簡易モデルを用いた津波に対する立木の抵抗性の評価

鳥田 宏行^{*1}・佐藤 創¹・真坂 一彦¹・阿部 友幸¹・野口 宏典²
坂本 知己²・木村 公樹³

東北地方太平洋沖地震津波の発生後、海岸林現地調査により、海岸林の被害状況が詳しく報告されてきた。本研究では、これらの現地調査の結果を力学的な見地から検証するため、青森県三沢市織笠のクロマツ海岸林を対象に簡易モデルを用いて現地の被害状況を解析すると共にモデルの有用性を検証した。その結果、立木に根返りや幹折れが発生するときの津波の限界流速が求められ、この値が小さい立木において実際に被害が発生したことが示された。特に、枝下高約 6 m 以下の立木は、被害を受けやすく相対的に限界流速が小さかった。立木の被害形態に関して予測された結果は、ほとんどが根返りを示し、現地調査の結果と定性的に一致した。形状比が限界流速に及ぼす影響については、明確な関係性がみられなかった。今回用いた簡易モデルは、各地の被害調査結果を相互に関連性をもって解析する際の一つの手段であり、これにより各地の被害状況を比較検討することが可能となると考えられる。

キーワード：限界流速、津波、根返り、幹折れ、枝下高

Hiroyuki Torita,^{*1} Hajime Sato,¹ Kazuhiko Masaka,¹ Tomoyuki Abe,¹ Hironori Noguchi,² Tomoki Sakamoto,² Koki Kimura³ (2014) Evaluation of Tsunami Resistance of Trees Using a Simple Dynamics Model. J Jpn For Soc 96: 206-211 Field experiments conducted on coastal forests after the 2011 Tohoku earthquake tsunami revealed that the tree size influenced the tree damage rate and its status (uprooting or stem breakage). In this study, to examine these results from the physical standpoint, the critical flow velocities for uprooting and stem breakage were calculated using a simple dynamics model and using field data from Misawa, Aomori Prefecture, Japan. The calculations showed that the damaged trees in the field experiments had relatively low critical flow velocities. In particular, trees with crown base heights of ≤ 6 m suggested relatively low critical flow velocities. According to the predicted status obtained using calculations, most of the trees were uprooted. This result was consistent with those of the field experiments. The influence of slenderness ratio on the critical flow velocity was not apparent. This approach can facilitate the comparisons of tree damage mechanisms in respective forests.

Key words: critical flow velocity, tsunami, uprooting, stem breakage, crown base height

I. は じ め に

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震津波により、東北から関東にかけての沿岸部を中心に甚大な被害が発生した。この津波に対し、海岸林は津波エネルギーを減衰させ（野口ら 2012）、海からの漂流物を捕捉するなど（坂本ら 2012）、程度の差は様々であるが住宅などの被害を軽減させた（小林ら 2012；岡田ら 2012）。これらの機能は、一般的には防潮機能と呼ばれ、飛砂防止機能と並んで海岸林の重要な基本的機能となっている（石川 1988）。海岸林がこの防潮機能を発揮するためには、海岸林を構成する各立木が根返りや幹折れなどの被害を受けずに残存することが重要であるが、今回の津波に対してはクロマツ海岸林自体にも被害が発生した（菊池ら 2011；田村ら 2011；星野ら 2012；寺本ら 2012；山中ら 2012）。報告によれば、ある一定範囲の直径サイズにおいては、直径が相対的に大きな個体で幹折れが多く発生している例（佐藤ら 2011；寺

本ら 2012）や根返りが多く発生する例（寺本ら 2012；山中ら 2012）など、被害形態の特徴は場所ごとに異なり、個体サイズと被害形態の関係については明確な見解が得られていない。さらに海岸林における立木の被害分布に着目してみると、林分構造等の違いにより被害の大きさに差異が生じたことが報告されているが（佐藤ら 2012；寺本ら 2012）、どのような林分において被害が大きくなるのかについては、今後、詳細な研究調査が必要とされるところである。以上のように津波の規模、林分構造、立地条件など異なる環境下においては海岸林被害の状況は様々である。しかし、結果として生じた被害の状況が異なるとしても、その背後には共通したメカニズムが存在するはずであり、そのメカニズムを定式化することで、これらの被害状況に関する差異の説明や被害の予測などが、ある程度可能となると考えられる。また、被害が発生するときの流速を一つの指標とすれば、海岸林を構成する各立木の津波に対する抵抗性も定量的に評価することができ、今後の海岸林造成

