

海岸林における土壌硬度がクロマツの根系成長と引き倒しモーメントに与える影響

古屋 航¹・小坂 泉¹・瀧澤英紀¹・阿部和時¹・坂井あゆみ²

1 日本大学生物資源科学部

2 神奈川県藤沢土木事務所

要旨: 2011年の東日本大震災後、クロマツの津波減衰機能を十分に発揮させるためには鉛直根の発達が必要であると考えられるようになった。本研究では、湘南海岸の砂防林のクロマツを対象に、①鉛直根の成長に対する土壌硬度の影響を明らかにすること。②鉛直根の発達がクロマツの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にした。試験は対象木生育地点において、土壌硬度試験、引き倒し試験、根系分布調査を行った。その結果、①既往の研究ではSH型土壌貫入試験で得られる土壌硬度Nd/drop値が7.1を超えると根系侵入は困難とされているが、この土壌硬度だけでは鉛直根の成長深度を説明できないことがあきらかになった。②鉛直根材積量、根系の最深深さは最大抵抗モーメントと相関性が高く、それは根系と砂粒子間の摩擦力が影響していると考えられた。

キーワード: 湘南海岸林、クロマツ、鉛直根、引き倒し抵抗モーメント、土壌硬度

Effects of soil hardness on root growth and pulling down moment of *Pinus thunbergii* in coastal forest

Wataru Furuya¹, Izumi Kosaka¹, Hideki Takizawa¹, Kazutoki Abe¹, Ayumi Sakai²

1 College of Bioresource Sciences, Nihon University, 1866 Kameino, Fujisawa, Kanagawa 252-0880

2 Fujisawa Civil Engineering Office, Kanagawa Prefecture, Shiomidai 1-7, Chigasaki, Kanagawa 253-0033

Abstract: After the Great East Japan Earthquake in 2011, the development of vertical roots was considered to be important for the tsunami attenuation function of *Pinus thunbergii*. The purpose of this study is to clarify the effect of soil hardness on vertical root growth, and to clarify the effect of vertical root on the pull-down moment of a trunk of *Pinus thunbergii*, in Shonan coastal forest. The soil hardness test, the pull-down test, and the root system distribution survey were conducted at the target tree growth points. As a result, (1) in the past research, when the soil hardness “Nd/drop” value obtained by the SH soil penetration test exceeds 7.1, root growth is difficult, but this soil hardness alone cannot explain the growth depth of vertical roots. (2) The vertical root volume and the deepest depth of the root system are highly correlated with the maximum pull-down moment, and the vertical root plays an important role in the tsunami attenuation function.

Keywords: coastal forest, vertical root, pull-down moment of a trunk, soil hardness, *Pinus thunbergii*

I はじめに

東日本大震災の津波によって関東、東北地方の太平洋側の海岸林が甚大な被害を受けた。しかし、一方でクロマツ林の津波軽減効果に対して評価する声も聞こえ、実際に震災時に確認された効果として、①クロマツの樹幹、根系によって津波の威力が減殺された。②津波による漂流物の移動を抑止し、移動による二次災害を防止、軽減したと言われている(1)。被災後の海岸林被害調査では、津波に耐えたクロマツは、流木化したクロマツと比べ鉛直根の発達が良好だったことが確認され、①鉛直根の発達はクロマツの流木化を抑制する、②流木化しないことによりクロマツの津波抵抗力を高めると報告された(2)。

このため、海岸防災林の再生事業を進めるにあたっては、地下水の影響によってクロマツ根系の深さ方向の成長が抑止されないよう、約3mの高さに造成した盛土地盤にクロマツの苗を植栽する手法がとられた。しかし、①重機で盛土を造成するため、圧密により土壌硬度が高くなり根系の深さ方向の侵入に影響を与える。②粘土質を含む山砂を使用しているため、透水性が悪く根系の生長に悪影響である、という課題が生じた(3)。上記の理由から本研究では、第一に鉛直根の成長に対する土壌硬度の影響を明らかにすること、第二に鉛直根の発達がクロマツの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。

