

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

—防潮堤と海岸クロマツ林の被害との関係—

山中啓介^{1*}・藤原道郎²・林田光祐³・後藤義明⁴・鈴木寛⁴・
宮前崇⁴・井上章二⁵・坂本知己⁴

The influence of the tsunami caused by 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake in Ido, Sendai-city

- Relation between coastal embankment and damage to coastal forests -

Keisuke Yamanaka^{1*}, Michiro Fujihara², Mitsuhiro Hayashida³, Yoshiaki Goto⁴,
Satoru Suzuki⁴, Takashi Miyamae⁴, Shoji Inoue⁵ and Tomoki Sakamoto⁴

Abstract: The influence of the tsunami caused by 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake in Ido, Sendai-city on young Japanese black pine (*Pinus thunbergii* Parl.) forests behind the coastal embankment was investigated. The coastal embankment decreased the amount of driftwood. Coastal forests had no effects on attenuation of tsunami force because of two reasons. (1) Because the forests were young, they did not resist the tsunami force. (2) Because the groundwater level was high, the main roots of the trees could not elongate. Several large trees were also uprooted in these forests because of growth inhibition of main roots. If tsunami-resistant forests are established, building a coastal embankment and bank for elongating the main roots of trees are effective technique for minimizing damage.

1 はじめに

海岸林は防風、飛砂防止といった機能を果たし、地域住民の生活環境を永い間守り続けてきた。このため、海岸林の造成や管理が永続的に実施され、松くい虫被害などによって海岸林が荒廃した場合でも治山事業などによって再生が図られてきた(橋岡, 1992)。

2011年3月11日に発生した平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による津波は、東北地方を中心に海岸林に大きな被害をもたらした。我が国の津波による海岸林の被害は過去にも報告されているが(四手井, 1948; 村井, 1983)、今回の津波のよ

うに広範かつ大規模な被害については報告が見当たらない。また、今回の津波と同様に海岸林に大きな被害をもたらした2004年のインド洋大津波では、海岸林の被害状況が詳細に報告されている(田中ら, 2005; Hayashida *et al.*, 2009; Okada *et al.*, 2009)。これらの知見には今回の津波による海岸林被害と共通する要素もあるものの、海岸林の構成種や地形などの環境条件に相違点も多い。

今回被害を受けた海岸林は早期に再生させる必要があるが、今後は津波に対してより強い海岸林の整備が求められている。津波から海岸林を保全する手段として防潮堤の施工は有効な手段と指摘されているが(四手井, 1948)、今回の津波では防潮堤後背の海岸林であっても大きな被害を受けた。したがって、今回の津波における防潮堤の効果やその後背の海岸林の被害状況を把握し、海岸林整備の方法や防潮堤などの土木構造物の施工における問題点や改善すべき点を明らかにすることは、被災地の海岸林再生や新規の海岸林造成に必要な不可欠と言える。

そこで、本研究では仙台市若林区井土地区の若齢クロマツ林に着目し、防潮堤の有無による海岸林被害の相異について調査し、今回の津波に対する防潮堤の効果について検討した。

なお、本論文の一部は日本海岸林学会石巻大会で発表した(山中ら, 2011)。また、本研究の一部には林野庁から(独)森林総合研究所への委託事業「海岸防災林による津波被害軽減効果検討調査」の予算を使用した。

2 調査地および調査方法

2.1 調査地

宮城県仙台市若林区井土地区において、太平洋と貞山堀に挟まれた約300mの区間に存在するクロマツ

¹ 島根県中山間地域研究センター

Shimane Prefecture Mountainous Region Research Center, 1207 Kamikijima, Iinan, Shimane, 690-3405, Japan

² 兵庫県立大学大学院

Graduate School of Landscape Design & Management, University of Hyogo, 954-2 Nojimatokiwa, Awaji, Hyogo, 656-1726, Japan

³ 山形大学農学部

Faculty of Agriculture, Yamagata University, Wakaba-machi, Tsuruoka, Yamagata 997-8555, Japan

⁴ 森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, Japan

⁵ 琉球大学農学部

Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus, 1 Sembaru, Nishihara, Okinawa, 903-0213, Japan