*連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: torita-hiroyuki@hro.or.jp

¹ 地方独立行政法人北海道立総合研究機構林業試験場 〒079-0198 北海道美唄市光珠内町東山 (Hokkaido Research Organization, Forestry Research Institute, Higashiyama, Koshunai, Bibai, Hokkaido 079-0198, Japan)

² 独立行政法人森林総合研究所 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 (Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan)

³ 地方独立行政法人青森県産業技術センター林業研究所 〒039-3321 青森県東津軽郡平内町大字小湊字新道 46-45 (Forestry and Forest Products Research Institute, Aomori Prefectural Industrial Technology Research Center, 46-45 Shinmichi, Kominato, Hiranai, Aomori 039-3321, Japan) (2013 年 11 月 18 日受付, 2014 年 5 月 12 日受理)

に必要な知見を提供することも可能であろう。

そこで本研究では、被害発生メカニズムを簡易モデルにより定式化し、前報（佐藤ら 2012）の林分被害調査結果を用いて簡易モデルの有用性を検証した。

II. 方 法

1. 調査地概況

青森県三沢市織笠のクロマツ海岸林において、海岸林を横断するように汀線と直交する方向に帯状の調査区（260 m×2 m）を設定し、残存林分および被害林分の状況、津波の痕跡高、地下水位等を調査した。現地調査では、東北地方太平洋沖地震津波による津波の痕跡高は最大で 8.5 m であった（佐藤ら 2012）。この痕跡高と地盤高の差が浸水深であり、実際に立木が海水に浸かった高さである。本研究では、痕跡高は一定とし最大値を用いた。林分構造の概略を、前報（佐藤ら 2012）から一部改変して図-1 に示す。

2. 簡易モデル

本モデルでは、深さ方向に速度勾配がない一様流を仮定し、浸水深 λ が枝下高 H_c より低く津波の力が幹部のみに作用する場合（ $\lambda < H_c$ ）と、浸水深 λ が枝下高 H_c より高く津波の力が幹部と樹冠部に作用する場合（ $\lambda \geq H_c$ ）に分けて検討を進める。また、立木の樹冠形状は円錐とし、幹の形状は地表から枝下高までおよび枝下高から梢までを、それぞれ円錐台、円錐と仮定した（図-2）。

円柱構造物や立木が津波に接して受ける力は、モリソン式により表すことができる（堀川 1991；酒井 2001；原田ら 2003；野口ら 2012）。

$$dF = C_D \rho \frac{|u|}{2} ds + C_M \rho \frac{\partial u}{\partial t} dV \quad (1)$$

ここで、 dF は微少部分に働く力、 u は流速、 ds は津波の進行方向の微少投影面積、 dV は微少部分の体積、 C_D は抗力係数、 C_M は慣性係数、 ρ は流体の密度を表す。(1) 式における右辺第一項は抗力を、第二項は慣性力を示しているが、津波は波浪に比べて周期が長く、短い時間で考えるとその時間内での流れの速度を持つ定常な流れによる力と

図-1. 帯状区における林分構造

図-2. 簡易モデル

左図は浸水深 λ が枝下高 H_c より低い場合（ $\lambda < H_c$ ）、右図は浸水深 λ が枝下高 H_c 以上の場合（ $\lambda \geq H_c$ ）を示す。

仮定することができ（酒井 2001）、ここでは慣性力項を省略して簡易化を図った。すなわち、立木が津波によって受ける力（ F ）は、一様流を仮定して水に沈んでいる幹部および樹冠部の投影面積を S_i とすれば、(2) 式で表すことができる。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho S_i u^2 \quad (2)$$

