

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

野口宏典^{1*}・鈴木覚¹・南光一樹¹・竹内由香里²
金子智紀³・新田響平³・渡部公一⁴・坂本知己^{1,5}

Evaluation of lodging resistance characteristics of broad-leaved tree and *Pinus thunbergii* planted in coastal sand dunes using tree-pulling experiments

Hironori Noguchi¹, Satoru Suzuki¹, Kazuki Nanko¹, Yukari Takeuchi²,
Tomonori Kaneko³, Kyouhei Nitta³, Koichi Watanabe⁴ and Tomoki Sakamoto⁵

Abstract: Many trees of coastal forests in East Japan were damaged by the Great East Japan tsunami. Since then, the restoration of coastal forests damaged by the tsunami has been in progress. Therefore, the evaluation of the lodging resistance characteristics of the trees of coastal forests is strongly required, but these characteristics have been insufficiently studied for broad-leaf tree species. We conducted tree-pulling experiments on *Pinus thunbergii* and the following broad-leaved tree species of coastal forests: *Acer mono* var. *glabrum*, *Machilus thunbergii*, *Quercus crispula*, *Quercus dentata*, and *Zelkova serrata*. The diameter at breast height (*dbh*) of the experimental trees ranged from 5 to 15 cm. For each tree species, the critical turning moment at which tree was uprooted increased with the increasing tree size characteristics such as *dbh*, squared *dbh* × tree height (*dbh*²*h*), and weight of above ground parts of tree (*w*). The critical turning moment of each tree species was well approximated by the functions of *dbh*, *dbh*²*h*, and *w*. The critical turning moment of *Z. serrata* was the largest and that of *M. thunbergii* and *P. thunbergii* were the smallest among the six tree species studied.

1 はじめに

陸地に遡上する津波に対して、海岸林は津波を弱めたり、漂流物を捕捉したりすることにより、津波による建造物や土地への被害を減らす効果を果たす。しかし、その一方で、海岸林自体が津波から被害を受けることもある。東日本大震災の際にも、海岸林が津波に対して減災効果を果たしたと見られる事例があった一方で（例えば、岡田ら、2012）、海岸林の樹木が津波の力によって被害を受けた事例も多数あった（例えば、佐藤ら、2012；渡部ら、2014）。

東日本大震災の後、被災地や近い将来の津波の襲

来が懸念される地域では、海岸林の造成や整備が進められている。それらの海岸林に対しては、津波被害を軽減する効果が期待され、被害軽減効果を評価することが求められている。また、前述のように、海岸林自体が津波を受けて被害を受けることから、海岸林の津波力に対する耐性についての評価も求められる。

津波力に対する海岸林樹木の耐性に関する研究はこれまでにも行われてきており、それらは、津波の被害を受けた海岸林を対象とした「被害地調査」と、樹木を引き倒して力学的な解析をする「引き倒し試験」の2つに大別することができる。被害地調査の例としては、過去のいくつかの津波被害事例をもとにして、樹木の胸高直径と津波高から被害の有無と形態について区分を行った首藤（1985）や、東日本大震災で被害を受けた海岸林を調査し、胸高直径と被害の関係を調べた Tanaka *et al.*（2013）等がある。引き倒し試験の例には、日本の海岸林を代表する樹種であるクロマツを対象とした今井・鈴木（2005）や近藤ら（2006）のものや、クロマツに加えて海岸砂丘地に植栽された広葉樹3種（カスミザクラ、イタヤカエデ、カシワ）を対象とした小野・石川（2012）等があり、それぞれ、倒伏が発生する限界回転モーメントと胸高直径の関係を検討している。

日本の海岸林では数十年来、クロマツへのマツ材線虫病の被害が大きな問題となっている。この対策の一つとして海岸林への広葉樹の導入が検討・実行されるようになってきており、広葉樹の導入は東日本大震災後に行われている海岸林の造成・整備においても重要な検討事項だと考えられる。こうした状況の中で、海岸林への導入が期待できる広葉樹の倒

¹（独）森林総合研究所, Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 Japan

²（独）森林総合研究所十日町試験地, Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute, Tatsuotsu, Tohkamachi, Niigata, 948-0013 Japan

³ 秋田県林業研究研修センター, Akita Forestry Research and Training Center, 47-2, Idojiridai, Kawabe-toshima, Akita, 019-2611 Japan

⁴ 山形県森林研究研修センター, Yamagata Prefectural Forest Research and Instruction Center, 2707 Hei, Sagae, Sagae, Yamagata, 991-0041 Japan

⁵ 現所属:（独）森林総合研究所東北支所, Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, 92-25 Nabeyashiki, Shimokuriyagawa, Morioka, Iwate, 020-0123 Japan

*Corresponding author: noguh@ffpri.affrc.go.jp

伏への耐性を評価することは非常に重要なことだが、これについての研究は、前述の小野・石川（2012）が見られる程度で数が限られている。そこで本研究では、海岸林に導入が検討される広葉樹の倒伏耐性を評価することを目的にした。

倒伏耐性を調べるための手法には、前述のように、被害地調査と引き倒し試験がある。被害地調査には、多くのデータを得られるという利点があるが、力学的な検討を行う際には、樹木が受けた力に関して多くの推定が含まれてしまうという欠点もある。これに対して、引き倒し試験には、多くのデータを得るためには多大な労力が必要となるが、力学的な検討を詳細に行うことが出来るという利点がある。

