
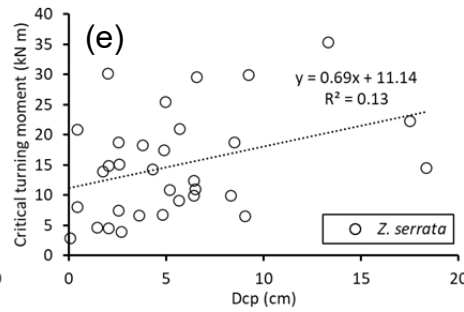
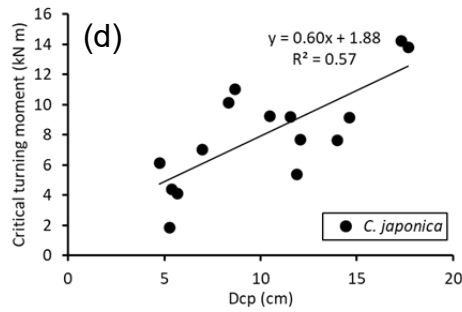
Zelkova serrata

Pinus thunbergii

Root soil plate radius

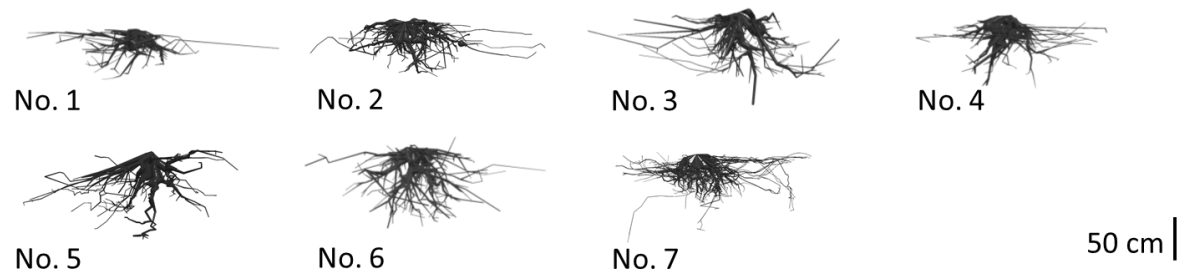


Dcp

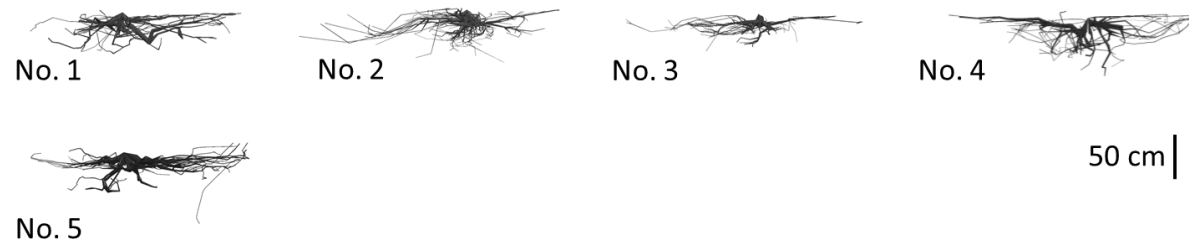


☒ 4-2-2 Relationship between critical turning moment and the belowground traits (Root soil plate radius and Dcp) of three tree species (*Cryptomeria japonica*, *Zelkova serrata* and *Pinus thunbergii*).

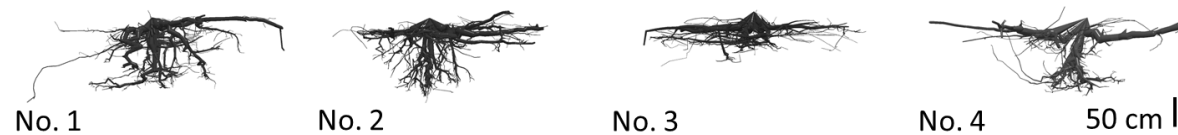
Cryptomeria japonica



Zelkova serrata



Pinus thunbergii



☒ 4-2-3 Reconstructed root systems of all test trees in three tree species (*Cryptomeria japonica*, *Zelkova serrata* and *Pinus thunbergii*).

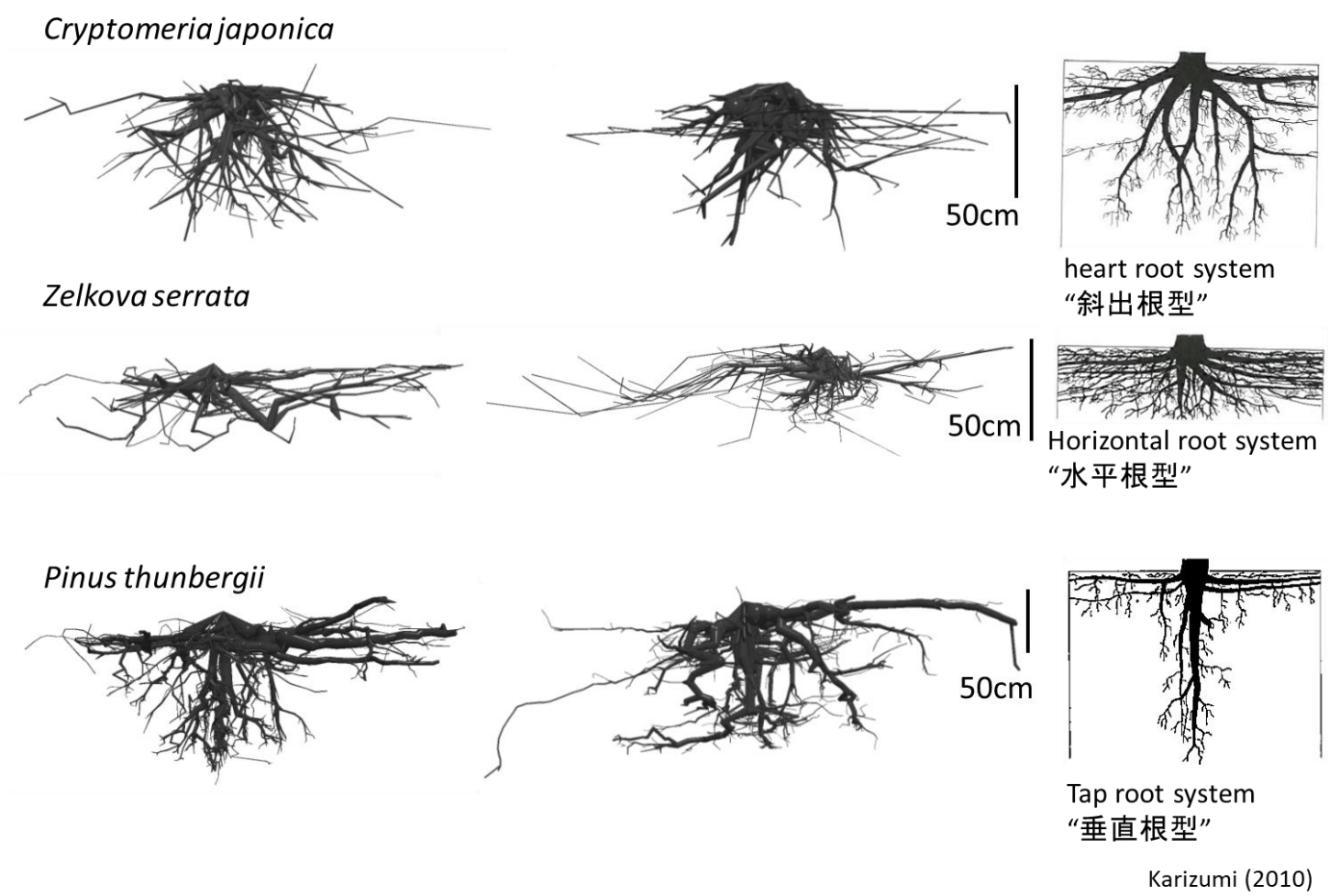
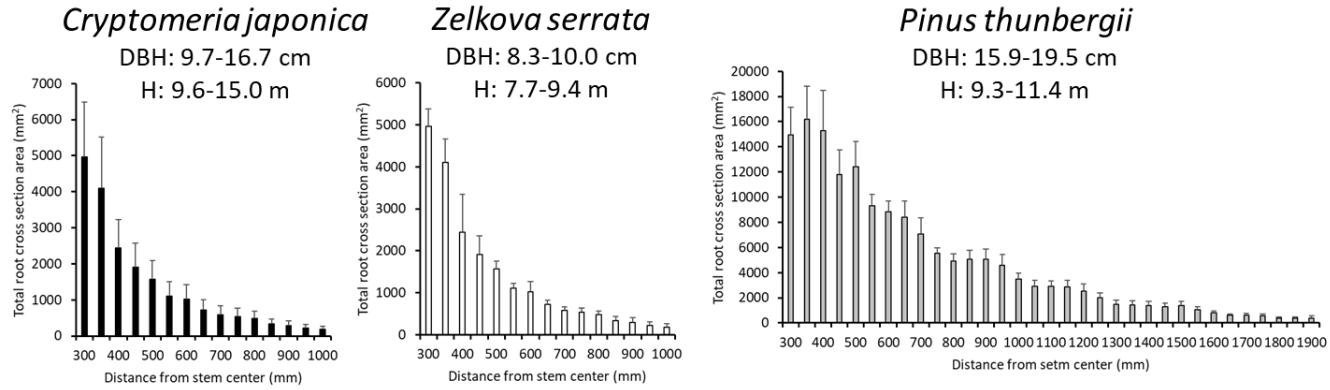
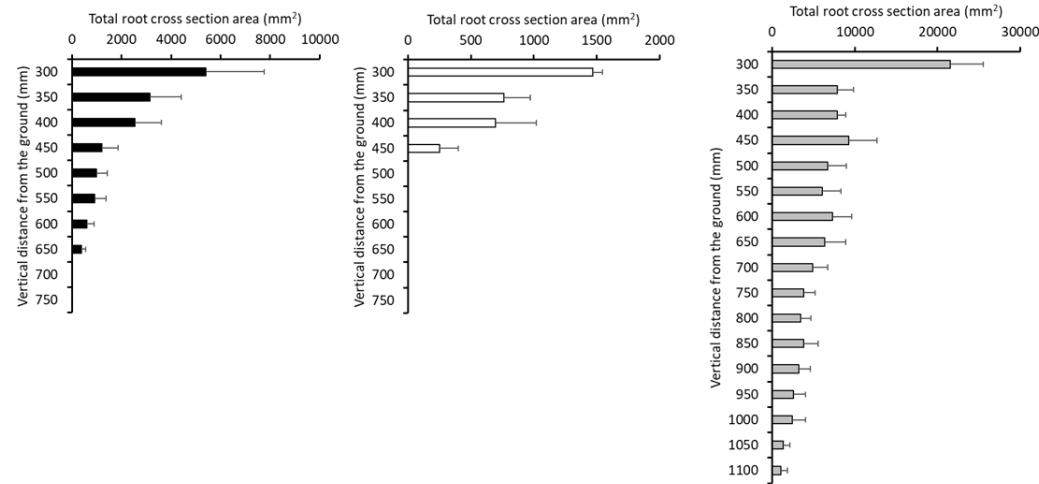


图 4-2-4 Differences in three types of root system form structure. Right and middle: results of this study, left: Root system types from Karizumi (2010).

