



ワンポイント解説  
海岸林造成技術の  
高度化に向けて



国立研究開発法人 森林総合研究所 東北支所  
Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute

# 1. 刊行にあたって

平成 23 年東北地方太平洋沖地震による巨大な津波は、海岸防災林（以下、海岸林）にも甚大な被害をもたらした。国立研究開発法人（以下（研）と略す）森林総合研究所では、津波直後から、関係機関と協力して、林野庁の委託事業調査（平成 23 年度）など<sup>1,2,3</sup>を通して、海岸林の津波被害ならびに海岸林が津波被害を軽減した実態を明らかにしてきた。（研）森林総合研究所の交付金プロジェクト「東日本大震災で被災した海岸林の復興技術の高度化」（平成 24～27 年度）は、これらを引き継いで被災した海岸林の再生を科学技術面から支援するためにおこなわれた。本冊子は、交付金プロジェクトの成果を海岸再生に携わる人々に届けるために作成したものである。参考にしていただければ幸いである。

本プロジェクトを立ち上げたのは、今回の海岸林の再造成にあたって、これまでの海岸林造成ではあまり必要とされなかった次のような知見が求められたからである。すなわち、津波による幹折れ・根返りを免れた樹木のその後の衰弱の原因解明と再造成にあたっての留意点、短期間に大面積で再造成を進めるにあたって懸念された苗木不足への対応としての、植栽効率・苗木活着率の向上ならびに植栽本数（植栽密度）の見直し、そして、単なる再造成ではなく、波力に対して強く、津波被害軽減効果の高い目標林型の提示<sup>4</sup>である。今回得られた成果を、これまでの海岸林造成の技術体系に組み込むことによって、より着実な海岸林の再生が期待できると考えている。

本冊子では、体系的な解説書の体裁ではなくワンポイント解説書の形をとり、海岸林の再生にあたって、現場を預かる人々から出された疑問に答える形にした。そのため、解説テーマ相互のつながりと、それらが海岸林の再生にどのように関係するのかが分かりにくいことから、冒頭に「海岸林再生の技術的課題」という解説をおいて、海岸林の津波被害と海岸林の果たした機能を振り返りながら、海岸林再生の中で各解説テーマを位置づけた。なお、海岸林再生事業ではコンテナ苗が積極的に使われているが、海岸林造成現場で本格的に使われるのは今回が初めてである。海岸林造成においてはまだ馴染みが薄いので、ワンポイント解説とは別に、巻末にコンテナ苗について解説を載せた。

研究担当者を代表して 坂本知己

---

<sup>1</sup> 林野庁平成 23 年度震災復旧対策緊急調査「海岸防災林による津波被害軽減効果検討調査」

<sup>2</sup> 森林総合研究所交付金プロジェクト平成 23 年「東日本大震災緊急調査」

<sup>3</sup> 平成 23 年度新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「津波で被災した海外林の赤枯れ現象の実態把握と原因解明」

<sup>4</sup> 提示された目標林型への誘導方法については、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）による「津波軽減効果の高い海岸防災林造成技術の開発」を対象とした。

## 謝 辞

研究を推進するにあたり、東北森林管理局、同三八上北森林管理署・宮城北部森林管理署・仙台森林管理署・仙台海岸治山事業所、近畿中部森林管理局石川森林管理署、青森県農林水産部林政課、同三八地域県民局地域農林水産部・上北地域県民局地域農林水産部の関係各位のほか、岩手県林業技術センター 成松眞樹氏・蓬田英俊氏、岩手県沿岸広域振興局農林部 高橋利光氏、大槌町大槌郵便局 小笠原浩二氏、元岩手県林業技術センター 小澤洋一氏、元宮城県林業技術総合センター 水田展洋氏を始めとする多くの方々にお世話になった。また、山形大学農学部教授 林田光祐氏には、外部評価委員として4年間丁寧にご指導いただいた。皆様に深謝いたします。

研究担当者一同

### 研究代表者(主査)

高橋正通(～H27.3:研究コーディネータ、現 企画部長)

坂本知己(H27.4～:東北支所地域研究監)

### 研究担当者

津波被害地の残存木・新規植栽木の生育阻害要因の解明と維持管理手法の開発

中村克典、小谷英司、篠宮佳樹、小野賢二、相川拓也、久保田多余子、安田幸生、八木橋勉(東北支所)、平井敬三(立地環境研究領域)、市原優(関西支所)、木村公樹(青森県産業技術センター 林業研究所)

東日本大震災で被災した海岸林の復興技術の高度化

明間民央(森林微生物研究領域)

クロマツの抵抗特性を反映した数値解析モデルによる海岸林目標林型の解明

野口宏典(気象環境研究領域:～H27.9、東北支所:H27.10～)

海岸林造成の効率化技術の開発

坂本知己(気象環境研究領域:～H26.3、東北支所:H26.4～)、落合幸仁(～H27.3)・山田健(林業工学研究領域)、小倉晃(石川県農林総合研究センター 林業試験場)・渥美幸大(石川県農林総合研究センター 林業試験場:H27.4～)

以上、交付金プロジェクト

東北森林管理局との協定による「仙台海岸林におけるコンテナ苗植栽時期試験」(平成26～27年度)

八木橋勉・中村克典・齋藤智之・松本和馬(～H27.3)・八木貴信・柴田銃江(～H27.3)・野口麻穂子・駒木貴彰(東北支所)

## 目 次

1. 刊行にあたって	1
2. 海岸林再生における技術的課題	5
3. ワンポイント解説	9
3.1. 樹木はどの程度の津波まで耐えられるか？	10
3.2. 津波に耐えた木はその後どうなった？	12
3.3. マツやスギの赤枯れはなぜ起きたのでしょうか？	14
3.4. 赤枯れしにくい樹種は？	16
3.5. 津波で菌根菌はどうなったのか？	18
3.6. 津波は松くい虫被害を拡大させたか？	20
3.7. 海岸林は津波をどの程度弱められるのか？	22
3.8. 津波を弱めるのに効果的な海岸林の姿は？	24
3.9. 森林土壌の除塩は必要か？	26
3.10. 赤枯れしにくい海岸林をつくるには？	28
3.11. 海岸の砂地に広葉樹を植えても育つの？	30
3.12. 海岸林造成にコンテナ苗を使うメリットは？	32
3.13. クロマツコンテナ苗は海岸でも時期を選ばずに植えられるのか？	34
3.14. コンテナの形状の違いは何か影響があるのか？	36
3.15. 盛土の表面に水溜まりができることがあるのはなぜか？	38
3.16. 山砂で造った生育基盤に菌根菌を人為的に導入できるのか？	40
3.17. クロマツの植栽本数を標準（10,000本/ha）より少なくしても大丈夫か？	42
3.18. 植栽本数（植栽密度）を減らすことの利点は？	44
4. コンテナ苗の基礎知識	46
5. 用語解説	51