本研究では、力学的な検討を詳細に行うために引き倒し試験を採用することとし、海岸林への導入が見込まれる広葉樹5種（エゾイタヤ (*Acer mono* var. *glabrum*), タブノキ (*Machilus thunbergii*), ミズナラ (*Quercus crispula*), カシワ (*Quercus dentata*), ケヤキ (*Zelkova serrata*)), および、広葉樹との比較のために日本の海岸林の代表的な樹種であるクロマツ (*Pinus thunbergii*) を対象として、樹木の倒伏耐性と樹木サイズの関係性を調べた。

2 方法

2.1 対象とした樹種と試験地

広葉樹5樹種（エゾイタヤ、タブノキ、ミズナラ、カシワ、ケヤキ）とクロマツの合計6樹種を対象とした。エゾイタヤ、カシワ、ケヤキ、ミズナラは、秋田県潟上市の海岸林内の試験地1 (39° 52′ 22″ N, 139° 59′ 15″ E) で、クロマツは秋田県秋田市の海岸林内の試験地2 (39° 47′ 23″ N, 140° 02′ 38″ E) で、タブノキは山形県遊佐町の海岸林内の試験地3 (39° 03′ 14″ N, 139° 52′ 36″ E) で、それぞれ引き倒し試験を行った (図1)。試験地1の広葉樹（エゾイタヤ、カシワ、ケヤキ、ミズナラ）は35～37年生、試験地2のクロマツは15年生、試験地3のタブノキは25年生であった。設定した3つの試験地はいずれも、土壌は砂丘未熟土であり（経済企画庁総合開発局, 1972a, 1973a）、表層地質は砂を主とした未固結堆積物である（経済企画庁総合開発局, 1972b, 1973b）。

エゾイタヤは樹高8.5m前後、胸高直径7～12cmの範囲の3本、カシワは樹高5～10m、胸高直径6～13cmの範囲の3本、ケヤキは樹高7～11m、胸高直径6～12cmの範囲の3本、タブノキは樹高7～10m、胸高直径7～14cmの範囲の6本、ミズナラは樹高7～11m、胸高直径9～13cmの範囲の3本、クロマツは樹高4.5m～7m、胸高直径9～14cmの4本を対象とした (図2)。形状比（樹高を胸高直径で除した値）は、全対象木の平均が82であり、樹種ごとに比較すると、クロマツが最小で58、ケヤキが最大で98であった。

2.2 立木引き倒し試験

対象樹木の幹の地上1.3mの位置にかけたソフトスリングをワイヤーに接続し、ワイヤーをチルホールによって牽引することにより、対象樹木の倒伏が発生するまで引き倒した。ワイヤーとソフトスリングの間にロードセル（LUX-B-20KN-ID、共和電業、

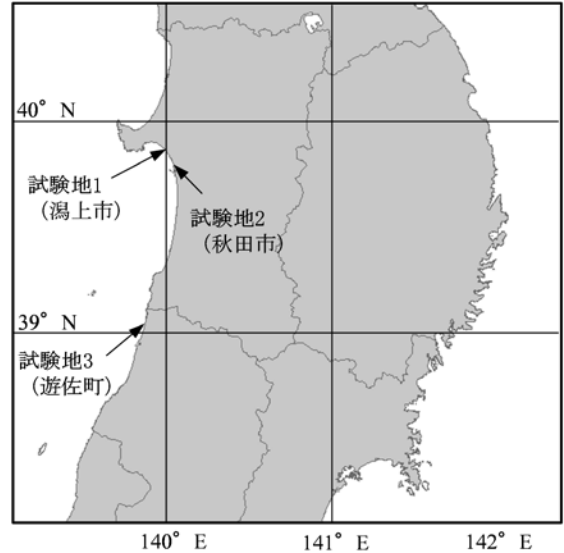


図1：試験地位置

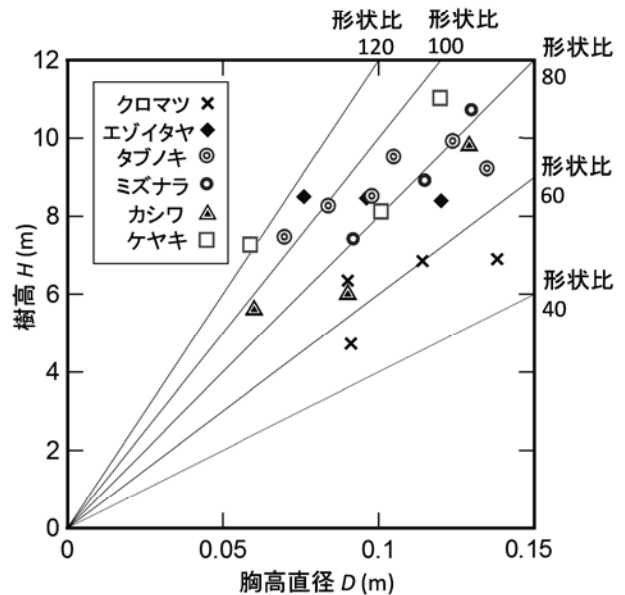


図2：対象木の樹高と胸高直径

東京)を連結し、樹木への牽引力を測定した。また、樹木を引き倒した後に樹木の高さ毎の重量を測定した。ロードセルによって測定した牽引力と樹木の高さ毎の重量等から、Nicoll *et al.* (2005)と同様に、牽引力により樹木の倒伏発生箇所（根返りの場合は根元、幹折れの場合は幹折れ箇所）にかかる回転モーメント M_{PULLED} (N m) (式 (1)) と樹木の重量により樹木の倒伏発生箇所にかかる回転モーメント $M_{GRAVITY}$ (N m) (式 (2)) を計算し、その和を樹木の倒伏発生箇所にかかる回転モーメント M (N m) (式 (3)) とした (図3)。

