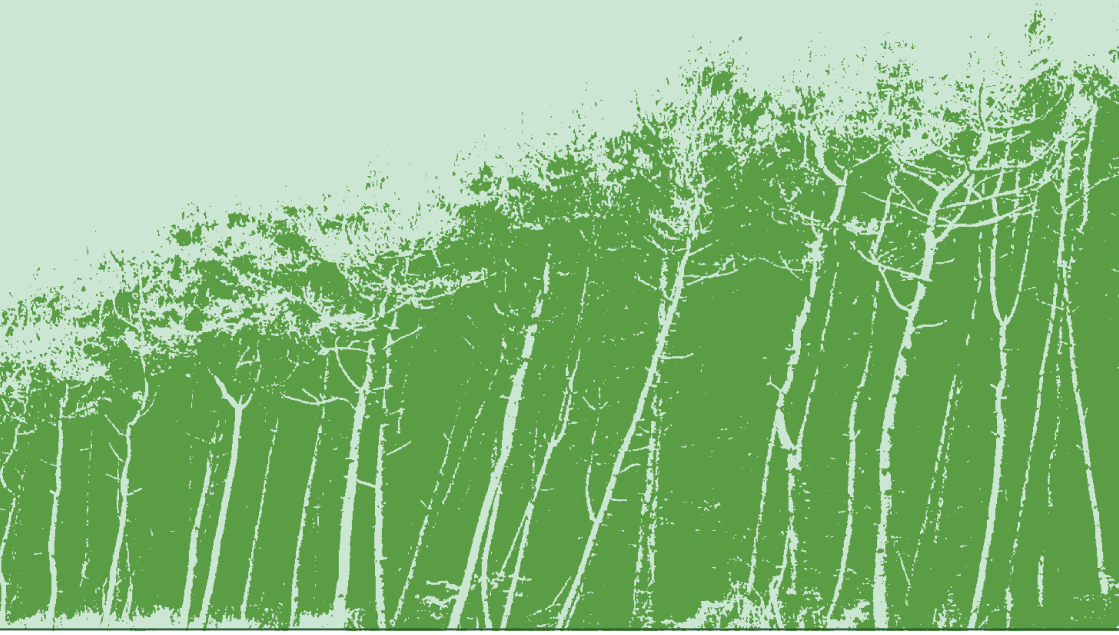
ISBN 978-4-905304-46-3

津波被害軽減機能を考慮した海岸林造成の手引き

ー海岸林を造成・管理する実務者のためにー



独立行政法人　森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute

森林総合研究所 第3期中期計画成果24（森林機能発揮ー15）

■はじめに　ー　本冊子のねらいと構成

平成 23 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波を契機に、海岸林には津波に対する防災効果がこれまで以上に求められるようになった。そのため、失われた海岸林の再生にあたっては、津波に対する耐性を高めた、また津波に対してより効果的に津波被害軽減機能を発揮する海岸林が求められている。しかしながら、これまでの海岸林造成は、かならずしも津波と海岸林との関係を考慮して行われてきたわけではない。

このたび、イノベーション創出基礎的研究推進事業（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センター、平成 24 ～ 25 年度）と農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業（農林水産省、平成 26 年度）のプロジェクト研究「津波被害軽減効果の高い海岸防災林造成技術の開発」で津波の影響を考慮した海岸林造成法の開発に取り組む機会を得た。本冊子は、プロジェクトの成果を活用してもらうために、研究成果報告書とは別に、現場技術者になじみのある技術基準書（林野庁監修：治山技術基準解説）の体裁に倣って海岸林造成法を示したものである。既存の技術基準で扱われている項目については基準書（林野庁監修：治山技術基準解説 第 3 編防災林造成編 第 3 章 海岸防災林造成、2004 発行年）に譲り、本冊子では津波被害を軽減するための海岸林造成法についてまとめた（参照「おわりに」）。

本冊子は大きく本編と資料編の二つに分かれる。本編（ 1 章、2 章）では、津波に対して耐性が高く、津波被害軽減に効果的な林帯とはどのような林帯であるかを示した上で、その造成法や誘導手法を示した。資料編（ 3 章～ 6 章）では、本編で示した造成法や誘導法の根拠となるプロジェクトの成果のうち、まだ印刷物として公表されていないものの概要を記した。

海岸林造成技術は、現場実績の裏付けがあって形作られていくものと考える。本冊子が海岸林の再生・造成現場の参考となり、現場実績が積み重ねられることに少しでも寄与することを願う。

平成 27 年 2 月

独立行政法人　森林総合研究所
坂本知己

本手引きの作成に携わった研究機関とメンバー

代表者　（独）森林総合研究所　坂本　知己
野口　宏典
鈴木　　覚
（平成 26 年 4 月から）　南光　一樹
（平成 26 年 8 月から）　萩野　裕章
秋田県林業研究研修センター　金子　智紀
（平成 25 年 3 月まで）　田村　浩喜
新田　響平
山形県森林研究研修センター　渡部　公一
上野　　満
斎藤　正一
国土防災技術株式会社　大野　亮一
田中　三郎
佐藤亜貴夫

目　　次

■はじめに　ー　本冊子のねらいと構成…… 1

【本　編】

1.　津波を考慮した海岸林とは …… 6
1.1.　健全な林帯 …… 6
1.2.　根系発達空間の確保 …… 8
1.3.　二段林化 …… 10
1.4.　海岸林の限界 …… 11
1.4.1.　引き波 …… 11
1.4.2.　地盤の喪失 …… 13
1.4.3.　軸替わりや枯れ枝の影響 …… 13
2.　造成手法 …… 14
2.1.　保育 …… 14
2.1.1.　適切な密度管理 …… 14
2.1.2.　過密林分の改良手法 …… 19
2.2.　生育基盤造成 …… 25
2.2.1.　生育基盤の定義 …… 25
2.2.2.　生育基盤（生育空間）として必要な基盤厚 …… 26
2.3.　広葉樹を活用した二段林造成手法 …… 27
2.3.1.　二段林を造成する区域 …… 27
2.3.2.　上木となるクロマツの密度管理 …… 28
2.3.3.　導入する広葉樹 …… 29
2.3.4.　自然侵入広葉樹の取扱い …… 29

【資料編】

3. 密度管理とクロマツ樹冠長の推移 …… 32
3.1. 目的 …… 32
3.2. 調査方法 …… 32
3.3. 結果と考察 …… 33
4. クロマツ海岸林を帯状更新する場合の更新幅 …… 35
4.1. 目的 …… 35
4.2. 調査方法 …… 35
4.3. 結果と考察 …… 36
5. クロマツ海岸林の樹高と林内光環境との関係 …… 39
5.1. 目的 …… 39
5.2. 調査方法 …… 39
5.3. 結果と考察 …… 39
6. 津波被害軽減効果に関する定量評価 …… 42
6.1. 定量評価の考え方 …… 42
6.2. モデルとした海岸林 …… 43
6.3. 林帯構造の違いによる波力減衰効果の変化 …… 45
6.4. 林帯構造の違いによる津波到達時間遅延効果の変化 …… 48

■おわりに　ー　既存の技術体系の中での位置づけ…… 50
参考文献…… 52

本　　編

1. 津波を考慮した海岸林とは

確実に津波被害軽減機能を発揮できる海岸林とは、充分な林帯幅を持った海岸林である。また、前砂丘を高くすることや、海岸林の内陸側に新たな林帯を造成することも効果的である。しかしながら、これらは他の土地利用との調整が必要になる場合が多いので、本冊子では扱わない。本冊子では、限られた林帯幅の中でより効果的な海岸林に導くことを対象とする。

1.1. 健全な林帯

健全なクロマツ海岸林を仕立てる。

海風の強い砂浜で海岸林を確実に造成するためには、クロマツを主林木とする林を仕立てることが勧められる。なぜなら、海岸林造成においてクロマツは他樹種を圧倒する実績を持つからである。マツ材線虫病対策を確実に行い、密度管理を適切に行うことが、形状比を低く保った健全なクロマツ海岸林をつくることの前提となる（**図 1**）。

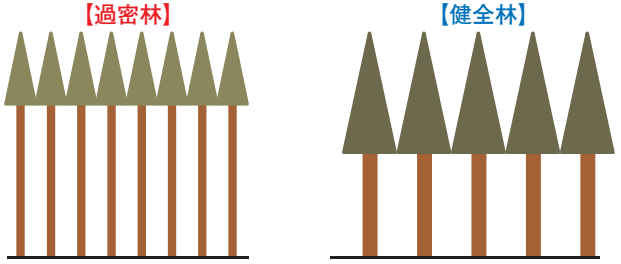


図 1　適切な密度管理による健全な林帯のイメージ

なお、本冊子では広葉樹を主林木とする海岸林は扱わない。

波力に対する耐性を持つ林（波を受けても倒れない林）と波力減殺効果が高い林（波の勢いを減らす林）は相容れない部分がある（**図 2**）。すなわち、波力に対して耐性を持つためには、幹が太い方がよい。そのためには、立木密度を低くする必要がある。しかしながら、立木密度を低くすると、水流に対する抵抗体としての幹の本数が少ないので、その分、波力減殺効果は減る（参照 6.3 ）。

これに対して、密に仕立てた林帯は、水流に対する抵抗体としての幹が多いので、波力減殺効果が期待できるが、幹が細いために波力に対する耐性が低い。

なお、枝下高が高い方が波力を受けにくいので波力への耐性は高くなるが、逆に波力減殺効果は減る。

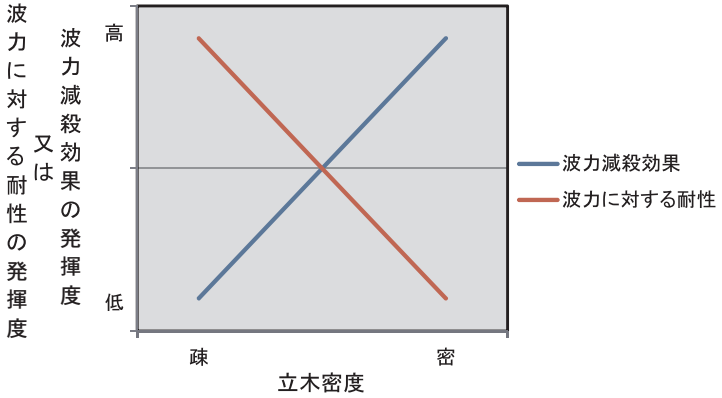


図 2　立木密度と波力減殺効果および波力に対する耐性の関係模式図

津波の規模と樹高を設定すれば、数値シミュレーションによって、津波に対する耐性と津波被害軽減効果のバランスを考えた林相を算定することは可能であるが、津波の規模も樹高も一つに固定することは現実的