*Corresponding author:

yamanaka-keisuke@pref.shimane.lg.jp

林を調査対象とした（図 1, 2）。本調査対象林は砂丘未熟土に人工造林されたクロマツ林で、クロマツ以外の樹種は少数のニセアカシア以外ほとんど見られなかった。また、クロマツの大部分は個体サイズがほぼ同一であった（約 15 年生）ものの、貞山堀付近の一部には大径のクロマツが生育していた。

本調査対象林の汀線側には T.P.+4 m の防潮堤が設置されていた。一方、調査対象林の内陸端から貞山堀の区間は井土浦に連なる后背湿地帯となっていた。調査地の地盤高は T.P.+0.3 ~ 2.8 m であった。

なお、図 1 の背景地図等データは、国土地理院の電子国土 Web システムから提供されたものである

2.2 調査区の設定

防潮堤の后背地（以下「有堤区」とする）、防潮堤が存在しない部分（以下「無堤区」とする）、両者の中間部（以下「中間区」とする）の 3 区域に調査区を設置した（図 3~6）。調査はベルトトランセクト法によって行い、調査区の大きさは汀線側からクロマツ林の内陸側の林縁部まで 3 調査区とも約 250 m、幅は 4 m とした。なお、調査区の基点は無堤区と中間区は汀線とした。また、有堤区では防潮堤が今回の地震によって一部沈下していることや、防潮堤の海側に波消ブロックが設置されていたため基点を防潮堤とした。調査区の長辺は汀線と直交するように設置し、互いに平行になるようにした。