このとき、水面からある深さ X における曲げモーメント M_X は、浸水深が枝下高までの場合（ $\lambda < H_c$ ）と浸水深が枝下高以上の場合（ $\lambda \geq H_c$ ）に分けると以下のように表せる。

$$M_X = \begin{cases} -F_X H_{GX} & (\lambda < H_c) \\ -F_X H_{GX} - F_c (H_{GC} + X - L) & (\lambda \geq H_c) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 H_{GX} は水面から深さ X 区間の幹部の投影面積の重心位置、 H_{GC} は水面から深さ X 区間の樹冠部の投影面積の重心位置、 F_X は深さ X 区間における樹冠部以外の幹部に作用する流体力、 F_c は水中にある樹冠部に作用する流体力、 L は浸水した樹冠の長さを表す。また、この曲げモーメントにより樹幹内には曲げ応力が生じ、 X における曲げ応力 σ_X は以下のように表すことができる。

$$\sigma_X = \frac{|M_X|}{Z_X} \quad (4)$$

ここで、 Z_X は断面係数であり、深さ X における直径 D_X を用いると $\pi D_X^3 / 32$ となる。

さらに津波による流体力により、立木には根返りを引き起こす倒伏モーメント M_k が発生する。このときの倒伏モーメント M_k を、浸水深が枝下高までの場合（ $\lambda < H_c$ ）と浸水深が枝下高以上の場合（ $\lambda \geq H_c$ ）に分けると、以下のように表すことができる。

$$M_k = \begin{cases} -F_k H_G & (\lambda < H_c) \\ -F_k H_G - F_c (H_{GC} + H_c) & (\lambda \geq H_c) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 F_k は水面から地表までの樹冠部以外の幹部に

作用する流体力, H_0 は水面から地表までの樹冠部以外の幹部の投影面積の重心位置を表す。本簡易モデルでは, 計算に必要な抗力係数 C_D の値は, 幹が 0.85, 枝が 0.81, 葉が 0.056 である (野口ら 2012)。強風に対しては, 実際の立木を対象に野外観測した結果では, 投影面積を風速に対して一定とすると, 風速の増加に対して抗力係数は減少することが知られている (Koizumi *et al.* 2010)。しかし, 津波においては, この点における知見が少ないため, 本モデルにおいては, 流速が増加しても抗力係数は一定と仮定した。したがって, 抗力係数が流速に対して顕著に減少する場合は, 本モデルによる限界流速は過小評価となる可能性があり, 今後の研究の進展を待ち, 改良すべき点である。

(2) 式より求められる樹冠部が受ける流体力の算出については, 投影面積と枝下直径の関係式 (野口ら 2012) により 1 本当りの枝および葉の投影面積を求め, 枝張り W を用いてこれらの投影面積を配分した。枝下直径および枝張りについては, すべての立木に対して直接測定することが望ましいが, 本研究ではすべての立木について測定を行っていない。そこで, 枝下直径については, 樹冠長, 樹高および胸高直径の関係式を用いて推定し (Sumida *et al.* 2009), 枝張りについては, 現地で測定した 10 本の立木について, 胸高直径 D (m) と枝張り W (m) の関係式 ($W = 19.4D - 0.3$ $r = 0.78$ ($P < 0.01$)) を求めて推定した。

被害形態の判別と立木に被害が発生するときの限界流速は, 倒伏モーメント M_A , 樹幹内の曲げ応力 σ , 根系の根返り抵抗モーメント R , 曲げ強さ MOR (modulus of rupture) の値を比較検討することで推定することができる。すなわち, 流速をゼロから徐々に増加させて $M_A > R$ かつ $\sigma < MOR$ ならば根返りが発生, $M_A < R$ かつ $\sigma > MOR$ ならば幹折れが発生, $M_A > R$ かつ $\sigma > MOR$ ならば根返りと幹折れが同時に発生すると推定される。この被害が発生するときの流速が限界流速であり, 立木の津波に対する抵抗性を示している。流速は 0.1 m/s ずつ増加させて計算した。