ではない。また、他の防災機能の点からも、津波のみを対象として林相を決めることは適切ではない。したがって、まずは健全な林帯を仕立てることが目標となる。

多くのクロマツ海岸林が、マツ材線虫病で劣化している状況、あるいは、本数調整が遅れて不健全な林相（樹高のわりに幹が細く、樹冠長率が低い）であることを考えると、抵抗性マツの活用を含めてマツ材線虫病対策を確実に行い、本数調整を着実に実施して健全な林相を持った林帯を仕立てるだけで、津波に対して強く、防災効果の高い海岸林になる。

なお、十分な肥大成長ののち、枝打ちを行って枝下高を上げると、枝葉が津波を受けにくくなるので、樹体が受ける波力を減らすことができ、波力に対する耐性が上がり、津波発生時に樹木が残存する可能性が高まる。作業量を考えると林帯全体に枝打ちを施すことは現実的でないが、内陸側の限られた範囲であっても、そうすることにより林帯内で発生した流木を捕捉する空間として機能する可能性は高くなる。

1.2. 根系発達空間の確保

標高が低く、地下水位が高い箇所では、排水工あるいは盛土をして海岸林の根系が発達できる空間を確保する。

津波の力が海岸林を構成する樹木の波力に対する耐性を超えた場合、幹折れや根返りは避けられない。しかしながら、海岸林を津波被害軽減のための防災施設と位置づけた場合、流木化は極力避ける必要がある。流木が混じることで津波の破壊力が増え、被害を拡大する恐れがあるからである。

東日本大震災の際、根返り・流失が発生した箇所では、根系が浅いと

いう共通点があった（**写真 1**）。その原因として高い地下水位が考えられた。鉛直方向への根系の発達が地下水に妨げられていたからである。幹が太い樹木も根が浅ければ根返りしやすく波力に対する耐性は低い。

写真 1　根系が浅く根返りして内陸側へ流失した例（福島県相馬市）

根系を発達させることで、波力に対する耐性を上げることができる（**写真 2**）。また、波力に耐えられず倒伏しても、根が地中に残り、その場に止まる可能性が高まる。すなわち、被害拡大につながる流木化を避けるためには、根系が地中深くに発達できる空間を確保することが重要である。

一つの方法は排水工によって地下水位を下げることである。標高が低い土地で自然排水が難しい場合には、盛土が有効である（参照 2.2）。

写真 2　深く伸びた根系の例（岩手県陸前高田市）
鉛直方向の根の発達が見られ根返りを免れた

1.3.　二段林化

波力減殺効果を高めるために、クロマツの下層に広葉樹林を仕立てて二段林化する。

根返り・流失の可能性の低い健全な林帯をつくることで、これまでの海岸林に比べて津波に対して効果的で耐性の高いものになる。そのうえで、さらに津波に対する効果を高めるには、クロマツ林の下層に広葉樹林を仕立てること、すなわち、上層クロマツ、下層広葉樹の二段林化が有効である（**図 3**）。そのことによって、クロマツの幹だけでなく下層の広葉樹も津波に対する抵抗体となるので、波力減殺効果をより高めることが期待できる（参照 2.3、6.3、6.4）。

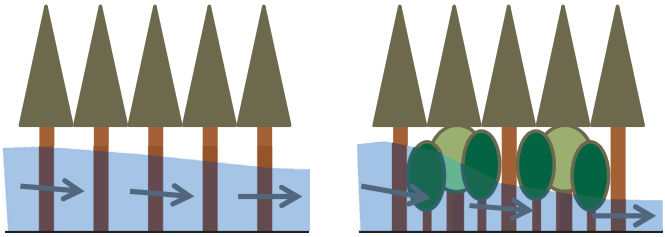


図 3　二段林化による波力減殺効果向上のイメージ

1.4. 海岸林の限界

1.4.1. 引き波

波力が樹木の耐性を超える場合、幹折れや根返りが生じることは避けられない。しかしそれがそのまま流木化につながるとは限らない。幹が折れても樹皮などで根株とつながっていたり、根返りしても根系の一部が地中に残ったりするので、倒伏によって受ける波力が大きく減少して樹体は流されずにその場に残ることが期待できるからである（**写真 3**）。また、そのような状態でも、裸地に比べれば水流に対する抵抗として働く。

写真 3　樹木の倒伏：引き波が弱い場合の例（宮城県仙台市）

しかしながら、強い引き波があると、話は大きく変わる。内陸側に向かって倒伏した樹体は、引き波によって海側へ向かう力を受ける。津波が複数回押し寄せ、そのたびに強い引き波が発生すれば、樹皮などでつながっていた幹が根株から引きちぎられ、地中に残っていた根系も引きちぎられたり引き抜けたりする可能性が高くなるからである（**写真 4、写真 5**）。

写真 4　幹のねじれ：複数回の強い引き波があった場合の例（岩手県陸前高田市）

写真 5　多様な倒伏方向：引き波が強い場合の例（岩手県陸前高田市）

強い引き波が生じるような場所を、樹体が幹折れや根返りで倒伏するような波力の強い津波が襲った場合には、海岸林に津波被害軽減機能を求められるのは第１波までと考える方がよい。

1.4.2. 地盤の喪失

海岸林の表土が津波によって侵食を受け根が洗い出されると、流木化は免れない。とくに液状化や地盤沈下を伴う場合、流木化の危険性はより高まる。これを防ぐには、樹木だけでは対応できず、侵食防止のための土木工事の併用が必要となる。

1.4.3. 軸替わりや枯れ枝の影響

海岸林を構成する樹木は、優勢木であっても梢頭が枯れて軸替りしていることが珍しくない。幹の中に枯れたかつての主軸が取り込まれていたり、また、枯れた枝も取り込まれたりして、死節が生じている（**写真6**）。これらは強度的に弱い部分なので､内陸側の限られた範囲だけでも、枯れた梢頭部分や枯れ枝を速やかに処理することが望ましい。また、老齢木には腐れが入っていることが多いので、植え替えることを勧める報告もある（農林省山林局、1935）。

【枯枝が取り込まれた例】　　【幹内部の腐れの例】

写真６　樹幹弱部で幹折れした事例

2.　造成手法

2.1.　保育

2.1.1.　適切な密度管理

（1）　密度管理の必要性

植栽密度の高い海岸クロマツ林は、そのまま放置すると形状比が高い個体で構成される脆弱な過密林分となる。防災機能（津波被害軽減を含めて）を維持するために、適切な密度管理を実施する。

【解　説】

1．クロマツ海岸林の造成における植栽本数は 10,000 本 /ha が標準であり、一般的な造林に比べると植栽密度は非常に高い。クロマツを高密度で植栽する理由は、いち早く鬱閉を図ることで飛砂防備機能の早期発揮や、クロマツ個体への風当たりを軽減するためである。

2．植栽時の立木密度のまま放置された林分では、下枝が高く枯れ上がり、樹高の割に幹が細い（形状比の高い）林分となる。

3．形状比が 70 ～ 80 以上では風雪害の危険度が増すとされる（金子ら、2000 小田、1992a）。

4．放置クロマツ林の場合、自然間引きや風雪害などにより成立本数が減少したとしても、残存個体の形状比は高いままであり、林分の脆弱性は解消されない。形状比の低い個体で構成された林帯を形成するためには、上長成長に応じた密度管理を確実に行う必要がある。

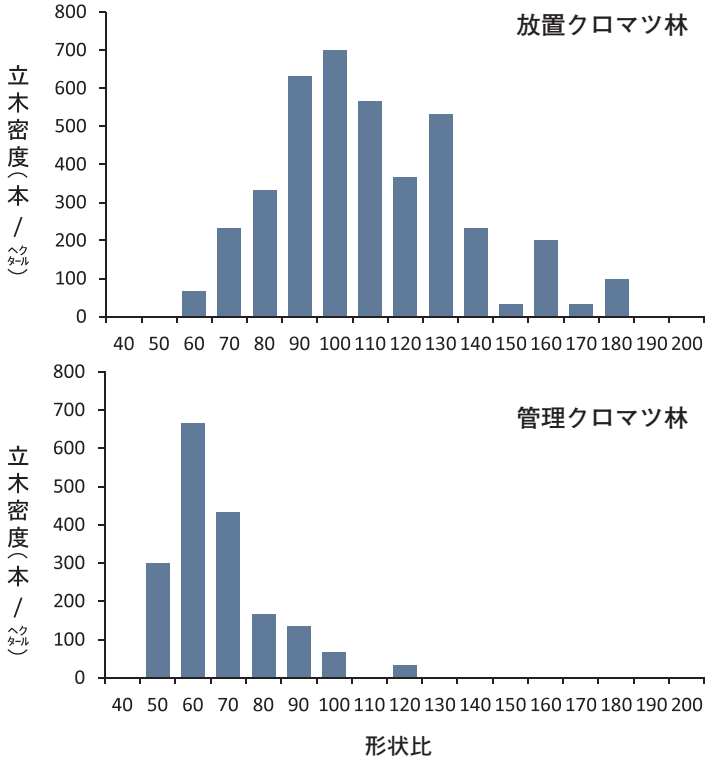


図 4　放置クロマツ林および管理クロマツ林における形状比分布

山形県庄内地方の事例：本数調整伐を実施していないクロマツ林（放置クロマツ林）は、本数調整伐を実施しているクロマツ林（管理クロマツ林）に比べ、個体サイズの優劣差が大きく、全体的に形状比の高い個体で構成される。放置クロマツ林では、形状比 70 以下の健全な個体の本数は８％以下である。