## 2. 海岸林再生における技術的課題

津波被害地における海岸林の再生では、単なる海岸林の再造成に止まらず、これまでより津波に対して強く持ちこたえられ、津波軽減機能を効果的に発揮できる海岸林を早期に大面積にわたって再造成することが求められたため、これまでに確立した海岸林造成技術に加えて新たな取り組みが必要になった（図1）。各ワンポイント解説に先立って、本プロジェクトで対象とした課題について概説する。

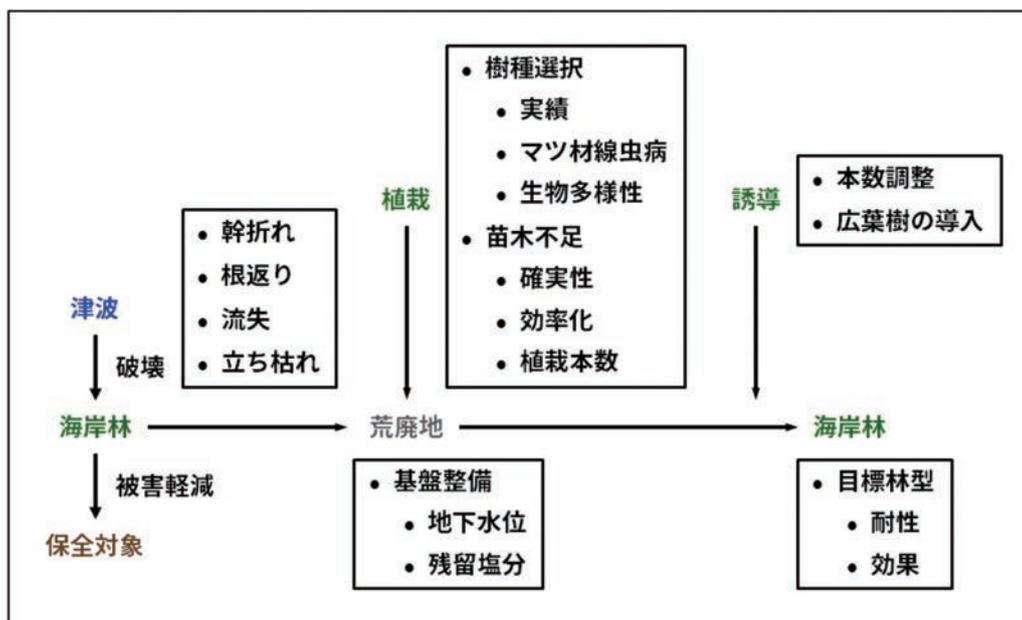


図1 海岸林再生にあたっての技術的課題

### 2.1. 目標林型 (3.1、3.7、3.8 参照)

海岸林は、これまで構成樹種や立木密度といった林相の違いが防災効果に与える影響を考慮して仕立てられていたわけではなく、適切に管理されたクロマツ林を現実的な目標としていた。それは、砂丘地が樹林で覆われていれば、林相に関わらず飛砂の発生は抑えられることと、クロマツが砂丘地という生育環境へ高い適応性を持つことによるものである。なお、防風範囲は樹高が高い方が広がるが、最終的な樹高は、樹種と生育環境、林帯幅の影響が大きく、随意に変えられるわけではない。従って、構成木の健全性を保つための密度管理が適切になされたクロマツ海岸林は、与えられた林帯幅において飛砂や潮風に対する防災機能を実用上最大限に発揮している。

これに対して、津波に対する機能については、立木密度によってその効果が異なる。すなわち、今回の津波による海岸林の被害調査から、同じ場所であれば、少なくとも幹折れは直径が大きい方が少なく（田村、2012；渡部ほか、2014）、津波に対する耐性を考えると大径木の方が有利である。一方、津波に対する抵抗性を考えると密に仕立てる方が津波に対する抵抗物が多いので有利であるが、大径木を密に仕立てることはできない。端的に言えば、小径木を密に仕立てる方がよいのか、疎であっても大径木を仕立てる方がよいのか問われる。

この問題を定量的に検討するために、本プロジェクトでは数値シミュレーションを用いた。海岸林造成にあたって数値シミュレーションを用いたのは、少なくともわが国では初めての試みである。数値シミュレーションに用いる樹木の特性値を得るために、新たに水理実験、現地引き倒し試験を実施した<sup>1</sup>。

なお、これから再生する海岸林においてもわが国の海岸林が抱える問題、すなわち、マツ材線虫病、過密化、前砂丘の維持管理に確実に対応することが重要なことは変わらない。

## 2.2. 津波の後の立ち枯れ (3.2、3.3、3.10 参照)

津波に耐え生き残った海岸林の中に、その後、葉を褐変させ衰弱・枯死するものが見られた。波力に耐えた樹木が生き残るか枯死するかで津波後の海岸林の防災機能は大きく異なる。新たに再生させる海岸林には、そのことも考慮する必要があり、津波後の立ち枯れの原因を明らかにした。

## 2.3. 残留塩分 (3.9 参照)

津波が侵入した農地では除塩が行われた。一方、海岸林には除塩を実行する際に必要となる大量の真水を灌漑し排水させる設備が整っていないので、農地と同様な除塩は現実的ではなく、降水による自然の除塩に頼らざるを得ない。どのくらいの期間で自然に除塩が進み、植栽が可能な土壌となるのかを確認するために、土壌中の残留成分とその時間変化について明らかにした。

## 2.4. 樹種選択 (3.4、3.6、3.11 参照)

津波に耐えた樹木の子後の生育や衰退の状況を調べた結果、クロマツとアカマツとに差が見られたことから、両樹種を対象とした耐塩水性の現地試験を行った。一方、マツ材線虫病対策や多様な森づくりの点から、海岸林の再生にあたっては広葉樹の導入が求められている。今後の広葉樹導入にむけて、現地植栽試験を行った。

## 2.5. 苗木不足に対して

大面積に短期間で海岸林を造成するにあたって、苗木が不足することが被災直後から指摘されていた。また、作業が植栽適期に集中することが予想された。そのため、植栽本数（密度）の見直し、苗木生産の効率化、活着率の向上、植栽作業の効率化、植栽期間の分散が課題になった。

---

<sup>1</sup> これらの試験には、本プロジェクトだけでなく、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」：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）、ならびに農林水産省・食品産業科学技術研究推進事業（農林水産省、平成 26 年度）でも取り組んだ（森林総合研究所、2015）。

### 植栽本数の見直し (3.17、3.18 参照)

植栽本数は、これまで10,000本/haを標準とし、条件によっては減らすことができるとされていたが、具体的にその条件を判断する方法は示されてこなかった。そのため、植栽本数を減らしている現場がある一方で、従来通りの10,000本/ha植えが行われている現場がある。そこで、すでに本数を減らして植えられている現場で気象条件と生育状況を調査することで、積極的に本数を減らすための根拠を明らかにすることとした。

