

社団法人国土緑化推進機構
「緑と水の森林基金」事業助成

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)

平成 24 年 1 月

森林保全・管理技術研究会

目 次

はじめに—津波と海岸林に関する調査研究事業について—	1
----------------------------	---

第1章 津波と海岸林に関する資料の収集・分析（河合英二）	9
------------------------------	---

1. 過去の調査報告書による海岸林、防潮林の高潮、津浪に対する効果	9
2. これまでの分析、実験、数値シミュレーション等による減災効果	10
3. 人工盛土（植栽基盤）と海岸林造成の組み合わせによる津波減災効果	17
3-1 盛土と海岸林の選択	
3-2 参考資料：防潮林・樹木の津波軽減機能に関し提案された数式	
4. 行政機関復興計画情報の概要	32
4-1 「減災」という考え方（東日本大震災復興構想会議：内閣府中央防災会議）	
4-2 防波堤による減災効果（交通政策審議会港湾分科会防災部会：国交省）	
4-3 津波の規模や発生頻度に応じた防災・減災目標の明確化（東日本大震災復興構想会議：内閣府中央防災会議）	
4-4 広域類型と復興のための施策（東日本大震災復興構想会議：内閣府中央防災会議）	
4-5 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 報告（案）要点	
4-6 海岸防災林の再生方針（東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会：林野庁）	
4-7 東日本大震災の津波被災現況調査結果（第2次報告）（国交省）	
4-8 過去に高地移転等の措置が取られた地域における今回の被災状況（内閣府）	
5. 津波被害画像公開サイト	46

第2章 東北地方太平洋沖地震による海岸林の効果と被害について	51
--------------------------------	----

第1節 衛星画像解析による津波被害の把握（越智士郎、野々口義延）	51
1. はじめに	51
2. 分析手順	52
2-1 被災前 衛星画像	
2-2 被災後衛星画像	
2-3 パンシャープン画像の作成	
2-4 被災した可能性のある地域の切り出し	
2-5 NDVI による被害度の比較	
2-6 被害分布図の作成	
2-7 集計結果	
3. 考察	69

第2節 現地調査報告（大野亮一）	71
1. 被災した海岸林の特徴	71
2. 現地踏査概況	73
2-1 岩手県陸前高田（高田松原）	
2-2 宮城県気仙沼南部（大谷海岸）	
2-3 宮城県石巻南部（矢本海岸）	
2-4 仙台荒浜地区	
3. 流木にみる根系分布の特徴	89
3-1 健全分布型	
3-2 中央集中型	
3-3 多分岐型	
3-4 無垂直根型	
3-5 まとめ	
第3節 海岸林の被災状況の把握（渡邊悦夫）	93
1. 現地調査	93
1-1 調査箇所	
1-2 調査時期	
1-3 調査内容	
1-4 調査方法	
1-5 調査結果	
2. 海岸林の被災状況	102
2-1 気仙沼市大谷海岸	
2-2 石巻市長浜	
2-3 岩沼市寺島	
2-4 その他（委員会現地視察地）	
3. 海岸林の有無と後背地被災状況の比較検討	116
3-1. 海岸林の被害度を定める要因と被害状況	
3-2. 石巻市長浜における海岸林の効果	
3-3. 海岸林被災状況と後背地被災状況の関係	
第4節 クロマツ引き倒し試験の結果（北原 曜）	121
1. クロマツ引き倒し試験の必要性	121
2. クロマツ引き倒し試験の対象地と方法	122
3. 試験結果と考察	123

第3章 海岸林の復旧にあたって	127
第1節 防潮林造成にあたっての提言（北原 曜）	127
第2節 復旧計画の中での海岸林のあり方（河合英二）	129
1. 海岸林、防潮林の幅（厚み）について	129
2. 津波被害軽減効果を発揮する海岸防災林の配置・構造について	132
3. 津波による被災地域の人工盛土工と海岸防災林の造成方法	133
3-1 人工盛土工造成上の問題点1：地下水位と盛土高さ	
3-2 人工盛土工造成上の問題点2：土壌硬度	
3-3 東北地方地震津波災害における海岸林の効果	
3-4 一般論としての地盤沈下、津波浸食による海浜の消失と住民移転の意向	
3-5 津波対策（多重防御）として望ましい海岸林の再生と復旧、整備	
第3節 提言（沢田治雄、越智士郎）	147
1. 平野部海岸林	148
1-1 200m 程度の幅広の林帯が確保できる場合	
1-2 十分な幅の林帯が確保できない場合	
2. リアス式海岸内低地部	153
3. リアス式海岸沿岸部	154
4. 平野部内陸林	156
5. その他の課題	159
第4節 提言（渡邊悦夫）	160
1. 市街地・農地等復旧計画における海岸林の配置のあり方	160
2. 津波被災跡地等における海岸林の造成、改良技術について	160
2-1 基本的な考え方	
2-2 林分構造	
2-3 地盤	
2-4 構造物（防潮堤、防潮護岸）	
第5節 海岸林の造成管理について造林・生態的観点からの配慮すべき点（藤森隆郎）	163
1. 樹冠構造と幹の成長との関係	163
2. 立木密度と成長との関係	163
第6節 海岸防災林の再生に向けて（太田猛彦）	169
1. 被災地復興計画と海岸林再生事業の関係	169
2. 海岸防災林再生事業の実施に当たって	170

第4章 ボラティア活動のためのやさしい海岸林植栽の手引き	173
1. 海岸林植栽の手引	174
1-1 苗木の植栽作業の準備	
1-2 苗木の取り扱い	
1-3 植え方	
2. 海岸林、森林に関する知識	179
3. 津波の基礎知識	185
おわりに	189

はじめにー津波と海岸林に関する調査研究事業についてー

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は、近來にない大規模な津波を発生させ、500km に及ぶ沿岸部に未曾有の被害をもたらしている。海岸林は、古来、津波の勢いを減速させることなどにより、後背地の農地、建物等への被害を軽減させる機能を有するといわれている。しかるに、今回の津波では、高田の松原が壊滅的な状態になるなど、海岸林の被害も甚大である。

今後の東日本大震災の復旧にあたって、海岸林のあり方が重要な課題となることに鑑み、森林保全・管理技術研究会は国土緑化推進機構の緑と水の森林ファンドの助成金により、津波と海岸林に関する調査研究事業を実施したところである。本調査研究事業は、森林保全・管理技術研究会に「津波と海岸林に関する調査研究委員会」を設置して行ったところである。

本調査研究事業が取り上げた課題は、①津波と海岸林に関する資料、文献の収集・分析、②東北地方太平洋沖地震による海岸林の効果と被害についての調査検討、及び、③復旧計画の中での海岸林のあり方に関する調査検討である。さらに、今後ボランティアによる海岸林造成が行われることが予測されることから、ボランティア活動のための海岸林植栽の手引きを取りまとめることとした。

各課題の具体的な内容は次のとおりである。

- (1) 津波と海岸林に関する資料の収集・分析
 - ① 過去に発生した津波と海岸林に関する資料、文献
 - ② 津波と海岸林に関する研究論文、知見等
- (2) 東北地方太平洋沖地震による海岸林の効果と被害についての調査検討
 - ① 衛星画像解析による津波被害の把握
 - ② 現地調査による津波被害の把握
 - ③ 海岸林の有無と後背地被災状況の比較検討
- (3) 復旧計画の中での海岸林のあり方に関する調査検討
 - ① 市街地・農地等復旧計画における海岸林の配置のあり方
 - ② 津波被災跡地等における海岸林の造成、改良技術について
- (4) ボランティア活動のための海岸林植栽の手引きの作成

本調査研究事業は、津波と海岸林に関する調査研究委員会委員及び研究会事務局メンバーを中心に、委員会での討議、現地調査、衛星画像分析の委託等により実施したところであり、その詳細は参考資料 1～5 の通りである。

なお、本報告書の記述については必ずしも委員ほか関係者の意見を調整し合意を得て作成したものではなく、執筆担当者の見解の下に書かれたものが多々あることを申し添えておく。

[参考資料1] 森林保全・管理技術研究会規約

(名称)

第1条 本会は「森林保全・管理技術研究会」（以下「研究会」という）と称する。

(目的)

第2条 研究会は、森林保全・管理技術研究開発事業を効率的に実施することを目的として設置する。

(事業の内容)

第3条 路網整備と森林施業技術体系、山地災害対応技術、森林環境保全技術等の研究開発及び森林保全・管理技術データベースの作成（以下「研究開発等」という。）を行い、その成果を広く森林技術者へ普及啓発する。

(研究会の構成)

第4条 研究会は、研究会の目的に賛同する森林技術の各分野の学識経験者を幹事として委嘱する。

2. 研究会に会長を置く。会長は幹事の中から互選する。
3. 研究会に監事をおく。監事は研究会の会計を監査する。

(幹事会)

第5条 研究会に幹事会を置く。

2. 幹事会は、事業計画、収支、その他研究会の運営に関する重要な事項を決議する。
3. 幹事会の決議は出席した幹事の過半数の賛成をもって決する。

(委員会、部会)

第6条 研究会に、森林保全・管理技術研究開発委員会及び津波と海岸林に関する調査研究委員会（以下「委員会」という。）を置き、事業実施の統括を行う。

2. 委員会に、必要に応じ個別課題ごとに部会又はワーキンググループを置き、当該課題の研究開発等を実施する。

(評価委員会)

第7条 研究会に、森林保全・管理技術研究開発事業評価委員会（以下「評価委員会」という。）を置き、事業の成果を評価するとともに、委員会に研究開発等の進め方等について助言する。

(事業年度)

第8条 研究会の事業年度は毎年9月1日に始まり、翌年8月31日に終わる。

(事務局)

第9条 研究会の事務局は、一般社団法人森林技術コンサルタント協議会に置く。

(雑則)

第10条 本規約の改廃は、幹事会において3分の2以上の賛成で決める。

附則 この規約は、平成23年7月26日から施行する。

[参考資料2] 森林保全・管理技術研究会構成員名簿

会長	鈴木 雅一	東京大学教授
幹事	服部 重昭	名古屋大学教授
	酒井 秀夫	東京大学教授
	弘中 義夫	森林・自然環境技術者教育会理事
	梶谷 辰哉	国土緑化推進機構専務理事
監事	山田 壽夫	治山治水協会専務理事

[参考資料3] 津波と海岸林に関する調査研究委員会名簿

委員長	北原 曜	信州大学教授
委員	太田 猛彦	東京大学名誉教授
	大野 亮一	国土防災技術株式会社
	河合 英二	元森林総合研究所領域長
	原田 賢治	静岡大学防災総合センター準教授
	沢田 治雄	東京大学生産技術研究所教授
	藤森 隆郎	元森林総合研究所部長
	渡邊 悦夫	株式会社森林テクニクス
執筆者等	越智 士郎	東京大学生産技術研究所特任研究員
	野々口 義延	グリーン航業株式会社

[参考資料4] 津波と海岸林に関する調査研究委員会等の開催

I. 津波と海岸林に関する調査研究委員会（第1回委員会）

日時：平成23年6月6日(月)12:00～14:30

場所：林友ビル6F 中会議室

議事次第

1. 開会
2. 委員長挨拶
3. 議事
 - (1) 津波と海岸林に関する調査研究事業について
ー国土緑化推進機構への助成申請ー
 - (2) 津波と海岸林に関する調査研究事業の進め方について
 - (3) 津波と海岸林に関する調査研究事業の進捗状況
 - 1) 津波と海岸林に関する資料の収集・分析
 - 2) 東北地方太平洋沖地震による海岸林の効果と被害についての調査検討
 - 3) 復旧計画の中での海岸林のあり方に関する調査検討
 - (4) 津波と海岸林に関する調査研究事業の今後の予定
 - 1) 現地調査について
 - 2) 復旧計画の中での海岸林のあり方に関する調査検討
(第2回委員会)
 - (5) その他
4. 会長挨拶
5. 閉会

◎配布資料

1. 津波と海岸林に関する調査研究委員会
2. 津波と海岸林に関する調査研究事業について
3. 津波と海岸林に関する調査研究事業の進め方について
4. 海岸林、防潮林の高潮、津浪に対する減災効果（摘要）
5. 森林（防潮林）の防潮機能（津波緩衝機能）
6. 森林保全・管理技術研究会規約
7. 津波と海岸林に関する調査研究委員会名簿

II. 津波と海岸林に関する調査研究委員会打合せ会

日時：7月21日(木) 13:30～17:00

場所：日本森林技術協会 4階中会議室

[検討項目]

- (1) 先日の現地調査で気付いたこと。
 - (2) 報告書取りまとめにあたってのご意見。
- 特に、
- 1) 海岸林の有無と後背地被災状況の比較検討

- 2) 復旧計画の中での海岸林のあり方に関する調査検討
 - ①市街地・農地等復旧計画における海岸林の配置のあり方
 - ②津波被災跡地等における海岸林の造成、改良技術について
- (3) これから、大野委員、渡邊委員にお願いする現地調査の具体的な調査事項
- (4) 原田委員にお願いする海岸林（内陸部を含む）造成効果のシュミレーションのための、
 - ① 条件設定（どこにどのような森林を造成すかなどの条件設定
 - ② モデル地区の選定及び必要な現地地形等調査について

Ⅲ. 津波と海岸林に関する調査研究委員会（第2回委員会）

日時：平成23年10月31日(月)14:00～17:00

場所：日林協会館4F 中会議室

議事次第

1. 開会
2. 委員長挨拶
3. 議事
 - (1) 津波と海岸林に関する調査研究事業報告書の取りまとめについて
(別紙：報告書レジュメ及び執筆分担)
 - (2) 津波と海岸林に関する調査研究事業報告書原稿の検討
(別紙：報告書レジュメ及び原稿リスト)
 - (3) 報告書作成方針について
 - (4) 津波と海岸林に関する調査研究事業報告会(仮称)について
 - (5) その他
4. 閉会

◎配布資料

1. 津波と海岸林に関する調査研究委員会(第2回)議事次第
2. 報告書レジュメ及び執筆分担
3. 報告書レジュメ及び原稿リスト
4. 報告書原稿(資料1～資料10)

[参考資料5] 現地調査

I. 津波と海岸林委員会現地調査（第1回）

◎ 日程

【1日目】6月30日(木)

一ノ関駅 → 〈途中気仙沼市内を車中視察〉 大谷海岸 → 古川市内泊

13:09 着 13:30 発

15:30 着 16:30 発

18:30 着

【2日目】7月1日(金)

古川市内 → 石巻女子校裏 → 矢本海岸 〈途中昼食〉

荒浜地区 →

仙台駅

8:00 発

10:00 着 10:30 発

11:00 着 12:00 発

14:30 着 15:30 発

16:00 着

◎ 調査の内容 本文第二章

◎ 参加者名簿

	氏 名	所 属
委員長	北原 曜	信州大学教授
委員	太田 猛彦	東京大学名誉教授
	大野 亮一	国土防災技術株式会社
	河合 英二	元森林総合研究所領域長
	沢田 治雄	東京大学生産技術研究所教授
	原田 賢治	静岡大学防災総合センター准教授
	渡邊 悦夫	株式会社森林テクニクス
オブザーバー	渡辺 太一	日本森林技術協会
事務局	弘中 義夫	森林保全管理技術研究会
	根橋 達男	森林部門技術士会会長
	越智 士郎	東京大学生産技術研究所特任研究員
	野々口 義延	グリーン航業株式会社
現地案内役	田中 三郎	国土防災技術株式会社

II. 津波と海岸林委員会現地調査（第2回）

目的 海岸林および内陸樹林地における「仙台平野型被害」および「リアス海岸型被害」の実態を把握し、リモートセンシング画像分析のための現地検証情報を収集する。

日程 平成23年9月21～24日（3泊4日）

参加者

越智士郎（東京大学生産技術研究所特任研究員）
沢田治雄委員（東大生研・教授）
三塚直樹（東大生研・研究員）
中尾悠士（東大生研・大学院）
石川達也（東大生研・大学院）

行程

- 21日（水）10:00 北上駅集合。レンタカーにて遠野東大震災プロジェクト
オフィスに移動。
12:00 打ち合わせ。現地状況確認。
13:00 釜石港、大槌町視察。
17:00 釜石市内泊
- 22日（木）8:00 釜石港付近海岸林にて土壌調査など。
10:00 三陸町、大船渡周辺方面へ移動、視察。
陸前高田、気仙沼周辺視察。
17:00 南三陸町・志津川泊
午後 山元町役場にて津波高の聞き取り。その後、現地調査。（仙台泊）
- 23日（金）8:00 志津川周辺視察、石巻へ移動。
10:00 石巻女子商業高校裏マツ林にて土壌調査。
13:00 石巻・矢本海岸視察、仙台へ移動。
16:00 仙台市・荒浜海岸視察。
17:00 仙台市内泊。
- 24日（土）8:00 岩沼市周辺視察。
11:00 山元町役場訪問。
13:00 山元町周辺視察、福島へ移動。
17:00 福島駅にて解散。

調査項目

- 被災した海岸林において、森林の様態と被害程度、土壌、地下水位に関するデータを取得する。
- リアス海岸、仙台平野部海岸林および内陸樹林地における被害状況の概要を把握し、リモートセンシング画像と照合するための現地情報（写真、グランドトゥールース）を取得する。
- 海岸林および樹林地の減災効果に関して聞き取り調査により情報収集を行う。

調査結果概要

- 被災した海岸林数11地点において、（添付資料1）に示した様式でデータを取得した。データ分析結果については、報告書において考察する。

第1章 津波と海岸林に関する資料の収集・分析（河合英二）

海岸砂丘地帯では不安定な砂地を安定させ、砂の移動をとめるため海岸林帯を造成することが最も適切な方法として古くから行われてきた。戦後、海岸林は開墾地や畑地などの保護地帯を飛砂、潮風・強風、霧の害から守ることを主な目的として積極的に造成されてきた。また、高潮や津波来襲の際の調査で、高潮、津波に対する減災効果があることも認識されている。

海岸林が諸害を軽減する場合、自ら害を受けながら内陸側の対象部を保護する。したがって、海岸林は保護対象物を絶対的に保護するものではなく、被害を軽減する働きをし、受ける力が大きい場合はその効果の限界もある。

過去の高潮、津浪災害について多くの調査報告書等がある。しかし、地震津波は頻繁に発生する災害でないことや現象が複雑でデータの解析が難しいため理論的解析が少ないのが現状である。近年、海岸工学の分野で、水路実験等の数値計測を通して解析が行われるようになってきた。この報告は過去に起きた地震津波に関する海岸林の効果の分析、3.11東北地方太平洋沖地震による津波に及ぼした海岸林の影響分析、海岸林復興のための提案について報告する。

1. 過去の調査報告書による海岸林、防潮林の高潮、津浪に対する効果

過去の実態調査結果を総合すると海岸林の津波減災機能、効果は次のように考えられる。

- ①樹幹の摩擦抵抗により林内に浸入した津浪・高潮の流速、エネルギーを低下させる。また、津波の到達時間を遅らせる。
- ②津波による漂流物の移動を林帯等で阻止し、漂流物によって生じる二次的災害を軽減、阻止する。
- ③高潮の跳波による破壊を軽減、阻止する。
- ④林帯が飛砂を軽減し、砂丘の移動を防いで海岸に高い地形を保つことによって、津浪、高潮に対する障壁となって浸入範囲を減少させる。
- ⑤一度津波にさらわれた人が引波に流されないように樹木につかまり津波をやり過ごす樹木へのすがりつき、つかまり効果である。明治三陸地震（1896）、南海地震（1946）に風俗画、体験談として残っている。
- ⑥海岸林の保安林制度の効果：潮害防備林として指定されている面積は全国で13,500ha前後である。また、海岸地帯の保安林は約130,000haと推定される。海岸林を保安林指定することにより、海岸地帯より人間活動の場を遠ざけ、結果的に人的災害を軽減する（例えば、1983年日本海中部地震等）。

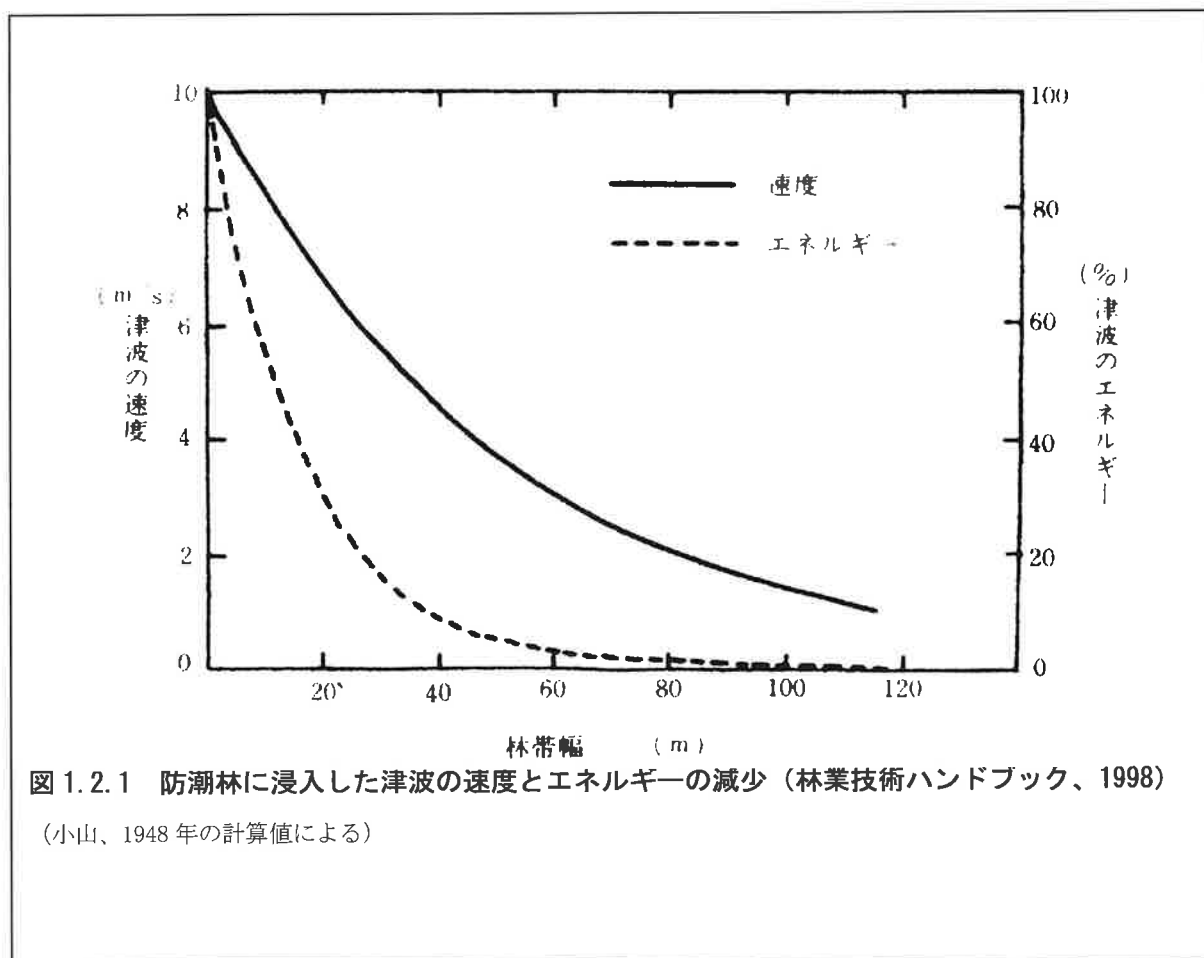
⑦林帯によって潮風内の塩分を吸着することによって農作物、果樹の被害を軽減する。

津波のエネルギーが大きいと植栽基盤ごと洗掘され倒木に至ることが多い。植栽基盤の浸食を軽減するため、防潮林と盛土工事、護岸工事の組み合わせが必要である。また、林帯内の作業道、道路は一直線にせず、S字状に曲げる等の工夫が必要である。さらに、林帯が途中で途切れた個所や疎林状態の個所で被害が大きいため、林帯は一様に整備しなければならない。

2. これまでの分析、実験、数値シミュレーション等による減災効果

(1) 最も古い理論値としての計算例（小山 悌、1948）

小山は樹木の胸高直径：20cm、立木密度：2,000本/ha、津波流速：10m/s、樹幹抵抗係数：1.0と仮定して計算した。その結果、津波の流速は林帯幅が40mあれば50%以下にエネルギーは10%以下に減少する。また、40m幅（厚）の林帯を40m間隔で多数並列することが効果的である。



(2) 水路による模型実験（中野ら，1966）

津波は林帯前面である程度貯留されるため、林帯前面における波高は林帯が無い場合に比べ増加する。したがって林帯通過後の波高は林帯幅（厚）が40m位までは林帯のない場合に比べ大きい。40m以上になると幅の増加に伴って減少し、180m幅になると50%程度になる。また、津波の動圧力は林帯幅が増すにつれて指数関数的に減少し、林の前縁から30-40mの間で大きく減少する。

(1)、(2)の結果から、与えられた津波規模では、幅の狭い林帯（20-40m）では津波の水位の低下は望めないが、流速あるいは破壊力の低下は期待できる。

(3) 林帯幅と防潮林の関係、浸水深の影響（首藤，1985）

過去の調査報告から43地点を分析した。林帯の平均値は胸高直径13cm（樹齢25年、樹高10.5m）、立木間隔1.6m、林帯幅23mである。

- ・ 漂流物の移動を阻止できる防潮林の限界胸高直径 d と津波の浸水深 H の関係を解析し、2つの曲線で提示した。直径 d (cm)、津波浸水深 H (m) とすると $d \leq 10$ で $H=4.65$ cm、 $d \geq 10$ で $d=0.1H^3$ の数式で与えられ d 以下の場合、樹木は津波に対し無効かである。 $d=0.37H^3$ 以上の d の場合、悪条件でないかぎり切断も倒伏もしない。
- ・ 小山（1948）の式で20%の土砂を含んだ海水が樹木に当たり、曲げせん断で折損する場合の d （限界胸高直径）は首藤が解析した経験的値に近似していた。小山が導いた $d = VH/150$ を変形し、流速 $V = \sqrt{gH}$ で与えられると仮定すると、 $d = 2.09 \times 10^{-2} H^{3/2}$ となり、図1.2.2（首藤）の点線に表示される。
- ・ 林帯幅と浸水高を基に a、b、c の3領域にわけて防潮機能、防潮林の限界等について分析した。（図1.2.3）a領域は浸水高が3m以下で帯幅20m以下の条件である。ここでは主林木が折損、倒伏の被害を受けることはない。林帯幅が狭いので流勢緩和効果は期待できず、漂流物の阻止は期待できる。
 - b領域は浸水高が3~4.65mのb-1領域と4.65m以上のb-2の副領域に分けられる。
 - b-1領域では樹木の倒伏が生じるが、条件によっては漂流物の阻止を期待できる。
 - c領域は折損し防潮林の効果は期待できない。

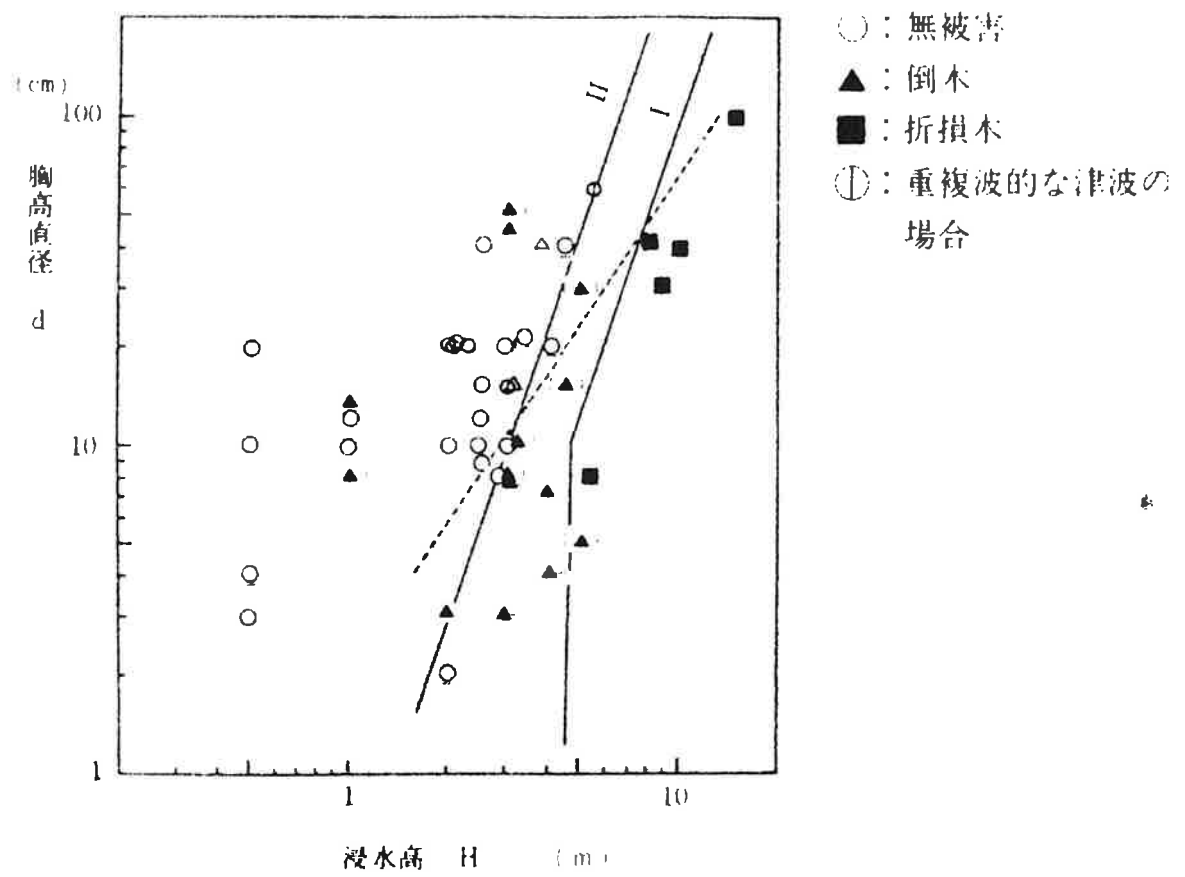
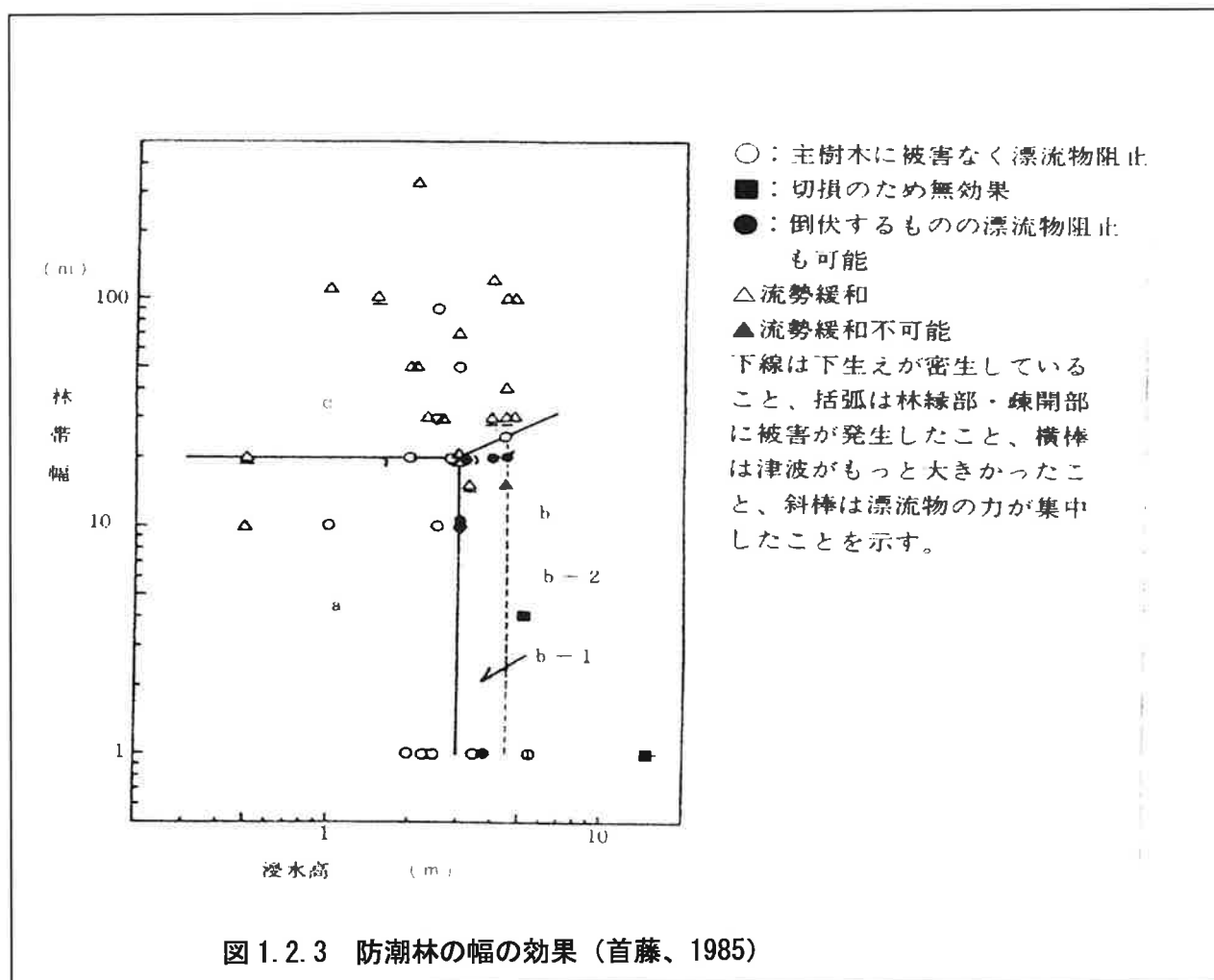


図 1.2.2 津波による防潮林主林木の被害（首藤、1985）



(4) 林による津波対策法の適用性 (平石哲也ら、2001)

水路実験によりマンゴー、ココナツの植林 (グリーンベルト) の効果を解析した。最大津波を発生させた条件では、グリーンベルトにより、水位は背後で約 1/2 に減衰、波圧は 40% に低下、流速値は最大で 70% に減衰した。津波高が沖合いで 5m になる条件では、植栽本数 36 本 (1 本 / (4.0 × 4.0m)) 以下ではグリーンベルト前後の波圧比は変化せず、樹木密度を大きくしないと大型の津波には効果が表れない。現地では樹木間隔 2.5m で 12 列 (25m 幅) の列数があるのが望ましい。

(5) 防潮林模型を用いた水理実験 (原田賢治ら、2003)

防潮林模型を用いた水理実験により、抗力係数モデルを示した。また、現地調査等と数値計算から防潮林の津波減衰効果と利用の可能性について検討した。

・抗力係数は水深変化に伴う葉部の影響による体積占有率の変化に比例する抗力係数モデルとして得た。模型は縮尺 1/10、直径 0.2m、密度 3,00 本 / ha を想定した。

・実験条件：東北地方の防潮林の平均値を求め、防潮林模型とした。地形勾配は仙台港の代表的勾配を採用した。林帯の厚みは50～400mの4段階にした。森林の立木密度と胸高直径は現実の林分に対応させ、「密度：1,000本/ha、胸高直径： $d=0.3\text{m}$ 」、「3,000本/ha、 $d=0.15\text{m}$ 」、「5,000本/ha、 $d=0.1\text{m}$ 」の3条件とし、葉部投影面積比0.65、樹高10m、枝下高5mとした。抵抗係数は計算メッシュサイズに合わせて用いた。

表 1.2.1 海岸林の定量的津波低減効果（原田ほか、2003）

			津波波高 (m)		
			1	2	3
海岸林の破壊限界 (首藤, 1985)			被害軽減, 漂流物阻止, 津波軽減		
遡上距離	海岸林幅	50m	0.89	0.86	0.81
		100m	0.83	0.80	0.71
		200m	0.79	0.71	0.64
		400m	0.78	0.65	0.57
浸水深	海岸林幅	50	0.86	0.86	0.82
		100	0.76	0.74	0.66
		200	0.46	0.55	0.50
		400	---	0.11	0.18
流速	海岸林幅	50	0.71	0.58	0.54
		100	0.57	0.47	0.44
		200	0.56	0.39	0.34
		400	---	0.31	0.24
水流圧力	海岸林幅	50	0.53	0.48	0.39
		100	0.33	0.32	0.17
		200	0.01	0.13	0.08
		400	---	0.02	0.01

・津波浸水深が約 4m を越えると樹木が折損や破壊の被害を受ける（首藤、1985）ため、入射波として樹木破壊を考慮しない入射波高 0.45、0.90、1.2m、周期 10 分の sin 波を入力した。これらは本数計算方法では浸水深が 1、2、3m になる。津浪数値計算方法としては Morison 式にもとづいた抵抗値を加えた。

・防潮林幅の効果：入射波高 3m、立木密度 3,000 本/ha の条件で、林帯幅に伴う抵抗の増加により、浸水深は低減率（ r ）は、林帯幅 50m： $r=1.0$ として、400m の時 $r=0.18$ まで低下した。流速の低減率は、50m： $r=0.54$ から 400m： $r=0.24$ にまで大きく減少した。

・立木密度の効果：幅 50m の条件で比較すると、浸水深の低減率は密度による影響がほとんど見られない。流速については密度の増加に伴い低減率が低下して、津波減衰効果が若干大きくなった。

・数値計算結果を整理したところ防潮林の幅の増加により、遡上距離、浸水深は低減率が低下し効果があることがわかったが、津波波高に対する影響は小さい。また、幅の増加による流速の低減率は水位と比較して大きな数値であった。さらに水流圧力の低減率は最も大きく、林帯幅の増加による流体力低減効果は大といえる。

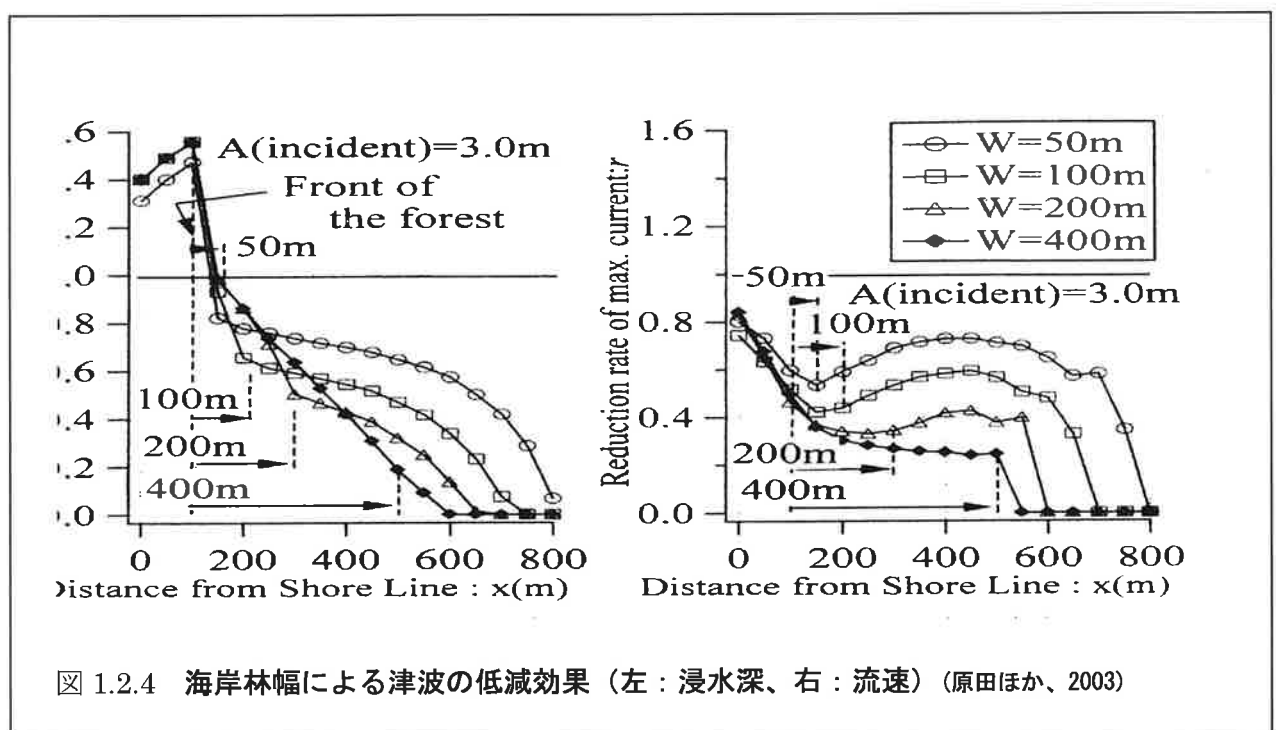


図 1.2.4 海岸林幅による津波の低減効果（左：浸水深、右：流速）（原田ほか、2003）

以上のことから防潮林により浸水被害を軽減させる効果に加え、津波流体力による被害を軽減させる効果を期待できる。

全ての沿岸地域に長大なる構造物による津波対策は不可能である以上、防波堤や防潮堤等の対策と防潮林を組み合わせることにより減災効果を強化して利用することが有効である。ただし、防潮林自体が破壊される限界についても理解する必要がある。

(6) 津波防御に対する樹林幅と樹種影響について—インド洋大津波におけるタイでの痕跡調査結果 (田中規夫ほか、2005)

インド洋大津波に対し沿岸植生が果たした役割を樹種 (モクマオウ、フタバナヒルギ、ヒルギダマシ、ココヤシ、カシューナッツ、雑木林)、樹形影響に注目して調査した。

○樹種の特長整理: 樹高、樹間距離、直径の関係を整理した。また、付加係数として枝分かれ、葉面積密度、気根本数の相違点から津波浸水深別に合成抵抗係数を導いた。フタバナヒルギは浅い浸水深の場合に大きな効果を発揮する。

○主要3地点の被害状況:

a) Phra Thong Island と Kang Island: Phra では最大 10m の浸水深を記録し、直径 10cm 程度のモクマオウや一部のココヤシをなぎ倒した。ヒルギダマシの倒伏・破断は端部を除き発生しなかった。Kang では津波高 8m と推定された。別々の島前面で幅 50m と 20m の樹林帯が破壊された。ここではフタバナヒルギの気根の付け根部分の主幹より切断されている例が多い。

b) Ban Thale Nok: 海岸林付近の津波浸水深は 10m 程度と推定された。本来のマングローブ林のある地域は前面部はなぎ倒されたが多くはそのまま残っていた。本来のマングローブ林を開発した程度により住宅地被害に差がみられた。

c) Laem Son National Park 付近: 3 測線で考察した結果、I 測線 (樹林帯入り口付近での津波高さが約 3m) にはモクマオウの巨木 (d 主幹直径 = 0.5–1.0m) が約 200m 幅あったが、樹幹間隔が疎であり津波は樹林帯を通り抜け、途中の家の一部を破壊し、1.8km の地点まで浸入した。測線 II ではモクマオウの若木をなぎ倒し、折れた枝を巨木前面部に蓄積した。一方測線 III では d 約 0.1m のフタバナヒルギは 5m の津波に対して単独でも折れない場合がほとんどである。

○樹形の相違が植生厚み d_n と抗力に与える影響: モクマオウは d_n を用いても首藤 (1985) の結果をおおむね満足している。カシューナッツとヒルギダマシは d_n より一次分岐枝の本数を考慮した d_{Na11} がより適切なパラメータと考える。フタバナヒルギは津波高さが 5m 以下の場合に少ない林帯幅で効果を発揮する (30 本の気根が力を分散させ) が、津波高さ 8m クラスでは破壊される傾向がある。これは密集した樹冠構造により気根上部の細かい幹に働く抗力モーメントが主幹の破断モーメントを上回るためである。有効性判断には、厚みに加えて樹高がある閾値を越えたか否かが重要である。

○気根の発達し、密生した樹種は津波の浸水深 5m 以下で有効であり、10m クラスの津波の場合は、沿岸部にヒルギダマシ、砂浜部は異齢林の混在するモクマオウ樹林帯やモクマオウと太い主幹・枝を形成する低木林の混在する構造が有効と考えられる。

以上をまとめると、防潮林は①平面・垂直の両方向の階層構造、②折れない程度の小直径 (10cm) の木、③流出木を受け止める大直径の木 (混在効果)、④汀線に平行な樹林内ギャップやクリーク、⑤人的被害を軽減する低木の混在等の構造を持つことが必要である。

3. 人工盛土（植栽基盤）と海岸林造成の組み合わせによる津波減災効果

3-1 盛土と海岸林の選択

3.11 東北地方太平洋沖地震の津波において、壊滅的な被害を受けた海岸防災林も多いが、津波エネルギーの減衰効果、津波到達時間の遅延効果が報告されている。また、林帯が残った海岸防災林では、漂流物を捕捉し、林帯の背後に存する人家等の被害を軽減した事例も報告されている。

今後の津波対策として「多重防御」として人工盛土を伴った海岸林の再生が提案されている。ここでは海岸林再生による津波減災効果を数値シミュレーションするための目標林を提案する。盛土上のクロマツ林の成林状態は樹齢 20～60 年間を想定し、過去の文献等から密度、胸高直径、樹高、枝下高等を推定する。

盛土高さ 2～10m、幅 50～400m の範囲にクロマツ林を造成する条件の中でいくつかの樹齢、森林条件を選択する。

しかし、海岸林の立地は置かれている環境に様々な要因（地下水位、季節風、飛砂、土壌肥沃度、林相、除間伐管理手法等）が含まれるため「樹齢」を因子とする成林状態の把握は、現在の海岸林のデータから得るのは困難なのが現状である。

そこで、以下の手順により、クロマツ林況の数値を求めた。なお、海岸林再生には盛土が前提にあるが、植栽されたクロマツは盛土によりその成長にプラス・マイナスがあると推定される。例えば、土壌養分、水分条件は（管理がしっかりされれば）、砂浜に比較しプラスと考えられるが、標高が高くなり風速が強くなること等のマイナスも考えられるがこれらの点はここでは考慮していない。

石川の未発表資料をはじめ既存資料よりおおよそのクロマツ林林況を試算、推定する。

（1）既存文献資料による推定、数値の採用

①. 樹高と樹齢は「石川の各県の林齢と樹高の関係図」より千葉県（太平洋側関東海岸林）を適応する。この図の関係線はアバウトである。しかし他に根拠となる数値が無いことのもあり、これを採用する。

②. 目標林型（立木密度、胸高直径）は「①」で得られた樹高に「坂本の樹冠高に対応した目標本数密度を応用する。この表中の形状比 70、相対密度 65% の数値を適応する。現状の海岸林ではこの目標本数密度より高く、形状比も 70 以上の海岸林が多いと推定されるが、再生される海岸林は今後より適正に管理されるということでこの数値を用いる。

③. 枝下高は「小田、河崎の樹高と枝下率（樹冠率）の関係」を適応する。

④. 林齢は 20～60 年について目標林型の数値化を試みる。

①～④に従って樹齢毎の樹高、枝下高を求めた。

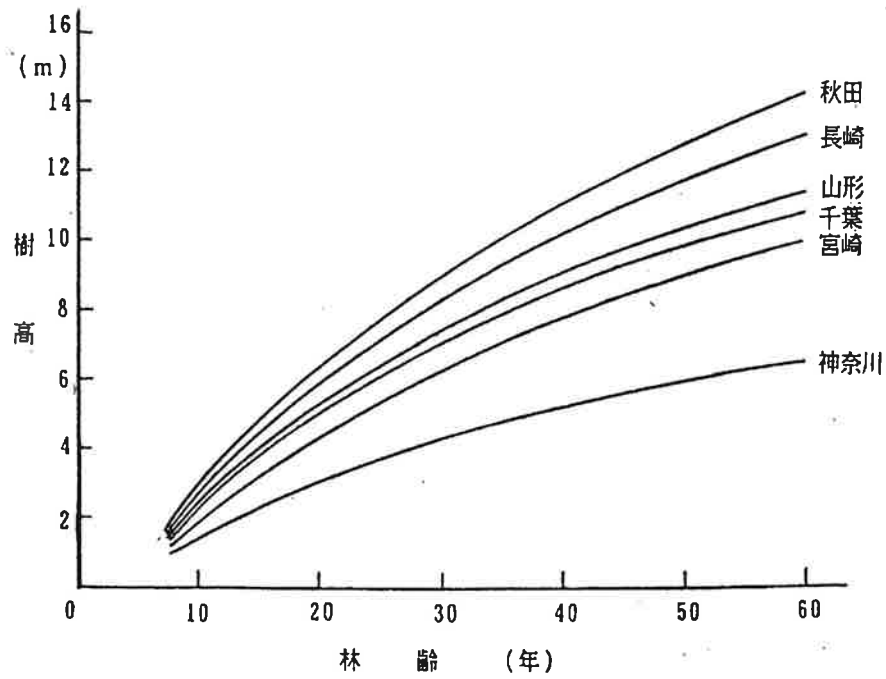


図 3.1.1.1 各県の海岸林の樹齢と樹高との関係 (石川、未発表)

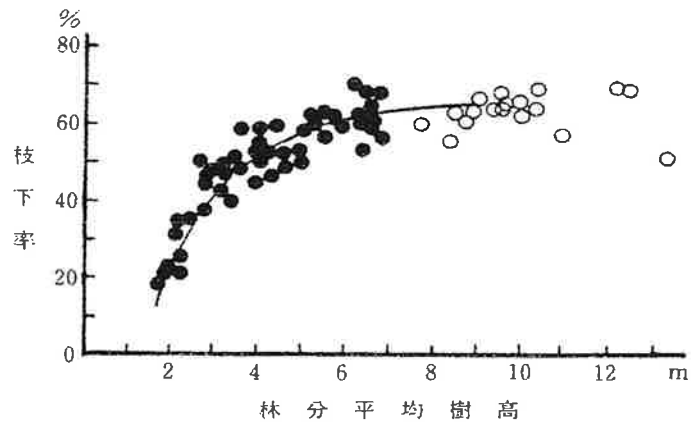


図 3.1.1.2 樹高と枝下率との関係

(黒丸は林齢 10~30 年、白丸は 40~120 年) (小田、1984)

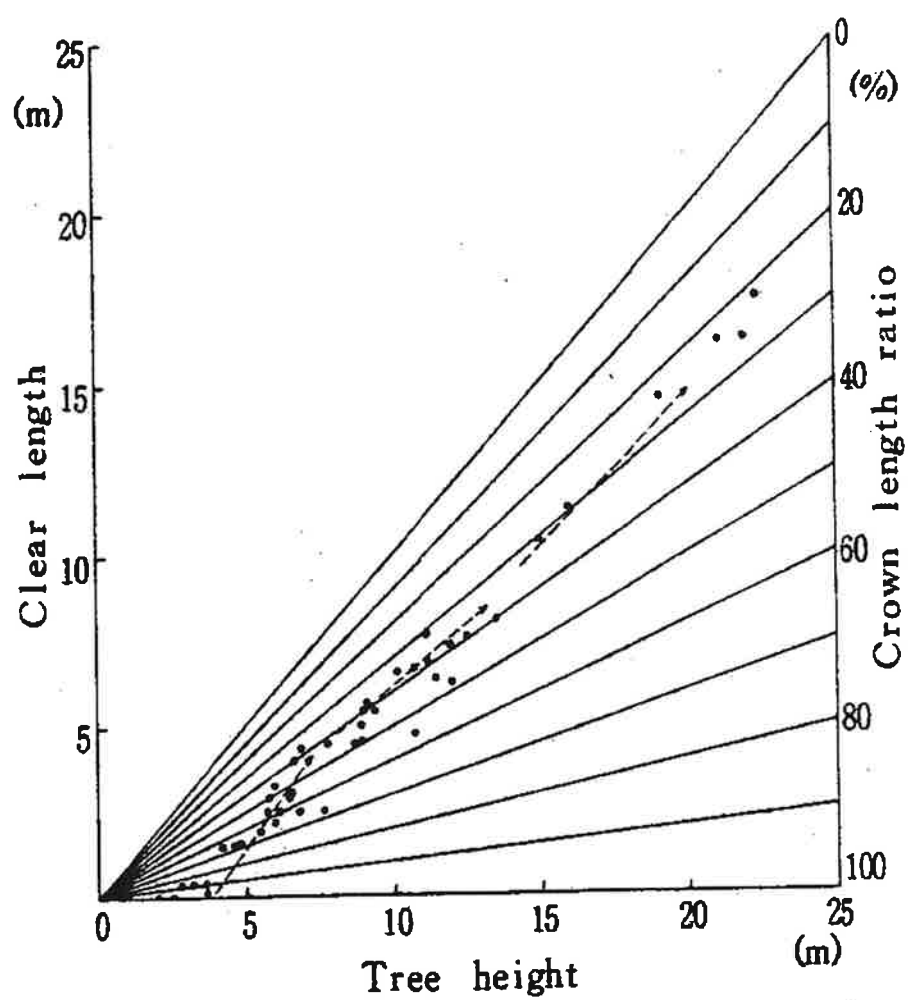


図 3.1.1.3 樹高と枝下高の関係 (河崎、1983)