$$M_{PULLED} = F(H_{PULLED} - H_C) \cos(\beta - \alpha) \quad (1)$$

$$M_{GRAVITY} = g \sin \beta \int_0^{H-H_C} z W(z) dz \quad (2)$$

$$M = M_{PULLED} + M_{GRAVITY} \quad (3)$$

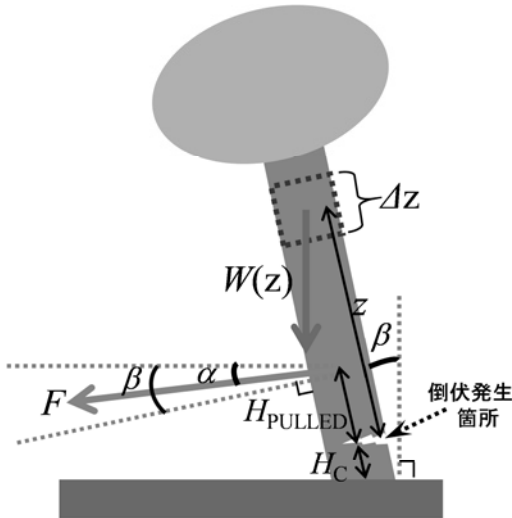


図3：限界回転モーメントの計算に用いる値の概略

ここで、 F ：チルホールによる樹木への牽引力 (N)， H_{PULLED} ：幹の牽引箇所から倒伏発生箇所までの距離 (m)， H_C ：倒伏発生箇所から根元までの距離 (m)， β ：鉛直方向と幹のなす角度 ($^\circ$)， α ：牽引方向と水平面がなす角度 ($^\circ$)， z ：倒伏発生箇所からの樹頂方向の距離 (m)， $W(z)$ ：距離 z での単位樹幹長あたりの樹木の重量 (kg)， g ：重力加速度 ($m\ s^{-2}$)， H ：樹高 (m) を表す。鉛直方向と幹のなす角度および、牽引方向と水平面がなす角度は、牽引時の様子を撮影した動画から測定した。対象木の樹幹方向 1 m 程度毎の重量とそこまでの距離 z と角度 β から高さ毎の樹体による倒伏発生箇所へのモーメントを計算し、それを樹幹方向に倒伏発生箇所から樹頂まで積算して、対象木全体の重力による倒伏発生箇所への回転モーメント $M_{GRAVITY}$ を算出した。牽引した場合にも樹幹のしなりは小さかったので、鉛直方向と幹のなす角度 β は根元付近で測定した値を用いた。

樹木への牽引力を増やしていくと、根元付近への回転モーメントも増加していくが、根返り、もしくは、幹折れが発生すると、この回転モーメントは急激に減少する。この回転モーメントの時間変化の中の急激な減少の直前に現れる最大値を樹木が根返りまたは幹折れに耐えることのできた限界値 (限界回転モーメント) と捉え、解析対象とした。

3 結果と考察

3.1 回転モーメントの時間変化

チルホールによってワイヤーを徐々に牽引することで、倒伏発生箇所にかかる回転モーメントは次第に大きくなっていき、倒伏が起こる直前に最大となり、倒伏が発生すると急激に減少した (図4)。

3.2 樹木の倒伏の形態

樹木の倒伏の形態を、地上部で幹が折れた場合は「幹折れ」、それ以外を「根返り」と2種類に分類した。それぞれの樹種の倒伏の形態は、クロマツは幹折れが1本で根返りが4本、エゾイタヤは3本すべて根返り、タブノキは6本すべて根返り、ミズナラは3本すべて根返り、カシワは幹折れが2本で根返

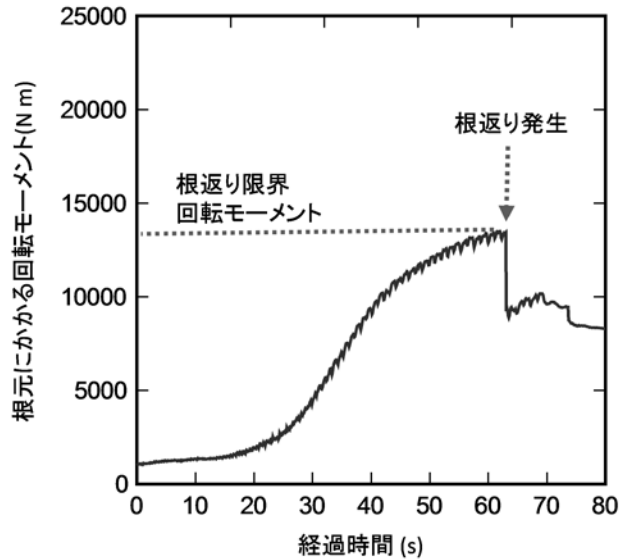


図4：根元にかかる回転モーメントの経時変化の例 (タブノキ)

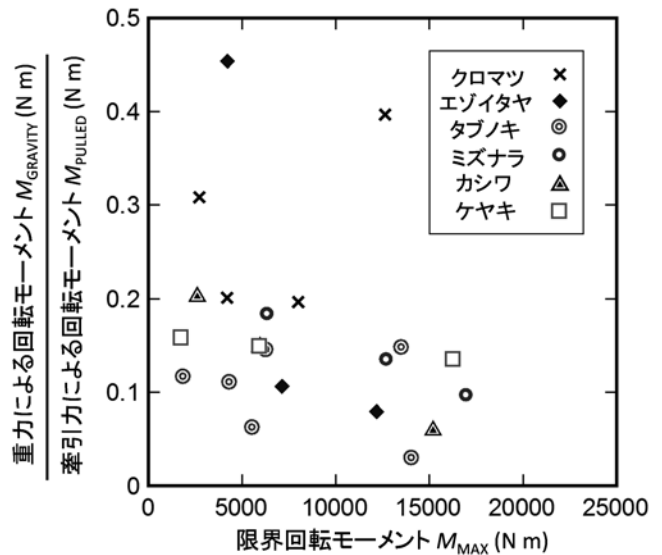


図5：根返り限界回転モーメント発生時の牽引力によるモーメントと重力によるモーメントの比率

りが1本、ケヤキは幹折れが1本で根返りが2本、であった。

3.3 重力による回転モーメントと牽引力による回転モーメントの比率

限界回転モーメント発生時の牽引力による回転モーメントに対する重力による回転モーメントの比率は、最低で0.03、最高で0.45、平均で0.16となり、0.05から0.2の間に集中的に分布した (図5)。