### コンテナ苗の利用 (3.12、3.13、3.14 参照)

苗木生産の効率化、活着率の向上、植栽作業の効率化、植栽期間の分散については、コンテナ苗の使用が有効と考えた。そこで、津波被害跡地に現場の砂で盛土した植栽地を作り、クロマツコンテナ苗の使用可能性を確認した<sup>1</sup>。

なお、本プロジェクトとは別に、東北森林管理局と森林総合研究所東北支所との間で協定が交わされ、コンテナ苗の植栽時期別の試験が行われることになった。こちらは、山砂を用いた盛土に植えられた。本書にはその結果も合わせて掲載した。

### 菌根菌の活用 (3.5、3.16 参照)

クロマツが海岸砂地での適性を持つ理由のひとつに菌根菌との共生関係がある。海岸林の再生にあたっては、津波によって菌根菌が失われたことが心配された。また、今回の海岸林造成で広く作られている盛土では、材料が山砂であるために菌根菌を欠いていることが考えられた。そこで、活着率の向上とその後の着実な生育のために、人為的に苗木に菌根菌を付ける技術の開発とその有効性の検証を行った。

## 2.6. 今後の課題

### 植栽基盤盛土 (3.15 参照)

津波では根返りした樹木も少なくなかったが、根返りの原因は必ずしも波力だけではなく、地盤が洗掘されたことと、浅い根系層が問題となった。浅い根系層の原因として、高い地下水位による有効土層の薄さが指摘された（田村、2012；渡部、2014）。それまでの強風に耐えてきた根系であったが、今回のような規模の津波に対する耐性を求められると、海岸防災林再生事業では、被害跡地にそのまま植え直すわけにはいかず、根系を深く伸長させられるように盛土することとなった。

理想的には、砂丘地の砂を使って盛土したいところであったが、今回の被災地域は盛土に

---

<sup>1</sup> 本プロジェクト開始時点において海岸林造成現場ではコンテナ苗は使われておらず、本プロジェクトの成果をもって積極的な導入を提言するつもりであった。実際は、プロジェクトの終了を待たずして、現場ではコンテナ苗が中心になった。これは、造成初期に植栽されたクロマツ（裸苗）が広く衰弱・枯死した際、本プロジェクトでの植栽試験や造成現場で試験的に植栽されたコンテナ苗の活着・生育の良好な経過が参考にされたと認識している。このため、本プロジェクトの成果は、コンテナ苗導入の妥当性を支援するデータを示すものと位置づけられる。

使える砂を用意できるほど砂丘が発達していない。そこで、近隣地域からの山砂が使われている。

山砂で盛土をしたところ、透水性が悪く盛土表面に水が溜まる現象と植え付けに支障が出るほどの盛土の硬さが問題となった。透水性の悪さは、一部で根腐れを起こしたとされる。また、硬い表土では、効率的に植えられるコンテナ苗の特性が活かさない。この状況を改善するために、現場では極力締め固めないような盛土手順の検討や、盛土後の耕耘による土性改良が行われており、（研）森林総合研究所でも東北支所を中心に研究を実施している。

### 広葉樹の活用

クロマツは、海岸林を造成するにあたって最も適した樹種であるが、マツ材線虫病<sup>巻木ii</sup>の問題を抱えているので、樹林状態を維持するという防災上の点と生物多様性等の点とから、今後、積極的な広葉樹の活用も必要と考えられる。海岸林の広葉樹林化にあたっては、適切な樹種選択、導入時期、求められる土壌条件、自然侵入に委ねられる可能性、導入本数（密度）、本数調整の必要性、クロマツに比べた樹高の低下程度の予測などの課題がある。このうち、自然侵入した広葉樹の活かし方については提言がまとめられているが（森林総合研究所、2011；森林総合研究所、2014）、それ以外については今後の課題である。

### 性能評価

これまで海岸林の防災機能の評価は一般的なものに止まっており、個々の海岸林の機能を定量的に評価する場面は限られてきた。しかしながら、津波被害軽減のための多重防御のひとつとして海岸林が位置づけられるようになったことから、他の防災施設との関係において個々の場面で海岸林の性能を定量的に明らかにすることが求められるようになった。今回のプロジェクトは、海岸林の津波被害軽減効果を林相に応じて算定できるようにした点で海岸林の防災的な機能評価を大きく進展させた。しかしながら、数値シミュレーションの信頼性の点で課題を残している。水流に対する樹木の抵抗特性や波力に対する耐性（根返りのしにくさ、折れにくさ）などの樹木の特性値についてはまだ知見が不足しているからである。また、海岸林の再生事業では盛土に植栽されているが、この場合、波力に対する根返り耐性についてこれまでの砂丘地での値がそのまま使えるかを明らかにする必要がある。

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 第2期中期計画成果 24, 55pp

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法－松枯れから防災機能を守るための広葉樹林化－．森林総合研究所 第3期中期計画成果 17, 45pp

森林総合研究所（2015）津波被害軽減機能を考慮した海岸林造成の手引き－海岸林を造成・管理する実務者のために－．第3期中期計画成果 24, 53pp

田村浩喜（2012）仙台平野の海岸林における根返り被害．森林科学, 66, 3-6

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

坂本 知己（東北支所）

### 3. ワンポイント解説



### 3.1. 樹木はどの程度の津波まで耐えられるか？

#### < 回 答 >

樹種が同じであれば、基本的に幹が太いほど強さは増します。例えば、クロマツの場合、胸高直径 20 cm の場合 5.0 m 程度の浸水深まで、胸高直径 10 cm では 3.5 m 程度の浸水深までの津波に耐えられると推定されます。

#### < 解 説 >

津波による樹木の物理的被害は、根返りと幹折れに大別できます（写真 1、2）。根返りに対する耐性を調べるために引き倒し実験（写真 3）を、幹折れに対する耐性を調べるために曲げ破壊実験（写真 4）を行いました。

樹木の引き倒し実験からは、立木を根返りさせるために必要な根元にかかる回転モーメント<sup>1</sup>の大きさは樹種によって異なり、同じ幹の太さでは、クロマツよりもエゾイタヤ、タブノキ、ミズナラ、ケヤキといった広葉樹の方が根返りしにくいことがわかりました（図 1）。また、同じ樹種では幹の太い個体ほど根返りしにくくなることがわかりました（図 1）。根返りへの耐性の樹種や太さによる違いは、根の分布や強度が樹種によって異なっていることや、同じ樹種では幹の太い個体ほど根の量も多くなることが要因だと考えられます。



写真 1 津波による幹折れの例



写真 2 津波による根返りの例

幹折れへの強さは、幹の太さと曲げ強度から推定することができます。クロマツの幹を対象とした曲げ破壊実験から、クロマツ幹の生材の曲げ強度は  $30 \text{ N/mm}^2$  程度であることがわかりました。この曲げ強度を用いて幹折れが発生する回転モーメントを胸高直径ごとに求め、根返りが発生する値と比較すると、幹折れの方が少し大きい値になりました（図 2）。つまり、