表 3.1.2.1 樹冠高に対応した目標本数密度（坂本知己ら、2011）

林冠高	平均 胸高 直径	形状比70のとき		形状比60のとき	
		立木本数		立木本数	
		相対密度 55 %	相対密度 65 %	相対密度 55 %	相対密度 65 %
m	cm	本/ha	本/ha	cm	本/ha
3.0	4.3	8,300	9,800	5.0	6,500
3.5	5.0	6,500	7,700	5.8	5,100
4.0	5.7	5,300	6,200	6.7	4,100
4.5	6.4	4,400	5,200	7.5	3,400
5.0	7.1	3,700	4,400	8.3	2,900
5.5	7.9	3,200	3,800	9.2	2,500
6.0	8.6	2,800	3,300	10.0	2,200
6.5	9.3	2,400	2,900	10.8	1,920
7.0	10.0	2,200	2,600	11.7	1,710
7.5	10.7	2,000	2,300	12.5	1,530
8.0	11.4	1,770	2,100	13.3	1,390
8.5	12.1	1,610	1,900	14.2	1,260
9.0	12.9	1,470	1,740	15.0	1,150
9.5	13.6	1,350	1,590	15.8	1,060
10.0	14.3	1,240	1,470	16.7	980
10.5	15.0	1,150	1,360	17.5	900
11.0	15.7	1,070	1,270	18.3	840
11.5	16.4	1,000	1,180	19.2	780
12.0	17.1	930	1,100	20.0	730
12.5	17.9	880	1,040	20.8	690
13.0	18.6	820	970	21.7	650
13.5	19.3	780	920	22.5	610
14.0	20.0	730	870	23.3	570
14.5	20.7	690	820	24.2	540
15.0	21.4	660	780	25.0	520
15.5	22.1	620	740	25.8	490
16.0	22.9	590	700	26.7	470
16.5	23.6	570	670	27.5	440
17.0	24.3	540	640	28.3	420
17.5	25.0	520	610	29.2	400
18.0	25.7	490	580	30.0	390

試算、推定した樹齢と林況は以下の表のようになった。

表 3.2.2.2 目標林型 1(モデル 1)

樹齢	樹高	枝下高(枝下率)	胸高直径*	立木密度(本/ha)*	健全な樹木の下端深
20 年生	5m	2.5m (50%)	7.1cm	4400	(60cm)
40 年生	8m	5.2m (65%)	11.4cm	2100	(90cm)
50 年生	10m	6.5m (65%)	14.3cm	1470	(110cm)
60 年生	11m	7.2m (65%)	15.7cm	1270	(120cm)

* 胸高直径、立木密度は坂本の表より形状比 70、相対密度 65%の数値を引用

(2) 枝下高の修正 1

坂本の密度管理図は早い段階から間伐、本数密度調整を行うことによって、より樹冠長の長い林分に誘導することを目標にしている。上記で試算した目標林型 I は、形状比 70、相対密度 65%の数値であるが、試算に使用した小田、河崎による枝下高の図は間伐手遅れで、高密度で推移したクロマツ林が多くを占めているものと推察される。したがって、目標本数密度の条件下では、枝下高(率)は表 3.2.2.2 の数値より低くなる(樹冠長が長くなる)ことが推察される。金澤ら(1987、1991)の考えを取り入れて修正の試算を行う。その提案式は以下のとおりである。

$$H_B = H_{\max} / \{ a (\rho^{-1/2} \times 100 / H)^b + 1 \}$$

$$= 1 / R_{II} \cdot H \{ a (\rho^{-1/2} \times 100)^b + 1 \}$$

H_B : 枝下高 (m)、 $R_{II} = H / H_{\max} \cong H / D$ (形状比=0.7)

H : 平均樹高 (m)、 $H_{\max}$ = 最大樹高 (=D cm)、

D : 平均胸高直径 (cm)

$a = 11.9517$ 、 $b = 1.4476$ (a 、 b は東海・鹿島・波崎・九十九里、一ツ葉、酒田ほか、東海村の4資料より得られた)

金澤の報告から試算すると以下のような枝下高が得られた。この枝下高を数値シミュレーションの係数として採用することも1案である。

表 3.2.2.3 枝下高の修正 1 (樹高は千葉県の数値を用いた)

樹齢	樹高	胸高直径	立木密度	枝下高 (金澤の式より)
20 年生	5.0m	7.1cm	4400	2.5 (2.29)
30 年生	6.0m	8.6cm	3300	3.0 (2.87)
40 年生	8.5m	12.1cm	1900	4.5 (4.33)
50 年生	9.5m	13.6cm	1590	5.0 (4.97)
60 年生	11.0m	15.7cm	1270	6.0 (5.91)

(3) 枝下高の修正 2

海岸林の場合、微地形、微気象の違いにより同じ地域でもクロマツの生長に大きな差がでることは現場でも確認している。そこでクロマツ林況に少し幅を持った数値を算出する必要もある。そこで、石川の樹齢-樹高の関係図の中で、最低樹高の神奈川県、中間の千葉県、最大の秋田県の数値を採用する。便宜的に、クロマツ海岸林前線～50mおよび低湿地地帯は神奈川県、前線より 50～150m地帯は千葉県、前線より 150m以上および立地条件の良い場所では秋田県の数値を用いることとする。神奈川県、秋田県の計算結果は以下のとおりである。

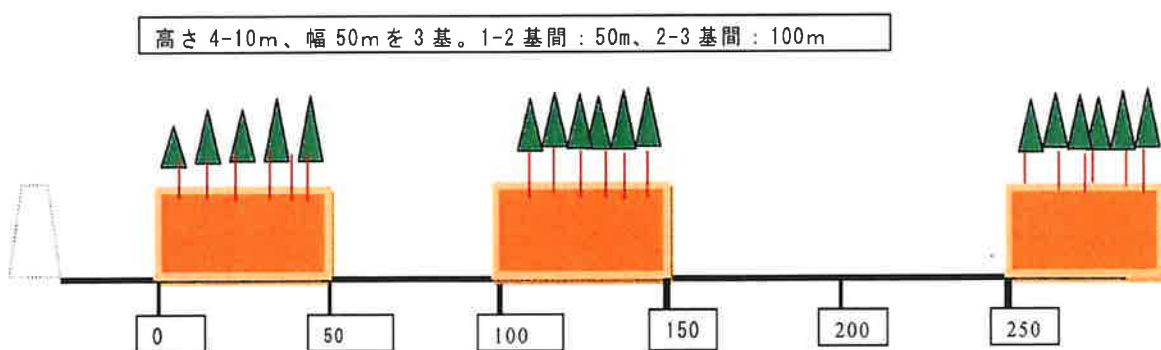
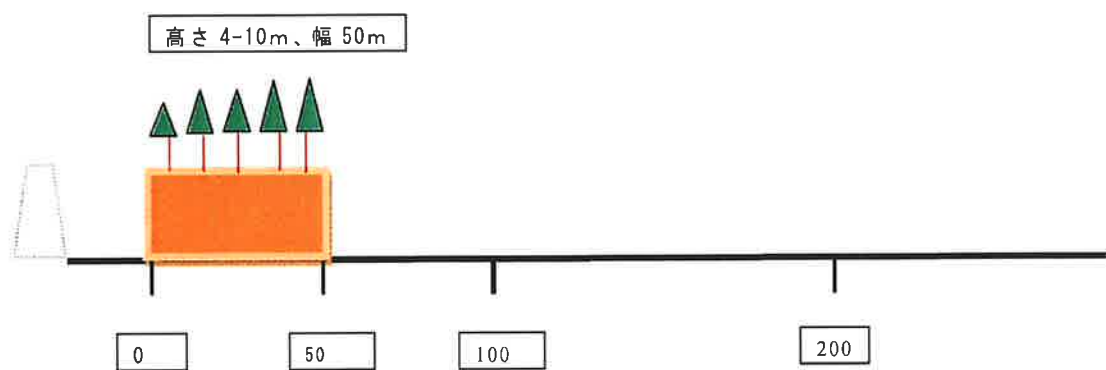
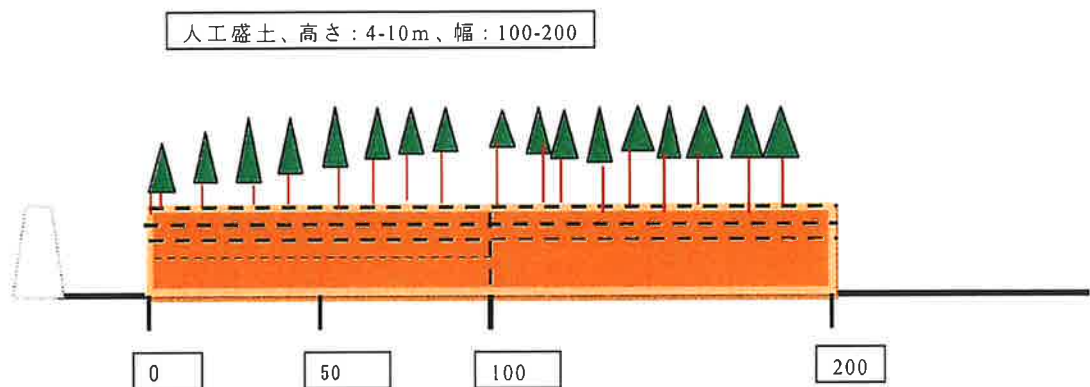
表 3.2.2.4 枝下高の修正 2-1 (樹高は神奈川県の数値を用いた)

樹齢	樹高	胸高直径	立木密度	枝下高 (金澤の式より)
20 年生	3.0m	4.3cm	9800	1.0 (1.24)
30 年生	4.0m	5.7cm	6200	1.5 (1.74)
40 年生	5.0m	7.1cm	4400	2.5 (2.28)
50 年生	6.0m	8.6cm	3300	3.0 (2.87)
60 年生	11.0m	15.7cm	1270	6.0 (5.91)

表 3.2.2.5 枝下高の修正 2-2 (樹高は秋田県の数値を用いた)

樹齢	樹高	胸高直径	立木密度	枝下高 (金澤の式より)
20 年生	5.5m	7.9cm	3800	2.5 (2.60)
30 年生	9.0m	12.9cm	1740	4.5 (4.67)
40 年生	11.0m	15.7cm	1270	6.0 (5.91)
50 年生	12.5m	17.9cm	1040	7.0 (6.91)
60 年生	14.0m	20.0cm	870	8.0 (7.89)

人工盛土と海岸林のイメージ図：盛土幅 100～200&400、高さ 4～10m



(4) 「多機能海岸防災林」の数値シミュレーションのための人工盛土地盤の規模（高さ、幅、間隔）について

海岸林の幅(奥行き)については仙台平野の海岸地帯には、奥行きが200m以上の海岸防災林も存在するが、人工地盤と海岸林造成と組み合わせる多機能海岸防災林では銀实的には50～200mとし、別に最大幅400mを考慮する。これは上述の検討委員会中間報告の5条件や海岸保安林を一度に大面積処分（一定期間完全消失）することは問題も多いので、幅に限界と変化を持たせることにした。

盛土地盤の最大高さは10mとした。最低規模は幅50m、高さ4mとする。したがって幅と高さの組み合わせは以下のとおりとなる。ほかに、狭い林帯（50m前後）の複数列の人工地盤を設置した場合を検討する。これは現実問題として、広い面積を人工地盤が占めることは不可能な場合がありうるし、他用途用地（住居、商業用地）や滞水地域、過湿地域の水処理のための用地の確保を考慮する必要性も出てくる。そこで、50m人工地盤（+林帯）、50m空間、50m地盤、100m空間、

50m地盤の300m幅の場合について検討する。（後述図のように人工地盤合計幅は150m）。

なお、これとは別に、現在の標高0以下地帯は2m以上のかさ上げを原則に再生する。

盛土高さ		人工盛土幅(m)			
	50	100	200	400	50m 複数列
4m	○				
6m					
8m					
10m					

「例えば ◎：必ず実行、○：条件より実行」

引用文献

- ・石川政幸（1988）：森林の防霧、防霧、飛砂防止機能. 日本治山治水協会, 83pp.
- ・大分県（1985）：海岸防災林造成工事調査報告書. 73pp.
- ・小田隆則（1979）：海岸防災林の保育および改良に関する研究（Ⅴ）. 千葉林試研報2, 45-50
- ・小田隆則（1991）：滞海水および滞水日数とクロマツの枯損との関係. 治山36（6）, 165-168
- ・小田隆則（2001）：海岸砂丘低湿地における植栽木根系の滞水反応と樹林帯造成法に関する研究. 千葉県森林研究センター3, 78pp.
- ・檜山徳治（1967）：海岸防災林. 林業技術308, 18-22
- ・金沢洋一・清野嘉之・藤森隆郎（1987）：東海村クロマツ林. 農林水産技術会議事務局研究成果185, 101-102
- ・金澤洋一（1991）：海岸クロマツ林の防災効果と生育管理. 林業技術593, 14-16
- ・河崎弥生・田中一夫（1983）：海岸防災林の保育、更新に関する研究（Ⅰ）砂丘研究30(1), 233-247
- ・気候変動に伴う海面上昇への対応：
http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/yosan/gaiyou/yosan/h21budget/1-2.pdf, 2011年11月28日確認
- ・工藤哲也（）1988）：森林の暴風機能. 日本治山治水協会, 46pp.
- ・坂本知己、（2011）：クロマツ海岸林の管理の手引きとその考え方. 森林総合研究所, 55pp.
- ・坂本知己（2011）：津波による海岸防災林の被害とその評価. 治山シンポジウム49, 1-10
- ・首藤伸夫（1985）：防潮林の津波に対する効果と限界. 海岸工学講演論文集45, 465-469
- ・鈴木千秋・芳賀俊郎・丹野絵里（2002）：海岸防災林における排水施設の効果. 治山研発論集40, 71-77
- ・高浦祐之・白石智美（1997）：九十九里海岸におけるマツ林の過湿対策. 治山研発論集35, 244-250
- ・高橋啓二, 堀江保夫（1965）：植物の耐塩水性（Ⅰ） -防潮林構成植物選定のための実験-. 林試研報183, 131-151
- ・田中規夫（2011）：津波に対する海岸防災林の効果. 治山シンポジウム49, 11-17
- ・千葉県・林業土木コンサルタンツ（1994）：平成5年度海岸の森林等機能評価調査委託報告書. 85pp.
- ・中野秀章ら（1962）：岩手・宮城両県下防潮林のチリ地震津波時における実態・効果と今後のあり方. 林試研報140, 1-88
- ・細見 寛ら（2005）：地球温暖化による海面上昇に対応するための海岸保全対策のあり方. 海洋開発論文集21, 223-228
- ・三村信男ら（1991）：地球温暖化による海面上昇・海象変化の影響評価. 海岸工学論文集38, 936-940
- ・村井 宏ら（1992）：日本の海岸林. ソフトサイエンス社, 513pp.

3-2 参考資料：防潮林・樹木の津波軽減機能に関し提案された数式

(1) 防潮林の津波・高潮軽減機能（加藤愛雄、1948）

○走常流が1列の杭列によって水頭 h を減ずる式

$$\text{Headloss } h = 1.73 (S^2/B) \cdot V^2/2g \quad \dots \quad (1 \cdot 1)$$

V ：流速、 g ：重力加速度、 S ：幹の直径、 B ：樹木の間隔

V を4m/s、 B を2m、 S を0.3mとすれば、水頭は約1/100減ずる。密生林はさらに効果が大きくなる。

(2) 樹木の抵抗によって減少する流速と林帯幅の関係式（小山、1948）

流速、エネルギーが、防潮林の樹幹投影面積に応じて減少することを表す。

$$L = (2 \cdot 10^4 / C_x \cdot N \cdot D) \log_e (V_0/V) \quad \dots \quad (2 \cdot 1)$$

L ：林帯幅（m）、 V_0 ：林帯に浸入する流速（m/s）

V ：林帯通過後の流速（m/s）、 C_x ：樹幹の抵抗係数、

D ：胸高直径（cm）、 N ：樹木本数（本/ha）

$$W = F \cdot V_{\text{mean}} \quad \dots \quad (2 \cdot 2)$$

$$F = \Sigma \Delta F = \Sigma (1/2) C_x \rho V_{\text{mean}}^2 \cdot \Delta NDH \quad \dots \quad (2 \cdot 3)$$

W ：津波のエネルギー（m k g / s）、 F ：樹木に及ぼす波力

ΔF ：林帯前縁から、ある距離の小区画内の樹木に及ぼす力（kg）

ρ ：海水の密度（1,000kg/m³）、 V_{mean} ：小区画内の平均流速（m/s）

ΔN ：小区画内の樹木本数、 H ：波高（m）

(3) ごみ止め格子による水頭損失（三宅 博、1960）

ごみ止め格子を鉛直に取り付けたときの水頭損失式（ h ）

$$h = \beta (t/b)^{4/3} v^2/2g \quad \dots \quad (3 \cdot 1)$$

β ：形状係数、 b ：格子の間隔、 t ：格子の直径、 v ：流速

樹列を1列と考え、 $b=3\text{m}$ （樹木間隔）、 $t=0.3\text{m}$ （樹木の直径）、 $v=4.0\text{m/s}$ 、 $\beta=1.79$ とすると $h=7\text{cm}$ になる。また、樹木の間隔を1.5mにすると、 $h=12\text{cm}$ になる。

以上により、防潮林の立木密度が密で、樹列（幅員）が十分であれば、全体の水頭損失は相当大きくなるので林帯内を通過する水の力は弱くなる。

(4) 樹木の曲げ合成特性の値、(田中ら、2006)

$$EI = (I^3/3) (F/D_{ef}) \dots \dots \dots (4 \cdot 1)$$

E I : 樹木の曲げ合成特性の値、 E : ヤング係数、 I : 断面二次モーメント

I : 支点から作用点までの距離 (m)、 F : 加えた力 (N)、 D_{ef} : 作用点の変位 (m)

$$M_{turnc} = 24.5 d_{BH}^2 \dots \dots \dots (4 \cdot 2)$$

M_{turnc} : 河道内樹木の転倒限界モーメント (Nm)、

d_{BH}² : 胸高直径 (cm)

○樹木の3グループ (G1, G2, G3) の破壊モーメント (Nm)

$$M_{G1} = 10.8 d^2 \dots \dots \dots (4 \cdot 3)$$

$$M_{G2} = 76.5 d^2 \dots \dots \dots (4 \cdot 4)$$

$$M_{G3} = 19.6 d^2 \dots \dots \dots (4 \cdot 5)$$

(5) 樹木に作用する抗力モーメント(佐々木、2009)

○河道内樹木の洪水による破壊条件

1) Gardiner et al (2000) の破断限界モーメント

$$M_{bc} = \sigma_{max} I / R \approx k d^3 \dots \dots \dots (5 \cdot 1)$$

R : 樹幹の破断断面の半径 (m)、 d : 樹幹の破断断面の直径 (m)、 σ_{max} : 樹幹の限界曲げ応力 (N/m²), I : 断面2 次モーメント (m⁴),

σ_{max} を定数とした場合、破断条件は d³ の関数となる。その場合、式(1)に示された k は樹種に依存した定数となる。一方、転倒限界モーメント M_{overc} は、およそ2000 本の試験木の引張り試験の結果に基づき、

樹木の重量の関数として、以下の式が提案されている (Gardiner et al., 2000)。

$$M_{overc} = k_{over} \times (trunk \ weight) \dots \dots \dots (5 \cdot 2)$$

k_{over} : 定数

○リバーフロント整備センター提案の転倒限界式 (1999)

Gardiner et al. (2000) と同様の式が、以下のように提案されている。

$$M_{turnc} \cdot \cdot \cdot 24.5 d_{BH}^2 \dots \dots \dots (5 \cdot 3)$$

M_{turnc} : 河道内樹木の転倒限界モーメント (Nm)、 d_{BH} : 胸高直径、

樹木の重量は樹木の胸高直径 d_{BH} の2 乗に比例しているため、両者の式形は異なるものの同様の仮説の上に成り立っている。

樹木の破断限界モーメント M_{bc} は樹種によって異なる比例定数 k を用いる必要がある。

また、曲げモーメントに抵抗するもうひとつの重要なメカニズムは根の引き抜き抵抗である。根の量が増加するとアンカーのような働きをするため、土壌緊縛効果によって根鉢と周辺土壌との限界せん断応力が増加する(Tosi, 2007)。

○樹木に作用する抗力モーメントの解析方法

樹木に作用する抗力 F 、モーメント M は樹木の鉛直構造を考慮して(Tanaka et al., 2007)、以下の式(1.4)-式(1.6)を用いて算出した。

$$F = \int_0^h (1/2) C_d(z) \rho u(z)^2 d(z) dz$$

$$= (1/2) \rho C_{d-ref} DBH U^2 \int_0^h d(z) C_d(z) / DBH C_{d-ref} dz$$

$$= (1/2) \rho C_{d-ref} DBH U^2 \int_0^h \alpha(z) \beta(z) dz \quad \dots \dots \dots (5 \cdot 4)$$

$$\alpha(z) = d(z) / DBH, \quad \beta(z) = C_d(z) / C_{d-ref} \quad \dots \dots \dots (5 \cdot 5)$$

$$M = (1/2) \rho C_{d-ref} DBH U^2 \int_0^h z \alpha(z) \beta(z) dz \quad \dots \dots \dots (5 \cdot 6)$$

z : 河床からの鉛直高さ(m), C_{d-ref} : 主幹を円柱と仮定した場合の抗力係数(本研究では $C_{d-ref} = 1$),

$C_d(z)$, $u(z)$, $d(z)$: それぞれ、河床からの高さ z における抗力係数, 流速(m/s), 主幹と枝の幅の和(流下物が樹木に集積していた場合はその幅も考慮した)(m),

ρ : 流体の密度(kg/m³), h : 洪水時の水深(m),

DBH : 胸高直径(=0.01 dBH (cm))であり、式(4)～式(6)では m単位で代入するため、 dBH と DBH を区別して定義した)(m),

$\alpha(z)$: 樹形(幹・枝)の相違(高さ z における幹・枝幅の総和を胸高における幅 DBH で基準化した比)を表す付加係数,

$\beta(z)$: 葉層や枝の重なりによる抗力係数の増分を表す付加係数、

$\beta(z)$ の値に関して、従来の研究では葉による抗力係数の増分は一定値であるとしている($\beta(z)=1.25$ (福岡・藤田, 1990), 1.4 (Armanini et al., 2005))。

(6) 防潮林の抵抗特性とモデル化、等価粗度、樹木の倒伏条件 (原田賢治 2003)

○抗力係数と体積占有率

抗力係数 C_{Dtree} は水深変化に伴う葉部の体積占有率 V_0/V の変化に比例した抗力係数モデルとして得た。

$$C_{Dtree} = 8.4 (V_0/V) + 0.66 \cdots \cdots (6 \cdot 1)$$

V : 防潮林の存在する区間の水面下の全体積

V_0 : 水面下の防潮林の体積

$$(0.01 < V_0/V < 0.07)$$

○津波減衰効果の運動方程式 (Morison 式に抵抗項を加えた)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \left(\frac{\partial (M^2/D)}{\partial x} \right) + gD \cdot \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + (g n^2/D^{7/3}) M|M| \\ + (C_D/2) (A_0/(\Delta x \cdot \Delta y)) (M' |M'| D^2) + C_M (V_0/V) \frac{\partial M'}{\partial t} \\ = 0 \cdots \cdots (6 \cdot 2)$$

η : 静水面からの水位変動量、 M : 線流量、 D : 全水深、 n : Manning の粗度係数 = 0.025、

C_D 、 C_M : 防潮林の抗力係数と慣性力係数、 V : 防潮林の占める水面下全体積、

V_0 、 A_0 : 体積 V 中の防潮林の占める体積、投影面積、 M' : 防潮林なしの線流量

○ 海岸林の抵抗を換算したモデル式

$$F = \rho g (n_{forest}^2/D^{1/3}) u^2 dx dy \cdots \cdots (6 \cdot 3)$$

$$F = (\rho/2) C_D (Num_{tree}/dxdy) d_{tree} D u^2 dx dy \cdots \cdots (6 \cdot 4)$$

$$n_{forest} = \{ (C_{Dtree}/2g) (Num_{tree}/dxdy) A D^{1/3} \}^{1/2} \cdots \cdots (6 \cdot 5)$$

F : 海岸林による抵抗力、 n_{forest} : 海岸林の等価粗度係数、 D : 津波浸水深、 u : 津波流速

C_D : 樹木の抗力係数、 Num_{tree} : 空間 $dxdy$ の中に存在する樹木本数、

$Num_{tree}/dxdy$: 単位底面積当たりの樹木本数、 A : 樹木の投影面積、

(7) 樹木が氾濫流を減衰する効果 (流水に対する抵抗力) (野口宏典ら, 2010)

$$F = (\rho/2) C_D A_0 u^2 \cdots \cdots (7 \cdot 1)$$

F : 流水に対する樹木の抵抗力 (N)、 ρ : 水の密度 (kg/m^3)、 C_D : 抵抗係数、

A_0 : 流れ方向への投影面積 (m^2)、 u : 流速 (m/sec)、

水路実験と実測値からえた結果を式 (1) の抵抗係数と投影面積に部位別 (枝、葉、幹) に用い、氾濫流のシミュレーションモデルに組み込んだ。

$$F = (\rho/2) (C_{DS} A_{HS} D + C_{DB} A_{HB} D + C_{DN} A_{HN} D) u^2 \cdots \cdots (7 \cdot 2)$$

C_{DS} 、 C_{DB} 、 C_{DN} : 幹、枝、葉の抵抗係数

A_{HS} 、 A_{HB} 、 A_{HN} : 幹、枝、葉の高さ当たりの投影面積 (m^2/m)

D : 水深 (m)

引用文献

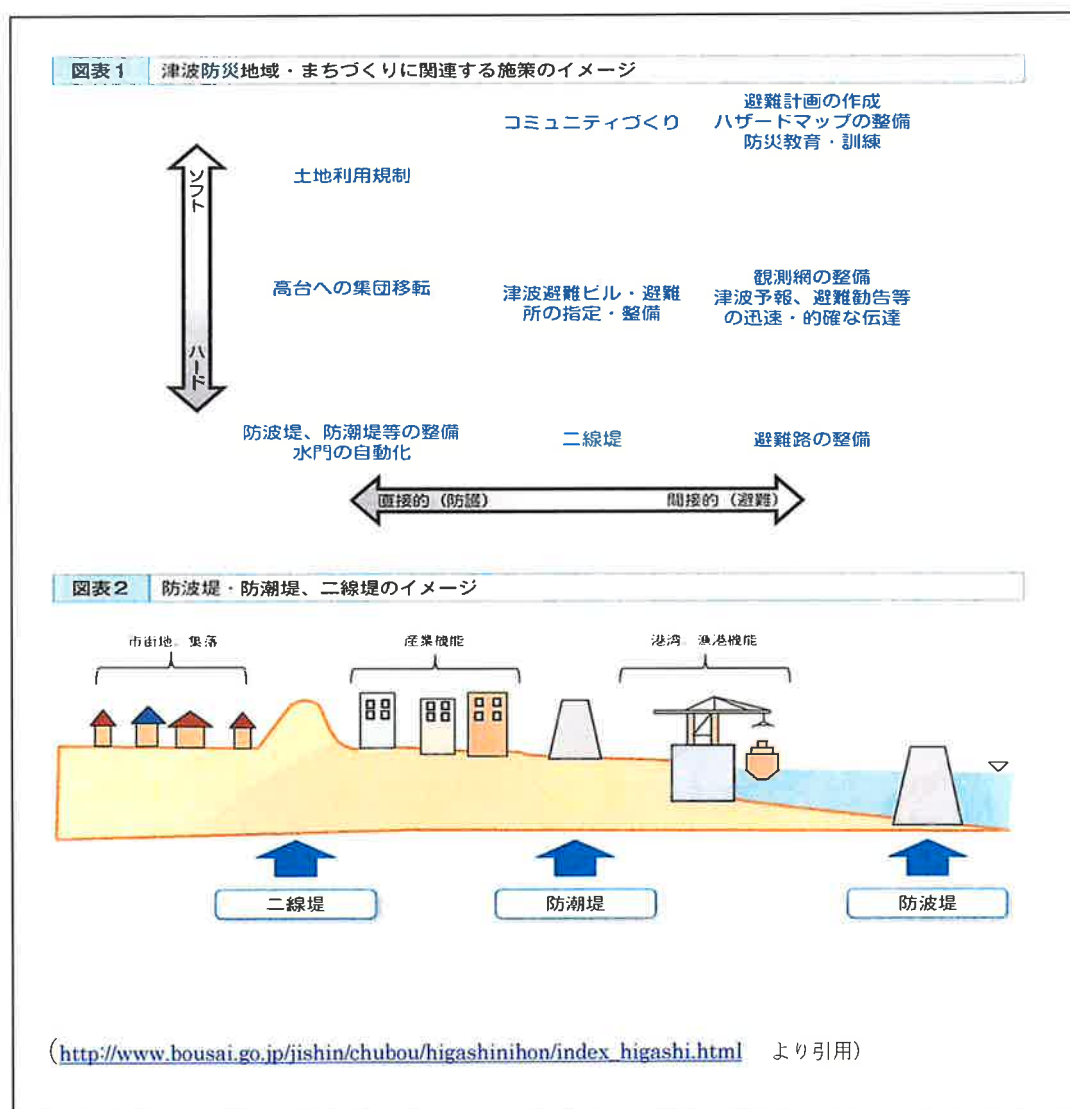
1. 加藤愛雄（1948）：防潮林の防浪効果について. 林友会青森支部, 45-49
2. 小山 悌（1948）：防潮林経営の計画資料, 防潮林経営研究録. 林友会青森支部, 96-143
3. 三宅 博（1960）：津波対策としての防潮林. 水利科学 4（3）, 171-181
4. 田中規夫ら（2006）：スリランカ南部海岸線におけるインド洋大津波被害実態調査（その2）：海岸林の破壊限界モーメントに注目して. 埼玉大学紀要. 工学部 39, 58-65
5. 佐々木 寧（2009）：外来植物による河川敷の藪化・樹林化への管理手法の開発, 樹木に作用する抗力モーメントの解析方法. 平成 21 年度報告書, 1-85
6. 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
7. 野口宏典・坂本知己（2010）：海岸林の津波氾濫流域減衰機能に関する検討. 日本森林学会大会データベース第 121 回, Pc1-35

4. 行政機関復興計画情報の概要

今後の津波対策に関連する政府各機関の復興計画情報の主要な概要を以下に掲載する。

4-1 「減災」という考え方（東日本大震災復興構想会議：内閣府中央防災会議）

今回の規模（数百年から千年に1回程度）の津波を防波堤・防潮堤を中心とする最前線のみで防御することはできないということが明らかとなった。今後の復興にあたっては、「減災」の考え方に基づき、水際での構造物に頼る防御から、「逃げる」ことを基本とする防災教育の徹底やハザードマップの整備など、ソフト面の対策を重視せねばならない。さらに、防潮堤等に加え、交通インフラ等を活用した地域内部の第二の堤防機能を充実させ、土地のかさ上げを行い、避難地・避難路・避難ビルを整備する。加えて、災害リスクを考慮した土地利用・建築規制を一体的に行うなど、ソフト・ハードの施策を総動員することが必要である。



復興計画を策定するにあたり、地形の特性に応じた防災効果や、それにかかる費用、そして整備に必要な期間等を考慮すべきである。その上で、防波堤³、防潮堤⁴、二線堤⁵、高台移転等の「面」の整備、土地利用・建築構造規制等の適切な「組み合わせ」を考えなければならない。

³ 「防波堤」とは、外洋の波浪から港湾や漁港を守り、また津波から陸域を守るため、海中に設置される構造物をいう。⁴ 「防潮堤」とは、台風などによる大波や津波等から陸域を守るため、陸上（海岸部）に設置される構造物をいう。⁵ 「二線堤」とは、防潮堤よりも陸側にある防御のための構造物をいう。例えば、道路や鉄道線路を盛土構造にして堤防の役割を果たすものなどである。

.....

4-2 防波堤による減災効果（交通政策審議会港湾分科会防災部会：国交省）

港湾口の防波堤には①津波高を低減、②港内の水位上昇を遅延させて避難時間を確保、③流速を弱めを弱め破壊力を低減する効果がある。

釜石港の湾口防波堤を一例に、シミュレーションによりそれらの効果を検証した結果、湾奥での津波高を約4割、流速を約5割低減させた。また、津波の第一波が防潮堤を越えるまでの時間については、防波堤がない場合は地震発生後28分となっていたが、34分となった。この差の6分間により地震後に避難所に到達できたと考えられる人の割合を、釜石湾内の避難所におけるアンケート調査をもとに推計したところ、回答者全体の約13%となった。これは釜石湾地域（ピーク時避難者数約9,900人）では約1,300人に相当する。

4-3 津波の規模や発生頻度に応じた防災・減災目標の明確化（東日本大震災復興構想会議：内閣府中央防災会議）

これまでの津波対策では、発生の可能性が高い津波を想定してきた。しかしながら、今回の津波はこの想定を大きく上回り、甚大な被害を発生させた。今後の津波対策を構築するにあたっては、津波の規模や発生頻度に応じて防護の目標を明確化して対策を進める必要がある。このため、基本的に二つのレベルの津波を想定するものとする。

一つ目のレベルである、発生頻度が高い津波（以下、「発生頻度の高い津波」という。）に対しては、できるだけ構造物で人命・財産を守りきる「**防災**」を目指すものとする。

二つ目のレベルである、発生頻度は極めて低いが影響が甚大な最大クラスの津波（以下、「最大クラスの津波」という。）に対しては、最低限人命を守るという目標のもとに被害をできるだけ小さくする「**減災**」を目指すものとする。

発生頻度の高い津波は、その地点において概ね数十年から百数十年に一回程度の頻度で発生する規模とする。発生頻度の高い津波に対しては、①人命を守る、②財産を守る、③経済活動を継続させることを目標とする。このため、津波防災施設の計画・設計に当たっては、堤内地への浸水（防潮堤からの越流）を防止するものとする。なお、堤外地では浸水が想定されるが、人命を守るとともに、港湾の産業・物流施設が早期に復旧でき、臨海部立地企業の業務が継続できるように計画・設計する。

最大クラスの津波は、その地点において概ね数百年から千年に一回程度の頻度で発生する規模とする。最大クラスの津波に対しては、①人命を守る、②経済的損失を軽減する、③大きな二次災害を防止する、④施設の早期復旧を図ることを目標とする。この場合、堤内地への浸水は許容するものの、土地利用や避難対策と一体となった総合的な対策を講じるものとする。

4-4 広域類型と復興のための施策（東日本大震災復興構想会議：内閣府中央防災会議）

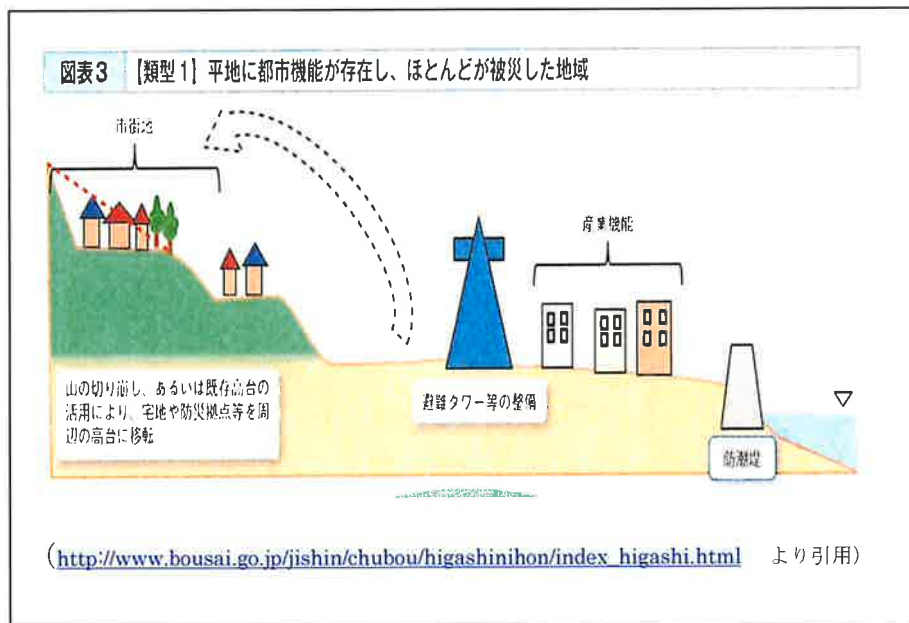
広域的インフラについては、各地域の復興プランと十分に連携しながら、「多重化による代替性」（リダンダンシー）の確保という視点に留意しつつ、整備・再構築を図ることが重要である。復興のための個々の事業については、その立案段階より、費用対効果や効率性の観点を重視し、真に必要なかつ有効な事業となるよう、十分な配慮がなされるべきである。

①平地に都市機能が存在し、ほとんどが被災した地域（類型1）

住居や都市の中核機能を高台など安全な場所に移転することを目標とすべきである。この際、コミュニティを一体的に維持することが重要である。しかしながら、移転先確保の状況によっては、同一地区内の住民が異なる場所に移転する可能性があることも留意すべきである。

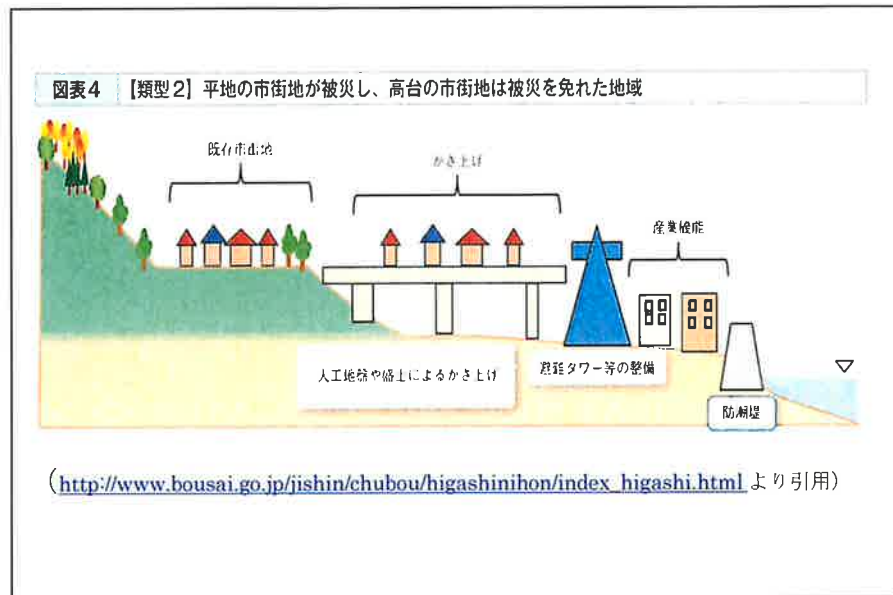
原則的には、高台移転を目標とすべきであるが、適地確保の問題、水産業など産業活動の必要から、平地の活用も避けられない。その際は、大規模津波発生時には被災の可能性があること

から、できるだけ地域になくてはならない産業機能などのみの立地とする土地利用・建築規制を一体的に実施せねばならない。土地のかさ上げ、適切な避難計画に基づく避難路の整備・機能向上、避難ビル等の整備についても積極的な検討が必要である。



②平地の市街地が被災し、高台の市街地は被災を免れた地域（類型2）

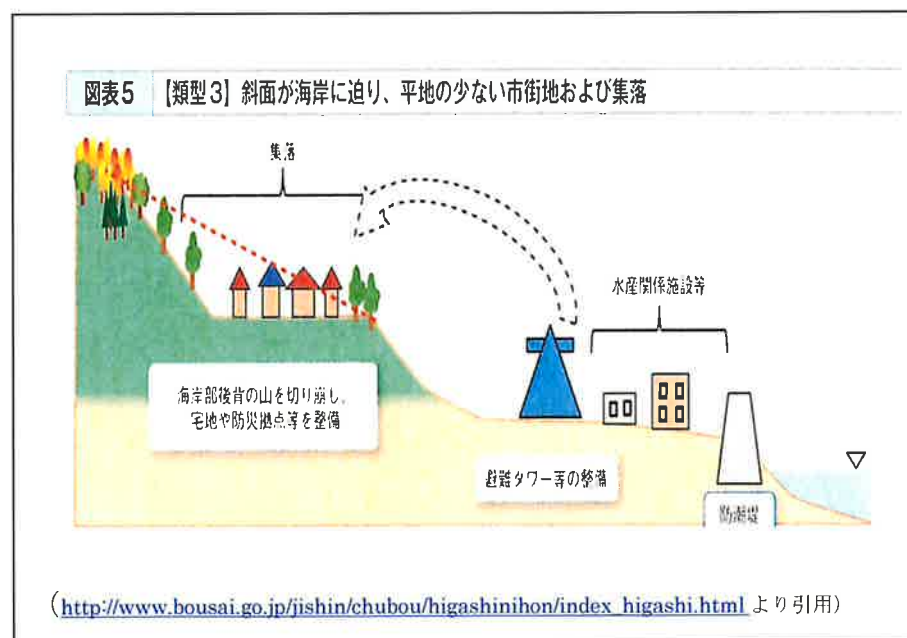
高台の市街地への集約・有効利用を第一に考えるものの、権利関係の調整が難航するおそれがあるため、平地の市街地のすべてを移転させることは困難である。そこで、平地の安全性を向上させた上での活用が必要となる。



その場合、大規模津波発生時には被災の可能性があることから、平地においてはできるだけ産業機能などのみの立地とする土地利用・建築規制を実施せねばならない。またあわせて、土地のかさ上げ、避難路・避難ビル等の避難対策を充実すべきである。

③斜面が海岸に迫り、平地の少ない市街地および集落（類型3）

斜面が海岸に迫り平地の少ない市街地や集落については、地域全体に甚大な被害が発生する可能性がある。そこでは、海岸部後背地の宅地造成を行うことなどにより住居などを高台に移転することを基本とする。平地においては、産業機能のみを立地させ、住居の建築を制限する土地利用規制を導入すべきである。



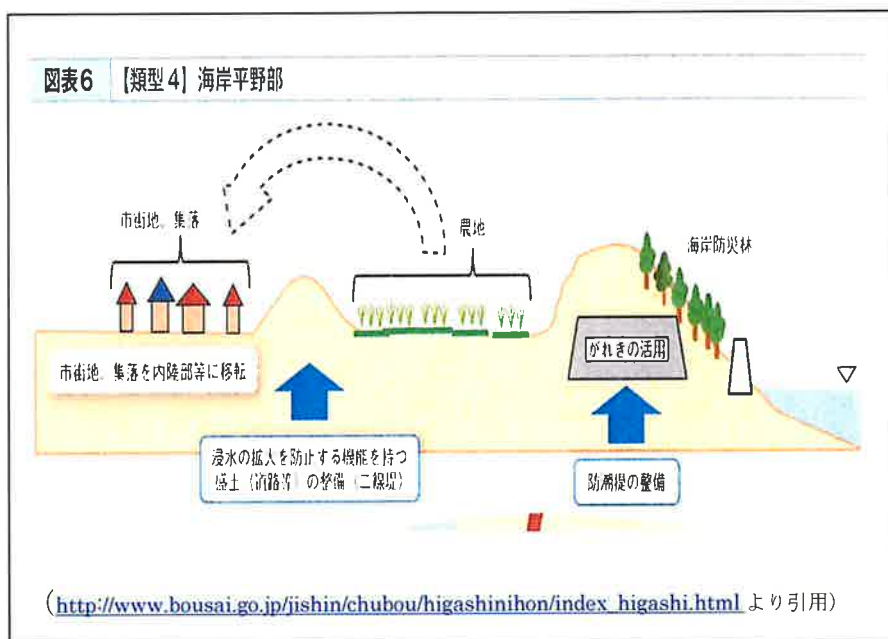
また、産業関係者の避難のための施設を建設せねばならない。さらに、高齢化に伴い、集落維持が困難なケースについては、集落の再編が課題となり得る。また、地形により防災対策を実施することが容易と考えられる地域を重点的に再整備することも検討すべきである。

④海岸平野部（類型4）

沿岸に広く平野部が展開し、津波による浸水を受け農業関連を中心に甚大な被害が発生した地域においては、海岸部に巨大防潮堤を整備するのではなく、新たに海岸部および内陸部での堤防整備と土地利用規制とを組み合わせなければならない。

その際、交通インフラなどを活用して二線堤機能を充実させ、住居などは二線堤の内側の内陸部など安全な場所へ移転することを基本とする。仮に、二線堤の海岸側に住居を設ける場合には、宅地の安全措置を講

じなければならない。二線堤より海岸側においては、適切な避難計画に基づく避難路の整備・機能向上、避難ビル等の整備について、当然、検討が必要である。その上で、コミュニティ維持に配慮し、農地としての再生や既存集落の安全性を一体的に確保するよう、配慮すべきである。



⑤内陸部や、液状化による被害が生じた地域（類型5）

被災した住宅・宅地に「再度災害防止対策」を推進するとともに、都市インフラの補強、住宅の再建、宅地の復旧のための支援を行わなければならない。

以上のすべての選択肢において、被災者生活再建支援法などの各種支援制度はあるものの、地域住民の負担が過大にならないようにすること、地方公共団体の地域づくりに要する負担が一時に集中しないようにすることの配慮が必要である。また、被災地における集団移転などを見越して、投機的な土地の先行取得等が行われることを防ぐため、土地取引の監視のために必要な措置をすみやかに講ずることが必要である。

4-5 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 報告（案） 要点

①基本的考え方

- 最大クラスの津波に対しては、被害の最小化を主眼とする「減災」の考え方に基づき、海岸保全施設等のハード対策と、ハザードマップ整備などの避難を中心とするソフト対策を組み合わせて実施
- 津波からの避難は、強い揺れや長い揺れを感じた場合、迷うことなく自ら高い場所に避難することが基本
- 津波到達時間が短い地域では、概ね5分程度で避難できるようなまちづくりを目指すべき。ただし、地形的条件などの状況により、このような対応が困難な地域では、津波到達時間などを考慮して避難方策を検討

②円滑な避難行動のための体制整備とルールづくり

- 津波警報と防災対応
- 情報伝達体制の充実・強化
- 地震・津波観測体制の充実強化
- 津波避難ビル等の指定、避難場所や避難路の整備
- 避難誘導・防災対応に係る行動のルール化

③地震・津波に強いまちづくり

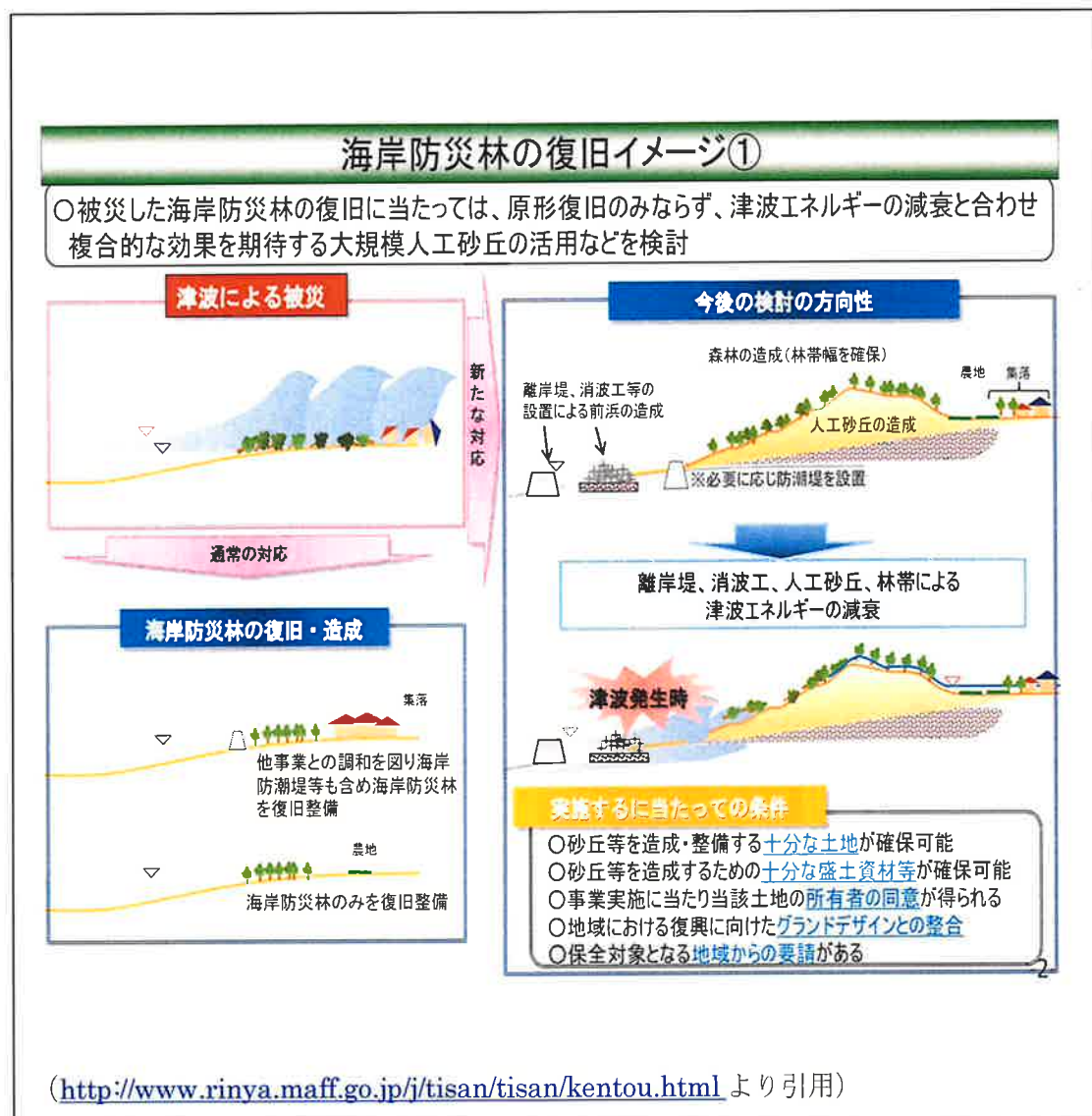
- 多重防護と施設整備
津波による浸水被害を軽減し、避難のためのリードタイムを長くするため、粘り強い海岸保全施設等や多重防護としての道路盛土等交通インフラの活用等による二線堤を整備する
- 行政関連施設、福祉施設等は、浸水リスクが少ない場所に建設
最大クラスの津波が発生した場合においても、行政・社会機能を維持するために、行政関連施設、避難場所、福祉施設、病院等は浸水リスクが少ない場所に建設する
- 地域防災計画と都市計画の有機的な連携
地域防災計画と都市計画を有機的に連携させ、長期的な視点で安全なまちづくりを進める。
その際、防災に関する専門家の参画を必要に応じて求める

④津波に対する防災意識の向上

- ハザードマップの充実
- 徒歩避難原則の徹底等と避難意識の啓発
- 防災教育の実施と地域防災力の向上

4-6 海岸防災林の再生方針（東北大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会：林野庁）

(1) 海岸防災林の再生



①海

海岸防災林は、大規模な津波自体を完全に抑止することはできないものの、津波エネルギーの減衰効果や漂流物の捕捉効果など被害の軽減効果がみられることから、まちづくりの観点において多重防御の一つとして位置づけることができる。

また、今回の津波による海岸防災林の被害は、岩手、宮城、福島各県を中心として広範囲に及び、津波の規模や地形等により、被災状況は地域により多様である。

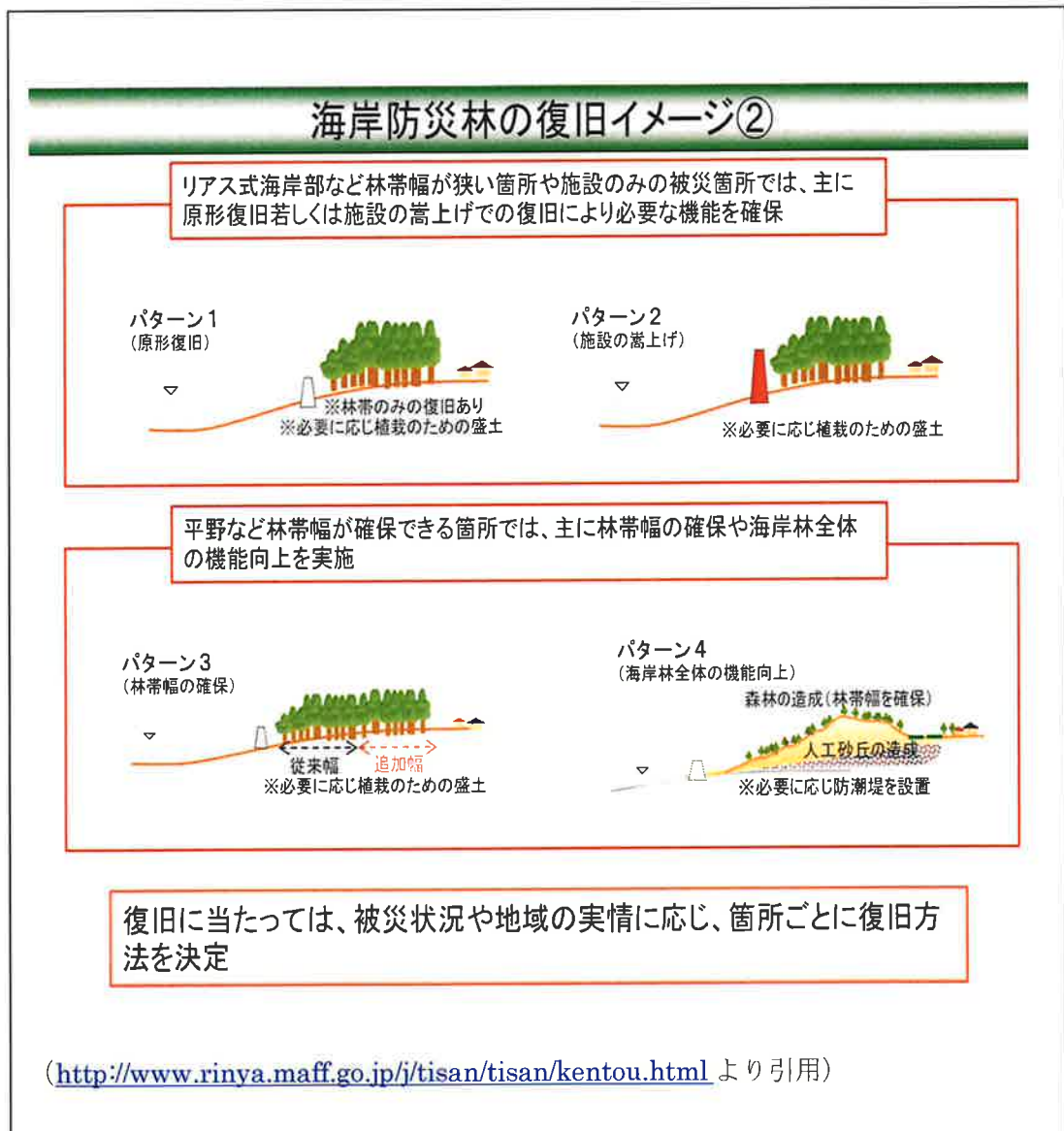
以上のことから、今回の津波による甚大な被災状況を踏まえ、地域の防災機能の確保を図る観点から、飛砂・風害の防備等の災害防止機能に加え、津波に対する被害軽減効果も考慮した海岸防災林の復旧・再生を検討していく必要がある。