3. 根返り抵抗モーメント R と曲げ強さ MOR

根系による根返り抵抗モーメントは, これまで様々な樹種およびサイズにおいて, 立木の引き倒し試験を実施することにより求められてきた (Fredericksen *et al.* 1993; Peltola *et al.* 2000; Nicoll *et al.* 2005; Nicoll *et al.* 2006; 鳥田 2009; 鳥田ら 2010; Urata *et al.* 2012)。本研究においても, 根返り抵抗モーメントは引き倒し試験により実験的に求めた。引き倒し試験を実施した場所は, 現調査地に隣接した被害が軽微なクロマツ海岸林で行った。試験木のサイズは胸高直径 6~13 cm, 樹高 6~8 m の合計 8 本である。幹折れ被害の解析に関して, 必要な情報である MOR は, ヤング率 E を測定し, 以下の式から算出した (澤田 1983)。

$$MOR = 5.3 \times 10^{-3} \times E \quad (6)$$

ヤング率は, 引き倒し試験を実施した場所において, 胸高直径 10~20 cm のクロマツ立木 5 本に対して非破壊試験 (小泉 1987) により測定した。

III. 結 果

現地調査結果では, 無被害木が 98 本, 被害木が 65 本であった。被害木のうち, 根返り木 (傾きを含む) は 56 本, 幹折れは 9 本で, 幹折れした立木の折損高は, 地上高 0~1 m において 8 本, 3.5 m が 1 本である。

1. 根返り抵抗モーメントおよび曲げ強さ

根返り抵抗モーメント R (kNm) と胸高直径の累乗あるいは材積指標との間には, 相関関係があることが報告されている (例えば, 深見ら 2011; 森岡 1983; Peltola *et al.* 2000)。本研究では, 根返り抵抗モーメント R (kNm) との相関が高かった材積指標 D^2H (m³) との関係式を用いた (Peltola *et al.* 2000)。

$$R = 67.2 D^2 H \quad (r = 0.98) \quad (7)$$

ここで, D は胸高直径を H は樹高を表す。

ヤング率 E を測定した結果, その平均値は 9.5 ± 1.5 GPa であった。よって, ここでは平均値を用いて (6) 式から求められた曲げ強さは, 約 50 MPa となった。

2. 限界流速

根返りおよび幹折れ発生時の流速を比較して, その値が低い方を限界流速として以下では記載する。汀線からの距離に対する限界流速の分布と汀線から 10 m 区間ごとの本数被害率を示す (図-3)。限界流速は, 今回の調査地における津波の高さ 8.5 m に対する各立木の津波に対する抵抗性を示しており, この値が大きいほど抵抗性が高いと考えられる。汀線からの距離 110~160 m 区間では, 相対的に限界流速の値が小さく, これ以降は距離 240 m 前後の区間で一度低下するものの, 徐々に限界流速の値が大きくなって行く傾向があった。この結果を現地調査の結果と比べてみると, 汀線からの距離 120~160 m 区間は被害が集中しており, 限界流速の値が小さいところで実際に被害が集中している結果となった。ただし, 林縁 110 m 付近は, 計算上は限界流速が小さいにもかかわらず実際の調査では被害が発生していなかった。汀線から 10 m 区間ごとの平均限界流速と本数被害率を求め, 本数被害率が 100% と

図-3. 立木の限界流速

なった区間から本数被害率が0%となった区間（汀線からの距離130～220 m区間）において、平均限界流速と本数被害率の関係を調べてみると、両者の間には有意な負の相関が認められた（図-4）。

被害形態は、根返り（傾きを含む）、幹折れ、根返り幹折れ同時の三つに分類される。計算の結果では、被害形態としては根返りが74%、幹折れが17%、根返り幹折れ同時が9%となり、根返りが大勢となった。現地調査（佐藤ら2012）においても、根返り被害は被害木全体の86%であり、根返り被害が大勢を占めた傾向は一致した。また、幹折れ発生時の樹幹内応力の分布を調べてみると、立木のほとんどが根元付近で応力が最大になっており、幹折れ被害が発生するのは根元付近の部位であると推定された。図-5に、樹高7.6 m、枝下高4.7 m、胸高直径7.4 cmの立木の計算例を示す。