3.4 根返り限界回転モーメントと樹木サイズの関係

樹木の根返り限界回転モーメントは、胸高直径をはじめとした樹木のサイズとの関係を解析されることが多い。本研究では、胸高直径 D (m)、地上部の重量 W (kg)、 D の2乗に樹高 H (m) を乗じた値である D^2H 、の3つの値と根返り限界回転モーメントの関係を検討した。

胸高直径が大きくなると根返り限界回転モーメントも大きくなる傾向がそれぞれの樹種で見られた(図6). 前述の胸高直径と根返り限界回転モーメントの関係を検討した研究(今井・鈴木, 2005; 近藤ら, 2006; 小野・石川, 2012)では, 胸高直径を説明変数, 根返り限界回転モーメントを目的変数とする累乗式で回帰している. 同様の回帰を, 樹種を区別せずに根返り木すべて, および, それぞれの樹種に対して行った. なお, カシワは根返りした個体が1本のみだったため, 樹種ごとの回帰は行えなかった.

$$M_{All} = 1.74 \times 10^6 D^{2.40} \quad (R^2 = 0.7912) \quad (4)$$

$$M_{Pt} = 4.35 \times 10^6 D^{3.01} \quad (R^2 = 0.8826) \quad (5)$$

$$M_{Am} = 1.65 \times 10^6 D^{2.32} \quad (R^2 = 0.9996) \quad (6)$$

$$M_{Mt} = 6.41 \times 10^6 D^{3.02} \quad (R^2 = 0.9517) \quad (7)$$

$$M_{Qc} = 7.21 \times 10^6 D^{2.95} \quad (R^2 = 0.9945) \quad (8)$$

$$M_{Zs} = 2.61 \times 10^6 D^{2.39} \quad (9)$$

ここで, D は胸高直径(m), M_{All} , M_{Pt} , M_{Am} , M_{Mt} , M_{Qc} , M_{Zs} はそれぞれ, 根返り木すべて, クロマツ, エゾイタヤ, タブノキ, ミズナラ, ケヤキの根返り限界回転モーメント(N m)を表す. 回帰式から求めた胸高直径0.1 mでの根返り限界モーメントは, 大きい方から順に, ケヤキが 1.06×10^4 N m, ミズナラが 8.05×10^3 N m, エゾイタヤが 7.92×10^3 N m, タブノキが 6.12×10^3 N m, クロマツが 4.25×10^3 N mとなった.

地上部重量の増加に対しては, 根返り限界回転モーメントは直線的に増加する傾向がそれぞれの樹種であった(図7). 地上部重量を説明変数とし, 根返り限界回転モーメントを目的変数とする, 原点を通る1次式での回帰を, 樹種を区別せずに根返り木すべて, および, それぞれの樹種に対して行った. カシワの根返り木は1本であったため, この1本の値と原点を通る1次式を求めた.

$$M_{All} = 1.36 \times 10^2 W \quad (R^2 = 0.7665) \quad (10)$$

$$M_{Pt} = 0.98 \times 10^2 W \quad (R^2 = 0.9770) \quad (11)$$

$$M_{Am} = 1.56 \times 10^2 W \quad (R^2 = 0.8550) \quad (12)$$

$$M_{Mt} = 1.18 \times 10^2 W \quad (R^2 = 0.9070) \quad (13)$$

$$M_{Qc} = 1.67 \times 10^2 W \quad (R^2 = 0.9902) \quad (14)$$

$$M_{Qd} = 1.17 \times 10^2 W \quad (15)$$

$$M_{Zs} = 2.09 \times 10^2 W \quad (R^2 = 0.9990) \quad (16)$$

ここで, M_{Qd} はカシワの根返り限界回転モーメント(N m), W は樹木地上部の重量(kg)を表す. 地上部重量に対する根返り限界回転モーメントの増加率は, ケヤキが最も大きく, 次いで, ミズナラ, エゾ