② 具体的には、被災箇所ごとに、被災状況や地域の実情さらには地域の生態系保全の必要性等を踏まえ、海岸防災林の再生方法を決定していくことが必要である。

この際、海岸防災林の再生に当たっては、維持管理を含むコストなども合わせて検討する必要がある。

③基本的な再生の方向性としては、大別して以下の4パターンが想定され、単独パターンやこれらパターンの組み合わせにより海岸防災林の再生を図っていくことが必要である。

※ 海岸線に山が近接している場合のほか社会条件等により林帯幅の確保が困難な場合を含む。



パターン1：林帯を再生しつつ、従来どおりの規模による施設の原形復旧により必要な機能を確保

パターン2：林帯を再生しつつ、防潮堤等施設の改良により必要な機能を確保

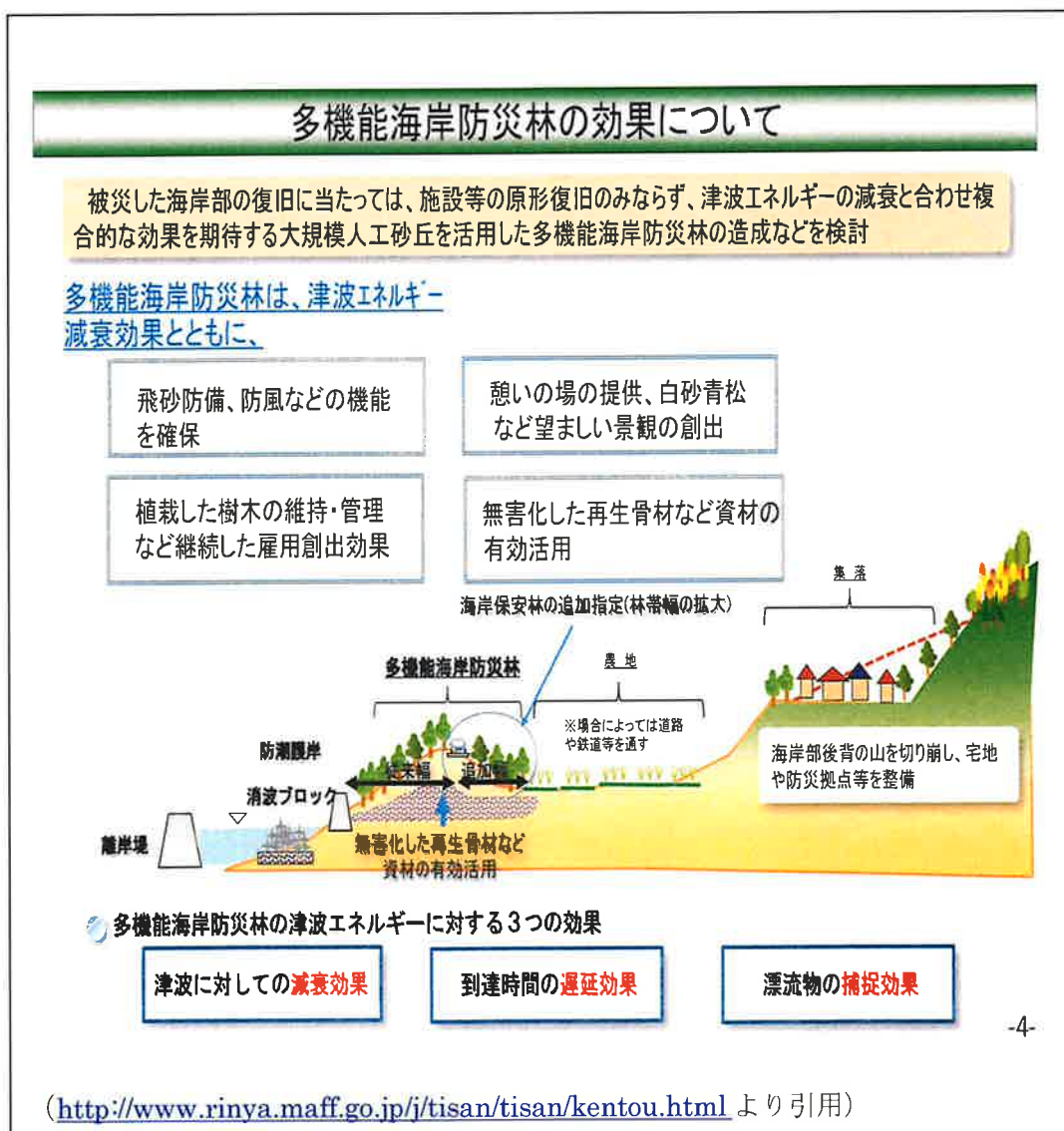
○平野部など林帯幅が確保できる箇所

パターン3：林帯幅の確保により必要な機能を確保

パターン４：林帯幅の確保に加えて人工盛土の造成により必要な機能を確保（多機能海岸防災林）

なお、林帯幅については、後背地の土地利用状況など地域の実情を十分踏まえ検討する必要があるとともに、パターン１～４であっても、必要に応じ盛土し、森林造成することにより必要な機能を確保することが望ましい。また、林帯を含め地域全体に著しい被害が生じている箇所は、復興のためのランドデザインの策定やそれに合わせた土地利用計画の見直しが必要となるなど、海岸防災林の再生までには相当の期間が必要となると想定されるが、今後の高潮等から被災した海岸防災林の保全が必要な箇所については、防潮堤等施設の復旧に早期に着工する必要がある。

(2) 多機能海岸防災林の機能及び効果



上記のパターン4の多機能海岸防災林については、特に津波エネルギーの減衰効果等被害の軽減効果とともに、海岸防災林が有する災害防止機能等の以下の機能及び効果が期待される。

- ① 飛砂防備、防風及び防霧等の災害防止機能
- ② 憩いの場の提供や白砂青松など望ましい景観を創出する保健休養機能
- ③ 植栽した樹木の維持・管理など継続した雇用の創出効果
- ④ 大量に発生した災害廃棄物（以下「ガレキ」という。）のうち無害化された再生資材や建設発生土などを盛土材として有効利用できる効果

このため、被災箇所ごとに具体的な再生方法を決定していく必要があるが、特に、多機能海岸防災林の造成に当たっては、以下の条件を備える必要がある。

- ① 人工盛土等を造成・整備する十分な土地が確保できること
- ② 人工盛土等を造成するための十分な盛土材等が確保できること
- ③ 事業実施に当たり当該土地の所有者の同意が得られること
- ④ 地域における復興に向けたランドデザインとの整合を図ること
- ⑤ 保全対象となる地域からの要請があること

5の条件は何れもクリアするのは容易ではないと考えられる。我々はこれらの条件を考慮しつつ、いくつかの盛土規模とそこに生育する海岸林（クロマツ）を設定する。また、「今回規模（500～1000年に1度程度＝レベル1）の津波を完全に防御するような規模の施設は造らない」と伝え聞いているが、護岸施設の規模については不確定要素である。

（3）地域のランドデザインとの整合

ア. 東北地方の太平洋岸では、明治三陸津波（1896年）、昭和三陸津波（1933年）、チリ地震津波（1960年）など過去にも大規模な津波により甚大な被害が発生しており、今後においても今回の津波と同規模の津波が発生する可能性は否定できない。

イ. 現在、中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会（以下、「専門調査会」という）」等において、規模の異なる津波に対する今後の対策が検討されているところであり、今般、専門調査会で中間とりまとめが行われたところである。

また、今般、国の東日本大震災復興構想会議で「復興への提言」が取りまとめられたところであり、これを受け、被災各県及び各市町村の震災復興会議等において、地域のランドデザインがさらに検討されることとなる。

4-7 東日本大震災の津波被災現況調査結果（第2次報告：国交省）

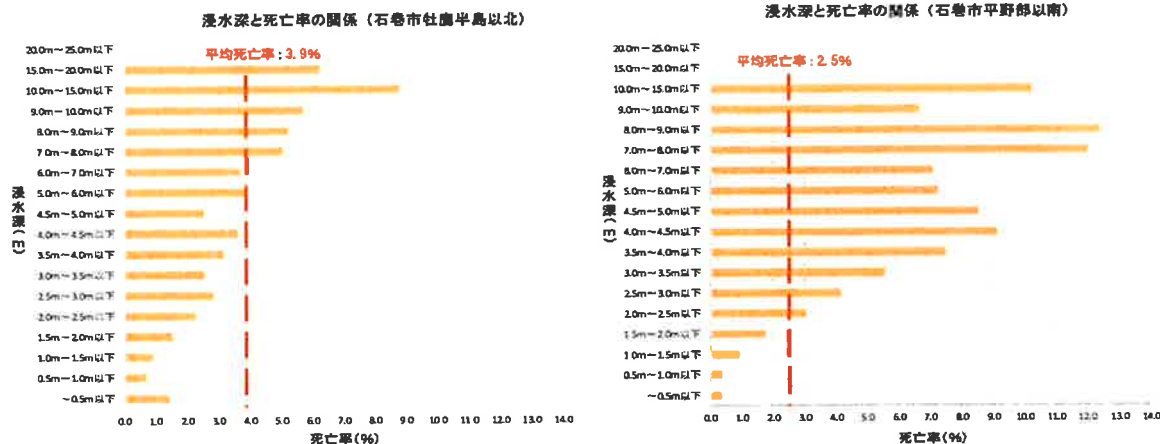
（1）死亡者と浸水深の関係

○浸水深と死亡率の関係を把握した。死亡者の被災場所は不明であるため、死亡者の居住地により分析した。現時点までに自治体等の協力が得られ、死亡者の詳しい住所が判明している13市町（大槌町、釜石市、大船渡市、陸前高田市、気仙沼市、女川町、石巻市、東松島市、仙台市、亶理町、新地町、相馬市、南相馬市）については、100mメッシュ単位での浸水深と死亡率の関係を把握した。

- ・ 浸水深が高いほど死亡率が高くなる。
- ・ リアス式海岸を主体とする「石巻市牡鹿半島以北」と、平野部を主体とする「石巻市平野部以南」では、平均の死亡率はリアス部の方が高いが、同一浸水深では平野部の方が死亡率が高くなる傾向がある。その要因としては、例えば、平野部では、リアス部と比較して、避難できる高台が近くになかったことなどが考えられる。

（日本経済新聞より：石巻市牡鹿半島より南を平野部、北をリアス式海岸地域に分けた結果、平均死亡率は平野部の2.5%に対し、リアス地域は3.9%と高かった。だが同じ浸水の深さ（浸水深）で比べると大半で死亡率が逆転。例えば浸水深が4.5～5メートルの地域の死亡率は平野部で8.5%、リアス地域で2.5%と3倍以上の差が開き、8～9メートルの地域でも平野部は12.4%、リアス地域は5.2%だった。）

<リアス部と平野部の分析>



(<http://www.mlit.go.jp/common/000168249.pdf> より引用)

4-8 過去に高地移転等の措置が取られた地域における今回の被災状況（内閣府）

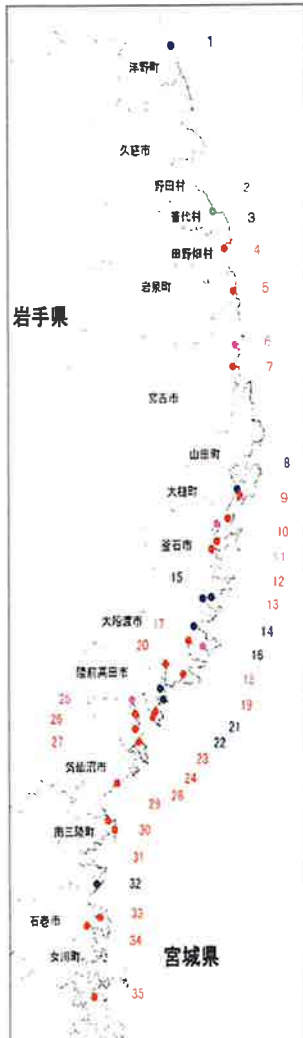
内閣府は明治三陸大津波（1896年）、昭和三陸津波（1933年）、チリ地震津波（60年）の後に、高台などに移転した地区を過去の文献などから調査した。明治三陸大津波後には43地区、昭和三陸津波後には再度移転も含め98地区が、集団もしくは戸別に高台移転していた。

このうち岩手県の20地区、宮城県の10地区の計30地区について、今回の震災の被災状況を調べた。岩手県では大槌町吉里吉里（大槌町）、越喜来村浦浜（大船渡市）、鶴住居村両石（釜石市）などの12地区で、宮城県では唐桑村大沢（気仙沼市）、大谷村大谷（気仙沼市）、歌津村石浜（南三陸町）、十五浜村雄勝（石巻市）などの9地区で家屋流失や浸水などの被害があった。今回も津波被害に遭った21地区のうち、船越村田ノ浜（岩手県山田町）など5地区は明治三陸大津波、昭和三陸津波のたびに計2度移転していた。

一方、調査対象の30地区のうち今回被害を免れたのは、種市村八木（洋野町）、普代村太田名部（普代村）、船越村船越（山田町）、唐丹村本郷（釜石市）、唐丹村小白浜（釜石市）、吉浜村本郷（大船渡市）、末崎村細浦（大船渡市）、末崎村泊里（大船渡市）、十三浜村相川（石巻市）の9地区であった。

中央防災会議の専門調査会座長・河田恵昭関西大教授は「移転先は中途半端な場所ではいけないということが教訓として示された」と話している。極めて妥当な談話であるが、移転の実現には解決しなければならない課題も多く残されている。例えば、地震津波の遡上高がそれぞれの津波で大きく異なっているため、安全高地の確認が非常に難しいことと住宅に適する高台が少ないことがあげられる。

過去にとられた高地移転等の措置



今回の津波被害の状況		過去の津波時の対応			
被害	旧地域名(現在の市町村名)	明治三陸地震 津波	昭和三陸地震 津波	チリ地震 津波	備考
なし	①陸市村八木(洋野町)	③	① ③		一度移転した地域数 4
	⑧船越村船越(山田町)	⑧ ⑭	⑧ ⑭		
	⑬唐丹村小白浜(釜石市)	⑮	⑮ ⑯		二度移転した地域数 5
	⑳末崎村細浦(大船渡市)		㉑ ㉒		
	㉓十三浜村相川(石巻市)		㉔		
過去に 移転を 行った 地域	④田野畑村平井(田野畑村)		④ ⑤		一度移転した地域数 15 二度移転した地域数 6
	⑦崎山村女湯戸(宮古市)	⑦ ⑨	⑨		
	⑩大槌町吉里吉里(大槌町)	⑩ ⑫	⑩		
	⑬船越村西石(釜石市)		⑬ ⑰		
	⑯陸奥村大船渡(大船渡市)		⑯ ⑲		
	㉑赤崎村宿(大船渡市)		㉑ ㉒		
	㉓広田村六ヶ浦(陸前高田市)		㉓ ㉔		
	㉕陸奥村大沢(気仙沼市)	㉕	㉕ ㉖		
	㉗唐桑村只越(気仙沼市)		㉗ ㉘		
	㉙唐桑村宿(気仙沼市)	㉙	㉙ ㉚		
	㉜津村田ノ浦(南三陸町)		㉜ ㉝		
	㉞十五浜村船越(石巻市)		㉞ ㉟		
	㊱大忍村谷川(石巻市)		㊱		
				㉛	
				㉜	
行過 つて い 移 な 転 い を 地 域	なし			② (水門建設)	高さ15.5mの晋代水 門により、浸水被害な し
	あり	(現地復興) (防潮堤) (区画整理) (現地復興)	(区画整理、 防潮堤建設) (防潮堤) (不明) (防潮堤)		高地移転が難しかった 地域において、海 岸堤防を津波が乗り 越え被災した。

過去の復興計画地域(1896明治三陸津波、1933昭和三陸津波)の出典:内務大臣官房都市計画課『三陸津波に因る被害町村の復興計画報告』、建設省国土地理院『チリ地震津波調査報告書』、山口弥一郎『日本の国土地理院』、山口弥一郎『津波常習地三陸海岸地域の集落移動』、山口弥一郎『津波と村』
(参考)明治大学 建築史・建築論研究室『三陸海岸の集落 災害と再生 1896、1933、1960』

(※)一覧表に記載の地域は、現時点で把握できた範囲であり、網羅できていない可能性がある。

また、現時点の調査、過去の記録から把握できた浸水範囲、復興計画地域等を地図に表示してあるが、過去の資料が不明瞭であることなど、必ずしも位置が正確でないものも含まれる。

6

(<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinihon/5/index.html> より引用)

引用文献

- ・国交省ホームページ：<http://www.mlit.go.jp/common/000168249.pdf>, 2011年11月28日確認
- ・小山 悌（1948）：防潮林経営の計画資料，防潮林経営研究録．林友会青森支部 96-143
- ・首藤伸夫（1985）：防潮林の津波に対する効果と限界．海岸工学講演論文集 45, 465-469
- ・田中規夫・佐々木 寧・湯谷賢太郎・Samang Homchuen（2005）：津波防御に対する樹林幅と樹種影響について-インド洋大津波におけるタイでの痕跡調査結果．海岸工学論文集 52, 1346-1350
- ・全国林業改良普及協会（1998）：林業技術ハンドブック．1969pp.
- ・内閣府ホームページ：
http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinihon/index_higashi.html, 2011年11月28日確認, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinihon/5/index.html>, 2011年11月28日確認
- ・中島勇喜・岡田 穰（2011）：海岸林との共生．山形出版会, 218pp.
- ・中野秀章・森沢万佐男・菊谷昭雄（1966）：防潮林の効果と幅に関する一実験．林試研報 194, 155-166
- ・原田賢治・今村文彦（2003）：防潮林による津波軽減効果の評価と減災のための利用と可能性．海岸工学論文集 50, 341-345
- ・平石哲也・竹村慎治・永瀬恭一（2001）：南太平洋地域における植林による津波対策法の適用性．海岸工学論文集 48, 1411-1415
- ・村井 宏・石川政幸・遠藤治郎・只木良也（1992）：日本の海岸林．ソフトサイエンス社, 513pp.
- ・林野庁ホームページ：<http://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/kentou.html>, 2011年11月28日確認

5. 津波被害画像公開サイト

5-1. 東北地方太平洋沖地震の被災地域の衛星画像地図の公開

<http://alosemergency.restec.or.jp/>

財団法人リモート・センシング技術センター（RESTEC）と株式会社 NTT データは共同で、東北地方太平洋沖地震の被害地域の復興支援のために岩手県、宮城県、福島県の沿岸地域の衛星画像地図を整備し、平成 23 年 3 月 31 日より WEB サイト等を通じた公開を行ないます。

5-2. 国土地理院（被災後空中写真）

- 被災地の空中写真【国土地理院】

http://saigai.gsi.go.jp/photo_h23taiheiyo-hr/index.html

被災後に撮影された空中写真を標定図から閲覧できる。なお、東北地方太平洋沖地震災害に関連する測量成果については、出典を明示することで申請を省略して複製・使用することが許可されたよう。

- 国土地理院の空中写真の WMS 配信【農研機構】

<http://www.finds.jp/independent/tohoku/photo201103.html>

国土地理院のオルソ空中写真（地図と重なるように補正したもの）を WMS 配信。

5-3. 日本大震災情報特設ページ【朝日航洋】

<http://ec2-175-41-208-71.ap-northeast-1.compute.amazonaws.com/index.html.var>

被災後の独自撮影の航空写真や、衛星画像とその解析結果を掲載。

5-4. 衛星画像災害前後の比較

ABC :

<http://www.abc.net.au/news/specials/japan-quake-2011/>

5-5 参考

防災科学技術研究所 : 地図・地理空間情報の紹介サイト、被災前後の空中写真比較など

<http://all311.ecom-plat.jp/group.php?gid=10005>

注意：下記の情報は公式情報だけでなく、個人による作成、ボランティアにより作成された情報など、様々です。それぞれの情報を利用する際は、それぞれのページの説明を読んだ上で、情報の信頼性、精度、更新頻度を十分に確認した上でご利用ください。

- 平成 23 年東日本大震災に関するだいち (ALOS) 衛星画像緊急 WMS 配信 暫定ページ

<http://bosai-drip.jp/alos/wms.htm>

JAXA が実施する「陸域観測技術衛星『だいち』(ALOS)」の防災利用に向けた「パイロット実証」の一環として、人工衛星「ALOS (だいち)」の緊急観測を実施した被災地衛星画像を WMS で公開。

- 平成 23 年東日本大震災に関する国土地理院被災後空中写真緊急 WMS 配信 暫定ページ

<http://bosai-drip.jp/ap/wms.htm>

国土地理院が撮影した被災後の空中写真を、各方面での災害対応に貢献するために、WMS で公開。

- ・東北地方太平洋沖地震 被災地の観測【(独)情報通信研究機構】

<http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/h22/announce110312/index.html>

航空機搭載合成開口レーダ(Pi-SAR2)を用いて、発災翌日の平成23年3月12日(土)午前7:30～午前10:45に東北地方の太平洋沿岸及び主要道路付近を緊急観測を実施。

5－6 被災後空中写真を使った判読・解析

- ・2011年3月11日東北地方太平洋沖地震に伴う津波被災マップ【日本地理学会】

<http://danso.env.nagoya-u.ac.jp/20110311/>

地震後に撮影された空中写真(国土地理院がwebで公開)を実体視判読し、津波の遡上範囲を縮尺1/25,000の地形図に記した。家屋流出等の甚大な被害を受けた範囲もあわせて示した。[eコミマップ](#)でも公開している。

- ・津波による浸水範囲概況図【国土地理院】

<http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60002.html>

平成23年3月12、13、19日に国土地理院が撮影した空中写真を使用して、津波により浸水した範囲を判読した結果をとりまとめた。

5－7 被災後衛星画像

- ・Bingによる衛星画像【Microsoft】

<http://www.bing.com/maps/?v=2&cp=38.17737624858512~140.94946098236628&lvl=15&dir=0&sty=h&FORM=LMLTCC>

Microsoftの地図サイトに被災後の衛星画像が表示されている。上記URLはその一例。

- ・Googleによる衛星画像公開サイト【Google】

<http://maps.google.co.jp/maps/ms?ie=UTF8&hl=ja&msa=0&t=h&brcurrent=3,0x34674e0fd77f192f:0xf54275d47c665244,1&msid=204258741904521852157.00049e53455ac25dd3c9a&l1=38.299367,141.000595&spn=0.141183,0.224533&z=12&iwloc=00049e5346a8d17ed79a6>

GeoEye社の衛星画像をGoogle MapとGoogle Earthで参照可能な状態で公開中。

- ・IKONOS衛星画像を用いた津波による被害状況抽出【アジア航測】

http://www.ajiko.co.jp/bousai/touhoku2011/touhoku.htm#110314_02

画像解析により、津波の到達区域が抽出されています。

- ・TerraSAR-Xによる被害状況抽出【パスコ】

http://www.pasco.co.jp/disaster_info/110311/

合成開口レーダによる地形変化や想定浸水範囲を抽出しています。

- ・【速報】平成23年3月 東日本大震災【国際航業】

http://www.kk-grp.jp/csr/disaster/201103_touhoku-taiheiyo/

衛星画像による浸水域の判読マップ。

- ・国際災害チャーター

http://www.disasterscharter.org/web/charter/activation_details?p_r_p_1415474252_assetId=ACT-359

世界中の宇宙機関による地球観測衛星の画像が集約されて公開。

- ・東北地方太平洋沖地震・緊急撮影状況～緊急撮影・災害前後資料～【日本スペースイメージング】

http://www.spaceimaging.co.jp/news_201103_japan_quake/tabid/539/Default.aspx

GeoEye-1 と IKONOS で撮影された被災後の衛星画像を pdf 資料でまとめています。

- ・GEO Grid 災害対応タスクフォース【産業技術総合研究所】

<http://disaster.geogrid.org/>

PALSAR による浸水域抽出や変化抽出画像、ASTER による 2 時期衛星画像の比較、震度分布図など、KMZ で公開。WMS としては ASTER、震度分布図、PALSAR、シームレス地質図、活断層図を公開（リンク）。

5－8 集約サイト

- ・東北地方太平洋沖地震緊急地図作成チーム【東北地方太平洋沖地震緊急地図作成プロジェクト協議会】

<http://www-drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/emt/>

地図作成チームが作成した各種地図を公開。さらにマッシュアップや相互運用が可能なように KML や WMS でも公開中。

- ・東北地方太平洋沖地震：通行実績情報マッシュアップ【首都大学渡邊研究室】

<http://shinsai.mapping.jp/>

Google の衛星画像、本田技研の通行情報、福島原発避難地域などの情報を一元的に表示。

- ・東日本大震災三次元フォトオーバーレイ【首都大学渡邊研究室】

<http://shinsai.mapping.jp/photooverlays.html>

New York Times の撮影写真のアングルを Google Earth で再現している。

- ・東北地方太平洋沖地震のソーシャルメディアマップ【ESRI ジャパン】

<http://www.esri.com/news/n20110312.html>

ESRI ジャパンがソーシャルメディアマップを公開している。先日の、ニュージーランドの地震においても、同じ仕組みを使ったマップを ESRI が公開している。

- ・国土地理院オルソ航空写真より作成した東北地方震災、投影変換済 PNG, KML ファイル, 津波到達（浸水域）判読ライン, その他統計 GIS データの KML (KMZ), SHP 形式による配布【東京大学沢田・竹内研究室】

http://stlab.iis.u-tokyo.ac.jp/eq_data/

国土地理院撮影空中写真による津波到達ラインや地図、統計 GIS のデータ、DMSP の夜間光画像を公開。

- ・東日本大震災 減災リポートマップ【ウェザーニューズ】

http://weathernews.jp/tohoku_quake2011/map/

ウェザーリポーターからの写真付きの投稿をカテゴリ別に地図上にマッピング。KML ファイルでも公開。

5－9 研究成果

- ・平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による災害に関するメモ【静岡大学牛山准教授】

<http://disaster-i.net/disaster/20110311/>

公開されている衛星画像や空中写真から津波の遡上高を推定。陸前高田市の被害状況も判読して Google マイマップで公開。

5-10 東日本大震災の被害把握と復興支援

森林の役割

海岸林の被害・防災効果に関する研究を行っている他のグループもある。

<http://iest.saitama-u.ac.jp/project/file/report-tsunami-Sendai%20Heiya20110609.pdf>

<http://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/pdf/2siryou2.pdf>

情報ソース一覧

【航空写真】

[国土地理院](#)：航空写真、正射写真（オルソフォト）（3月12日～19日撮影）

[防災科学技術研究所](#)：地図・地理空間情報の紹介サイト、被災前後の空中写真比較など

[アジア航測](#)：斜め航空写真、ダム決壊など

【衛星画像・関連情報・海外発信】

[UN UN-SPIDER](#)：衛星画像の提供元・各種生成図等、本災害関連サイトのリンク多数（国際情報・英語）

[International Disaster Charter](#)：衛星保有機関による国際チャーター、衛星処理画像多数（国際情報・英語）

【地域観測画像（数 m-10m 級）】

[産業総合研究所 GeoGrid](#) 災害対応タスクフォース：衛星画像による被害把握や地震動マップ等のハザード情報：ASTER と PALSAR

[パスコ（株）](#)：TerraSAR-X 湛水範囲図

[国際航業（株）](#)：津波シミュレーション

[JAXA 防災・災害](#)：ALOS（だいち）画像ギャラリー：被災前後（PALSAR, AVNIR）

[ALOS through RESTEC](#)：ALOS 災害観測データの無償配布

[日本スペースイメージング（株）](#)：RapidEye, GeoEye, IKONOS, SkyMed

FORMOSAT：コンタクトポイント

JAXA/SAPC/DMSSO 川井 淳

E-mail: kawai.makoto@jaxa.jp

Tel: 03-3362-3026

[RADARSAT-2（データ：3月12日～15日：無償提供）](#)

RESTEC&NTT：岩手県、宮城県、福島県の沿岸地域の衛星画像地図を整備・配布

<http://alosemergency.restec.or.jp/>

【衛星画像災害前後の比較】

[ABC :](#)

[New York Times :](#)

【広域災害】

[NASA Earth Observatory](#)

連絡先 :

沢田治雄 (Haruo Sawada)

東京大学生産技術研究所 教授

都市基盤安全工学国際研究センター (ICUS) 国土環境安全情報学部門

〒153-8505 東京都目黒区駒場4丁目6番1号 Ce-506 ([地図はこちら](#))

電話 : 03-5452-6409

ファックス : 03-5452-6408

mailto:sawada@iis.u-tokyo.ac.jp

東北地方太平洋沖地震における津波被害と海岸林の状況

～仙台平野（福島県、宮城県）における海岸林被害状況調査結果～

埼玉大学大学院理工学研究科・（兼）環境科学研究センター 教授 佐々木 寧

問い合わせ先 E-mail:ysasaki@mail.saitama-u.ac.jp

埼玉大学大学院理工学研究科・（兼）環境科学研究センター 教授 田中 規夫

問い合わせ先 E-mail:tanaka01@mail.saitama-u.ac.jp

<http://iest.saitama-u.ac.jp/project/file/report-tsunami-Sendai%20Heiya20110609.pdf>

海岸防災林の被災状況

www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/pdf/2siryou1.pdf

www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/pdf/siryou3.pdf

第2章 東北地方太平洋地震による海岸林の効果と被害について

第1節 衛星画像解析による津波被害の把握（越智士郎、野々口義延）

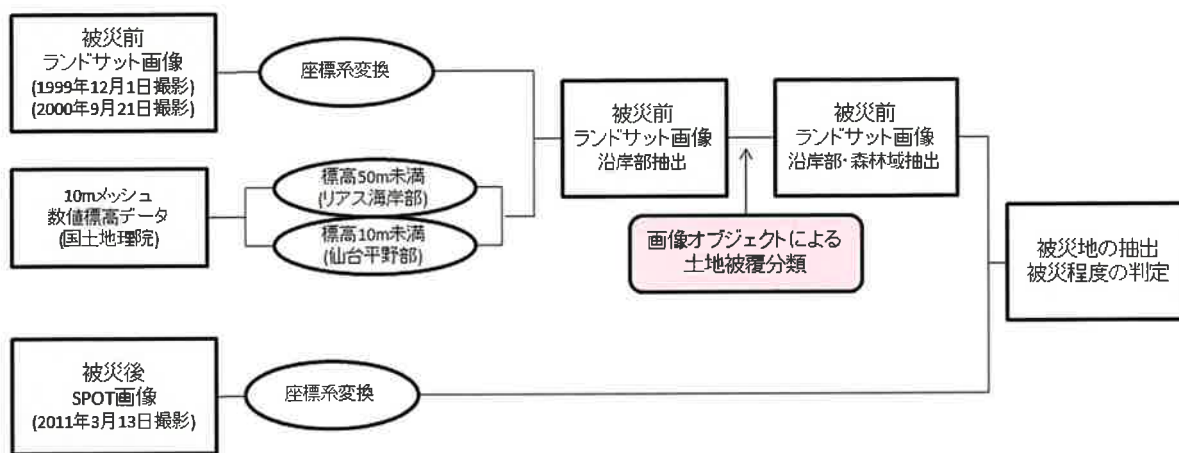
1. はじめに

2011年3月11日の東日本震災では、津波により東北太平洋沿岸地域の広い範囲は壊滅的な被害を受けた。沿岸に位置する海岸林および沿岸低地の樹林地でも、直接津波に流されたり、深い浸水による塩害被害で枯損木として立ち枯れの被害が出るなど、被害は広域に及んでいる。

しかし、沿岸の比較的狭い範囲をとってみても、沿岸や海底の地形、あるいは防潮堤や消波ブロックの位置により津波の高さが一様でないこと、林地の地形、土壌、地下水位などの森林立地条件、液状化や地盤沈下などの地震被害の程度により、海岸林の被害の程度は多様である。

本報告は、リモートセンシング画像によるデータ分析により、広域な被害状況を把握しようとするものである。

2. 分析手順



リモートセンシング画像分析 処理の流れ

今回行ったリモートセンシング画像分析の処理の流れを図に示し、以下に説明する。

2-1. 被災前 衛星画像

米国地質調査所(U.S. Geographic Survey: USGS)では過去に撮影された各種衛星データの一部をインターネットを通じて無料で公開しており、被災地を撮影した画像も複数存在している。その中で、比較的鮮明な(雲量が少なく)直近の Landsat 画像として、1999 年 12 月 1 日撮影の 1 画像(三陸・中部)と 2000 年 9 月 21 日撮影の 2 画像(三陸南部・仙台平野・福島海岸部)を選択し、ダウンロード、入手した。全て ETM センサ画像である。

参考 URL <http://edcsns17.cr.usgs.gov/NewEarthExplorer/>

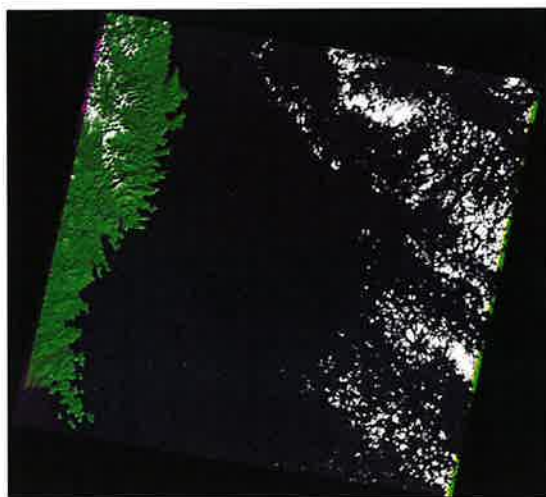
ETM センサの特徴を表に示す。

Landsat ETM+			
band	波 長 帯	解像度 (m)	区 分 内 容
1	青～緑 (0.45-0.52 μ m)	30	浅海域の地形や沿岸域の観測。針葉樹と広葉樹の区別、土壌と植生の区別等。
2	緑～黄 (0.52-0.60 μ m)	30	地表構造物の識別、水質等。水域・陸域の区別等。
3	赤 (0.63-0.69 μ m)	30	市街地や砂浜、造成後の乾いた裸地、収穫後の畑地、枯れた草地や芝地などが、画像上で明るく見える。植生調査。陸域と水域の区別等。
4	近赤外 (0.76-0.90 μ m)	30	人間の目には感じられない領域。赤外線は水に吸収されるため、水面は暗く写る。陸域と水域の境界線の抽出や地質構造の判読に向いている。植生分布、熱水変質による褐鉄鉱などの検出等。
5	中間赤外 (1.55-1.75 μ m)	30	人間の目には感じられない領域。雲と積雪域の区分。埋立地や空き地、草地やゴルフ場は白く見える。植物と土壌の水分含有量の推定等。
6	熱赤外 (10.4-12.5 μ m)	60	人間の目には感じられない領域。地熱、水温等、地表物質の温度分布。石灰岩や粘土分布等シュードカラー表示して詳細な分布をみる。
7	中間赤外 (2.08-2.35 μ m)	30	人間の目には感じられない領域。露出している地表熱水鉱床や鉱石資源探査、水域と雲の識別等。
8(p)	緑～近赤外 (0.50-0.90 μ m)	15	地表構造物の識別、植生分布等の調査。上記 30m 画素データの高解像度化。

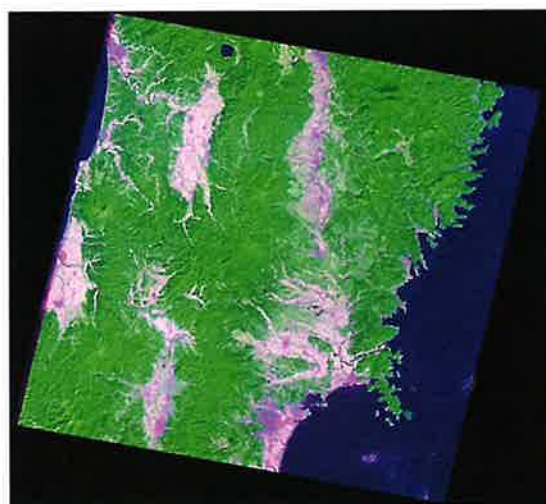
SPOT5 (HRG-X,HRV-P)		
band	波 長 帯	解像度 (m)
1	緑～黄 (0.50-0.59 μ m)	10
2	赤 (0.61-0.68 μ m)	10
3	近赤外 (0.78-0.89 μ m)	10
4	中間赤外 (1.58-1.75 μ m)	20
5(p)	緑～赤 (0.48-0.86 μ m)	5or2.5

Terra/ASTER (VNIR)		
band	波 長 帯	解像度 (m)
1	緑 (0.52-0.60 μ m)	15
2	赤 (0.63-0.69 μ m)	15
3	近赤外 (0.76-0.86 μ m)	15

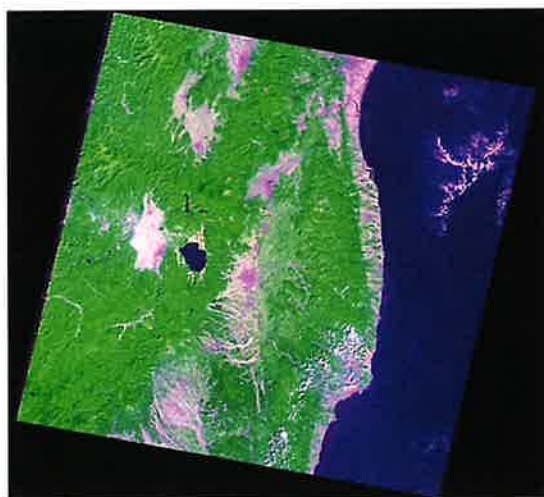
分析に利用した 3 シーンの画像を図に示す。



1_199912



2_200009



3_200009

3 シーンが含む範囲について、被害の状況を考慮して、地域を以下の 4 つのゾーンに分割して、解析を進めた。

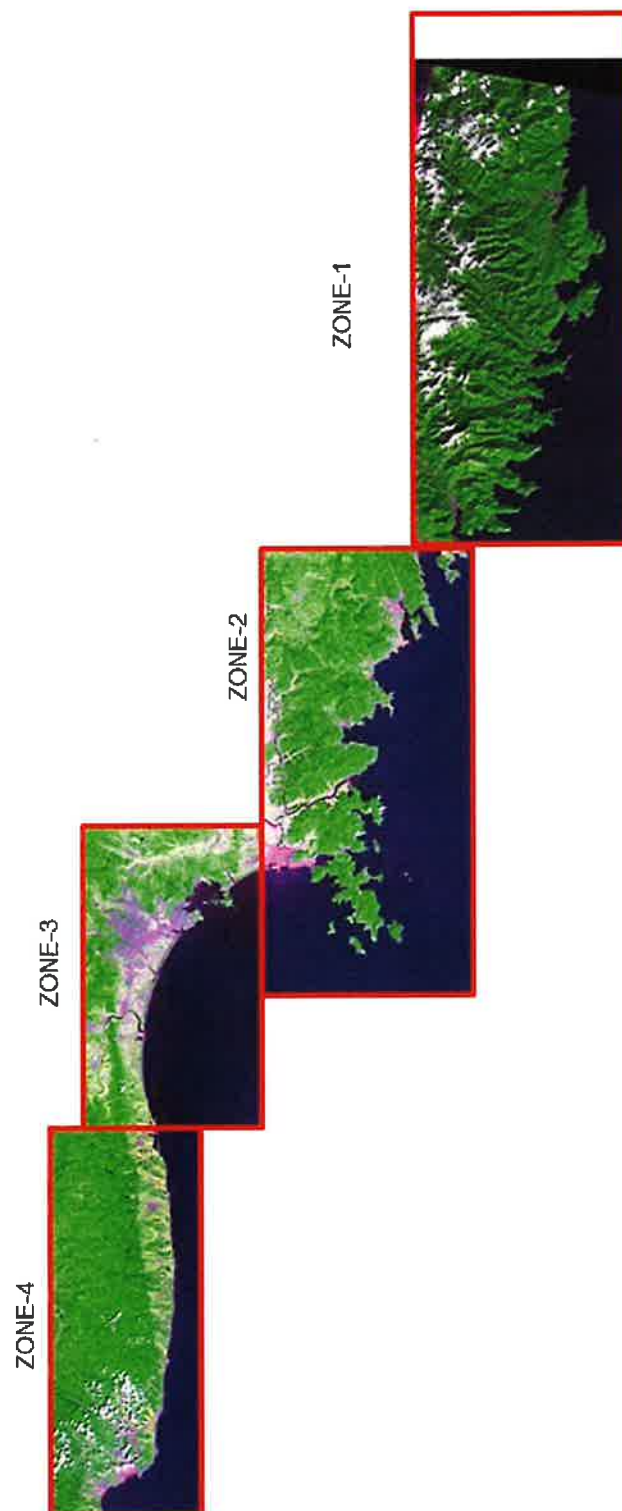
(ZONE-1) 三陸海岸北部

(ZONE-2) 三陸海岸南部

(ZONE-3) 仙台平野部

(ZONE-4) 福島沿岸部

4 つのゾーンを図に示す。



2-2. 被災後衛星画像

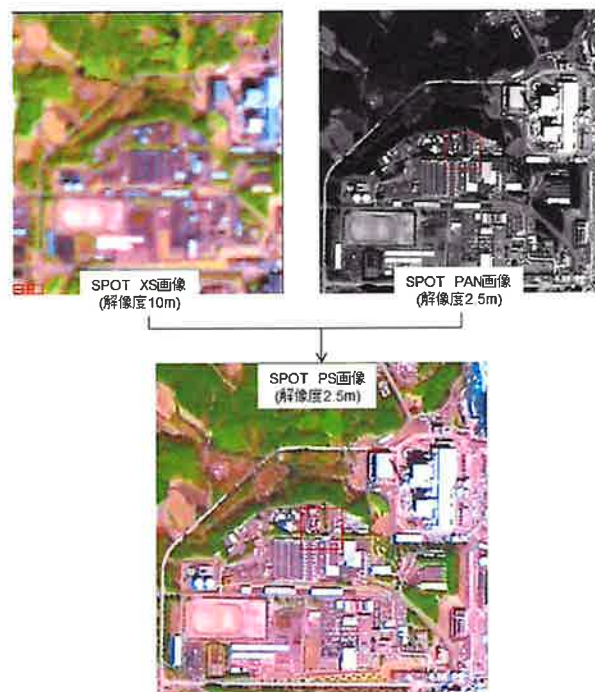
被災後の衛星画像については、日本の JAXA が保有する各種の人工衛星画像の他、フランス SPOT-Image 社の SPOT 画像、カナダの RADARSAT 画像などがチャーター撮影を実施し、画像データの無償配布を行った。本報告では、無償配布されたデータの中からスペクトル特徴、空間解像度(地上分解能)、撮影範囲、画質(雲量)などを考慮し、SPOT 画像を利用することとした。ただし、雲で判読できない場所については、ASTER データで補完することにした。

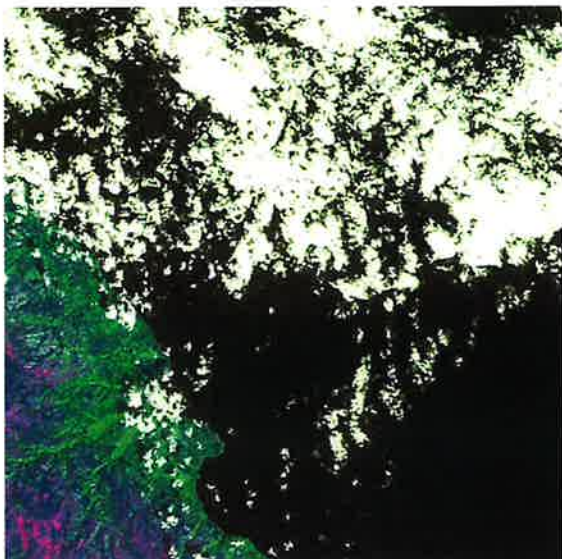
SPOT/Pan/XS センサおよび ASTER センサの特徴を表(前出)に示す。

2-3. パンシャープン画像の作成

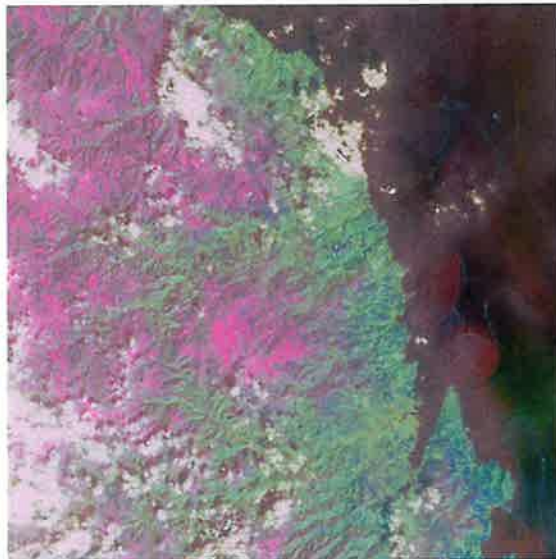
SPOT センサには、地上分解能 2.5m のパンクロマチック画像(PAN 画像)と地上分解能 10m のマルチスペクトル画像(XS 画像)が存在する。パンシャープン画像(PS 画像)とは、2.5m 解像度の PAN 画像の輝度情報を利用して、解像度 10m のマルチスペクトル画像を疑似的に解像度を 2.5m に鮮明化した画像である。スペクトル反射輝度のオリジナル情報は損なわれるが、鮮明なマルチスペクトル画像(カラー画像)となるため、特に目視判読により画像判読を行う場合には有効である。

図は分析に利用した SPOT 画像 8 シーン(XS 画像)である。
また図に同一地点の PAN 画像、XS 画像、PS 画像を示した。PS 画像で鮮明なカラー画像となり、目視判読に有効であることがわかる。

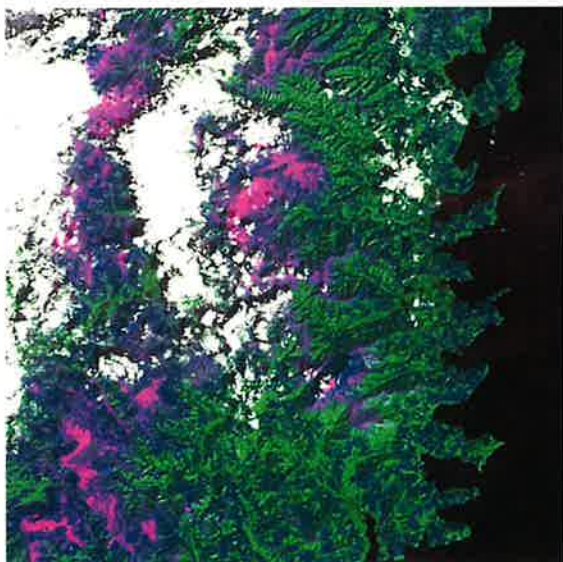




spot_xs_org1



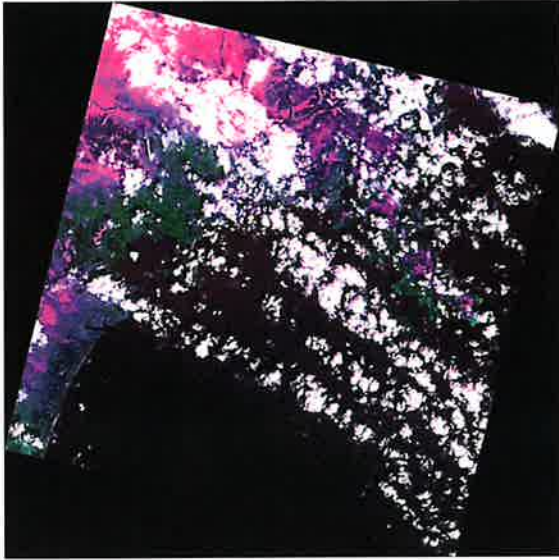
spot_xs_org2



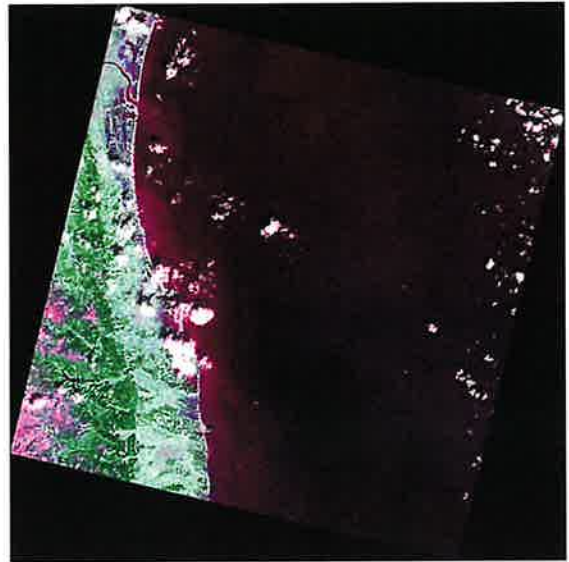
spot_xs_org3



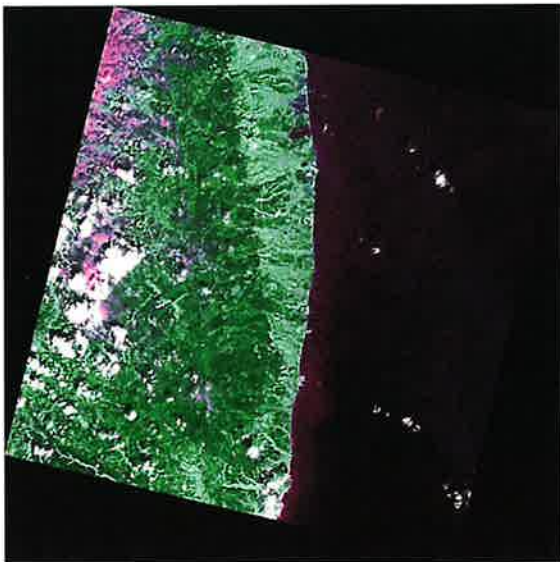
spot_xs_org4



spot_xs_org11



spot_xs_org13



spot_xs_org15



spot_xs_org17

なお、ZONE-2(三陸海岸南部)については、SPOT 画像では雲量が多く、解析が困難なため、日本の ASTER・VNIR 画像(表参照)を利用した。

図は作成した ASTER-VNIR 画像(ZONE-2)である。



図 ASTER/VNIR 画像
(ZONE-4)

2-4. 被災した可能性のある地域の切り出し

- (1)三陸海岸地域については、標高 30m 以下の地域、
 - (2)仙台平野部については、標高 10m 以下の地域、
 - (3)福島県沿岸地域については、標高 20m 以下の地域、
- を被災した可能性のある地域として切り出し、分析対象地とした。



LT7_ROI_1



LT7_ROI_2



LT7_ROI_3



LT7_ROI_4

2-5. NDVI による被害度の比較

NDVI(エヌディーブイアイ、Normalized Difference Vegetation Index)とは植生の分布状況や活性度を示す指標で、日本語では正規化差植生指数と呼ばれるものである。

NDVI は衛星データの、赤バンドと近赤外バンドの反射率を用い、以下の式により算出できる。

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R)$$

R:衛星データの可視域赤の反射率

IR:衛星データの近赤外域の反射率

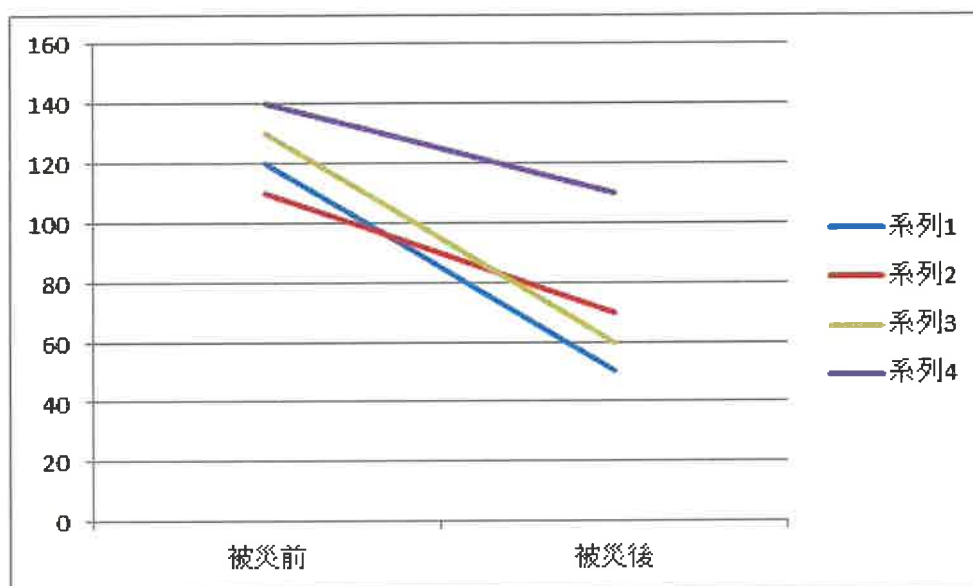
この式から、NDVI は -1 ～ 1 の間に正規化した実数値を示すが、本報告で、これを 0 ～ 200 の整数値に変換して使用する。NDVI は大きい数値になるほど植生が濃い(植生の活性度が高い)ことを表すが、具体的な単位量(例えばバイオマス量、葉面積、緑被率)ではない。単位量を推定するために、様々な単位量と植生指標の関係を現地観測データとの相関から求める必要がある。本報告では、NDVI 値だけから、相対的な植生の活性度の変化を調べている。