3. 枝下高および形状比

直径サイズは、立木の津波に対する抵抗性に影響するこ

図-4. 本数被害率と平均限界流速の関係

汀線から130～220 m区間における10 mごとの本数被害率と平均限界流速を示す。

図-5. 樹幹内応力の垂直分布

樹高7.6 m、枝下高4.7 m、胸高直径7.4 cmの立木の計算例を示す。

とが、(4)式および(7)式から理論的に推測される。一方、枝下高が立木の津波抵抗性に与える影響は、モデル式から理論的に直接評価することはできないため、限界流速と枝下高の関係を図-6(a)に示した。これによると林縁部を除けば、被害立木は、枝下高約6 m以下の立木において多く、限界流速も相対的に小さいことが示され、枝下高は立木の津波に対する抵抗性に影響する一つの因子であることが示唆された（図-6(a)）。さらに枝下高と浸水深の関係を調べるため、浸水深が枝下高よりも高くなる（立木の樹冠に津波が達した： $\lambda \geq H_c$ ）場合と、低くなる場合（立木の樹冠に津波は達しない： $\lambda < H_c$ ）について、限界流速を区別しその分布を調べると、樹冠部にも津波が達した立木は、被害が発生した区間付近に集中し、限界流速も小さく抵抗性が低くなることが示された（図-6(b)）。そこで、浸水深が立木の抵抗性に与える影響を調べるため、樹高7.8 m、枝下高5.2 m、胸高直径11.5 cmの立木を例に、浸水深を変化させて限界流速を求めた。これによると、浸水深が増加すると限界流速は減少するが、浸水深が枝下高を超えると限界流速の減少がより大きくなり、立木の津波に対する抵抗性をより低下させる結果となった（図-7）。

森林における風雪害では、形状比が大きくなると被害を受けやすくなる傾向が示される場合もあるが（e.g., Cremer *et al.* 1982）、今回の解析結果では、形状比に関係なく限界流速が小さな立木に被害が集中した（図-8）。現地調査の結果では、被害発生の有無は形状比よりも枝下高が強く影響していた。

図-6. 枝下高と限界流速の関係

図-7. 浸水深と限界流速の関係

樹高 7.8 m, 枝下高 5.2 m, 胸高直径 11.5 cm の立木の計算例を示す。

図-8. 形状比と限界流速の関係

IV. 考 察

林縁部の立木では、樹冠部は完全に水中にあり限界流速が小さいにもかかわらず実際の調査では被害が発生していなかった。原因としては、津波時は深さ方向に速度勾配が生じ、地面近くでは津波の速度が小さく林縁部の立木は被害を免れた可能性や、林縁部の立木の幹の剛性が影響した可能性等が考えられる。林縁部の立木は、もともと風衝形をなしており、また幹のヤング係数が測定結果よりも小さく、津波を受けたときに幹が変形して、津波による外力を受けにくくなったのではないかと推察される。カラマツなどの調査結果では、間伐などを行って肥大成長を促すと年輪幅が大きくなるが、晩材幅や晩材密度の値が大きくなるため年輪密度の低下はみられず、無間伐区に比べて間伐区は動的ヤング係数が大きいことが報告されている(安久津ら 2012)。本調査地の林縁部では肥大成長が不良で、胸高直径は平均 5.2 cm であった。このため、ヤング係数の値を上昇させるのに重要な晩材の形成等が不十分であり、ヤング係数の値が測定結果よりも小さく変形しやすかった可

能性がある。林縁木が被害を受けなかった理由を解明するには、今後、詳細な調査を行う必要がある。

林縁部の立木を除けば、限界流速が小さい立木において、実際に被害が発生しており、本モデルによる解析は、津波に対する海岸林の抵抗性を評価していると考えられる。また、被害形態に関しては、方法で示したように、根返り抵抗力、樹幹内応力、曲げ強さなどを定量的に解析し、それぞれの値を被害発生メカニズムを考慮して比較することで判断した。その結果、根返り立木が大勢を占める結果を得たが、この点については現地調査の結果に一致しており、本モデルは被害形態について考察手段の一つとなりうると考えられる。根返り被害が体勢を占めたことは、幹折れに対する耐力が根返りに対する耐力よりも大きかったことを意味するが、立木のヤング係数がもっと小さな樹種等であれば、幹折れ木が増加するものと考えられる。

現地調査による被害形態については、ある一定範囲の直径サイズにおいては、直径が相対的に大きな個体で幹折れが多く発生している例(寺本ら 2012; 佐藤ら 2011)や根返りが多く発生する例(寺本ら 2012; 山中ら 2012)など、直径と被害形態との関係は不明である。しかし、本簡易モデルで検討したように、幹折れするか、根返りするかは、幹と根系の抵抗性を定量的に解析して相対的に比較することにより説明が可能である。