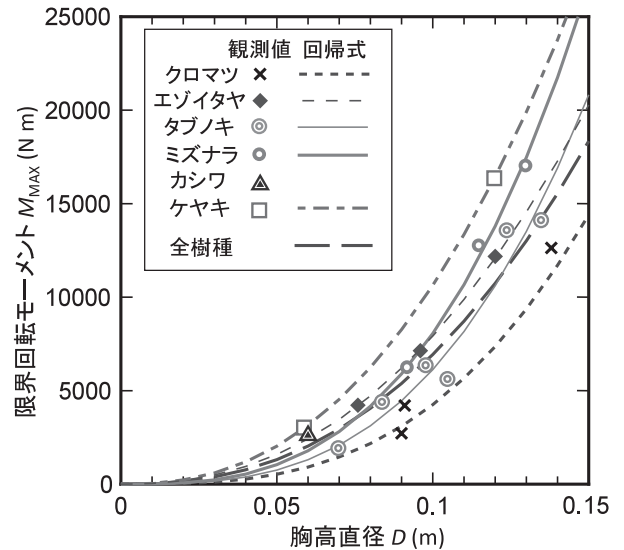


図6: 根返り限界回転モーメントと胸高直径の関係

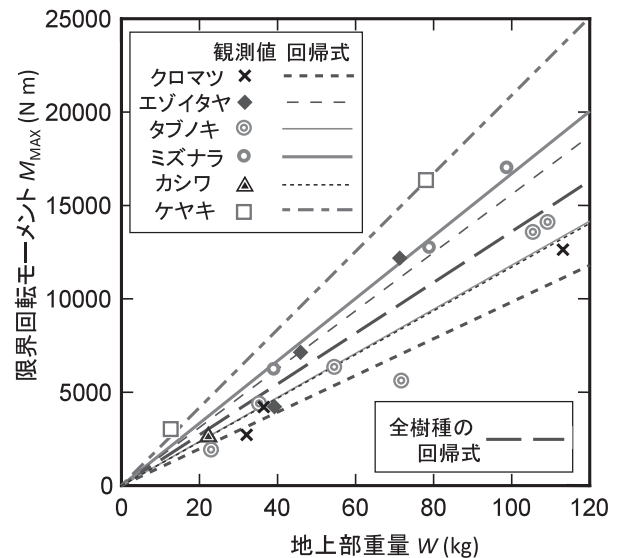


図7: 根返り限界回転モーメントと地上部重量の関係

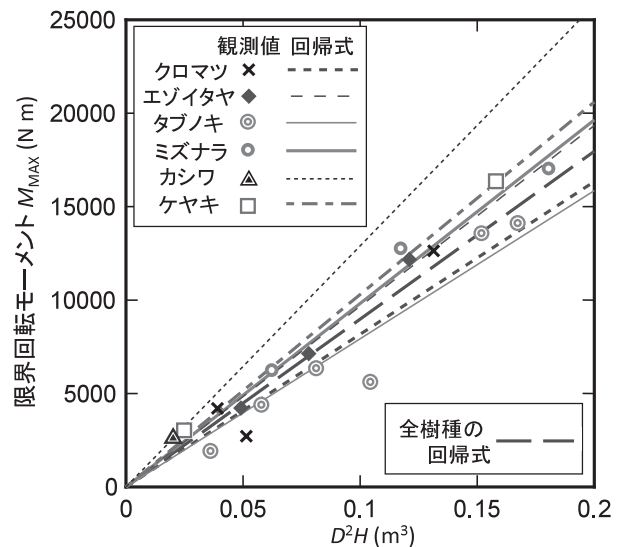


図8: 根返り限界回転モーメントと D^2H の関係

イタヤとなり、次いで、タブノキとカシワが同等で、クロマツが最も小さかった。ケヤキの重量に対する根返り限界回転モーメントの増加率は、クロマツの値の2倍以上であった。

D^2H の増加に対しては、根返り限界回転モーメントは直線的に増加する傾向がそれぞれの樹種で見られた(図8)。 D^2H を説明変数とし、根返り限界回転モーメントを目的変数とする、原点を通る1次式での回帰を、樹種を区別せずに根返り木すべて、および、それぞれの樹種に対して行った。カシワの根返り木は1本であったため、この1本の値と原点を通る直線を求めた。

$$M_{All} = 8.98 \times 10^4 D^2H \quad (R^2 = 0.9143) \quad (17)$$

$$M_{Pt} = 8.17 \times 10^4 D^2H \quad (R^2 = 0.8948) \quad (18)$$

$$M_{Am} = 9.67 \times 10^4 D^2H \quad (R^2 = 0.9791) \quad (19)$$

$$M_{Mt} = 7.93 \times 10^4 D^2H \quad (R^2 = 0.9103) \quad (20)$$

$$M_{Qc} = 9.82 \times 10^4 D^2H \quad (R^2 = 0.9672) \quad (21)$$

$$M_{Qd} = 12.9 \times 10^4 D^2H \quad (22)$$

$$M_{Zs} = 10.3 \times 10^4 D^2H \quad (R^2 = 0.9984) \quad (23)$$

ここで、 D は胸高直径(m)、 H は樹高(m)を表す。 D^2H に対する根返り限界回転モーメントの増加率は、カシワの値が最も大きく、次いで、ケヤキ、ミズナラ、エゾイタヤとなり、タブノキとクロマツが同等で最も小さかった。この大小関係は、幹折れ木を含めても変わらなかった。 D^2H の増加に対する根返り限界モーメントの増加率は、カシワを除いて最大であったケヤキの値は、最小であったタブノキの値の1.3倍程度であり、樹種間の差は、地上部重量を説明変数とした場合よりも D^2H を説明変数とした場合の方が小さかった。

胸高直径、地上部重量、 D^2H のそれぞれの値と根返り限界回転モーメントの関係を検討した結果を、樹種間の大小関係と比較すると、いずれの値を説明変数とした場合でも、根返り限界回転モーメントは、ケヤキが大きく、タブノキとクロマツが小さく、ミズナラ、エゾイタヤはその間に入るという結果になった。しかしながら、例えば、回帰式の係数をクロマツとタブノキとで比較すると、胸高直径を説明変数とした場合にはタブノキはクロマツの1.5倍程度、地上部重量を説明変数とした場合にはタブノキはクロマツの1.2倍程度、 D^2H を説明変数とした場合にはタブノキはクロマツと同程度となり、タブノキとクロマツの関係性には説明変数によって違いが見られる。このことは、クロマツに比べてタブノキの方が形状比が大きいことなどから、胸高直径が同程度でもタブノキの方が地上部重量や D^2H が大きい傾向があったためだと考えられる。