計算式で利用される赤バンドと近赤外バンドは多くの人工衛星のセンサに搭載されており、本研究で利用した Landsat/ETM 画像、SPOT/XS 画像、ASTER/VNIR 画像でも算出できる。ただし、同じ地点を撮影しても画像が異なれば計算される NDVI 値に差異が生じる。これはセンサ毎の解像度や感度の違いや、その地点から見た衛星や太陽(日射)の角度の違いによるもので、異なる画像間で NDVI を比較する場合には、現地の状態に応じたキャリブレーションが必要となる。

図は、被災前の Landsat 画像から計算された NDVI 値と被災後の SPOT(または ASTER)画像から計算された NDVI の変化を模式的に示したものである。

被災前の Landsat(ZONE-1)画像は 1999 年 12 月 1 日撮影のものであり、季節的に、落葉樹や草本の多くは既に枯れていると考えられる。また、被災前の Landsat(ZONE-2~4)画像は 2000 年 9 月 21 日の画像で、落葉樹や草本もまだ葉の緑を保っていると考えられる。一方、被災後の SPOT 画像、ASTER 画像は、2011 年 3 月に撮影されたもので、落葉樹や草本は新緑を迎える前の冬季の植生状態で撮影されている。

従って 4 つのゾーンで単純に NDVI 値の減少量から植生の減少度を出すのではなく、シーン毎に、できればシーン内の植生タイプの異なる地域ごとに、NDVI 値の減少量と現地の状態を対比させながら、被害度の推定を行う必要がある。本報告では、2 度にわたり現地調査を実施し、画像の情報と現地の被害度のすり合わせを行った。



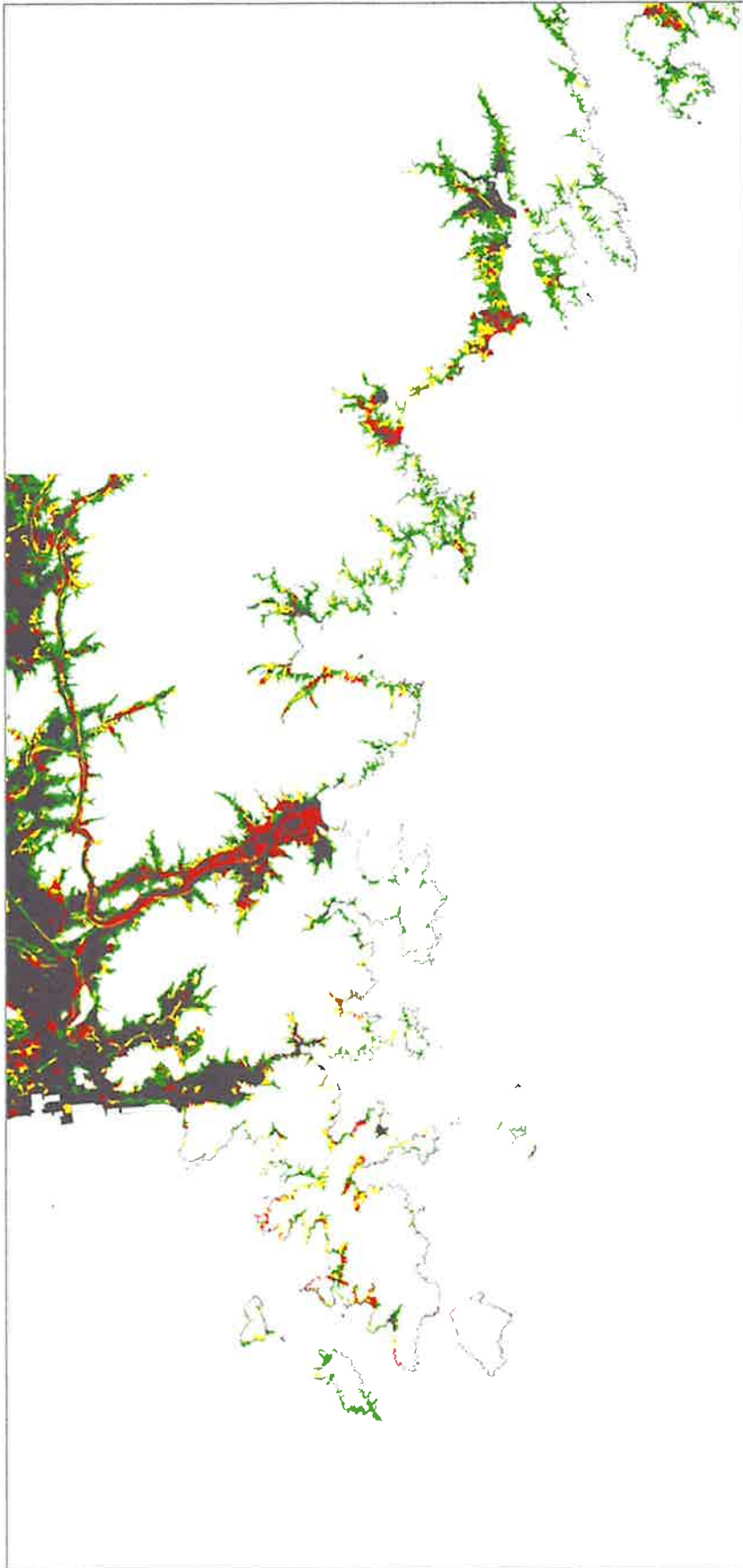
2-6. 被害分布図の作成

被災前の Landsat 画像から「森林」と判読した領域を対象に、現地調査から得た知見から、NDVI の減少量と被害度の関係を考慮し、被害度を以下のように分類し、分類マップを作製した。

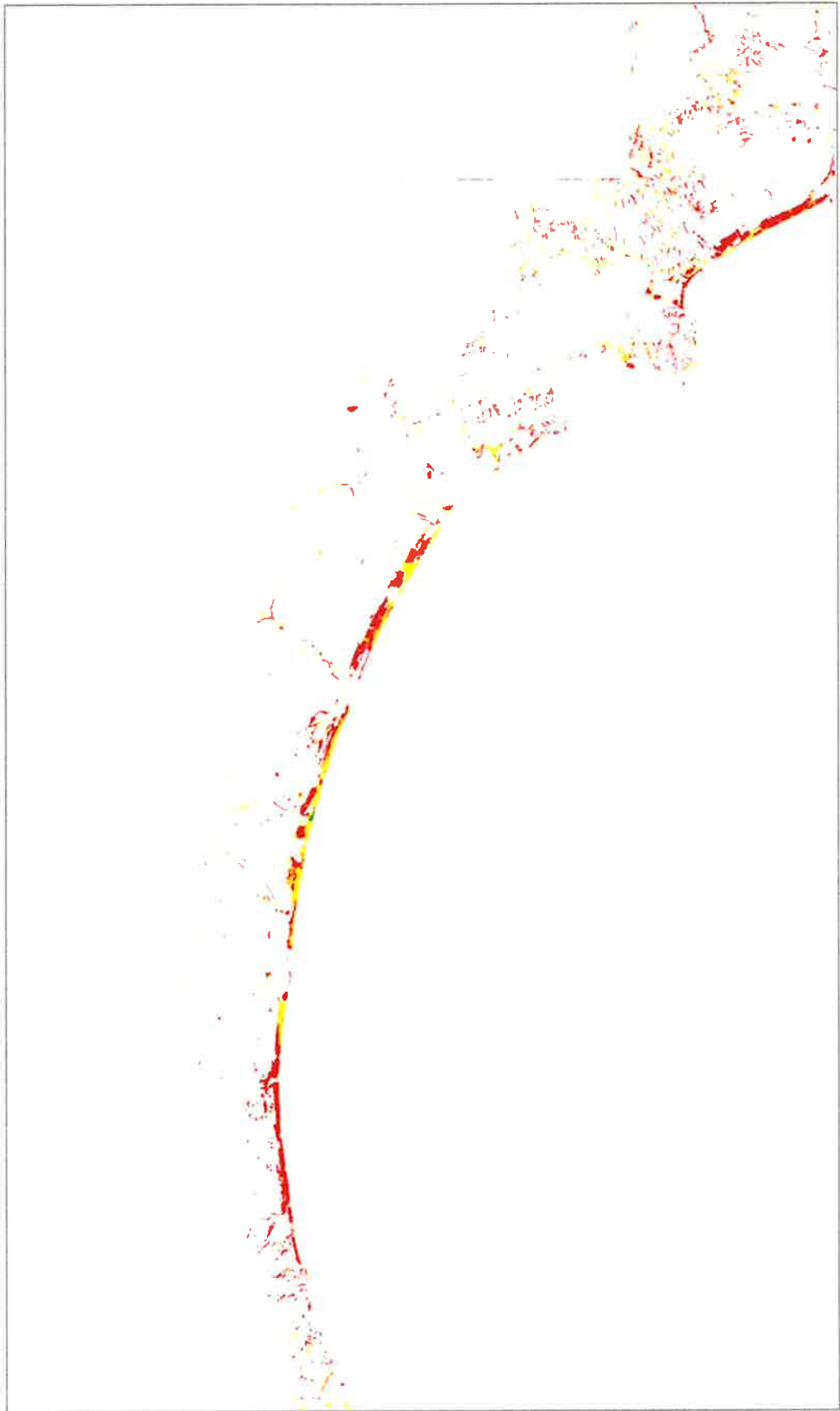
- A 外観上の被害が軽度もしくは確認できない林地・・・軽度の被害
- B 画像上からも植生の劣化が確認できる林地・・・中程度の被害
- C 消失または大部分の植生が流出した林地・・・深刻な被害



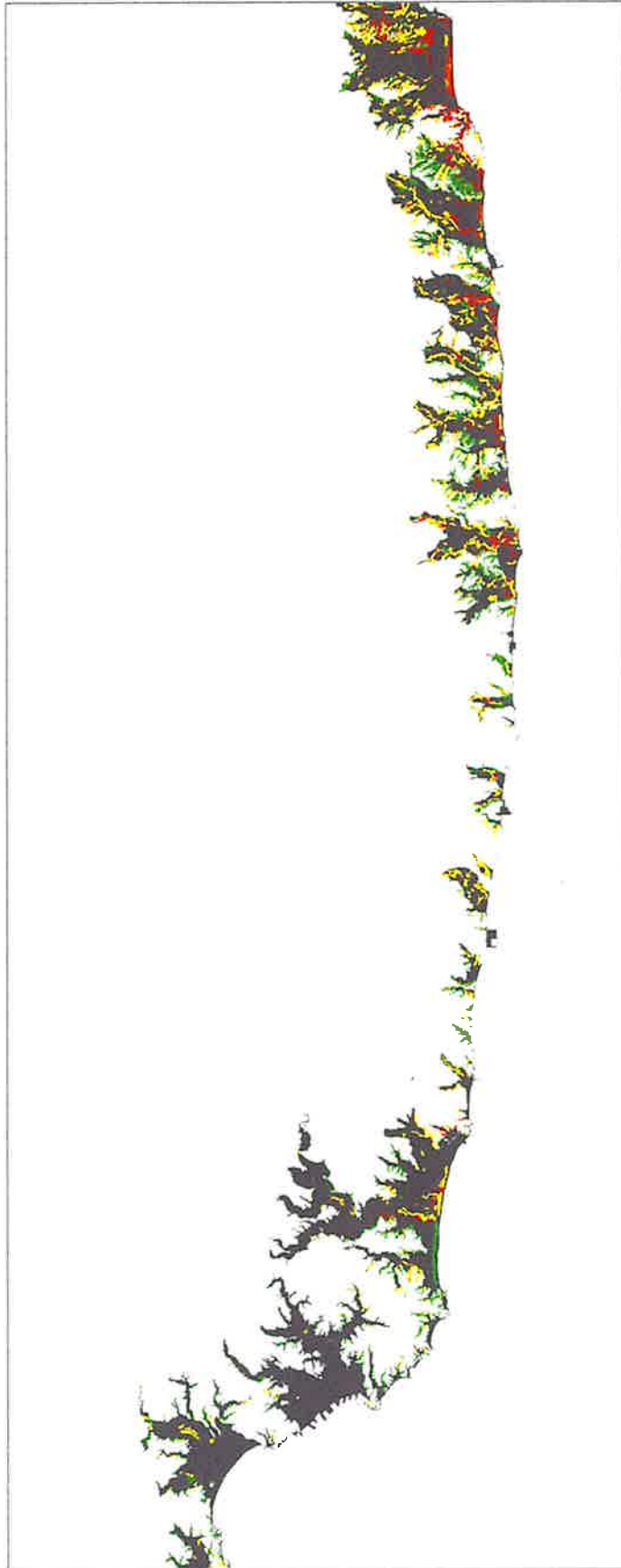
被害分類図_Z 1



被害分類図_Z 2



被害分類図_Z 3



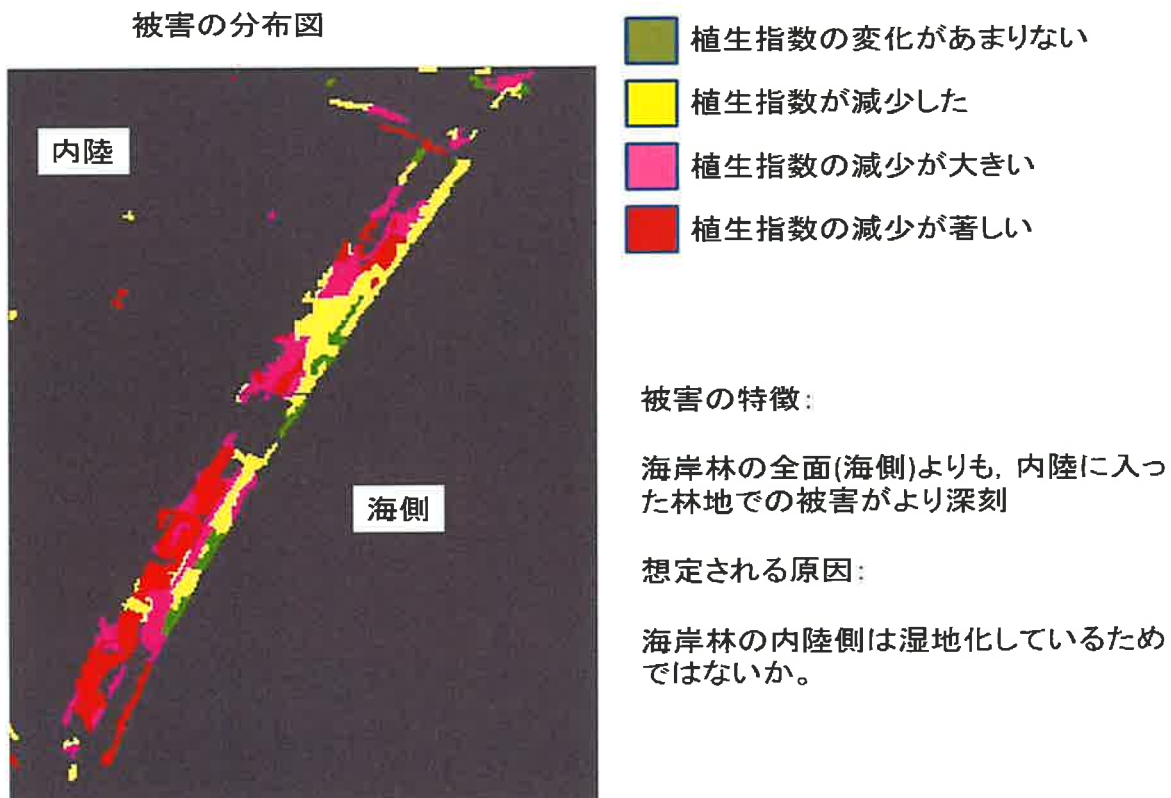
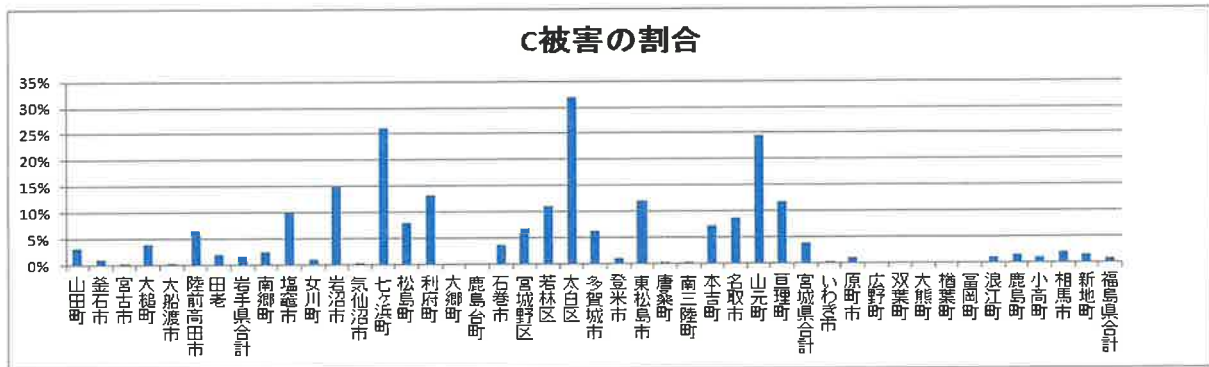
被害分類図_Z 4

2-7. 集計結果

	(面積: Ha)			
	対象林地(一部・畑, 草地を含む)	A(植生指標の劣化は小さい)	B(植生指標の劣化が大きい)	C(植生指標が著しく劣化)
山田町	576	531	26	19
釜石市	1,370	1,316	39	16
宮古市	2,185	2,141	35	9
大槌町	670	627	18	26
大船渡市	1,501	1,417	81	4
陸前高田市	748	626	73	49
田老	464	442	13	10
岩手県合計	7,513	7,098	283	132
南郷町	35	19	15	1
塩竈市	120	73	35	12
女川町	834	586	239	9
岩沼市	404	232	112	61
気仙沼市	2,791	2,394	389	7
七ヶ浜町	147	54	55	39
松島町	213	129	67	17
利府町	27	14	10	4
大郷町	12	7	5	0
鹿島台町	5	4	1	0
石巻市	18,441	15,340	2,405	696
宮城野区	203	107	83	14
若林区	334	114	183	37
太白区	15	9	2	5
多賀城市	65	43	17	4
登米市	6,581	5,456	1,053	72
東松島市	1,191	455	591	145
唐桑町	215	204	11	0
南三陸町	2,377	1,840	528	9
本吉町	1,812	1,154	526	131
名取市	211	99	93	19
山元町	399	31	271	98
亘理町	175	89	65	21
宮城県合計	36,606	28,452	6,756	1,398
いわき市	14,937	14,586	334	17
原町市	3,631	3,165	429	37
広野町	461	443	18	0
双葉町	1,082	1,014	68	0
大熊町	472	427	45	0
楢葉町	760	634	126	0
富岡町	432	387	46	0
浪江町	1,793	1,489	285	19
鹿島町	3,260	2,934	276	50
小高町	2,565	2,359	178	28
相馬市	6,158	5,163	864	130
新地町	106	40	65	2
福島県合計	35,657	32,640	2,735	282

3. 考察

クラス C の被害は、面積としては石巻市(宮城県)が最も大きい、分析対象地域の面積自体が大きいためと考えられる。分析対象地の面積に対するクラス C 被害地面積に割合では、太白区(仙台市)、山元町、亶理町など仙台平野と、その周辺の、塩釜市、七ヶ浜、利府町などで大きくなっている。



図は名取川と阿武隈川にはさまれた仙台平野の被害マップである(被害分類図_Z 3の部分)。仙台平野沿岸の海岸林は全体的に林帯幅が広く、海岸側と内陸側で被害程度が異なっている場

所も多くの場所で確認できた。そうした地点の多くで、図に見えるように、海岸に側の林地より内陸側の林地の方が被害度が強くなることが確認できる。その要因として、

1. 海岸側の樹木が比較的若齢で、幹が細く、津波の力に対してしなって、折れにくいこと、
2. 海岸側の土地の方は砂丘となり内陸側より土地が高く、地下水位が深く、逆に内陸側の土地では地下水位が低く、湿地化していること、
3. 数回にわたる津波で、内陸で発生したがれきを含んだ引き波により、内陸側の樹木により強い破壊力が加わった、

ことなどが考えらえられる。

以上の分析結果を踏まえて、今後の海岸林および内陸の樹林地の復旧と創生に関する提言を考える。

以上

第2節 現地調査報告（大野亮一）

1. 被災した海岸防災林の特徴

東日本大震災の津波により多様な被害を受けた海岸林の特徴を把握するため、青森から千葉までの各所を回り、被害状況の確認を行った。ここでは、視察しての印象を踏まえ、被害の特徴を簡単にまとめた。

●地形条件による被害の違い

- ✓ 津波の高さだけではなく、海岸林が立地する地形により被害形態が異なる。
- ✓ 津波が高く、低地部で被害が最も大きく、津波が低く、高地部では被害は皆無となる。
- ✓ 同規模の津波高さであっても、リアス式、平野部など地形条件により被害が異なる。
- ✓ 津波の高さと地形条件が同様な場合、被害形態も同様となる。



リアス式の被害状況（明戸浜）



平野部の被害状況（仙台平野：井土浜）

●リアス式海岸での被害の特徴

- ✓ 津波により根こそぎ（根が引きちぎられる状態）流出している林帯が多い。
- ✓ 津波の遡上高が高く、防潮堤のない個所では最大 1.5km 幅の林帯が破壊された。
- ✓ 林帯幅が狭い個所は壊滅的な被害を受けている。
- ✓ 林帯後部の地形形状により、林帯の被災状況が異なる。

●平野部での被害の特徴

- ✓ 津波により林帯が列状に被災している箇所が多く見られる。
- ✓ 幹折れ形態から、押し波被害が多いように見受けられる。
- ✓ 海に張り出した砂州地形では、地形変化や防災林の流木化が甚大であった。
- ✓ 盛土の背面など陸側に下っているのり面では、のり尻が激しい侵食を受け根返り被害が見られる。
- ✓ 汀線と直交する作業道の周辺では、林帯被害の拡大が見られる。
- ✓ 河口部では、河口からの津波侵入により樹木が被災している。

2. 現地踏査概況

被災箇所のうち、代表的な箇所について写真とコメントを記す。

2-1 岩手県陸前高田（高田松原・撮影平成 23 年 5 月 22 日）

奇跡の一本松が有名。約 7 万本のマツが植栽されていた高田松原の 80% 程度の地盤が沈下により水没している。地盤が残っている箇所では前縁の防潮堤が残るが、それより海側の砂浜は消失した。林内に造成されていた防潮堤（T.P5.0m 程度）はほとんどが破壊され、水門部のみが海の中に残っていた。



被災前



被災後（赤丸：一本マツ）



海中に残った防潮堤の水門



破壊された林内の防潮堤



松原へ渡る橋の上からの全景（高田松原を守る会提供）

海岸林の被害としては、「消失」となるが、残存している個体は「折れ」となり、一本松以外に生存している個体は認められない。本地区は生育地盤の破壊が顕著で、基盤が破壊されれば当然生育を継続できないことを示す事例である。

残存している個体も、ほとんどが生育基盤の侵食を受け、根系がむき出しになっている。基本的に、胸高直径 50 cm 以上の大径木が多く、根系も垂直根、根張りとも十分に発達しており、根系同士が絡まりあって、竹のような根系網を形成している（根系が絡まりあい元の地上位置と考えられる場所にとどまっている）。現在は、散乱した流木も片付けられているが、当初は根系のついた流木が散在していた。本地区も、海側・陸側両方向の「折れ」が確認されたため、押波だけでなく引き波の影響も大きいと推察される。また、立木の周りが選択的に侵食されている状況も確認された。



松原であった箇所



「折れ」被災で根系がむき出しとなる



根系ごと流木化した個体



生育基盤残存部の状況



立木の周りが選択的に侵食



生育基盤残存部の状況



根系網を維持したまま土壌が流亡



発達した垂直根（現状も砂地の中）

流木化したマツは、背後の建物に侵入し、津波被害を増幅させた可能性がある。



松原の後部にある浄化センター建物



海岸部より約 3km 内陸のアパート

災害廃棄物（ここでは多くが流木）は、海沿いに仮置き場が設けられており、金属、がれき（コンクリート等）、木材などに大別し収集されている。



海岸沿いに集積された木材ゴミ



災害廃棄物山の例？

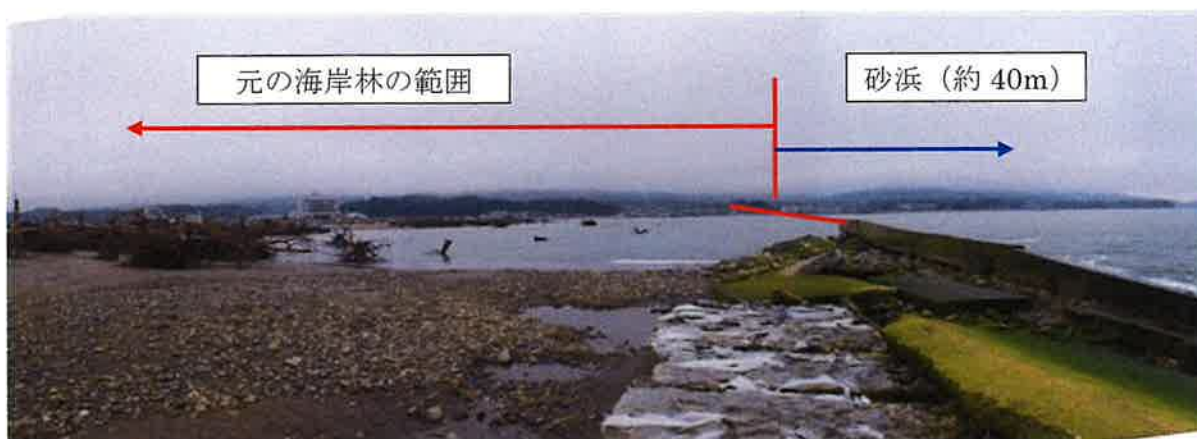
一本松は、テレビではあまり大きく見えないが、実際は周囲の個体よりも一回り大きなサイズと考えられ、胸高直径 1m 以上ある大木であった。現在は、周囲がトンバックで固められ、冠水しないよう対策が採られている（排水溝も設置）。一本松が残存したのは、林帯最後部だったこと、他の個体と比べ一回りサイズが大きかったことに起因していると考えられる。



一本松（元の林帯の一番後部）



胸高直径 1m 以上ある



高田松原の前縁防潮堤からの全景



陸前高田市街の状況（海岸から 3km 内陸でも冠水し、流木等のがれきが散在している）

2-2 宮城県気仙沼南部（大谷海岸・撮影平成 23 年 5 月 22 日）

宮城県気仙沼市の南部で、壊滅的な破壊を受けた海岸林。気仙沼付近は高低差が大きく、津波被害が発生したのは地盤の低い箇所と河川沿いに集中している。特に気仙沼から国道 45 号線を南下すると、海岸に張り出した尾根部と谷部で被害の状況が全く異なっている。

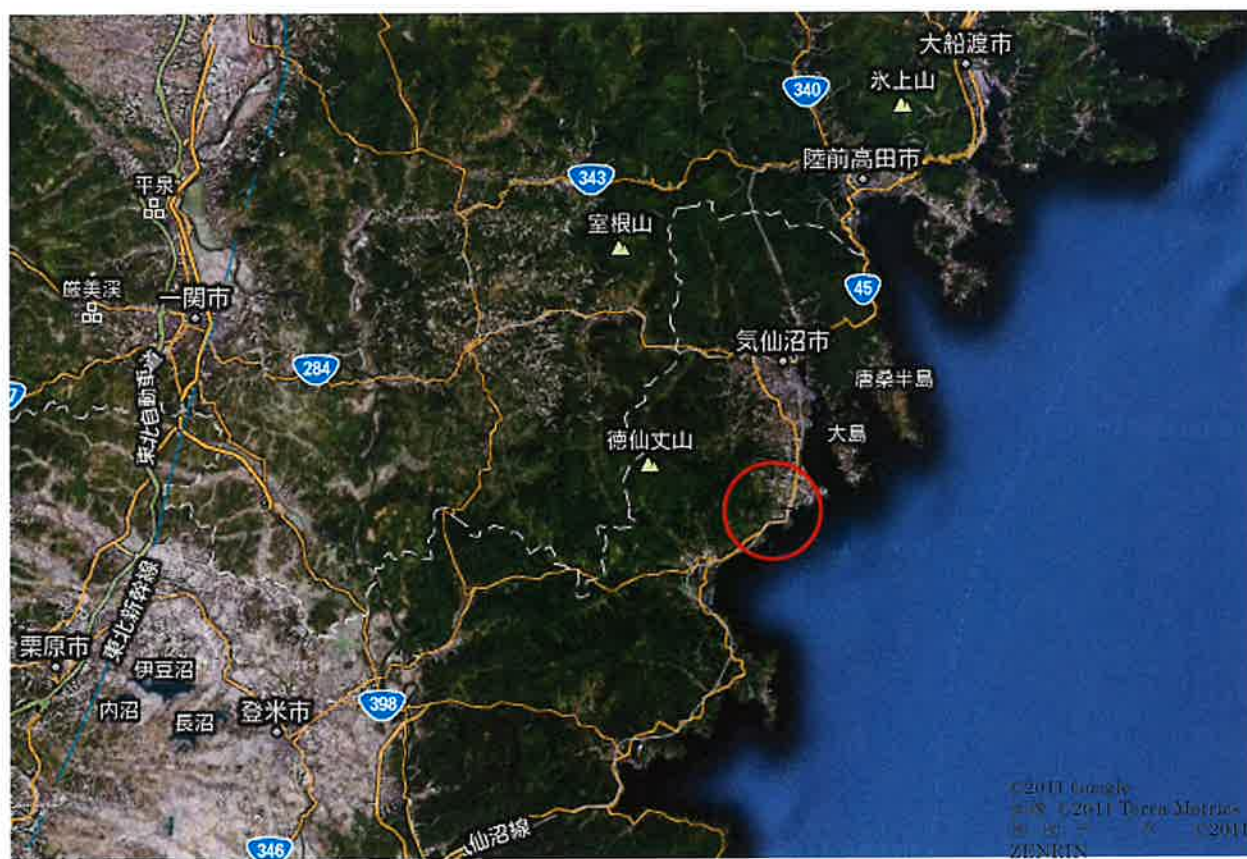


図 1 宮城県大谷海岸



被災前 (S56)



被災後

元々林帯幅が狭いが、ほとんどの海岸林が破壊され流木化している。被災後写真の赤丸部分は、海沿いまで尾根が張り出しているため両側の谷部よりも被災度合いが小さい。「折れ」被害も陸に向かう個体、海に向かう個体が混在しており、当地区では引き波の影響も大きかったと推察される。前浜の侵食が激しく、防潮堤も破壊されているため、復旧時には塩害対策も重要な位置付けになる。また、地盤沈下(?)のために一部冠水している箇所もある(塩水)。



海岸林が破壊され砂浜となっている



壊滅状態 (一部残存木の裏は駅舎、尾根部)

当地区は、「折れ」により流木化した個体が多く確認された。林帯後部の盛土部では、垂直根が発達し根系ネットワークを形成しているような状態が見られ、根系の流出は免れていたが、ほとんどの幹部が「折れ」により流木化していた。「折れ」は、地上高1m程度のものが多く見られたが、地上高約8m付近でも確認された。



若干の盛土部（根系は残るが「折れ」）



発達した垂直根



高い位置で幹折れ被害が発生



地上高 13m（10m 程度まで津波痕跡有）より撮影

海岸後部の地形が谷状になっているか所は、壊滅的な被害を受け、海岸林が跡形もなくなっている。



海岸林が跡形もなく破壊されている（元々林帯幅が狭い部分）

防潮堤は破壊され、ほとんど機能を果たせない状態となっている。現在の汀線は防潮堤のあった位置から約 20m 後部に位置している。また、海底汚泥は見られないが芝の枯れたようなものが表層に集積していた。



破壊された防潮堤



地盤沈下、侵食により汀線が後退



芝？が集積した状態



左図拡大

2-3 宮城県石巻南部（矢本海岸・撮影平成 23 年 5 月 23 日）

石巻南部に位置する。元々地下水位が高く、開渠が林内に多く設置されている。本地区は、「折れ」、「根返り」、「傾倒」など多様な被害が確認できる。流木化はあまり認められないが、海岸近くの田畑では根の薄い流木が確認された。



図 2 宮城県矢本海岸

©2011 Google
画像 ©2011 Terra Metrics
地図データ ©2011
ZENRIN



被災前



被災後



被災前



被災後

元の地下水位が高いためか、多くの土地が冠水している（林帯後部ほど冠水）。垂直根の発達もほとんど確認されない。被災状況は、「折れ」、「根返り」、「傾倒」と多様で、「折れ」と「根返り」・「傾倒」は個体サイズで区切れる印象を受けた。「根返り」と「傾倒」は判然としないが、よりサイズの小さなものが「傾倒」となるように思えた。生存木については、葉が赤色化している個体が多く確認され、時間経過とともに増加している可能性がある。また、降雨後の踏査のためか冠水の程度も悪化していた。



「折れ」の被害状況



「傾倒」、「折れ」の被害状況



「根返り」の被害状況



地際での「折れ」被害



地下水位が高く垂直根の発達なし



多くの箇所が冠水

すべての調査地に共通する事項として、防潮堤等の構造物後部の破壊が顕著であった。これは段波によるものと考えられるが、同様の現象が多く見られた。当地区では、林帯前線から約50mに設置された土留工の後部で盛土が侵食され冠水している状況が確認できた。

したがって、立木被災も構造物の後部で大きく、構造物前面はあまり流木化が確認されず生存木が多いのに対し、構造物後部では林帯が消失（生育基盤が消失）するなど、**地形により津波から受ける影響が大きく異なることが確認された**。ただし、盛土部で垂直根が発達した個体は流木化しておらず、**根系の発達が流木化防止に大きく影響することが伺えた**（津波の規模にもよる）。



構造物前後の状況（左が海側、右が陸側）



構造物前後の状況（左：陸、右：海）



発達した垂直根



実生と考えられる個体は生育継続



防潮堤裏の破壊

2-4 仙台荒浜地区（撮影平成 23 年 5 月 21 日）

海岸林後部には、すでにがれき収集場所やヘリポートが整備されていた（海岸林が存在した場所かは不明）。元々汀線より 150m 程度の砂浜があり防潮堤の後に海岸林が幅 400m 程度存在していた。林内には、貞山堀が横断している。図中赤丸の荒浜地区のみ海岸林が切り開かれ住宅地となっていた。

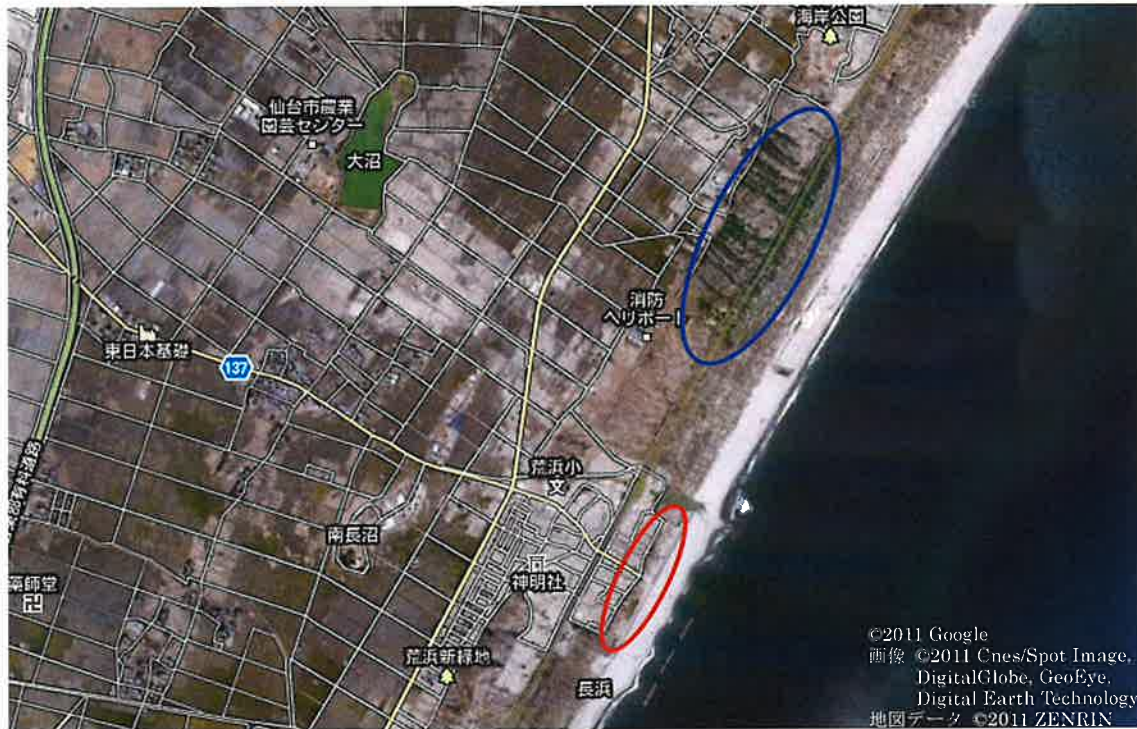


図 3 仙台荒浜地区（青丸：海岸林が筋状に残存、赤丸：海岸林幅狭く住宅地が迫る）



被災前



被災後

図 3 の青丸は海岸林が筋状に残存している。筋状に破壊された箇所は現在も一部が冠水（塩水）していたが、元々（被災前より）地下水が高い箇所であると考えられる（湿地性植物有）。



一部冠水（貞山堀より後部）



破壊されている箇所には湿地が見られる

残存している個体にも流木等が当たった痕跡があり、樹皮が剥がれ樹液が出ている。地上高約 5m 付近の枝も引き裂かれていた。破壊箇所で一部残存した個体は、盛土部の垂直根が発達した個体や、根張りがよく一部が土中に残存して流木化を免れている個体が多く、**根系が流木化防止に大きな影響を与えていることが伺えた。**

当地区では、「折れ」よりも「傾倒」、「根返り」などの被害が多く、流木化した個体も根系のついた状態が多く見られた。また、すべての被害木が陸側に倒れていたため押波の影響が大きいと推察される。貞山堀より 100～150m 付近後部では破壊を免れており、津波の威力が徐々に減衰したとも考えられる。全体的に侵食されているが、立木の周りが集中的に侵食される傾向が見られた。

筋状に残存した個体は、健全な個体と葉が赤く変色し枯死に向かっている個体が確認された。時間の経過とともに葉が赤くなる現象が増加しているとの報告もあるため、今後当地区の残存木が順調に生育するかは不明。

貞山堀の土手に植栽されている個体は、比較的に健全に生存していた（津波の水位が低くなり津波の影響が小さかったのではないかな）。



「折れ」の被害木は少ない



「根返り」が多く見られる（立木の周辺侵食）



盛土部では垂直根が発達



垂直根がなくても根張りが良いと流木化しな



残存木の葉が赤く変色



貞山掘付近の状況

図 3 の赤丸は、海岸林の最前線で、個体サイズの小さなものは「傾倒」、大きなものは「折れ」の被害を受ける傾向が見られた。特に最前線では、前列よりも 5 列目以降の個体が被害を多く受けている。ただし、根がすべて露出している個体は少ない。林床は所々草本が見られる程度であった。



最前列の状況（破壊はなく傾倒して残存）



傾倒するが侵食跡が小さい



根返りするが露出が少ない



左図拡大



最前線より 10～20m 程度後部のサイズ大の個体は「折れ」による破壊を受けている

被災し傾倒している個体に新芽が確認された。葉が緑で生存している個体は、生育を継続できる可能性が高い。



新芽が確認された



新芽が確認された傾倒木

破壊を受けても立木が存在している部分では、漂流物捕捉効果が確認された。



最後部 1 列のみ残存



海からの漂流物を捕捉している

「折れ」の被害を被っている個体は、ねじ切られたような切り口となっている。



海岸林最後列が破壊された状況



「折れ」の拡大（ねじ切られている）

3. 流木にみる根系分布の特徴

現地踏査において、流木化した個体について詳細な観察を行った。その結果、海岸林に生育するマツ（クロマツ、アカマツ）の根系には4つの分布型があると考えた。以下に、各分布型の特徴を整理した。

3-1 健全分布型

根量も多く、水平根、垂直根ともに発達したマツ本来の根系分布型。被災地では高田松原が代表的だが、盛土部など地盤高の高い箇所でも多く確認された。この分布型はほとんど流木が確認されなかったが、津波被害の大きい箇所では幹部の「折れ」被害が発生している。



高田松原で見られる根系分布型



盛土部での根系発達状況（青森県二川目）

3-2 中央集中型

根量が少なく、垂直根は認められるものの中央部に集まっている分布型。この分布型は、根量が極端に少なく（根一本は太い）先端に細根が集中している特徴が認められる。流木として確認される個体数は非常に少ないが、下記に示すとおり複数の箇所を確認されている。垂直根の長さは個体によって異なるが 1.5m程度の個体も確認された。この分布型の垂直根が短い場合、後に示す多分岐型に近い形となる。



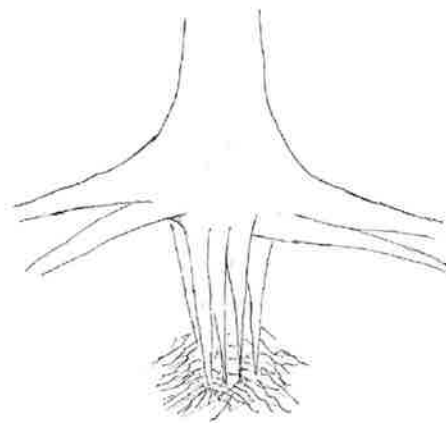
宮城県長面の流木



宮城県荒浜の流木



青森県織笠の流木



中央集中型のイメージ図

3-3 多分岐型

明瞭な垂直根が確認されないものの、多数に分岐した短い垂直根が複数認められる分布型。垂直根が見られる流木ではこの分布型の出現が一番多く、また中央集中型との混在分布型も認められる。垂直根の長さは後に示すとおり、個体のサイズよりも場所の特性に依存しているものと推察される。このタイプの流木を観察すると、多分岐の程度が強いほど垂直根存在範囲の土壌を保持している個体が多く、中央集中型に近い個体よりも土壌緊縛力が強いと思われる。



岩手県船越浦の浜



岩手県越喜来浦浜

典型的な多分岐型の例



宮城県新浜



青森県織笠

中央集中型に近い多分岐型

3-4 無垂直根型

垂直根が全く確認されない根系分布型。福島県相馬市松川浦など、元々湿地帯である箇所に表示される。流木にはこの分布型の出現が一番多く確認され、水平根が絡み合った状態で2個体が同時に流木化したものも見られた。水平根の大きさに関わらず垂直根（下に向かって発達している根系）が確認されない。



福島県松川浦の流木（2個体同時）



宮城県井土の流木

3-5 まとめ

マツ群落の立木密度が高い場合、水平根同士が重なり合い、竹のような根系網を形成する。この根系網は、竹林の崩壊同様、ある一定の力に対しては根系の力で抵抗するものの、それ以上の力に対しては降伏し、本来であれば流木化しない個体まで道連れに流木化している箇所が見られた。

現地踏査からは、これらの力に対する抵抗は、垂直根の有無が大きく関わっていると考えられた。例えば、福島県松川浦では、根系層がマット状にめくれ上がった状態が確認されたが、高田松原は水平根による根系網が認められるものの、垂直根が存在することから、めくれ被害は確認されなかった。

流木化を防止するためには、垂直根を成長させることが重要であることを示す証左と考える。



福島県松川浦の状況



岩手県高田松原の状況

第3節 海岸林の被災状況の把握（渡邊悦夫）

1 現地調査

1-1 調査箇所

（1）選定に関する基本的考え方

東日本大震災に係る海岸林の調査は、本委員会の調査のほかに、林野庁や東北森林管理局で実施しており、「各機関のデータを共有する」ことを前提とすれば、本事業における現地調査箇所は、先行する林野庁等と重複しないように選定することが効率的である。また、各機関の調査内容等を確認しておくことが重要である。

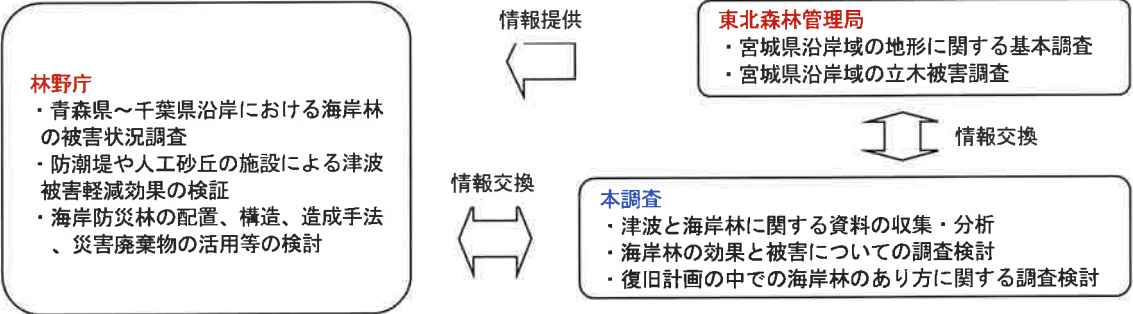


図1 各調査機関との関係

（2）調査箇所の選定

今回の津波による青森、岩手、宮城、福島、茨城、千葉の6県の海岸林の浸水被害は、約3,660haと広範囲に及んでいる。下表は、林野庁と東北森林管理局が予定している調査箇所の数を三陸型と仙台型に分類して示したものである。

表1 他機関の調査箇所数

調査機関	三陸型	仙台型	計
林野庁	2	6	8
東北森林管理局	0	31	31
計	2	37	39

これによると三陸型と比べて仙台型の調査箇所数が多くなっているが、仙台型は被害形態が多様で、三陸型は海岸林自体が少ないことを考慮すると妥当な数値だと考える。調査結果を分析・検討するにあたり、これらの調査箇所のデータを共有できるという前提に立ち、本調査においては三陸型と仙台型のそれぞれを補足する形で、宮城県下の次に示す地区の海岸林を調査箇所（三陸型1箇所、仙台型2箇所、計3箇所）として選定する。

- ① 気仙沼市大谷海岸
- ② 石巻市長浜
- ③ 岩沼市寺島

三陸型：リアス式三陸海岸の湾内に分布する海岸林。背後が斜面となっており、河川の河口部に該当する場合もある。地形的に津波の波高が高くなつたとされている。

仙台型：仙台平野等の海岸線沿いに分布する海岸林。背後には沖積平野が広がり、湿地となっている場合もある。津波の波高は三陸型より低いとされている。



注) 赤色アイコン：本調査箇所（3箇所）

黄色アイコン：委員会現地視察箇所（5箇所、大谷海岸・長浜を含む）

1－2 調査時期

現地調査及び委員会現地視察は次の日程で実施した。

現地調査 : 平成23 年8 月8 日 (月) ～13 日 (土)

委員会現地視察 : 平成23 年6 月30 日 (木) ～7 月1 日 (金)

1－3 調査内容

海岸林の被災状況を把握するために、次に示す内容及び数量の調査を実施した。

(1) 汀線から津波到達地点までの縦横断測量

① 気仙沼市大谷海岸 : 縦断245.3m

② 石巻市長浜 : 縦断1157.9m (A 測線622.1m、B 測線535.8m)

③ 岩沼市寺島 : 横断388.9m

(2) コドラート法による海岸林調査 (立木密度調査等)

① 気仙沼市大谷海岸 : 1 箇所

② 石巻市長浜 : 3 箇所

③ 岩沼市寺島 : 8 箇所

気仙沼市大谷海岸



：今回測量ライン（延長 245.3m）

■ ：コドラート調査箇所（1箇所）

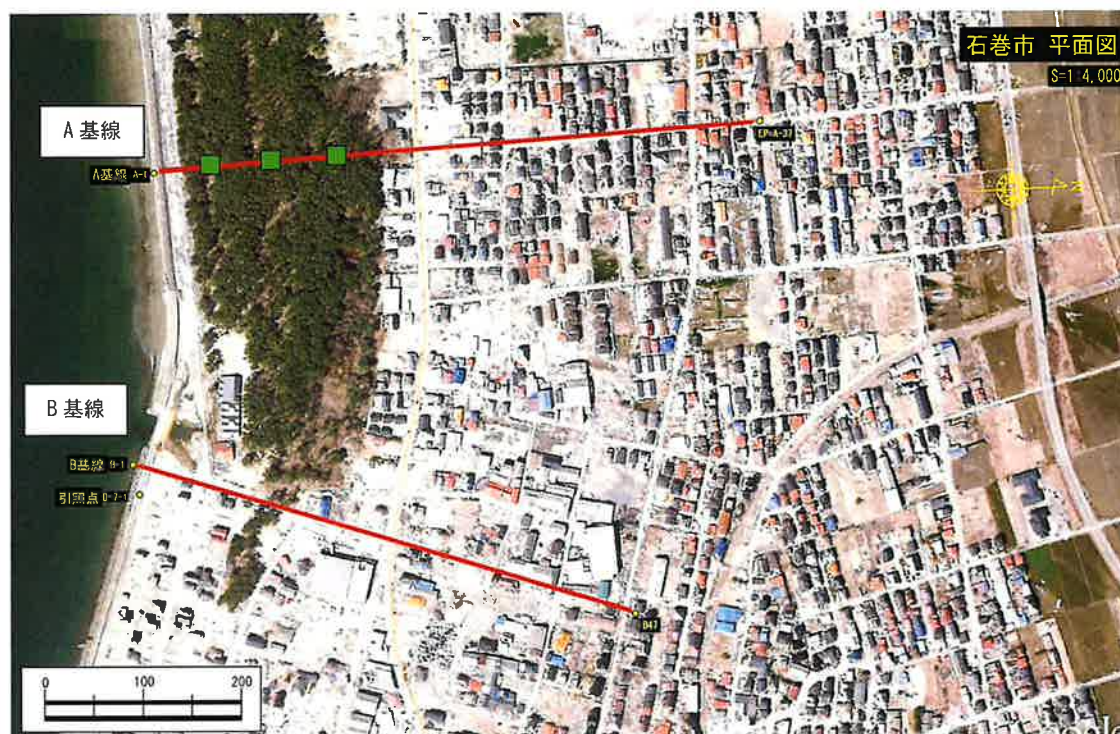
※ コドラート調査は大谷海岸の南東側約 600m
付近に残存するクロマツ林分で代替

Image ©2011TerraMetrics
Data©2011MIRC/JHA
©2011ZENRIN



図3 調査内容（気仙沼市大谷海岸）

石巻市長浜



— : 今回測量ライン (延長 1157.9m)



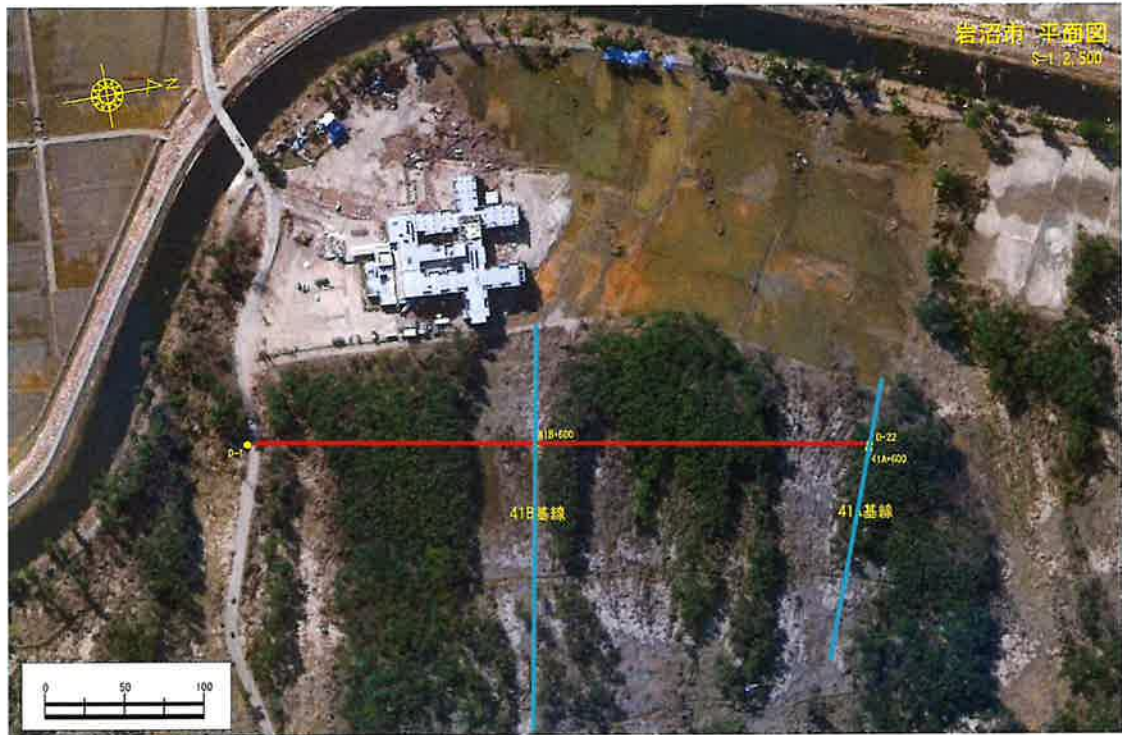
■ : コドラート調査箇所 (3 箇所)