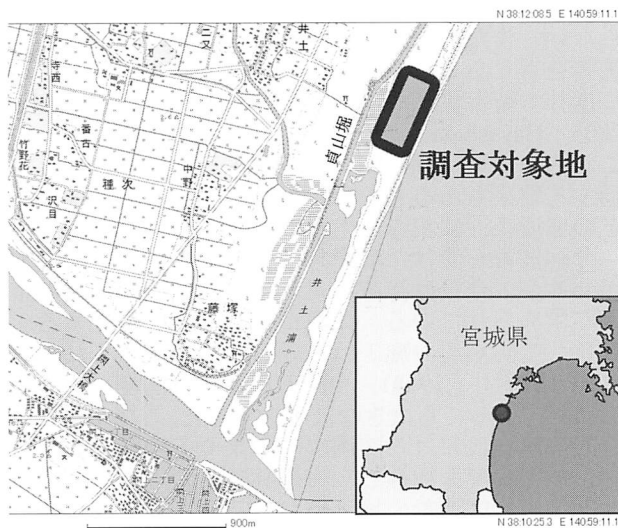


図 1 調査対象地



図 2 調査林分

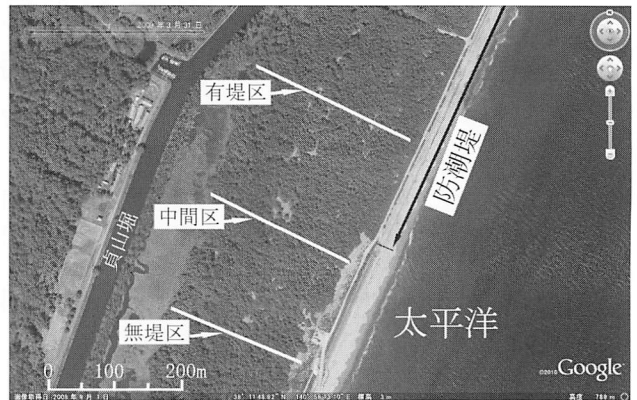


図 3 調査区の設置状況

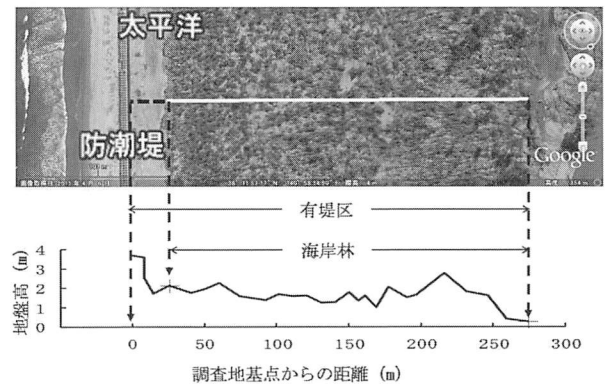


図 4 調査区の概況（有堤区）

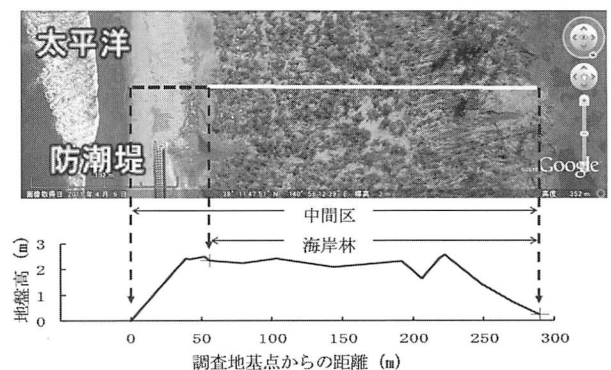


図 5 調査区の概況（中間区）

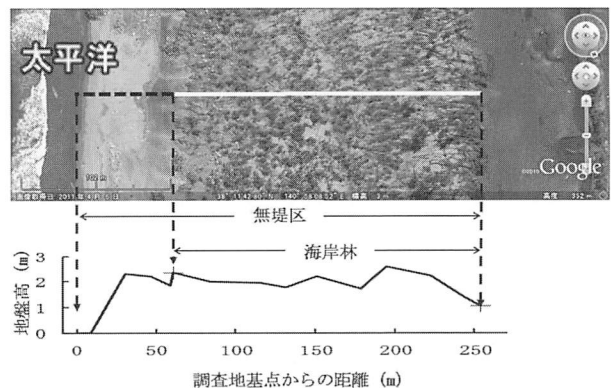


図 6 調査区の概況（無堤区）

2.3 調査項目

2011年9月5~8日、クロマツの被害形態、樹高、胸高直径、枝下高を調査した。被害形態は主幹や根元が折損している幹折れ、根返り、立ち枯れ、生存に区分した。なお、樹木が傾く場合は根返りか根元折れに起因するが、堆砂のために両者を判別することが困難である場合には被害形態を「傾き」とした。

被害前の立木密度はGoogle Earthの画像を判読して算出した。また、被害後の密度は調査対象林の海側で表土ごと流出してしまった部分や、被災前から無立木地となっていた部分があるため、クロマツが残存していた区域の面積に対するクロマツの残存本数とした。

なお、本研究では調査区内の上層、亜高木層を形成していたクロマツのみを調査対象とし、林床に生育しているクロマツの稚幼樹および広葉樹は調査から除外した。

また、各調査区の基点から内陸端まで現地盤高を測量した。その後、1調査区当たり5~10か所程度津波で堆積した土砂厚を測定して元地盤高を算出した。

3 結果

樹幹の先端が流出した個体が多くて樹高の計測が困難であった汀線付近および大径木が散在している貞山堀付近を除いた各調査区における主要構成木の状況を表1に示した。各調査区とも胸高直径9~11 cm、樹高5~7 m、形状比63~79と同様の値を示した。地盤測量や被害調査時に貞山堀付近や調査区周辺に散在する大径木において測定した痕跡から、各調査区の津波の最大浸水高はT.P.+7.2~9.2 m、地盤からの最大浸水深は5.7~7.0 mであった。したがって、今回の津波では本調査林分の主要構成木の樹高とほぼ同様、あるいは樹高よりも2 m程度高い位置まで浸水していた。

3.1 防潮堤の効果

3.1.1 クロマツの流出に及ぼす影響

被災前と被災後のクロマツの状況を表2、図7に示した。被災前のクロマツの密度は2100~2400本/haであった。これに対し、被災後のクロマツの残存密度は920~1260本/haであり、被災前から840~1410本/ha減少していた。また、根鉢の流出数を明確にす



図7 被災前(2008年:左)と被災後(右)の状況(Google Earth)

表1 主要構成木の状況

調査区	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	枝下高 (m)	形状比
有堤区	9.3 (4.0)	6.5 (1.8)	2.8 (1.4)	75.7 (28.0)
中間区	10.8 (5.4)	4.6 (2.6)	1.4 (1.0)	62.9 (37.0)
無堤区	9.7 (5.2)	6.5 (3.1)	3.1 (2.2)	79.3 (23.1)

() 内は標準偏差

表2 被災前と被災後のクロマツの状況

調査区	本数(本/ha)			減少率 (%)
	被災前	被災後	減少数	
有堤区	2100	1260	840	40.0
中間区	2400	1020	1380	57.5
無堤区	2330	920	1410	60.5