Horizontal roots

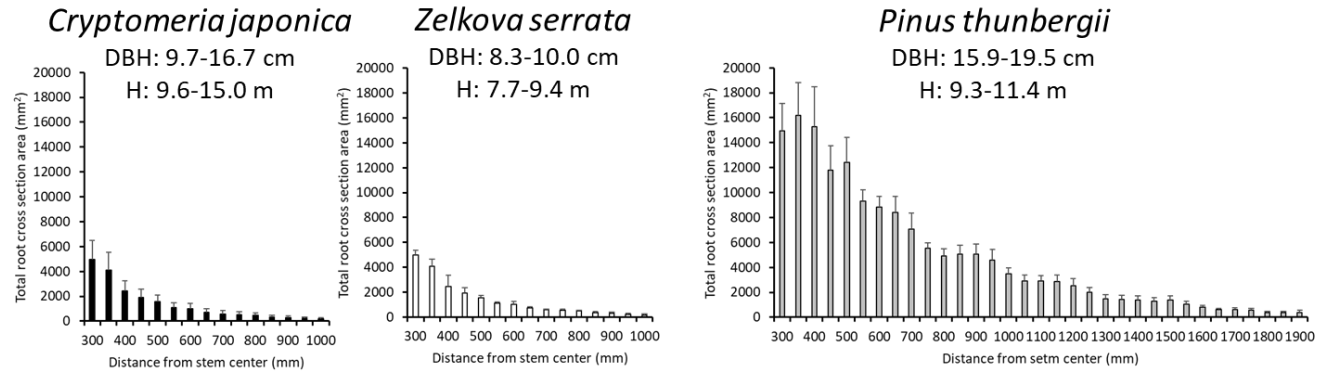


Tap roots

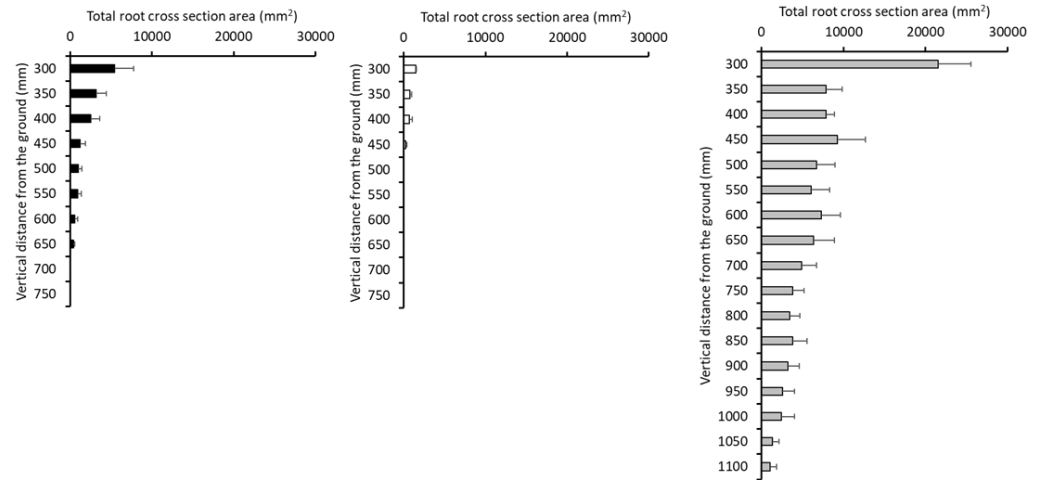


☒ 4-2-5 Difference in the total root cross sectional area (CSA) of the root systems in the three tree species with difference distances from stem center or from the ground.

Horizontal roots



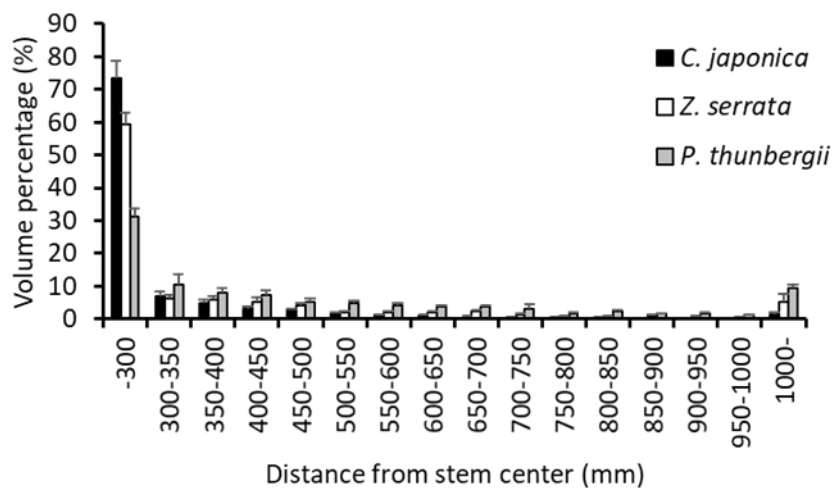
Tap roots



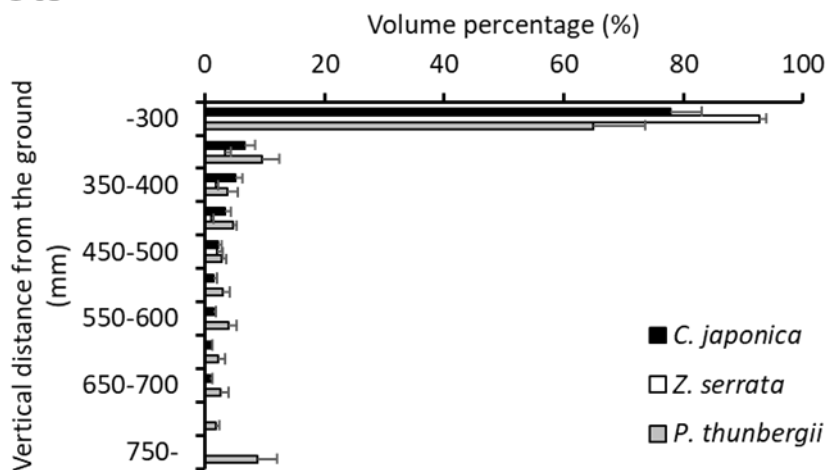
☒ 4-2-6 Difference in the total root cross sectional area (CSA) of the root systems in three tree species with different distances from stem center or from the ground (Align the maximum values of the axes).