※ A 基線の西方に東北森林管理局測量ラインがある

©2011ZENRIN
Image ©2011TerraMetrics
Data©2011MIRC/JHA

図 4 調査内容 (石巻市長浜)

岩沼市寺島



- 今回測量ライン (延長 388.9m)
- 東北森林管理局測量ライン
- : コドラート調査箇所 (8 箇所)

©2011ZENRIN
Image ©2011TerraMetrics
Data©2011MIRC/JHA



図 5 調査内容 (岩沼市寺島)

1-4 調査方法

(1) 縦横断測量

測量は、トータルステーション（光波測距儀）を使用した。ただし、石巻市長浜において、東北森林管理局が設置した測点と標高の整合を図るため、レベルを用いた。

縦断測量は、汀線を起点（BP）とし、指定した後背位置を終点（EP）とする。横断測量は、南側の道路を起点（BP）とし、北側の東北森林管理局が測定したA 測線上を終点（EP）とした。

測点は、地形変化点のほか、必要と考えられる土地の利用区分（林地、耕地、宅地等の区画）、各種建物、既設工作物（道路、橋梁、堤防、護岸、ダム、頭首工、用水路等）、林相区分等の現況を正確かつ詳細に測量した。

測点の流亡、遺失等の不測の事態に対する測点の復元を考慮し、必要に応じて引照点を設けるものとした。

(2) 海岸林調査

立木密度調査は、コドラート法を採用し、標準地の大きさは10m×10mとした。調査箇所は、基本的に縦横断測量の測点を標準地の中心となるように設定した。標準地内の樹木の位置、胸高直径（幹折れの場合は根元直径）、樹高、樹冠中心位置、樹冠の広がり、枝下高を測定した。測量は、輪尺や直径メジャー等を用いて直径を測定し、測桿、樹高測定器等を用いて樹高を測定した。樹木の被害状況は、生存、傾き、倒伏、幹折れ、根返り、流失等で示した。

堆積深調査は、スコップで地表面を震災前の地表面まで掘削し、現在の地表面と震災前の地表面との差をコンベックス等で計測した。

塩分濃度調査は、塩分濃度計を用いて湛水箇所の塩分濃度を計測した。また、採取した土壌を一定量の水と攪拌し、沈殿後に上水の塩分濃度を計測した。

1-5 調査結果

(1) 縦横断測量

各調査箇所（気仙沼市大谷海岸、石巻市長浜、岩沼市寺島）で実行した縦横断測量の延長を集計すると表2 のとおりである。

表2 縦横断測量の実行延長

調査箇所	測線	実行延長 m
①気仙沼市大谷海岸		245.30
②石巻市長浜	A測線	622.10
	B測線	535.80
	計	1,157.90
③岩沼市寺島		388.90
合計		1,792.10

なお、各調査箇所の縦横断面図は巻末の「測量成果」に示す。また、各調査箇所の状況写真を巻末の「現場状況写真」に示す。

縦横断面図上には、堆積深の測定結果から判断した災害前の地盤高（元地盤高）と、家屋や樹木等の痕跡から判断した浸水位（浸水痕跡高）を示した。

① 気仙沼市大谷海岸

汀線から約100m付近からは標高15mを越える丘陵となっているが、津波の痕跡は最高でも13m程度であった。したがって、丘陵内の最高点である尾根部を測量の終点とした。

② 石巻市長浜

A 測線622.10m、B 測線535.80mの測量を実行した。国土地理院の浸水範囲概況図によれば、石巻市長浜では汀線から1 km以上も浸水範囲となっているため、実行した測量区間もその範囲に含まれている。

③ 岩沼市寺島

南側の道路を起点（BP）とし、北側の東北森林管理局が測定したA 測線上を終点とする区間を測量した。

（2）海岸林調査

① 立木密度調査

気仙沼市大谷海岸は、震災後も被災林のほか一部に生存林も確認されていたが、本調査時には仮設防潮堤（1 トン土のう）の設置のために、すべて除去されていた。予定していた箇所での標準地調査が不可能となったため、大谷海岸の南東側約600m付近に残存するクロマツ林分を代替地（1 箇所）として行った。

石巻市長浜は3 箇所、岩沼市寺島は8 箇所を実施した。

なお、各調査箇所の調査結果は巻末の「立木密度調査の結果」に示す。また、各調査箇所の状況写真を巻末の「現場状況写真」に示す。

表 3 標準地調査の実行数量

調査箇所	測線	実行数量 箇所	備考
①気仙沼市大谷海岸	測線上	0	海岸林除去済み
	その他	1	代替地
	計	1	
②石巻市長浜	A測線	3	
	B測線	0	
	計	3	
③岩沼市寺島	A測線	3	東北森林管理局の測線
	B測線	3	東北森林管理局の測線
	その他	2	B測線の対照地
	計	8	
合計		12	

② 堆積深調査

気仙沼市大谷海岸は代替地で実施したため、本調査を省略した。石巻市長浜及び岩沼市寺島で調査した結果は、それぞれの縦横断面図上に示した。（巻末「測量成果」参照）

③ 塩分濃度調査

気仙沼市大谷海岸は代替地で実施したため、本調査を省略した。岩沼市寺島の東北森林管理局が測定してB 測線付近に湛水が確認されたため、塩分濃度調査を実施したが、0.02%という極めて低い値であった。

岩沼市寺島の横断線（D 測線）付近の土壌を、林地及び湿地のそれぞれ3 箇所で採取した。また、石巻市長浜では、A 測線上の3 箇所で採取した。採取した土壌の塩分濃度はいずれも0.00%であった。

2 海岸林の被災状況

現地調査実施箇所（3 箇所）のほか、委員会現地視察箇所（5 箇所）について被災状況を整理すると以下のとおりである。

表 4 調査箇所一覧

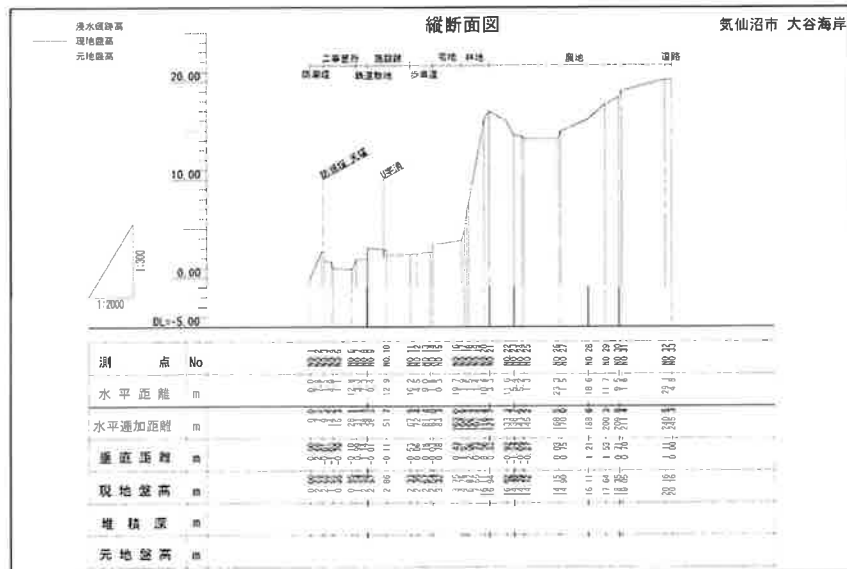
現地調査実施箇所	委員会現地視察箇所
① 気仙沼市大谷海岸（三陸型）	① 気仙沼市大谷海岸（三陸型）
② 石巻市長浜（仙台型）	② 石巻市長浜（仙台型）
③ 岩沼市寺島（仙台型）	③ 気仙沼市本吉野々下（三陸型）
	④ 東松島市矢本海岸（仙台型）
	⑤ 仙台市若林区荒浜（仙台型）

2-1 気仙沼市大谷海岸

（1）縦断地形

汀線から103m地点まではほぼ平坦（地盤高0～3.75m）で、この狭い区間に海側から緩傾斜防潮堤、海岸林、鉄道（気仙沼線）、商業施設、国道（45 号線）、住宅が集中していたが、いずれも津波により被災し、現地調査時点では国道だけが復旧されていた。

汀線から103～122m区間は高低差13mの急崖（平均傾斜35°）となっており、その途中の地盤高11.42～13.49mの範囲には津波による漂流物（ビニール袋、ロープ）が確認された。急崖上端部（汀線から122m地点、地盤高16.94m）からその背後の緩い尾根地形の頂部（縦断測量終点：N0.33、汀線から245m地点、地盤高20.16m）までの間は農地となっているが、津波による浸水の痕跡は認められない。このことから津波は急崖に衝突して多少のせり上がりはあったものの、急崖上端部を越えて背後の農地に到達することはなかったことが分かる。



（２）防潮施設

汀線に位置する防潮堤は水表が緩傾斜（法勾配1：3 程度）コンクリートブロックで構築されているため、防潮堤は流体力をまともに受けることなく、測量の縦断線上では現在でもほぼ健全な状態を保持している（写真3 及び写真4 参照）。ただし、基礎地盤は液状化による裏面盛土部の空洞化が懸念される。

直立型のコンクリート防潮護岸は、津波流体力のほか基礎地盤の液状化により転倒し、破壊していた。また、沖合いには人工リーフ4 基が設置されていたが、大規模な津波には効果がなかったものと考えられる。

（３）海岸林

委員会現地視察時（2011. 6. 30）には、被災した海岸林が部分的に残存していたが（写真2 及び写真3 参照）、現地調査時（2011. 8. 9）には、防潮堤を1 トン土のうで補強するために、海岸林は根こそぎ除去されていた（写真4 参照）。その工事箇所の幅は21.8mであり、被災前の写真（写真1 参照）も考慮すると、元々の海岸林の幅は15m程度であったと考えられる。また、測量の縦断線上における災害直後の林況は不明であるが、除去前の写真から判断すると多少残存していたことが分かる。



写真1 海岸林災害前
※赤線が測量縦断線



写真2 海岸林除去前 (2011. 6. 30)
※赤線が測量縦断線



写真3 海岸林除去前 (2011. 6. 30)
※赤線が測量縦断線



写真4 海岸林除去後 (2011. 8. 9)
※撮影位置が測量縦断線

除去された海岸林の代替地における立木密度調査の結果では、クロマツの立木密度 3100 本/ha、平均樹高 11.5m、平均胸高直径 21.4 cm、形状比 50 であったが、除去された海岸林も災害前は同様な林況を呈していたものと考えられる。林地の地盤高がほぼ防潮堤の天端高 (2.69m) であるため、海岸林冠頂の高さは $11.5 + 2.69 = 14.19\text{m}$ で津波の高さ (13.49m) を若干上回る程度であり、ほぼ海岸林全体が浸水したと想定される。

表5 立木密度調査結果 (気仙沼市大谷海岸)

気1

汀線からの距離: 約10m
地盤高: 約5m

生存率: 51.6% (針) 51.6%
(広) -

状況		立木密度 本/ha	平均樹高 m	平均 胸高直径 cm	樹冠水平 投影面積 m ²	形状比	材積 m3	幹折れ 高 m	枝下高 m	広葉樹 立木密度 本/ha	広葉樹 侵入率 %
生存	無被害	1,600	13.4	27.9	10.0	49	0.42	—	6.7	0	0.0
	傾倒	200	7.5	19.0	5.8	40	0.10	—	4.8	0	0.0
衰弱	—	100	8.5	16.0	3.2	53	0.09	—	7.8	0	0.0
枯死	—	400	8.2	16.0	6.8	57	0.09	—	4.5	0	0.0
	幹折れ	500	10.1	13.2	—	61	0.09	0.6	—	0	0.0
流失	幹折れ	300	—	11.3	—	—	—	3.6	—	0	0.0
計		3,100	11.5	21.4	8.6	50	0.26	1.7	6.2	0	0.0

大部分の海岸林は津波により幹折れが生じて枯死し、幹折れには押し波と引き波の痕跡が確認された。緩傾斜防潮堤は水表の法勾配が緩く、津波が容易に遡上し、抵抗体としての躯体で流体力を軽減することは困難である。このため多くの海岸林に幹折れが生じたものと考えられる

一方、樹高に匹敵する波高の津波を受けながらも、写真2 及び写真3 に示すように被災後も生育していたクロマツも部分的に存在する。部分的に生存している海岸林の背面には台地状の地形があり（図6 参照）、海岸林と台地との間に貯留できる海水量が限られ、引き波の量が少なかったために、被害が少なかったものと考えられる。調査箇所は西側に隣接する海岸林は、図7 に示すように被災の程度が激しい。この箇所では背面に台地状の地形が迫ってなく、津波が河川に沿って内陸まで遡上し、引き波に伴う海水量が多かったと判断できる。



図7 海岸林の被災状況と地形の関係

Image ©2011TerraMetrics
Data©2011MIRC/JHA
©2011ZENRIN

2-2 石巻市長浜

(1) 縦断地形

ア. A 測線

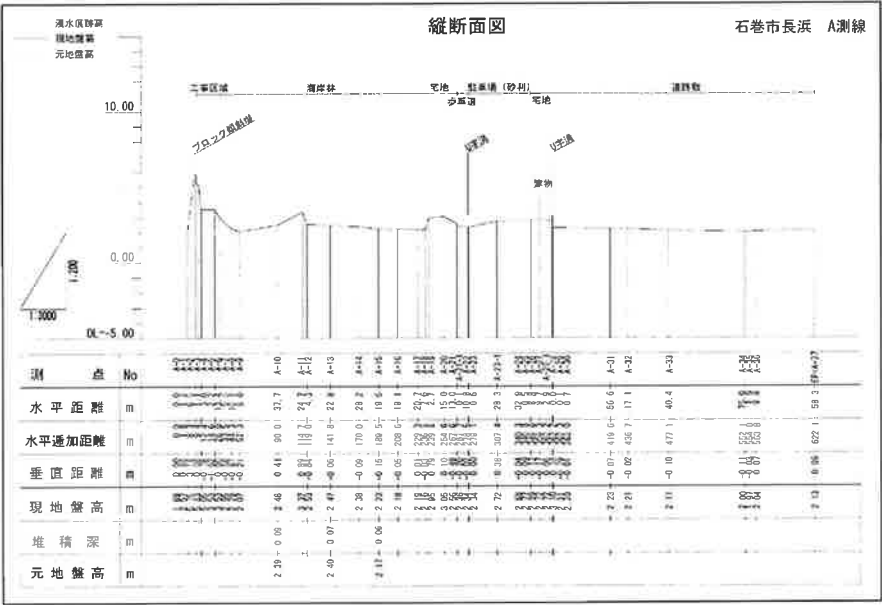
測量の起点は調査時点での汀線（海水面）であるが、現地盤高が 1.69m となっているのは、東北森林管理局が測量した縦断線の測点と地盤高の整合を図ったためである。（以下、汀線の地盤高を 0.00m とした場合の地盤高を括弧書きで示す。）

汀線沿いには天端高 5.83m (4.14m) の防潮堤が設置されている。海岸林は汀線からの距

離が33.5m地点で始まり、その林帯幅は195.8mである。林内の測点A-11 に地盤高3.37m(1.68 m)の凸部があるほかは、地盤高2～2.5m(0.3～0.8m)程度である。229.3m地点から内陸は住宅地で、267.7～279.1m区間には国道398 号線が横断している。国道の前後の229.3～362.3m区間は平均地盤高2.62m(0.93m)で周囲より若干高いが、362.3～622.1m区間は2.14m(0.45 m)と低い。このように海岸林背後の住宅地等は、海岸林の林地よりも地盤高が低く、汀線から約620m隔たった測線の終点でも現地盤高2.13m(0.44m)であった。

なお、防潮堤背面は、委員会現地視察時には洗掘されていたが、現地調査時には造成され、洗掘部は埋め立てられていた。

密集した住宅地内では、浸水の痕跡を詳細に調べるのが困難であったが、家屋の被害状況から浸水位は地盤高5m(3.3m)程度であったと考えられる。図



8 縦断面図（長浜A 測線

イ. B 測線

B 測線もA 測線同様に、東北森林管理局の測量成果と地盤高を整合させたために、汀線（海水面）の地盤高が0.89mとなっている。測線A の汀線の地盤高1.69mと異なるのは潮位の差によるものである。（以下、測線A における汀線の地盤高を0.00mとした場合の地盤高を括弧書きで示す。）汀線沿いには天端高6.22m (4.53m)の防潮堤が設置されている。その背後は洗掘され、汀線から19.0m地点では地盤高が2.28m (0.59m)と低下している。この測線上には海岸林はなく、26.1m地点から内陸が住宅地となっている。266.8～282.6m区間には国道398号線が横断している。その前後の地盤高を比較すると、国道の海側（26.1～266.8m区間）が2.45m (0.76m)、内陸側（282.6～535.8m区間）が2.70m (1.01m)で、若干内陸側の方が高くなっている。津波による浸水の痕跡を調査した結果、浸水位は5.81 (4.12)～7.90m (6.21m)とA 測線より高かった。B 測線の方が地盤高も0.5m程度高いことを勘案しても、地盤からの浸水高はA 測線の方が0.5～1.0m程度低かったことが分かる。このことからA 測線では海岸林の浸水位低減効果が発揮されたものと判断される。

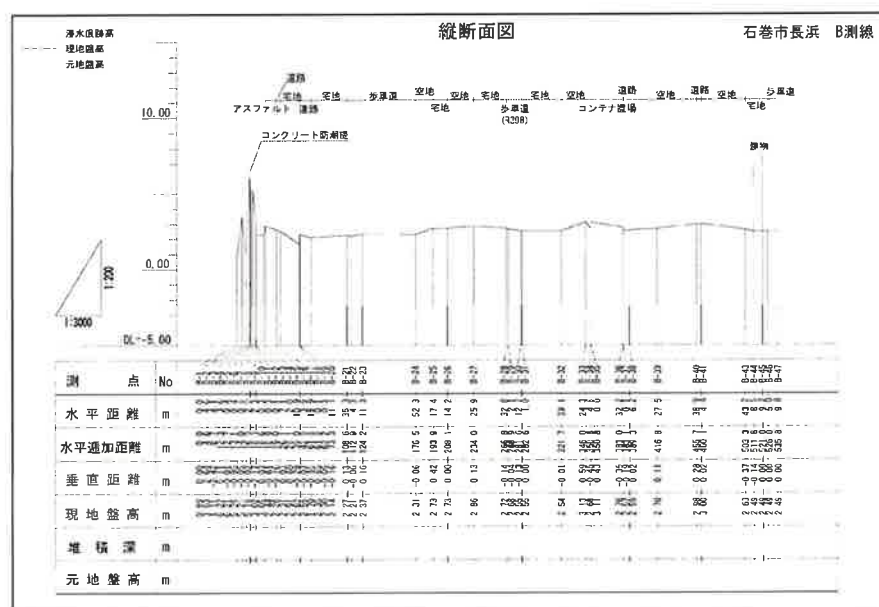


図9 縦断面図（長浜B 測線）

（2）防潮施設

ア. A 測線

コンクリートブロック傾斜防潮堤の水表（法勾配1：0.7）はほとんど被害がないが、水裏法面は著しく破壊した。津波が堤頂を越え、背面での落差によるエネルギーで洗掘されたものと考えられ、洗掘箇所の一部では湛水していた。現地調査時には埋め立てられていて詳細は不明であるが、堤頂から内陸側約15mの範囲が洗掘を受けたも



のと推定される。

海岸林は汀線から28.0m、防潮堤から18.6m地点から始まっているが、洗掘を受けた防潮堤のすぐ背面に成立していれば、気仙沼市大谷海岸の例のように防潮堤背面の被災は免れたものと考えられる。

イ. B 測線

コンクリート直立型防潮堤で天端には波返しが付いており、基礎部には消波ブロック（テトラポット）が設置されている。直立型であるため、津波の流体力をまともに受けたが、躯体自体には異状はなく、背後の土地が洗掘されるに留まっている。

後背地の大部分は津波浸水位が5.81(4.12)～6.59m(4.90)mの範囲にあるが、防潮堤付近では防潮堤により7.90(6.21)mまで堰上げられている。



写真6 被災を免れた直立型防潮堤

(3) 海岸林

B 測線には海岸林がないため、A 測線についてだけ述べる。防潮堤は被災したが、海岸林は前線部が枝折れ・変色だけで生存している。周辺の家屋も仙台市若林区荒浜とは異なり、残存しているものがある。震源地との間に牡鹿半島があるため、津波の流体力が比較的小さかった上に、防潮堤が被災することにより津波エネルギーを減殺し、海岸林等への影響が少なかったものと考えられる。

破壊した防潮堤のブロック等が林内に散乱しているが、一部では樹幹がブロックの林内への侵入を阻止している状況も確認された。このことから海岸林が漂流物の捕捉効果を発揮し、背後の住宅地への被害を最小限にとどめたことが分かる。



写真7 林内に散乱する防潮堤のブロック

海岸林はアカマツ、クロマツを主体に広葉樹（ウワミズザクラ、ニセアカシア等）が混生している。立木密度調査は、汀線からの距離に応じた次の3箇所を実施した。

表6 立木調査箇所（石巻市長浜）

区分	測点	汀線からの距離 m	海側林縁からの 距離 m	地盤高 m
石1	A-10	90.0	56.5	2.48(0.79)
石2	A-13	141.8	108.3	2.47(0.78)
石3	A-15	189.5	156.0	2.23(0.54)

注) 地盤高の括弧内は汀線の地盤高を0.00mとした場合

立木密度調査の結果、立木密度、平均樹高、平均胸高直径等は表6のとおりで、海側は樹高が高く、陸側は胸高直径が大きい傾向にある。そのため海側は災害を受けやすいとされる形状比が70を上回る線香型の林分となっている。広葉樹は中心付近から陸側にかけて侵入しており、下層植生も比較的多く見られる。また、海岸林内における津波堆積物の深さは6～9cmと予想外に浅い値を示した。

表7 立木調査結果集計（石巻市長浜）

標準地	立木密度 本/ha	平均樹高 m	平均 胸高直径 cm	樹冠水平 投影面積 ㎡	形状比	材積 m3	枝下高 m	広葉樹 立木密度 本/ha	広葉樹 侵入率 %	備考
石1(A-10)	1,400	15.8	22.3	11.4	73	0.39	11.6	0	0.0	海側
石2(A-13)	2,100	13.2	22.8	12.3	67	0.60	9.0	600	28.6	中心付近
石3(A-15)	600	13.8	30.3	36.1	54	0.76	9.0	100	16.7	陸側

被害状況別の林況は表8のとおりで、海側で生存率が高く内陸で低いという予想外の結果が出た。さらにアカマツやクロマツよりも広葉樹の方が生存率が高い。因子別では、樹高や枝下高が高く、胸高直径や材積が大きいほど、被害が無いことが分かった。ただし、形状比については被害の無いものほど高い傾向にあった。

表8 立木調査結果による被害状況（石巻市長浜）

石1(A-10) 汀線からの距離:90.0m 生存率: 85.7% (針) 85.7%
地盤高:2.48m (広) -

状況	立木密度 本/ha	平均樹高 m	平均 胸高直径 cm	樹冠水平 投影面積 ㎡	形状比	材積 m3	枝下高 m	広葉樹 立木密度 本/ha	広葉樹 侵入率 %
生存 無被害	1,200	16.7	23.4	11.4	74	0.42	11.6	0	0.0
衰弱 -	100	4.5	8.0	-	56	0.01	-	0	0.0
枯死 -	100	4.2	6.0	-	70	0.01	-	0	0.0
計	1,400	15.8	22.3	11.4	73	0.39	11.6	0	0.0

石2(A-13) 汀線からの距離:141.8m 生存率: 71.4% (針) 66.7%
地盤高:2.47m (広) 83.3%

状況	立木密度 本/ha	平均樹高 m	平均 胸高直径 cm	樹冠水平 投影面積 ㎡	形状比	材積 m3	枝下高 m	広葉樹 立木密度 本/ha	広葉樹 侵入率 %
生存 無被害	1,300	15.2	27.8	-	63	0.78	9.8	300	23.1
傾倒	200	5.8	8.0	-	74	-	1.3	200	100.0
衰弱 -	100	14.0	22.0	8.1	64	0.25	6.2	0	0.0
枯死 -	300	13.7	20.7	-	73	0.32	-	0	0.0
根返り	200	6.5	8.0	-	82	0.02	-	100	50.0
計	2,100	13.2	22.8	12.3	67	0.60	9.0	600	28.6

石3(A-15) 汀線からの距離:189.5m 生存率: 50.0% (針) 40.0%
地盤高:2.23m (広) 100.0%

状況	立木密度 本/ha	平均樹高 m	平均 胸高直径 cm	樹冠水平 投影面積 ㎡	形状比	材積 m3	枝下高 m	広葉樹 立木密度 本/ha	広葉樹 侵入率 %
生存 無被害	300	15.3	34.7	36.1	60	1.38	9.0	100	33.3
枯死 根返り	300	12.3	26.0	-	47	0.35	-	0	0.0
計	600	13.8	30.3	36.1	54	0.76	9.0	100	16.7

2.3 岩沼市寺島

(1) 縦横断地形

縦断地形に関する資料は東北森林管理局が測量したもの（図 10 及び図 11）を用いる。これらの測線は測量時の汀線を地盤高 0.00m としている。今回の横断測量時に両者を連結し、B 測線を基準とすると、A 測線の起点（汀線）は地盤高 0.92m となることが分かった。すなわち A 測線測量時には B 測線測量時よりも潮位が 0.92m 高かったことになる。（以下、地盤高は B 測線の地盤高を基準とする。）

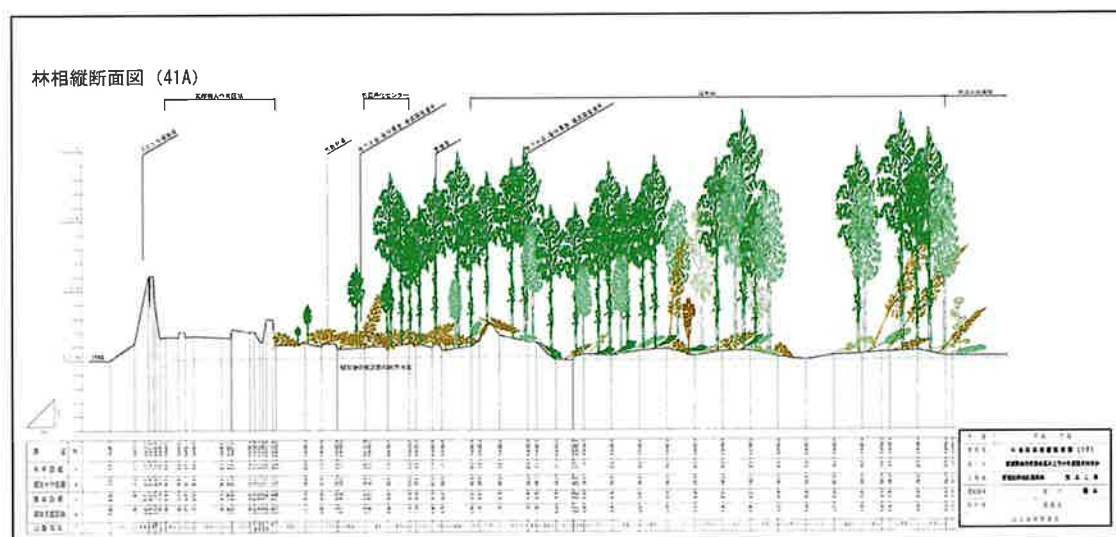


図 10 縦断面図（寺島 A 測線） ※提供：東北森林管理局

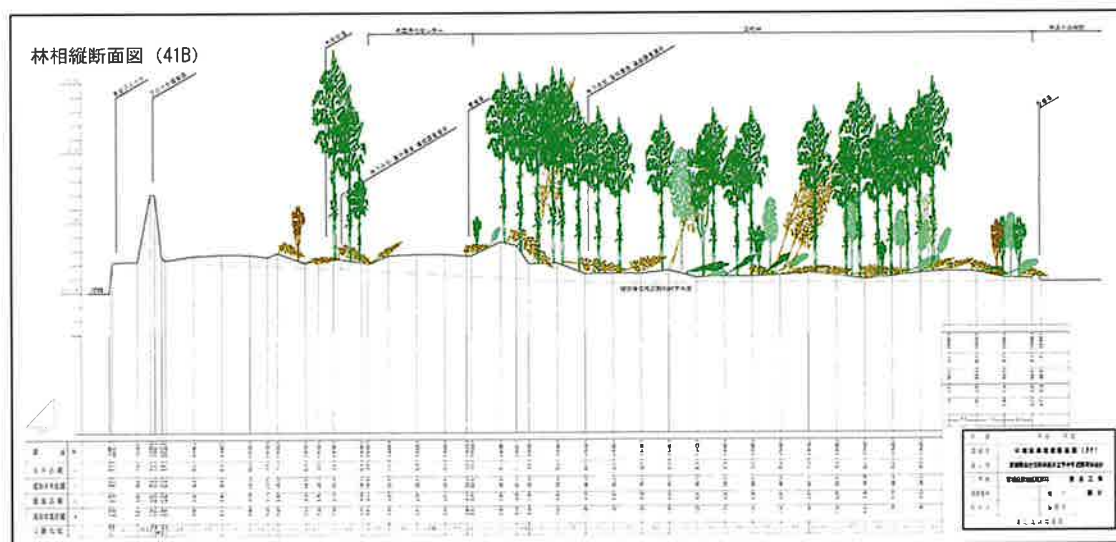


図 11 縦断面図（寺島 B 測線） ※提供：東北森林管理局

A・B 両測線とも汀線から 30m 付近に天端高 7.0m の防潮堤が設置されている。その背後の地盤高は、A 測線が 0.88～3.85m、B 測線が 0.57～3.60m の範囲にある。また、汀線から 360m 地点の前後の平均地盤高を比較すると、A 測線では海側 2.35m、陸側 1.28m、B 測線が海側 2.55m、陸側 1.28m となる。このことから両者に地形的な差異はないが、いずれも陸側の地盤高は 1.28m と低く、海側はそれに対し 1.07～1.27m 高いことが分かる。海側の地盤高が高い部分は自然砂丘ないし海岸林造成時の人工砂丘であると考えられる。なお、林帯幅は A 測線で 485.9m、B 測線で 540.0m である。

汀線から 600m 地点で行った横断測量の結果は図 11 のとおりである。ほぼ平坦な地形であるが、地盤高の最高点は 1.82m、最低点は 0.75m で、1.07m の差がある。図中、測点 D9～D10 間、D18～D19 の倒木帯と D10～D11 間の湿地を草地として、また D14～D15 間の倒木帯を林地として扱い、草地と林地の地盤高を比較する。ただし、人工的に造成されている道路(D1、D2) 及び広葉樹林地(D21、D22) は除く。その結果、林地の平均地盤高 1.48m、草地の平均地盤高 1.18m で、林地と比較して湿地や草地は地盤高が 0.3m 低いことが判明した。

クロマツやアカマツを海岸林の樹種として植栽する場合には、当地域においては地盤高が 1.5m 程度となるように盛土する必要があると判断される。また、ウワミズザクラ等の広葉樹は地盤高が比較的低くても生育が可能である。

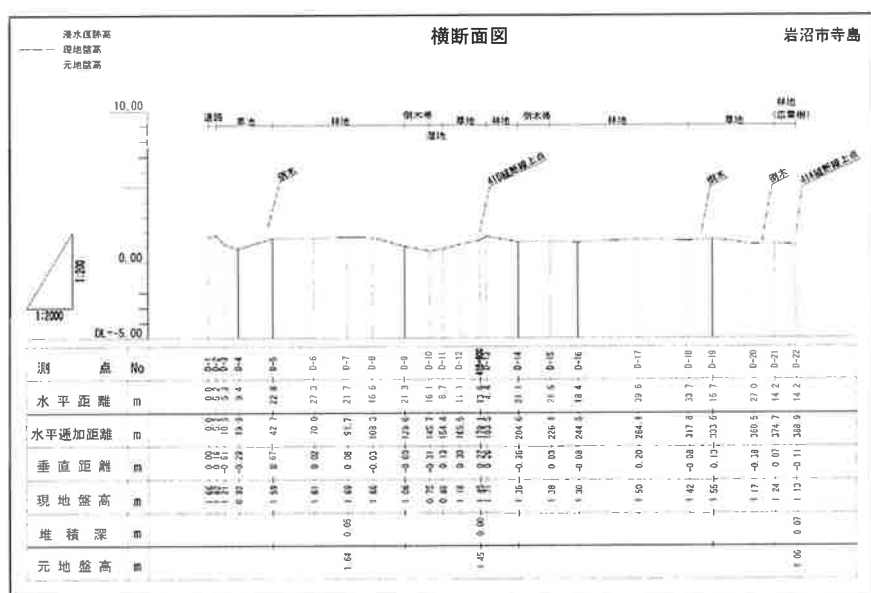


図 12 横断面図（寺島 D 測線）

(2) 海岸林

海岸林は箇所により樹齢や疎密度が異なるが、アカマツ、クロマツ及び広葉樹（ウワミズザクラ、コナラ等）が混生している。立木密度調査は、A・B 縦断測線上で汀線からの距離に応じてそれぞれ 3 箇所、これらの対照地として完全な林内で 2 箇所実施した。

表 9 立木調査箇所（岩沼市寺島）

区分	測点	汀線からの距離 m	海側林縁からの 距離 m	地盤高 m
岩 1	41A+140	140.0	20.9	2.13
岩 2	41A+360	360.0	240.9	1.22
岩 3	41A+580	580.0	460.9	1.55
岩 4	41B+140	140.0	20.0	2.07
岩 5	41B+360	360.0	240.0	1.34
岩 6	41B+600	600.0	480.0	1.45
岩 7	41B+360 横	360.0	240.0	1.34
岩 8	D-7	600.0	480.0	1.69

立木密度調査の結果、立木密度、平均樹高、平均胸高直径等は表 10 のとおりで、海側に幼齢ないし若齢林、陸側に壮齢林が配置されている。幼齢及び若齢林は当然樹高が低く胸高直径も小さいが、形状比も小さくなっている。壮齢林は林縁部分を除くと形状比が高い傾向にあり、立木密度が比較的高い標準地（岩 3 及び岩 8）の形状比は 70 を上回っている。なお、広葉樹は林帯の中心付近を主体に侵入している。また、海岸林内における津波堆積物の深さは 5～7 cm と予想外に浅い値を示した。

表 10 立木調査結果集計（岩沼市寺島）

標準地	立木密度 本/ha	平均樹高 m	平均 胸高直径 cm	樹冠水平 投影面積 m ²	形状比	材積 m ³	幹折れ 高 m	枝下高 m	広葉樹 立木密度 本/ha	広葉樹 侵入率 %	備考
岩 1 (41A+140)	1,500	4.9	10.2	—	52	0.03	0.7	9.0	0	0.0	若齢林
岩 2 (41A+360)	700	9.5	20.0	12.3	57	0.27	—	6.1	300	42.9	壮齢林林縁
岩 3 (41A+580)	1,300	13.8	16.8	4.1	84	0.17	—	9.1	0	0.0	壮齢林
岩 4 (41B+140)	2,500	7.5	15.0	0.0	66	0.05	0.4	—	0	0.0	若齢林
岩 5 (41B+360)	3,100	0.9	2.0	—	46	0.00	—	—	0	0.0	幼齢林
岩 6 (41B+600)	800	9.4	23.1	15.6	50	0.26	0.3	9.0	0	0.0	壮齢林林縁
岩 7 (41B+360横)	1,000	10.9	20.2	15.2	65	0.34	—	7.1	400	40.0	壮齢林
岩 8 (D-7)	1,100	14.3	20.4	10.5	78	0.33	—	9.4	200	18.2	壮齢林

被害状況別の林況は表 11 のとおりで、海側の若齢林は林地の地盤高が比較的高いものの、全て枯死又は流失したため、生存率 0.00%であった。幼齢林は生存率 87.1%、壮齢林も 80～100%程度であるが、唯一標準地（岩 6）だけ 12.5%という低い値となった。また、石巻市長浜とは異なり、アカマツやクロマツよりも広葉樹の方が生存率が低かった。樹高、胸高直径等の因子別では有意な傾向が認められないが、陸側の壮齢林（岩 3、岩 7、岩 8）を比較すると、地盤高が高いほど生存率も高くなっている。

表 11 立木調査結果による被害状況（岩沼市寺島）

岩1(41A+140)		汀線からの距離:140.0m			生存率: 0.0%		(針) 0.0%		(広) 0.0%		
		地盤高:2.13m									
状況	立木密度	平均樹高	平均	樹冠水平	形状比	材積	幹折れ	枝下高	広葉樹	広葉樹	
	本/ha	m	胸高直径	投影面積		m3	高	m	立木密度	侵入率	
			cm	m ²			m		本/ha	%	
衰弱	—	100	2.8	6.0	—	47	0.00	2.8	0	0.0	
枯死	—	400	3.5	8.3	—	48	0.05	—	0	0.0	
	幹折れ	700	5.9	12.6	—	50	0.04	0.4	0	0.0	
	根返り	200	5.4	8.0	—	73	0.02	—	0	0.0	
流失	幹折れ	100	—	10.0	—	—	0.7	—	0	0.0	
計	1,500	4.9	10.2	—	52	0.03	0.7	9.0	0	0.0	
岩2(41A+360)		汀線からの距離:360.0m			生存率: 85.7%		(針) 100.0%		(広) 66.7%		
		地盤高:1.22m									
状況	立木密度	平均樹高	平均	樹冠水平	形状比	材積	幹折れ	枝下高	広葉樹	広葉樹	
	本/ha	m	胸高直径	投影面積		m3	高	m	立木密度	侵入率	
			cm	m ²			m		本/ha	%	
生存	無被害	600	9.8	21.7	12.3	53	0.27	—	200	33.3	
枯死	根返り	100	8.0	10.0	—	80	—	—	100	100.0	
計	700	9.5	20.0	12.3	57	0.27	—	6.1	300	42.9	
岩3(41A+580)		汀線からの距離:580.0m			生存率: 92.3%		(針) 92.3%		(広) —		
		地盤高:1.55m									
状況	立木密度	平均樹高	平均	樹冠水平	形状比	材積	幹折れ	枝下高	広葉樹	広葉樹	
	本/ha	m	胸高直径	投影面積		m3	高	m	立木密度	侵入率	
			cm	m ²			m		本/ha	%	
生存	無被害	1,200	14.1	17.2	4.1	84	0.18	—	9.1	0.0	
枯死	根返り	100	10.0	12.0	—	83	0.06	—	0	0.0	
計	1,300	13.8	16.8	4.1	84	0.17	—	9.1	0	0.0	
岩4(41B+140)		汀線からの距離:140.0m			生存率: 0.0%		(針) 0.0%		(広) 0.0%		
		地盤高:2.07m									
状況	立木密度	平均樹高	平均	樹冠水平	形状比	材積	幹折れ	枝下高	広葉樹	広葉樹	
	本/ha	m	胸高直径	投影面積		m3	高	m	立木密度	侵入率	
			cm	m ²			m		本/ha	%	
枯死	幹折れ	1,300	7.7	12.0	—	69	0.05	0.4	—	0.0	
	根返り	200	6.5	13.0	—	50	0.05	—	0	0.0	
流失	幹折れ	1,000	—	19.2	—	—	0.6	—	0	0.0	
計	2,500	7.5	15.0	0.0	66	0.05	0.4	—	0	0.0	
岩5(41B+360)		汀線からの距離:360.0m			生存率: 87.1%		(針) 87.1%		(広) —		
		地盤高:1.34m									
状況	立木密度	平均樹高	平均	樹冠水平	形状比	材積	幹折れ	枝下高	広葉樹	広葉樹	
	本/ha	m	胸高直径	投影面積		m3	高	m	立木密度	侵入率	
			cm	m ²			m		本/ha	%	
生存	無被害	2,000	0.9	2.0	—	47	0.00	—	0	0.0	
	傾倒	700	0.9	2.0	—	45	0.00	—	0	0.0	
衰弱	—	100	0.9	2.0	—	45	0.00	—	0	0.0	
	傾倒	300	0.8	2.0	—	40	0.00	—	0	0.0	
計	3,100	0.9	2.0	—	46	0.00	—	—	0	0.0	
岩6(41B+600)		汀線からの距離:600.0m			生存率: 12.5%		(針) 12.5%		(広) —		
		地盤高:1.45m									
状況	立木密度	平均樹高	平均	樹冠水平	形状比	材積	幹折れ	枝下高	広葉樹	広葉樹	
	本/ha	m	胸高直径	投影面積		m3	高	m	立木密度	侵入率	
			cm	m ²			m		本/ha	%	
生存	無被害	100	16.0	30.0	15.6	53	0.51	—	9.0	0.0	
枯死	幹折れ	100	9.5	16.0	—	59	0.10	—	0	0.0	
	根返り	300	7.1	24.7	—	29	0.14	—	0	0.0	
流失	幹折れ	100	—	12.0	—	—	0.3	—	0	0.0	
伐採	—	200	—	15.0	—	—	—	—	0	0.0	
計	800	9.4	23.1	15.6	50	0.26	0.3	9.0	0	0.0	
岩7(41B+360横)		汀線からの距離:約360.0m			生存率: 80.0%		(針) 83.3%		(広) 75.0%		
		地盤高:約1.34m									
状況	立木密度	平均樹高	平均	樹冠水平	形状比	材積	幹折れ	枝下高	広葉樹	広葉樹	
	本/ha	m	胸高直径	投影面積		m3	高	m	立木密度	侵入率	
			cm	m ²			m		本/ha	%	
生存	無被害	800	11.4	22.3	15.2	61	0.38	—	7.1	300	37.5
枯死	—	100	11.0	18.0	—	61	0.14	—	—	0	0.0
	根返り	100	6.0	6.0	—	100	0.00	—	—	100	100.0
計	1,000	10.9	20.2	15.2	65	0.34	—	7.1	400	40.0	
岩8(D-7)		汀線からの距離:約600.0m			生存率: 100.0%		(針) 100.0%		(広) 100.0%		
		地盤高:1.69m									
状況	立木密度	平均樹高	平均	樹冠水平	形状比	材積	幹折れ	枝下高	広葉樹	広葉樹	
	本/ha	m	胸高直径	投影面積		m3	高	m	立木密度	侵入率	
			cm	m ²			m		本/ha	%	
生存	無被害	1,100	14.3	20.4	10.5	78	0.33	—	9.4	200	18.2
計	1,100	14.3	20.4	10.5	78	0.33	—	9.4	200	18.2	

2-4 その他

委員会現地視察時に訪れた被災地に関して、気づいた点を以下に記す。

(1) 気仙沼市本吉野々下

- 海岸林の流失：もともと林帯幅が狭かった。
- 地盤沈下による海岸林地の減少：原状に回復の場合、ますます林帯幅が狭くなる。
- 後背湿地の発達：地盤沈下により相対的に地下水位が上昇した。
- コンクリート防潮堤の破壊：津波流体力のほか基礎地盤の液状化により転倒した。



写真8 流失した海岸林



写真9 転倒した防潮堤

(2) 東松島市矢本海岸

- 後背湿地の対策：後背地は元々湿地で湿性植物が繁茂し、立木密度が低い箇所が見られる。湿地は汀線と変更に数条発達しており、汀線に直角に発達する仙台市の海岸と状況が異なる。この湿地に盛土してまで海岸林を造成し、津波に備えるべきか。変化に富んだ海浜緑地として復元させるなら、湿地を残した方が良い。また、津波対策として、盛土して海岸防災林を造成する場合には、膨大な土砂が必要となるが、調達は困難と考えられる。
- クロマツの変色：元々湿地である上、地盤沈下により相対的に水位が上昇し、倒伏したクロマツ以外にも立ち枯れ状態となっているものが多い。
- 緩傾斜防潮堤の水裏の被災：石巻市長浜と同様。



写真10 後背湿地の被災林



写真11 被災した防潮堤水裏

(3) 仙台市若林区荒浜

- 壊滅的な海岸林：林帯幅は広い箇所では約 600mあったが、ほぼ壊滅状態にある。生存しているのは地盤が周囲よりも若干高い箇所（貞山堀の土手付近、貞山堀陸側の汀線と直角方向の帯状残存林）である。
- 微地形の成因：貞山堀陸側の汀線と直角方向に帯状残存林と湿地が交互に発達している。過去の津波・高潮の流路となった部分が浸食され、現在の湿地になっているのか。
- 生存と枯死：生存（無被害、傷痕、枝折れ、傾倒）しているのは、主として高齢木で、枯死（無被害、枝折れ、傾倒、根返り、幹折れ）しているのは、主として若齢木である。樹齢により生死が分かれたのか、あるいは微地形の影響か。
- 建築物の効果：本来海岸林が建築物を保全すべきであるが、逆に、公衆便所の背面に数本のクロマツが残存している。
- 離岸堤の効果：荒浜の住宅地の部分は、海岸林の林帯幅が狭いため、沖合に離岸堤（コンクリートブロック）が設置されているが、今回の災害では効果を発揮できなかったと考えられる。
- 堅牢な防潮堤：石巻市長浜や東松島市矢本海岸の防潮堤と異なり、水裏も被災していない。後背地の洗掘は生じているが、水裏法面の構成材料が水表と同じコンクリート製の堅牢なものであった。堤高は比較的低いが、堅牢なために被災せずに済んだと考えられる。また、石巻市長浜や東松島市矢本海岸の防潮堤の水表はコンクリートブロック製で、透水性があり、浸透水が水裏法面に影響したとも考えられる。



写真 12 林地と湿地の地盤高差



写真 13 堅牢な防潮堤

3. 海岸林の有無と後背地被災状況の比較検討

3-1. 海岸林の被害度を決める要因と被害状況

後背地の保全対象が、流失した海岸林の流木により被害を受けるケースもあり、毎日新聞によれば、「高田松原のマツが流れてきて、あっちこっちの建物を壊したんだ。」という地元民の証言もある。しかし、全体的には、海岸林の津波エネルギー減勢効果や漂流物の捕捉効果が、これまでの調査で報告されている。海岸林が存在することにより、後背地の被災状況を軽減することができたことは間違いない。

海岸林と一言と言っても、その状況は千差万別で、海岸林の状況により後背地の被災状況も異なっている。海岸林の状況は、様々な要因が複合的に作用して決定されている。（図13 参照）

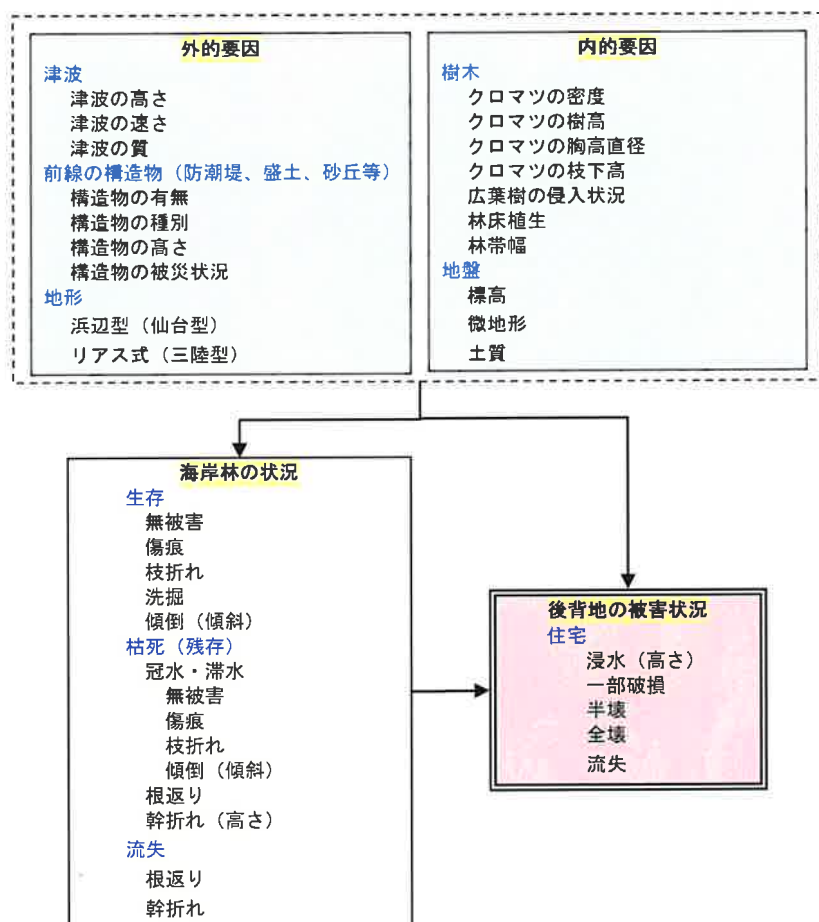


図13 被害を決める要因と被害状況の内容

海岸林の被害状況とその度合いを決める要因を整理した上で類型化することが必要である。現地調査の結果から、被害状況と被害度を決定する要因は概ね次のように分類される。

■被害状況

生存（無被害、傷痕、枝折れ、洗掘、傾倒）

枯死（滞水、根返り、幹折れ）

流失（根返り、幹折れ）

■被害度を決める要因

外的要因：

津波（高さ・速さ・質）

前線の防潮堤等（有無・種別・高さ・被災状況）

地形（三陸型、仙台型）

内的要因：

樹木（クロマツ等）の樹齢（密度・樹高・胸高直径・枝下高）

広葉樹等の侵入状況

林帯幅

地盤の状況（標高・微地形・土質）

また、第1回東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会（林野庁）の資料4現地調査報告（森林総合研究所坂本室長）を参考に、現地調査の結果から判断される被害状況と被害度を決める要因との関係を図14に示す。この関係を明らかにするにはさらに詳細な調査が必要となるが、被害に及ぼす影響が大きい要因を抽出した上で、それらをパターン化することが重要となる。

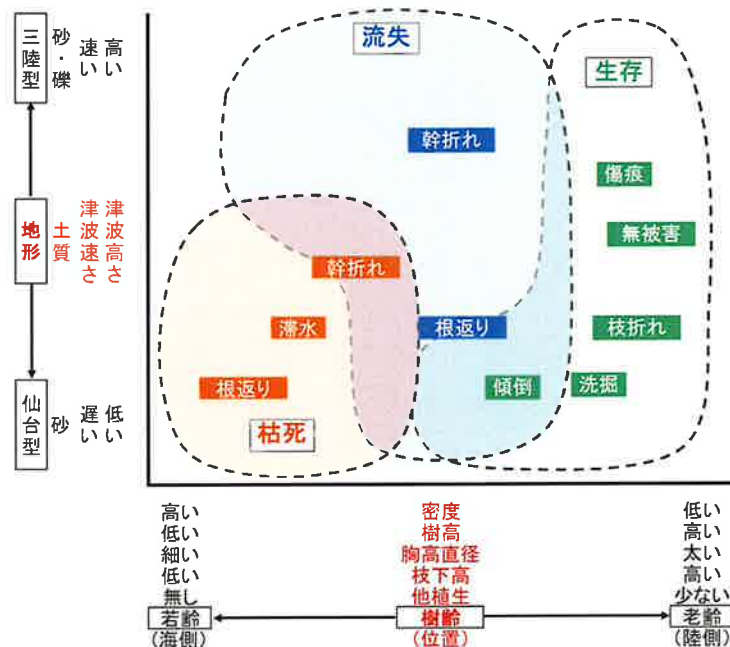


図14 被害状況と被害度を決める要因との関係

密度：植栽時は10,000本/ha程度と高いが、成長とともに自然淘汰、間伐等により低くなる。

樹高：成長とともに高くなる。

胸高直径：成長とともに太くなる。

枝下高：成長とともに高くなる。

他植生：若齢時は林床植生が見られないが、成長とともに侵入してくる。ただし、その量は少ない。

3-2 石巻市長浜における海岸林の効果

今回の現地調査箇所の中で、海岸林の有無と後背地被災状況の関係を把握することが可能な箇所は石巻市長浜である。ここでは前述のように海岸林が存在するA 測線と、海岸林のないB 測線を設定した。また調査範囲は、A 測線の海岸林を除けばいずれもほとんどが住宅地で、後背地の被災状況として確認することが比較的容易な条件下にある。

「海岸林の被災状況」の項で述べたように、A・B 両測線における浸水高を比較すると、B 測線よりA 測線の方が0.5～1.0m程度低かったことが判明しており、海岸林の有する浸水位低減効果が実証されている。このことからすでに海岸林の存在自体が後背地の被災を軽減することが可能であると想定される。

各縦断測線の左右200mの範囲内の家屋数を被災前後で比較する。被災前は1984～86 年に撮影された空中写真、被災後はGoogle の画像（2011. 4. 6撮影）を用いる。被災前の写真から家屋を判読し、被災後の画像により家屋の残存・流失を判別する。また、B 測線の海寄りの部分は海岸林が存在しないため、当然被災家屋が多い。したがって、国道398 号線から陸側だけの範囲を対象にして、同様に家屋の残存・流失を判別する。

判別結果を整理すると表12 のとおりである。海岸林が存在するA 測線では、残存家屋数201 棟、流失家屋数58 棟、流失率22%であるのに対し、海岸林のないB 測線では、残存家屋数182 棟、流失家屋数200 棟、流失率52%である。A 測線では海岸林となっている海沿いの箇所にB 測線では家屋が密集し、その多くが被災しているために流失率に大きな差が出た。A・B 両測線とも、汀線から約270mの地点に国道398 号線が通過している。この国道から内陸の部分だけを比較すると、A 測線では残存家屋数197 棟、流失家屋数57 棟、流失率22%であるのに対し、B 測線では残存家屋数116 棟、流失家屋数64 棟、流失率36%となり、国道の前面に海岸林が存在するA 測線の方が流失率は14%低くなっている。この差が、海岸林が後背地を保全する効果であり、海岸林の有無により被災状況が異なることを示すものである。