ることはできなかったものの、現地調査では根鉢が流出したとみられるすり鉢状の痕跡が観察された(図8)。

立木の減少本数は有堤区で最も少なく、中間区と無堤区はほぼ同数であった。また、被災前の立木本数に対する減少数の比率である減少率も有堤区で40.0%と他の2調査区が57.5、60.5%であることと比較して低かった。

また、有堤区を含め、今回設定した3調査区内のクロマツのほとんどの個体は傾斜あるいは倒伏していた。そして、それらの先端はいずれも西北西方向を向いていた(図4~6)。

3.1.2 防潮堤後背の表土の侵食

図9に調査地基点からの距離と被害別胸高直径の関係を示した。各調査区において、最も汀線側に出現



図8 根鉢が流出した痕跡

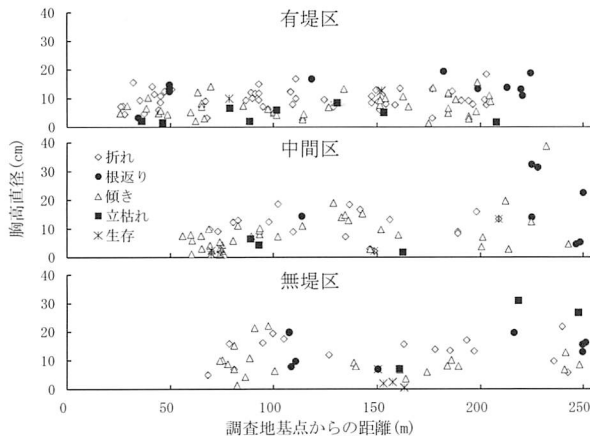


図9 基点からの距離と被害別胸高直径の関係

したクロマツの位置は有堤区が基点から 30 m と最も汀線に近く、中間区、無堤区は両者ともほぼ 60 m であった。しかし、被災前から中間区と無堤区には海岸林と汀線の間は無立木地が存在しており(図7)、最も汀線側に存在するクロマツの位置は被災の前後でほぼ同じであった。一方、有堤区では防潮堤付近にも生育していたクロマツが表土ごと約 30 m にわたり流失していた。

3.1.3 クロマツの枯死や被害の形態に及ぼす影響

各調査区で確認された流木を除く全個体の被害状況を表3に示した。防潮堤の有無に関わらず、いずれの調査区でも90%以上の個体が枯死していた。表4に調査区別の被害形態の割合を示した。被災前と同様に直立したままの個体は、いずれの調査区でも12~13%と少数であった。一方、有堤区と無堤区ではそれぞれ半数の個体が幹折れし、いずれの調査区で

も10%程度は根返りが確認された。傾きとした個体も35~61%発生した。図10に被害形態別の平均胸高直径を示した。幹折れ、根返り、傾きに分類される個体の平均胸高直径分布は調査区による違いは認められなかった。一方、立ち枯れや生存に分類される個体はいずれの調査区でも5本程度と少なく、平均胸高直径は調査区によってばらつきがみられた。

3.2 根系が根返りに及ぼす影響

今回の調査ではいずれの調査区においても調査対象とした個体の中でも、より大径のものに根返り木が多かった(図10)。本調査林の主要構成木の平均胸高直径が約10cmであるのに対し、根返り木の平均胸高直径は15~18cmであった。表5に根返り木の根系の状態を示した。いずれの調査区においても、ほとんどの個体が垂下根を欠いており、根系の深さも1mを超えるものは確認できなかった(図11)。

3.3 林帯幅の影響

今回の調査ではいずれの調査区でも基点からの距離によって被害が軽くなることはなく、林帯幅によって波力が減殺される実態は捉えられなかった(図9)。

表3 調査区別の被害状況

調査区	面積 (ha)	本数 (本)	密度 (本/ha)	被害状況		
				生存木 (本)	枯死木 (本)	枯死率 (%)
有堤区	0.10	124	1260	3	121	98
中間区	0.08	79	1020	6	73	92
無堤区	0.08	70	920	4	66	94