（2） 密度管理の目安

樹冠長は樹高の 50 %、樹冠幅は樹高の 35 %程度を確保する。

【解　説】

1．クロマツ海岸林の密度管理については、「クロマツ海岸林の管理の手引きとその考え方－本数調整と侵入広葉樹の活用－」（森林総合研究所、2011）などに記されている。ここでは、密度管理が適切になされているかを、あるいは、どの程度樹幹を離せばよいのかを判断するための簡便な目安として、樹冠長：樹高の 50 %、樹冠幅：樹高の 35 %程度を示す。

2．形状比は、林冠閉鎖後の立木密度と関係する。立木密度の高い林分では、上長成長に比べ肥大成長が少ないため、立木密度が高いほど形状比が高く、立木密度が低いほど形状比は低くなる。立木密度と樹冠の大きさとの間にも関係があり、立木密度が低くなるほど樹冠が大きくなる。すなわち、形状比を低くするためには樹冠を大きく保つ必要がある。

3．クロマツ海岸林において目標とする形状比は、積雪や風の状況などの環境要因を考慮して決定する必要がある。特に冠雪害や津波への耐性を考慮すると、目標形状比は 60 程度が適当である。

4．形状比と樹冠長率との関係は、べき乗式により回帰することが出来る（**図 5**、上段）。関係式から形状比 60 に当てはまる樹冠長率は、約 53 %である。従って、下枝が樹高の半分を越えて枯れ上がらないうちに本数調整伐を実施する必要がある。

5．樹冠長率と同様、形状比と樹冠幅率（樹高に対する樹冠幅の割合）との関係は、べき乗式により回帰することが出来る（**図 5**、下段）。

関係式から形状比 60 に対応する樹冠幅率は約 35 %である。従って、樹高 10 m の林分において形状比 60 の林分を目標にする場合、隣接個体との間隔（幹距）を 3.5 m 程度空けることが目安となる（**図 6**）。

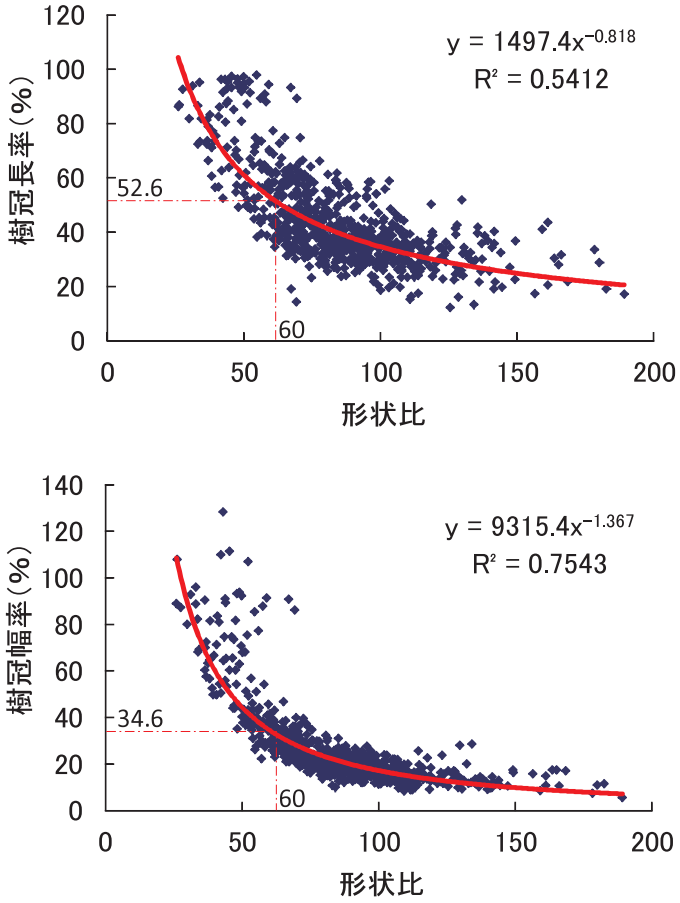


図 5　形状比と樹冠の大きさの関係

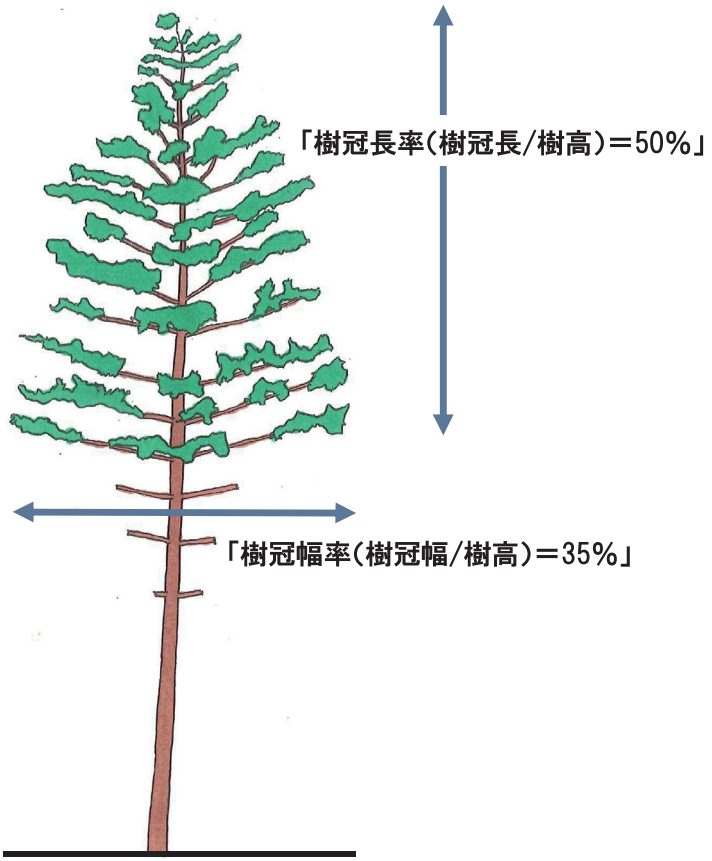


図 6　形状比 60 を目標とした時の樹形の目安

2.1.2. 過密林分の改良手法

（1） 過密林分の区分と判定基準

津波軽減効果の高いクロマツ海岸林は、形状比の低い個体で構成されることが望ましい。本冊子では本数調整が適正になされなかった結果として形状比 70 以上の個体が多くを占める林分を「過密林分」とする。

過密林分はつぎの２つに区分される。

① 改良可能林分

樹冠長率が 50 %を下回る林分において現状の枝下高を維持した場合、樹冠長率が 50 %に回復する期間がおおむね 10 年以下の林分。

② 改良困難林分（手遅れ林分）

同様に、おおむね 10 年では樹冠長率 50 %への回復が見込めない林分。

【解　説】

1．過密林分を改良するため、本数調整伐を実施した場合に見込まれる樹冠長率の回復程度に基づいて判断し、「改良可能林分」と「改良困難（手遅れ）林分」に区分する（**図 7、図 8**）。

2．改良可能林分は、枝下の高さを現状に維持した場合、上長成長によって樹冠長率が 50 %に回復するまでの期間がおおむね 10 年以内の林分とする。

3．改良困難（手遅れ）林分は、本数調整伐を行い枝下の高さを現状維持した場合であっても、樹冠長率が 50 %に回復するまでの期間が

10 年を超す林分とする。あるいは、樹冠長率 50 %への回復が見込めない林分である。なお、10 年という区切りは、5 年ごとに 2 度の本数調整を想定したものである。

4．対象となるクロマツ林が「改良可能林分」か「手遅れ林分」かの判断には、10 年後の樹高を予測する必要がある。10 年後の樹高は、周辺の林分の生育状況等から推定する。

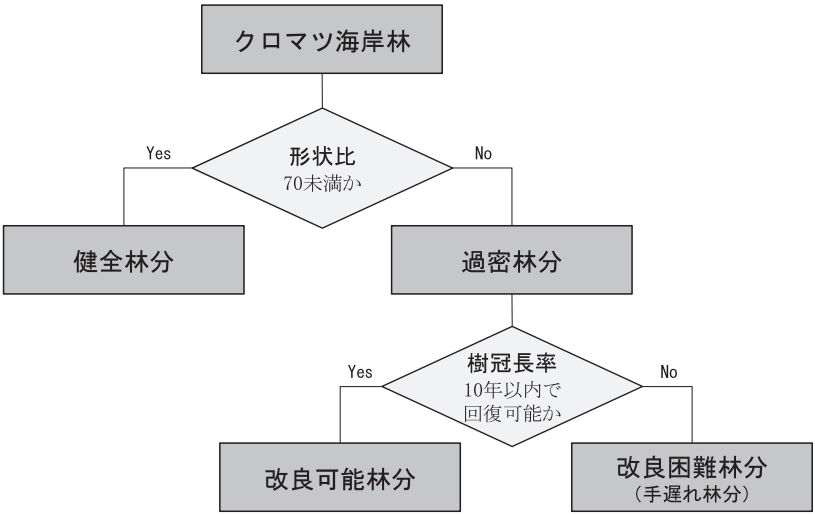


図 7　過密林分判定フローチャート

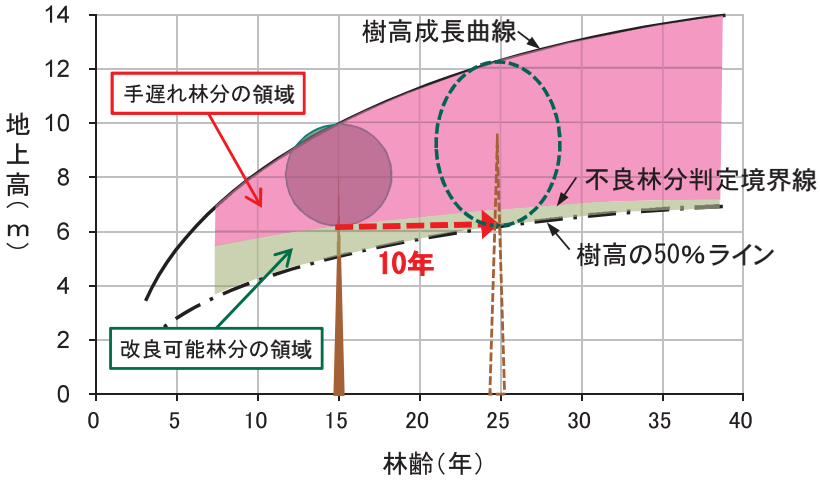


図 8　過密林分における「改良可能林分」と「手遅れ林分」の判断基準

（2）　改良可能林分の改良方法

改良可能林分と判定された林分は、速やかに本数調整伐を行い健全な林分（形状比 60 以下、樹冠長率 50 %）に誘導する。

【解　説】

1．現在の樹高や地位の高さから今後の上長成長が期待できる林分では、極端に枯れ上がりが進行していない限り、改良可能林分と判定できる。本数調整伐によって枝の枯れ上がりを抑制することで、上長成長に伴う樹冠長率の増加が期待できるからである。