なお、判読に用いた写真を図15 及び図16 に示す。海岸林の有無による流失家屋数の差が一目瞭然に読み取れる。

表 12 家屋の流失率

測線	区分	家屋数（棟）			流失率（%）
		残存	流失	計	
A測線	全域	201	58	259	22
	内陸	197	57	254	22
B測線	全域	182	200	382	52
	内陸	116	64	180	36



図 15 被災前後の家屋の分布 (A 測線)

©2011ZENRIN
Image ©2011TerraMetrics
Data©2011MIRC/JHA

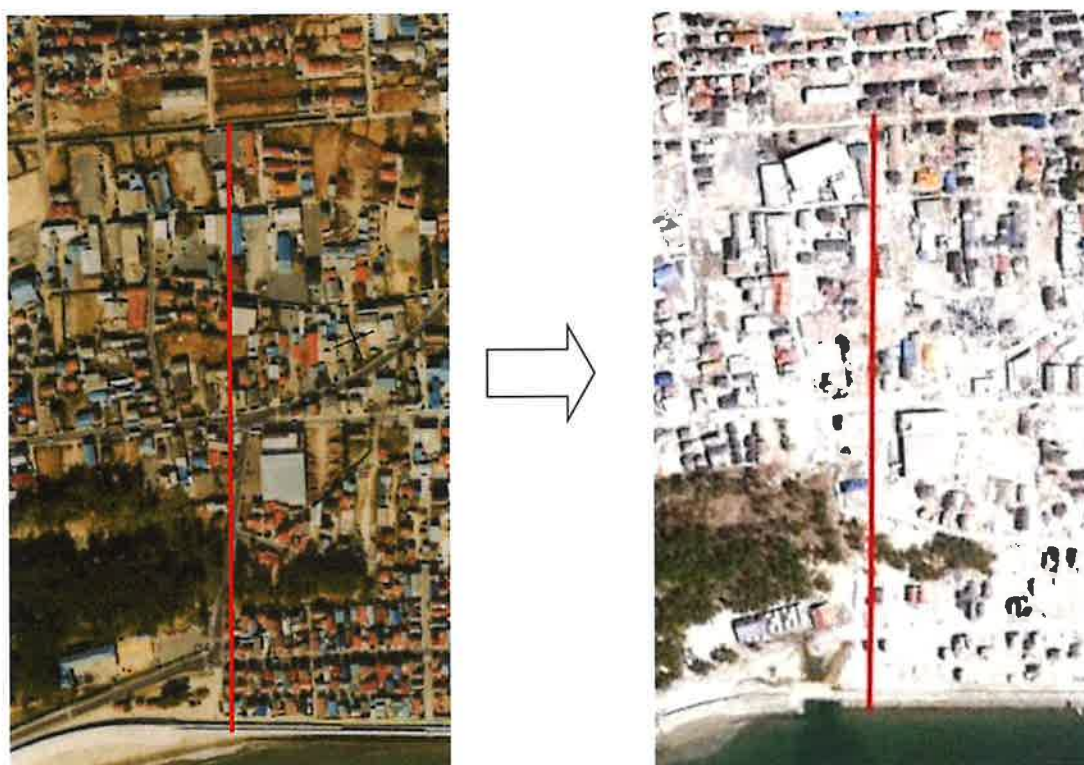


図 16 被災前後の家屋の分布 (B 測線)

©2011ZENRIN
Image ©2011TerraMetrics
Data©2011MIRC/JHA

3－3 海岸林被災状況と後背地被災状況の関係

海岸林が後背地の保全に対して有効であることは、過去の津波災害でも言われてきたが、今回の東日本大震災に基づいた報告もされている。海岸林の効果は、漂流物を捕捉して後背地に到達させない効果と、後背地に到達するときの津波エネルギーを軽減させる効果がある。前項で述べた石巻市長浜の例は後者の効果に該当するが、現地調査では破壊した防潮堤のブロックを捕捉している状況も確認され、前者の効果も発揮していた。このように津波に対して効果を発揮しながらも、海岸林自体の被害は大きくないのが特徴的であり、その関係を明らかにするためには前述の「海岸林の被害度を決める要因と被害状況」を究明する必要がある。海岸林の被災状況により後背地の被災状況も異なり、被害度の決定要因、海岸林の被災状況、及び後背地の被災状況との関係は極めて多様で、厳密に関係を把握するには、大量の事例を収集して分析しなければならず、各機関における今後の調査・研究に期待したい。

第4節 クロマツ引き倒し試験の結果（北原 曜）

1. クロマツ引き倒し試験の必要性

海岸防災林に津波緩衝機能を発揮させる条件は、大きく三つある。一つは、各単木が津波により倒伏したり流木化しないこと、すなわち津波の流体モーメントに対して各単木の引き倒し抵抗モーメントが大きいことである。二つ目は、一定の林帯幅により林内に侵入した津波の流体力を徐々に低下させ、林帯背後にある建築物などの耐力（5 kN/m²）以下に抑えることである。三つ目は、津波が侵入しないように林帯に切れ目を作らないことである。以上の3条件のうち、一つ目の条件は津波災害を軽減させるために非常に重要な条件であり、クロマツなどの海岸防災林の引き倒し試験を行うことが必須である。

津波の単木に作用する流体力 F (kN/本) は、 U を流速 (m/s)、 H を波高 (m)、海水の単位体積重量を γ (10.1 kN/m³)、単木を胸高直径 D (m) の円柱と見なして抗力係数 $Kh=1.2$ とすると、

$$F=Kh \cdot (\gamma/g) \cdot D \cdot H \cdot U^2$$

で表される。また、単木に作用する津波の流体モーメント M (kN・m/本) は、

$$M=Kh \cdot (\gamma/g) \cdot D \cdot (H^2/2) \cdot U^2$$

で表される。

これに対し、単木の引き倒し抵抗モーメント R (kN/本) は、胸高直径 D (m) の3乗に比例すると考えられるので、以下のように表すことができる。

$$R=\alpha D^3$$

単木が倒伏しない条件は $R>M$ なので、

$$D>\sqrt{Kh \cdot (\gamma/2\alpha g) \cdot H \cdot U} \quad \dots (1)$$

で表される。すなわち、 $Kh=1.2$ 、 $\gamma=10.1$ kN/m³、 α =樹種により異なる係数、 $g=9.8$ m/sec² として数値を与えれば、倒伏しない D (m) を求めることができる。なお、 D は津波の波高と流速に比例して大きくする必要があることが分かる。

ところで、立木の引き倒し試験は、土石流緩衝林として信州大学農学部治山学研究室などを中心に主要造林樹種と溪畔林などを対象に最近多数行われてきているが、海岸防災林を対象に引き倒し試験が行われたことはこれまでになく、砂質土に成育するクロマツなど海岸防災林樹種の引き倒し抵抗モーメントは全く知られていない。土石流緩衝機能と津波緩衝機能は、メカニズムは全く同じで、違いは唯一、立木に作用する土石流と津波の流体力の差であり、この差

を決定するのは単位体積重量でしかない。したがって、土石流緩衝機能解明のための立木引き倒し試験は、対象樹種を変えるだけで、試験方法は全く同じである。

信州大学農学部治山学研究室は、立木引き倒し試験の機器やワイヤー類、ノウハウや習熟した学生スタッフなどが揃っており、海岸防災林の引き倒し試験の条件は整っている。ただし、長野県には海岸防災林がないので、臨海県であり東海地震対応のため海岸防災林を造成保全している愛知県に打診したところ、快く海岸防災林の引き倒し試験に協力していただけることとなった。場所は渥美半島田原市の伊良湖岬周辺である。以下、2011年9月にこの場所でクロマツを対象とした引き倒し試験を行った結果について報告する。

2. クロマツ引き倒し試験の対象地と方法

クロマツ引き倒し試験は以下の要領で行った。

実施日時：2011年9月14日

実施場所：愛知県田原市愛知県栽培漁業センター内の52年生クロマツ人工林

実施主体：信州大学農学部森林科学科治山学研究室

協力：愛知県農林水産部森林保全課治山G

同 東三河農林水産事務所林務課

(財) 愛知県水産業振興基金栽培漁業部

事前に、表1のような毎木調査により林相等の把握をし、また様々な胸高直径の単木を引き倒せるよう、引き倒し対象木候補を選別しておいた。ただし、このクロマツ林はマツノザイセンチュウによる枯損が激しく、大径木から枯損し既に伐採処理が進んでいる。したがって、事前調査で引き倒し候補木を決めてあっても、枯損したり衰弱した木が含まれている。クロマツは林齢52年で、林床はシャリンバイやウバメガシ、クスノキなどが侵入している。

このクロマツ林の標高は2.0mで、地形は平坦である。土壌は円礫混じりの砂質土であり、愛知県東三河農林水産事務所林務課の調査によると地下水位は1.5m付近に存在し変動は少ない。実際に引き倒し試験前日に1.0m掘削しても地下水位は確認できなかった。最寄りの田原アメダス観測点によると、年平均気温は16.0度、年平均降水量は1602mmである。

表1. 毎木調査の結果

プロット No.	プロット面 積	クロマツ生 立木本数	クロマツ伐 根数	広葉樹立木 本数	全立木密度 (本/ha)	伐根を除く本数 密度(本/ha)
A	10×10m	18	7	30	5500	4800
B	10×10m	6	8	22	3600	2800
C	10×10m	7	8	20	3500	2700
D	10×10m	10	8	12	3000	2200
平均					3900	3125

対象木は、事前に胸高直径、樹高、枝下高、東西南北4方向の枝張りを測定した。引き倒しは、以下の手順で行った。

(1) 対象木の地際から 1.0m の高さの幹にワイヤーをかける。

(2) ただし、対象木を引き倒す際、木に傷がいたりワイヤーが皮ズレしたりするのを防ぐため、対象木とワイヤーの間にゴムタイヤを挟んだ。

(3) 対象木に巻いたワイヤーと重機に結んだワイヤーとの間にロードセル（東京測器研究所製、TLP-100KNB）を挟み、ロードセルからの電気信号をインターフェイス（DBU-120A）を介してパソコンに時系列でデータ収録した。インターバルは 0.1 秒とした。重機は、ZAXIS 225US を用いた。

(4) 重機による牽引は、徐々に負荷をかけ、引き倒し抵抗力が最大を過ぎ、今度は抵抗力が低下してきたら引っ張り荷重を除荷した。最大引き倒し抵抗力は、立木が約 10～20 度程度傾いた時に発生し、それ以上引っ張り荷重を加えても抵抗力は減少していくため、抵抗力が減少に転じた時に負荷を中止した。

(5) 得られた最大引き倒し抵抗力に、地際からの高さ 1 m を乗じて、最大引き倒し抵抗モーメント得た。

3. 試験結果と考察

クロマツ引き倒し試験の対象木の形状と引き倒し結果を述べる。引き倒し試験を行った対象木は、胸高直径が 15～29cm の立木とした。これ以上の立木も引き倒したが、マツ枯れの影響が見られ、胸高直径の割には大変低い引き倒し抵抗力であったので、除外した。なお、これまでの造林樹種や溪畔樹種を対象に行ってきた引き倒し試験では、胸高直径が 10cm 以下の立木は引き倒し荷重を与えるとワイヤーがずれてしまい、皮ズレが生じて正確な引き倒し抵抗力が記録されないことが分かっている。そのため、胸高直径は 15cm 以上とした。

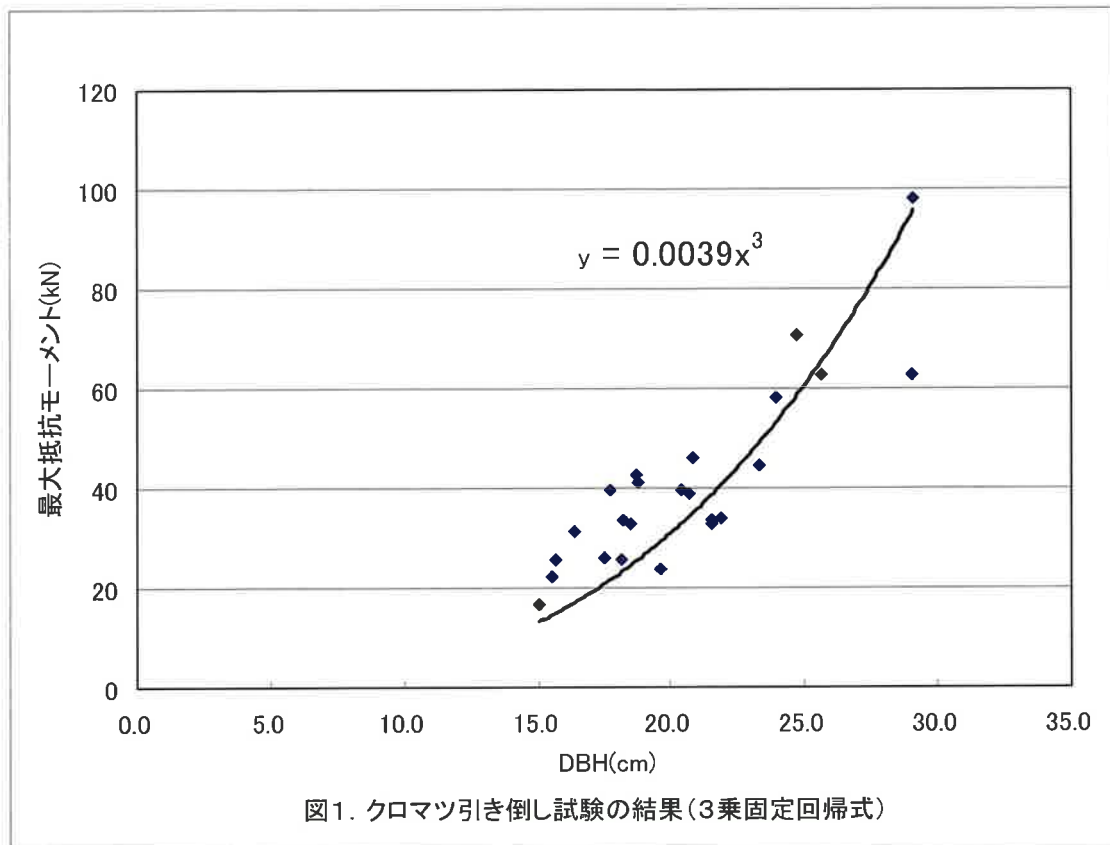
引き倒し時の状況を概略すると、幹折れが 3 本、根返りが 4 本あった。これまでの樹種では、通常、根返りは多く認められるものの幹折れはなかったので、幹折れはクロマツに多い特徴ではないかと思われる。おそらく、地下水位が深い所にあるクロマツでは、根系が発達している一方、幹は針葉樹であるため柔らかいため、引き倒し荷重がかかると幹折れが生じやすいものと推察される。

引き倒し試験の結果を図 1 に示す。これまでの多数の引き倒し試験から、べき値は 3 乗に固定してある。なお、株立ちのものは、各胸高直径から胸高断面積合計を算出し、これを 1 本の立木として仮想的な胸高直径を求めた。図示のように、比較的よい回帰式が得られ、クロマツの係数は 0.00390 であった。これまでに得られた樹種の係数を大きい順に並べると、コナラ 0.00679、ヒノキ 0.00437、カラマツ 0.00223～0.00387、スギ 0.00282、カツラ 0.00214、サワグルミ 0.00199、トチノキ 0.00180、オノエヤナギ 0.00113 であるので、クロマツはコナラやヒノキよりやや低いものの、比較的引き倒し抵抗モーメントが大きい樹種であると考えられる。なお、秋田県ではクロマツを対象に同様の試験を行い、以下の式が得られている。

$$y=0.0064x^{2.795}$$

ここで、 y は引き倒し抵抗モーメント (kN・m/本)、 x は胸高直径 (cm)。この回帰式から胸高

直径 25cm の引き倒し抵抗モーメントを算出すると 52kN・m であり、愛知県で得られた式から算出した値 61kN・m と比較的近似していた。



以上の成果をもとにクロマツ単木が倒伏せず津波緩衝機能が発揮される胸高直径 (m) は、(1) 式に示されたように (再掲)、

$$D > \sqrt{Kh \cdot (\gamma / 2 \alpha g) \cdot H \cdot U} \quad \dots (1)$$

で表され、これに $Kh=1.2$, $\gamma=10.1 \text{ kN/m}^3$, 胸高直径の単位を cm から m に換算して $\alpha=3.90 \times 10^3$, $g=9.8 \text{ m/sec}^2$ を代入すると、

$$D > 0.0126 \cdot H \cdot U \quad \dots (2)$$

となる。この (2) 式に津波の波高 $H=5 \text{ m}$, 流速 $U=5 \text{ m/sec}$ を与えると、胸高直径は 32cm 以上必要となる。波高が 10m となるとこの 2 倍の太さ、また流速が 2 倍になるとやはり 2 倍の太さが必要となる。このように津波の波高や流速が大きくなるに従い、必要な胸高直径を非現実的な値としなければならなくなる。したがって、クロマツに津波緩衝機能を期待するならば、波高 5 m, 流速 5 m/sec 以下の津波までとするべきであろう。これ以上の巨大津波に対しては、土盛りするなどの土木的対策が必要となる。なお、津波来襲時を考えると、土壌は飽和条件になると予想されるが、飽和条件下と不飽和条件下で引き倒し抵抗モーメントに差がないことが分かっているので、(2) 式は津波来襲時にも有効と考えられる。

なお、もともと地下水位の高い場所、例えば仙台市荒浜地区の貞山堀の内陸側などでは、根

系が極めて浅くしか分布していないため、引き倒し抵抗力が極めて弱いと考えられる。このようなクロマツの引き倒し試験が必要であるとともに、地下水位の高い立地条件下でもやはり土盛りが必要と考えられる。

第3章 海岸林の復旧にあたって

第1節 防潮林造成にあたっての提言（北原 曜）

防潮林には、100%津波を防止する機能はない。しかし、一定規模の津波に対して、その速度やエネルギーを減殺する効果は明らかにある。漂流物を阻止するなどの機能についてはここでは触れないが、海岸林の多面的な機能を合わせて考えると、防潮林造成あるいは既存海岸林の防潮機能を高めることは、再度の津波被害を軽減させるために、必要不可欠と考えられる。ただし、防潮林の津波防止機能にも限界がある。今回の実験でも明らかになったが、波高が5mを超えるような場合は、防潮林そのものが折損し破壊されてしまう可能性があることである。これは、津波の波高が高くなると、津波の引き倒しモーメントの作用点が立木の高い場所に移るため、引き倒しモーメントが樹幹の曲げ応力より大きくなり折損するためと考えられる。また、現地調査などでも明らかになったが、地下数メートルの高い場所では、鉛直方向の根系発達が劣り、根返りそして流木化が起こりやすい。クロマツなどの森林根系は、地下水位のない通常の場所では1～1.5m程度、海岸林にあっても2m程度が限界であると考えられる。このような根系発達に対し、地下水位が高い地域では停滯水による酸素欠乏により根系が地下水位以深までに伸長しない。

したがって、例えば津波の波高が10mの地域では、折損や根返りに伴う流木化を防止するために5m程度の土盛りが絶対に必要である。10m以上あるいは10m以下の波高が見込まれる地域についても、防潮林に到達する時の波高が5mになるように土盛りする必要がある。また波高が5m以下の場合は、土盛りする必要はないが、地下水位の高い場所では3m程度の土盛りを設置することが望ましい。今後、地下水位の高い場所での立木引き倒し試験を待つより仕方がないが、地下水位の高い場所での引き倒し抵抗力が、通常の場合と比べてどの程度低いのかの解明できれば、土盛りの高さが確定できる。

クロマツ引き倒し試験および現地調査から考えられることをまとめると、以下のとおりである。

1.（防潮林の最終林型） 防潮林はできるだけ胸高直径を大きくすること。可能なら胸高直径40～50cm以上にする。ここまで成育させるには年数はかかるが、地道に次の津波に対応していく。理想的な防潮林は胸高直径が太く、枝下高が津波の波高よりやや高い程度で、かつ樹高が低いことが望ましい。立木密度は、その胸高直径に対応する密度となるが、一般に500～1000本/ha程度であろう。樹種はクロマツがよいが、松枯れが危惧される場合は、その地域の海岸に成育する樹種を混植する。東北地方ならば、カシワ、ミズナラ、コナラ、イタヤカエデなどであろう。

2. (既存の海岸林の扱い方) 既存の海岸林は、通常、飛砂防備保安林に指定されているが、飛砂防止は十分機能を果たしていることが多いので、今後は防潮機能を付加させていく。そのためには、除間伐などの森林整備を行い、胸高直径をできるだけ大きくさせていくことが必要である。ただし、除間伐は下層間伐とし、1回の間伐率は小さく間伐回数を多くすることが重要と考える。なお、除間伐により飛砂が増えることはあまり考えられないが、その可能性がある場合には間伐率を小さくするが、下枝の枯れ上がりが甚だしい場合は、早めに間伐を行い、胸高直径が大きくかつ樹高が低い防潮林に仕立てる。

3. (林帯幅) 今後の実験によるところが大きいですが、これまでの調査資料などによると 150～300mほど必要とされている。

4. (成育基盤) 先にも述べたように、地下水位が高い場所と、推定される波高が5 m以上の場所では、土盛りが絶対に必要である。地下水位の高い場所では3 m程度、津波の波高が5 m以上の場所では、防潮林前縁に到達した波高が5 m以下になるようにする。また、一定程度の防潮堤が必要である。

おわりに

復興計画の中で、防潮林を含めた今後の土地利用計画は非常に重要であり、まず最初にこれがないと復興は進まない。防潮林は津波に対して完全ではないが、かなりの効果が期待される。防潮林をどこにどのように計画するのか、そして背後の土地利用をどのようにするのか、二度と悲惨な津波被害を被らないために、被災者の定住を促進するために、すばやい決断が必要であろう。防潮林造成は年月のかかるものだが、防潮林の配置計画を含めた土地利用計画は一刻も早く決定していただきたいものである。この報告と提言が、復興計画の一助となることを願う。

第2節 復旧計画の中での海岸林のあり方（河合英二）

海岸地帯全体に大規模な護岸構造施設を造成することは経済的にも無理なことから海岸林の効果と限界を把握した上で、構造物と海岸林を有効活用することが望ましい。

1. 海岸林、防潮林の幅（厚み）について

防潮林は当初は潮風防止の意味で使用されていたが、前述のように多くの高潮、津波災害時に防潮林が災害を軽減した実績から、防潮林には防潮風と防高潮・防津波の2つの意味をあわせ持って使用されるようになった。

これまで、防潮風、防飛砂を目的に海岸防災林の必要幅が提案されてきた（表 3.1.1.1）。

檜山は日本の海岸林を日本海側、太平洋側に大きく2分し、望ましい林帯幅を提案した。すなわち、日本海側 150～200m、太平洋側 100～150mを必要幅とした。その中で、犠牲林帯幅 50～60m、主林帯幅

80～100m、更新林帯幅 50～100mを必要幅として合算した。石川は風環境を強さ別に5つに区分し、機能ごとに必要林帯幅を提案した。潮害機能としては、弱風地域 140～230m、日本海通常 190～300m、日本海強風 240～350m、太平洋通常 170～250m、太平洋強風 190～300mを提案した。

河合（1994）は日本海側について前砂丘幅 150mに必要林帯幅 250mを加えた前砂丘・海岸林幅を、太平洋側については前砂丘幅 70～100mに必要林帯幅 200mを加えた前砂丘・海岸林幅を提案した。前砂丘は海岸林造成上必要な幅であり、一方海岸侵食や護岸工事の場として無視できない必要幅と位置付けている。また、風エネルギー（平均風速の3乗の値）別の必要林帯幅も提案した（表 3.1.1）。

工藤は（1988）はさらに、庄内海岸平野の内陸部の土地利用状態を参考に、複数の林帯を間隔を開け並列にならべ、林帯間を利活用することを提案している。

表 3.1.1 海岸防災林の必要幅

単位 (m)

		①立野	②鹽山	③河合	④石川			(*)本調査
		機能毎	2段階	2階階	5段階・機能毎			5段階
前砂 丘幅	日本海側			150				
	太平洋側			70-100				
犠牲 林帯幅	弱風地域				0- 30			i) 30
	日本海通常				50-100			ii) 50
	日本海強風		50- 60		100-150			iii) 50-80
	太平洋通常				30- 50			iv) 80
	太平洋強風				50-100			v) 100-
主林 帯幅	防 風	50			30- 70			i) 30-50
	飛 砂	70	80-100		50- 70			ii) 50-70
	潮 風	20						iii) 70-
	潮 害	50			70-100			iv) 90-
	要 件	25年生 以上	樹高10 m以上					v) 100-
更新 林帯幅	防 風				30- 70			i) 30-50
	飛 砂				50- 70			ii) 50
	潮 害		50- 70		70-100			iii) 70
								iv) 70- v) 70-
機 能					防 風	飛 砂	潮 害	
必要 林帯幅	防 風	100-150						i) 130
	飛 砂	140-210						ii) 170
	潮 害	100-150						iii) 220
	弱風地域				60-170	100-170	140-230	iv) 240-
	日本海通常		150-200	250	110-240	150-240	190-300	v) 270-
	日本海強風				160-290	200-290	240-350	
	太平洋通常		100-150	200	90-190	130-190	170-250	
	太平洋強風				110-240	150-240	190-300	

(千葉県・林業土木コンサルタンツ、1994)

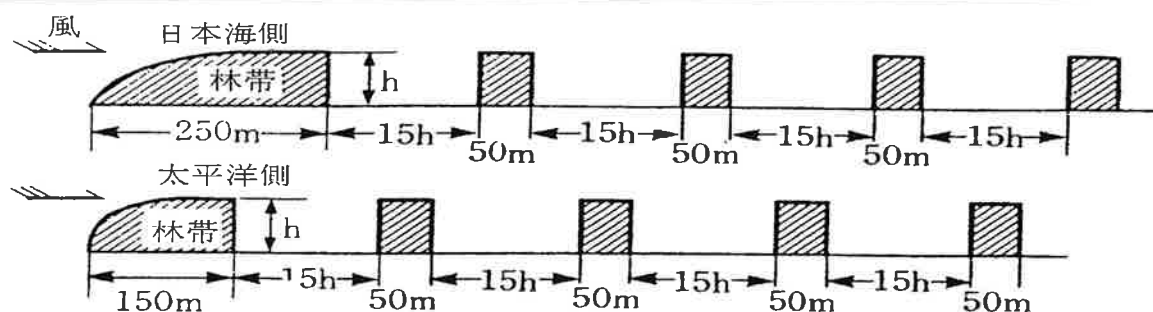


図 3.1.1.1 海岸防風林の林帯配置（工藤哲也、1988）

そのほかに、一ツ葉海岸のゴルフ場を例にとり、前線側に一定幅を残し、ゴルフコースとして利用する「並列林帯利用方式」は防災機能上の問題が少ないとの報告がある（河合、1987）。広い一定林帯幅を

海側に残しその内陸側を一定間隔を空けて平行に林帯を並べ、空間地帯を利活用する方式としては工藤と共通の考え方である。海岸林を海岸線に沿って並列に並べることは、林帯の林縁付近のクロマツの下枝が枯れ上がらず健全な生育をすることや側方からの日射による天然更新を促す効果も併せ持つと考えられる。



図 3.1.1.2 宮崎県一ツ葉海岸林のゴルフ場内林帯配置

2 津波被害軽減効果を発揮する海岸防災林の配置・構造について

—密な小径木林帯か疎な大径木林帯か—

津波の浸水深、エネルギーが大きいと防潮林自体が破壊される。防潮林が効果を発揮する浸水深の限界は、国内の多くの調査例を分析した結果、これまでおよそ 5m 以下といわれている（首藤、1985）

チリ地震津波では上層クロマツ林、下層クロマツ林、低層木広葉樹林の林帯幅 20-100m の防潮林の減災効果を調査した（中野ら、1962）。下層植生をもつ密な 2 段林であることにより、浸入海水の勢力が大きく減殺された。一方で 1933 年の三陸津波のときに、疎林では樹木の根部が激流に洗掘されるなど、折損や倒伏が多く発生した。

インド洋大津波では非常に疎林状態の林帯は漂流物の流木の阻止機能が低かったと報告がある（田中ら、）。密な林帯ほどは漂流物を良く阻止できていた。ただし、浸水深が 5m を超えると、樹帯が破壊されることも指摘されている。

小山は 40m 幅の林帯を 40m 間隔で並列に複数並べ、全体で 400m 幅を保持することを提案している。

漂流物の阻止機能は数列の狭い林帯でも発揮され、国内の実態調査では少なくとも 20~30m の幅があれば漂流物は阻止されている。林帯幅が広く樹幹が太いほど衝突や衝撃に耐えられるが、反面で立木密度が高いほど多くの漂流物を阻止できる。

以上をまとめると、防潮林は平面・垂直の両方向の階層構造があり、折れない程度の小直径(10cm)の木と流出木を受け止める大直径の木が混在していれば効果が大きいと推察される。つまり隙間の大きい大径木と密な中・低木の混在効果を発揮する林帯配置、構造が望ましい。高い立木密度と大直径木林帯の二つの要素を同じ育成管理では満たすことが出来ない。そこで施業方針の異なる 20-40 m 幅の林帯を同じ距離の緩衝帯（空間）を複数列設定することが必要になる。

連続する林帯が欠除したり疎開したりした部分があるとそこの部分に被害が集中することも実態調査で明らかである。海から林帯に直行するように作業道が設定された部分でも被害が増加するので、S 字型に曲げる工夫が必要である。防潮林だけでは津波の侵入は阻止できない。また、防潮林はしばしば砂丘の浸食や洗掘を伴って倒伏する。首藤、原田が指摘するように津波の浸水深が 5m を越えると防潮林に折損、破壊が起こる可能性が大きい。そのため、津波の侵入防止と植栽基盤の浸食、洗掘防止を兼ねて防潮堤、防潮護岸工を併用することが望ましい。

3 津波による被災地域の人工盛土工（植栽基盤）と海岸防災林の造成方法

3-1 盛土（植栽基盤）造成上の問題点 1：地下水位と盛土高さ

① 盛土高さ

植栽予定地の植栽地盤を、地下水位が植栽根系への影響のない程度に高めることが必要であり、標高 2～3m 以上上げることが必要と思われる。

クロマツ苗木の鉢を、2～10 日間海水につけて、その後の経過を観察したところ（小田、1983、1984）、1983 年度は浸水日数 7 日でほとんどの供試木が枯死したが、1984 年度は浸水日数 10 日間で約半数が半枯したがほとんどが生存した。この原因は自然の降雨量が影響したようである。植栽地の塩分量は降雨により低下するので、降雨量と塩分変化を現地調査で把握する必要がある。

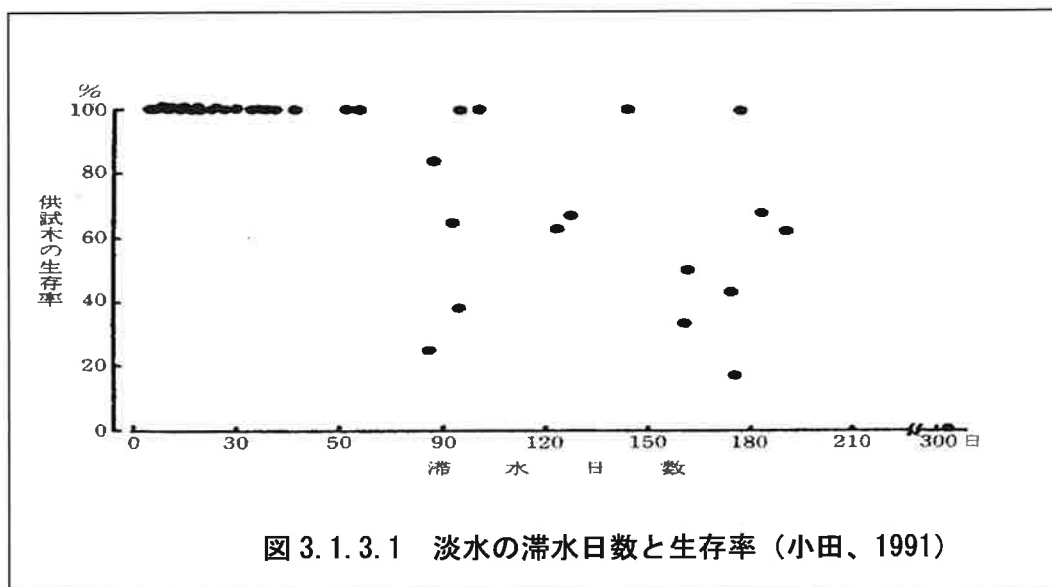
高橋（1965）によると植栽鉢内の砂土中に一時的に溜まった塩分は、雨が降ると急速に減少し、積算雨量 50－70mm で指数関数的に減少する。したがって、十分な降雨量後に継続的に土壌塩分量を測定し、植栽苗木に問題が発生しない程度に塩分量が減少していることを確認する必要がある。

土壌が沈下して定期的に（満潮時等）常に海水につかる場所では、根系が地下水、海水に害を受けない程度に植栽基盤を高めておく必要がある。

被災現地は地盤沈下、海水浸水している場所が多いと思われる。地下水位が高いと根系が過湿害を受け、発達不足のための上長成長阻害が起こる。また、根系が土壌表面付近の浅いか所に集中し、成林後に強風による根倒れの懸念がある。このような場所に海岸林を造成するには標高 2m 以上の盛土（植栽基盤）を造成する必要がある。

② 砂丘の地下水位とクロマツ林の根系分布

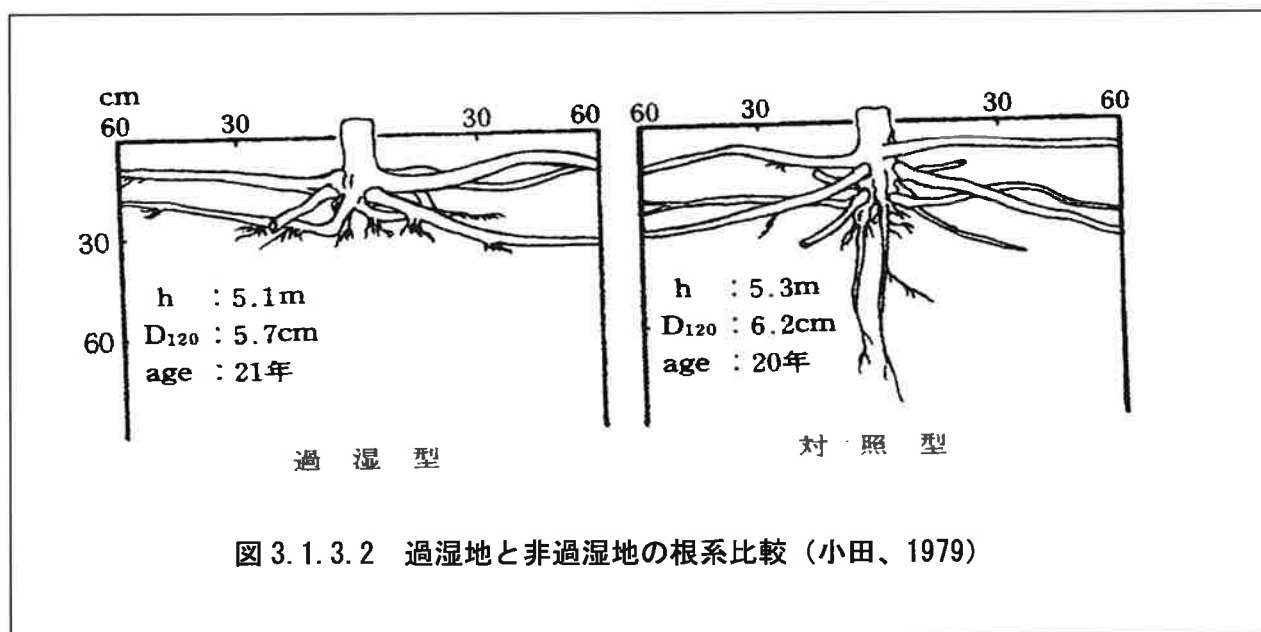
刈住（1979）によれば、地下水位が低く乾燥傾向にある海岸砂地のクロマツ根系は土壌深くまで発達し、根系の最大深さは、樹齢 50 年では 3m 近くまで到達する。しかし、海岸地帯は地下水位が高い地域が多く分布し、そこに造成された海岸林はクロマツ林をはじめ地下水位の影響を受け、根系が深部まで発達しない。



千葉県九十九里海岸は、砂堤列と湿地が交互に存在しており、全体に地下水位が高く、クロマツ林の過湿害がしばしば報告される海岸である。台風による豪雨時には海岸林内に滞水状態が長期間続く場合があり、クロマツの衰弱や枯死も散見される。

クロマツ鉢苗の滞水実験 (小田、1991) によると、滞水日数が 70 日以上では苗は枯死しないが、90 日前後になると枯死害が発生しはじめ、120～180 日程度で半数が枯死する結果になっている。

過湿型と健全なクロマツ根系を比較すると過湿型は、垂直根の発達が地下水で阻害され、根が水平に伸び、垂直方向の根の先端部が枯死している (小田、1998)。

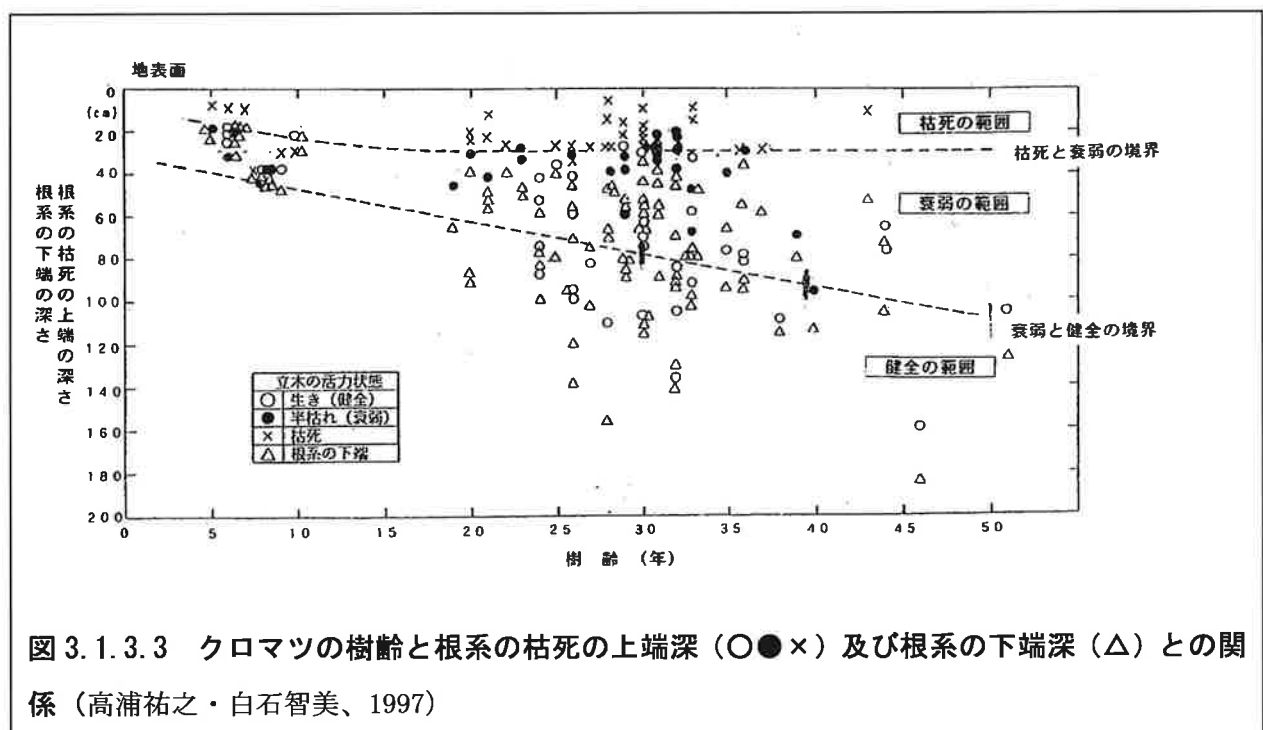


千葉県北部林業事務所で調査した（高浦・白石、1997）。100本のクロマツ林の根を掘り取り、健全木（○）、衰弱木（●）、枯死木（×）別に根系の垂直深（根の下端までの深さ）を測定した。

調査地は、9地区のうち8地区は地盤高3m以下であり、林地の相当部分が湿地化している状況であった。

枯死木の根の枯死がはじまる深さはおおよそ30cm以下になっており、地下水の影響をあまり受けない土層厚が30cm以上なければ枯死する可能性が高いと推定している。幼・若齢林の時代には大きな影響を受けていなかった林分が、生長に伴い、根が地下深くまで伸長を必要とするため、次第に地下水の影響を多く受けはじめ、枯死に至ったものと思われる。地下水の影響を受けない土層の厚

さが不十分なところでは、枯死はしないが、次第に衰弱していく。図中の点線は示された「衰弱と健全の境界」線以下の範囲がクロマツが健全に生育できる土層厚と考えられる。土層厚は樹齢とともに直線的に増加し、樹齢10年で約50cm、30年で約80cm、50年で約110cmが必要になる。この地域での目標林齢、個体サイズをどの程度に設定することが効率的、機能的であるかということが課題になる。

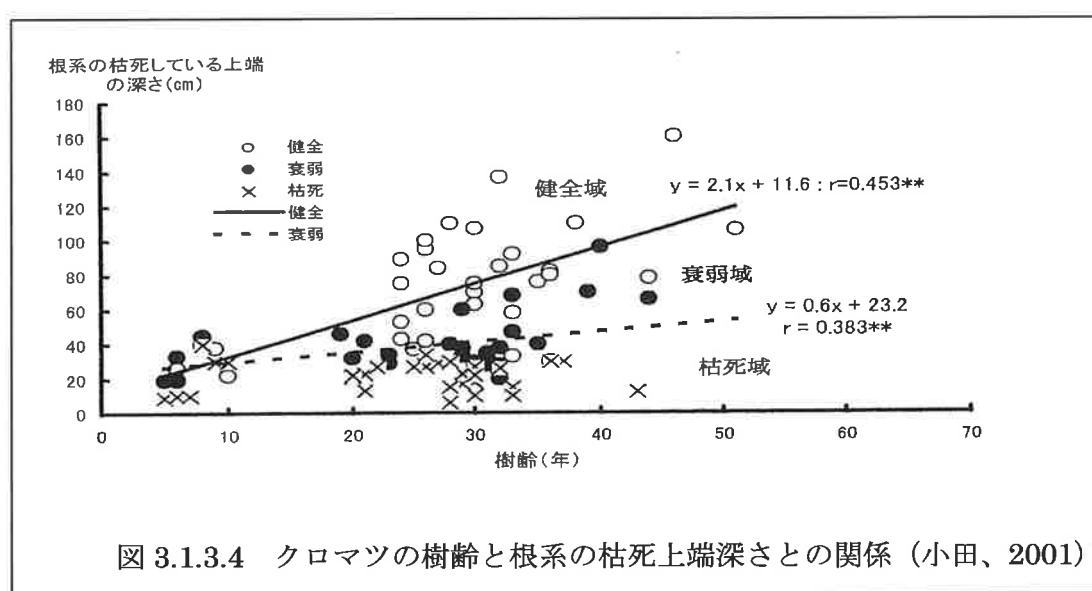


同様に九十九里の海岸林において、クロマツの生存のために樹齢に対応した根系の必要垂直深が検討され、以下の必要垂直深が提案された（小田、2001）。小田はこの垂直深を「基準盛土厚」と呼んでいる。

$$y = 2.1x + 11.6$$

y：垂直深（根系の枯死上端の深さ）、 x：樹齢

この式からクロマツの健全な生存に必要な根系の垂直深は、目標樹齢を 50 年とすると 120cm になる。小田はこれに盛土の圧縮沈下量等を補正し、補正後の基準盛土厚を 1.9m と見積もっている。



小面積の海岸林過湿対策の一つとして福島県松川浦海岸では海岸防災林における排水施設の効果がある（鈴木ら、2002）。樹齢 80 年生のクロマツを主体とする海岸林に過湿が原因と思われる樹木衰退が発生した。当地は標高 1.8m～2.8m 程度の低位標高部である。海面との比高差は 0.9～1.9m である。滞水害防止のため水路工や暗渠工の排水施設整備と荒廃林整備を行った。タンクモデルによる解析結果から、排水施設は十分に効果を発揮していると評価できる。

3-2 盛土（植栽基盤）造成上の問題点2：土壌硬度

植栽基盤は重機で造成，成形すると思われるが，人工盛土は自然状態の土層と異なり，土壌の粗孔隙が少なく，硬く透水性が不良な上，土壌の有効保水量も少ない。さらに造成直後は乾燥し易い上に、梅雨期等には過湿になりやすい。盛土（植栽基盤）の造成にあたっては透水性等土壌物理性が悪化しないよう留意することが必要である。そのためには雨天時や含水率の高い日に重機による圧密は避けること等が必要である。止むを得ず硬い植生基盤が出来上がった場合は、植栽まで年数を経過すると雑草の根系により土壌の物理性は改良される。しかし、盛土造成後に年数をおくことは現実的には困難と考えられる。そのため耕運、明・暗渠の排水路により土壌改良を行う必要がある。

植物の育成に適切な土壌硬度指数は、概ね18～23mm程度の範囲である。植物の根系が伸長しうる土壌硬度は一般的に、根の伸長圧が山中式土壌硬度計による硬度指数で23mm程度とみなされており、根が土中に伸長するためには、この値より小さいことが必要とされている。しかし、土壌には大小の間隔があるため一般土壌では硬度指数27mm程度まで侵入可能とされ、間隔の極めて少ない粘性度では根の伸長圧と同じ硬度指数23mmが限界とされている。また、硬度指数10mm未満の軟らかい土壌においても、乾燥害や表層土の浸食が起こりやすいので、植栽基盤の改善が必要である。

大分県潮見町の干拓地の植栽基盤を1.2m厚に盛土して海岸防風林を造成した例がある。盛土高は当初2m以上を提案したが、現地で供給可能な土量を基に、最終的にやむを得ず1.2m厚として造成した。

第1回目は植栽基盤は重機により相当に締め固められた（山中式硬度計で27mm以上）ため、植栽木根系は植え穴内にとどまり発達せず、さらに過湿と乾燥の害を受けたと推定される（現地で使用された土は水を含むと固く締め固められる性質でもあった）。

県の造成指針には過度の締め付けを避け、排水に配慮するよう注意事項として記載していたが、後日現場を見たところ道路基盤造成のように締め固められていた。その後2回目の造林のときには、締め固め過ぎの失敗が生かされ、表土層の山土を別にして、基盤締め固め後に基盤上に表層土を比較的柔らかく盛ったことにより、ほぼ成功したと思われる。

クロマツ林の根系が及ぶ範囲を約2m深とすれば、この範囲まで土壌硬度指数で23mm程度に保つ必要がある。

干拓地の植栽地盤は、横4m、縦2mの作業路を配し、40×20mの羊糞状のものを交互（千鳥足状）に2列設置した。汀線に直角な作業路は風道にならないように直線を避けた。また、作業路は植栽地盤のスムーズな排水の役割を果たすことも考慮に入れ採用した。

図8は海岸林造成がある程度完成した昭和62年時の現況である。クロマツ林と広葉樹林の混交林を目標型としたが、当初目標とした針広混交林ではなく、クロマツを主体とした林帯になった。このこともあり、クロマツ林には松の材線虫病による被害が多く発生しているとの報告がある。

目標とした林型にならなかった理由として、後の調査の結果以下のことがあげられる。

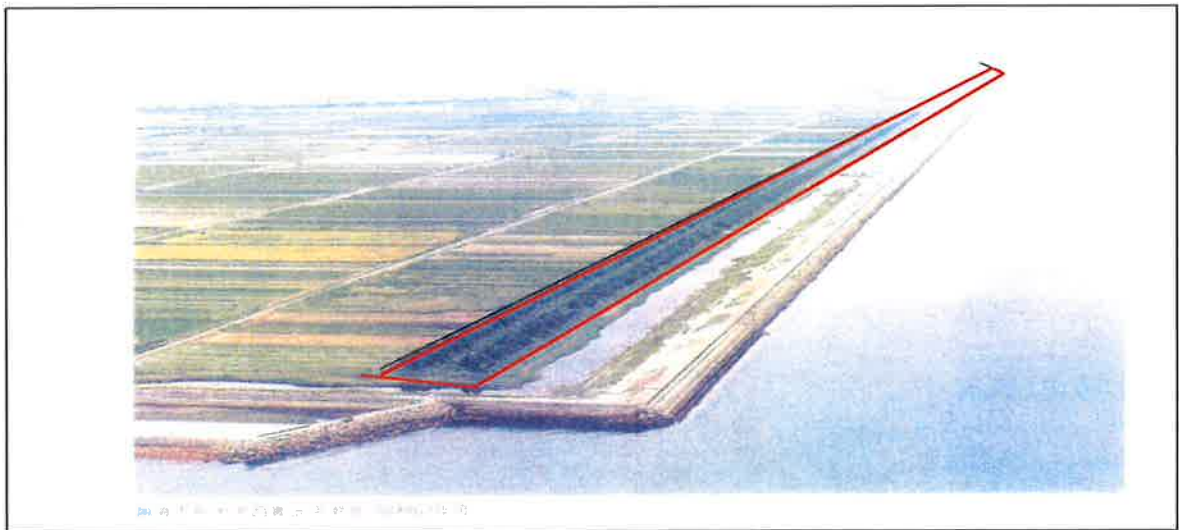
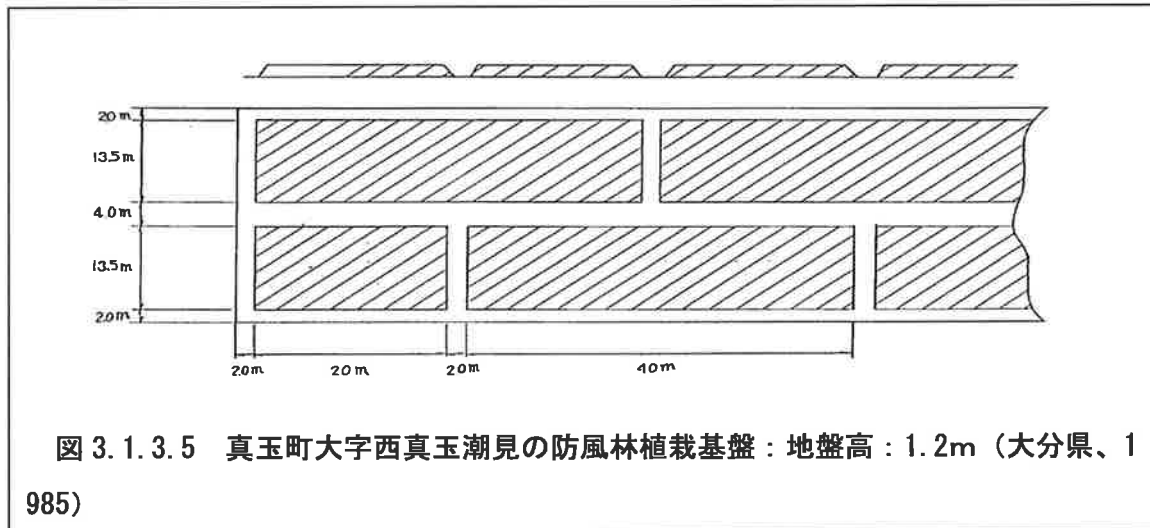


図 3.1.3.6 大分県真玉町字潮見 干拓地の盛土後の海岸林造成（昭和 62 年）

（林業土木コンサルタンツ提供）

- ・前期に行った人工盛土は道路地盤のように固く締めつけられ、根系の生長が阻害された。
- ・広葉樹は初期成長が遅いこともあり、雑草による被圧があった。
- ・クロマツ苗木、グミの初期成長が他の広葉樹類の生長より優れていたため広葉樹が被圧された。

一旦出来上がった人工盛土を苗木の植栽前に耕運し、山中式硬度計の数値で 23mm 以下にすることや多くの樹種を植栽する場合は、樹種間の生長曲線を考慮した植栽設計・配置と施業管理が必要である。

また、クロマツ林と広葉樹林は植栽する地域を明確に区分することが必要である。

3-3 東北地方地震津波災害における海岸林の効果

速報的報告書（森林総合研究所、埼玉大学等）によると、海岸林は3.11の大きな津波によって壊滅的被害を受けた。しかし、被害を受けながら津波災害の軽減に役立っていることが多数報告されている。

○森林総合研究所の研究：高さ16mの津波の場合、海岸防災林がないと約18分後には海岸から600m離れた地点に秒速約10mの波が押し寄せるが、防災林があれば到達時間を約6分間遅らせ、津波の勢いも秒速2メートルに落ちると推定される。（根を深く定着させるため海岸沿いに高さ3～5mの盛土をして高台をつくり、奥行き幅200m程度まで拡大する。）

○埼玉大学 田中規夫教授の研究：モデル化した数値計算から600mの海岸林は、海岸部で10m前後の津波（砂丘高5m）の条件下で、約200mの家屋の流失を抑える効果があったと推定される。現地（仙台市荒浜地区）の家屋密度から推定すると、家屋流失は100～300m前後減少した考えられる。これは数値計算の結果と概ね一致する。