<sup>1</sup> 回転モーメント：物体に回転を生じさせるような力の性質を表す量。ここでは、根元を中心として立木を回転させて引き倒そうとする力の量を表す。



写真3 引き倒し実験の様子



写真4 曲げ破壊実験の様子

幹折れよりも根返りの方が発生しやすいと推定されました。しかし、根返りと幹折れの差は大きくはなく、根がよく発達した個体の場合などには、幹折れが発生することが考えられます。

樹木の引き倒し実験と曲げ破壊実験の結果、過去の被害状況、津波氾濫流の数値シミュレーションなどから、クロマツは、胸高直径 20 cm だと 5.0 m 程度の浸水深まで、胸高直径 10 cm だと 3.5 m 程度の浸水深までの津波に耐えることができると推定されます。

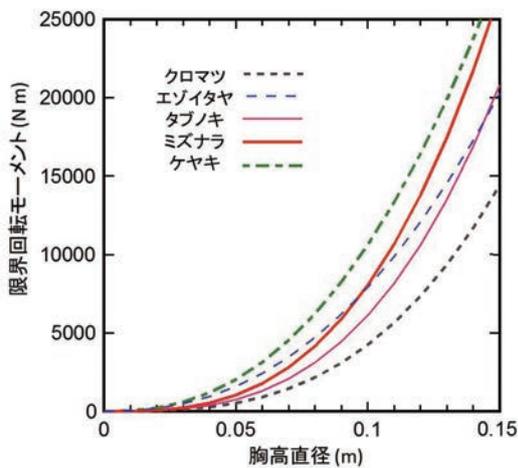


図1 樹種ごとの根返り限界回転モーメントと胸高直径の関係

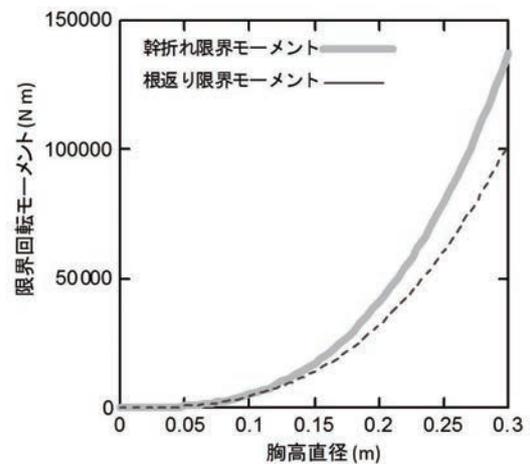


図2 クロマツの根返りと幹折れの限界回転モーメントと胸高直径の関係

### 《より詳しく知りたい方のために》

野口宏典・鈴木覚・南光一樹・竹内由香里・金子智紀・新田響平・渡部公一・坂本知己 (2014) 海岸砂丘地に植栽された広葉樹およびクロマツの倒伏抵抗特性の引き倒し試験による評価, 海岸林学会誌, 13 (2), 59-66.

野口 宏典 (東北支所)

## 3.2. 津波に耐えた木はその後どうなった？

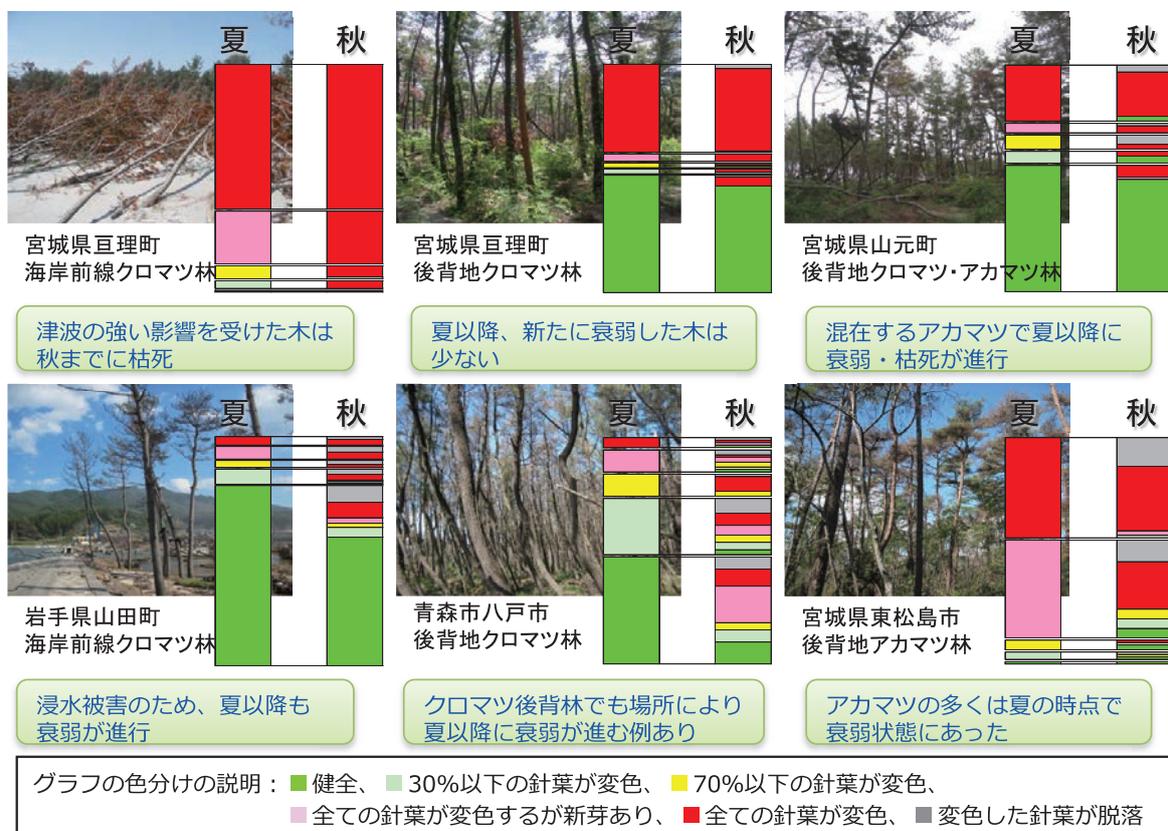
### < 回 答 >

海水に浸かってしまったことによる生理障害（塩害）で衰弱、枯死してしまった木も少なくありませんでした。しかし、海岸林の主要な構成樹種であるクロマツは多くが生き残り、松林として維持されています。

### < 解 説 >

今回の津波により、東北地方太平洋沿岸の海岸林は「壊滅的」と言われるような激しい被害を受けましたが、津波に耐えて残った木も実は多くありました。しかし、それらの木が衰退するのか、そのまま生き残ることができるのかは不明でした。そこで、被害を受けた海岸林に残ったクロマツ、アカマツの生死を被災当年夏（6～7月）から追跡しました（図1）。

クロマツでは、根元から傾斜したり、折れ曲がったりという激しい樹体の損傷を受けた小径木や、被災前から他の木に被陰されていた木は、当年夏までにほとんどが枯れてしまいま