2．過密化が進んでいるクロマツ林の本数調整にあたっては、個体サイズの優劣がはっきりしているので、比較的形状比が小さく肥大成長

を望むことができる個体を「仕立て木」として選木する。伐採は仕立て木の樹冠の拡大を妨げる隣接個体を中心に行うが、仕立て木どうしが隣接する場合は、両個体を残しその周辺木を伐採する。また、片枝等の樹型であっても優勢個体は積極的に残すことが望ましい。

3．樹冠が矮小化しているクロマツは、すでに樹勢が低下しており本数調整を行っても樹冠の回復は期待できない。このような個体は伐採の対象木となるが、仕立て木の成育を妨げることがなければ残置しても良い。

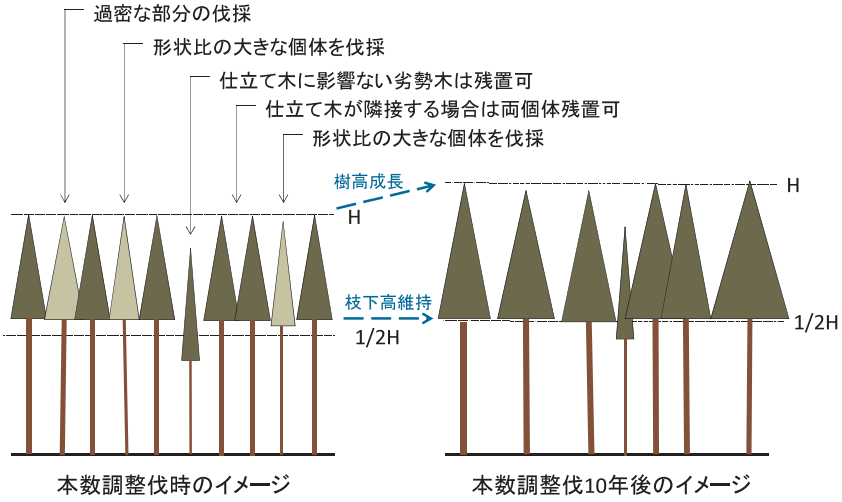


図９　改良可能林分における本数調整伐のイメージ図

（3） 改良困難林分（手遅れ林分）の更新方法

改良困難林分（手遅れ林分）と判定された場合は更新（伐採して植え直し）を検討する。更新は、海岸線に平行な帯状に複数回に分けて実施する。一まとまりの更新幅は残存林帯の林冠高の２倍程度以上を目安とする。

【解　説】

1．手遅れ林分と判定された場合は、帯状に伐採して植え直し（更新）を検討する。

2．林帯の伐採の影響を最小限に抑えるため、伐採は海岸線に平行に帯状に行い、海風に対して連続した林帯を保つようにする。

3．更新帯において、クロマツが健全に生育できる相対照度 60 %以上の光環境を確保する必要がある（森、1987 ）。

4．必要な陽光条件を満たすため、更新帯の幅（伐採幅）は、更新帯の海側の林冠高（H）の２倍以上が必要である（４章参照）。

5．伐採幅の上限については知見が不足しているため、当面は安全側に見て改良困難林分のうち内陸側部分を更新対象とする。伐採幅は 5H、あるいは 50 m の短い方に止める。更新後の残存帯の様子を見ながらその後の更新帯の幅の拡大を検討する（**図 10**）。

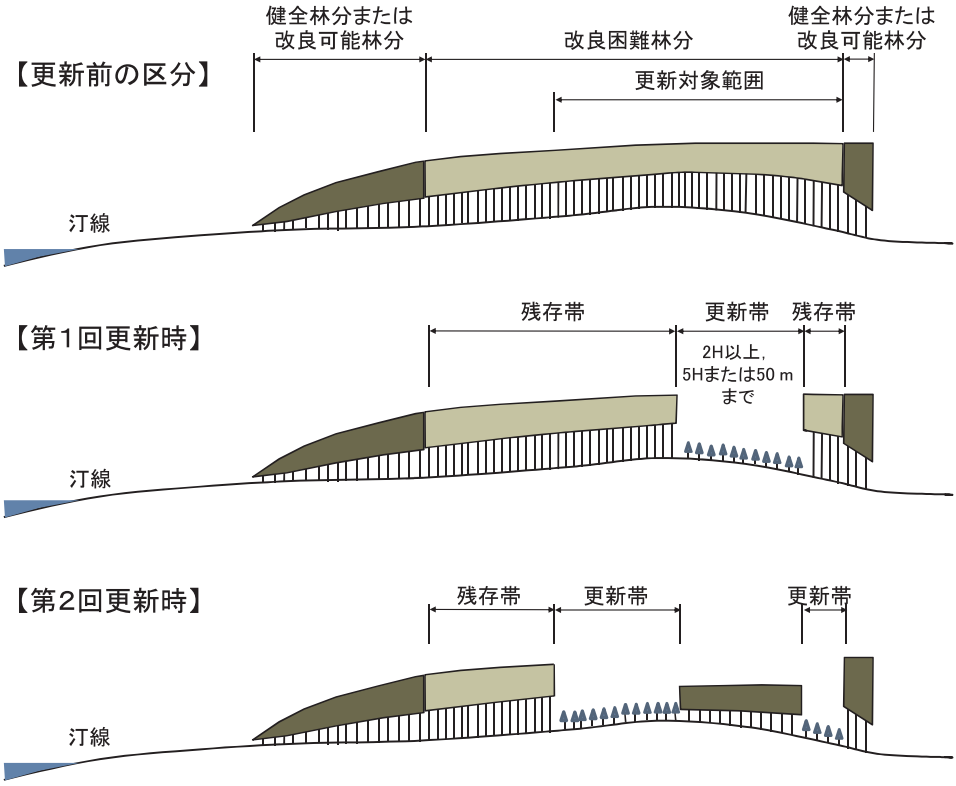


図 10　改良困難林分の更新イメージ横断図

2.2.　生育基盤造成

2.2.1.　生育基盤の定義

生育基盤とは、植物の根が伸長できる範囲の土層（「有効土層」という）をいう。有効土層は、主に養水分を吸収する根が分布する表層の「上部有効土層」と、支持根が分布する下層の「下部有効土層」に分けられる。

【解　説】

1．上部有効土層とは、表層の上部 30 cm から 40 cm の土層をさし、根が養水分を吸収する範囲であり、土壌の物理性・化学性が適正でなければならない（**図 11**）。これに対して下部有効土層は、支持根が分布する範囲であり、とくに排水性が確保されていることが重要である（柳田、2014）。

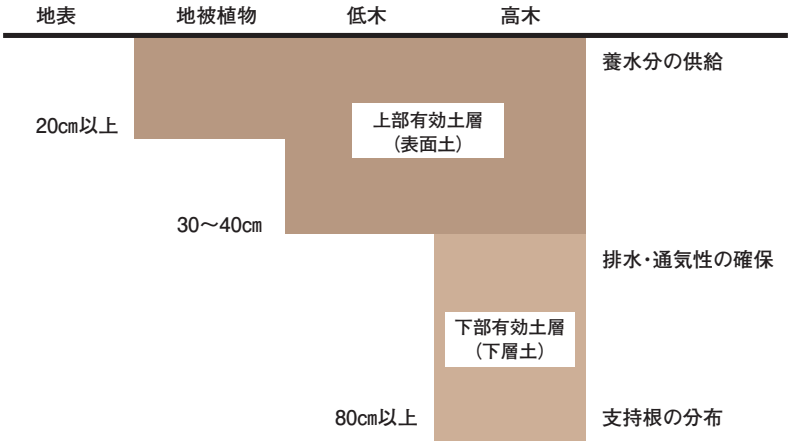


図 11　有効土層の構成
（出典：最新・樹木医の手引き　改訂 4 版　に加筆）

2.2.2.　生育基盤（生育空間）として必要な基盤厚

津波による根返りを防止する観点から盛土による生育基盤を造成する場合、クロマツ植栽地の有効土層は 1.5 m 以上確保することが望ましい。

【解　説】

1．マツ類では地下水位が高いと垂下根が発達せず、表層のみに根系が分布することが知られている（小田、1992c）。平成 23 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波においても、根返りしたマツの根系の多くは根が浅く偏平で、地下水によって垂下根の発達が制限されていたことが各地で確認されている。

2．海岸林を造成・復元する際には、波力を受けても根返りしにくいように、垂下根が発達できる生育基盤の確保について検討する必要がある。標高が低く地下水位が高い場所では、排水工による地下水位の改善が難しいため、盛土による生育基盤の造成が有効である。

3．渡部ら（ 2014 ）によれば、仙台平野において、津波によるマツ類の被害と地下水深度（地盤高と地下水位との差）を調査した結果、根返りの発生は地下水深度と胸高直径との関係が強かった。地下水深度が 1 m以上の場所では、根返りはほぼ胸高直径 20 cm 未満の個体にしか発生しなかったが、地下水深度が 1 m 未満の場所ではほとんどの立木が根ごと流された区域が多く、胸高直径 30 cm を超える個体でも根返りの発生が確認された。

4．上の調査が地震によって地盤沈下が起こった場所で行われたことと地下水位の季節的変動を考慮すると、根返りを防止するためには、盛土により有効土層厚を 1.5 m以上確保することが望ましい。