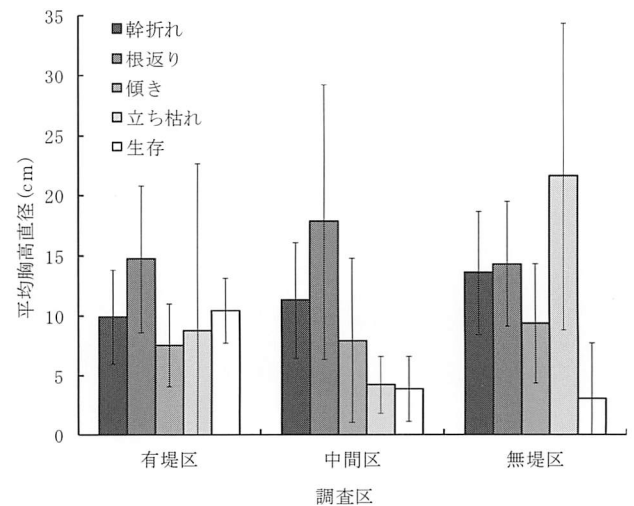


図10 被害形態別の平均胸高直径 (誤差線は標準偏差)

表4 調査区別の被害形態の割合(%)

調査区	幹折れ	根返り	傾き	直立した状態	
				立ち枯れ	生存
有堤区	48	11	35	7	5
中間区	26	10	61	4	9
無堤区	46	13	35	6	6

表5 根返り木の根系の状態

調査区	直根の存在 (個体数)			根系の深さ		
	有り	無し	不明	調査数	深さ(m)	
					平均	最大
有堤区	2	12	0	10	0.55	0.90
中間区	1	1	5	2	0.75	0.80
無堤区	0	8	1	6	0.77	0.90



図11 垂下根を欠いた根返り木の根系

4 考察

4.1 防潮堤の効果

小田(1992)はクロマツ樹冠がうっ閉を開始するのは相対密度が50~55%前後であり、胸高直径9~12cmの場合、この密度は2000本/ha前後としている。本調査林分は被災前のGoogle Earthで取得した画像で明らかのように、被災前にはほぼ閉鎖状態にあったと考えられる(図7)。したがって、画像判読から得た数値は被災前の密度とほぼ同様の数値であったと考えられる。

今回の調査でいずれの調査区でも被災前と比較し

て立木本数が減少しているが、現地調査で根鉢が流出したと考えられるすり鉢状の痕跡が観察されたことから、この立木本数の減少は津波による流出であると考えられる。

有堤区では被害後のクロマツの密度が他の2調査区と比較して最も高く、立木の減少率、つまり津波による流出率は最も低かった。

これには次のことが考えられる。すなわち、津波が防潮堤を越流して堤防後背の地表面に落下する時には、ウォータークッション作用によって津波のエネルギーが損失することが知られている(村上・細井ら, 1988; 見附・村上ら, 1984)。また、津波が防潮堤を越流し、水中に没した後も倒壊しない限り防潮堤は流水中で津波に対する抵抗物となる。これらによって津波の波力が減衰されたためであると考えられる。

また、クロマツ樹幹の傾斜方向から、陸上に遡上した津波は各調査地の東南東方向から西北西方向に向かって、つまり汀線と直交する方向で直線的に流動していったと考えられる。したがって、防潮堤に近い中間区においても無堤区と同様に、津波の流動方向に防潮堤は存在せず、調査区内を流動した津波は防潮堤の影響を受けていなかったと考えられる(図3)。このことが、両調査区の流出本数や流出率がほぼ同じで、しかも有堤区よりも値が大きくなった理由であると考えられる。

海岸林は津波の波力を減衰させる効果がある一方、海岸林を構成する木本が流亡すると、津波被害を拡大する危険性がある(首藤, 1992)と言われている。今回、防潮堤によってクロマツの流出が減少したと考えられるが、防潮堤を越流するような津波であっても、後背地の津波被害の軽減に防潮堤が一定の役割を果たしたと言える。

ただし、堤防後背では防潮堤を越流した津波が、地表面に落下したときに発生した衝撃越流波圧(水谷ら, 2002)によって、局所的な表土侵食が引き起こされたと考えられる。この局所的な流木発生については今後その対策を検討していく必要がある。

一方、クロマツの枯死状況や被害の形態からは防潮堤による被害の軽減効果は認められなかった。これは、防潮堤による波力の減殺効果と比較して今回の津波の波力が大きく上回っていたため、クロマツの枯死状況や被害の形態に防潮堤の有無による差が出なかったと考えられる。