立木の津波に対する抵抗性と形状比については、一定の関係がみられず(図-8)、形状比よりも枝下高との関連性を注視した方が、被害発生との関係をより理解しやすい結果となった。風害では、樹高が高いほど風を強く受け、また根返りを引き起こす回転モーメントも大きくなるため、樹高の増大は被害促進要素となり、一方、直径の増大は、(4)式および(7)式に示したように、幹折れおよび根返り被害の抑制要素となると考えられる。したがって、形状比は被害促進要素と被害抑制要素の比であると考え、形状比が小さな立木は被害が小さくなると大まかに理解することが可能である。しかし、津波の場合、枝下高付近の浸水深である場合は、直径の増大は被害の抑制要素となりえても、樹高の増大によって風害のような被害促進メカニズムは働かないと考えられ、形状比の物理的な意味が曖昧となりうる。本研究では、津波高を 8.5 m の条件の下で計算したが、津波高がより高くなった場合における形状比との関連性などは、今後、更なる検討が必要であろう。

本モデルでは、津波の実際の流速そのものを直接的に推定するものではないが、計算から求められた限界流速を用いて、おおよその流速を推定することは可能だと思われる。図-4において、130~220 m 区間では平均限界流速が増加すると本数被害率が減少することを示したが、この区間では、限界流速と実際の津波の流速が近い値であったと考えられる。この区間の本数被害率と流速との関係を調べてみると、限界流速が約 2 m/s では被害率は 100% を示し、実際の流速はこれよりも大きな値であり、さらに、限

界流速が約 6 m/s では被害率は 0% となり、津波の速度はこの値よりも小さかったと推定される (図-4)。つまり、130~220 m 区間における津波の流速はおおよそ 2~6 m/s の間にあると本モデルによる計算では推定される。また、汀線から 250 m 付近では、平均限界流速が一時的に 3.6 m/s まで減少して、被害が発生しているレベルまで低下しているにもかかわらず、被害が発生していない。このことから林帯は流速減殺効果を発揮し、徐々に波力を弱めていると考えられる。

V. お わ り に

東北太平洋沖地震津波の発生後の海岸林現地調査により、海岸林の被害状況が詳しく報告されてきた。これらの報告は、今後の海岸林のあり方について検討する貴重な資料である。本研究では、これらの現地調査の結果を物理的な見地から考察するため、簡易モデルを用いて現地の被害状況を解析するとともにモデルの有用性を検証した。その結果、限界流速が小さい立木において、実際に被害が発生しており、本モデルによる解析は、津波に対する海岸林の抵抗性を評価していると考えられる。また、簡易モデルによる被害形態の解析結果は、現地との定性的な一致を得ており、被害形態の要因の解明においても物理的な根拠を提示することができると思われる。

今回用いた簡易モデルは、各地に存在する各被害調査結果を相互に関連性をもって解析する際の一つの手段でもあり、これにより各地の被害状況を比較検討することが可能となるであろう。今後、津波と海岸林の被害との関係性をより明確にするため、災害後に残された貴重なデータを、さらに有効に活用することが重要であると同時に、詳細な被害解析には、より精巧なモデルの開発が望まれる。

本研究は JSPS 科研費 24510262 の助成を受けたものである。

引用文献

- 安久津久・松本和茂・藤本高明・大野泰之・滝谷美香・八坂通泰 (2012) カラマツ間伐強度の違いが年輪構造や丸太のヤング係数に及ぼす影響。木材学会誌 58: 249-259
- Cremers KW, Borough CJ, McKinnel FH, Carter PR (1982) Effect of stocking and thinning on wind damage in plantations. NZ J For Sci 12: 244-268
- Fredericksen TS, Hedden RL, Williams SA (1993) Testing loblolly pine wind firmness with simulated wind stress. Can J For Res 23: 1760-1765
- 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
- 原田賢治・今村文彦 (2003) 防潮林による津波減衰効果の評価と減災のための利用の可能性。海岸工学論文集 50: 341-345
- 星野大介 (2012) 東北地方太平洋沖地震津波による岩手県沿岸の海岸林と集落の被害状況。日林誌 94: 247-251
- 堀川清司 (1991) 海岸工学。(海の波, 東京大学出版会), 110-111
- 石川政幸 (1988) 森林の防霧, 防潮, 飛砂防止機能。社団法人日本治山治水協会
- 菊池俊一・渡部公一・佐藤恒治・須藤泰典・上野 満・齋藤正一・堀米英明・海老名寛 (2011) 2011 年東北地方太平洋沖地震によ

