

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—

佐藤 創^{1*}・鳥田宏行²・真坂一彦²・阿部友幸²・野口宏典³・木村公樹⁴・坂本知己³**Relationship between treefall damage and forest structure of *Pinus thunbergii* coastal forest by the 2011 Tohoku earthquake tsunami disaster**

- An example of Misawa City of Aomori Prefecture -

Hajime Sato^{1*}, Hiroyuki Torita², Kazuhiko Masaka², Tomoyuki Abe², Hironori Noguchi³, Koki Kimura⁴ and Tomoki Sakamoto³

Abstract: The *Pinus thunbergii* coastal forest in Misawa, Aomori Prefecture, Japan, was partially damaged by the 2011 Tohoku Earthquake tsunami. The forest extended 110–370 m from the beach, and the tsunami reached a residential area 440 m from the beach. The height of the tsunami was 7.4 m above the beach. Trees within 200 m of the beach were felled by the tsunami. The inundation depth of the tsunami was 4.2 and 1.8 m at 150 and 370 m from the beach, respectively. Tree size, crown height, and forest age increased from the sea inland. The mean diameter at breast height (DBH), mean height, mean crown height, and forest age of the forest stand 180 m from the beach were smaller than those of the forest stand 212 m from the beach. The density of stems in the forest stand at 180 m was greater than that at 212 m. In conclusion, the increase in DBH caused by self-thinning with aging is important for tsunami resistance. From a management perspective, increasing diameter growth by thinning is important.

1 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、東北地方から関東地方にかけての海岸林は様々な程度の被害を受けた(星野ほか, 2011; 田村ほか, 2011; 山中ほか, 2011; 寺本ほか, 2011; 小林ほか, 2012)。同時に海岸林は津波のエネルギーを減衰させたり(野口ほか, 2011)、海からの漂流物を捕捉する(坂本ほか, 2011)など、被害を軽減させる事例もみられた(岡田ほか, 2011; 小林ほか, 2012)。海岸林が津波被害の軽減機能を発揮するには、海岸林が倒伏や流失などの被害を受けずに残存することが重要である。しかし、被害の激しかった場所では海岸林が壊滅したケースもあり、どのような条件が残存にとって重要かを検証することが出来ない。

そこで、本研究では被害の中心から比較的離れた青森県三沢市の海岸林に注目した。この地域の海岸林は海岸前線側では倒伏や葉の褐変などの被害が見

られたが、内陸側ではほぼ無被害で残存しているのが確認された。この被害の境界がどのように決まったかがわかれば、残存にとって重要な要因を知ることが出来るはずである。この要因としては、1つには立木サイズが考えられ、サイズの増加とともに根返りや幹折れ抵抗が増大することが予想される。もう1つは津波氾濫流が樹木により減衰し、内陸側ほど残存しやすくなることが予想される。本研究では前者に注目し、立木サイズや密度といった林分構造と被害の関係を検討した。

2 方法

2.1 調査地

調査地は青森県三沢市織笠のクロマツ海岸林に設けた(図1; N40° 47' 20", E141° 24' 18")。六ヶ所村から八戸市にかけては、ほぼ連続して50kmほどの海岸林があり、調査地はそのほぼ中間に位置する。ここでの林帯幅は260mで海側林縁から汀線までは約110mあり、林帯の内陸側は住宅地となっていた。

2.2 調査方法

調査は2011年8月15~17日に行った。上記の林帯を横断するように、汀線と直交する方向に260m×2mの帯状区を設定し(図2)、出現する全てのクロマツの胸高直径、樹高、枝下高、汀線からの距離を測定した。なお、個体が被害を受け傾いている場合には、立っている状態の樹高を仮定した幹長を測定した。さらに、全個体について、残存、幹折れ、根返り、傾き(倒伏しているが、地中で幹折れか根返りが起きており判断がつかないもの)の被害区分を行い、残存以外は倒伏の方向を測定した。なお、本調査地では根系ごと流出した個体はなかった。本数被害率は海側林縁から10mごとに全本数に対する

1 (地独) 道総研 林業試験場 道南支場
Donan Station, For. Res. Inst., Hokkaido Research
Organization