(受理日 2020年2月17日)

II 試験地と方法

1. 試験地

神奈川県藤沢市鶴沼海岸から中郡大磯町の湘南海岸に造成された全長 11.4km、面積 85.2ha の広さを有する砂防林の 4 地点で実施した。

2. 試験方法

平成 25 年から 30 年にかけて 31 本のクロマツを対象に土壌硬度試験、引き倒し試験、根系分布調査を行った。

(1) **土壌硬度測定試験** クロマツの鉛直根の深さ方向の侵入に土壌硬度が関係していると考えられるため、SH 型貫入試験機を用いた土壌硬度測定試験を行った。測定地点は対象木の根元中心部から東西南北方向に 1.5m 離れた 4 地点とした。土壌硬度は Nd/drop 値（試験機先端のコーンを 100mm 貫入させるのに必要な 5kg の重りの打撃回数）によって表した。DBH 11~28cm の 11 本のクロマツを対象に試験を行った。

(2) **引き倒し試験** 津波に対するクロマツの抵抗力を明らかにするためクロマツの引き倒し試験を行い、最大抵抗モーメントを測定した。この試験では、引き倒す調査木と反力を確保するための 3 本の支持木を使い、調査木を陸側に倒せるようにワイヤーロープをセットし、牽引機で引き倒し荷重を載荷して引き倒した。ワイヤーロープは調査木の地際から 1.0m の高さに取り付けた。引き倒し試験の対象としたクロマツは DBH 11~27cm の 23 本である。

(3) **根系分布調査** クロマツ根系の分布状態を明らかにするために根系分布調査を行った。この調査は土壌硬度試験と引き倒し試験の両方の試験を実施した 11 本のクロマツを対象に、それぞれの試験後、根系全体を掘り起こしてから実験室に持ち帰り、天井から滑車で根系全体を吊るし、地表面から深さ 10cm ごとに水平根と鉛直根の直径と長さを測定して、深さ 10cm ごとの根系材積を算出した。なお、根株中心から水平方向を 0°、鉛直下方を 90° として、60~90° の方向に生育する根を鉛直根、それ以外の根を水平根とした。測定時の観察では水平根と鉛直根は比較的明瞭に区分でき、斜出根はほとんど生育していなかった。

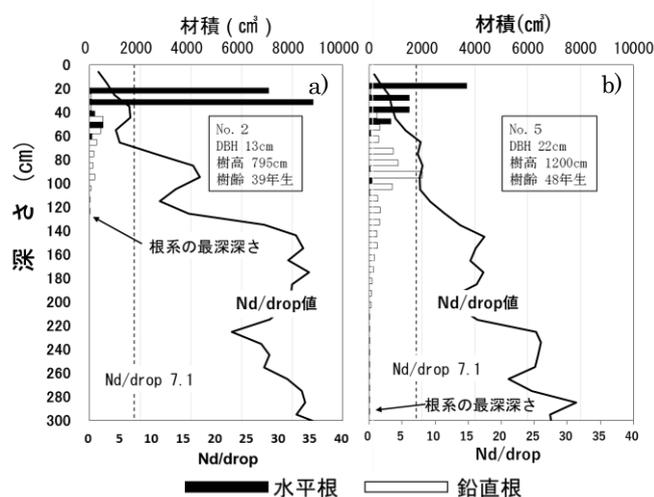
III 試験結果

1. 土壌硬度 Nd/drop 値と根系分布の関係

図-1 a) と b) には東西南北 4 地点で測定した Nd/drop 値の平均値と、地表面から深さ 10cm ごとに測定した根系材積との関係を表した。a) は 39 年生、DBH13cm、b) は 48 年生、DBH22cm のクロマツを調査対象とした。両者とも水平根は地表から深さ 40cm 程度までに集中的に生育