5．盛土にあたっては、透水性と通気性が損なわれないように留意するとともに、必要に応じて排水溝を設置したり盛土面に勾配をつけたりして排水性を確保する。

2.3.　広葉樹を活用した二段林造成手法

2.3.1.　二段林を造成する区域

海岸林としてのクロマツ－広葉樹二段林の造成区域は、立地環境等を考慮し決定する。

【解　説】

1．海風環境の厳しい汀線側では、海浜砂丘環境への耐性が高いクロマツであっても樹高が抑制されることから、二段林構造の海岸林を造成することは難しい。概ね、林冠高 6 m 以上の林分が対象となる。

2．従って、クロマツ－広葉樹二段林は、比較的環境の穏やかな内陸側や砂丘後背地が対象地になる（**図 12**）。

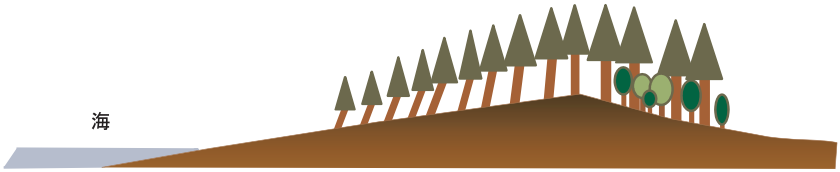


図 12　広葉樹二段林造成区域模式図

2.3.2.　上木となるクロマツの密度管理

適切に密度管理されたクロマツ林内の光環境は、下層に広葉樹を導入できる水準にある。したがって、上木となるクロマツの密度管理は、クロマツ純林と同様に実施する。

【解　説】

1．クロマツの下層に広葉樹を導入するためには、クロマツ林内において広葉樹の生育に必要な光環境を確保する必要がある。

2．適切に密度管理を実施したクロマツ林内は、広葉樹の成長に十分な光環境を有している（参照５章）ため、下層に広葉樹を導入するにあたって特別な密度管理の必要はない（**写真７**）。

写真７　適正な立木密度の例（秋田県秋田市）

平均樹高 9.5 m　平均胸高直径 16.6 cm

立木密度 750 本 /ha　平均樹冠長率 51.5 %

2.3.3.　導入する広葉樹

クロマツの下層に導入する広葉樹は、海岸砂丘地において生育可能な樹種を選定する。

【解　説】

1．適切に密度管理されたクロマツ林内においては、広葉樹の生育に必要な光環境は確保されているため、導入する樹種に特別に高い耐陰性は要求されない。したがって二段林を造成する砂丘環境で生育できる樹種を選定することが重要である。

2．導入樹種はその地域に自生する広葉樹を中心に検討することが望ましい。自生する樹種の方が活着不良等のおそれが少なく、早期の二段林化が見込めるからである。

3．具体的な導入樹種の例として、秋田県においてはカシワ、エゾイタヤ、ケヤキ、シナノキが示されている（金子・田村、2007）。

4．対象海岸林における導入広葉樹は、森林総合研究所（ 2014）の手引き等を参照して選定する。

2.3.4.　自然侵入広葉樹の取扱い

侵入広葉樹は、次のいずれかに該当する場合を除き活用する。

1．導入広葉樹を著しく被圧する恐れがある低木性広葉樹

2．ニセアカシア等に代表される侵略的外来樹種である場合

3．上木の密度管理上の支障木となる場合。

【解　説】

1．林帯の内陸側や砂丘後背地など比較的環境が穏やかな立地条件においては、カシワやカスミザクラやヤマグワ等といった広葉樹の侵入がよく確認される（**写真 8**）。

2．これら侵入広葉樹も津波被害軽減効果の向上に寄与することから、原則として伐採する必要はない。

3．しかしながら、侵入した広葉樹が、導入した広葉樹を著しく被圧する、あるいは被圧する恐れのある低木類である場合や、ニセアカシアをはじめとする侵略的外来種である場合、上木であるクロマツの密度管理作業に支障をきたす場合などは伐採する。

写真 8　クロマツ林内に侵入したカシワの事例（秋田県潟上市）

資　料　編

3.　密度管理とクロマツ樹冠長の推移

3.1.　目的

クロマツ植栽木の健全性を判断する指標として樹冠長が有効である。樹冠長は「樹高－枝下高」で求められるが、クロマツの枝下高が上長成長に伴い、もしくは管理方法の相違により、どのように変化するかはあまりわかっていなかった。そこで、施業履歴の異なるクロマツ林において、節解析による枝の枯れ上がりの推移から樹冠長の変化を推定し、クロマツ林における本数調整伐の効果について本プロジェクトで検証した。

3.2.　調査方法

調査は、山形県庄内海岸林のクロマツ林において、管理が行われていない放置クロマツ林１林分と、本数調整伐が行われている管理クロマツ林２林分で行った。各林分からサンプル木を採取し、節解析により枝の枯れ上がりの推移を調べた。調査対象林分は、いずれも 10,000 本/ha 植栽である。節解析を行った節は、樹皮に残る枯れ枝の痕跡から地上高を計測した後、節全体が含まれるように幹を輪切りにして採取した。採取した節は、バンドソー等を用いて節の痕跡に沿って幹軸方向にミカン割（**写真 9**）にし、節の縦断面から、枝の枯死した年を測定した。また、クロマツの樹高は、輪生する枝の高さを測定することで求めた。

写真 9　節の巻き込み状況（ミカン割）

3.3.　結果と考察

いずれのクロマツも植栽後 8 ～ 10 年程度、樹高が 4 m 前後で枝の枯れ上がりが始まっており、この時期には林冠が閉鎖し個体間競争が起きていると考えられる（**図 13**）。その後、放置クロマツ林では、上長成長のスピードと枝が枯れ上がるスピードがほぼ同じであったため、樹冠長約 4 m を維持しながら成長している。上長成長が進む一方で樹冠長が変わらないことから、樹冠長率は、樹高が 8 m に達する時期には 50 %を下回っている。一方、管理クロマツ林 A では、本数調整伐を行った平成 17 年以降には枝の枯れ上がりが幾分抑えられていたが、次第に枝の枯れ上がりが顕著になりつつある。管理クロマツ林 B は、2 回の本数調整伐を行ったことで枝の枯れ上がりが抑えられ、平成 16 年以降、上長成長とともに樹冠長が大きくなっている。

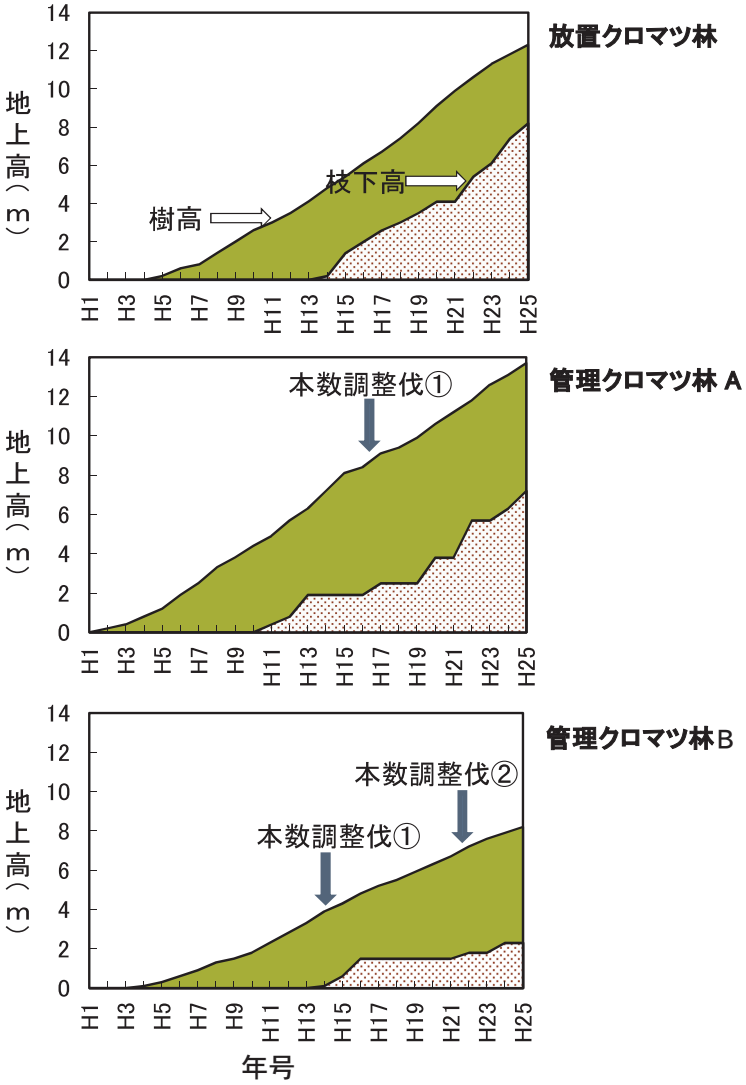


図 13　放置クロマツおよび管理クロマツ林における樹高と枝下高の推移

4.　クロマツ海岸林を帯状更新する場合の更新幅

4.1.　目的

過密化が進んだクロマツ林は、海岸線に平行な帯状伐採を行って数回に分けて順に更新を図る必要があるが、防災機能の低下を最小限に抑えるためには伐採更新幅の目安が必要である。防災機能を低下させないためには伐採幅は狭い方がよいが、狭すぎるとクロマツ苗木の生育に必要な陽光条件が得られなくなる恐れがある。森（1987）が酒田クロマツ海岸林においてクロマツ苗の相対照度と生育の関係を調べた報告では、クロマツを更新させるためには 60 %以上の相対照度が必要とされている。そこで相対照度 60 % を確保するために最低限必要な伐採幅を明らかにするため、クロマツ林帯の樹高および伐採幅が陽光条件に及ぼす影響を調査した。

4.2.　調査方法

健全なクロマツ林に隣接している開放地（幼齢林、畑、作業道等の裸地など）を調査地に選び、林帯の方位による被陰の影響範囲の違いを調べた。簡易積算日射量測定フィルム（商品名　オプトリーフ R-3D　株式会社大成イーアンドエル社製）を用いて、6 月下旬から 7 月上旬にかけて 2 日から 4 日間、フィルムを測定点に設置した。測定点は林縁部を 0 とし、クロマツ林帯の林冠高 H を基準として林縁から外側に 1/4H、1/2H、3/4H、1H の位置に設定し、近隣の四方に日当たりを遮るものがない開放地の値を 100 として、フィルムの褪色度から相対光量子量を求めた。残存林帯がどの方位にあるかによって被陰の影響を受ける範囲が異なることを想定し、東西南北の四方のいずれか一方向が林帯に接している箇所と、東西、あるいは南北方向の 2 面が林帯に接している箇所に