- る宮城県岩沼海岸林の津波被害と根系発達状況。平成 23 年度日本海岸林学会石巻大会講演要旨集: 11-12
- 小林達明・野原麻由実・加藤 顕・本條 毅 (2012) 千葉県九十九里における海岸林の津波被害調査結果。第 123 回日本森林学会大会学術講演集
- 小泉章夫 (1987) 生立木の非破壊試験による材質評価に関する研究。北大演研報 44: 1329-1415
- Koizumi A, Motoyama J, Sawada K, Sasaki Y, Hirai T (2010) Evaluation of drag coefficients of poplar-tree crowns by a field test method. J Wood Sci 56: 189-193
- 森岡 昇 (1983) 集積材用ワイヤー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。日林誌 65: 342-346
- 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, Rayner B, Peace AJ (2006) Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. Can J For Res 36: 1871-1883
- 野口宏典・佐藤 創・鳥田宏行・真坂一彦・阿部友幸・木村公樹・坂本知己 (2012) 2011 年東北地方太平洋沖地震津波によるクロマツ海岸林被害の数値シミュレーションを用いた検討—青森県三沢市の事例—。海岸林学会誌 11(2): 47-51
- 岡田 稔・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程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(2): 59-64
- Peltola H, Kellomäki S, Hassinen A, Granander M (2000) Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. For Ecol Manage 135: 143-153
- 坂本知己・新山 馨・中村克典・小谷英司・平井敬三・齋藤武史・木村公樹・今 純一 (2012) 東北太平洋沖地震津波における海岸林の漂流物捕捉効果—青森県八戸市市川町の事例—。海岸林学会誌 11(2): 65-70
- 酒井哲郎 (2001) 海岸工学入門。(海岸海洋構造物に働く波の力, 森北出版), 2-3
- 佐藤重貴夫・田中三郎・大野亮一・坂本知己・井口英道 (2011) 津波被害に対する海岸防災林の盛土効果—福島県松川浦の盛土造成地の事例—。平成 23 年度日本海岸林学会石巻大会講演要旨集: 13-16
- 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) 東北地方太平洋沖地震津波によるクロマツ海岸林被害と林分構造の関係—青森県三沢市の例—。海岸林学会誌 11(2): 41-45
- 澤田 稔 (1983) 風および冠雪による針葉樹幹の変形。林業試験場北海道支場研究資料 128: 1-18
- Sumida A, Nakai T, Yamada M, Ono K, Uemura S, Hara T (2009) Ground-based estimation of leaf area index and vertical distribution of leaf area density in a *Betula ermanii* forest. Silva Fennica 43: 799-816
- 田村浩喜・金子智紀・加賀正博・村上雅美・坂本知己 (2011) 仙台市荒浜海岸林の津波被害。平成 23 年度日本海岸林学会石巻大会講演要旨集: 9-10
- 寺本行芳・浅野敏之・林健二郎・多田 毅・今井健太郎・坂本知己 (2012) 2011 年東北地方太平洋沖地震津波発生後の宮城県名取市閑上浜における海岸林被害と残土盛土による海岸林の被害軽減効果。海岸林学会誌 11(1): 11-18
- 鳥田宏行 (2009) カラマツの風害に関する力学的評価。日林誌 91: 120-124
- 鳥田宏行・渋谷正人・小泉章夫 (2010) カラマツ林の力学的解析による風害予測。日林誌 92: 127-133
- 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: 16-71
- 山中啓介・藤原道郎・林田光祐・後藤義明・鈴木 寛・宮前 崇・井上章二・坂本知己 (2012) 平成 23 (2011) 年東北地方太平洋沖地震で発生した津波が仙台市井土地区の海岸林に及ぼした影響—防潮堤と海岸クロマツ林の被害との関係—。海岸林学会誌 11(1): 19-25