していた。土壌硬度は深くなるにしたがって高くなり、鉛直根はこれに対応して材積が減少する傾向がみられたが、一般的に根系の進入限界とされる Nd/drop 値 7.1 を超えても (d)、a) の調査木では深さ 130cm まで、b) では深さ 290cm まで生育していた。そのため、図-2 に根系最深深さにおける土壌硬度と根系最深深さの関係を表した。この図をみると土壌硬度が低くても深くまで侵入しないクロマツもあれば、Nd/drop 値 30 を越しても侵入するクロマツがあることも確認された。

また、図-1 では地上部の生育状況が異なる 2 本の調査木の根系分布と土壌硬度の関係を示した。b) の調査木の方が地上部の成長量は大きく、それに対応して根系も深いところまで侵入している傾向がみられた。このため、



a) 39 年生・DBH13cm のクロマツ b) 48 年生・DBH22cm のクロマツ

図-1. 樹齢・DBH の異なる調査木の深さ方向にみた根系材積と土壌硬度の関係

Figure 1. Relationship between root volume and soil hardness about different tree age and DBH

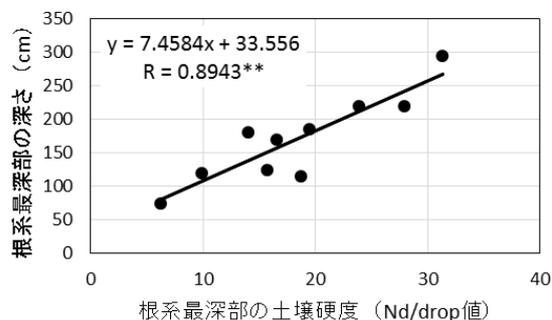
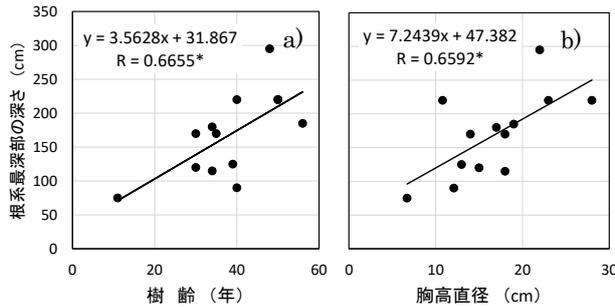


図-2. 根系の最深深さと土壌硬度の関係
** : p<0.01 で有意を示した。

Figure 2 Relationship between maximum root depth and soil hardness



a) 根系最深深さと樹齢, b) 根系最深深さと胸高直径

図-3. 根系最深深さと樹齢及び胸高直径の関係

* : $p < 0.05$ で有意を示した。

Figure 3 Relationship between the deepest root depth and tree age, and the deepest root depth and DBH

図-3に胸高直径及び樹齢と根系最深部の深さの関係を示した。この図のように樹齢及び胸高直径と根系の最深部の深さとの間には、ともに右上がりの傾向はみられるが、これら2つの要因だけで根系最深部の深さを十分に評価することは難しいと思われた。

2. 最大抵抗モーメントと根系分布の関係

図-4にクロマツの胸高直径と最大抵抗モーメントの関係を表した。胸高直径が大きくなるほど最大抵抗モーメントは大きくなり高い相関性がみられた。図-5には根系最深部の深さと最大抵抗モーメントの関係を表した。根系最深部の深さは深いほど最大抵抗モーメントは大きくなり、高い相関性がみられた。

図-6に水平根材積と最大抵抗モーメントの関係を示した。直性回帰よりも相関係数が高い曲線回帰を当てはめたが、有意性は認められなかった。この理由として、引き倒し試験で測定される最大抵抗モーメントに影響しない水平根材積が多く存在していることが考えられる。例えば、引き倒し試験で樹幹は陸側に倒すので、陸側に向かって生育していた水平根は樹幹を受け止める形で抵抗力を発揮し、海側に向かって生育していた水平根は樹幹を引き止める形で抵抗力を発揮していたと考えられる。