Hakodate, Hokkaido, 041-0801 Japan

2 (地独) 道総研 林業試験場
For. Res. Inst. Hokkaido Research Organization
Bibai, Hokkaido, 079-0198 Japan

3 (独) 森林総合研究所
For. and Forest Prod. Res. Inst.,
Ibaraki 305-8687 Japan

4 (地独) 青森県産業技術センター 林業研究所
For. and Forest Prod. Res. Inst., Aomori Prefectural
Industrial Technology Research Center
Aomori 039-3321 Japan

*Corresponding author: satou-hajime@hro.or.jp

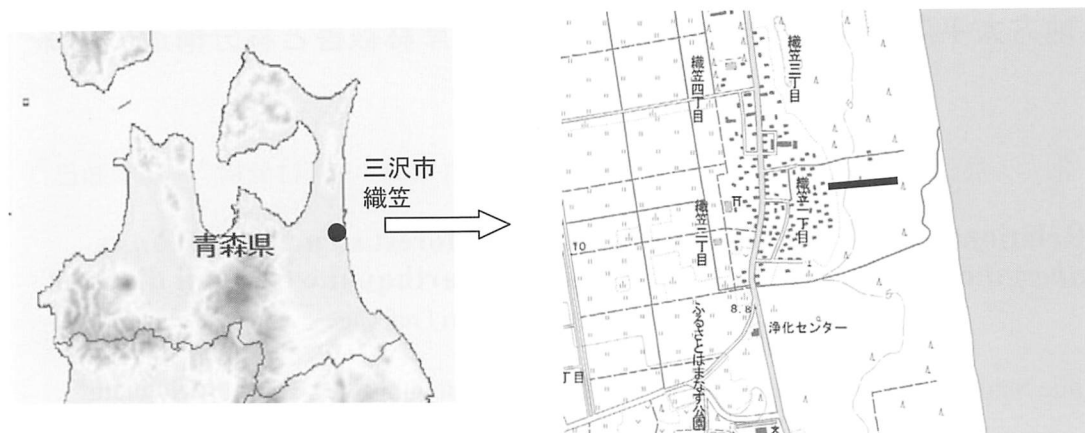


図1 調査地の位置
右図の太線は長さ 260m の带状区を示す。

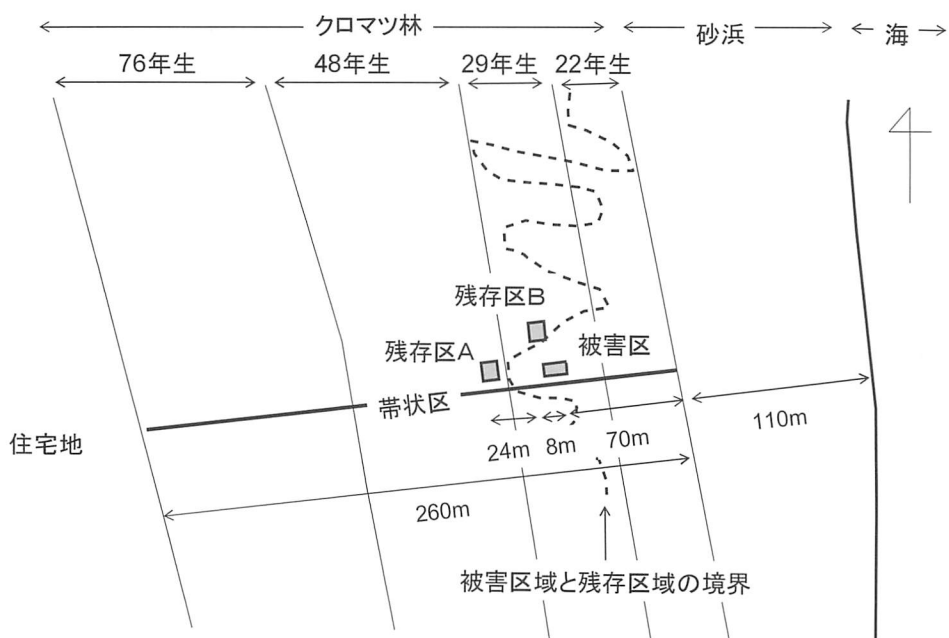


図2 調査区の配置図

被害本数の割合で示した。樹木に付着した枝葉や住宅地に残る浸水痕などにより津波の痕跡高（調査時の汀線を基準とする）を 36 点で測定した。

また、带状区を通るように、汀線から住宅地内の津波の到達地点までの、調査時の汀線を基準とした地盤高を測定した。測定には三脚に設置した Impulse200 (Laser Technology Inc.) を用いた。