ついて各 2 調査地ずつ測定した（**表 1**）。

表 1　調査地概要

調査地	残存林帯の方位	H 残存林帯の平均樹高 m	残存林帯の平均枝下高 m	w 開放地の幅 m	w/H
東向1	西	18.8	10.4		
東向2	西	14.6	4.8		
西向1	東	17.0	10.1		
西向2	東	15.1	5.2		
南向1	北	21.1	16.4		
南向2	北	18.7	6.7		
北向1	南	16.5	10.2		
北向2	南	18.2	7.8		
東西1	南北	18.3	10.6	14.0	0.77
東西2	南北	15.5	9.0	19.5	1.26
南北1	東西	17.7	13.2	16.0	0.90
南北2	東西	12.2	12.2	12.6	1.03

4.3.　結果と考察

一方向だけ林帯と接している調査地のうち、東向き、西向き、北向きの開放地では 1/2H 地点以降で相対光量子量は 60 %を上回り、南向きの開放地では 1/4H 地点でも 60 %を上回った（**図 14**）。両側の 2 面が林帯に接している調査地で、開放地の幅が林冠高より大きい調査地では 1/2H の地点が 60 %を上回ったが、開放地の幅が林冠高とほぼ同じか狭い調査地では、いずれの点においても相対光量子量は 60 %を下回った（**図 15**）。以上の結果から、相対光量子量を相対照度に読み替えると、クロマツ林帯から受ける被陰による影響範囲は、林縁部から林帯のクロマツ樹高の 1/2 程度の幅の区間であった。林内を伐採更新する場合は、両側の林帯から被陰を受けることになるため、この幅を見込んで伐採更新幅を決定する必要がある。被陰の影響を受けない部分を林冠高と同じくらいの幅で確保した場合の伐採更新幅は、林縁にあっては林帯の林冠高の 1.5 倍、林内にあっては 2 倍程度とすることが望ましい。

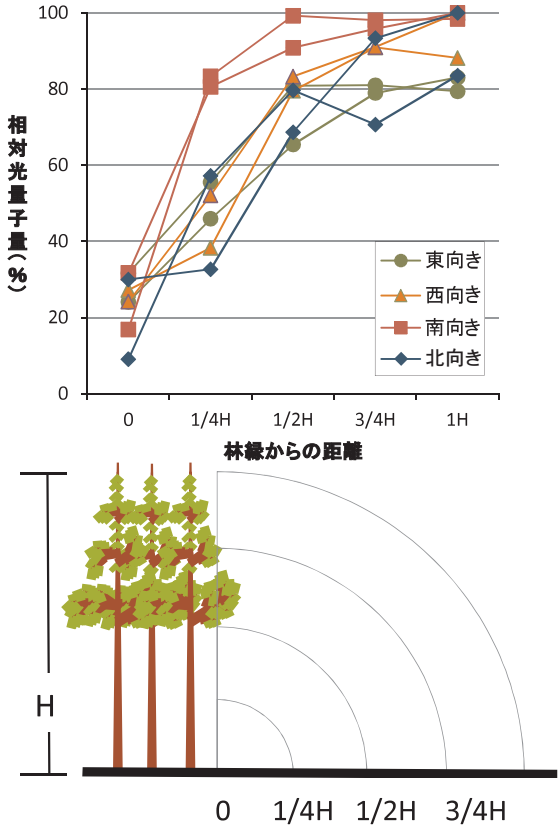
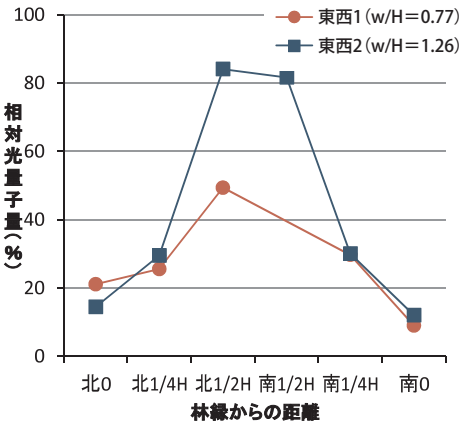
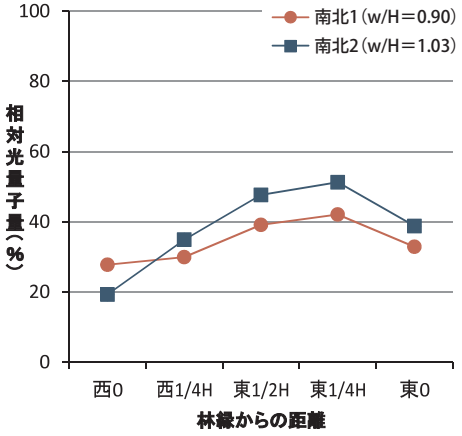


図 14　1方向がクロマツ林帯と隣接している開放地の林縁からの距離別相対光量子量





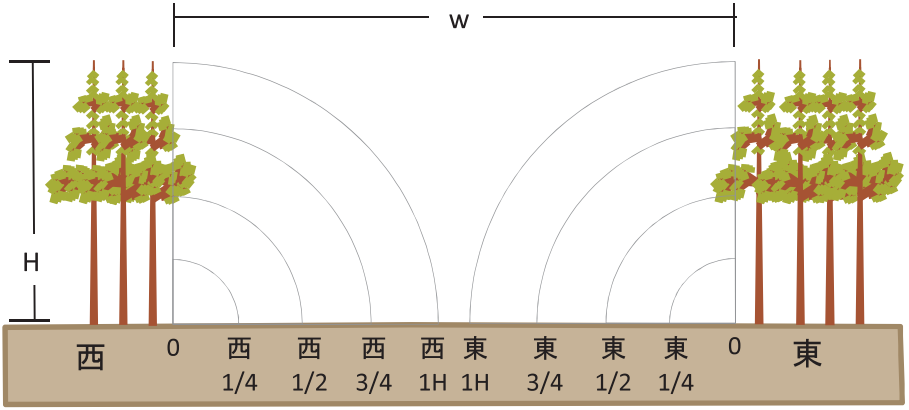


図 15　両側がクロマツ林帯と隣接している開放地の
林縁からの距離別相対光量子量

5.　クロマツ海岸林の樹高と林内光環境との関係

5.1.　目的

クロマツの下層に広葉樹を導入して二段林を造成するにあたり、クロマツ林内で広葉樹の生育に必要な光環境が確保されるのかを明らかにするために、秋田県内のクロマツ林内で光環境を調査した。

5.2.　調査方法

調査地は秋田県沿岸部のクロマツ海岸林であり、汀線から 100 ～ 600 m の風衝地から風背地に位置している。これら調査林分内に 6 m × 6 m、あるいは 10 × 10 m の方形プロットを 117 箇所設定し、プロット内に生育するクロマツの樹高・胸高直径・枝下高を測定するとともに、林内の光環境を測定した。光環境は、下層植生の影響をうけない地上 2.0 m の高さにおいて、裸地と林内を同時に測定し、裸地に対する林内の相対光量子束密度（rPPFD%）を算出した。測定は各プロットでランダムに 10 箇所実施し、その平均値をプロットの光環境とした。

適切に密度管理がなされて樹冠長率 50 %である場合の理想的な光環境を求めるため、平均樹冠長率（（樹高－枝下高）／樹高× 100 ）を算出し、rPPFD 値との関係を解析した。

5.3.　結果と考察

各プロットのクロマツは平均樹高 3.4 ～ 22.0 m、立木密度 100 ～ 5,833 本 /ha、平均樹冠長率 15.3 ～ 68.0 %であった。各プロットのクロマツ下層の rPPFD 値は 5.4 ～ 78.6 %の範囲にあった。クロマツの平均樹高 6 m 毎に区分して、平均樹冠長率と rPPFD 値の関係を解析した（**図 16**）。樹冠長率 50 %における rPPFD 値を各区分間で比較すると、樹高

6 m 以上 12 m 未満の林分が 15 %前後と最も暗く、樹高 6 m 未満の林分がそれに次いだ。12 m 以上の林分では rPPFD 値は高く、明るくなっていた。このことから、適正に密度管理がなされ、樹冠長率 50 %に維持した場合、植栽から樹高 6 m までは比較的暗く、その後樹高成長と林冠の閉鎖に従い林内光環境は徐々に低下し、樹高 9 m 前後で最も暗くなることがわかる。そして樹高が 12 m を越え、枝下高が高くなるに従い林内光環境は徐々に改善すると考えられた。

一方、落葉広葉樹の生育と生存に必要な光環境は相対照度で 15 %以上が目安とされている（小池、1988）。本研究の結果、樹冠長率 50 %で管理されたクロマツ林内の光環境は、最も暗くなる樹高 6 m ～ 12 m の時期においても 15 %程度である。Muraoka *et al.*（2001）により rPPFD 値と相対照度を同値と見なすと、少なくとも本数調整が適切におこなわれた林分では、どの樹高においても広葉樹の生育と生存が可能であると考えられる。特に樹高 12 m 以上のクロマツ林内においては、広葉樹の生育と生存に必要な光環境が十分に確保されていると考えられる。

したがって、クロマツ林の下層に広葉樹を導入するにあたって特別な密度管理は必要でなく、健全なクロマツ林を仕立てることを目指した密度管理を実施することで、下層の広葉樹に必要な光環境を確保できると考えられる。