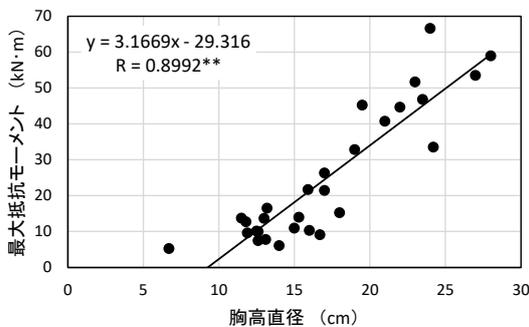


図-4. 胸高直径と最大抵抗モーメントの関係

Figure 4 DBH and maximum pull-down moment

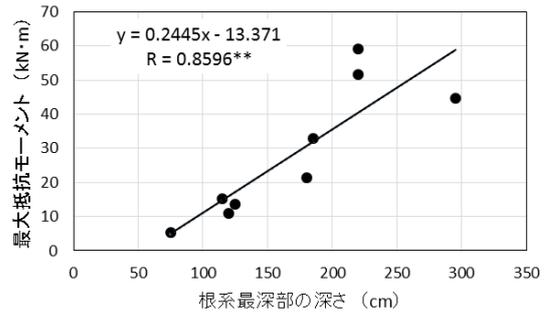


図-5. 根系最深深さと最大抵抗モーメントの関係

Figure 5 The deepest root depth and maximum pull-down moment

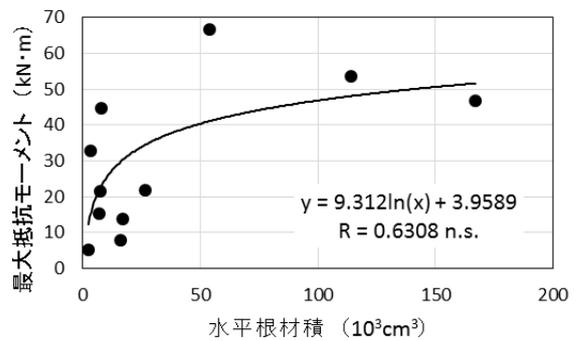


図-6. 水平根材積と最大抵抗モーメントの関係

Figure 6 Horizontal root volume and maximum pull-down moment

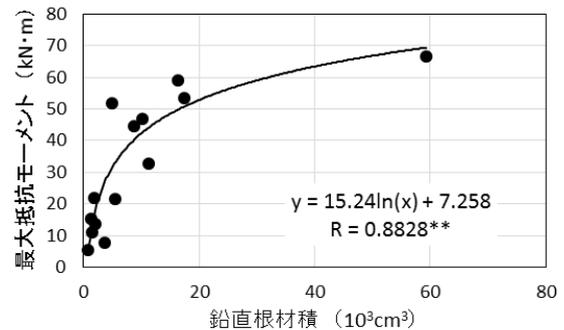


図-7. 鉛直根材積と最大抵抗モーメントの関係

Figure 7 Vertical root volume and maximum pull-down moment

しかし、それ以外の汀線とほぼ平行な方向に生育していた水平根は最大抵抗モーメントに強い影響を及ぼしていないと考えられる。こうした水平根が相関性を低下させていると推察している。

図-7に鉛直根材積と最大抵抗モーメントの関係を示した。両者は比較的高い相関性を示した。この図によると、鉛直根材積が約 20,000cm³ までの増加に対応して最

大抵抗モーメントも急激に上昇しているが、それ以上に鉛直根材積が増えても最大抵抗モーメントの上昇幅は緩やかになった。このことはクロマツが成長する初期段階に発達する鉛直根が根返りに抵抗する重要な効果を発揮していて、その後の鉛直根の本数の増加や肥大成長に伴う材積の増加によっても効果的な増加は期待できるが、鉛直根発達の初期段階よりも効果は小さくなるものと推察している。

IV 考察

1. 土壌硬度と根系最深深さの関係

湘南海岸の地盤は、粘土分が極めて少なく、ほとんど砂粒子で構成されているため、土粒子間の空隙が大きく、透水性と通気性に優れていると考えられる。図-1で示したように、深さ 1.0m くらいから土壌硬度は植物の根の伸長が困難とされる $Nd/drop$ 値 7.1 を越える状態にあるが、 $Nd/drop$ 値が約 30 になってもクロマツの根系は砂粒子間の空隙に伸長し生育していると考えられる。これまで言われてきた根系の成長限界値である $Nd/drop$ 値 7.1 は、粘土やシルトなどの微細な土粒子も含まれた土壌を対象とした数値であると推察している。