津波によるクロマツ被害の概要は、前線に近い部分ではまとまって傾き、葉が褐変しており（被害区域）、その内陸側では直立した状態で残存していた（残存区域）。被害区域と残存区域の境界は比較的明瞭であった（写真 1）が、汀線や海側林縁と平行ではなく大きく波打っていた（図 2）。以上のような境界と林分構造との関係を探るために、带状区に沿った境界付近の被害区域（被害区）、被害区域の内陸側（西側）に隣接する残存区域（残存区 A）、被害区域の北側に隣接する残存区域（残存区 B）に方形区を設定し、带状区と同様の項目（汀線からの距離は除く）



写真 1 被害区域と残存区域の境界付近

について調査を行った。方形区中心までの汀線からの距離は被害区が180m(海側林縁からの距離は70m)、残存区Aが212m(残存区Bからの距離は24m)、残存区Bが188m(被害区からの距離は8m)であった。方形区面積は被害区が40m²、残存区Aが48m²、残存区Bが81m²であった。なお、境界線は2011年4月5日撮影のGoogle Earthにより判読した。また、方形区を設置した林分では過去に間伐の履歴はなかった。

3 結果と考察

3.1 被害の内訳

倒伏個体の被害の内訳は、幹折れ14%、根返り5%、傾き81%であった(図3右)。傾き(写真2)の多くは根系による地面の盛り上がりが見られたため、不完全な根返りであると考えられる。倒伏の方向はほとんどが西向きすなわち内陸方向であった(図3左)ことから、被害は押し波によるものと考えられる。

3.2 带状区での被害状況の変化

地盤高は汀線から内陸にかけて徐々に増加し、津波が到達した440m地点で8mであった(図4上)。林帯の汀線側、100m地点前後には高さ2m程度の人工砂丘があり、林帯内部の205m地点と280m地点にも小規模な凸地形が見られた。

津波の痕跡高は平均7.4m(最大8.5m, 最小6.0m)で、多少の増減はあるものの、内陸に向かって変化する傾向は見られず、津波は汀線からの高さをほぼ一定に保って遡上したと考えられた(図4上)。津波の地上高は汀線から150m地点で4.2mで、内陸側林縁(汀線から370m地点)で1.8mであった。

クロマツの樹高は前線部では2m前後で、内陸に進むにしたがい増加し、最大20m程度に達した。胸

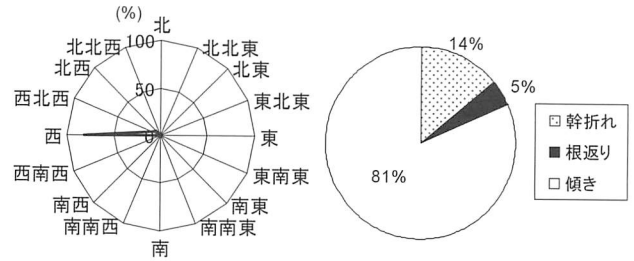


図3 被害の内訳
左が倒伏方向, 右が倒伏種類を示す。



写真2 被害区域における「傾き」被害

高直径は前線部では5cm前後で、内陸に行くにしたがい増加し、最大40cmに達した。森林管理の帳簿によると、林齢は前線側から内陸に向かって、22年生、29年生、48年生、76年生となっていた(図2)。クロマツサイズの内陸に向かっての増加は、林齢と海からの距離による海風の影響の違いの両方による考えられる。