Volume

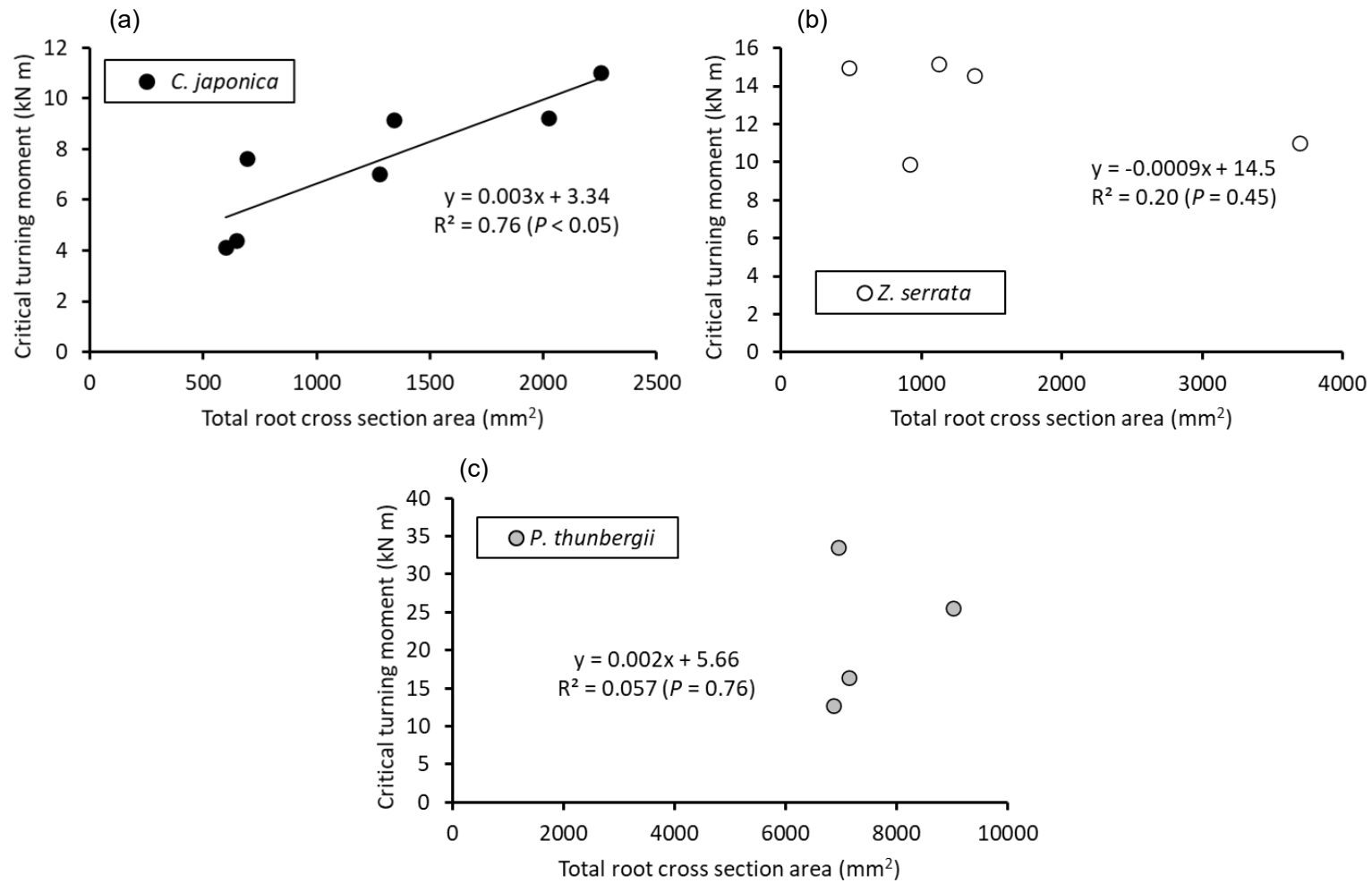
Horizontal roots



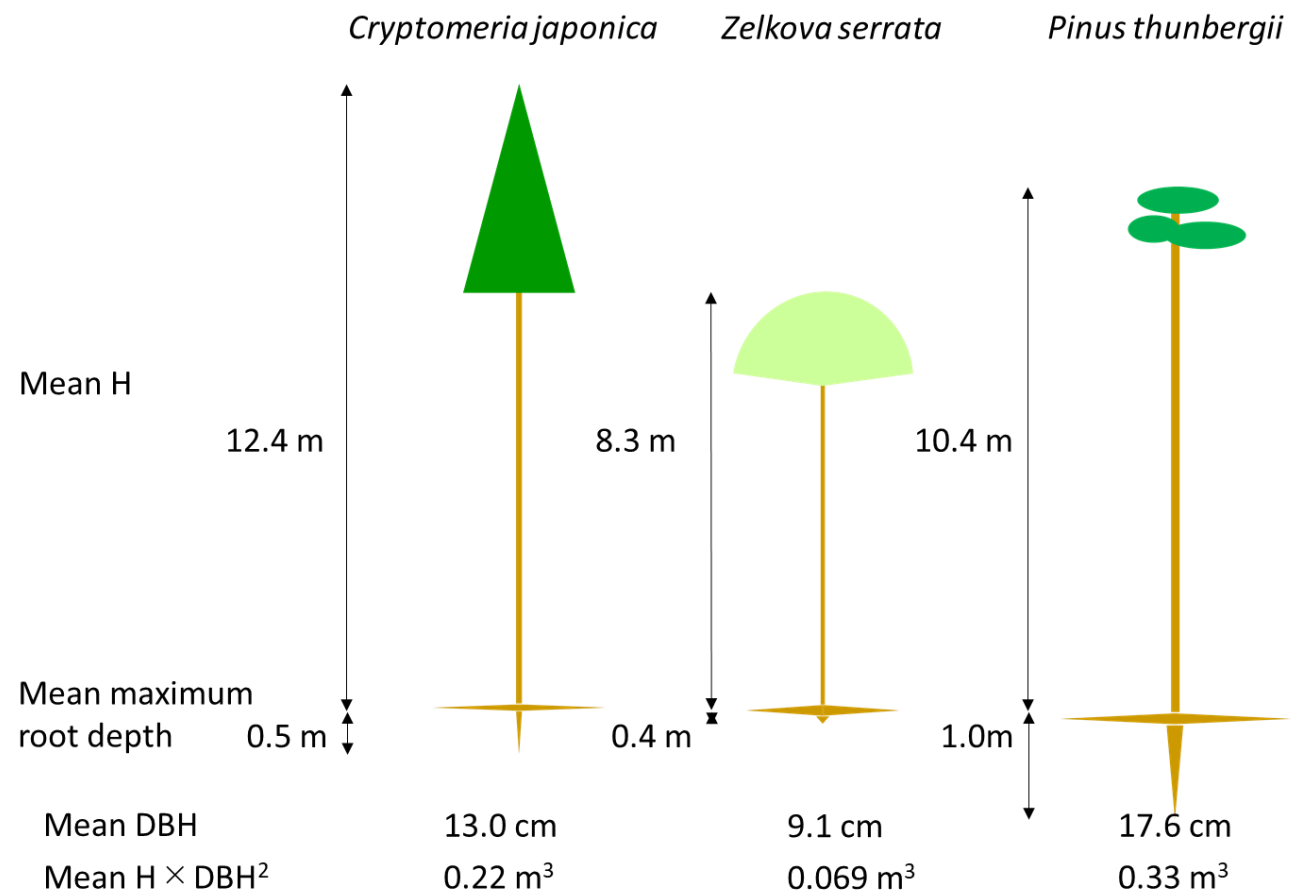
Tap roots



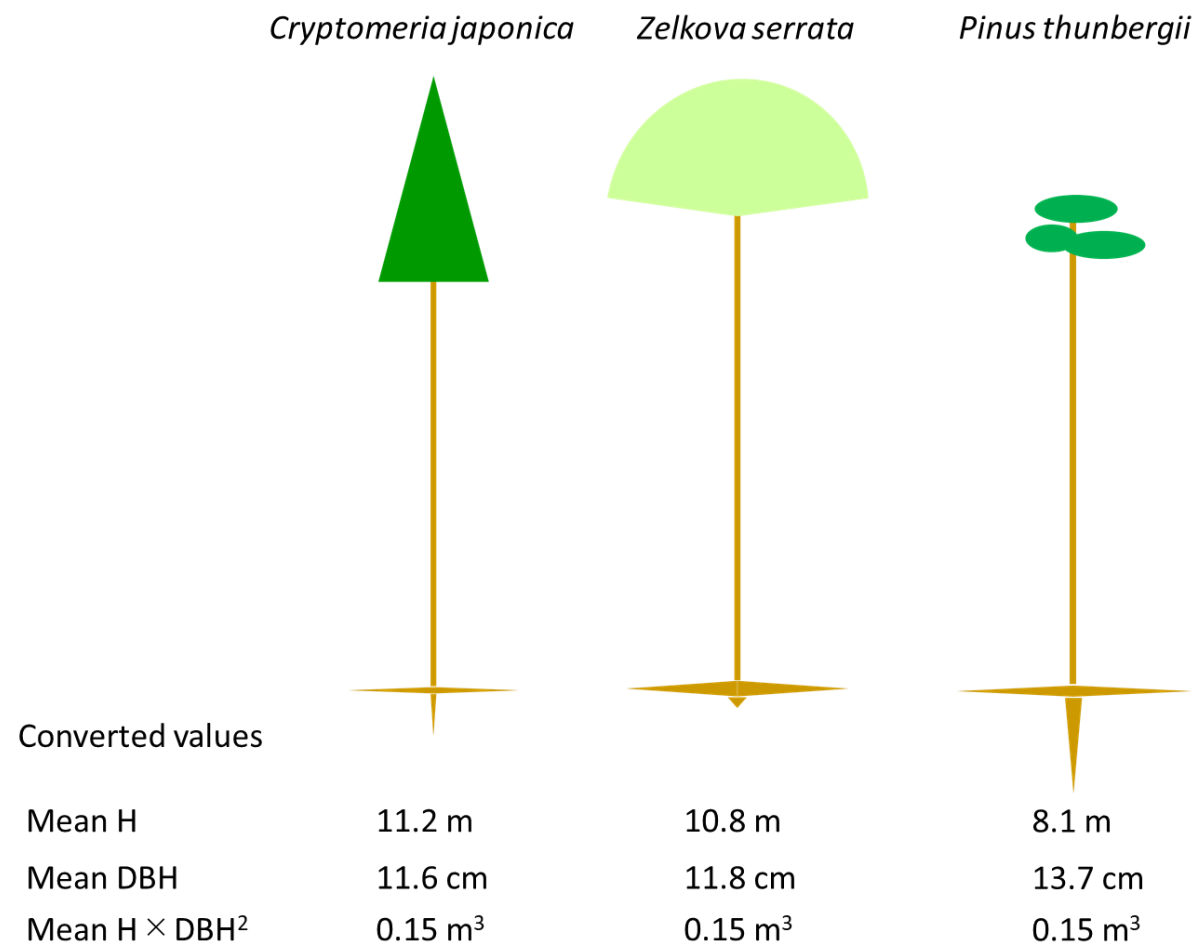
☒ 4-2-7 Differences in proportion distribution of three types of root system volume with different distances from stem center or ground surface.



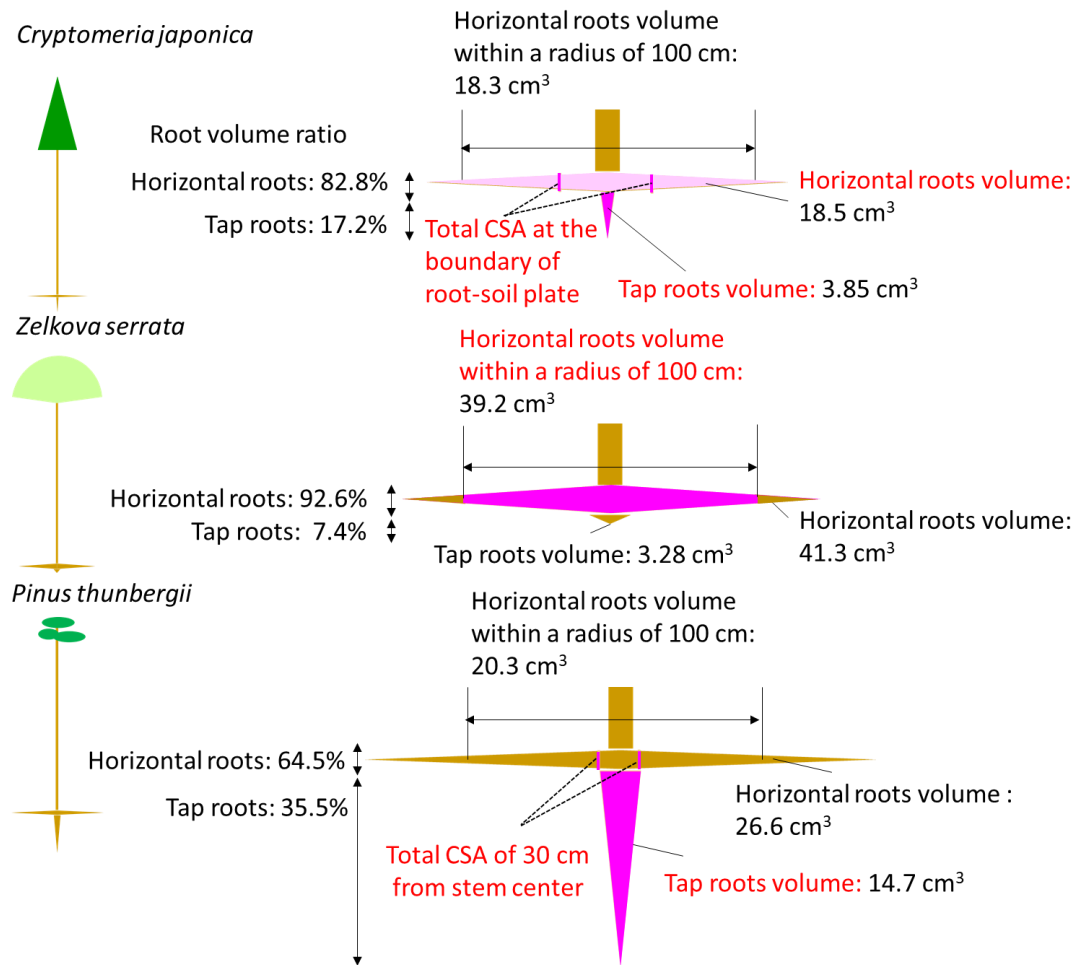
☒ 4-2-8 Relationship between critical turning moment and total root cross sectional area (CSA) at the boundary of root soil plate radius.



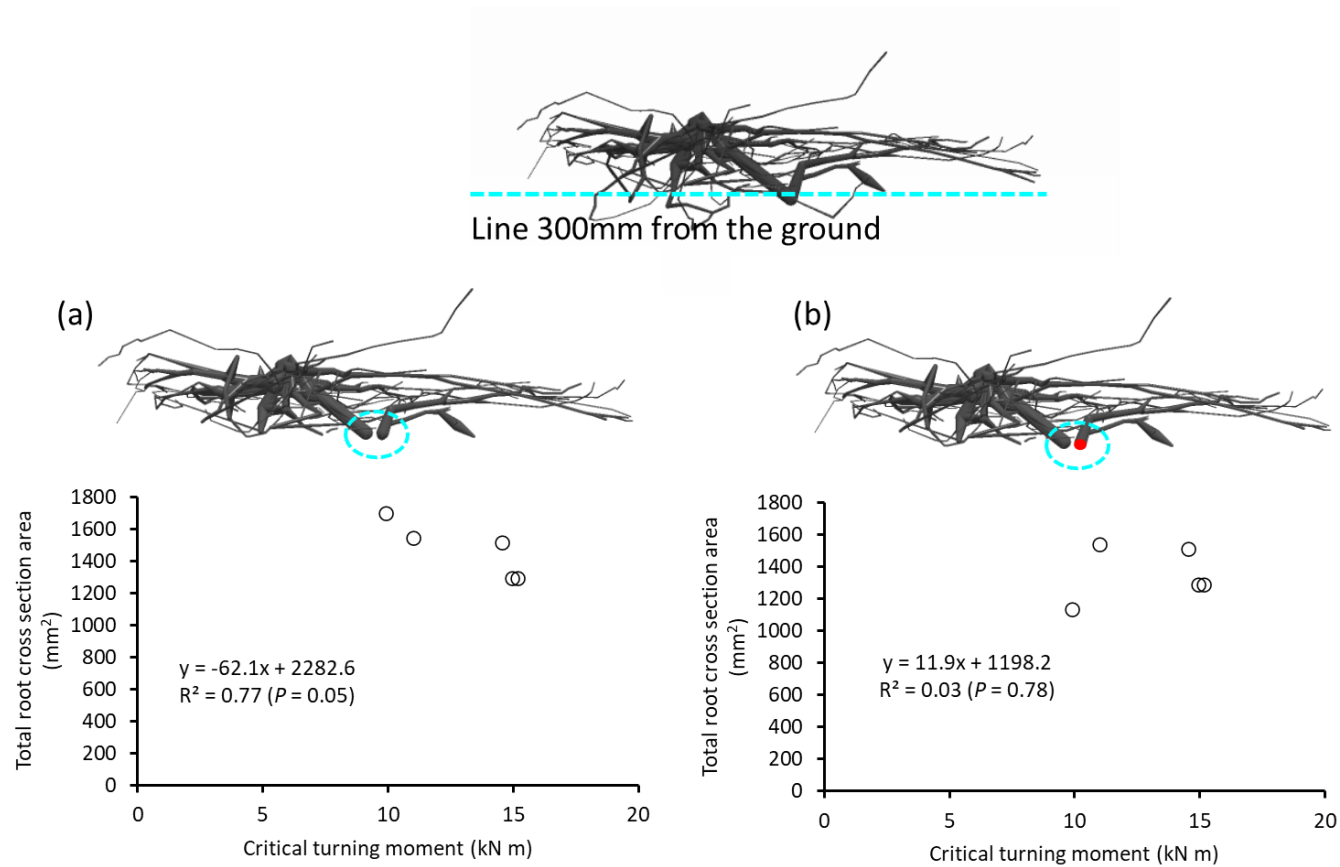
☒ 4-2-9 Schematic diagram with the average values of H, maximum root depth DBH and $H \times DBH^2$ of the test trees in three species (*C. japonica*, *Z. serrata* and *P. thunbergii*).



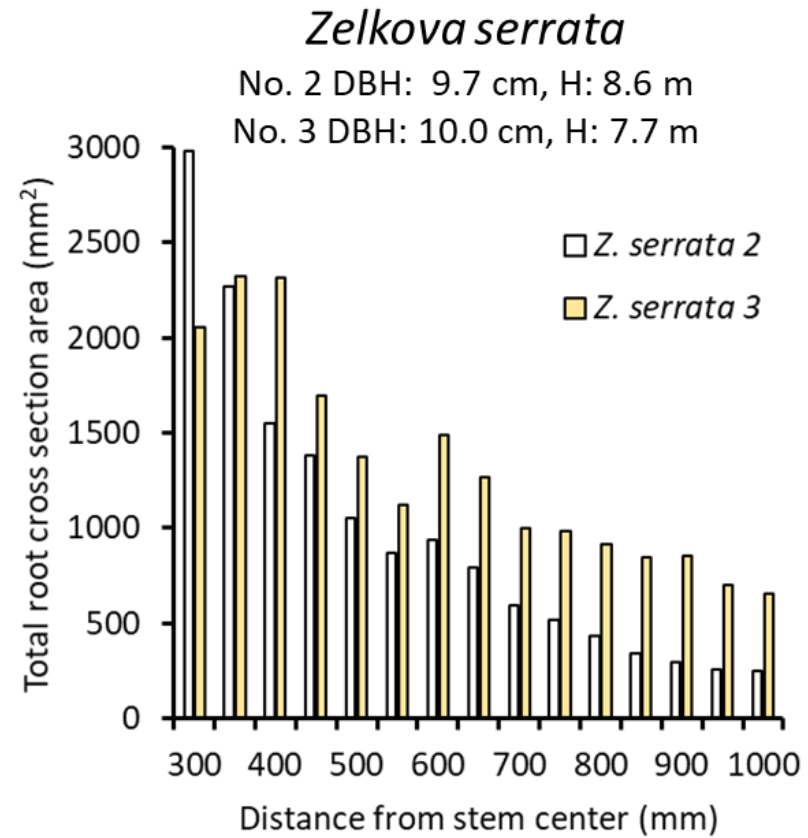
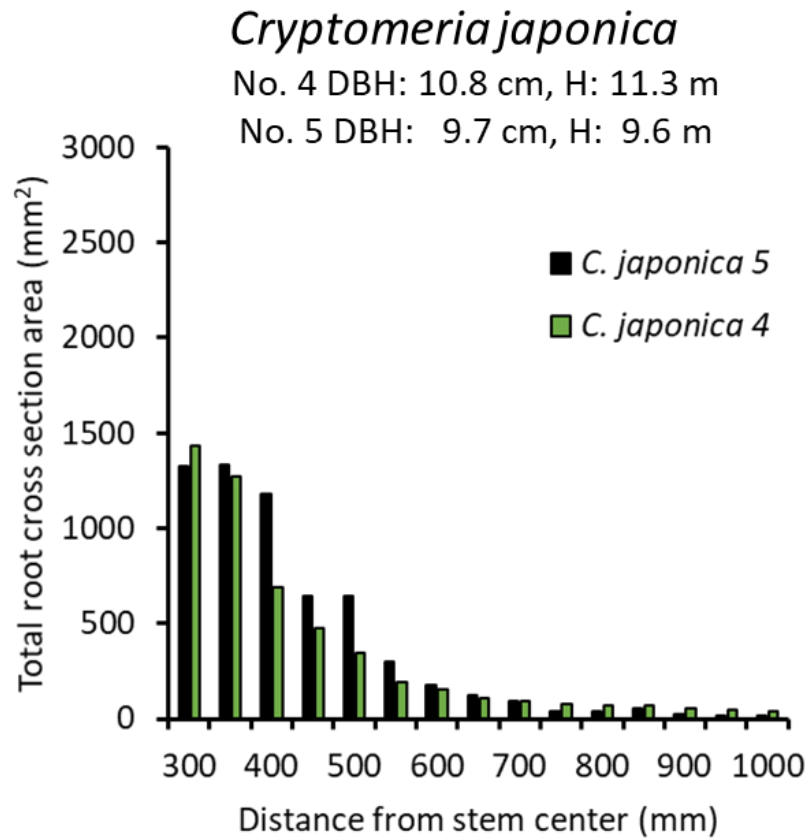
☒ 4-2-10 Schematic diagram of size in the test trees normalized with aboveground volume ($H \times DBH^2$).