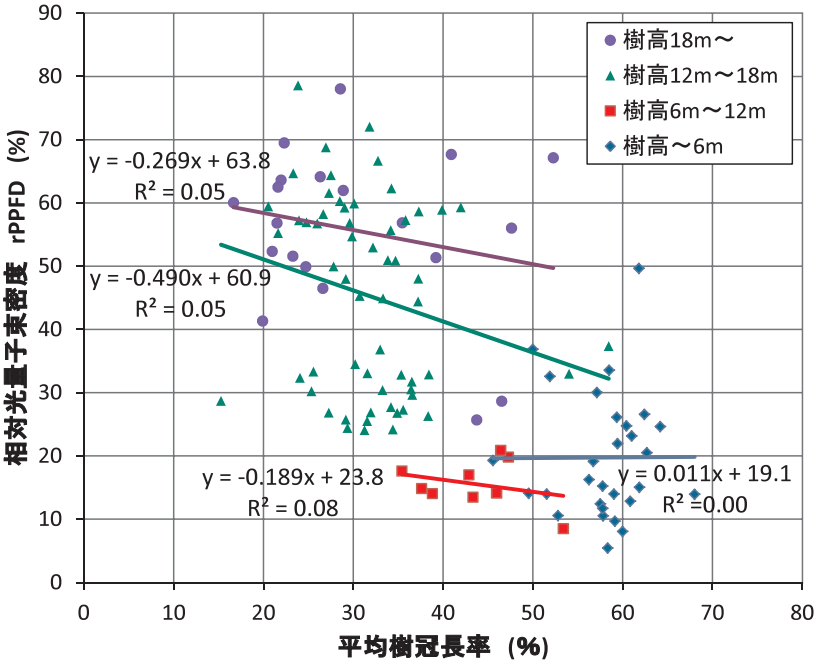


図 16　樹高区分毎の平均樹冠長率と光環境（rPPFD 値）との関係

6. 津波被害軽減効果に関する定量評価

津波の影響を考慮した海岸林の林相を検討するにあたって、林相が海岸林の波力減殺効果に及ぼす影響を定量的に評価するために、次のような林相を想定して数値シミュレーションを実施した。

- 適切に密度管理された健全なクロマツ海岸林
- 本数調整がされずに放置された過密な海岸林
- 適切に密度管理された健全なクロマツ林の下層に広葉樹を導入した海岸林

6.1. 定量評価の考え方

連続式と運動方程式から成る浅水方程式を津波氾濫流の数値シミュレーションの支配方程式とした。樹木の抗力項（Morison 式にもとづいた項）を運動方程式に加えることにより樹木の影響を反映させた。抗力項の中で用いられる抗力係数は、実物樹木を対象とした水理実験の結果から、幹枝の値と葉の値を次式により求めた。

$$C_{DW}=\frac{2F_{DW}}{\rho A_{PW}u^2} \qquad (1)$$

$$C_{DL}=\frac{2F_{DL}}{\rho A_{L}u^2} \qquad (2)$$

ここで、C_{DW} は幹枝の抗力係数、F_{DW} は幹枝の抗力（N）、ρ は水の密度（kg m^{-3}）、A_{PW} は幹枝の投影面積（m^2）、u は流速（m s^{-1}）、C_{DL} は葉の抗力係数、F_{DL} は葉の抗力（N）、A_L は葉の面積（m^2）を表す。野口ら（2014）の水理実験の結果から、幹枝の抗力係数は 0.8、クロマツの葉の抗力係数は 0.02、広葉樹の抗力係数は 0.02 とした。抗力係数

を用いた抗力の計算に必要となる幹枝の投影面積と葉の面積は、林分調査の結果から推定した。運動方程式と連続式は、差分法（staggered leap-frog 法）により解いた。

海底の地形は仙台市沖の地形を参考に設定した。陸地の地形は汀線から 1/200 の一様な上り勾配とした。入力津波は、汀線から 25000 m 沖から 35000 m 沖の範囲を正弦波半周期の形に隆起させることにより発生させた。

入力津波の規模は、「健全なクロマツ林帯」として設定する林帯の樹木が破壊されない範囲で最大のものとした。

計算は汀線に直交する方向に対して 1 m 間隔で、0.02 秒ごとに行ない、計算時間は陸上から海水が引くまでの様子が含まれるように設定した。

林帯の種類は、「健全クロマツ林」、「過密クロマツ林」、「健全クロマツ＋広葉樹林」の 3 つを設定した。林帯の範囲は、汀線から 100 m の距離から内陸側に向かって、50 m、100 m、200 m の 3 つを設定した。

6.2. モデルとした海岸林

数値シミュレーションの対象とした海岸林の諸元は次の通りである。

【健全クロマツ林】

- 樹高　：　12.0 m
- 形状比　：　60
- 胸高直径：　20 cm
- 立木密度：　730 本 /ha
- 枝下高　：　6.0 m

樹高 12.0 m は、東日本大震災で被災した仙台平野の海岸林をイメージしたもので、少なくともこの高さまでクロマツは成長することが期待

できる。海側の前縁部でも高いものではこの程度の樹高が確認されたことから、風衝林型は想定せず、均一な樹高とした。

形状比は、70を超えると気象害を被りやすくなることから、60とした。この時、胸高直径は、樹高と形状比から 20 cm となった。

立木密度は、小田（1992b）の相対密度管理表から、鬱閉する目安としての相対密度 55 %を想定して、形状比 60 のときの値を求めたものである。よく見られる海岸林と比べると疎林仕立てである。これは、波力減殺効果を安全側に算定する（過剰に算定しない）ためである。

枝下高 6.0 m は、健全な樹形の目安となる樹冠長率 50 %を想定して求めた。想定した立木密度と樹高からも、現実的に見込める値である。

【過密クロマツ林】

- 樹高　　：　10.1 m
- 形状比　：　106
- 胸高直径：　9.5 cm
- 立木密度：　4033 本 /ha
- 枝下高　：　6.7 m

健全クロマツ林と同等の樹高であるが、手入れ不良な海岸林の胸高直径、立木密度、枝下高を、山形県下藤崎海岸林における調査結果に基づいて設定した。

【健全クロマツ林 + 下層広葉樹】

- 樹高　　：　6.0 m
- 形状比　：　120
- 胸高直径：　5 cm
- 立木密度：　2500 本 /ha
- 枝下高　：　3.1 m　　（下層広葉樹の諸元）

広葉樹の樹高が、健全クロマツの枝下高（ 6.0 m）程度の樹高である秋田県浜山海岸林における調査結果に基づいて、広葉樹の立木密度、胸高直径、枝下高を設定した。

6.3. 林帯構造の違いによる波力減衰効果の変化

数値シミュレーションの結果によると、最大浸水高、最大線流量は、それぞれの林帯の種類において、林帯幅の増加に応じて減少した（**図 17、図 18**）。すべての種類の林帯が波力に耐えられると仮定すると、健全クロマツ林よりも過密クロマツ林の方が最大浸水高、最大線流量を抑える効果が大きかった。健全クロマツ林の下層に広葉樹林を導入した場合には、過密クロマツ林と同等の波力減殺効果が見られた。

なお、前述のように、数値シミュレーションに用いた津波の規模は、「健全クロマツ林」を構成する樹木が波力に耐えられる範囲で最大のものであった。このため、「健全クロマツ林」に比べて林帯を構成する樹木の幹が細い「過密クロマツ林」は、実際には波力に耐えられないと考えられる。