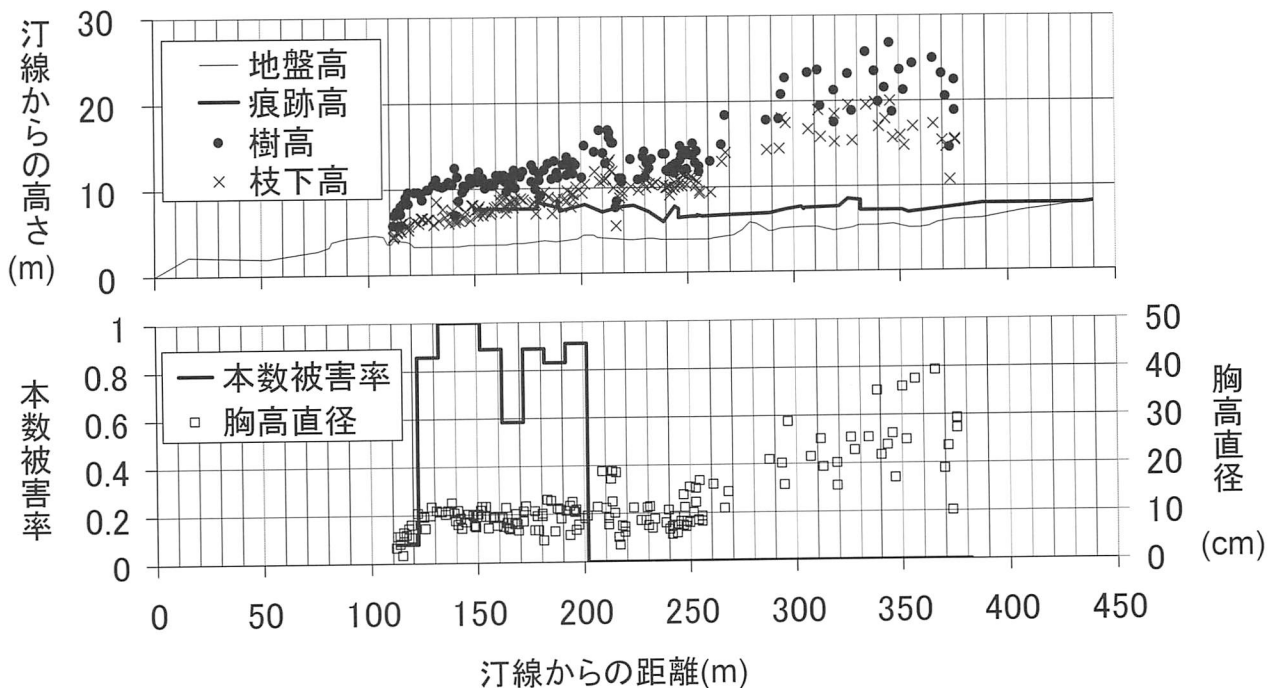


図4 带状区における地盤高, 痕跡高, 樹高, 枝下高の推移(上段)および本数被害率, 胸高直径の推移(下段)

表1 方形区におけるクロマツのサイズ、樹形、林齢、本数密度

方形区名	本数被害率	平均胸高直径	平均樹高	平均枝下高	平均形状比	林齢	本数密度	材積
		cm	m	m				
被害区	0.95	8.8	7.9	5.0	93	29	5,500	175
残存区 A	0 **	12.6 **	11.2 **	7.6 **	93	48	4,375	395
残存区 B	0.26 **	10.6	7.4	4.0 **	74 **	29	3,827	175

** : 被害区との間に統計的有意差があることを示す (P<0.01) , * : (P<0.05) . 本数被害率は χ^2 検定, 平均胸高直径, 平均樹高, 平均枝下高, 平均形状比はU検定による.

クロマツの枝下高は、ほぼ樹高の変化と一致していた。汀線からの距離が 190m 付近までは、津波痕跡高と類似した高さで推移しており、樹冠下部が浸水した可能性を示している。

クロマツの本数被害率は前線から 120m 地点までは 0.08 と低かったが、それより内陸側の 200m までは 0.80 以上と高かった (図 4 下; 160~170m の 0.6 を除く)。それより内陸側は無被害であった。それに一致するように 200m より内陸側では胸高直径の増加が見られた。