した。これらは、津波で生じた樹体損傷や光不足で弱っていたところに塩害（3.3 参照）の影響が加わって枯死に至ったと考えられます。また、大径木でも地盤沈下や堤防決壊のため根元に海水だまりができたような木は早期に枯死しました（3.10 参照）。しかし、このような悪条件がなければ塩害による枯死の発生は少なく、クロマツ林が維持されています（写真1）。ただし、せっかく津波の被害を乗り越えたクロマツ林でも、その後松くい虫被害が広がって木が枯れてしまったり（3.7 参照）、場所によっては復興工事のため伐採されてしまうこともありました。

東北地方太平洋沿岸では、海岸前線近くまでアカマツが広く分布しています。しかし、アカマツの海水への耐性は高くありません（3.4 参照）。今回の調査でも、被災当年夏にはほとんどの木が枯れるか、葉の量が減って衰弱しており、衰弱木の多くはそのまま枯死しました（図1）。一方、この調査地に近い松島のアカマツは多くが生き残りました。崖地のため、侵入した海水がすぐに排水されたことが理由と考えられます。

マツ以外の樹種では、震災当時にまだ開葉していなかった落葉樹のサクラ類やケヤキなどでは被害が少なかったようです。また、各地の海岸で旺盛な繁殖が問題になっているニセアカシアは、被災後に高木が枯れたり、低木が津波に運ばれた砂に埋もれたりして一時衰退したように見えてましたが、萌芽等により勢力を回復してきています。湛水や排水不良などの極端な悪条件がない限り、津波に耐えた樹木はその場で生き続け、海岸林の維持、再生に貢献しています。



写真1 津波被害地に造成された植栽地に隣接する残存クロマツ林（青森県三沢市、2015年10月）

#### 《より詳しく知りたい方のために》

小野賢二・平井敬三（2012）東北地方太平洋沖地震による大津波を受けた三陸沿岸のスギ林土壌における塩害とその後の土壌環境の変化：降雨に伴う自然排水がもたらす除塩の効果。森林総合研究所研究報告 12(1): 41-47.

中村克典（2012）津波で枯れた松は松くい虫被害を拡大させるのか？海岸林の再生に向けて：森林総合研究所東北支所「特別シンポジウム要旨」パンフレット（森林総合研究所東北支所 編）、森林総合研究所東北支所 pp8-9.

中村克典・小谷英司・小野賢二（2012）津波被害を受けた海岸林における樹木の衰弱・枯死。森林科学 66: 7-12.

中村 克典（東北支所）

### 3.3. マツやスギの赤枯れ<sup>巻末i</sup>はなぜ起きたのでしょうか？

#### < 回 答 >

津波によって持ち込まれ土壌に残留した大量の塩分が赤枯れの原因です。

#### < 解 説 >

発災後、三陸沿岸の森林を踏査したところ、被災直後には生き残ったと思われた樹々の針葉が、2011年5月以降、次第に赤く変化する「赤枯れ」被害が広がっていることが確認されました（写真1）。また、赤枯れの発生範囲は津波が到達した箇所とほぼ一致していることが分かりました。マツやスギの赤枯れは、同年5月上旬までは認められなかったもので、暖かくなって樹木が成育を開始した時期から急に広まったと考えられました。

森林に押し寄せた津波は、林床の植物や落葉層を流し去り、一部では土壌を浸食し、樹木の根が洗掘（波に洗われて根が露出）されたところもみられました（写真2）。斜面上の森林でも、海砂や被災した建材や家具などの漂流物が地表にたまりました。一方、海岸線近くの平地のマツ林では、地盤沈下によって根が水没してしまった箇所もみられました。このように、津波の襲来を受けた森林の土壌は大きな影響を受けました。

赤枯れが発生した森林の土壌を採取し、その化学的性質を分析したところ、海水と海砂がもたらしたナトリウムなどの塩分が多量に集積し、pHや電気伝導度（EC、塩分が多いほど高い値となる）が上昇していることがわかりました（図1）。過剰な塩分を含む土壌では樹木の根が水分を吸収できなかつたり、必要な養分の吸収が阻害されたりした可能性があります。土壌に集積した塩分のこれらの影響によって、広範囲に赤枯れが発生し、一部の木々は枯死したと考えられました。

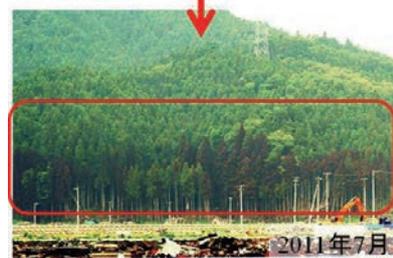


写真1 「赤枯れ」が発生したスギ林

津波直後は健全に見えたが、次第に針葉が赤くなり枯れていった。

陸前高田市

大槌町

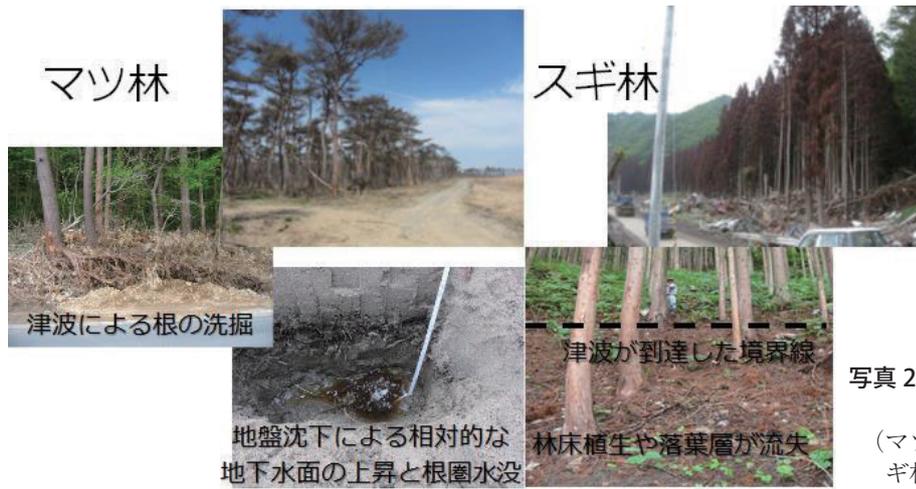


写真2 津波が襲来した海岸林の様子

(マツ林：宮城県東松島町、スギ林：岩手県釜石市)