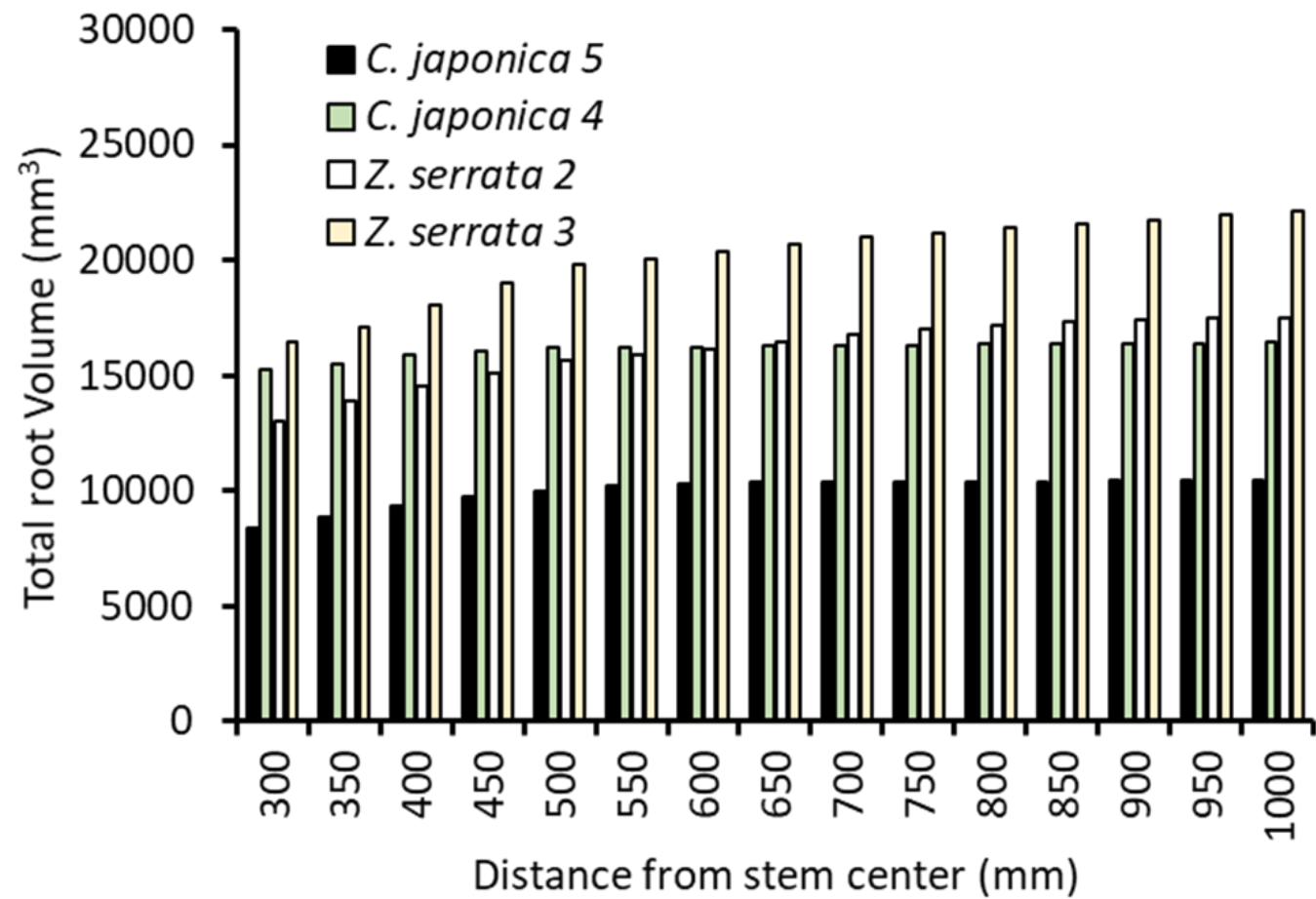
☒ 4-2-11 Volume of the root system normalized with $H \times DBH^2$ in the three tree species. The parts of roots related significantly to critical turning moment (the pink areas in the figure and the names of the part) are shown in red.



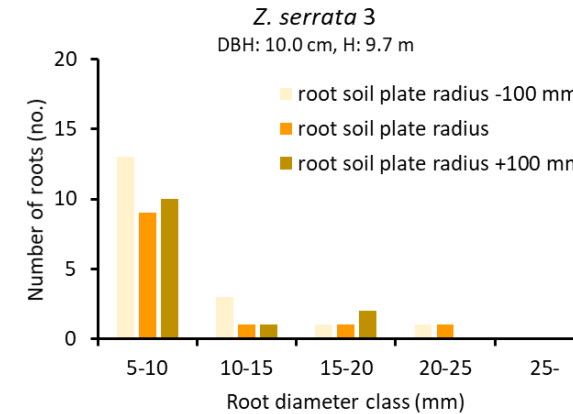
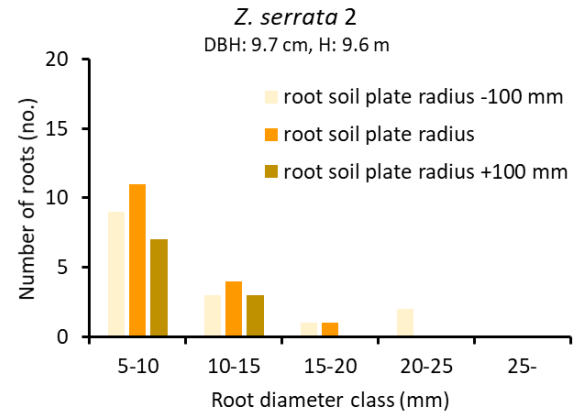
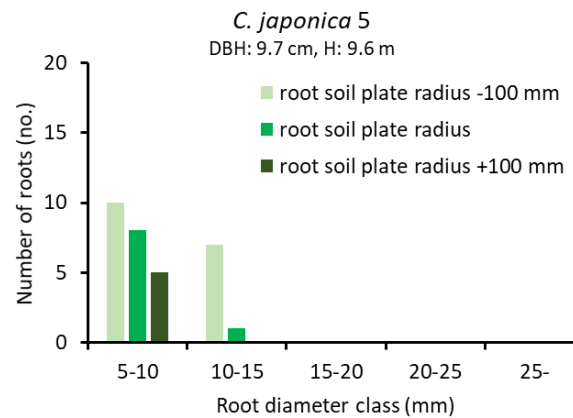
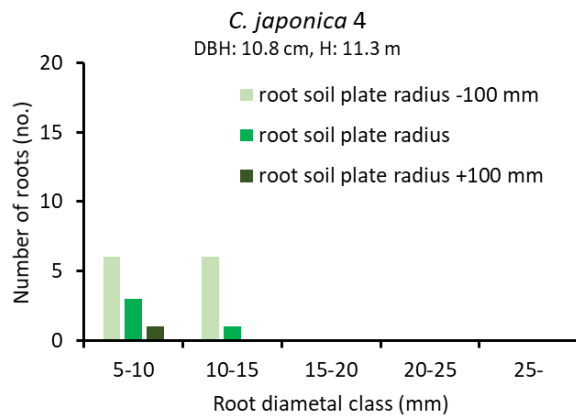
☒ 4-2-12 Relationship between critical turning moment and total CSA at the distance of 300 mm from the ground. (a) Relationship between critical turning moment and total CSA of all roots, and (b) relationship between critical turning moment and CSA without one root (red area) which grew upward and did not contribute to critical turning moment.



☒ 4-2-13 Variation in the total root CSA on the side of the cylinder imitating *C. japonica* and *Z. serrata* root soil plate with different distances from the stem center.



☒ 4-2-14 Variation in the total root volume in the root soil plate which assumed a cylinder in *C. japonica* and *Z. serrata* with different distances from the stem center.



☒ 4-2-15 Number of roots (>5 mm in diameter) in each 5 mm diameter classes in *C. japonica* and *Z. serrata* under the distance to root soil plate radius or to distance with or without 100 mm from root soil plate radius.



写真 4-2-1 The study site of *Cryptomeria japonica* stand (Site 1).



写真 4-2-2 The study site of *Zelkova serrata* stand (Site 1).



写真 4-2-3 The study site of *Pinus thunbergii* stand (Site 2).



写真 4-2-4 The excavated root system of *Cryptomeria japonica*.



写真 4-2-5 The excavated root system of *Zelkova serrata*.



写真 4-2-6 The excavated root system of *Pinus thunbergii*.

5章 総合考察

5-1 はじめに

本章では、2章から4章で明らかにしてきた異なる根系型を持つ3樹種の三次元(Three dimensional, 3D)根系構造(Root system architecture, RSA)と樹木の倒れにくさである倒伏耐性との関係性について包括的に整理する。また、樹木の3D根系構造のデータ取得法について、本研究で明らかにしてきた利点と欠点をまとめ、今後の展望として、これらの欠点を補うための新たな手法の提案について考察する。

さらに本研究で明らかにされた成果を、樹木の倒伏耐性を高めるため、実際に森林の管理や整備をどのように行っていくべきかについて検討し、持続的な森林管理に向けた施業や整備方法について提案する。

5-2 樹木の根系構造と倒伏耐性

本研究では、樹木の倒伏耐性への根系構造の寄与を明らかにするため、異なる根系型すなわち、深さ方向に垂直な根を伸長させる垂直根型のクロマツ(*Pinus thunbergii*)、深さ方向の垂直根よりも水平根の伸長を優先させる水平根型のケヤキ(*Zelkova serrata*)、両型の中間型とも言える斜め下方に根を特徴的に成長させる斜出根型のスギ(*Cryptomeria japonica*) (荻住 2010)の3樹種に着目した。クロマツやケヤキは国内の海岸にも生育する植栽樹種であり、スギは国内における主要造林樹種で国内森林面積の18%を占める(林野庁 2020)。またケヤキは、材が硬く美しい木目をもつことや、樹形や広葉が美しいという優れた点から、造林樹種や街路樹種として植栽されてきた(茂木ら 2000)。

近年、国内で管理手遅れの人工林を改善し健全な森林を育成するため、さらに森林の炭素吸収源として必要な森林管理として、スギ林における間伐が必要とされている(林野庁 2021)。2章では間伐されたスギで、同じ地上部サイズならば無間伐と比較して引き倒しモーメントが増大し、倒伏耐性が高まることを明らかにした。間伐の有無により、スギの根の最大深さ指標に差は認められなかったが、水平根の指標である根鉢半径は間伐されたスギで無間伐に比べ大きくなった。これらのことから間伐されたスギは、斜出根型の根系構造の中で水平根の成長を促進して倒伏耐性を高めることが示唆された。

3章では、津波の最前線として津波被害軽減機能を担う海岸林に生育するクロマツ(野口ら 2004)において、地下水位の高低で垂直根の発達の変化が倒伏耐性に関与することを明らかにした。陸側の地下水位の低い土壤に生育するクロマツでは垂直根が発達していたものの、海側の地下水位の高い土壤に生育するクロマツでは垂直根が未発達であった。海側に40年生程度生育したクロマツはこのように垂直根型の根系構造を水平根型に適応させる可塑性を示したが、どちらの根系型でも同じ材積における引き倒しモーメントは同じ程度であった。ただし、樹高の低い海側のクロマツでは、樹高より高い波