仮に幹のみが浸水することを仮定すると、直径が n 倍になると投影面積が n 倍になるので、回転モーメントは n 倍となる。ここでは根返りを仮定すると、根返り抵抗モーメントはこれまでの研究から胸高直径の 1.5~2.5 乗に比例する (佐藤ほか, 2009; 鳥田ほか, 2010) ため、直径が n 倍になると根返り抵抗モーメントは $n^{1.5} \sim n^{2.5}$ 倍となる。したがって、胸高直径の増加により、回転モーメントに対する根返り抵抗モーメントの割合は大きくなるため、倒れにくくなったと考えられる。

首藤 (1985) は個体の胸高直径と津波の高さから被害程度を区分した。それによると、同じ津波高さでも直径の太い林分は被害が少なくなり、本研究の結果と傾向が一致した。また、今回の津波による仙台市荒浜 (田村ほか, 2011) および名取市閑上浜 (寺本ほか, 2011) の結果でも、胸高直径が大きいと傾きや幹折れ被害が少ないことが明らかになっている。

ただし、被害境界の 200m 地点の内陸側 220m 地点までは個体サイズが増加するが、220m 地点から 250m 地点までは被害区域と同程度に減少している (図 4)。これには前線側のクロマツにより、津波氾濫流が徐々に減衰したことが関わっている可能性がある。

さらに、クロマツ個体の倒伏は津波氾濫流のみによるのではなく、海寄りの隣接個体の倒伏に巻き込まれた可能性もある。このような“共倒れ”により被害境界が明瞭になった可能性があり (写真 1)、詳細なメカニズムは今後の課題である。

また、汀線からの距離が 190m 付近までは、樹冠の一部が浸水したことも 200m より海側で被害が大きくなった要因かも知れない。

3.3 方形区での被害状況

被害区 (本数被害率 0.95) と比較すると、残存区 A (本数被害率 0.00) は胸高直径が大きく、樹高および枝下高が高く、本数密度が低かった (表 1)。こ

表2 残存区 B における無被害木と被害木の比較。

	平均	平均	平均	本数
	胸高直径	樹高	枝下高	
	cm	m	m	
無被害木	11.4	7.8	4.2	23
被害木	8.3	6.5	3.7	8
P 値(U検定)	0.016	0.052	0.112	—

れは残存区 A の林齢が高いことから、個体の成長が進み、自己間引きが進行したこと起因すると考えられる。被害区と残存区 A はほぼ帯状区に沿って設定されているため (図 2)、帯状区の被害境界付近の林分構造の再確認となる。被害区と残存区 A の被害率の違いは、クロマツの胸高直径および枝下高の違いによるものと推察され、それに対する考察は、前述した帯状区と基本的に同じである。

次に、被害区と残存区 B を比較すると、残存区 B (本数被害率 0.26) は林齢および平均樹高は変わらないものの、胸高直径はやや太い傾向があり、枝下高は低く、形状比が小さく、本数密度が低かった。林齢は同じであることから、残存区 B は何らかの原因によって密度が低下したため、肥大成長がやや促され、枝の枯れ上がりが抑制されたと考えられる。

被害区と残存区 B 付近の津波の地上高は痕跡高から 4m と推定された。したがって、残存区 B では樹冠下部が浸水した可能性が高いと推察される。

このように、残存区 B は被害区と比べて、胸高直径は太いが、枝下高は低くなっており、林分構造から見た被害の受けやすさに明瞭な優劣はつけがたい。踏査によると、被害境界ラインと地形の関係も明瞭ではなかった。したがって、境界ラインが波打ったのは、林分構造ではなく、津波氾濫流が原因と考えるのが現時点では妥当であろう。

被害木と無被害木が混在する残存区 B において、被害の有無別にサイズを比較した (表 2)。無被害木は被害木に比べて胸高直径が有意に大きく、樹高および枝下高がやや大きい傾向が見られた。したがって、同じ氾濫流の条件下で、胸高直径が大きいと被害を受けにくいことが明確に示されたと言える。

次に、各方形区がどの程度の混み合い度にあるのかを知るために、これまで報告されている収量-密度図により収量比数を調べた (表 3)。なお、収量比数は 0.1 刻みごとの直線で示されているため、図上