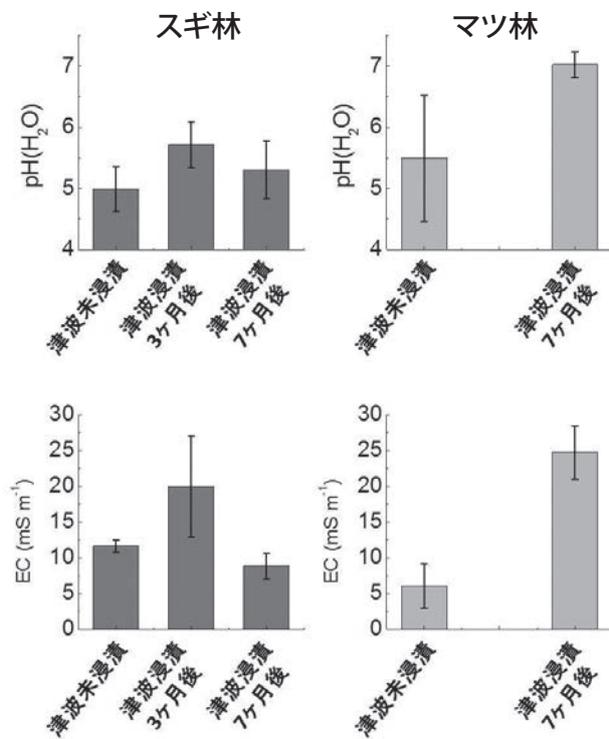


図1 大津波によって海水をかぶった森林の表層土壌の化学性の変化

上段：土壌 pH (H<sub>2</sub>O)、下段：電気伝導度、縦棒は標準偏差。

《より詳しく知りたい方のために》

- 中村克典・小谷英司・小野賢二（2012）津波被害を受けた海岸林における樹木の衰弱・枯死. 森林科学 66：7-12
- 小野賢二・平井敬三（2012）東日本太平洋沖地震大津波が三陸沿岸地域におけるスギ林針葉の赤褐変化に及ぼした影響. 森林総合研究所研究報告 11：33-42
- 小野賢二・中村克典・田中永晴・古澤仁美・平井敬三（2013）東北地方太平洋沖地震による大津波の襲来を受けた東北太平洋沿岸の海岸マツ林の土壌環境. -津波浸漬7カ月後の現地調査から-. 森林総合研究所研究報告 12：49-66
- 小野賢二・中村克典・平井敬三（2014）東北地方太平洋沖地震に伴う大津波が沿岸の海岸林土壌にもたらした影響. 森林立地 56：37-48

小野 賢二（東北支所）

### 3.4. 赤枯れしにくい樹種は？

#### < 回 答 >

クロマツ、マサキ、ハマゴウなどが海水への浸水に耐性であることが知られています。ただし、その耐性は絶対的なものではなく、木の状態や浸水条件によって枯れることがあります。

#### < 解 説 >

塩性植物（マングローブ類が代表格）と言われる一部の例外を除き、草や木を海水に浸けると高濃度の塩類により生理障害（塩害）が発生します（3.3 参照）。塩害への耐性（耐塩水性）は種によって異なり、海岸林植栽のための樹種を選定する上で耐塩水性は重要なポイントになるはずですが、このことについて調べた例は実はあまり多くありません。少ない研究例のうちの一つに、国立林業試験場（現 森林総合研究所）で行われた実験があり（高橋・堀江、1965；堀江、1968）、クロマツ、マサキ、ハマゴウなどで耐塩水性が高く、アカマツ、ヒノキなどでは低いことが示されています（図1）。クロマツの耐塩水性については、千葉県林業試験場（現 千葉県森林研究センター）で行われた実験（小田、1991）により、浸水期間や季節、あるいは海水の濃度と枯死発生との関係が詳細に調べられています。今回は、より条件の厳しい海浜環境下でのクロマツとアカマツの耐塩水性評価に取り組みました。青森県三沢市の海岸砂丘地に埋め込んだ鉢植えのクロマツまたはアカマツを一時的に海水または淡水に浸水する実験により、クロマツの耐性はアカマツより格段に強いこと、夏の海水への浸水は春の浸水より赤枯れが起こりやすいこと、根系の傷害はクロマツが海水に浸かったときの赤枯れの発生を促進することなどが明らかになっています（写真1）。

浸水実験とは別のアプローチとして、現実の津波被害跡地

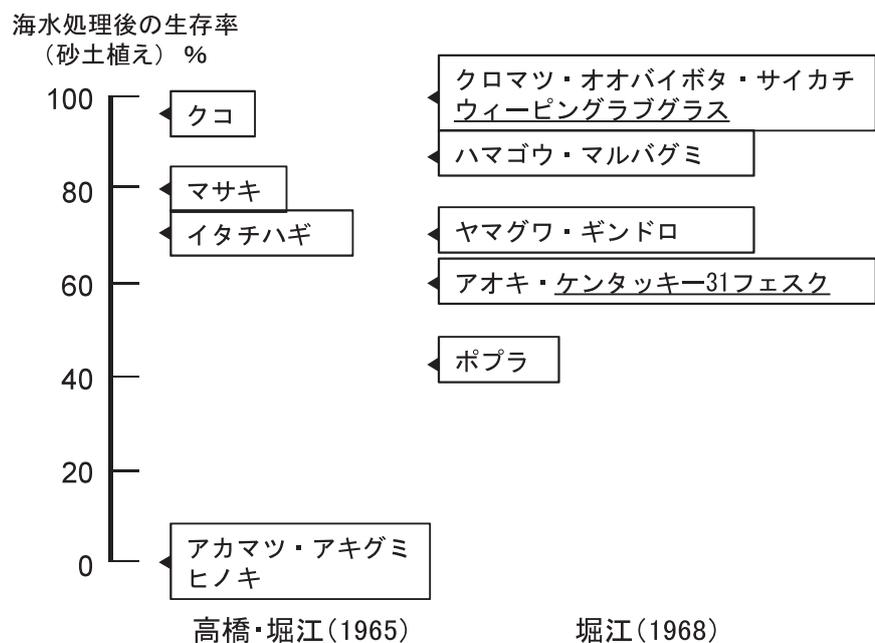


図1 堀江・高橋（1965）および堀江（1968）の浸水実験における植物の耐塩水性評価

下線は草本種を示す。2回の実験で浸水後の気象条件が異なるため、相互の直接比較は不可能であることに注意。



写真1 三沢市の海岸で実施したクロマツ、アカマツ苗木の浸水試験

左：鉢植え苗木の浸水処理

右：浸水8週後のクロマツ（右下から左上に並んだ手前2本が海水処理木、3本目が淡水処理木）、アカマツ（後に見える赤枯れした2本、どちらも海水処理木）に現れた針葉変色被害

で様々な樹種の生育、衰退状況を調べることにより各樹種の海水への耐性を評価した研究があります。岡田ら（2014）は津波浸水を受けた仙台平野の屋敷林や社寺林に生育していた樹木の被害、回復状況を調査し、多数の調査地で共通に出現した7樹種について耐塩水性の順位付けを行ったところ、その結果はクロマツ＝マサキ＞ケヤキ＞エノキ＞シロダモ＞ヤブツバキ＞ウワミズザクラの順となりました。本田・林田（2015）は宮城県北部の海に面した斜面上の広葉樹を対象に木の大きさや樹冠部の浸水程度と衰退程度との関係を解析し、同じ樹種でも幼木か成木か、あるいは樹冠まで海水が到達したか否かで衰退程度が異なることを示しました。

このように、ある樹種が海水に浸かったときに枯れやすいかどうかは、調査方法や調査対象となる樹木の状態によって変わってくる場所もあるのですが、過去の調査事例や経験から判断してクロマツ、マサキ、ハマゴウなどは海水への浸水に強い樹種であると言えます。

#### 《より詳しく知りたい方のために》

堀江保夫（1968）植物の耐塩水性（2）防潮林構成植物選定のための実験．林業試験場研究報告 186: 113-133.