高の津波に対する倒伏耐性は脆弱であった。陸側のクロマツでは最大引き倒しモーメントの大きい樹高の高い個体が生育することで倒伏抵抗を高めていることも示唆された。これら2章と3章の結果から、同程度の最大深さの根系を持つ同じ樹種であれば水平根をより発達させることにより、また同じ樹種であれば垂直根のより発達している樹木のほうが、大きい倒伏抵抗を持つことが示唆された。

水平根や垂直根など根系構造の発達と倒伏耐性の関係は、樹種により異なる可能性がある。4章では、異なる根系構造を持つ3樹種スギ、ケヤキ、クロマツについて根系構造データから再現された3D根系構造について、さらに直接測定することは困難な根系特性値を算出することで、倒伏抵抗を示す引き倒しモーメントとの関係性を解析した。その結果、根系構造をなす根系特性の違いにより、樹木の倒伏抵抗に寄与する根系部位が異なることを明らかにした。垂直根の深く発達する垂直根型のクロマツでは垂直根の体積や断面積が強く関与し、斜出根型のスギでは、垂直根だけではなく水平根、特に根鉢の周囲の水平根の根断面積合計も関与していることが示唆された。一方で、樹種特性として垂直根を発達させず浅く水平な根を持つ水平根型のケヤキでは、幹中心から一定の距離内での水平根の体積が引き倒しモーメントと最も強く関係していた。ケヤキは、特に根系と土壌との緊縛により一体化させ、板のように強固な根鉢を作り上げ、根鉢の大きさを大きくすることで引き倒しモーメントを高める可能性が示唆された。以上のような樹種別の根系構造の特性および倒伏抵抗への寄与について表5-1にまとめて示した。

風などの横荷重が樹木を倒伏させる時、横荷重は樹木を回転させようと働く(鈴木2012)。そして横方向の荷重への抵抗に対して限界に達した樹木は、その根鉢をめくるように倒伏する(鈴木2012)。倒伏時に働く樹木根系の倒伏抵抗には、1章でも述べたように、根系全体の重量による抵抗、せん断に対する抵抗、風上側の引張に対する抵抗、風下側の圧縮に対する抵抗、土壌の抵抗の5つがあり(Mattheck et al. 2015)、これらの抵抗は根鉢境界面で同じタイミングで同じように寄与しているわけではない(鈴木2012)。Coutts(1986)の浅い水平根型根系のシトカトウヒ(*Picea sitchensis*)によると、倒伏の時間経過とともに、発揮される抵抗力のバランスは変化する。倒伏初期にはせん断に対する抵抗と土壌の抵抗が大きい。しかし、根鉢がめくれるとともに垂直根といった風上および風下以外の根系の剥離や破壊と、土壌のせん断が起これ、比較的早い時間でこれらの抵抗のピークが終了する(Coutts 1986)。太い垂直根を持つことで初期に働く抵抗力のピークを高くし倒伏抵抗を高めた樹種が、本研究における垂直根型のクロマツと言えるであろう。風上側の引張に対する抵抗と根系全体の重量による抵抗は、これらより少し遅れて増大する(Coutts 1986)。本研究では水平根の体積を増加させることで抵抗力を高めた樹種が水平根型のケヤキであろう。さらにカイガンショウ(*Pinus pinaster*)の例では、風下側の水平根の体積増加が風下側の圧縮に対する抵抗の増加につながる(Danjon et al. 2005)。したがって、ケヤキの水平根体積の増加は、倒伏初期からほぼ一定

に力を発揮する風下側の圧縮に対する抵抗の増加にもつながる。本研究における垂直根と水平根の両方とも倒伏抵抗への寄与がみられる斜出根型のスギは、5つの抵抗力をバランスよく増加させている可能性がある。Coutts (1986)のシトカトウヒでは倒伏時の抵抗力のうち最も大きなものは、風上側の引張に対する抵抗である。しかし鈴木 (2012)は、Coutts (1986)のシトカトウヒは浅根性樹種であるため垂直根の寄与を小さく見積もった可能性を指摘している。実際、風下側の圧縮に対する抵抗について、Coutts (1986)の浅い水平根を持つシトカトウヒでは全体の抵抗力の8%程度と見積もられたが、Crook and Ennos (1996)の垂直根を持つカラマツ属 (*Larix europea* × *japonica*)では25%、Danjon et al. (2005)によるカイガンショウではもっと割合が高い可能性を示唆している。これらは、5つの抵抗力の発揮されるタイミングも樹種や根系型により異なることを示唆している。

上記では樹種特性としての根系構造について垂直根や水平根の体積や根断面積合計など根系特性に着目してきた。しかし特殊な生育環境に適応した樹木では、これらと異なる関係性が見られるかもしれない。3章3-2で明らかにされた汀線に近い海側に生育したクロマツは垂直根を持たず、まるでケヤキのような水平根型の根系を持っていた。このような根系の違いは、クロマツが根系構造をその生育環境に適応させていることが示唆された (Hirano et al. 2018; Todo et al. 2019)。海岸近くの地下水位の高い場所に生育するクロマツでは、4章4-2で述べたように、倒伏に対して垂直根に依存しながら抵抗力を高める戦略ではなく、水平根の発達を促進させることで倒伏抵抗力を高める戦略に変化させていることが示唆された。このように垂直根型から水平根型に適応する可塑性を示す場合、クロマツが水平根のどの部分にどのように作用して倒伏抵抗力を高めているかについては、水平根の詳細な3次元根系構造と成長方向など根系特性値に着目して調べるなど、今後さらなる調査研究が必要となるだろう。

5-3 樹木の根系構造に関するデータ取得についての展望

倒伏抵抗について樹種間における違いを今後さらに検討するために、それぞれの樹種ごとに3次元根系構造 (RSA)のデータを取得する必要がある。本研究では、RSAデータの取得方法として、手動計測および3Dレーザスキャナ計測を使用し、これらの計測方法の利点と欠点を検討した (4章4-1、図5-1)。手動計測の利点は、特別な知識なしで取得できるなど手軽で汎用性の高いことであり、根の直径と位置座標という根のポイントデータを直接取得できることが挙げられる。3Dレーザスキャナ計測の利点は、データ入手に人手や時間がかからないことである。一方で両手法の欠点として、手動計測ではデータ取得に費やす時間や労力が大きいこと、3Dレーザスキャナ計測では計測機器が高価であり取得に専門的な技術が必要のことが挙げられる (4章4-1、図5-1)。

このように両手法に挙げられた欠点を補う手法として、多地点で撮影された複数枚の画像からの3D形状を復元するSfM (Structure from Motion)が挙げられる (Westoby et al.

2012、織田 2016)。SfM はデジタルカメラなどで撮影された複数枚の画像から、撮影された対象位置を推定し、対象物の同一地点に対するそれぞれの画像の視差から対象物全体の 3D データを生成する手法である。SfM で取得された根系構造の 3D データは、3D レーザスキャナ計測と同様にその根系表面のみを反映した点群データで構成されており、その精度は、撮影に使用したカメラの画素数、焦点距離、対象物までの距離やオーバーラップ率等に依存する (織田 2016)。また対象物の特性の算出には、取得された点群データから、特性の計測可能なポイントデータや 3D メッシュデータなどの形式に変換する必要がある (図 5-1)。

森林を対象にした SfM の応用では、葉や幹など地上部を対象とした事例が多く、樹木個体の樹高 H および胸高直径 DBH の計測 (Morgenroth and Gomez 2014) や、森林における林分単位の平均樹高の計測 (田村ら 2015) などに使用されている。 H が 3.85 m の常緑樹であるカウリ (*Agathis australis*) と DBH が 71 cm の夏緑樹であるアメリカガシワ (*Quercus palustris*) に SfM を応用した時、 H 推定値および DBH 推定値の誤差はそれぞれ 2.59% と 3.7% となり、苗木と比較して幹の太い樹木で SfM の再現性が高いことが明らかにされている (Morgenroth and Gomez 2014)。一方で、3 年生の夏緑樹であるヨーロッパナラ (*Quercus robur*) のような落葉した細い苗木では、点群データから 3D メッシュデータの作成が困難であったことが明らかにされている (Morgenroth and Gomez 2014)。地下部根系構造への SfM の応用では、グリーンアッシュ (*Fraxinus pennsylvanica*) 26 個体を SfM にて体積を計測し、実測した体積と比較した例が報告されているが (Koeser et al. 2016)、根系構造の詳細な部分計測までは及んでいない。このような SfM の手法を RSA の取得に使うことができるようなれば、RSA データの取得がさらに容易になることが推察される。また SfM で取得できるデータは点群データであるため、根の直径や断面積等の計測が一般的には困難であった。しかし本研究では 4 章 4-1 において根系の点群データを根のポイントデータに変換する方法を新たに提案した。本手法を使用すれば、3D メッシュデータ化を必要とせずに点群データを根特性値の計測可能な形式に変換できるため、さらに容易に応用できる可能性が高まる。

このように 3D 根系構造のデータ取得に関する手法は本手法やいくつかの報告により、近年急速に発展しつつあるが (Danjon and Ruebens 2008)、手動計測、3D レーザスキャナ、SfM による RSA データの取得には、いずれも土壌から根系を掘り出すことが必須である (Danjon and Ruebens 2008)。根系の掘り出しは土壌の攪乱を伴う破壊調査であるため、根系の経年変化による動態を評価するなど継続的な時系列調査は不可能である。したがって、経年変化の調査可能な非破壊調査による RSA データの取得も検討されており、そのうちの一つに地中探査レーダ法 (Ground penetrating radar, GPR) を用いた根のポイントデータの取得である (Danjon and Ruebens 2008)。4 章 4-2 でも述べたように、GPR 法では根の直径と位置を示すポイントデータを入手することができるものの (Hirano et al. 2012; Yamase et al. 2019)、RSA データを得るために必要な根のポイントデ

一タのつながりデータである根の接続情報は入手できない。Ohashi et al. (2019)は、スギ個体を構成する多数の根のポイントデータ、すなわち根の 3D 座標位置と直径のみを用いて、根のポイント間のつながりを予測し 3D 根系構造を復元する接続アルゴリズムの開発を行った。4章4-2で明らかにしたように、樹種により元来持つ根系構造が異なるため、樹種ごとの根のつながりアルゴリズムを得ることが今後必要である。スギと同様な方法(Ohashi et al. 2019)により他樹種のアルゴリズムを開発することで、様々な樹種に対して GPR 法を用いた RSA データ取得および 3D 根系構造復元からの根特性値の評価が可能となるであろう (図5-1)。

5-4 高い倒伏抵抗力をもつ根系構造を発達させるための森林施業の提案

2章では、同じ最大深さの根系を持つ樹木であれば水平根の発達を促すことで、倒伏抵抗力を高める可能性を明らかにした。水平根の発達を促すための森林施業には間伐施業が考えられる。これまでの間伐施業は、主伐に良質な材を得るために行われる施業であった。近年では、森林の防災機能を高めるため、間伐施業が進んで取り入れられており、特に森林の土壌表層を樹木の根により保持する表面侵食防止機能の向上には効果があると報告されている (荒木・阿部 2005)。一方で、森林災害の代表的な表層崩壊について、表層崩壊防止機能は間伐により向上するという報告 (伴ら 2009; 今井ら 2009)と、間伐しないものと同じ程度であるとの報告 (Yamase et al. 2019)がある。本研究で、間伐施業により森林の防災機能のうちの倒伏抵抗力が高まることを明らかにしたことは、近年、木材価格の低下により遅れている間伐施業を推進することに役立つであろう。これまで行われてきた、良質な木材を得るための間伐は、強度間伐をあまり行わず、間伐率 20-30%程度の間伐を行うことが推進されてきた。また、表面侵食防止機能を高めるための間伐施業としては、林床の植被率を改善させる整備基準として森林の込み具合を相対的に示す指標である収量比数を 0.75 以下にするという基準が設けられている (兵庫県 2010)。一方で、倒伏抵抗力を高めるために本研究における間伐施業の基準を導入するとこれまでの基準と異なる可能性がある。本研究では間伐率 55%とかなり強度な間伐であった (2章、藤堂ら 2015)。この強度の間伐が、隣接した樹木個体の地下部に根系を発達させる空間を作り、倒伏抵抗力の増加をもたらした可能性がある。




3章では、地下水位を低く保ち樹木の垂直根の発達を促すことで、高い倒伏抵抗力を持つ樹木が生育する可能性が示唆された。これを可能とするためには、樹木の生育基盤を地表面高より嵩上げする盛り土施業を行うことで、垂直根の深さ方向の伸長範囲を確保し、垂直根の成長を向上させる必要があるだろう (坂本 2015)。特に4章4-2で明らかにしたように、津波に伴う倒伏防止効果の期待される海岸に生育するクロマツでは、垂直根の発達過程が倒伏抵抗力に大きく寄与する。実際、東日本大震災の津波による海岸林被害地では、海岸に盛り土施業を行った生育基盤にクロマツを新たに植栽し、海岸林を急速に回復させる事業が行われている (林野庁 2013)。盛り土を行う際に気を付け