海岸林は本来飛砂防止や潮風防止を目的に造成されてきたが、津波に対する効果は、護岸工のように絶対的に津波を防ぐことではなく、林内に津波の侵入を許し、海岸林自らも被害を受けながらその面積効果（厚み）により津波の災害を軽減する（減災効果）ことである。今回の津波は数役年から千年に1度くらいの確率で起こると推定されるほど規模が大きかった。このため、当初海岸林はほとんど役に立たなかったとの報道もなされたが、現地に入ってみるといろいろな場所で効果が認められた。今回の被災状況を要約すると以下ようになる。

○今回の地震により大規模な地殻変動とそれに伴う地盤沈下が1.0m前後発生した。このため、護岸構造物の破壊や海岸林の被害が増長された可能性がある。

○岩手県では海岸林の浸水面積が164haと被害県では比較的少ない面積であったが、その6割が甚大な被害である。宮城県は仙台平野に被害が広く及び、海岸林の浸水面積が1,753haで、そのうち甚大な被害は約4割である。

○海岸林は壊滅的被害を受けながら、漂流物の捕捉、津波速度の軽減等の効果を一定程度発揮した。一例として、かつて海岸林であったところの一部を住宅地として開発し、林帯幅が狭くなった場所では、被災程度が大きく、広い林帯が残された場所では被害が少ないことなどが報告されている（坂本、2011）。海岸林は3.11大津波自体を完全に抑止することはできないが、被害の軽減に貢献したと判断され、多重防御の一つとして考えることができる。

○海岸林や被災地の微地形や標高の差が海岸林の効果や海岸林自身の被害に影響を及ぼしていると推定されている。ただし、詳細な効果調査までは至っていないので今後の調査・分析を待つことになる。

○今回の津波災害は数百年から千年に一度といわれる規模であった。そのため、防潮堤や津波のエネルギーに抗しきれず、多くが破壊された。また、地震の揺れ、地盤沈下、津波浸食、引き潮等が被害を加速したと推定される。比較的被害がすくない護岸構造物として緩傾斜の階段護岸工が残存していた。

緩傾斜堤は津波・高潮防止を目的としたものではなく、海岸侵食防止や親水堤として造成されたものと思われるが、結果として大津波に余り抵抗しない構造が良い影響をもたらしたといえる。

○海岸砂丘地帯は元々、過湿地帯が多く存在する。今災害でも過湿によるクロマツ根系の直根の成長不良により多くの木が倒伏、流木化した。被災地はさらに地盤沈下により過湿地の拡大や海拔0 m以下地帯の増加が見込まれている。これまでの過湿地帯や新たに発生した過湿地帯にどのような対策の基に海岸林の再生を行うのが課題である。人工盛土の造成後に海岸林を再生することが望ましいが、盛土規模、サイズや盛土材料の確保、配置等検討すべき課題は多い。被災ガレキを盛土材料として再利用することも必要と考えられる。

3-4 一般論としての地盤沈下、津波浸食による海浜の消失と住民移転の意向

三村ら（1993）は IPCC の地球温暖化シナリオとして、海面上昇が日本の砂浜（試算は茨城県の砂浜を対象）に及ぼす影響を試算した。0.3m、0.6m、1.0mの海面上昇による汀線の静的後退距離はそれぞれ 10m、21m、32m と推定された。さらに、静的な後退距離の 3 倍以上の侵食が生じると予測し、改良式での予測では、付加的な平均後退距離をそれぞれ 30m、65m、101m と試算した。侵食面積では個々の潜在的後退距離と砂浜の幅とを比べ、0.3m、0.6m、1.0mの海面上昇により、それぞれ 45.2%、77.5%、90.5%の砂浜が消失すると試算した。

この試算には沿岸漂流など個々の地点の固有の課題は無視して検討しているが、沿岸漂流の卓越する海岸では海面上昇の効果は小さいと報告している例もあるので定量的評価は今後の課題とも述べており、後退距離は予測を下回る可能性も指摘している。

今回の津波による地盤沈下は 1.0m前後と言われているので、砂浜の後退は最低でも 30m、最大で 100m前後後退する危険性を考慮しておく必要がある。

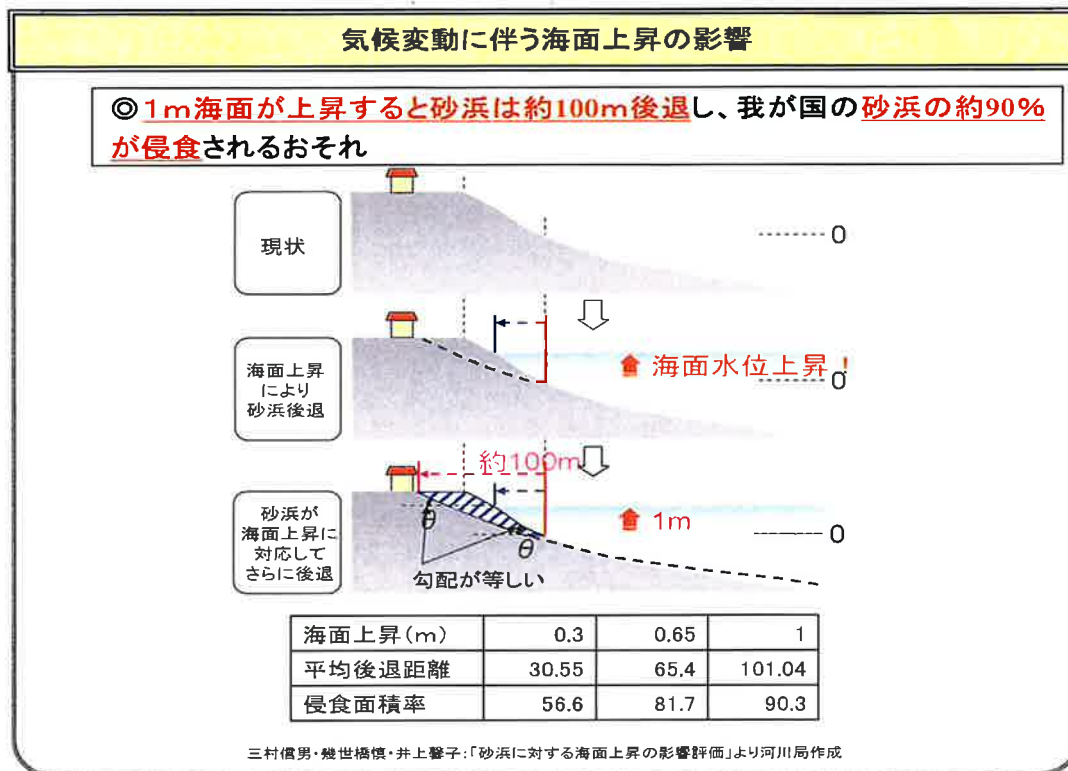


図 3.1.3.6 気候変動に伴う海面上昇の影響

(http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/yosan/gaiyou/yosan/h21budget/1-2.pdf より引用)

細見ら(2005)は海面上昇に対応する海岸保全対策を発表している。海面上昇量 0.9mを加えた値、(T.P+3.8m)を潮位条件とした。既存堤防の天端高は 1.3m かさ上げた。移転対策として波の遡上高に余裕分(バッファゾーン)を加え、高さ(T.P+7.0m)を設定し、この高さより標高の低い地域を浸水危険範囲として住宅はすべて移転対象とした上で住民に対するアンケート調査を実行した。今後の参考として要約を以下に箇条書きする。

○日本では防護対策より移転対策の方が経済的に優位になる地域が存在する。

○住民は防護対策と同程度かそれ以上に移転対策を望む声が多い(自分の家が安全な生活ができなくなると分かった場合のアンケートの結果(複数回答)、64%が「安全な場所に引っ越す」、38%が「行政に安心できる対策を要望する」であった。行政に力を入れて欲しい政策として、従来通り

の防護施設の整備を望む人が41%あり、「移転させてほしい」と「被害を低減させる対策を進めて欲しい」の合計で48%になった）。

○移転を促された場合、費用の補助があれば移転する意思を示した人が7割にも及んだ。（「移転費用の負担を条件に安全地区への移転を進められた場合の対応」として、「速やかに移転」と「移転する」の合計は72%になった。

○移転したくない人の理由として「移転費の補助だけでは財政的に移転が困難」が54%であった。移転したくない人に対して「移転費補助以外に行政からの援助があるとして望むもの」を問うたところ「安全な土地への等価交換」が53%で、「税金や利子の免除」が47%であった）。

今災害でも住宅移転は避けて通れない課題であるが、被災者側の要望である「財政的」な支援が不可欠な要因になると判断される。

3-5 津波対策（多重防御）として望ましい海岸林の再生と復旧、整備

林野庁は「多重防御」海岸林再生を提案している。県、市町村単位でも独自の提案がされる情勢である。ここで、これまでの文献整理を前提に望ましい海岸林、防潮林の再生、復旧方法について提案する。海岸林は元々、津波を完全に抑える機能は持っていないが、今回のような大津波に対しても、漂流物を捕捉する効果や津波のエネルギーをある程度抑制する効果があることが判明した。これらの事実等を前提に、「津波に対する防潮林」の再生と配置は、現段階では次のように考える。

① 林帯幅

海岸林はその幅（奥行）が広いほど津波減災効果が大きい。理想的には前砂丘幅として100mを確保し、その内陸側に200～300mの「健全」な林帯の確保が望ましい。前砂丘幅は護岸構造物工事のための土地、または今後起こりうる海岸浸食に対する安全性の確保のために必要な幅である。「健全」という意味は、今回の災害調査で、地下水位が高く地域のクロマツは、根系が浅く、津波効果が小さいことや流木化することから、林帯幅プラス健全な林帯の必要幅が必要と判断された。もちろん、後述する過過湿地帯への林帯造成の再検討と湿地の植栽基盤として盛土、嵩上げも必要である。

② 栽基盤の盛土、嵩上げ

海岸地帯平野部は元々砂丘の内陸側には過湿、湿地地帯が一定割合占めているのが普通である。仙台平野海岸地帯も過湿、湿地地帯が広がっていた上に、地震、津波による地盤沈下も1m前後発生した個所もある。このため過湿湿地帯が増加し、今後も海岸線の後退の可能性がある。海岸林の健全性の確保のためにはT.P+4.0m以上の地盤高が必要になる。地盤高は高ければ高いほど、津波のエネルギーを減少できるが現実問題として、大面積の高い盛土については、盛土材料の場と量の確保が容易ではないと考えられる。一定幅、一定高さの並列配置が現実的である。

③ 配置

海岸林幅を 200～300m確保することが困難な場合は、最小限 30～50m幅の林帯を間隔を空けて、複数列海岸線に平行に並べることが必要である。林帯間の空間は人間の活動の場として利用できる。例えば、30 幅×60mの長さの羊羹型の地盤を「千鳥足状」に並べる方法がある。海岸林の直接的影響ではないが、海岸線にほぼ直角の一直線の道路は津波の通路となり、被害を大きくしている。「千鳥足状」の配置は道路の直線化と植生地盤の過湿を防ぐ意味である程度有効と考えられる。海岸林内の直線道路のマイナス効果は過去の津波被害でも報告されており、なるべく早く S 字やクランク状道路に変更することが望ましい。また、河川の河口付近から上流に向かう浸水域には最低 30m幅の林帯の確保が望ましい。

④ 林帯の構造、施業

クロマツ海岸林は人工的にその密度をある程度変更できる。複数列の目標林帯造成が可能な場合は、前線側はある程度密（2000～3000 本/ha）に導き、最内陸側林帯は大系木化を目標林型とする。大系化の場合は、根系の垂直深と植栽基盤高の海拔高も考慮に入れる。広葉樹化も検討されることになるが、クロマツ林に比較し、塩害、塩風に弱く、貧栄養の土壌での成長が悪いので、内陸側に位置し、土壌養分が広葉樹林に適している条件で採用を検討する。

⑤ 護岸構造物と海岸林の調和

護岸構造物は破壊されない条件で、その高さまでの津波を防ぐことができる。そのため護岸工設計、完成時やその後に海岸林幅を減少させる伐採、開発も行われている場合もある。ただし多くの防潮護岸工は 30～50 年に一度の津波に対応する高さ、強度を前提に設計されている（河田、2011）。「多重防御」の一つとして、海岸林の伐採が伴う工事や内陸側開発は避けるべきである。また、今回の災害による地盤沈下で、海岸林地帯に海拔 0m前後の地帯が多く発生した。歴史的、文化的に海岸林の復元が不可欠な地域（例えば高田松原）ではある程度強固な構造物による護岸工と海岸林の再生の調和が必要になる。

⑥ 地盤沈下、過湿地の拡大と海岸林再生

海岸線後退、侵食、過湿地の問題をどのように解決するかは今後の大きな課題である。

海岸地帯の地下水位の高い地域や手入れ不足の場所で、樹木根系が浅い個体や形状比（樹高(m)/胸高直径(m)）が高い70以上の樹木が多く出現している。今災害でも根系が浅い樹木や細い樹木の多いことが倒伏、流木化した要因としてあげられている。

仙台平野では、砂丘背後のラグーンのような地下水位が高い地域に海岸クロマツ林が広く植栽されてきた個所が多く見られる。3.11東北地方太平洋沖地震では地盤沈下も多く発生しているので、過湿地も拡大している。これまでのように過湿地が広がっている地域をすべて盛土して植林するに

は、水処理、盛土材料の確保等解決すべき課題も多い。このような場所では、水の移動路、排水のための排水路、排水ため池の造成と盛土海岸林造成の区域をゾーニングして再生計画することも一つの方法である。

第3節 防災・減災のための森づくりへの提言（沢田治雄、越智士郎）

海岸林および内陸樹林地の被災地現地調査並びにリモートセンシング画像分析の結果を踏まえ、林地の立地条件を考慮し、以下の場合に分けて提言を行う。

1. 平野沿岸部

1.1 200m程度の幅広の林帯が確保できる場合

1.1.A 高さ3m程度の盛土が確保できる場合

1.1.B 十分な盛土が確保できない場合

1.2 十分な幅の林帯が確保できない場合

1.2.A 高さ3m程度の盛土が確保できる場合

1.2.B 十分な盛土が確保できない場合

2. リアス海岸湾内低地部

3. リアス海岸半島沿岸部

4. 平野内陸部

4.A 住居地域

4.B 農産業地

4.C 道路

1. 平野部海岸林

(事例紹介)

平野沿岸部の被災地として、①仙台市若林区荒浜地区、②亶理郡山元町、③石巻市渡波地区、④石巻市矢本海岸地区の4地区を視察した。

①荒浜地区は海岸に近く市街地は壊滅的な被害を受けた(写真1)。津波浸水高は約12mと記録されている。街区の被害状態に比べて、海岸林の一部は残留している(写真2)。ほぼ消滅した「高田の松原」と比べて、津波の高さやそのエネルギーの違い、地盤沈下や液状化の程度の差で海岸林の樹木が残存したものと考えられる。



写真1 荒浜地区被災地



写真2 荒浜地区北側の海岸林



写真3 スジ状に消失した海岸林
(荒浜地区北部)



写真4 被害が軽微な海岸林
(宮城県・山本町第二小付近)

荒浜海岸北部では林帯幅が300m近くあったが(図1)、海側の林地に比べ内陸側の林地の被害が大きい。これはリモートセンシング画像による被災前後の比較でも確認できた(図2)。前面の海岸林では樹高やDBHは比較的小さく、津波でなぎ倒された状態であるが(7月の現地調査時点)、根返りなどで土壌が掘り返されたような被害は確認しなかった。荒浜海岸で津波により地面が掘削された地点で砂地の深さは3m以上あり、地下水がしみだす状況も確認できなかった。一方、内陸側の林地は林分がスジ状に消失した地点があり、そうした場所では根返りにより土壌が掘り起こされていた(写真3)。また根返りで土壌が掘り起こされた場所は地下水が染み出してお

り、地下水位が高くなっているが、この地下水位が地震前から同じように高かったかどうかは確認できていない。



図1 被災前の荒浜地区
(GoogleEarth より)

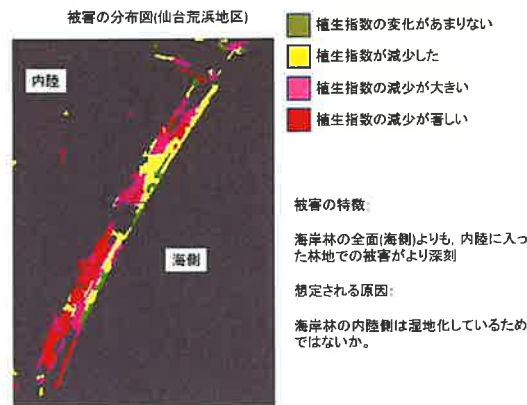


図2 リモートセンシング画像の分析結果

②山元町で海岸林の林木の多くが流失した。津波浸水高は7～12m 程度である。役場でのヒアリングでは、海岸林で発生した流木により破壊・損傷を受けた家屋も多いとのことであった。津波をかぶることによる直接的な破壊に加え、流木やその他の瓦礫が押し波・引き波で家屋・構造物を破壊していることが確認されており、流失しない海岸林を作る必要がある。

山元町内では、第2小学校裏の海岸林の被害が比較的軽微であった(写真4)。海底の地形やヘッドランドなどの条件で、海からの押し波のエネルギーが局所的に抑えられた可能性もあるが、内陸側の地形を見ると、該当する海岸林の両脇に引き波の通り道となるような水路があり、この海岸林が引き波による被害から免れたことが想像される。

③石巻市渡波地区の長浜海岸林(石巻女子商業高裏)は軽微な被害に留まった。すぐ西側の石巻漁港で7～8m の津波浸水高が記録されているのに比べ、海岸付近の津波の高さは6m 弱と記録されており、1m 程度低くなっている。また、この海岸林部分は周辺より少し地盤が高くなっており、引き波がこの海岸林部分を避けて両脇から海側に抜けた可能性も考えられる。

④石巻市矢本海岸の海岸林は400m 近い林帯を持つ。前面の比較的若い樹林地に比べ、内陸側は広葉樹が侵入している林地で、根返り、傾倒などの被害が見られた。津波遡上高で約7m、浸水高で約5m と記録されており、石巻港付近に比べて1～2m 程度低めである。内陸側の林地は湿地化している。地震後の地盤沈下、液状化の影響もあるかもしれないが、林内を流れる水路の状況から以前から地下水が高く湿地化傾向にあったと思われる。

以上の視察結果から、(1)海岸林から流出した流木による二次的な被害を作らないこと、(2)特にガレキなどを大量に含んだ引き波の破壊力にも考慮し、内陸側で流木を発生させないようにする。

(提言)

1.1 200m 程度の幅広の林帯が確保できる場合

海岸から 300m 程度は海岸から続く砂質地盤で高い地下水位となる。垂直方向の根系が発達せず、土壌緊縛力の低下により、津波で立木が流失する危険性が高まる。また、地震による地盤沈下、液状化も懸念される。宅地、工場などの利用は避け、防災保安林とした土地利用が適当と思われる。

1.1.A 高さ 3m 程度の盛土が確保できる場合

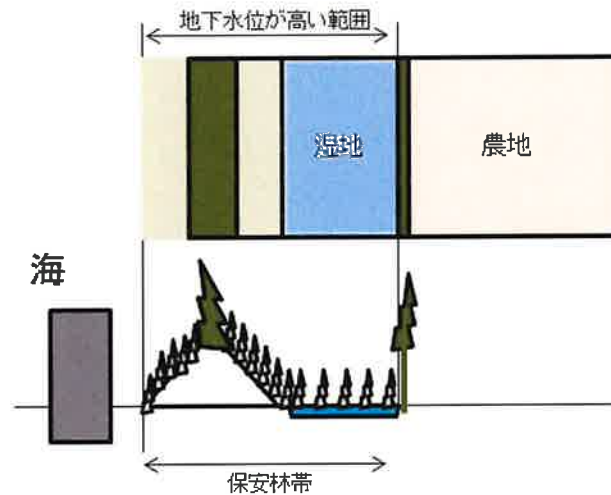


図3 林帯が広く盛土が可能な場合の森林配置例

十分な盛土が確保できる場合、相対的に地下水位を下げて、垂直根が発達できる大規模な海岸林の造成が可能であろう。林帯幅の大きな海岸林を超えることで、津波のエネルギーの低下が期待できる。

ただし、森林の完成には30年程度以上の期間を見込む必要があり、密度管理、病虫害の予防、駆除など育林の手間も必要となる。砂質で潮害などの影響があるならば、マツは適性樹種の一つであるが、盛土などにより土壌の改変があるならば広葉樹などの植栽も可能であろう。ただし、想定以上の津波で大径木の樹木が流出するリスクも考慮しておく必要がある。

流出しにくい、幅の広い樹林帯を形成し、万が一に備えて大径木の流出被害を少なくなる森林帯の一つとして図3のような配置が考えられる。

森林自体は、津波そのものの破壊力しか持たない押し波には比較的強く、ガレキなどを含んだ引き波に脆いと考えられたため、堤防に近い側に3m程度の盛土を施し、地下水位を3m程度上げ、その場に砂質土壌、潮風に強い、例えばクロマツ等を植栽する。盛土斜面は、樹高2m程度までの低灌木、草本類で覆い、飛砂対策とする。ただし、幅広い林地帯をすべて盛土で地上げすることは困難である。また、内陸側は表層の砂が飛ばされ地盤が下がりやすいため、相

対的に地下水位が上がり、湿地化しやすい。そこで内陸側は湿地化することを前提に、湿性の生態系・植生を造成する。

今回の被災地である石巻・矢本海岸公園では、海岸林の後背地が湿地化し、当初植えられていたクロマツに代わって湿地性の広葉樹が広く自生するような状態であった。被災後、これらの広葉樹は、海水をかぶったことで、枯死してしまったが、樹木の多くは流出することなく、その場にとどまっていたことを考えると、林帯を通過した津波の威力を軽減するという効果は発揮できたものと考ええる。また、農地と保安林地帯の間には、「居久根」となる、スギや竹の防風林を築いて、海岸林樹木が内陸に侵入することを、また内陸の瓦礫が海岸林を破壊することを防ぐようにする。

1.1.B 十分な盛土が確保できない場合

広域にわたる盛土には大量の土砂が必要で、必要な土砂の確保ができない可能性は高い。しかし、地下水位が高いままの地盤で、クロマツなどが大きく成長すると、土壌緊縛力が十分でなく、液状化も伴い津波で樹木が流失する可能性が高まる。よって、盛土のない低地に大径化する樹木を高密度に配置することは、避けるべきであろう。クロマツなどを植林する場合でも、一本の重さが、例えば1トン(目安)以上の木が一定の割合以上に増えいないように、管理を行き届かせる必要がある。高田松原の「奇跡の松」のように、巨木で深い垂直根により、大津波での流出を免れるかもしれないが、「想定外」の津波を想定すれば、巨木による津波の威力を軽減するよりも、巨木の流木化による2次的な被害を防ぐことの方が重要と考える。

従って、幅が広い林地幅を確保できても盛土により地盤の強化が期待できない場合は、あえて大径化する樹木を植栽するよりも、低灌木や草で飛砂対策を行い、沿岸部を緑地化し、海岸側には「居久根」程度(5~10m幅程度)の防風林を設け、緑地内には、木陰を作る程度に植栽地帯を設ける(図4参照)。その植栽地帯(図中の緑▲印)はできれば、盛土を施し、根が深く発達するよう配慮する。内陸側は湿地化する傾向にあるので、湿地性の生態系に適した植生帯を造成する。さらに、海岸林からの流木、内陸からのガレキの行き来を阻止する目的で、湿地帯の内陸側に「居久根」を築く。

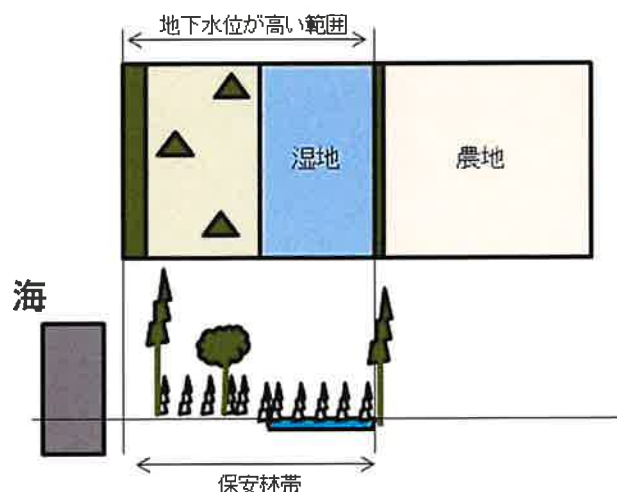


図4 林帯が広く盛土が不可能な場合の森林配置例

1.2 十分な幅の林帯が確保できない場合

すでに農地などで広く林帯幅を確保できない地区でも、地盤沈下、液状化の危険があるため、住居などの建設はすべきではない。

1.2.A 高さ 3m 程度の盛土が確保できる場合

防風、飛砂防止、防潮を目的に、盛土を造成し、その上海岸林を形成する。盛土は、根が深く発達するように 3m 程度は必要で、砂質土壌であればクロマツなどが適当で、十分な垂直根の発達が難しい斜面は、低灌木、草本類で被覆し飛砂および土壌の流出を防止する。また、海岸林からの流木、内陸からの瓦礫の行き来を阻止する目的で、農地などの内陸側の土地利用との境界には「居久根」を築く。森林の配置例を図 5 に示す。

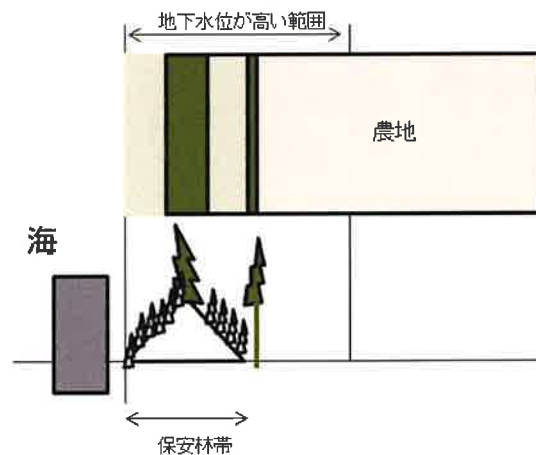


図 5 林帯が狭く盛土が可能な場合の森林配置例

1.2.B 十分な盛土が確保できない場合

海からの押し波と瓦礫を含んだ引き波の揺さぶりに加えて、液状化、地盤沈下によって、海岸林が流失するような危険性もある。流木による二次的な被害を防ぐためにも、大径化する樹木を高密度で植栽することは避けるべきと考える。図 6 のように、海岸側に防風林として「居久根」程度（5～10m 幅）の海岸林、および農地との境界に、海岸林からの流木、内陸からの瓦礫の行き来を阻止する目的で、「居久根」を築き、高木の密度は低く、低灌木、草本類で、防災緑地化する。

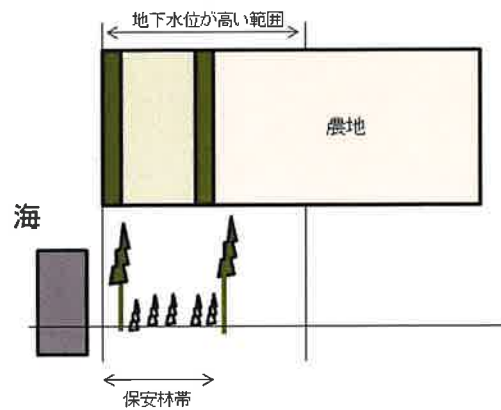


図 6 林帯が狭く盛土が不可能な場合の森林配置例

2. リアス海岸湾内低地部 (提言)

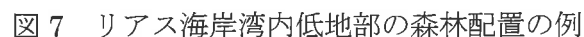
三陸地域における都市の多くは、リアス湾内低地に位置する。湾に侵入した津波は湾の奥に向い収束するため、津波浸水高は 10m を超えた個所も多い。また、河川の河口の三角州上に位置しているため、地盤沈下、液状化が各地で発生している。写真 5 は「高田の松原」跡地付近の様子で、1m 近い地盤沈下で以前の海岸林地は現在水面下にある。



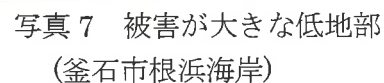
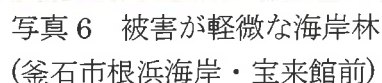
写真 5 高田松原海岸林跡地

こうした低地部は、ガレキが混じった津波の押し波、引き波で揺さぶられ、地盤沈下と液状化で地盤が緩んだ条件も加わり、海岸林が流失したと考えられる。さらに、流木により家屋な

図7は海岸林配置の一例である。地盤沈下、液状化が懸念される地点や今回の津波で浸水深が(例えば)5m以上あった地域には大径化する樹木の植栽は避ける。その地域から内陸側には、今回の津波浸水深に応じて盛土の高さを配慮して居久根型の保安林を複数の環状で形成し、ガレキ等が押し波・引き波で流動するのを防止する。



(事例紹介)



岩手県釜石市根浜海岸北端にある旅館「宝来館」前の海岸林はほとんど被害を受けずに残った(写真 6)。旅館は 3 階床付近まで浸水しており、約 5m の浸水深があったものと思われる。根浜海岸に沿って広がる低地部は壊滅的な被害を受けており、津波の威力も決して小さなものではない(写真 7)。ただし、「宝来館前」の海岸林は海岸から 5m 程度小高く盛り上がった場所であり、被害の大きな低地部よりも 3～5m 小高い場所になる。50cm 程度掘削したが、地下水が浸み出す気配は全くなかった。

旅館関係者から提供された津波襲来時の様子をテレビで見たところ、津波は海側正面から侵入せず、海岸林の両脇から押し寄せていたことが分かった。その後、旅館の 3 階付近までの浸水深となったが、旅館背後は切り立った崖になっており、強い引き波が海岸林を揺さぶるような状況は想像しにくい。押し波で徐々に浸水深が上がり、引き波やガレキの流れも強くなり、浸水の上下が繰り返されたものと考えられる。なお、旅館背後の崖斜面には避難用の階段が設置されており、地震直後に避難し、従業員、宿泊客とも無事であったそうである。

一方、岩手県大船渡市三陸町の越喜来湾南部に位置する海岸林では、背後が崖になっている部分は、被害が小さく、背後が平野で津波が抜けるような地点では海岸林が消失している(写真 8)。背後の地形に大きく影響を受けることがわかる。



写真 8 被害が分かれた海岸林
(大船渡市三陸町付近)

(提言)

リアス海岸半島沿岸部は、海岸線に対して、陸側の後背地が狭いため、内陸に侵入した津波の引き波の威力が小さく、押し波、引き波の揺さぶりも小さいと考えれる。従って、地盤による緊縛力が十分大きければ、高木であっても押し流されない可能性は大きい。海岸林があることで、ガレキ等が海に流されにくく、また海からガレキなどに襲われにくくなることを考えれば、盛土等により地盤を高くした場所に小規模でも海岸林を造成すれば、減災効果があると考ええる。ただし、海岸林背後の地形を十分に考慮する必要がある。図8に海岸林の配置例を示す。背後の山・崖の斜面には、避難路を準備すべきである。

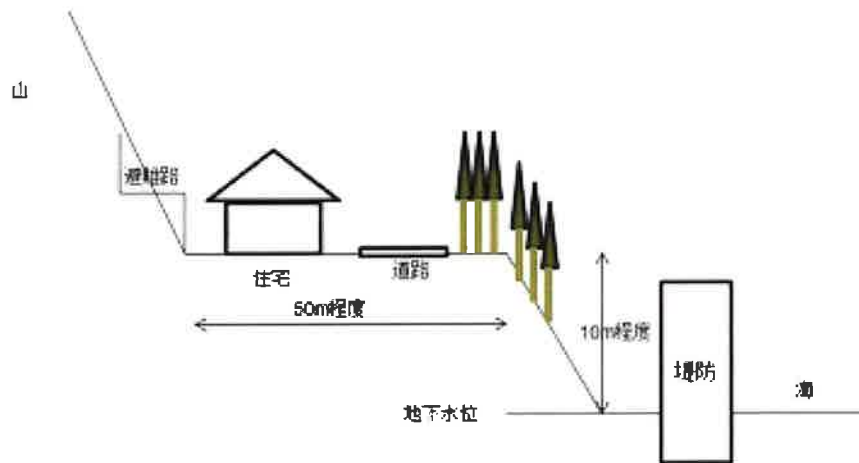


図8 リアス海岸半島沿岸部の森林配置例

4. 平野部内陸林

平野内陸部は「居久根」を積極的に導入し、防災、減災に役立てることを提案する。図9に平野部における森林(居久根)の配置例を示す。

「居久根」とは、住居を囲うようにスギなどを植えた屋敷林の東北地方での呼び名で、防風、防火に役立ってきた。また所有範囲を明らかにするために、田畑の境界上に植えたりもする。

津波による浸水深が1~2m程度の所では、居久根により住宅の損傷被害を免れた所も多い。

(事例紹介)

宮城県岩沼市庵原邸は居久根に守られた住宅として日本経済新聞にも取り上げられている(図9)。また写真10~12は現地調査において、庵原氏から提供を受けた津波被災時の様子を撮影した写真である。現在は津波の塩害で居久根(スギ)は立ち枯れ状態となっており、その処置の方法に苦慮されていた。

宮城県山元町の下野地地区の住宅地は周辺の住宅に比べて、被害が非常に小さいものであった(写真13, 14)。それは宅地南側の居久根によるものと考えられている。住宅地全体の地盤が若干高くなっているため浸水深が床上程度で済んだこともあるが、周辺の被害を受けた住宅では、ガレキの衝突でガラスや壁が破壊されていることを考えると、地区全体が居久根によってガレキなどの侵入から守られたと考えられる。



写真 9 居久根に関する新聞記事
(岩沼市庵原氏提供 日経新聞 2011 年 8 月 23 日)



写真 10 被災時の居久根の様子
(岩沼市庵原氏提供)



写真 11 被災時の住宅の様子(居久根内)
(岩沼市庵原氏提供)



写真 12 被災時の様子
(岩沼市庵原氏提供)



写真 13 被害を免れた下野地地区住宅



写真 14 居久根の外側の被災の様子
(2m 近く浸水した跡があった)

(提言)

内陸部における森林配置の一例を図9に示した。住居地域、農産業地域、道路部に分けて以下に説明する。

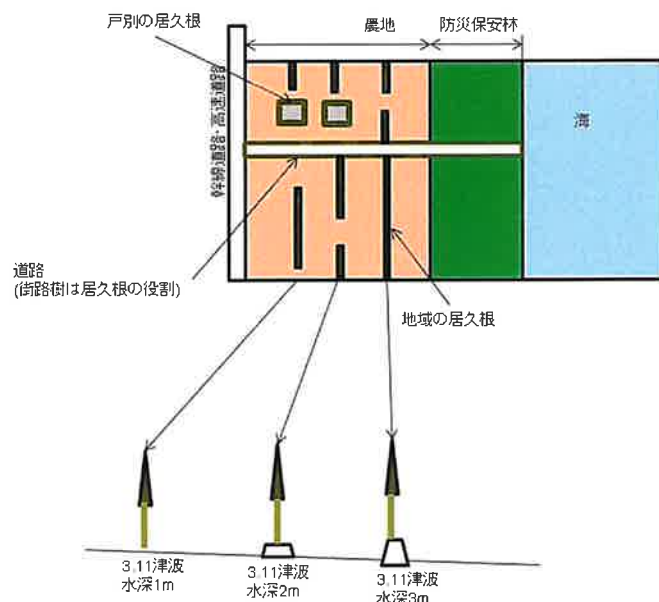


図9 内陸部の森林配置例

4. A 住居地域

平野部内陸で、床上浸水程度までの浸水被害の地区では、居久根により、瓦礫の侵入を阻止し、家財の流出を防ぐ効果が期待できる。

(例えば)2m以上の浸水が懸念される地区については、適当な高さまで地盤を盛土したうえで、居久根を築いて、瓦礫の侵入を阻止し、家財の流出を防ぐ効果が期待できる。

居久根は戸別で築くほか、団地単位でも効果が期待できる。

4. B 農産業地域

海岸から近く、被害が甚大な地域では、住宅地や工場からの瓦礫、自動車などが、津波の押し波、引き波と一緒に移動し、被害を増大させたと考えられる。

居久根が住宅への瓦礫の侵入と家財の流出を防ぐように、地域を居久根で囲むことで、ガレキの流動を防ぐ効果が期待できる。

なお、海岸に近く、津波の威力が強いことが懸念される地域では、盛土を施し、居久根樹木の土壌緊縛力を強めるよう配慮する。例えば、居久根を地盤高に合わせ等高線状に計画的に配置すれば、海岸に近づくほど、盛土の高さは高くなる。将来、災害発生時の避難の際、盛土の高さが避難の目安になることも期待できる。

4.C 道路

避難経路として、海岸線に垂直の方向で、避難路を整備し、同時に道路街路樹として居久根を利用することで、道路から自動車が出出してガレキ化することを防ぐ。

5. その他の課題

塩害、潮害被害木の診断、処置、処理について

津波被害を受けた地域では、津波で直接的な損傷(幹折れ、傾倒など)を受けた樹木の処理が進んでいる。一方、被災直後は直接的な損傷がなかった樹木が、この半年間の間に、塩害や地下水位の上昇による土地の湿地化などで、立ち枯れ状態となっているケースも多くみられる。

仙台平野・居久根の処理

居久根により大きな被害を免れたケースも多くみられるが、半年後の現在、立ち枯れ状態になっている樹木も多い。一部の市町村では、立ち枯れ状態で、伐採処理をすすめている。しかし所有者の中には、樹木医などの意見を聞き、来年の春の芽吹きまで処分を決めかねている人もいる。数十年をかけて育てた居久根を処分すれば、その再生には長い年月と費用も必要なことから、土壌改良などで立ち枯れ状態に見える樹木を治療する手段がないか、検討できないだろうか。

潮害林の処理

被災後2、3か月は被害の症状を出さなかった林地でも、半年後の現在、津波の浸水を受けた広い地域で、潮害により立ち枯れが目立っている。放置すれば倒木、火災の危険がある。

町づくりに向けた山林の利用

壊滅的な被害を受けた市区では居住地の高台への移転が検討されているが、移転候補地の多くは山林である。安易な土地利用の転換は慎重にならざるを得ないが、十分に検討すれば居住可能な土地も多く存在するだろう。山林の居住地への転換に関するアセスメント方法を検討し、山林地の利用、開発を推進すべきである。

第4節 提言（渡邊悦夫）

1. 市街地・農地等復旧計画における海岸林の配置のあり方

- ・東日本大震災復興構想会議による「復興への提言」が取りまとめられ、現在、各自治体において復興計画が策定されている。
- ・海岸林の具体的な配置は、復興計画のランドデザインによって決められるものであるが、どのようなランドデザインが描かれた場合においても、海岸林を配置することができるように、地域特性に適合した理想的な海岸林を類型化しておく。
- ・地域ごとの定められる整備水準（想定する津波の波高）も考慮して海岸林を配置する。
- ・海岸林を類型化するには、林野庁が例示している4つのパターンを参考とする。
- ・海岸林の多面的な機能に着目し、地域において期待されている機能を把握した上で、具体的な配置を決定する。例えば、保健休養機能に期待し、林内空間を確保すると、防災機能が低下するという相反が生じるため、注意する。
- ・後背地に対して有効であった石巻市長浜の例（林帯幅195.8m）、また無効であった気仙沼市大谷海岸の例（林帯幅15m）から判断し、林帯幅200m以上の海岸林を後背地の前面に配置する。
- ・防潮施設背面における洗掘防止の観点からは、施設の直近から海岸林を配置して洗掘時の津波エネルギーを減殺させる。

2. 津波被災跡地等における海岸林の造成、改良技術について

2-1 基本的考え方

被災した海岸林を再生させるには、従来の海岸林造成・改良技術を適用することを基本とする。一朝一夕には津波に強い新技術は開発できないし、長年をかけて先人たちにより生み出された手法を無視することはできない。

2-2 林分構造

汀線に直角方向の縦断的な林帯構造（樹高の変化等）について、樹冠を結んだ線がどのような状況のときに効果があるか検討する。（自然植生は放物線を描く。）

枝下高の差異による津波エネルギーの減勢効果、漂流物の捕捉効果の違いを把握する。枝下高が低く、枝葉が多量に着いていると効果が増加する反面、津波の流体力を受けやすく海岸林自体の被災する危険性が高まると考えられる。このことは、海岸林再生後の保育作業（枝打ち）と関連する。

2-3 地盤

海岸林の造成、改良を考える際には、林帯における樹林（樹種構成、立木密度等）だけではなく、地盤としての林地についても、盛土や排水工等の必要性や構造等について検討する。地盤に礫が混入する三陸型の被災地では、液状化等に伴う根返りが見られないため、盛土に礫を

混入することも検討の余地がある。

岩沼市寺島の例では、地盤高が1.5m程度となるように盛土する必要があると判断された。また、盛土が困難な場合は、ウワミズザクラ等の広葉樹は地盤高が比較的低くても生育が可能であったことから、導入種について検討する必要がある。

岩沼市寺島で地盤高1.5mの盛土を実施した場合の全盛土量を試算する。対象範囲は横断測線の範囲（延長388.9m）とし、盛土部分の林帯幅は東北森林管理局の縦断測線から約500mとした場合と、前線部の高地盤高部分を除いた約350mとした場合を算出する。

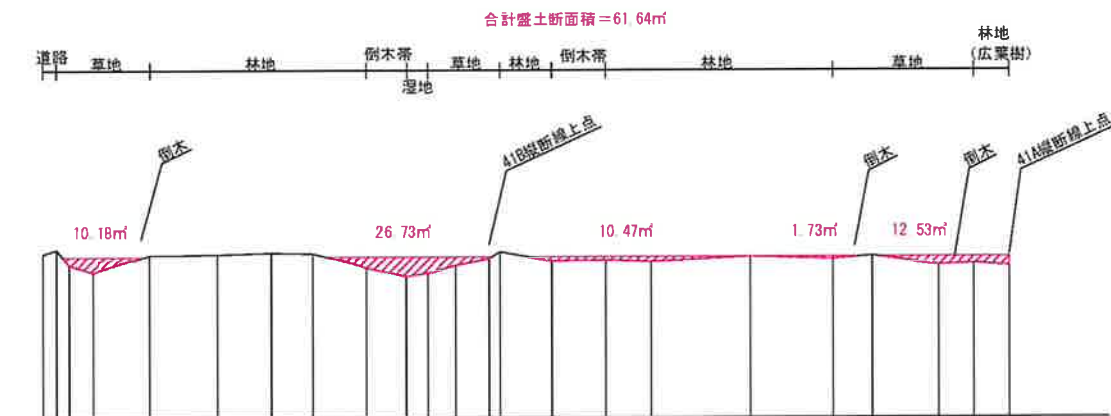


図 17 盛土量の試算（岩沼市寺島）

横断面上の盛土断面積は、図17 に示すように61.64 m²であることから盛土量は次のように算出される。

① 林帯幅500m範囲

$$61.64 \text{ m}^2 \times 500\text{m} = 30,820\text{m}^3$$

② 低地盤高350m範囲

$$61.64 \text{ m}^2 \times 350\text{m} = 21,574\text{m}^3$$

上記の値は横断延長388.9mの場合であるが、1 kmあたりの値を求めると次のとおりである。

① 林帯幅500m範囲

$$30,820\text{m}^3 \times 1,000 / 388.9 = 79,249\text{m}^3$$

② 低地盤高350m範囲

$$21,574\text{m}^3 \times 1,000 / 388.9 = 55,474\text{m}^3$$

2-4 構造物

海岸林を構造物（防潮堤、防潮護岸、人工砂丘等）と組み合わせることにより、津波の減勢効果が高まることが確認されたため、構造物との効果的な組み合わせが必要である。

① 防潮堤

越波により陸側の地盤が洗掘され、躯体の水裏法面も破壊されている例が多い（石巻市長浜、

東松島市矢本海岸)。ただし、仙台市若林区荒浜の例から判断すると、傾斜型防潮堤の場合においても、水裏法面の構成材料も水表と同じコンクリート製で堅牢なものとするのが有効である。

また、防潮堤の陸側に天端高まで盛土して海岸林を造成することも有効である。越波エネルギーを海岸林で緩衝し、防潮堤の破壊を未然に防止することが可能と考える。直立型防潮堤で、基礎地盤が砂で形成され液状化やパイピングを生じやすい場合は、基礎杭（支持杭、摩擦杭等）を設ける必要がある。

② 防潮護岸

気仙沼市大谷海岸では、緩傾斜型と直立型の防潮護岸を設置されていた。背後の海岸林の保全という観点から比較すると、緩傾斜型は津波が容易に遡上するため、波力の減殺機能は低い。しかし、津波の流体力をまともに受けないため被災しにくく、結果的に海岸林の育成基盤を維持できる。したがって、緩傾斜型の防潮護岸の方が直立型よりも海岸林の保全に有効であると言える。直立型を設置する場合には、波力に耐えられる強固な構造にする必要がある。

なお、緩傾斜型と直立型の関係は防潮堤においても同じである。

表 13 防潮施設と海岸林の関係

防潮施設	津波の遡上	流体力	減殺機能	安定性	海岸林の保全
緩傾斜型	易	小	小	大	海岸林に働く流体力は大きいですが、破壊しにくい構造であるため、林地の保全が図れる。
直立型	難	大	大	小	海岸林に働く流体力は小さいが、破壊しやすい構造であるため、林地の保全が図れない。

第5節 海岸林の造成管理について造林・生態的観点からの配慮すべき点 (藤森隆郎)

はじめに

私は今から30年ぐらい前の1960年前後に、何年間か海岸林のプロジェクト研究に加わったことがあるが、それ以後は海岸林については関係することはなく、勉強もしてきていない。しかし木材生産の人工林の冠雪害や風害に対して強い森づくりのために、また林業経営において最適の質量の木材を合理的に生産するために、「樹冠構造と幹の成長の関係」についての研究を続けてきた。海岸林においても、その機能の発揮のためには、適切な樹冠構造の管理が必要であり、そのための密度管理が必要である。

海岸林の管理において必要な、林分の「密度管理」の理論も、生産林におけるそれと同じように、「樹冠構造と幹の成長・形態の関係」から説明されなければならない。そこで「樹冠構造と幹の成長」と、それを制御するための「密度管理」について必要な情報と考え方を整理してみた。

1. 樹冠構造と幹の成長との関係

葉は光合成をおこなう生産器官であり、枝は葉が太陽光を受けやすいように効率的に空間配置する役割を果たしており、枝葉の部分である樹冠の状態は、その木の成長と健全性を支配するものである。ここでは木材生産のためのスギやヒノキなどで得られた知識に基づく話が中心になるが、クロマツの海岸林においても現象は同じことである。

密度管理の技術は、林分の個体にどの程度の樹冠を与えていくかの樹冠管理技術である。その技術を理解するためには、樹冠の構造と幹の成長の関係を理解しておく必要がある。それぞれの枝の葉で光合成により生産された物質は、まずその枝の成長とその枝の葉の増産に使われ、それ以外の生産物はその枝よりも下の幹の成長と、さらには根系の成長に使われていく(図1)。

この現象を捉えて、幹はそれぞれの葉着き枝のパイプが束ねられて形成されたものであると考えることができ、それをパイプモデルセオリーと呼んでいる。したがって図1のように樹冠の中にある幹の形は円錐形に似ているが、樹冠よりも下の幹の形は円柱に似た形になる。しかし樹冠より下は円柱形に近いといってもやはり下に行くほどわずかず太くなっているのは、既に枯れた枝のパイプが幹の中に残されているからである。なお、地際のところが太くなっているのは、地上部の重力が根系に伝わる場所で起きる物理的現象である。

幹は葉着き枝と根系の間にあるパイプの集積物であるといえる。林業はその幹の生産を目的とするのであるから、好ましい幹の形質とその幹の適正な生産の速度を求めて樹冠をコントロールしていくことが必要である。海岸林においては、どういう個体の構造と、その集団である林分構造が、その機能目的に照らして好ましいのかの理論的根拠を整えて、密度管理の在り方を検討していくことが重要である。

2. 立木密度と成長との関係

同一樹種の同齢林(一斉単純林)で、林分の立木密度(1haなど単位面積当たりの立木本数)が高くなるほど、下枝の枯れ上がりは進行し、樹高に対する樹冠長の比率、すなわち樹冠長率は低下していく。樹冠長と樹冠長率は図1に示したとおりである。

立木密度と成長および樹形の間には次のような関係がある。

- ① 密度が増すにしたがって、下枝の枯れ上がりは進行し、樹冠長率は低下する。
- ② 過密で極端に樹冠長率が低くなるまでは、樹高成長は密度が増しても変わらないが、直径成長は密度が増すに従って小さくなる。
- ③ その結果として密度が増すに従って、幹の直径に対する樹高の比率、すなわち形状比（図1）は高まる。すなわち、幹は細長くなる。
- ④ 極端に過密になり、樹冠長率が20%ぐらいまで低下してくると、樹高成長も低下する。
- ⑤ 樹冠の発達と根系の発達には密接な関係があり、密度が高まり樹冠の発達が悪くなれば根系の発達も悪くなる。

①については、樹冠長率が低下すると個体の成長は低下する。また、重心が高くなって風害や冠雪害を受けやすくなる。津波に対する耐性も同じであろう。⑤については、スギやヒノキなど直根性（深根性）でない樹種にとっては倒伏根返りが起きやすくなり、重要な問題であるが、直根性のクロマツではその危険性は少ないが、樹勢の衰退に連なるのでやはり問題である。

○ 樹冠長率を見ることの重要性

樹冠構造はその木の形質と機能（耐風性、耐津波性）を決めるものであるから、その木の樹冠の位置と樹冠量を知ることは極めて重要である。樹冠長率はそのことを外観的に非常にとらえやすいので、密度管理は樹冠長率と関係づけて議論されることが望ましい。木材生産においてもそうであるが、海岸林においても樹冠構造と幹の成長・構造の関係を押さえ、機能目的に照らしてそれを評価することは本質的に重要なことである。そのために必要な因子として樹冠長率は重要である。

○ 樹冠長率と収量比数との関係

林分の樹高階に応じた密度と林分材積および胸高直径の関係などを示した図を「林分密度管理図」と呼んでいる（図2）。密度管理図には相対的な混み方を示すものとして、最多密度線に平行に混み方の度合いを示す収量比数が描かれている。収量比数1は最多密度に相当し、収量比数0.5はそれ以下になると長期にわたって林冠の再閉鎖が期待できない疎な状態に相当する。木材生産の施業においては、収量比数が0.8から0.7の間ぐらいで管理するのが好ましいとされてきたが、長伐期大径材生産への移行や気象災害への耐性の向上を考えて、最近は0.75から0.65ぐらいの間が好ましいという考えに変わりつつある。

図3はスギ人工林の収量比数と樹冠長率の関係を示したものである。木材生産林の施業においては、樹冠長率を50%ぐらいにコントロールするのが理想と考えられている。したがって樹冠長率を40%から60%の間で制御しようと思えば、収量比数を0.6から0.75ぐらいの間を保てるように間伐を進めていけばよいということになる。これは従来考えられていた好ましい収量比数の範囲は0.8から0.7の間ぐらいというものより、疎な密度管理ということになる。

海岸林の管理においても同じように密度管理を考える必要がある。同じような考えというのは、海岸林の構造として、どのぐらいの樹冠長率を望ましいとするかを決めて、それが実現できる密度管理を進めていくということである。

○ 望ましい樹冠長率を定めてそのための密度管理を行う

さて、海岸林の機能発揮のために好ましい樹冠長率はどれぐらいであろうか。その機能目的からして、海岸林における樹冠長率は木材生産のための樹冠長率において望ましいとされているものよりも小さいということは考えにくい。むしろさらに大き目が好ましいかもしれない。クロマツは深根性の樹種であり、スギやヒノキに比べて根返りの心配はないのでその点は樹冠長率が小さくても問題はない。しかし樹冠長率が小さいと形状比が高くなり、重心も高くなるので、幹折れが生じやすい。樹冠長率が小さすぎると厳しい環境条件の中で樹勢が低下しやすい。樹冠長率が小さくなり、重心が高くなることは、風による振幅が大きくなり、幹の組織が傷められ、また根にも損傷が起きやすく樹勢の衰退に連なる。したがって海岸林の樹冠長率は生産林のそれと同じレベルか、あるいはそれよりも大きめではないかと考えられる。ただしこれはあくまでも私個人における裏付けの乏しい中での推測である。しかし瞥見するところでは、学会や現場などにおいても海岸林に関するこのところの裏付け資料は乏しいようである。

したがって、このところの科学的根拠を早く押さえることが必要である。海岸林の機能として、個体安定性と集団安定性の両方から好ましい樹冠長率を求めることが必要である。そして海岸林の機能として、林内の風通しをどのぐらいにするのが好ましいのかなどの要素も加えて総合的に判断することが必要である。そのようにして定められた好ましい樹冠長率を維持するために、どのような密度管理をしていくかという考えが重要である。

○ 目標林型を定めて密度管理を行う

森林管理は、機能目的に応じた目標林型があつてこそ、合理的な管理が考えられ、その評価が行えるものである。目標林型には様々な要素があるが、樹冠長率は重要な要素である。それは海岸林の機能に直接関係するからである。目標林型があつて、それに向けての密度管理・間伐とその選木がある。樹冠長率と密度管理はセットとして密接な関係にある。間伐は途中段階の目標林型を達成するための手段である。

○ 林分の位置によって望ましい樹冠長率は変わる

海岸林は、海岸の最前線とその内側では環境条件が異なり、樹高成長も異なるために、林分の位置に応じて望ましい樹冠長率や密度管理も異なる。最前線では下枝の枯れ上がりができるだけ起きないように、かつ林分が適度に閉鎖された状態を保つことが好ましい。最前線から内側に入るにつれて、林内を適度に風が通ることが海岸林の機能として必要であり、それに適した樹冠長率（枝下高率）を維持するための密度管理を検討していくことが重要である。

○ クロマツと海岸林の特色

スギや多くの広葉樹は、下枝が枯れあがっても、その後生育空間が与えられると後生枝（休眠芽、潜伏芽、不定芽由来の、後から幹の表面に出てくる枝）が発生するが、クロマツにはそれはない。海岸林は風のストレスが強くて、樹高成長速度は一般に低い。スギやヒノキの人工林では、下枝が枯れあがっても間伐してやれば下枝の枯れ上がりは止まり、樹高成長に応じて樹冠長率は増えるが、海岸林で下枝が枯れ上がりすぎると間伐をしても樹冠長率の回復は望めず、海岸林の管理においてはこのところの注意が非常に重要である。すなわち、間伐の手遅れは絶対に避けなければならないということである。

○ マニュアル通りではなく、常に観察により考える

生産林においてもそうであるが、マニュアルにある数字通りに管理を進めていけばよいというものではない。マニュアルはあくまでおよその目安である。微地形などによって生育条件も異なるし、常によく観察して実態に応じた判断のもとに管理を進めていくことが大事である。

【参考文献】

藤森隆郎. 2003. 新たな森林管理—持続可能な社会に向けて. 全国林業改良普及協会. 428pp.