表3 2地域のクロマツ海岸林の収量-密度図上における3方形区の収量比数

	被害区	残存区 A	残存区 B
北海道	0.9-0.95	1.15-1.2	0.85-0.9
鳥取県	1.0-1.05	1.05-1.1	0.95-1.0

にプロットした後、0.05 刻みで目測により読み取った。北海道のクロマツ海岸林の基準（佐藤，2003）では残存区 A が収量比数 1 を越え、鳥取県のクロマツ海岸林の基準（河崎・田中，1983）では残存区 A と被害区が収量比数 1 を越えた。いずれも収量比数は残存区 A > 被害区 > 残存区 B となっており、3 方形区とも過密な状態であると判断された。これは、本調査林分で間伐が行われていないことと一致する。なお、収量比数は被害の受けやすさとは無関係であった。

4 おわりに

本研究の結果から津波氾濫流で倒れにくく、防潮効果の高いクロマツ海岸林の管理方法を提示すると以下のようになる。

1. サイズの大きい個体から成る林をつくる。
2. そのためには適切に間伐を行い、肥大成長を促し、大径の林に誘導する。

本調査地では混み合い度と被害の受けやすさの関係は明瞭ではなかった。しかし、肥大成長を促すことを最優先するためには、間伐を行い、混み合い度を緩和することは重要であると考えられる。

また、下枝については枝打ちを行うことで倒れにくくなると考えられるが、津波氾濫流を減衰させる意味では下枝を残した方が良いと考えられる（岡田，2009）。さらに強度の枝打ちは肥大成長を低下させるため、望ましくないと考えられる。したがって、津波氾濫流を減衰させる目的からは枝打ちを行わない方が良いと考えられる。

引用文献

[1] 星野大介・岡田穰・金子智紀・田村浩喜・塩谷学・佐藤亜貴夫・田中三郎・中北理・山本幸一・坂本知己（2011）東北地方太平洋沖地震津波による明戸海岸林の被害状況。平成 23 年度日本海岸林学会石巻大会研究発表要旨集，5-6

[2] 河崎弥生・田中一夫（1983）海岸防災林の保育，更新に関する基礎的研究（第 1 報）密度管理と林分構

造について。砂丘研究，30，233-247

[3] 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

[4] 野口宏典・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・坂本知己（2011）被災地の林分・地形条件を用いた数値実験による海岸林の津波氾濫流減衰機能の検討。平成 23 年度日本海岸林学会石巻大会研究発表要旨集，27-28

[5] 岡田 穰（2009）海岸林の津波被害軽減効果に関する研究成果発表会—文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（A）海外）「インド洋大津波に対する海岸林の効果の検証と今後の海岸域の保全のあり方」。海岸林学会誌，7（3），39-46

[6] 岡田 穰・野口宏典・岡野通明・坂本知己（2011）平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波における海岸林と家屋破損程度の関わり—石巻市長浜の事例。平成 23 年度日本海岸林学会石巻大会研究発表要旨集，1-2

[7] 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（2011）平成 23 年東北太平洋沖地震津波における海岸林の漂流物捕捉機能。平成 23 年度日本海岸林学会石巻大会研究発表要旨集，3-4

[8] 佐藤 創（2003）クロマツ海岸林の密度管理方法。光珠内季報，129，11-14

[9] 佐藤 創・鳥田宏行・真坂一彦・今 博計・渋谷正人（2009）防風林の風倒要因の解析—2004 年台風 18 号による北海道美唄市の例—。日林誌，91，307-312

[10] 首藤伸夫（1985）防潮林の津波に対する効果と限界。第 32 回海岸工学講演会論文集，465-469

[11] 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研究発表要旨集，5-6

[12] 寺本行芳・浅野敏之・林健二郎・多田毅・今井健太郎・坂本知己（2011）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の実態。平成 23 年度日本海岸林学会石巻大会研究発表要旨集，19-22

[13] 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

[14] 山中啓介・藤原道郎・林田光祐・後藤義明・鈴木覚・宮前崇・井上章二・坂本知己（2011）平成 23 年（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。平成 23 年度日本海岸林学会石巻大会研究発表要旨集，17-18

[受付 平成24年5月23日，受理 平成24年7月17日]