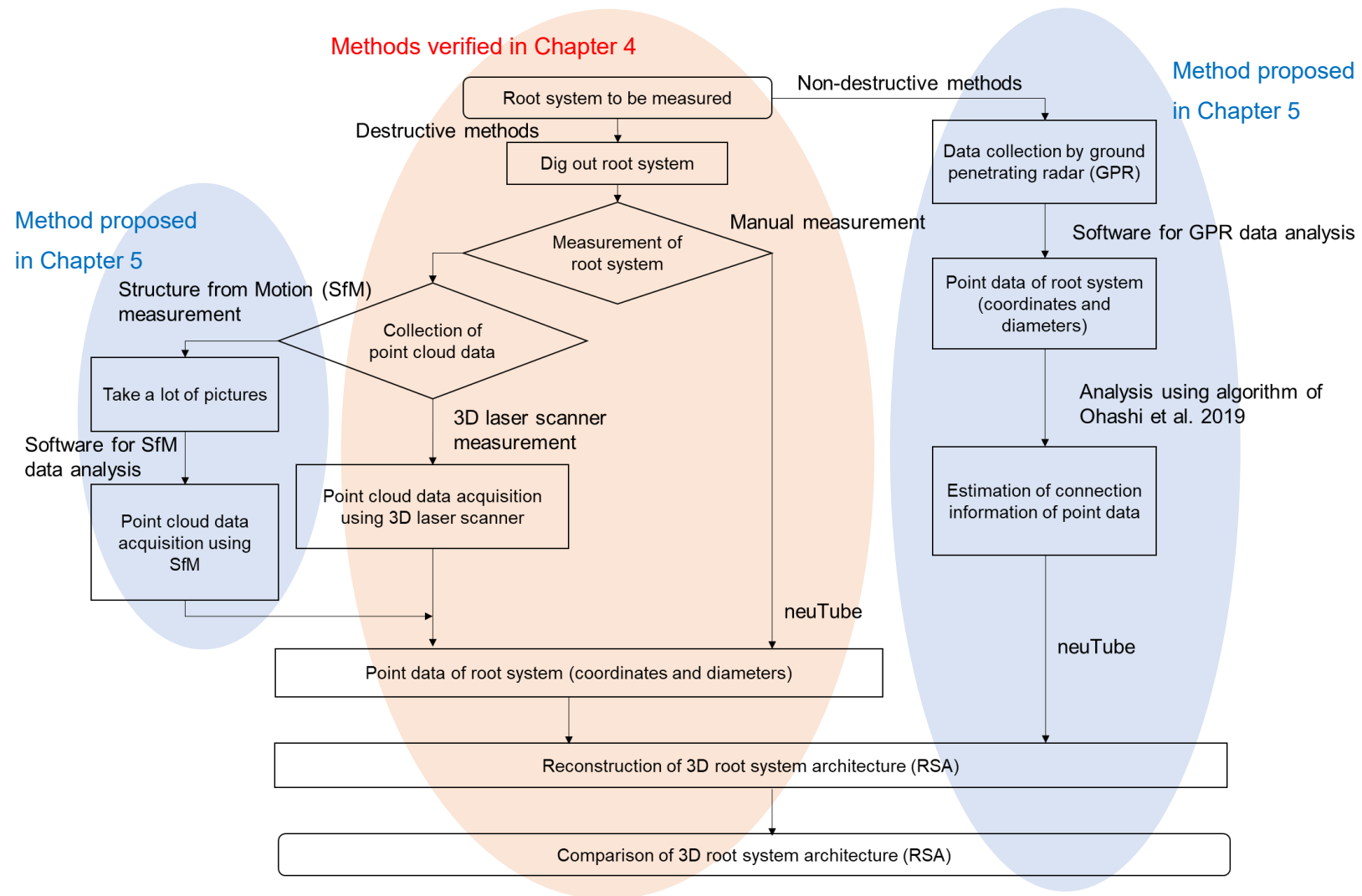
ることは、あくまでも垂直根の伸長を促すために行う作業であるため、盛り土を固める際には根系伸長を阻害しない硬さにすべきである (小野ら 2016、橘ら 2019)。盛り土を固めることは滞水層を作り滞水ストレスに晒す可能性もあるため、盛り土の慎重な造成が必要とされる (小野ら 2016)。

4章では、樹種により倒伏抵抗に寄与する根系構造の部位が異なることが示唆された。特徴的な樹種はケヤキである。ケヤキの根系は比較的浅く水平根型を示し (4章4-2、苅住 2010)、倒伏抵抗に垂直根の関与は少ないものの (4章4-2)、他の樹種と比較して高い倒伏抵抗を持つ樹種である (4章4-2)。したがって、生育基盤に存在する堅い岩盤等のため深く根の張れない可能性のある場所においても、倒伏抵抗力の強いケヤキを植栽することで、倒れにくい森林を育成できる可能性がある。一方で、ケヤキは街路樹では倒伏被害の多い樹種に挙げられている (飯塚・船久保 2019)。街路樹の生育基盤は道路により水平方向にも狭小である (飯塚・船久保 2019)ため、狭小な生育基盤がケヤキの倒伏抵抗を担う水平根の成長阻害を引き起こす可能性がある。このように森林等における植栽施業を検討する際、その樹種の根系構造と倒伏抵抗力を高める根系部位やその寄与メカニズムについて科学的知見を積み重ねておくことは極めて重要である。

今後、気候変動に伴い地球の温暖化が進むにあたり、豪雨や台風などの災害規模が大きくなることが予想される。それらの災害からできるだけ被害を減らす減災の観点で踏まえた持続的な森林を保持し管理するため、その森林に適した整備法を検討していく必要がある。このためには、森林整備の方法の裏付けとなる科学的な知見が必要となる。本研究で明らかにしてきた樹木の根系構造に関する基礎的な知見も減災を考慮した持続的な森林管理のための有力な科学的知見の一つである。2章の間伐に伴う倒伏抵抗力の増加は、令和元年度森林・林業白書 (林野庁 2020)にも紹介され、間伐施業で期待される結果の1つの知見として提供された。一方で、本研究は個体レベルでの倒伏抵抗についての知見であるため、個体の集まりである森林における倒伏抵抗の挙動や分布に対して検討していない。したがって、面的な倒伏抵抗を示す検討も必要だろう。このようなさまざまな知見を集積するためにも、労力のかかる根系を掘りだすなど調査して記録し、3D構造の情報を得るなど、地道な研究の積み重ねをますます進める必要があるだろう。

表 5-1 Root system architecture and their traits related with overturning resistance of the three tree species (*C. japonica*, *Z. serrata*, *P. thunbergii*) and proposed forest managements to increase overturning resistance.

	<i>Cryptomeria japonica</i> 	<i>Zelkova serrata</i> 	<i>Pinus thunbergii</i> 
Root system form	Heart root system	Horizontal root system Plate root system	Tap root system
Roots involved in overturning resistance	Horizontal roots Tap roots	Horizontal roots	Tap roots
Contribution of roots for overturning resistance	Resistance to tension Resistance of weight (Resistance to shear)	Resistance to tension Resistance of weight (Resistance to compression)	Resistance to shear (Resistance to tension) (Resistance of weight)
Forest management to increase overturning resistance	Thinning	Planting in shallow soil Do not plant on soils without enough spaces for horizontal root growth	Embankment in soils with high groundwater table or shallow hard pans
Relationships with soils or site conditions	Higher contribution of horizontal roots around the root-soil plate	Thin, large and hard root-soil plate	Plasticity of root system due to growth environment



☒ 5-1 Summary of data acquisition methods for root system architecture (RSA).

謝辞

本論文をまとめるにあたり、非常に多くの方々のご指導、ご鞭撻を得て完成することができました。まず、指導教官である名古屋大学大学院環境学研究科地球環境システム学講座の平野恭弘准教授には、樹木根の共同研究に声をかけていただいた時から長年にわたり、丁寧にご指導、ご支援いただいたことを本当に感謝いたします。同講座の高野雅夫教授、同研究科の依田憲教授、池野英利教授（福知山公立大学）には本論文に有益なご意見およびご示唆をいただきました。同講座の山口靖名誉教授、宮坂隆文助教には、講座でのセミナー発表を通し、様々な貴重なご意見、ご指導いただきました。皆様に心から御礼申し上げます。

大橋瑞江教授（兵庫県立大学）、谷川東子准教授（名古屋大学大学院生命農学研究科）、檀浦正子助教（京都大学）には、共同研究の場において多くの適切なご助言と温かい励ましをいただきました。山瀬敬太郎部長兼主席研究員（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）には、研究上のご助言およびご指導のみならず、社会人博士課程に入学するにあたり、当センターでの様々な便宜や調整を図っていただきました。ありがとうございました。

宮谷紘平氏、土居龍成氏、和田竜征氏、所千恵氏、山本智究氏、吉田巖氏、西村滂氏、吉江凜平氏、杵山哲矢氏（以上、名古屋大学）、木村敏文助教、木村弥生氏、奥田直人氏、鬮橋心氏、中川湧太氏、赤松真治氏、高松綾子氏、吉田滂氏（以上、兵庫県立大学）、Ji Young An 氏、仲畑了氏（以上、京都大学）、伊東康人氏、橋本忠義氏、中川勉氏（以上、森林林業技術センター）には、野外調査やデータ収集、データ解析などにおいて、大変貴重なご指導、ご助言、ご協力をいただきました。

これらの皆様に、この場をお借りして感謝いたします。

また、兵庫県農政環境部豊かな森づくり課には、「災害に強い森づくり事業」効果検証調査として本研究を位置づけていただけたこと、感謝しております。「災害に強い森づくり事業」検証委員の皆様には、本研究に対してご助言いただきました。特に、北原曜名誉教授（信州大学）には、本研究を始めるきっかけをいただけたこと、本当に感謝いたします。あなたにお会いしていなければ、私は樹木倒伏に関する研究を始めていなかったと思います。

兵庫県立農林水産技術総合センターの高松宏文前所長、芦田義則所長および森林林業技術センターの戸田政宏前所長、岩本順三所長には、当センター勤務と社会人博士課程の両立についてご配慮いただきました。センターの皆様には、野外調査の協力および、温かい励ましをいただきました。宮田和男氏をはじめとする宮田樹業の皆様、大橋成友氏をはじめとする（株）萬木園の皆様、中村裕幸氏をはじめとする（株）Woodinfo の皆様には、根系の掘り出し等の調査、データ収集に対するご協力をいただきました。兵庫県農政環境部林務課、田中淳氏（国土防災技術株式会社）、山下昇氏、中島寛文氏（愛知

県林業センター)、愛知県栽培漁業センターの皆様には、調査地の使用を許可していただき、本調査の設定にご協力いただきました。

本論文の研究は、JSPS 科研費 JP25252027 および 20H03028 と第 28、29 回公益財団法人市村清新技術財団植物研究助成をいただき、遂行しました。

本論文は、これらすべての方々のご協力とご支援により完成させることができました。応援してくださった方々に改めて感謝します。最後に、社会人博士課程へのチャレンジを見守ってくれた家族、特に、時に癒しを与えてくれた愛猫と、全面的に支えてくれた夫、何森要氏に心から感謝いたします。

引用文献

- 阿部和時 (1997) 樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能評価方法に関する研究. 森林総研研報 373:105–181.
- Achim A., Ruel JC., Gardiner BA. (2005) Evaluating the effect of precommercial thinning on the resistance of balsam fir to windthrow through experimentation, modelling, and development of simple indices. *Can.J.For.Res.*35:1844–1853.
- 荒木誠, 阿部和時 (2005) 間伐は森林の土壌を守れるか?. 森林科学 44:26–31.
- 伴博史, 北原曜, 小野裕 (2009) 間伐がカラマツ根系の崩壊防止機能に及ぼす影響. 中森研 57:179–182.
- Blackwell PG., Rennolls K., Coutts MP. (1990) A root anchorage model for shallowly rooted Sitka spruce. *Forestry* 63:73–91.
- Boggie R. (1972) Effect of water-table height on root development of *Pinus contorta* on deep peat in Scotland. *Oikos* 23:304–312.
- Brown DC. (1971) Close-range camera calibration. *Photom. Eng.* 37:855–866.
- Calders K., Newnham G. Burt A. Murphy S., Raumonon P., Herold M., Culvenor D., Avitabile V., Disney M., Armston J., Kaasalainen M. (2015) Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. *Meth. Ecol. Evol.* 6:198–208.
- Coutts MP. (1986) Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil. *Forestry* 59:173–179.
- Coutts MP., Nielsen CCN., Nicoll BC. (1999) The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. *Plant Soil* 217:1–15.
- Crook MJ., Ennos AR. (1996) The anchorage mechanics of deep rooted larch, *Larix europea x L japonica*. *J Exp Bot* 47:1509–1517.