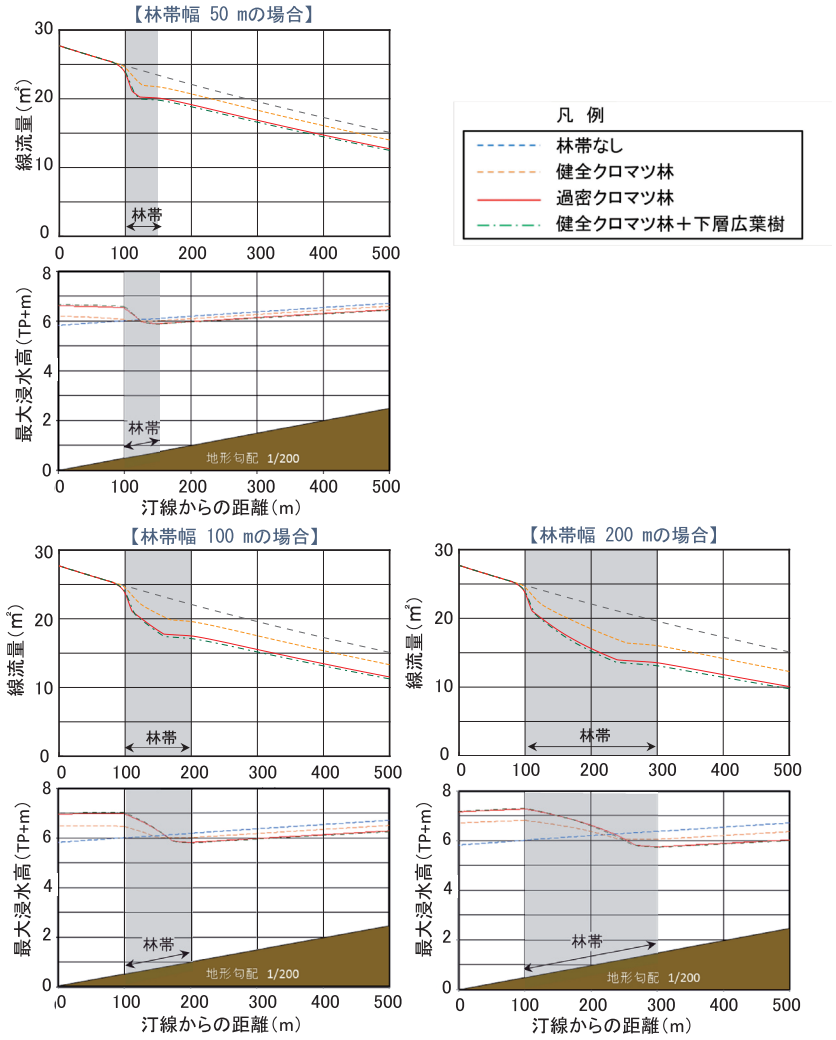


図 17　林帯幅ごと・林帯構造別の最大浸水高（下）と最大線流量（上）

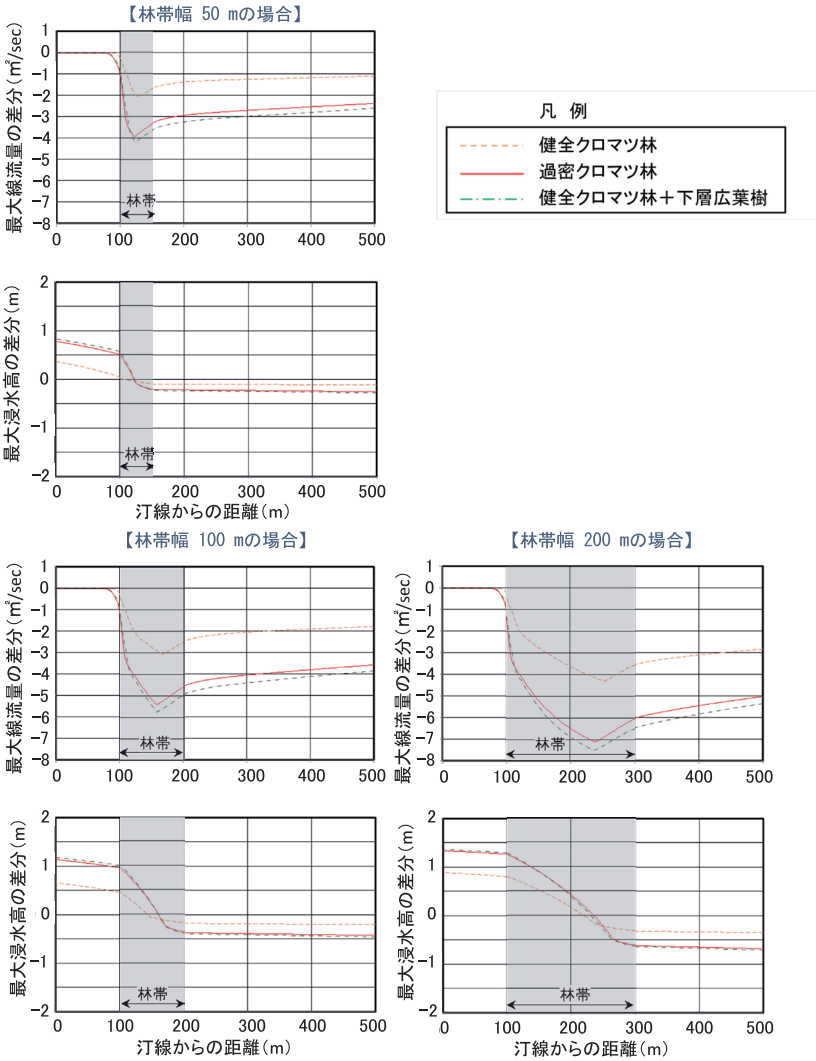


図 18　林帯幅ごと・林帯構造別の最大浸水高（下）と最大線流量（上）
林帯なしの場合との差分値

6.4. 林帯構造の違いによる津波到達時間遅延効果の変化

林帯による津波到達の遅延効果を調べるために、汀線から内陸側 400 m の地点までの所要時間と遅延時間を比較したところ、それぞれの林分において、林帯幅の増加に応じて遅延時間は増加した（**表 2**）。すべての種類の林帯の樹木が波力に耐えられると仮定すると、同じ林帯幅の健全クロマツ林と過密クロマツ林では、過密クロマツ林の方が 2 倍ほど長かった。健全クロマツ林の下層に広葉樹林を導入した場合には、過密クロマツ林と同等の遅延効果が見られた。

ただし、前述の通り、「過密クロマツ林」は波力に対する耐性が「健全クロマツ林」よりも大きく劣り、対象とした規模の津波によって破壊されると考えられる。

表 2　林分種類・林帯幅と遅延時間

林分の種類	林帯幅（m）	汀線到達から400m地点までの所要時間（秒）	林帯なしからの遅延時間（秒）
林帯なし	0	46.8	―
健全クロマツ林	50	49.9	3.1
	100	52.2	5.4
	200	55.8	9.0
過密クロマツ林	50	53.0	6.2
	100	57.7	10.9
	200	65.4	18.6
健全クロマツ林＋広葉樹	50	52.3	5.5
	100	56.6	9.8
	200	63.1	16.3

■おわりに　ー　既存の技術体系の中での位置づけ

海岸林造成の技術体系は、林野庁監修の「治山技術基準解説 第3編 防災林造成編」（2004 発行年）の「第3章 海岸防災林造成」（以下、技術解説）に整理されている。しかしながら、必ずしも津波を想定したものとはなっていない。そこで、それを補うものとしてプロジェクト研究「津波被害軽減効果の高い海岸防災林造成技術の開発」（平成 24 ～ 26 年度）で津波の影響を考慮した海岸林造成法に取り組んできた。本冊子はその成果を広く知ってもらうために企画された。

本冊子の内容を既存の技術体系と比べると、1章は、技術解説の第3節「海岸防災林造成の計画」を、「2.2 生育基盤造成」は 4-5-2「盛土工」を、それぞれ津波被害軽減機能を考慮した視点から補足したものである（**表3**）。「2.1 保育」は 4-6-4-7「保育」を補足するとともに、植え直しについても言及を試みた。「2.3 広葉樹を活用した二段林造成手法」は、波力減殺効果を高めるためにクロマツ海岸林の下層に広葉樹を導入する際のクロマツ上層木の扱いに関するもので、4-6-4「植栽工」に新たに追加される内容となっている。

これらの内容は現場技術者に馴染みのある技術解説に倣って構成されているが、技術として認められるには、「はじめに」にも記したように、現場での実証が必要である。批判的にご活用いただきたい。

表 3　既存技術体系の中での位置づけ

現行技術基準の目次（抜粋）	本冊子で補った内容（津波を想定した造成）	本冊子の該当箇所
第 1 節　海岸防災林造成の目的	−	−
第 2 節　調査	−	−
第 3 節　海岸防災林造成の計画 3-1　総説 3-2　計画規模 3-3　海岸防災林造成の工種	津波を考慮した海岸林造成のポイントを整理	1章
第 4 節　海岸防災林造成の設計 4-1　総説 4-2　測量 4-3　設計高潮位 4-4　防潮工 4-5　砂丘造成 4-5-1　堆砂工	−	−
4-5-2　盛土工	生育基盤盛土についての考え方を整理	2.2
4-5-3　覆砂工 4-5-4　防浪工 4-6　森林造成 4-6-1　防風工 4-6-2　排水工 4-6-3　静砂工	−	−
4-6-4　植栽工 4-6-4-1　植栽計画 4-6-4-2　植栽樹種 4-6-4-3　植栽本数 4-6-4-4　植栽方法	広葉樹を活用した二段林造成手法について整理	2.3
4-6-4-5　施肥及び客土 4-6-4-6　埋わら及び敷わら	−	−
4-6-4-7　保育	過密林分の取扱い等、林帯維持及び改良手法について整理	2.1

参考文献

金子智紀・石田秀雄・金澤正和（ 2000 ）秋田県沿岸南部におけるクロマツの冠雪害について．東北森林科学会誌，5，97-100.

金子智紀・田村浩喜（ 2007 ）広葉樹を活用した海岸防災林造成技術の開発 . 秋田県森林技術センター研究報告第 17 号， 37-60.

苅住昇（ 1981 ）樹木根系図説．誠文堂新光社，250-252.

小池孝良（ 1988 ）落葉広葉樹の生存に必要な明るさとその生長に伴う変化．林木の育種，No.148，19-23.

森麻須夫（ 1987 ）保育更新法（酒田クロマツ海岸林），環境変化に対応した海岸林の環境保全機能の維持強化技術の確立に関する研究．研究成果 85，農林水産技術会議事務局，102-103.

Muraoka, H., Hirota, H., Matsumoto, J., Nishiura, S., Tang, Y., Koizumi, H.,Washitani, I. (2001) On the convertibility of different microsite light availability indices,relative illuminance and relative photon flux density. Functional Ecology, 15 , 798-803

野口宏典・鈴木覚・坂本知己（ 2014 ）実物樹木を対象とした水理実験によるクロマツの水力学的抵抗特性の評価．海岸林学会誌，13 ，45-50.

農林省山林局 [編]（ 1935 ）津浪災害豫防林（防潮林）造成に關する技術的考察．農林省山林局，22pp.

農林水産技術会議（ 1987 ）環境変化に対応した海岸林の環境保全機能の維持強化技術の確立に関する研究．農林水産技術会議事務局研究成果 185，91.

小田隆則（ 1992a）クロマツ林の林況．「日本の海岸林」，ソフトサイエンス社，村井宏・石川政幸・遠藤治朗・只木良也編，399-402.

小田隆則（ 1992b）クロマツ林の密度管理.「日本の海岸林」、ソフトサイエンス社、村井宏・石川政幸・遠藤治郎・只木良也編，402-405.
小田隆則（ 1992c）生理・気象被害と防除技術.「日本の海岸林」、ソフトサイエンス社、村井宏・石川政幸・遠藤治郎・只木良也編，441-453.
森林総合研究所（ 2011 ）クロマツ海岸林の管理の手引きとその考え方―本数調整と侵入広葉樹の活用―
森林総合研究所（ 2014 ）クロマツ海岸林に自然侵入した広葉樹の活用方法―松枯れから防災機能を守るための広葉樹林化―， 17-45.
渡部公一・海老名寛・古川和史・堀米英明・大築和彦・上野満・宮下智弘・坂本知己（ 2014 ）2011 年東北地方太平洋沖地震津波による仙台平野の海岸林被害と地下水深度及び立木サイズとの関係．海岸林学会誌，13，7-14.
柳田友隆（ 2014 ）土壌の対策．最新樹木医の手引き，改訂 4 版，財団法人日本緑化センター，563.

津波被害軽減機能を考慮した海岸林造成の手引き

ー 海岸林を造成・管理する実務者のために ー

独立行政法人　森林総合研究所　東北支所
〒 020-0123　岩手県盛岡市下厨川字鍋屋敷 92 番 25 号

編集・発行　東北支所
発行日　2015（平成 27）年 2 月 20 日
お問い合わせ先　編集刊行係
電話 029-829-8135
e-mail：kanko@ffpri. affrc. go. jp

※本誌掲載内容の無断転載を禁じます。

印　刷　永代印刷株式会社
岩手県盛岡市北飯岡一丁目 8-30

この印刷物は、印刷用の紙にリサイクルできます。