2. 根系の最大抵抗モーメントに関する考察

最大抵抗モーメントは鉛直根材積および根系最深深さとの相関性が高かったが、図-4 に示したように胸高直径とも高い相関性を示した。この理由を以下のように考えている。根株周辺には多くの太い水平根が集中して生育しているため、津波の力が作用したときには図-8 のように根鉢を形成して根返りを起こすと考えられる。その際、根鉢の陸側の端が支点となり、海側の端が持ち上がるように倒れはじめる。この根鉢の動きに対して、海側方向に向かって生育する水平根は根鉢が浮き上がらないように、また鉛直根も根鉢が浮き上がろうとすると地盤との間に周面摩擦力が生じて根返りを防ぐ働きをする。加えて、太い陸側水平根がより長く成長すると根鉢の半径が大きくなるので、樹幹と支点間の距離が増して根返りを起こすためにはより大きな津波の力が必要になる。また、鉛直根と支点間の距離が長くなれば、鉛直根による根返りを防ぐモーメントも大きくなり、根返りにくくなると推察している。

このように、鉛直根だけではなく根鉢の大きさに関係する水平根も引き倒し抵抗モーメントを大きくする重要な役割を果たしていて、根鉢の大きさや総根系材積量と相関性があると考えられる胸高直径も最大抵抗モーメントと比較的良好な相関性を示したと考えている。

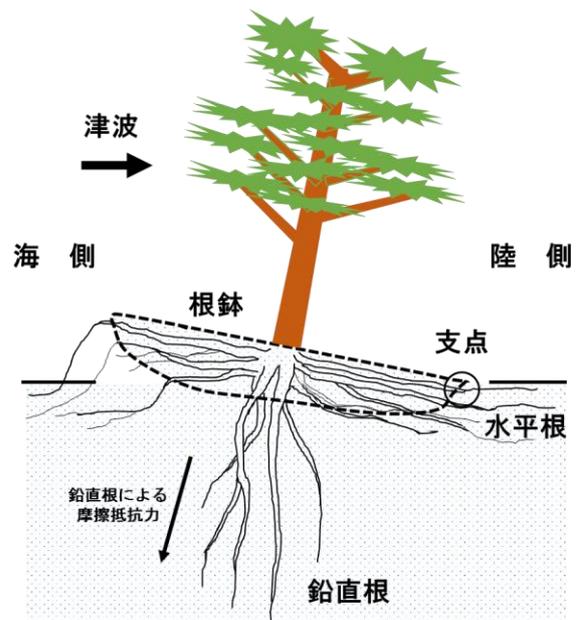


図-8. 津波による根返りの状況想定図

Figure 8 Diagram of a root system when the tree fell down by tsunami

V おわりに

海岸林の樹木根系が果たす役割は未解明の課題が多く、津波減衰機能については鉛直根、水平根それぞれの役割を明らかにしたうえでさらに検討を続けたいと考えている。

謝辞

本研究は H25～H30 年度、日本大学生物資源科学部森林資源科学科環境保全学研究室の多くの学生諸子に調査・解析等でご協力頂いた。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- (1) 浅野敏之・寺本行芳(2013)海岸林が有する津波減衰能力の定量的評価. 鹿児島大学研究報告, 土木分野 No. 9
- (2) 大野亮一(2011)被災した海岸林の特徴. 津波と海岸林に関する調査研究事業(平成 22 年度調査報告書): 71-92
- (3) 小野賢二・今矢明宏・高梨清美・坂本知己(2016)海岸林生育基盤における盛土の現状. 森林総合研究所研究報告書 15: 65-78
- (4) 表土層調査技術研究会(2007)SH 型貫入試験綱:20-22