荏住(2010)は、一般に広葉樹は針葉樹よりも支持力(根返り耐性)が大きいものとしており、その理由について、針葉樹は根系分布が疎らで抜根時の根系と土壌との摩擦抵抗が小さいために抜根時の根

鉢が小さくなることと、根系の剪断力が小さいことだとしている。本研究では根系に関する調査を行っていないが、針葉樹であるクロマツの限界回転モーメントは、広葉樹に比べると小さめであり、荏住(2010)が論じた広葉樹と針葉樹の支持力の大小関係と合致していた。

胸高直径と D^2H は測定が容易であるが、地上部重量は測定には立木を伐倒することが必要となり、労力が大きい。この3つの値と根返り限界回転モーメントについて検討したが、測定に労力を要する地上部重量を説明変数とした場合の回帰式と観測値が特によく合うということにはなかった。樹種の区別をせずに根返り木すべてを対象として、それぞれの説明変数によって根返り回転モーメントを回帰した結果を比較すると、 D^2H を説明変数に用いた場合が最も決定係数が大きく、良好に回帰できた。地上部重量は D^2H と同じく、胸高直径よりも、根の量との相関が高く、根返り限界回転モーメントの回帰も胸高直径よりも良好にできるものと予想していたが、決定係数は胸高直径を用いた場合と同程度であった。このことは、樹木サイズ以外にも、体積あたりの樹木重量や根の構造等に樹種による差異があり、このことが影響したためだと考えられる。

地上部の樹木サイズは根系の量と何らかの関係を持つものと考えられることから、本研究では、根返り限界回転モーメントと地上部の樹木サイズの関係について検討した。本研究では地上部の樹木サイズ以外との関係は検討していないが、根の構造、根の発達に関連して地下水位、また、根の発達や根の引き抜き抵抗力に関連して土壌特性等も、根返り限界回転モーメントに影響する要因として考えられる。そうした要因の検討も今後行われるべきだと考えている。

3.5 根返りと幹折れの比較

クロマツ、ケヤキ、カシワは、根返りしたものと幹折れしたものの両方があった。幹折れは高さ20cm程度の箇所が発生したため、幹折れ木の幹折れ限界

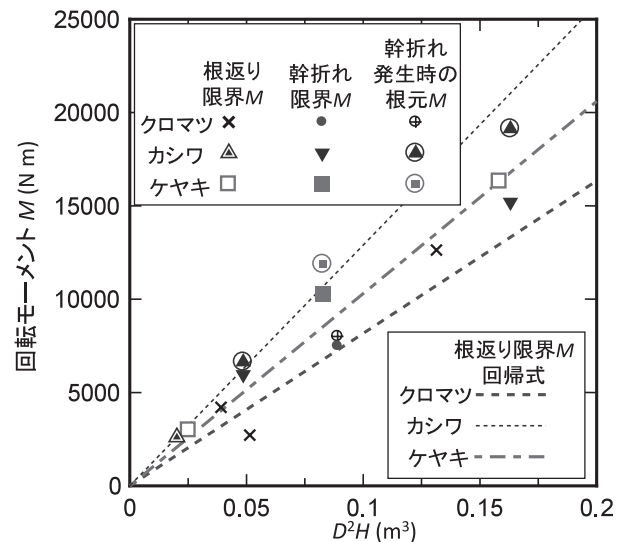


図9：根返り限界回転モーメント、幹折れ限界回転モーメント、幹折れ発生時の根元での回転モーメントと D^2H の関係

回転モーメントは、幹折れ発生時の根元での回転モーメントよりも小さかったが（図9）、根元に比べて幹折れ箇所の方が幹が細かく、幹折れ耐性が小さかったため、回転モーメントが最大ではない箇所で幹折れが発生したのだと考えられる。また、幹折れ発生時の根元での回転モーメントは、少なくともその値までは対象木が根返りに耐えられた値と考えることができ、幹折れ木の根返り限界モーメントはもっと大きい値であると考えられる。幹折れ発生時の根元の回転モーメントは、いずれも、各樹種の根返り回転モーメントの回帰式よりも大きい値となっていた。こうしたことから、幹折れ木は根返り限界モーメントが樹木サイズに対して大きめであったため、根元での回転モーメントが根返り限界回転モーメントに達するよりも先に、幹折れが発生した箇所が幹折れ限界モーメントに達して幹折れが発生したものと考

えられる。

3.6 既往の研究との比較

小野・石川（2012）と本研究との共通の樹種である、クロマツ、カシワ、エゾイタヤを対象として、小野・石川（2012）がそれぞれの樹種に対して求めた胸高直径から根返り限界回転モーメントを推定する累乗式と本研究の観測値を比較した（図10）。なお、小野・石川（2012）では樹木の重量による回転モーメントの扱いに関して明記されていないが、倒伏時の傾きが小さいため、重量による回転モーメントは牽引力によるモーメントに比べて小さく、重量による回転モーメントの影響は小さいものと考えられる。小野・石川（2012）の対象地の土壌は本研究と同じく砂質土である（経済企画庁総合開発局、1972a）。小野・石川（2012）では、胸高直径に対する根返り限界回転モーメントの大きさは、カシワが大きく、エゾイタヤとクロマツには差が見られなかった。これに対し本研究では、カシワが一番大きいことは小野・石川（2012）と同様であったが、エゾイタヤはクロマツよりも大きかった。樹種ごとに小野・石川（2012）と本研究の値を比較すると、クロマツは本研究の方がやや大きい程度であったが、カシワとエゾイタヤは本研究の方が明らかに大きかった。このことの原因として、小野・石川（2012）と本研究では対象樹木のサイズが異なり、小野・石川（2012）の対象樹木の胸高直径の範囲は、クロマツが0.14～0.4 m、エゾイタヤが0.13～0.34 m、カシワが0.12～0.24 mと、いずれの樹種も本研究よりも大きかったため、小さい樹木の方が大きいものに比べて撓りやすく、力を逃がすような形になったのではないかと推測した。