- Crook MJ., Ennos AR., Banks JR. (1997) The function of buttress roots: a comparative study of the anchorage systems of buttressed (*Aglaia* and *Nephelium ramboutan* species) and non-buttressed (*Mallotus wrayi*) tropical trees. *J Exp Bot* 48:1703–1716.
- Cucchi V., Meredieu C., Stokes A., Berthier S., Bert D., Najjar M., Denis A., Lastennet R. (2004) Root anchorage of inner and edge trees in stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in different podzolic soil conditions. *Trees* 18:460–466.
- Danjon F., Barker D., Drexhage M., Stoke A. (2008) Using three-dimensional plant root architecture in models of shallow-slope stability. *Ann. Bot* 101:1281–1293.
- Danjon F., Fourcaud T., Bert D. (2005) Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*. *New Phytol.* 168:387–400.
- Danjon F., Ruebens B. (2008) Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. *Plant Soil* 303:1–34.
- Danjon F., Sinoquet H., Godin C., Colin F., Drexhage M. (1999) Characterisation of structural tree root architecture using 3D digitising and AMAPmod software. *Plant Soil* 211:241–258.
- Dassot M., Constant T., Fournier M. (2011) The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Ann. For. Sci.* 68:959–974.
- Dorval AD., Meredieu C., Danjon F. (2016) Anchorage failure of young trees in sandy soils is prevented by a rigid central part of the root system with various designs. *Ann. Bot.* 18:747–762.
- Drexhage M., Colin F. (2001) Estimating root system biomass from breast-height diameters. *Forestry* 74:491–497.
- Dupuy L., Fourcaud T., Stokes A. (2005) A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. *Eur. J. Soil Sci* 59:319–327.

- Ennos AR. (2000) The mechanics of root anchorage. *Adv. Bot. Res.* 33:133–157.
- FAO-UNESCO (1990) *Soil Map of the World. Revised Legend. Reprinted with corrections.*
World Soil Resources Report 60. FAO. Rome. Italy
- FARO Technologies Inc. (2013) FARO@LASER SCANNER FOCUS3D Manual.
<https://faro.app.box.com/s/kfpwjofogeegocr7mf2s866s2qalnaqw> (accessed 18 Apr 2021)
- Feng L., Zhao T., Kim J. (2015) neuTube 1.0: A new design for efficient neuron reconstruction software based on the swc format. *eNeuro* Jan-Feb.2 (1) ENEURO.0049-14.2014:1–10.
- Fourcaud T., Ji JN., Zhang ZQ., Stokes A. (2008) Understanding the impact of root morphology on overturning mechanisms: a modelling approach. *Ann. Bot.* 101:1267–1280.
- Forestry and Forest Products Research Institute, Japan (2012) Regeneration of coastal forests affected by tsunami. 1–24.
- Fritz M., Phillips DA., Okayasu A., Shimozone T., Liu H., Mohammed Fa., Skanavis V., Synolakis CE., Takahashi T. (2012) The 2011 Japan tsunami current velocity measurements from survivor videos at Kesennuma Bay using LiDAR. *Geophys. Res. Lett.* 39: L00G23
- 深見悠矢, 北原曜, 小野裕, 藤堂千景, 山瀬敬太郎 (2011) 土壌水分等の条件が異なる場合の立木引き倒し試験. *日林誌* 93:8–13.
- Gärtner H., Wagner B., Heinrich I., Denier C. (2009) 3D-laser scanning: a new method to analyze coarse tree root systems. *Forest Snow and Landscape Research* 82:95–106.
- Ghestem M., Veylon G., Bernard A. Vanel Q., Stokes A. (2014) Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance. *Plant Soil* 377:43–61.
- Godin C., Costes E., Caraglio Y. (1997) Exploring plant topological structure with the AMAPmod software: an outline. *Silva Fennica* 31:357–368.
- Hale SE., Gardiner BA., Wellpott A., Nicoll BC., Achim A. (2012) Wind loading of trees: influence of tree size and competition. *Eur. J. For. Res.* 131:203–217.

林拙郎, 野々田稔郎, 川邊洋 (1998) 根株の強度と樹木の安定性. 平成7年度～9年度文部省科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))研究成果報告書. 耐風特性を考慮した斜面上緑化樹木の安定性に関する研究:35–47.

Henderson R., Ford ED., Renshaw E., Deans JD. (1983) Morphology of the structural root system of Sitka spruce 1. Analysis and quantitative description. *Forestry* 56:121–135.

平野恭弘, 野口享太郎, 大橋瑞江 (2020) 森の根の生態学. 共立出版株式会社. 東京. pp.352

Hirano 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 Soil* 426:327–337.

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* 360:363–373.

兵庫県 (2010) 災害に強い森づくり事業検証報告書 2010:1–87 pp.

Iimura K., Tanaka N. (2012) Numerical simulation estimating effects of tree density distribution in coastal forest on tsunami mitigation. *Oceanic Eng.* 54:223–232.

飯塚康雄, 舟久保敏 (2019) 街路樹の倒伏対策の手引き 第2版. 国土技術政策総合研究所資料 1059:1–142.

今井健太郎, 原田賢治, 南幸弘, 川口誠史, 二宮栄一 (2013) 海岸樹木の津波耐力評価手法の高度化. *土木学会論文集 B2* 69: I_361–I_365.

今井健太郎, 鈴木明菜 (2005) 沿岸樹木のパイプモデルを用いた表面積, 体積評価法とその倒伏耐力. *水工学論文集* 49:859–864.

今井裕太郎, 北原曜, 小野裕 (2009) ヒノキ根系の崩壊防止力に及ぼす間伐の影響. *中森研* 57:175–178.

- 稲垣秀輝 (1999) 植生の違いによる風倒木の発生と斜面崩壊. 応用地質 40:196–206.
- 井上美那, 香口成美, 立石麻紀子, 谷口武士, 山本福壽, 山中典和 (2015) 海水による
土壌冠水が東日本太平洋沿岸域に分布する木本植物 17 種の生育に及ぼす影響. 日
緑工誌 41:73–78.
- 伊東日向, 吉崎真司 (2013) 沿岸域に生育する常緑広葉樹を用いた塩水による生育実験.
日緑工誌 39:117–120.
- Jackson RB., Pockman WT., Hoffmann WA. (1999) The Structure and Function of Root Systems.
In Handbook of Functional Plant Ecology. Marcel Dekker Inc. New York. 196–220.
- Kaestner A., Schneebeli M., Graf F. (2006) Visualizing three-dimensional root networks using
computed tomography. Geoderma 136:459–469.
- 掛谷亮太, 瀧澤英紀, 小坂 泉, 園原和夏, 石垣逸朗, 阿部和時 (2016) スギ林分の間伐
が根系生長と表層崩壊防止機能に与える影響. 日緑工誌 42:299–307.
- Kamimura K., Kitagawa K., Saito S., Mizunaga H. (2012) Root anchorage of hinoki
(*Chamaecyparis obtusa* (Sieb. Et Zucc.) Endl.) under the combined loading of wind and
rapidly supplied water on soil: analyses based on tree-pulling experiments. Eur. J. For. Res.
131:219–227.
- 苧住昇, 寺田正男 (1963) クロマツ稚樹の根系の生長と本数密度. 日林講 74:269–271.
- 苧住昇 (1974) 森林生産の場における根系の機構と機能II 根量とその分布. 林試研報
267:1–88.
- 苧住昇 (1979) 樹木根系図説. 誠文堂新光社. 東京.
- 苧住昇 (2010) 最新樹木根系図説 (総論). 誠文堂新光社. 東京.
- 茅島信行, 佐々木重行 (2010) 斜面傾斜地における根系分布の偏りがスギ引き倒し試験
に与える影響. 森林立地 52:49–55.
- 木下篤彦, 坂井佑介, 大野亮一, 田畑三郎, 川島正照, 山崎孝成 (2013) スギ・ヒノキ

- 林における水平根が発揮する抵抗力の検討. 砂防学会誌 65: 11-20.
- 北原曜 (2010) 森林根系の崩壊防止機能. 水利科学 311:11-37.
- 気象庁 (2017) <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/> (accessed 31 Jan 2017)
- 気象庁 (2019) <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/> (accessed 12 Aug 2019)
- 気象庁 (2021a) https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/jishin/about_eq.html
(accessed 12 Jan 2021)
- 気象庁 (2021b) https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/ame_chuui/ame_chuui_p1.html
(accessed 12 Jan 2021)
- 気象庁 (2021c) https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html (accessed 12 Jan 2021)
- Koeser AK., Roberts J., Miesbauer JW., Lopes AB., Kling GJ., Lo M., Morgenroth J. (2016)
Testing the accuracy of imaging software for measuring tree root volumes. *Urban Forestry & Urban Greening* 18: 95-99.
- 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.
- Liang T., Knappett JA., Bengough AG., Ke YX. (2017) Small-scale modelling of plant root systems using 3D printing, with applications to investigate the role of vegetation on earthquake-induced landslides. *Landslides* 14:1747-1765.
- Liski J., Kaasalainen S., Raunonen P., Akujärvi A., Krooks A., Repo A., Kaasalainen M. (2014)
Indirect emissions of forest bioenergy: Detailed modeling of stump-root systems. *GCB Bioenerg.* 6:777-784.
- Lontoc-Roy M., Dutilleul P., Prasher SO., Han L., Smith DL. (2005) Computed tomography scanning for three-dimensional imaging and complexity analysis of developing root system. *Botany* 83:1434-1442.
- Lundström T., Jonas T., Stöckli V., Ammann W. (2007a) Anchorage of mature conifers: resistive

turning moment, root–soil plate geometry and root growth orientation. *Tree Physiol.* 27:1217–1227.

Lundström T., Jonsson MJ., Kalberer M. (2007b) The root – soil system of Norway spruce subjected to turning moment: resistance as a function of rotation. *Plant Soil* 300:35–49.

正木隆, 櫃間岳, 八木橋勉, 野口麻穂子, 柴田銃江, 高田克彦 (2013) スギ林における壮齢時の間伐は樹高の長期的な成長にどのように影響するか?. *日林誌* 95:227–233.

Mattheck C., Bethge K., Weber K. (2015) *The Body Language of Trees (Encyclopedia of Visual Tree Assessment)*. Karlsruhe Institute of Technology. Karlsruhe. pp.548

宮田賢, 北原曜, 小野裕 (2013) 愛知県伊良湖岬におけるクロマツ引き倒し試験. *中部森林研究* 61:1–4.

水山高久, 天田高白, 栗原淳一, 小林幹男 (1989) 樹林帯の抵抗特性と土砂堆積促進効果. *新砂防* 42:18–22.

水山高久, 栗原淳一, 鈴木浩之 (1990) 立木の衝撃エネルギー吸収効果. *新砂防* 42:24–28.

茂木透, 勝山輝男, 太田和夫, 崎尾均, 高橋秀男, 石井英美, 城川四郎, 中川重年, 吉山寛 (2000) *樹に咲く花*. 山と溪谷社. 東京. pp.719

Moore JR. (2000) Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types. *For. Ecol. Manage.* 135:63–71.

Morgenroth J., Gomez C. (2014) Assessment of tree structure using a 3D image analysis technique—A proof of concept. *Urban Forestry & Urban Greening* 13:198–203.

森岡昇 (1983) 集運材用ワイヤロープの支柱としての立木の強さ(II) 立木を傾けようとする力のモーメントの中心位置の推定法. *日本林学会誌* 65:342–346.

森岡昇 (1984) 集運材用ワイヤロープの支柱としての立木の強さ(III) 横荷重による力のモーメントと幹の傾きの関係—スギ小径木の場合—. *日本林学会誌* 66:160–163.