本田詩織・林田光祐（2015）三陸南部の津波浸水地における広葉樹6種のサイズと樹冠の浸水程度が個体の樹冠の衰退程度に及ぼす影響．海岸林学会誌 14（1）：13-20.

小田隆則（1991）滞海水および滞水の日数とクロマツ枯損の関係．治山 53: 165-168.

岡田穰・坂本知己・後藤義明・林田光祐（2014）東日本大震災津波による屋敷林および社寺林の被害からみた広葉樹の耐塩水性の評価．海岸林学会誌 13（1）：15-24.

高橋啓二・堀江保夫（1965）植物の耐塩水性（1）防潮林構成植物選定のための実験．林業試験場研究報告 183: 31-152.

中村 克典（東北支所）

### 3.5. 津波で菌根菌はどうなったのか？

#### < 回 答 >

津波被災地では、菌根菌のきのこは発生しなくなりましたが、土壤中に孢子などの形で生き残っていました。

#### < 解 説 >

健全なマツ林の土壌には共生微生物である菌根菌が豊富に生息し、一般にきのこ（子実体）と呼ばれる孢子を飛ばす地上部を作りますが、被災地では生き残ったマツの近くを含め、菌根性きのこの発生は全く見られませんでした。しかし、きのこは植物でいえば花にすぎず、地下で菌糸体の本体や耐久性がある孢子が生き残っている可能性があります。

2012年11月に、菌根菌の孢子を接種した苗木を植える試験（接種区）と、何も接種せず逆に殺菌剤を与えて苗木を植える試験（非接種区）を開始しました。試験地は、仙台市若林区荒浜の国有林内で、津波被害跡地に周囲の土壌を盛り上げて造りました。ここに苗木を70cm間隔で49本ずつ植栽しました（写真1）。苗木は2011年3月に播種したクロマツコンテナ苗です。

試験に用いた菌根菌は、海岸林に生育し塩分や乾燥への耐性も高いことが知られているショウロという食用きのこです。このきのこは耐久性が高い孢子を大量に生産します（写真2）。一方、菌根菌を接種しない苗木には菌根菌を含む多くの菌に効果がある殺菌剤のポリオキシシン1000倍溶液を施用し、育苗中に飛び込んだ菌根菌の排除を試みました。この薬剤は低濃度継続施用で菌根を排除できますが、残効性は低いとされています。

2013年10月に、両区から7本ずつ苗木を掘り取って根の状態を調べたところ、菌根菌接種区では7個体全て、非接種区では7個体中5個体に菌根（写真3）が形成されていました。接種区ではショウロと考えられる菌根（写真4）が4個体に見られましたが、それらを含む



写真1 植栽直後の試験地（接種区：非接種区も同様）

周囲の土壌（砂）を盛り上げて植栽基盤とし、1年生のクロマツコンテナ苗を70cm間隔で植栽して周囲にワラを立てて風よけとした。

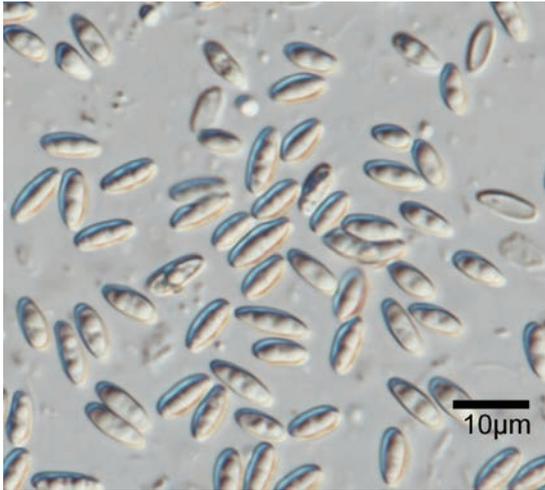


写真2 ショウロの孢子  
貯蔵物質をもち寿命が長い

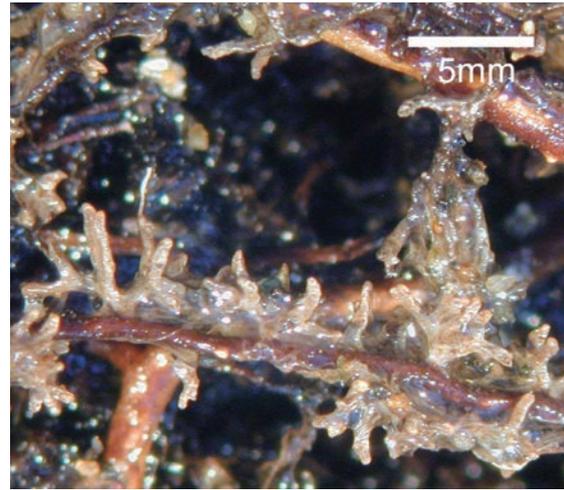


写真3 根の拡大図  
サンゴ状に分枝した部分が菌根

全ての苗木に接種したのものではない菌根が見られました。非接種区から掘り取った苗木にも殺菌剤の効果が切れたあと、現場土壌から定着したと考えられる複数タイプの菌根が見られました。以上を合わせると、調査した合計14本の苗木のうち12本に、現場土壌由来と考えられる菌根菌が定着していました。

予想よりはるかに多く菌根菌が被災地土壌に生き残っていたので、その量の評価のために試験地から土壌を持ち帰り、消毒したビニールポットに入れてクロマツの芽生えを1本ずつ植えました。閉鎖温室の中にビニールテントを設置して隔離状態で1年間育成して、菌根の有無を観察しました。その結果、途中で枯死したものを除く22個体のうち19個体では、何らかの菌根が形成されていました。このことは、津波で海水をかぶった土壌の中には、養分を与える樹木がなくなって2年たっても菌根菌が生き残っていたことを示しています。



写真4 植栽1年後のコンテナ苗の根系  
形状からショウロと思われる菌根が形成されている

これらのことから、かつてマツ林だった場所の土壌の中には、津波被災後も菌根菌が孢子など何らかの形で生き残っていたことが分かりました。

#### 《より詳しく知りたい方のために》

「菌根の生態学」M. F. アレン p.169 (中坪孝之・堀越孝雄 訳) 共立出版株式会社 ISBN4-320-05424-5  
「炭と菌根でよみがえる松」小川真 pp.2-26. 築地書館 ISBN978-4-8067-1347-0

明間 民央 (きのこ・森林微生物研究領域)