クロマツを対象とした既往の引き倒し試験の結果から得られた、胸高直径から根返り限界回転モーメントを推定する累乗式（今井・鈴木（2005）、近藤ら（2006）、小野・石川（2012））、と本研究の値を比較した（図11）。なお、近藤ら（2006）は対象木の高さ1 m程度から上部を事前に除去し、樹木重量による回転モーメントの影響を除去している。また、今井・鈴木（2005）では樹木の重量による回転モーメントの扱いに関して明記されていないが、倒伏時の傾きが小さいため、重量による回転モーメントは牽引力によるモーメントに比べて小さく、重量による回転モーメントの影響は小さいものと考えられる。今井・鈴木（2005）、近藤ら（2006）、小野・石川（2012）のいずれの対象地の対象地の土壌は本研究と同じく砂質土である。対象としたクロマツの胸高直径は、小野・石川（2012）は0.14～0.4 m、近藤ら（2006）は0.11～0.23 m、今井・鈴木（2005）は0.06～0.13 mであり、小野・石川（2012）と近藤ら（2006）は本研究よりも胸高直径の大きい範囲のクロマツを対象としている。3つの回帰式は本研究の胸高直径の範囲ではそれほど差がなく、本研究の値は、3つの回帰式から推定される値に近いものだった。

3.7 幹の曲げ強度

樹木の幹の形状が円柱であることを仮定して、幹折れ木の限界曲げモーメント M (N m) を断面係数 Z (m^3) で除することにより、幹折れ木の曲げ強度

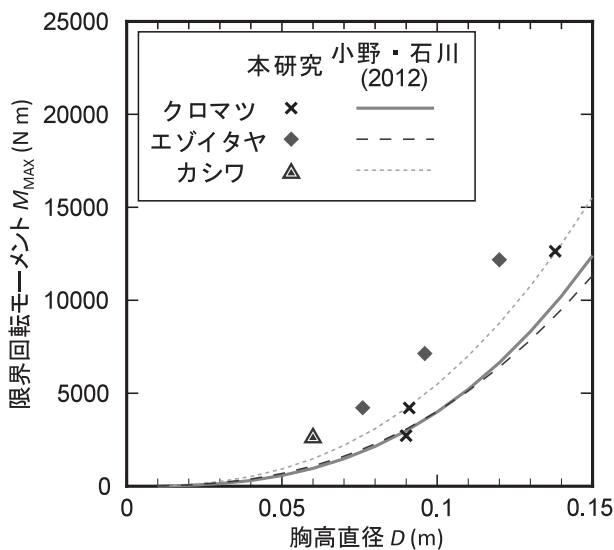


図10：本研究と小野・石川(2012)に共通する樹種の限界回転モーメントと胸高直径の関係の比較

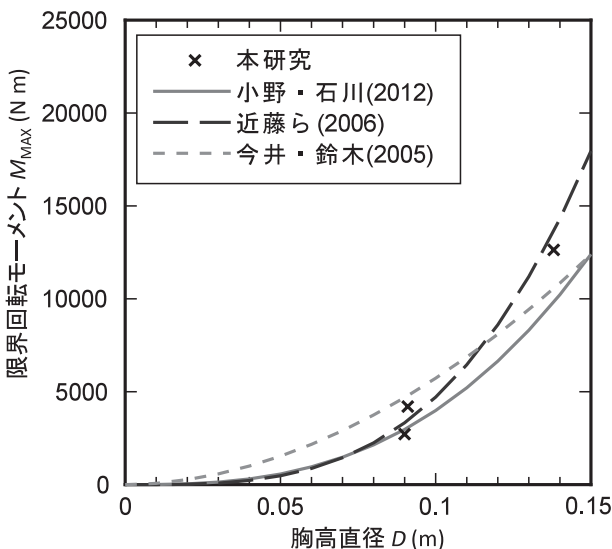


図11：既存の研究で得られた胸高直径を説明変数としたクロマツの限界回転モーメントの推定式と本研究の値の関係

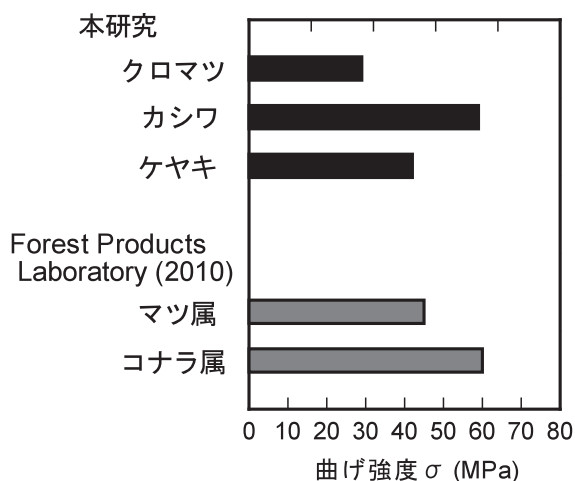


図12：本研究と既存の研究の生材の曲げ強度

σ (N m⁻² または Pa) を求めた.

$$Z = \frac{\pi D_B^3}{32} \quad (24)$$

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad (25)$$

ここで、 D_B は幹折れした箇所を幹直径 (m) を表す。なお、樹皮は曲げ強度には寄与しないものと考え、樹皮の厚みを 5 mm と仮定して、樹皮を含めて測定した幹直径から 10 mm を差し引いた値を幹直径として断面係数の算出に用いた。