- Mulaty JM., Wilson J., Ong CK., Deans JD., Sprent JI. (2002) Root architecture of provenances, seedlings and cuttings of *Melia volkensii*: implications for crop yield in dryland agroforestry. *Agroforestry Systems* 56:65–72.
- 村井宏, 石川政幸, 遠藤治郎, 只木良也 (1992) 日本の海岸林—多面的な環境機能とその活用. ソフトサイエンス社. 東京.
- 長野県林務部 (2008) 災害に強い森づくり指針:1–18.
- Nanko K., Suzuki S., Noguchi H., Ishida Y., Levia FD., Ogura A., Hagino H., Matsumoto H., Takimoto H., Sakamoto T. (2019) Mechanical properties of Japanese black pine (*Pinus thunbergii* Parl.) planted on coastal sand dunes: resistance to uprooting and stem breakage by tsunamis. *Wood Sci. Tech.* 53:469–489.
- 奈良県農林部 (2014) 平成 25 年度「災害に強い森づくり」調査検討報告書:1–60
- Nicoll BC., Achim A., Clossly A., Gardiner BA., Mochan S. (2009) The effect of spacing on root anchorage and tree stability. *Scott. For.* 63:32–36.
- Nicoll BC., Achim A., Mochan S., Gardiner BA. (2005) Does steep terrain influence tree stability? A field investigation. *Can. J. For. Res.* 35:2360–2367.
- Nicoll BC., Gardiner BA., Peace AJ. (2008) Improvements in anchorage provided by the acclimation of forest trees to wind stress. *Forestry* 81:389–398.
- Nicoll BC., Gardiner BA., Rayner B., Pearce AJ. (2006) Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. *Can. J. For. Res.* 36: 1871–1883.
- Nicoll BC., Ray D. (1996) Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions. *Tree Physiol.* 16:891–898.
- 日本造園学会緑化環境工学研究委員会 (2000) 緑化事業における植栽基盤整備マニュアル. *ランドスケープ研究* 63:224–241.
- 新田響平, 野口宏典, 太田敬之, 小野賢二, 萩野裕章, 野口享太郎, 大谷達也, 宇川裕

- 一, 小森谷あかね, 谷川東子, 平野恭弘, 鈴木覚 (2021) 秋田県の海岸砂丘に生育するクロマツおよび植栽広葉樹数種の根系分布. 森林総合研究所研究報告:(印刷中)
- Noguchi K., Konôpka B., Satomura T., Kaneko S., Takahashi M. (2007) Biomass and production of fine roots in Japanese forests. *Journal of Forest Research* 12:83–95.
- 野口宏典 (2015) 海岸林の津波減衰効果に関する研究. 博士論文. 東京大学. 日本. 1–81.
- 野口宏典, 鈴木賞, 南光一樹, 竹内由香里, 金子智紀, 新田響平, 渡部公一, 坂本知己 (2014) 海岸砂丘地に植栽された広葉樹およびクロマツの倒伏抵抗特性の引き倒し試験による評価. *海岸林学会誌* 13:59–66.
- 野々田稔郎, 林拙郎, 川邊洋 (1998) 簡略化した根系分布を用いた根返り抵抗モーメントの計算. 平成7年度～9年度文部省科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))研究成果報告書. 耐風特性を考慮した斜面上緑化樹木の安定性に関する研究:22–34.
- 野々田稔郎, 林拙郎, 川邊洋, 本多潔, 小藪一志 (1996) 樹幹引き倒しによる根返りの発生機構. *日本林学会誌* 78:390–397.
- 小田隆則 (2001) 海岸砂丘低湿地における植栽木根系の滞水反応と樹林帯造成法に関する研究. 博士論文. 岩手大学.
- 小川真 (1979) 海岸砂丘のクロマツ林における微生物相. *林業試験場研究報告* 305:107–124
- Ohashi M., Ikeno H., Sekihara K., Tanikawa T., Dannoura M., Yamase K., Todo C., Tomita T., Hirano Y. (2019) Reconstruction of root systems in *Cryptomeria japonica* using root point coordinates and diameters. *Planta* 249:445–455.
- Okada Y. (2019) Measuring the critical turning moment of the Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in situ. *J. For. Res.* 24:168–177.
- 岡山県農林水産部林政課 (2005) 21世紀おかやまの新しい森育成指針:1–29.
- 小野賢二, 今矢明宏, 高梨清美, 坂本知己 (2016) 海岸防災林復旧・再生事業における

- 生育基盤盛土の現状—事業着手初期の未耕起盛土の物理性および盛土への各種耕起工が土壌硬度鉛直分布に及ぼす効果の評価—. 森林総合研究所研究報告 15:65–78.
- Ono K., Komoriya A., Tachibana R., Imaiya A., Suzuki S., Noguchi H., Noguchi K., Hagino H. (2018) Effects of row deep tillage for the growth base formed by piling up soil in damp lowlands behind coastal sand dunes to construct coastal disaster prevention forest belts on the Kujukuri coastline, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 64:168–180.
- Oppelt AL., Kurth W., Dzierzon H., Jentschke G., Godbold DL. (2000) Structure and fractal dimensions of root systems of four co-occurring fruit tree species from Botswana. *Ann. For. Sci.* 57:463–475.
- 織田和夫 (2016) Structure from Motion (SfM) 第一回 SfM の概要とバンドル調整. 写真測量とリモートセンシング 55:206–209.
- Peltola H., Kellomäki S., Hassinen A., Granander M. (2000) Mechanical stability of Scot pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *For. Ecol. Manage.* 135:143–153.
- Polomski J., Kuhn N. (1998) Root systems. Paul Haupt AG Bern. Bern. pp. 290.
- Raumonen P., Kaasalainen M., Åkerblom M., Kaasalainen S., Kaartinen H., Vastaranta M., Holopainen M., Disney M., Lewis P. (2013) Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. *Remote Sens.* 5:491–520.
- Ray D., Nicoll B. (1998) The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce. *Forestry* 71:169–182.
- R Core Team (2017) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- 林野庁 (2011) 平成 23 年度 森林・林業白書.
https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/23hakusyo/pdf/23_e.pdf, (accessed 18 Apr

2021).

林野庁 (2013) 平成 25 年度 森林・林業白書.

<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/25hakusyo/pdf/h25summary.pdf>. (accessed 31 Jan 2017).

林野庁 (2014) 平成 26 年度 森林・林業白書.

<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/26hakusyo/pdf/h26summary.pdf>. (accessed 31 Jan 2017).

林野庁 (2020) 森林・林業統計要覧 2020.

https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/toukei/youran_mokuzi2020.html. (accessed 23 Jan 2021)

林野庁 (2020) 令和元年度 森林・林業白書.

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r1hakusyo/zenbun.html>. (accessed 26 June 2021)

林野庁 (2021) 令和 2 年度 森林・林業白書.

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/R2hakusyo/index.html>. (accessed 23 Jan 2021)

坂本知己 (2015) 津波による海岸林の被害と海岸林再生で盛土をする理由. 日緑工誌 41: 334–335.

坂本知己, 野口宏典, 後藤義明, 鈴木賞, 島田和則 (2013) クロマツ海岸林における天然更新木の取り扱い (1) 渥美半島西の浜クロマツ海岸林における天然更新の実態. 海岸林学会誌 12:29–34.

佐藤創, 鳥田宏行, 真坂一彦 (2001) 間伐によるトドマツ根系の発達. 日林北支論 49:118–119.

Schneider CA., Rasband WS., Eliceiri KW. (2012) NIH Image to ImageJ: 25 years of image

analysis. *Nat. Meth.* 9:671–675.

Schwarz M., Lehmann P., Or D. (2010) Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes — From a bundle of roots to tree stand. *Earth Surf. Process. Landforms* 35:354–367.

Seidel D., Fleck S., Leuschner C., Hammett T. (2011) Review of groundbased methods to measure the distribution of biomass in forest canopies. *Ann. For. Sci.* 68:225–244.

芝寄茂, 松本司, 海原荘一, 伊藤統博, 水山高久 (2003) 2001年8月21日に和歌山県東の川で発生した土石流における樹林帯の土石流制御効果. *砂防学会誌* 56:20–24.

島田博匡, 野々田稔郎 (2017) 三重県中部地域におけるスギ・ヒノキ立木の引き倒し抵抗力. *日緑工会誌* 43:138–143.

森林総合研究所 (2004) 木材工業ハンドブック. 丸善. 東京. pp.1221

Smith A., Astrup R., Raunonen P., Liski J., Krooks A., Kaasalainen S., Åkerblom M., Kaasalainen M. (2014) Tree root system characterization and volume estimation by terrestrial laser scanning and quantitative structure modeling. *Forests* 5:3274–3294.

Sorgonà A., Proto AR., Abenavoli LM., Di IA. (2018) Spatial distribution of coarse root biomass and carbon in a high-density olive orchard: effects of mechanical harvesting methods. *Trees* 32:919–931.

Srinivasan S., Sorin C., Popescu M., Eriksson R., Sheridan D., Ku NW. (2015) Terrestrial laser scanning as an effective tool to retrieve tree level height, crown width, and stem diameter. *Remote Sens.* 7:1877–1896.

末次忠司 (2019) 水害被害を助長する土砂・流木の影響. *水利科学* 365:56–69.

鈴木寛 (2012) 樹木と環境 第4回：風と樹木. *樹木医学研究* 16:15–22.

橘隆一, 小野賢二, 小森谷あかね, 宇川裕一, 福永健司, 國井洋一 (2019) 千葉県海岸盛土造成地におけるクロマツの根系伸長特性. *水利科学* 370:146–157.

田原市 (2015) 田原市南海トラフ地震被害予測調査業務報告書概要版. 1–26.

http://www.city.tahara.aichi.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/001/437/mayor/newsconference/pdf/1506/1506_1-1nankaitorafu-higaisoutei.pdf (accessed 27 Sep 2017).

玉手三葉寿, 檜山徳治, 笹沼たつ, 高橋亀久松 (1965) 立木引き倒し試験. 日林誌 47:210–213.

田村太壱, 加藤顕, 小花和宏之, 吉田俊也 (2015) 小型 UAV による空撮と SfM を用いた樹高計測. 日緑工誌 41:163–168.

田中淳, 中澤洋, 佐藤威臣 (2017) 愛知県田原市西ノ浜海岸林におけるクロマツの根系掘削および周辺地下水位調査の事例. 日本緑化工学会誌 43:298–301.

Tanaka N. (2012) Effectiveness and limitations of coastal forest in large tsunami: conditions of Japanese pine trees on coastal sand dunes in tsunami caused by Great East Japan Earthquake. J. Jpn. Soc. Civil Eng. 68:II7–II15.

Tanikawa T., Ikeno H., Todo C., Yamase K., Ohashi M., Okamoto T., Mizoguchi T., Nakao N., Kaneko S., Torii A., Inagaki Y., Nakanishi A., Hirano Y. (2021) A quantitative evaluation of soil mass held by tree roots. *Trees* 35:527–541.

Toral M., Bown H.E., Mañon A., Alvarez J., Navarro-Cerrillo R. (2011) Wind-induced leaning (toppling) in young *Pinus radiata* plantations in Chile. *International Journal of Agriculture and Natural Resources* 38:405–414.

鳥田宏行 (2006) 2002 年台風 21 号により北海道十勝の防風保安林に発生した風害の要因解析. 日林誌 88:489–495.

鳥田宏行, 渋谷正人, 小泉章夫 (2011) カラマツ林の力学的解析による風害予測. 日林誌 92:127–133.

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 (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. 日緑工誌 41:308–314.

Todo C., Tokoro C., Yamase K., Tanikawa T., Ohashi M., Ikeno H., Dannoura M., Miyatani K.,

- Doi R., Hirano Y. (2019) Stability of *Pinus thunbergii* between two contrasting stands at differing distances from the coastline. *For. Ecol. Manage.* 431:44–53.
- 土屋智, 今泉文寿, 逢坂興宏 (2009) 荒廃溪流源頭部における土石流の流動形態と石礫の流下状況. *砂防学会誌* 61:4–10.
- 塚本良則 (1987) 樹木根系の崩壊抑止効果に関する研究. *東京農工大学演習林報告* 23:65–124.
- Urata T., Shibuya M., Koizumi A., Torita H., Cha JY. (2012) Both stem and crown mass affect tree resistance to uprooting. *J.For.Res.* 17:65–71.
- Vergani C., Giadrossich F., Buckley P., Conedera M., Pividori M., Salbitano F., Rauchg HS., Lovreglio R., Schwarz M. (2017) Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review. *Earth-Science Reviews* 167:88–102.
- Westoby MJ., Brasington J., Glasser NF., Hambrey MJ., Reynolds JM. (2012) 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179:300–314.
- Yamase K., Tanikawa T., Dannoura M., Todo C., Yamamoto T., Ikeno H., Ohashi M., Aono K., Doi R., Hirano Y. (2019) Estimating slope stability by lateral root reinforcement in thinned and unthinned stands of *Cryptomeria japonica* using ground-penetrating radar. *Catena* 183: 104227.
- Yamase K., Todo C., Torii N., Tanikawa T., Yamamoto T., Ikeno H., Ohashi M., Dannoura M., Hirano Y. (2021) Dynamics of soil reinforcement by roots in a regenerating coppice stand of *Quercus serrata* and effects on slope stability. *Ecological Engineering* 162:106169.
- Yang M., Défossez P., Danjon F., Dupont S., Fourcaud S. (2017) Which root architectural elements contribute the best to anchorage of *Pinus* species? Insights from in silico experiments. *Plant Soil* 411:275–291.

Yang M., Défossez P., Danjon F., Fourcaud S. (2018) Analyzing key factors of roots and soil contributing to tree anchorage of *Pinus* species. *Trees* 32:703–712.

吉野豊, 前田雅量 (2006) 針広混交林育成試験(I)ースギ人工林内に樹下植栽された落葉広葉樹 4 種の 9 年間の生存と成長ー. 兵庫農技総セ森林林業編. 53:1–4.

Zhu J., Matsuzaki T., Sakiok, K. (2000) Windspeeds within a single crown of Japanese black pine (*Pinus thunbergii* Parl.). *For. Ecol. Manage.* 135:19–31.