4.2 根系が根返りに及ぼす影響

クロマツの根系は一般に深根性で、大径の垂下根を発生させることが知られている(荻住, 1979)。したがって、地上部の成長に伴い、垂下根も発達するため、大径になるほど樹体の支持力は増すと考えられる。ところが、今回の調査ではいずれの調査区でも調査対象木のうち、より大径のものが根返りしていた。

小田(1979)は地下水位が高く、過湿な条件ではクロマツの垂下根は発達せず、比較的太めの水平根が地下30cm深まで発達し、扁平な根系を形成するとしている。今回の調査における根返り木の根系は、小田が報告している過湿型の根系とほぼ同様の形態であった(図11)。また、地下水位が高い砂丘地の

クロマツ林では集団枯損の発生(小田, 2001)や成長不良(川名, 1966)となることが報告されている。本調査地は貞山堀および井土浦という湿地に近接していることや、地盤高がT.P.+2 m程度と低いこと(図4~6)から地下水位が高いと推察されるが、このことが垂下根の形成を阻害したと考えられる。

田中ら(2006)は2004年12月26日に発生したインド洋大津波で被害を受けたスリランカ南部の海岸林を調査し、同一樹種であれば胸高直径が大きくなるほど破壊モーメントも大きくなるため、樹幹が折損し難くなることを示している。したがって、大径のクロマツのうち垂下根の発達が不良であったものは樹幹が折損する前に、根系が樹体支持力を失ったと考えられる。なお、このような現象は過去の津波被害においても指摘されている(四手井ら, 1948)。また、今回の津波でも同じ宮城県内の海岸クロマツ林において報告されている(田村ら, 2011; 菊池ら, 2011)。

4.3 おわりに

今回の津波では防潮堤後背で局所的な洗掘が発生し、この部分に流木の発生が集中していたが、林帯全域の流木本数は減少していた。このため、本調査地においては防潮堤が流木の発生を抑制する効果があったといえる。しかし、防潮堤後背の林帯幅が狭い場合、洗掘が局所的であったとしても表土ごと流出してしまえば、防潮堤が無い場合より流木が増加する可能性がある。これらのことから、防潮堤による津波被害の軽減効果は林帯幅など後背の海岸林の条件によって変化すると考えられる。したがって、防潮堤の整備に当たっては後背の海岸林の条件を十分に考慮することが、津波被害軽減という観点から重要であると言える。また、防潮堤後背の洗掘についても今後対策を検討していく必要がある。

Harada *et al.* (2004)は今回の調査対象林と同様の樹高10 m、林帯幅200 mの防潮林について、津波に及ぼす影響を数値シミュレーションで解析している。そして、本調査地の被災前の立木密度と同じ2000~2500本/haの場合、浸水被害に関係する浸水深を5~6割に、流体力による被害に関係する流速は4~6割に低下させることを示している。つまり、このシミュレーションと同じ波高が3 m程度の津波であれば、本調査林では浸水深や流速が低下するため、津波の被害が軽減されると考えられる(原田, 2003)。

ところが、いずれの調査区でも被害の形態は個体サイズが同じであれば調査区の汀線側と内陸側でほぼ同様であった。したがって、被害の形態からは今回の津波では林帯の汀線側と内陸側でほぼ同じ波力であったと考えられ、林帯によってそこを通過する津波の波力が減殺される効果は認められなかった。

海岸林地帯は農業、工業、公園など多用途に利用されてきた(河合, 1992)ため、現在ある海岸林の林帯幅をこれ以上拡大することは困難な場合が多いと考えられる。したがって、今回の津波の様な大きな津波の被害を軽減するためには、現在ある林帯幅を可能な限り維持すると共に、海岸林を構成する樹木の津波に対する耐性を高める必要があると考えられる。

本調査林ではクロマツが折損被害を免れる強度を

持つに至らない(首藤, 1985)若齢段階のものが主要な構成木であったことが示された。成長し、大径になるほど折損被害を免れる強度が増していくことから、日頃から密度管理を適切に実施して肥大成長を促進することが重要である。

また、今回の調査地においては根系の発達が悪かったことが明らかになった。これに対し、盛土は地下水の影響を受けない土層厚を厚くする(小田, 2000)ことから、根系の発達を促す手段として有効であると考えられる。