幹折れ木の曲げ強度は、カシワの幹折れ木 2 本の平均が 59 MPa、クロマツの幹折れ木 1 本の値が 29 MPa、ケヤキの幹折れ木 1 本の値が 42 MPa であった (図 12)。Forest Products Laboratory (2010) によると、カシワと同じコナラ属 18 樹種の生材の曲げ強度は 60 MPa、クロマツと同じマツ属 16 種類の生材の曲げ強度は 45 MPa とされている。ケヤキの生材の曲げ強度の測定例は見当たらなかったが、森林総合研究所 (2004) によると、気乾材 (含水率 15%) の曲げ強度は、ケヤキが 100 MPa、カシワと同じコナラ属のミズナラが 100 MPa、シラカシとアカガシが 120 MPa とされていることから、ケヤキの生材の曲げ強度はカシワよりもやや小さいものと考えられる。既往の研究の曲げ強度に対して、本研究の値は、カシワとケヤキは同程度、クロマツはやや小さめであった。

本研究では幹折れ木の曲げ強度を求めたが、幹折れ木の数は少なかった。曲げ強度を検討するためには、木材に対して行われている曲げ試験を幹の生材に対しても行うことが有効だと考えられるが、生材の丸太に対するそうした研究例は少ないことから、今後、行っていく必要があると考えている。

4 おわりに

東日本大震災後に海岸林の樹木の倒伏耐性の評価の必要性が高まっているが、海岸林への導入が見込まれる広葉樹に関しては倒伏耐性の研究例が限られている。そこで、海岸砂丘地に植栽された広葉樹 5 種 (エゾイタヤ、タブノキ、ミズナラ、カシワ、ケ

ヤキ) を対象として引き倒し試験を行った。また、日本の海岸林を代表する樹種であるクロマツについても引き倒し試験を行った。その結果から、以下の知見が得られた。

(1) 各樹種の樹木の根返りが発生する限界回転モーメントは、胸高直径を説明変数とする累乗式、地上部重量を説明変数とする 1 次式、胸高直径の 2 乗 × 樹高を説明変数とする 1 次式、それぞれで概ね近似することができた。これらの式によって、各樹種の根返りに対する耐性 (限界回転モーメント) を樹木サイズから評価することが可能になった。

(2) 胸高直径、地上部重量、 D^2H を説明変数とする回帰式をもとに根返り限界回転モーメントの樹種間の大小関係を比較すると、いずれの値を説明変数とした場合でも、ケヤキが大きく、タブノキとクロマツが小さく、ミズナラ、エゾイタヤはその間に入るという結果になった。

謝辞

2 名の査読者の方からは多くの有意義な指摘をいただきました。ここに記して謝意を表します。なお本研究は、農林水産省・食品産業科学技術研究推進事業を活用して行った。

引用文献

- [1] Forest Products Laboratory (2010): Wood handbook – Wood as an engineering material-, U.S.Department of Agriculture, Forest Service, Madison, Wisconsin, 508pp.
- [2] 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体力, 水工学論文集, 49, pp.859–864.
- [3] 苅住昇 (2010): 最新樹木根系図説, 誠文堂新光社, 204pp.
- [4] 経済企画庁総合開発局 (1972a): 土地分類基本調査 (土壌分類図)「秋田県」.
- [5] 経済企画庁総合開発局 (1972b): 土地分類基本調査 (表層地質図)「秋田県」.
- [6] 経済企画庁総合開発局 (1973a): 土地分類基本調査 (土壌分類図)「山形県」.
- [7] 経済企画庁総合開発局 (1973b): 土地分類基本調査 (表層地質図)「山形県」.
- [8] 近藤観慈・小山美香・野々田稔郎・林拙郎 (2006): 海岸クロマツ林の津波を想定した外力に対する根系抵抗力, 日本森林学会大会学術講演集, 117, G03.
- [9] Nicoll, B. C., Achim, A., Mochan, S. and Gardiner, B. A. (2005): Does steep terrain influence tree stability? A field investigation, Can. J. For. Res., 35, pp.2360–2367.
- [10] 岡田穰・野口宏典・岡野通明・坂本知己 (2012): 平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波における家屋破損度からみた海岸林の評価—宮城県石巻市長浜の事例—, 海岸林学会誌, 11, 59–64.
- [11] 小野圭・石川仁 (2012): 海岸防災林の倒伏耐力に関する試験と考察, 治山研究発表会論文集 51, pp.152–157.
- [12] 佐藤創・鳥田宏行・真坂一彦・阿部友幸・野口宏典・木村公樹・坂本知己 (2012): 東北太平洋沖地震津波によるクロマツ海岸林被害に及ぼす林分構造の影響—青森県三沢市の例—, 海岸林学会誌, 11, 41–45.
- [13] 森林総合研究所 (2004): 木材工業ハンドブック, 丸善, 1221pp.
- [14] 首藤伸夫 (1985): 防潮林の津波に対する効果と限界, 海岸工学論文集, 32, pp. 465–469.

- [15] Tanaka, N., Yagisawa, J. and Yasuda, S. (2013): Breaking pattern and critical breaking condition of Japanese pine trees on coastal sand dunes in huge tsunami caused by Great East Japan Earthquake, *Natural Hazards*, 65, pp.423–442.
- [16] 渡部公一・海老名寛・古川和史・堀米英明・大築和

彦・上野満・宮下智弘・坂本知己 (2014): 2011 年東北地方太平洋沖地震津波による仙台平野の海岸林被害と地下水深度及び立木サイズとの関係, *海岸林学会誌*, 13, 7–14.

[受付 平成 26 年 8 月 14 日, 受理 平成 26 年 11 月 24 日]