藤森隆郎. 2006. 森林生態学—持続可能な管理の基礎. 全国林業改良普及協会. 280pp.

藤森隆郎. 2010. 間伐と目標林型を考える. 全国林業改良普及協会. 191pp.

藤森隆郎・石塚森吉・田内裕之・千葉幸弘. 目標林型と育林技術. 提案型集約化施業テキスト. 全国森林組合連合会. 7-50.

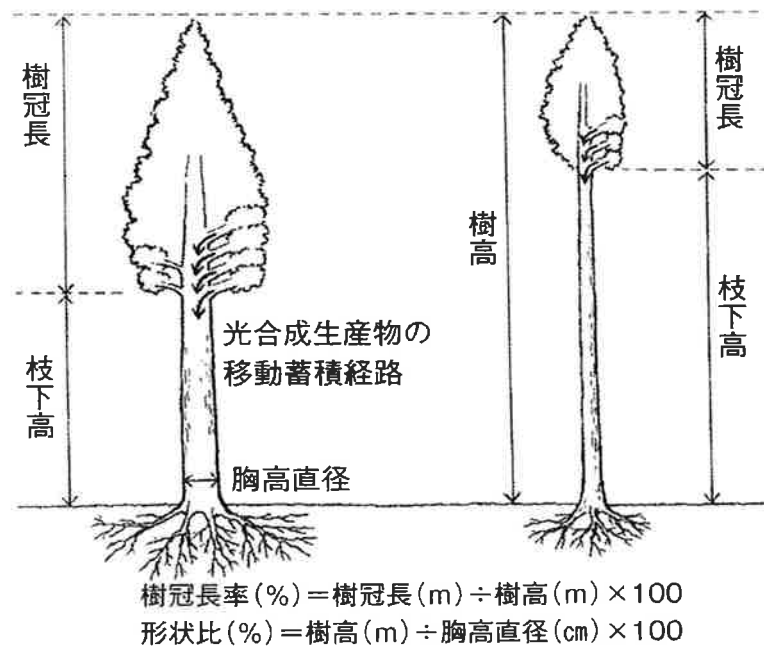


図1 葉の分布と幹の成長

左と右の木は同じ樹齢だが、左は疎な状態で、右は密な状態で育ったものである。それぞれの枝の葉で生産された物質は、その枝とその枝より下に運ばれて蓄積していく。疎な状態で育った木は樹冠が発達していて幹の肥大成長はよい。密な状態で育った木は、下枝の枯れ上がりが進んで樹冠量（葉量）が少なく、幹の肥大成長は悪い。極端に密な状態でないと、樹高成長は疎密度に関係なく同じなので、密なほど（樹冠量が少ないほど）幹は細くなる。

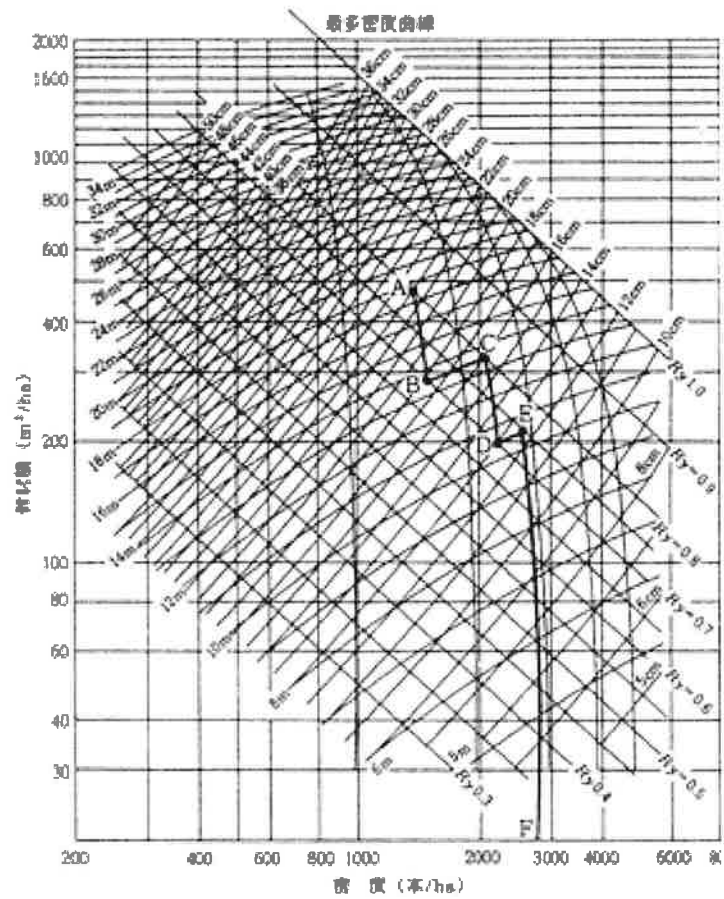


図2 林分密度管理図の例（安藤、1994）
これは四国地方の国有林のスギ人工林の例である。

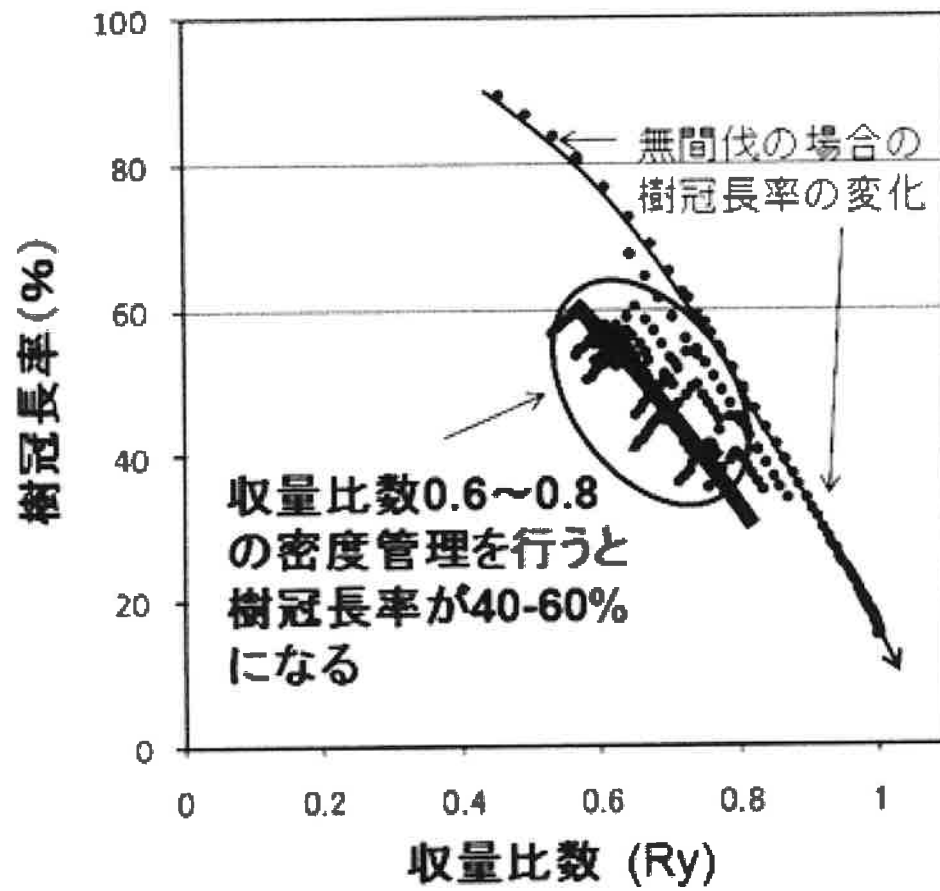


図3 スギ人工林における樹冠長率と収量比数の関係

第6節 海岸防災林の再生に向けて（太田猛彦）

1. 被災地復興計画と海岸林再生事業の関係

東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会（以下、検討会という）は、今後における海岸防災林の再生について・中間報告（以下、中間報告という）において、海岸防災林再生事業を地域にとってより有効なものとするためには、海岸防災林再生計画と地域の被災地復興計画すなわちランドデザインとの整合を図る必要があると報告している（1）。筆者は本委員会の委員とともに検討会の委員も務めている。そこで、本項の課題について、検討会での検討内容も一部ふまえて、海岸防災林関係者が考慮すべき事項を、おもに仙台平野での海岸防災林再生事業を念頭において思いつくままに述べる。

①海岸林の機能は多々あることが知られているが、最も重要な機能は今回確かめられた津波に対する減災効果も含めて防潮、防風、防砂などの災害防止機能である。このことを海岸地域の人々にもう一度周知徹底することがまず必要である。それは今回の巨大津波により海岸林を失った人々の声からも明らかである。

②関連して、津波、高潮、強風害、塩害のみでなく、軟弱地盤、液状化現象、塩水浸水害、さらには河川近傍や後背湿地での津波の朔上や豪雨時の洪水氾濫など、海岸の地形が持つ本質的危険性を周知することも重要である。本来日本人はこれらの危険を避けて暮らしていたが、最初は港湾の開発、近代以降は経済的理由などから次第に海岸地域の開発が進み、そこに都市を発達させてきた。しかし、本質的に自然災害を受けやすい地域であることを思い起こす必要がある（2）。

③海岸林の成立過程を広く広報することも必要である。最近の海岸林は地域にある馴染みの森林そのものとしての価値が認められてきてその保護活動も盛んになっているが、逆に防災機能、とくにその成立過程については知る人が少なくなっている。海岸林はおもに飛砂防止を目的として江戸時代に以降に造成された人工林であるが、飛砂害が激しかった歴史的事実、人工砂丘を形成し植林した経緯、主としてクロマツが植えられている理由等を広く広報して海岸防災林の本来的機能を知ってもらうよう努力する必要がある（2）。

④現在の海岸林は防災機能に加えて、優れた景観、憩いと保養・レクリエーション・観光の場、さらにはセラピーや環境教育の場、森と人とのつながり・人と人とのつながりを築く場、飛砂害防止と闘った先人の労苦を偲ぶ文化的価値などの多面的機能を持つが、砂浜海岸でとくに重要なのは生物多様性あるいは生態系の保全機能である。海浜生物の生物多様性保全には十分な砂浜と背後の幅広い海岸林を含む海浜植生の連続的な存在が必要である。言い換えれば、自然と人間の豊かなつながりがまだ存在する東北地方の特性を活かし、自然の海岸をそのまま残す場所（森と川と海とのつながり、内陸と海の生物的つながりを維持する場所）を出来る限り多く遺す必要がある。

⑤以上を考慮すると、海岸地域は防災林を中心とした災害緩衝機能を持つ土地利用、あるいは海岸の自然にふさわしい土地利用（自然公園やメモリアル公園、通常の公園や緑地、運動場他のスポーツ施設などで避難場所整備を伴う利用）、さらには農業的土地利用等を優先した地域復興計画が策定されるよう海岸防災林関係者は努力すべきである。具体的には、広い林帯幅を

持つ強固な海岸林と背後（後背湿地）の農業的土地利用、海岸防災林と公園・緑地利用の一体化、後背湿地の池沼型利用などを提案すべきである。

⑥津波や高潮対策においても、とくに④を考慮すると、防潮堤の築造さえも慎重であるべきである。現在、例えば仙台平野ではいわゆるレベル1の防災計画として海岸堤防の高さを7.2mに設定する案が提示されている。しかし、仙台平野の全ての海岸に連続した7.2mの防潮堤が築造される絵は想像したくない。自然海岸保全地区の設定とともに防潮堤に替わり得る人工盛土を土台とした多機能海岸防災林を計画に加えるよう働きかけるべきである。

⑦大型の多機能海岸防災林（孤塁型）を津波に安全な高台として整備し、避難場所、普段の作業基地、場合によっては必要な恒久施設の建設場所として活かすことが考えられる。

⑧海岸防災林再生事業の実施にあたっては上記のような俯瞰的観点に立って、海岸地域で実施される他の事業（防潮堤建設や公園整備、農地整備など）と協調し、地域の人々と協働し、地域の人々の参加を得て事業を実施するべきであろう。

⑨最後に、多機能海岸防災林を含む海岸防災林再生計画と地域のランドデザインの整合を図るためばかりでなく、再生事業の実施に必要な土地を確保し、土地所有者の同意を得、地域からの要望をうながし、さらに⑧を確実にするためにも、以上のような内容を広報することが不可欠であることを繰り返し強調したい。

2. 海岸防災林再生事業の実施にあたって

海岸防災林再生事業の実施にあたって、その要点を個人的にまとめてみた。参考にしていただければ幸いである。

2-1 海岸林の被災状況

- ・ 東北地方太平洋沖地震に伴って発生した津波は生物である樹木（おもにクロマツ）の防災機能を超える巨大なものであり多くの海岸林が被災した。典型的な津波被災形態としては若齢林の倒伏、壮齢林及び老齢林の幹折れ、壮齢林の根返りなどであり、幹折れ及び根返りしたものの大部分は流失した。被災原因にはこのほか漂流した船舶や流失した防波堤材料による被災、引き波や段丘崖からの反射波による被災がある。地震発生時の地盤沈下や液状化現象が被害を大きくした可能性も指摘されている。
- ・ 一部残存林地での被災状況の観察により枝下高が高い場合、汀線に近いところで樹高が低い場合に生き残る例が見られたことから、海岸林の位置別密度管理や枝下高管理などの重要性が指摘できる。
- ・ 問題なのは壮齢林の根返りで、そのような樹木は地盤高が低く、したがって地下水位が高いところに多かった。そのような場所はクロマツの健全な生育には適さないところのようである。（以上（1）その他、筆者の観察より）

2-2 海岸林の津波減災効果

- ・ 海岸林の津波減災効果としては津波エネルギー（流速・流体力）の減衰、津波の内陸への到達時間の遅延、漂流物の捕捉が挙げられるほか、マツの木に掴まって助かったなどの例も見られる。

- ・ 津波減災効果は地盤高との共同効果が大きい。また防潮堤との共同効果も見られる。
- ・ 林帯幅が広ければ、効果の積み上げにより内陸での減災機能が高まる。
- ・ 海岸防災林の効果は数値シミュレーションによっても裏付けられた。(以上(1) その他、筆者の観察より)
- ・ 結論として、海岸林の津波減災効果を、従来の飛砂防止、高潮防止、塩害防止、防風、防霧等の防災機能に加え明確な形で認めた(1)。観察(文献を含む)やシミュレーションの結果から、津波減災効果はおおむね浸水深(地盤面からの津波高さ) 6 m以下で何らかの効果が見られ、同3 m以下で大きい。
- ・ また、津波対策の面からはいわゆる多重防御の一環として海岸防災林が認定された(東日本大震災からの復興の基本方針、2011年8月11日)。
- ・ 海岸防災林はその防災機能面からも、その他の多面的機能面からも早急な再生・強化が必要である(1)。

2-3 海岸防災林の再生に向けて

海岸防災林の再生にあたっては、ランドデザインとの整合を図るようにすべきである、地域の実情を考慮すべきである、防災機能以外の多面的機能、とくに生態系の保全にも配慮すべきである等の基本方針の下で、以下のような点が指摘されている。

①より広い林帯幅を確保することが、飛砂や風害の防備等の災害防止の観点に加え、津波減災効果を直接的に高度に発揮させる観点からも有効である。

②根系の健全な発達をうながし、飛砂や風害の防備に必要な樹高を確保するとともに津波に対して根返りしにくい林帯を造成するため、植栽木の健全な生育に必要な生育基盤を確保する。具体的には地下水の高い場所では必要な盛土を行う。

③おもに津波エネルギーを減衰させ、健全な林帯を確保して背後の居住地等を保全する目的で人工盛土を造成しその上に樹木を植栽する多機能海岸防災林を造成する。

④従来の防災機能に加え、林帯による津波エネルギーの減衰効果、到達時間遅延効果、漂流物捕捉効果を高度に発揮させるため、成林時の望ましい目標林型を設定し、枝下高や密度を森林の成長に応じて維持管理していくこと、またそこに導くための適正な植栽樹種や植栽本数を確定することなどの検討が必要である。(以上、(1))

以下、筆者の感想を述べる

- ・ 海岸防災林の再生はまずクロマツを主体に考えるべきである。マツノザイセンチュウ対策や生物多様性の保全の観点から郷土の抵抗性クロマツを中心とした苗木供給体制を整備する必要がある。「この際、広葉樹を」との意見もあるが、筆者は安易な広葉樹の導入を避けるべきと考える(2)。上記検討会報告もその立場に立っているようである。
- ・ ①の林帯幅は、万一樹木が流失した場合にこれを捕捉し、背後への流木災害の波及を防止するためにも出来る限り広く取る必要がある。具体的な幅は地域の実情に応じて各種報告や今後提案されるであろう数値を参照する。
- ・ ②の健全な生育基盤の確保については、成長したクロマツが十分長い垂直根を持つことが重要で、そのためにはクロマツの根が地下水面に到達しない深さを必要とする。とくに後背湿地では地下水面が高い地域があり、この地域にクロマツを再生するためには必須の条

件となる。こちらにも具体的な数値は今後提案されるであろう。

- ・ ③についてはⅠ.でも述べたが、防潮堤の機能を兼ね、なおかつ生物多様性の保全、生態系の保全にとって極めて有利な方法としてその造成を積極的に推進していくべきと考える。生物多様性ホットスポットの一つに数えられている日本の、さらに遠野に代表される自然と人々の共存の伝統を持つ東北地方の海岸は出来る限り自然のまま、あるいはその機能を担保した海岸として後世に伝えるべきである(3)。その方法として防潮堤の機能を備えた人工砂丘状の海岸防災林の造成は困難が多くとも追求するに値する。さらに可能であれば出来る限り高いもの、幅の広いもので海と陸との連続性を保つものが望ましい。人工砂丘の造成にあたってはコンクリートくず、津波堆積物、木くず等の適切な利用を促進する(検討会検討事項)。池沼造成による掘削土砂の利用も考えられる。
- ・ ④については過去の経験を掘り起こし、新しい研究成果を取り入れた方法を見出して行く努力が必要である。林帯幅や生育基盤高度のほか、汀線からの距離や導入樹種によっても植栽方法や維持管理方法が異なるであろう。関係者の努力に期待したい。また、苗木の育成・調達、植栽体制の整備も早急に開始すべきである。
- ・ 海岸防災林の成林までには相当の期間を必要とする。それまでの代替防災処置の検討も必要である。
- ・ 筆者は既存の海岸林が造成され維持されてきたかつての海岸の環境条件と現在の海岸の環境条件は飛砂害の減少に見られるようにまったく異なり、それはクロマツの生育にとって好ましくないものとなっている点を強調している(2)。言い換えれば、広葉樹の生育、したがってその導入が容易な新しい海岸環境に変化しているのである。したがって、海岸林帯の内陸側を中心に各地で広葉樹の導入が試みられるであろうが、このたびの津波被害は安易な導入に警告を発しているようにも思われる。慎重な樹種選択を希望する。
- ・ 防潮堤や護岸工は海岸防災林の保全にとっても有効であり、地域の要望もあって建設促進の圧力が強まるであろう。災害の防止は人々の最も願うところだからである。しかし、とくに防潮堤は一方で海と陸との連続性を遮断するという点で海浜生態系に対するダメージはとてつもなく大きい。防潮堤や護岸工の高さや延長を最小限に抑える努力が必要である。
- ・ 飛砂害減少の根本原因は河川から沿海に流出する砂の量が減少したことによるが、その影響は全国の海岸での海岸侵食の増加となって現れている。したがって、長期的には海岸侵食が直接海岸防災林に及ぶ可能性がある(2)。この場合の対策も防潮堤よりも離岸堤や消波工(消波ブロック等)、自然養浜など出来る限り海と陸との連続性を遮断しない方法を追求すべきである。

参考文献他

- (1) 東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会：今後における海岸防災林の再生について・中間報告
- (2) 太田猛彦：海岸林再生のバックグラウンド、グリーンエージ 2011 年 12 月号、4 - 8
- (3) 太田猛彦ホームページ：最近の話題、海岸林再生メモ（復興計画作成に当たっての森林からのアピール）

第4章 ボラティア活動のためのやさしい海岸林植栽の手引き

はじめに

はじめて海岸で苗木を植栽する人々のための手引き書です。苗木を植栽する作業にしばってやさしく説明します。

細かい点では、他の指導書と異なっている点があるかもしれません。現場の環境条件も様々なので基本的には各現場の指示に従ってください。

海岸砂丘で苗木を植栽する場合、砂地なので柔らかく掘りやすいので植えつけはあまり難しくはありません。しかし、津波災害後の海岸地域では人工的に盛土をすることが検討されています。人工盛土はそのままの状態では固く締めつけられている恐れがあります。もちろん、植栽前に耕運により柔らかい状態にしてから植栽にはいるとは思いますが。

なお、章を改め、海岸林と津波の知識として一般的な知識を最後に記載しました。苗木植栽に直接関係することではありませんが、海岸防災林を理解する上で参考にして下さい。



「曾根原家名士十四名松植付之図寫」の一部

(藩政時代の砂防植栽の様子)

1. 海岸林植栽の手引

1-1 苗木の植栽作業の準備

(1) ふさわしい服装と必要最低限の持ち物のチェック（自分でそろえましょう）。

ヘルメット（作業の必需品です）、季節に合わせた長袖、長ズボン、軍手（作業用手袋—うるし等のかぶれに弱い人はゴム軍手・皮手袋を用意）、移植コテ（小）、手ぬぐい（汗ふき、手洗い）、長靴・作業靴、ザック（リュック・デイバック・バックバック・ナップザック）、水筒（ペットボトル）、雨具、救急セット（とげぬき、消毒薬、消毒絆創膏（カットバン・バンドエイド・リバテープ）、虫よけスプレー等）

(2) 作業に使用する道具（ほぼ主催者側が用意する）

スコップ、とうぐわ（唐鍬）、（ノコギリ、カマ、刈り払い機、チェーンソー）。スコップ、唐鍬は、苗木の植え穴を掘るためや土の埋め戻しに使用します。

1-2 苗木の取り扱い

苗木の根は乾かさないようにしましょう。苗木は専用の苗木袋に入れて移動します。飼料の空袋やビニール袋は苗木の水分が減少したり、ムレたりするのでなるべく避けましょう。苗木は昼休み前、休息前に植栽する分を持って運び、残りは木陰や日の当たらない小屋の中など、風や陽のあたらないところに置いておきます。

1-3 植え方

当たり前ですが植えつけはていねいにしましょう。津波に対し強い海岸防災林造りを目標として、健全な海岸林を育てなければなりません。そのため山地で行っている「ていねい植え」の方法に準じて手順を簡単に説明します。

苗木はまっすぐに植えます。植え穴に埋め戻す土は落ち葉や草の根をできるだけ混ぜないようにします。植えつけは曇天または降雨直前が良い結果が期待できます。

(1) 作業開始

作業は2人1組で行うのが効率的で、また楽しいものです。一人が唐鍬をもう一人がスコップを担当します。唐鍬は上から振り下ろしますので、2人とも周囲にも気をつけながら行ってください。

(2) 植え穴地点の整備

表面に落葉がある場合は植えつけ地点を中心に80～100cm四方くらい地被物を取り除き片側にかき寄せます。草と根もあれば、一緒に寄せておきます。

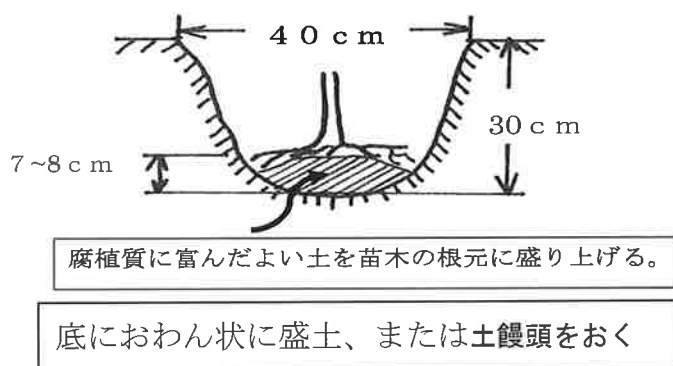
(3) 植え穴掘り

植え穴の大きさは苗木の大きさ、土壌の性質によりますが、一般に植え穴地点の中央部に40cm四方、深さ、25～30cmくらいの植え穴を掘ります。とうぐわの歯の幅が約10cmで、スコップの先から広い部分の高さが約30cmなので目安にします。

(4) 土の掘りだし

とうぐわやスコップで土を掘りだします。掘りだした土は落葉、草の根と混じらないように積んでおきます。

ていねい植えの植え穴の1例



(5) 苗木の植栽

水分を保持するため埋わら（藁）を穴底に敷く場合もあります。埋めわらは植栽木の水分を保持・供給するために用います。植栽木の根系がわらに直接触れないように、植え穴の底に置いた藁を砂で被覆し、その上に植栽します。埋め藁の量は植栽木1本あたり 400 g を標準とします。

底に土をお碗状に盛ります。盛った土に一番太い根（直根）を少し差し込み、そのまわりにひげ（髭）根をていねいに四方に広げてから土をかぶせます。土を盛り上げる代わりに、掘った穴に高さ10～15cm位の土饅頭を作って、底に置く方法もあります。土饅頭の上に根を広げた状態で苗木を載せます。幹から真下に直根がある場合は、土饅頭に突き刺すようにします。

「ポット苗」の場合は、ポットをはずし、苗木の根をほぐしてさばいてください。根鉢の下側から親指を入れて四方に広げます。固い場合ははさみで根を切って十分に広げてください。そのようにした後、土を盛り上げるか、土饅頭の上に乗せて植えます。このようにすれば幹の真下に生じやすい空間がなくなります。

海岸砂地は養分が乏しいので、苗木植栽の際に必要なに応じて施肥、客土（土壌改良のため、他から性質の異なる土を運んで混入すること）を行うことも行われます。人工地盤の場合は、その土壌の養分を調査のうえ、適当な成分、量を選択する必要があります。

（6）土の埋め戻し

植栽する際に土を埋め戻す場合、地表面の有機物とA0層をきれいに取り除いて、その下の菌類の少ないA層、B層の土で植えるようにします。苗木がきちんと根付くように、苗木を持って周囲の土を踏み固めます。しっかり踏み固めないと根と土の間に空間ができ、乾燥したり苗木が強い風で揺れたり倒れたりして根付かない危険性があります。また、苗木は深く植えないようにし、土の埋め戻しは、幹と根の境目位を目安にします。ポット苗であれば埋め戻しの土は根鉢の上面くらいにします。落ち葉や草の根が混じらないように気をつけます。土(砂)をかぶせて芯を天にまっすぐ向けて足で踏みます。かるく引張っても抜けない程度に踏みます。苗木を軽く持って少し揺さぶりながら、根の間に入れるようにしてかけます。土が粘土質で固まっている場合は、細かく砕いてから入れます。少していねいに踏み固めるには七分程度穴が埋まったら、苗木を持って1度軽く両足で踏みつけます。さらにその上に、かき上げた土を盛り、よく踏みつけます。

（7）植え終わった後

植え終わったら、地表面を枝条や葉で地表を覆います。砂丘地では砂の移動を防ぐこと、水分の蒸発を防ぐこと、地温の上昇・低下を防ぐため、藁で覆います。

現場技術者の指示があると思いますが、敷く量は植栽木の周囲に300 g /本程度です。植栽地全面に施す場合は、6,000～10,000kg/ha（ヘクタール）を基準とします。

(8) 植栽時期

植栽時期は、春植えと秋植えの2回ありますが、海岸砂丘植栽では季節風の強い、寒い時期を避ける意味があり、春植えが一般的です。

(9) よくない植栽の事例

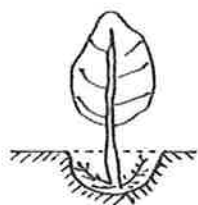
海岸防災林植栽の場合、経済林、生産林としての森林造りではないので、これまで「ていねい植え」の考え方で植栽されてこなかったと考えられます。海岸砂丘植栽が成功しない原因としては強い海風による苗木の揺れ、飛砂害や潮風害、乾燥害、高温等があります。しかし、不適切な植え方が原因で、不成績になることもあります。下図は3つのよくない事例を載せました。

1番目は、植え穴が小さすぎて根がループ状に上にあがっています。根に対して十分な穴の大きさを用意し、根を伸ばして植えなければなりません。

2番目は土を埋めもどす時に、落葉や草の根が混入したため、苗木の根と土が十分になじまない状態になり、乾燥しやすくなります。

3番目は斜めに植わっています。両足で踏みつける際に苗木をつかんで、持ち上げるようにするとまっすぐに植わります。

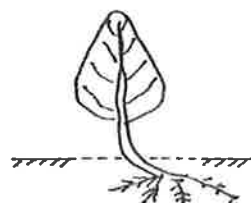
よくない植えつけのかたち



穴が小さすぎて、根が上方に曲がったり、巻いている。



植栽根の上に落葉やシダ、カヤ等の根で埋めている。



斜めに植えている（苗木の先を持ち上げるようにして踏みつけるとよい）。

(徳島県林業総合技術センターの原図を修正し引用)



2. 海岸林、森林に関する知識

(1) 海岸防災林の目的

ほとんどの海岸林は、海側からの飛砂害、潮風害から農作物を守るために植栽されました。16世紀ごろから植栽が始まり、砂丘地に植栽が広く成功したのは戦後になってからといわれています。強い台風時に農作物を保護し収量に貢献したことが数値としても証明されています。

海岸林は海岸堤防と違って、ある高さまで津波を完全に止めるというものではありません。海岸林は津波を防ぐというより、津波を海岸林内に浸入させ、接触することによって、津波の勢いを減少させます。勢いを減少させると同時に海岸林自身も津波により、樹木の倒伏、折損等の被害を受けます。つまり海岸林は自ら犠牲になりながら津波の力を弱め、被害を軽減しています。

(2) 海岸林の津波に対する減災効果

上に述べたように海岸林は本来、飛砂防止や海風（潮風）を防ぐことを主目的に造成されましたので、高潮や津波災害を軽減する効果は副次的なものですが、これまでの調査では高潮・津波に対する減災効果が証明されています。これまでは津波浸水深が4m高以下の発生頻度が数十年から百数十年規模程度の津波では、漂流物を阻止することや津波エネルギーや速度を抑える効果が確実にあることが報告されています。今回の3.11東北大地震津波では、海岸林の樹木が倒れたり、流木化したこともあり津波に対する減災効果を疑問視する声もありました。しかし、多くの調査が行われ、海岸林が津波災害を軽減することが明らかになりました。

(3) 海岸林の津波減災効果の程度

マツの仲間（アカマツ、クロマツ）は本来中心の太い根が地中深くまで伸ばす深根性の樹木です。生育適地である山地尾根部や乾燥地ではこの性質が発揮されます。しかし、今回の大地震津波ではクロマツの津波による流木化が海岸林の一部で見られました。海岸砂丘の過湿地帯で、地下水の影響で根が浅いため津波の力に根系の抵抗力が及ばなかったと推測されています。さらに土地の液状化、地盤沈下も影響したと考えられます。

(4) クロマツと広葉樹林の津波に対する抵抗力

よく、クロマツが津波で流木化した現状をみて、クロマツにかわって広葉樹を植えてはどうかという議論があります。海岸砂丘地帯の立地環境ではクロマツの適応力が圧倒的に大きいことは長い歴史の中で証明されています。これまでも広葉樹の適応力は調査されてきましたがクロマツには、はるかに及びませんでした。しかし、クロマツが成立し、立地環境が改善された内陸側の場所やクロマツ海岸林に保護されている風下側では広葉樹も生育できます。適応可能な環境の場所に、海岸環境に強い広葉樹を導入することは可能です。ただし、広葉樹の生長はクロマツよりかなり遅いと考えられます。

海岸砂地では同じような場所に広葉樹が少ないので、これまで津波に対する抵抗力を比較した調査例はありませんでした。今年（2011）、海岸砂地で行ったクロマツと広葉樹（カシワ、サクラ類およびコナラ）の引き倒し（倒伏耐力）試験では、両者にほとんど差がないことが報告されています。海岸の様々な環境でもう少し調査事例を増やす必要がありますが、海岸砂地ではクロマツ林と広葉樹の津波に対する抵抗力は幹の直径が同じであればほぼ同等になります。

(5) 海岸林の植栽本数

戦後の海岸林植栽は飛砂が砂丘地全面で発生するような過酷な立地条件下で、主としてクロマツを用いて始まりました。そのため、早期に砂丘面を植栽木で覆う目的で、10,000本/ha（ヘクタール）という密植を行ってきました（1m方形に1本）。

近年では条件の良い場所では5,000～8,000本/ha植栽に減少させてもよいことになっており、海岸最前線でも5,000本/ha植栽を試行し、特に問題がないことを報告している県もあります。問題が少ない理由としては、海岸林植栽が進み、砂丘地全面に裸地が広がるような状況にないことと森林造成に関する工法、技術が定着したこと等があげられます。

今後、被災地ではクロマツ苗木が十分に供給されない状況が考えられるので、内陸側では2,500本/ha（2.5m方形に1本）前後植栽に減少し、1本1本健全な育成を目指すことも一方法と考えられます。その場合、丁寧に植えることや強風による樹体の揺れを軽減するようにすることが必要と考えられます（山地の植栽基準として3,000本/ha植栽が一般化していますが、1,500本/ha植栽の低密度植栽も実行されています）。

（６）海岸林の立木密度管理（除伐、本数調整伐）

10,000 本／ha 植栽の場合秋田営林局管内では植栽後 8 年で 50%の除伐をし、植栽後 15～20 年後に第 2 回目の除伐をして残存の立木密度を 3,000 本／ha を基本としてきました。しかし、密植後の除伐、本数調整伐が十分に実行されないまま生長したことにより、立木密度が高く、枝葉の部分が小さい細い樹木が残存する状況が各地で見られるようになりました。

今後の植栽本数が減少される可能性があることも考慮に入れながら、目標立木密度に応じ、適宜本数調整伐を実行し、健全な海岸林に導くことが必要です。

（７）クロマツ林と広葉樹

クロマツ海岸林では秋から冬に落葉した松葉を集め、肥料や燃料として使用してきましたが、高度経済成長期の石油燃料、化学肥料の導入をきっかけに、この習慣は衰退してきました。落葉かきがおこなわれず土壌が肥沃化してくるとクロマツの生長もよくなるがそれ以上に広葉樹に適した環境になります。

クロマツの生長を助ける（共生関係）土壌中の菌根菌は落葉分解菌などのほかの菌類との競争に負けます。広葉樹が進入、生長すると土壌の富栄養化とともに菌根菌が駆逐され、その結果クロマツ林特有のキノコ相が消え、同時にクロマツの細根が死滅し、クロマツの樹勢が衰えると考えられています。植生の自然の動き（遷移）に従えば最終的にはクロマツ林は広葉樹林に移行しますが、海岸砂丘地は自然環境が厳しく、複雑なので単純に広葉樹林に替わるわけではありません。

現段階では、海岸線に近い海岸林は潮風に強いマツ林を維持するため、落葉かきを実行してマツからマツへの更新を図り、潮風が穏やかになる内陸側クロマツ林や大きな砂丘の風背地では落葉をそのままにして土壌の富栄養化をまって、クロマツ林から広葉樹林に移行することが考えられます。

また、植栽の段階で両者を健全に育てるには、クロマツの植栽域と広葉樹の植栽域は帯状に場所を分けることが重要です。さらに、広葉樹は一般に活着率が悪く、生長が遅いので、苗木高さが競合する雑草の高さ以下より低くなる可能性があります。広葉樹の苗木が雑草を抜け出すまで、植栽後数年にわたって雑草刈作業をしなければなりません。さらに雑草刈の際に広葉樹の誤伐（雑草との区別ができず刈ってしまう）率が高いので細心の注意が必要です。獣害（ネズミ、ウサギ等）、病害にも注意が必要です。

(8) 海岸砂丘地に適する樹種

海岸砂丘地の環境は樹木にとって苛酷な条件がそろっています。最も適するのはクロマツです。砂丘地最前線ではクロマツ以外はほとんど育ちません。少し内陸に入って環境が緩和され、クロマツ海岸林の成立で立地条件が改善されると広葉樹林の生育も可能になります。

クロマツの苗木は1回床替え2年生苗を用います。2回床替え3年生苗以上になると苗が大きくなり、強い風で根が揺すられことが多くなり、支柱が必要な場合があります。柱の要否は現場の技術者が判断します。

クロマツより潮風、飛砂、乾燥害に弱いですが、比較的海岸に適する広葉樹（カシワ、ミズナラ等）の苗木を内陸側に植栽する場合があります。広葉樹の苗木は一般に主幹となる幹が1本しかありません。しかし、海岸部に自生するカシワやミズナラは複数本の幹を出すいわゆる多幹型をしています。海岸では、冬芽、幹の多いことが有利であり、海岸防災林用の広葉樹の苗木は複数の主軸を持つ方が有利と考えられます。そのためには苗木の主軸を切断して萌芽を促進させる方法があります。

(9) 海岸林の病気（病虫害）

クロマツ林の病気としてはマツ材線虫病があります。この病気は北米から輸入された木材に紛れて日本に入ってきました。マツノマダラカミキリが病原体のマツノザイセンチュウを媒介し、マツに次から次に被害を及ぼし枯らしてしまいます。明治期に九州で発生し、その後西日本を中心に被害を広げ、2011年には青森県への侵入が報告されています。薬剤による防除法が確立されていますが、外来の病気特有の病原力の強さと広範囲な被害分布のため、根絶が難しいのが現状です。近年は、病気に強い抵抗性マツの苗木がつくられ、海岸に導入されています。

最近、ブナ科のナラ類やシイ・カシ類が大量に枯れる「ナラ枯れ」が発生しています。その原因は病原菌で、「カシノナガキクイムシ」という昆虫に運ばれて、寄主であるナラ類に被害をもたらしていることがわかっています。現在のナラ枯れ被害の流行は、環境要因の変化も影響しています。被害が発生してしまうと防除は極めて困難であることがわかっています。広葉樹林を海岸に植栽する場合は、カシノナガキクイムシの被害を受ける樹種は慎重に取り扱うことが必要でしょう。

(10) クロマツが過湿害にならずに健全に生育できる土壌厚（海拔高）

海岸クロマツ林が健全に生育できる根系の最小限の土壌の厚さは

$$\text{根系の深さ (cm)} = 2.1 \times (\text{樹齢}) + 11.6$$

であらわされます（小田、2001）。この式によれば樹齢 30 年では根系が 75cm、樹齢 50 年では 120cm の土壌の厚が必要になります。地下水に影響されない盛土の厚さもこれ以上必要です。地下水位が低く乾燥状態にある海岸砂地のクロマツ根系の最大深さは樹齢 50 年生で 3m 近くまで発達します（刈住、1979）。

仙台平野の湿地で流木化したクロマツ林の根系は 50cm 前後しか残っていませんでした。細根を含めて根系の垂直根の深さを 70cm と推定し、上式をあてはめると、樹齢は約 28 年になります。この湿地帯では樹齢が 30 年前後になると根系が地下水に達し、クロマツが健全に生長する土壌厚環境にないものと推定されます。

(11) 土壌の硬さ

液状化や地盤沈下した場所では盛土（植栽基盤）を造成し、その上に海岸林植栽を行うことが検討されています。一般的に植物の根が侵入できる土壌硬度は、山中式土壌硬度計で 25mm 程度（土質や植物等の条件によって変化する）までです。植物の育成に適切な土壌硬度指数は、概ね 18～23mm 程度の範囲と言われています。土壌深は、クロマツ林約 50 年生の根系が及ぶ範囲を約 1.2m 深とすれば、この範囲以上に土壌硬度指数で 23mm 以下に保つ必要があります。植栽基盤を造成した場合、根系範囲は耕運して柔らかくしておく必要があります。また過湿害を防ぐため排水を考慮しなければなりません。

(12) 過湿地に強い樹種

海岸の過湿地では地下水の酸素（溶存酸素量）が不足するため、クロマツの根系は呼吸障害を起こし、生長が阻害され、ひどくなると枯死に至ります。過湿な状態で比較試験を行ったところ耐水性が高いといわれているハンノキ、ヤチダモ等よりヌマスギ（ラクウショウ）が一番優れていることがわかりました（小田、2001）。ただし、ヌマスギが海岸の厳しい環境に耐えて生長できるかどうかは未知数です。風台風が通り過ぎた時に、潮風が内陸のヌマスギに当たり、葉が赤く変色した事例が観察されています。また、ヌマスギの落葉が牛の飼料に混じると牛が食べないということを聞いたことがあります。さらにヌマスギは外国からきた樹種（北アメリカ南部からメキシコに分布する外来樹種）であることにも留意しなければなりません。

(13) 砂丘地の気象の特徴

日本の砂丘では、砂丘の表面近くは非常に乾燥します（図は真夏の鳥取砂丘での調査）。しかし、その下層は湿っています。また、乾燥した表面地温は真夏の日中 50℃ 以上になります。

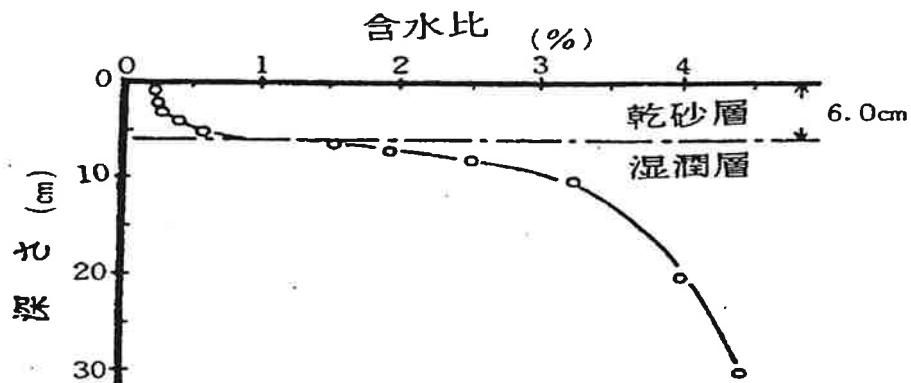


図 鳥取砂丘における真夏の土壌水分の垂直分布（松田ら、

3. 津波の基礎知識

(1) 津波の高さの予測

気象庁ではグリーンの法則を適用し、水深 1 m での高さを求め、これを沿岸での津波の高さとしています。

「沖合の(水深の深いところの)津波が沿岸の水深の浅い場所へくると、津波のスピードが遅くなり、前の波と後ろの波との間隔が短くなります。しかし、ひと波に蓄えられるエネルギーは、同じはずです。波面が海岸線に並行に入射する場合には、波と波との間隔が短くなった分、結果として、波の高さが高くなります。これがグリーンの法則です。

$$H = H_1 \sqrt{h_1 / h}$$

H_1 : 沖合予測点津波高さ、 h_1 : 沖合地点水深

H : 沿岸地点津波高さ、 h : 沿岸地点水深

水深 100m で高さ 1m の津波が、沿岸 1m の場所では約 3 倍の 3.16m の高さになります。津波の高さは海岸の地形によっても変わります。いわゆるリアス式海岸のように、湾奥に入るに従って狭くなる地形では津波のエネルギーが集中し、入り江の奥で次第に高くなります。

(2) 津波の速さ

津波が水深 h (m) の海を進行するとき、その伝播速度 V (m/s) は次式で近似されます。

$$V = \sqrt{g h}$$

g : 重力加速度 (9.8 m/s²)

津波は水深に比べ波長が長いという長波です。その速度は水深の平方根に比例するので、津波が深い外洋から浅い海岸部にやってくると進行が遅くなります。伝播速度は水深 4,000m で毎秒約 200m、水深 10m では毎秒 10m です。

昭和 35 年 5 月 24 日未明、北海道、三陸沖を中心として太平洋沿岸全域に津波（チリ津波）が襲来し、甚大な被害をもたらしましたが、この津波は、南米チリのチロエ島沖を

震源地とする大地震によるものです。理科年表によりますと、太平洋の平均深度は4,188mという事ですから約203m/秒の速度になります。これを時速に直しますと約730km/時に相当します。チリから日本までの広い海(17,500km)を約24時間かけてジェット機並みの速さで進んできたことになります。

(3) 海岸堤防(防潮堤)の強さ

海岸堤防は過去最大級の高波、高潮の高さを参考に設計されていますが、高さや強度を決める時、地震や津波のことは考慮されませんでした。平成16年度の一斉点検調査によると地震に耐えられる海岸堤防の割合は、全体の33%との結果が報告されています。

(4) 堤防をのり越える津波

津波は波というよりは、川の流れのようになって押し寄せます(エネルギーが波という形で伝搬する)。そのため流れがせき止められると流れがせり上がろうとする力に変化します。

「高さ4mの津波がきても堤防の高さが5mあるから大丈夫」というのは正しいでしょうか。高さ4mの津波は堤防に衝突すると、前進できなくなり海面が盛り上がります。理論的には堤防に衝突前の1.5倍くらい高くなり、6mに達します。また、前進中の海水の流れが突然ストップさせられるので、衝撃的な圧力が働き、堤防が破壊されることが起きます。

堤防といえば田老町の大堤防が有名でした。海拔高10m、設置点での高さ7.7mです。3.11東北地方太平洋沖地震後、再建案として海拔高14.7mで修復することが計画されています。設置点では12.4m高になります。

計算上、現堤防では設置点に押し寄せる津波は $7.7/1.5 \div$ 約5.1mの浸水深までは確実に防ぐことができます。計画案の設置点12.4m高の堤防の場合は、 $12.4/1.5 \div$ 約8.2mの浸水深まで防ぐことができます。このように、津波に対する堤防の限界も広く知っておく必要があります。

参考文献

- 秋田営林局（1963）：秋田営林局管内の海岸砂地造林. 71pp.
- 小田隆則（2001）：海岸砂丘低湿地における植栽木根系の滞水反応と樹林帯造成法に関する研究. 千葉県森林研究センター, 1-78
- 河田恵昭（2011）：津波被害. 岩波新書, 191pp.
- 刈住 昇（1979）：樹木根系図説. 誠文堂新光社, 1121pp.
- 気象庁ホームページ：
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/known/tsunami/ryoteki.html>, 2011年11月28日確認
- 酒田営林署（1963）：海岸砂地造林事業概要. 47pp.
- 庄内海岸ボランティアの手引き（庄内海岸松原再生計画策定委員会）：
： http://www.pinerescue.jp/torikumi/saisei/saisei_jigyuu/shounai/03.pdf,
2011年11月28日確認
- 森林総合研究所関西支所（2007）：「ナラ枯れの被害をどう減らすか：里山林を守るために」
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/2nd-chuukiseika1.html>
- 曾根原さん宅の「曾根原家名士十四名松植付之図寫」
- 立石友男（1989）：海岸砂丘の変貌. 大明堂, 214pp.
- 津波研究小委員会（2010）：津波から生き残る. 土木学会, 176pp.
- 中島勇喜・岡田 穰：海岸林との共生、山形出版会、2011
- 苗木は大事に、植えつけはていねいに（徳島県林業総合技術センター '89）：
<http://www.pref.tokushima.jp/files/00/01/22/94/system/naegihadaijini.pdf>,
2011年11月28日確認
- 新村義昭（1988）：北海道北部の海岸林におけるコナラ属樹木2種の生存様式に関する研究. 1-74
- 日本治山治水協会（1992）：治山技術基準解説 防災林造成編. 297pp.
- 農林水産部秋田県スギ振興課：森林防虫害の防除法：
<http://www.pref.akita.lg.jp/www/contents/1208500639094/files/FUKYUU03.pdf>,
2011年11月28日確認
- 松田昭美・神近牧男・安東登志広（1977）：砂丘地の地表付近における温度の垂直分布について. 鳥取砂丘研報 16, 9-13
- 村井宏ら（1992）：日本の海岸林. ソフトサイエンス社, 513pp.
- 全国林業改良普及協会（1998）：林業技術ハンドブック, 1969pp.

おわりに

津波と海岸林に関する調査研究は、平成23年6月6日に第1回津波と海岸林に関する調査研究委員会を開催し、同年11月末日に報告書を取りまとめたものであり、準備期間を入れてもわずか7ヶ月の短期間の活動であった。したがって、報告書の内容は、過去の調査研究事例、今回の被害状況等を十分把握した上でのものとは言い難く、また、委員等関係者の意見を十分調整してまとめたものでもないことをお詫びしておきたい。現在、各分野、各地で東日本大震災の復旧に携わっている方々からはご叱責を受けることとは思いますが、一つでもお役に立つことがあればと思い、このたび報告書を出版することとしたところである。

当初、本研究会の主な調査研究課題は、①、過去に発生した津波被害の報告書や研究調査の成果を取りまとめ、海岸林の津波被害減災効果等を取りまとめること、②、東北地方太平洋沖地震による津波による海岸林の被災状況、後背地に及ぼした海岸林の効果等を調査分析することであった。国土緑化推進機構に助成申請する段階で、③、研究会で現地調査も行い、調査箇所の被害状況、立地条件を踏まえて少しでも海岸林復旧に役立つ調査分析及び提言を行うこと、④、海岸林再生に参加すると考えられるボランティアのために海岸林造成の手引書を作成することを追加した。

本調査研究の対象とする海岸林の定義は、当初、海に隣接する海岸に生育する森林と考えていたが、内陸部の屋敷林、鎮守の森等が津波被害の減災効果が有ったという報告を踏まえて、津波の遡上した範囲に生育する森林とした。

過去の津波災害の事例や研究成果から、海岸林が津波被害を減災する機能を有することは一般に認識されているが、今回のような超弩級の津波に対しては有効な抑止機能を持つものではない。我が国の海岸林は、農地の保全、住居・公共施設の保全等を目的とし、森林の防風、防砂、防潮機能の効果を期待して江戸時代以降長年にわたって造成・維持されてきたものである。

今回被災した海岸林の復旧に当たっては、これらの所期の目的を達成することが第一義であるが、東日本大震災の復旧計画の中で海岸林は多重防御の一環として位置づけられていることにも配意して、津波被害の防災効果の高い森林を造成することが必要であろう。また、復旧都市計画の中では、内陸部の森林を含めて緑地の保全、住民の憩いの場等の観点にも配慮する必要がある。

海岸林の被災状況や後背地への防災効果は、津波の波高や早さによるところが大きいのは当然であるが、海岸林の立地条件（海面下の地形を含めて）により形態が異なっている。大きくはリアス海岸と平野沿岸部に分かれ、前者は、リアス海岸湾内低地部とリアス海岸沿岸部に、後者は沿岸部と内陸部に分かれる。この立地条件の相違は、今後の海岸林復旧に当たっても考慮すべきことである。

海岸林の復旧に当たっての技術的な提言及びこれを実施する上での課題はおおむね次の通りである。

- ①、林帯幅は広ければ広いほどよいが、立地条件等を勘案して一定の林帯幅（150～300m 程度）以上を確保することが必要である。

内陸部の森林造成、広い林帯幅の海岸林造成のための用地を確保するためには、復旧計画の新たな土地利用計画の中で、海岸林の防災機能を十分反映させることが必要である。

- ②、地下水の影響を受けないように一定の高さの盛土（植栽基盤、生育基盤）が必要である。

盛土の土を確保するためには、被害地の瓦礫や低放射能汚染土壌の活用について、専門家による安全性と土盛りとしての有効性について検討する必要がある。

- ③、目標林型は、漂流物を捕捉する機能の高い密な林分と、津波に対する倒伏抵抗力の大きい胸高直径が太く、枝下高が高い林分を組み合わせることを目標とし、適切な密度管理を行う。

- ④、数千ヘクタールの海岸林に復旧に当たっては、抵抗性品種のクロマツの種子の確保、苗木育苗のための苗畑の確保が必要である。

苗畑については被災農地の一時的活用についても検討する。

- ⑤、樹種の選択に当たっては、基本的には海岸地帯で大きな生長が期待できるクロマツを中心とするが、内陸部では立地条件の変化も踏まえ、適切な広葉樹の導入（混植を含む）についても検討する必要がある。

- ⑥、防潮堤、護岸工等の構造物を併設する。

防潮堤、護岸工等の併設の当たっては、海浜生態系の保全に配慮した規模、構造を検討する必要がある。

以上、津波と海岸林に関する調査研究の経緯及び報告書の要旨について述べたが、報告書に対するご意見、ご指導を賜ることをお願いする次第である。また、最後に報告書の執筆・取りまとめに当たられた津波と海岸林に関する調査研究委員会の委員その他関係者の方に厚く感謝申し上げたい。

平成 23 年 11 月 17 日 発行

編集・発行 森林保全・管理技術研究会
(事務局) 一般社団法人 森林技術コンサルタント協議会
〒102-0085
東京都千代田区六番町 7 番地 日林協会館 4 階
TEL 03-6737-1236