引用文献

- [1] 原田賢治(2003): 海岸林による津波の減災効果の評価について, 林業技術 741, pp.12-15
- [2] Harada, K., Kawata, Y. (2004): Study on the Effect of Coastal Forest to Tsunami Reduction, Disaster Prevention Research Institute Annuals.47C, pp.273-279
- [3] Hayashida, M., Sakamoto, T., Okada, M., Inoue, S., Yanagihara, A., Akojima, I. and Nakashima, Y. (2009): Endurance of the Casuarina coastal forest in southern Sri Lanka against the Indian Ocean Tsunami, Journal of the Japanese Society of Coastal Forest 7(3), pp.1-5
- [4] 橋岡伸守(1992): 制度と施業方針, 日本の海岸林, ソフトサイエンス社, pp.32-49
- [5] 苅住昇(1979): クロマツ, 樹木根系図説, 誠文堂新光社, pp.562-564
- [6] 河合英二(1992): 海岸林と土地利用, 日本の海岸林, ソフトサイエンス社, pp.20-31
- [7] 川名明(1966): 堤列海岸平野の低地過湿林の改良に関する研究, 東京農工大学演習林報告 4, pp.1-115
- [8] 菊池俊一・渡部公一・佐藤恒治・須藤泰典・上野満・齊藤正一・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, 日本海岸林学会石巻大会講演要旨集平成23年度, pp.11-12
- [9] 見附敬三・村上仁士・細井由彦(1984): 津波の海岸堤防における越波および陸上遡上特性について, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第2部 39, pp.347-348.
- [10] 水谷将・今井文彦(2002): 津波段波の衝撃性および越流を考慮した設計外力算定フローの提案, 海岸工学論文集 49, pp.731-735
- [11] 村井宏(1983): 日本海中部地震津波の被災事例, 林業技術 501, pp.15-18
- [12] 村上仁士・細井由彦・島田富美男・三野英樹(1988): 堤越波時および越波後の津波の水位, 流速の特性に関する基礎実験, 海岸工学講演会論文集 35, pp.592-596.
- [13] 小田隆則(1979): 海岸クロマツ林の生長と密度について(Ⅲ)一クロマツ根系の分布と量一, 日本林学会大会発表論文集 90, pp.459-461
- [14] 小田隆則(1992): クロマツ林の密度管理, 日本の海岸林, ソフトサイエンス社, pp.402-405.
- [15] 小田隆則(2000): 砂丘海岸林の低湿地におけるクロマツ根系の分布特性からみた必要盛土厚, 日本砂丘学会誌 47(2), pp.102-110
- [16] 小田隆則(2001): 九十九里浜クロマツ林における集団枯損の立地要因, 日本砂丘学会誌 48(1), pp.7-16
- [17] Okada, M., Sakamoto, T., Hayashida, M., Inoue, S., Yanagihara, A., Akojima, I. and Nakashima, Y. (2009): The damage caused by the 2004 Indian Ocean tsunami and the mitigating effects of the mangrove forest against

- the tsunami-A case study of Medilla, Southern Sri Lanka-,
Journal of the Japanese Society of Coastal Forest 7(3),
pp.7-13
- [18] 四手井綱英・渡邊隆司(1948):昭和 21 年南海地震に於ける和歌山縣防潮林効果調査, 林業試験場集報 57, pp.97-133
- [19] 首藤伸夫(1985):防潮林の津波に対する効果と限界, 海岸工学講演会論文集 32, pp.465-469
- [20] 首藤伸夫(1992):津波強度と被害, 津波工学研究報告 9, pp.101-136
- [21] 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, 日本海岸林学会石巻大会講演要旨集, 平成 23 年度, pp.9-10
- [22] 田中規夫・佐々木寧(2005):スリランカ南部海岸線におけるインド洋大津波被害実態調査, 埼玉大学紀要工学部 38, pp.66-73
- [23] 田中規夫・佐々木寧(2006):スリランカ南部海岸線におけるインド洋大津波被害実態調査(その2)-海岸林の破壊限界モーメントに注目して-, 埼玉大学紀要工学部 39, pp.58-65
- [24] 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, 日本海岸林学会石巻大会講演要旨集, 平成 23 年度, pp.17-18

[受付 平成24年 2月15日, 受理 平成24年 7月 4日]