### 3.6. 津波は松くい虫被害<sup>巻末ii</sup>を拡大させたか？

#### < 回 答 >

津波で発生したマツ折損木や衰弱、枯死木の多くはマツノマダラカミキリの発生源とはならず、津波は松くい虫被害拡大の直接的な原因にはなりません。ただし、震災前から松くい虫被害が蔓延していた地域や、震災の混乱によって松くい虫防除事業の実施が不十分になった地域では被害が拡大した例があります。

#### < 解 説 >

松くい虫被害は、病原体マツノザイセンチュウが媒介昆虫であるマツノマダラカミキリによって運ばれて広がるマツの木の伝染病です。マツノマダラカミキリは、松くい虫被害やその他の原因で衰弱したマツや枯死したばかりのマツに誘引され、そのような木に産卵して繁殖します。震災津波の被害地では衰弱または枯れたマツが大量に発生し、これを繁殖源にマツノマダラカミキリが大量発生することで松くい虫被害の拡大が促進される可能性が考えられました。そこで、津波被災マツ林におけるマツノザイセンチュウおよびマツノマダラカミキリの生息状況を調査しました。

仙台平野の調査地における調査木のほとんどは津波被災当年（2011年）の夏までに枯死したクロマツであり、これらの木でマツノザイセンチュウ、マツノマダラカミキリの生息が確認されることはありませんでした（表1）。折損木の切り株でもマツノマダラカミキリは見られませんでした（写真1）。しかし、東松島市の調査地では夏以降に枯死したクロマツ、アカマツでマツノマダラカミキリの生息が確認されることが多く（写真2）、クロマツの大半とアカマツの一部でマツノザイセンチュウが検



写真1 山元町の津波被害木折損根株の剥皮調査  
(2011年10月)

ゾウムシ類、キクイムシ類の食害痕のみでマツノマダラカミキリの生息は確認できない。



写真2 東松島市の津波被害木折損根株の剥皮調査  
(2011年10月)

マツノマダラカミキリ幼虫の食害痕（樹幹表面の白っぽい木屑）と穿入孔（赤矢印）が確認できる。

表1 津波被害を受けた海岸林で発生したクロマツ、アカマツ枯死木の松くい虫被害発生源としての危険性  
 マツノマダラカミキリ、マツノザイセンチュウは生息の可能性が高い順に◎>○>△>×の記号で示した。

樹種	枯死時期	近隣の 松くい虫被害	マツノマダラ カミキリ	マツノザイ センチュウ	松くい虫被害発生源 としての危険性	備考
クロマツ	夏までに枯死	有/無	×	×	低い	津波で大量に発生
〃	夏以降に枯死	有	○	◎	高い	前年感染木の年越し枯れか？
アカマツ	夏以降に枯死	無	△	×	低い	
〃	〃	有	◎	△	あまり高くない	被災当年秋時点での評価
				↓ ○	↓ 高い	↓ カミキリの線虫保持により 評価を修正

出されました（表1）。この理由として、(1) 東松島の調査地周辺では震災前から松くい虫被害が蔓延していて、津波後に発生した枯死木に松くい虫被害木が含まれていたこと、(2) 被災当年夏に調査地周辺の松くい虫被害木で発生したマツノマダラカミキリ成虫が津波被災地のマツ衰弱、枯死木に飛来し、産卵したこと、が考えられました。被災当年秋の時点では、マツノマダラカミキリに産卵されていたアカマツからマツノザイセンチュウが検出されることはほとんどなかったのですが、翌夏これらのマツから発生したカミキリ成虫は多くがセンチュウを保持していました（表1）。カミキリの産卵時にセンチュウが媒介され（その時点ではセンチュウが低密度のため検出されなかった）、枯死木内で増殖して翌年発生したカミキリ成虫に持ち出されたものと考えられます。

このように、津波によって生じた枯れ木でも条件によっては松くい虫被害の発生源となることが明らかになりました。これに加え、震災により防除事業の実施が困難となったことも被災地での松くい虫被害拡大の重大な要因になったと指摘されています（八木・佐々木、2015）。

### 《より詳しく知りたい方のために》

相川拓也・中村克典・市原優・前原紀敏・水田展洋（2013）同一マツ枯死木から脱出したマツノマダラカミキリ成虫が保持するマツノザイセンチュウ数の変異：津波被害によって発生した枯死木の事例。森林防疫 62（4）：130-134.

中村克典（2011）松くい虫被害の問題。海岸林との共生（中島勇喜・岡田穰 編）、山形大学出版会 pp138-143

中村克典（2012）津波で枯れた松は松くい虫被害を拡大させるのか？海岸林の再生に向けて：森林総合研究所東北支所「特別シンポジウム要旨」パンフレット（森林総合研究所東北支所 編）、森林総合研究所東北支所 pp8-9.

八木智義・佐々木智恵（2015）海岸防災林再生のための津波被災木の適切な処理に関する調査。宮城県林業技術総合センター成果報告 24: 16-21.

中村 克典（東北支所）

### 3.7. 海岸林は津波をどの程度弱められるのか？

#### < 回 答 >

津波の規模や海岸林の幅等によって異なりますが、例えば、汀線（海岸線）での最大波高が 6.0 m 程度の津波に対して、樹高 12 m で胸高直径 20 cm の適正な形状比になるように密度管理が行われたクロマツ林帯が幅 200 m あることで、林帯の内陸側での浸水深が 10 % 程度抑えられることが数値シミュレーションから推定できます。

#### < 解 説 >

海岸林は、津波を完全に止めることはできませんが、水の流れに対する抵抗体となってはたらくことによって津波を弱めることができます。海岸林のこの効果を検証するために、海岸林を通過する津波氾濫流の数値シミュレーションを行いました。数値シミュレーションの樹木の抵抗特性パラメータには、実物樹木を対象とした水理実験（写真 1）から得た値を用いました。この数値シミュレーションでは、密度管理が行われて適正な形状比のクロマツで構成されている林帯（樹高 12 m、胸高直径 20 cm、形状比 60、立木密度 730 本／ha）が汀線から 100 m 地点から内陸側にあると仮定し、この林帯の樹木に幹折れや根返りなどの物理



写真 1 実物樹木を対象とした水理実験の様子

的被害が発生しないと考えられる規模（汀線での最大波高 6.0 m）の津波を想定しました。

林帯がない場合と幅 200 m の林帯がある場合での計算結果を比較すると、林帯があることで内陸側（汀線から 400 m 地点）で、浸水深が 3.8 m から 3.5 m へと 10 % 程度少なくなり、線流量（単位幅当たりの流量）は  $8.6 \text{ m}^2/\text{s}$  から  $7.2 \text{ m}^2/\text{s}$  へと 20 % 程度少なくなりました（図 1）。

対象とした津波の規模（汀線での最大波高 6.0 m）での浸水深と線流量の海岸林による低減率は、林帯より内陸（汀線から 400 m 地点）では、林帯幅が大きくなるとともに大きくなることが明らかになりました（図 2）。ただし、林帯幅の増加に対する海岸林による低減率の増加は次第に小さくなることがわかりました。

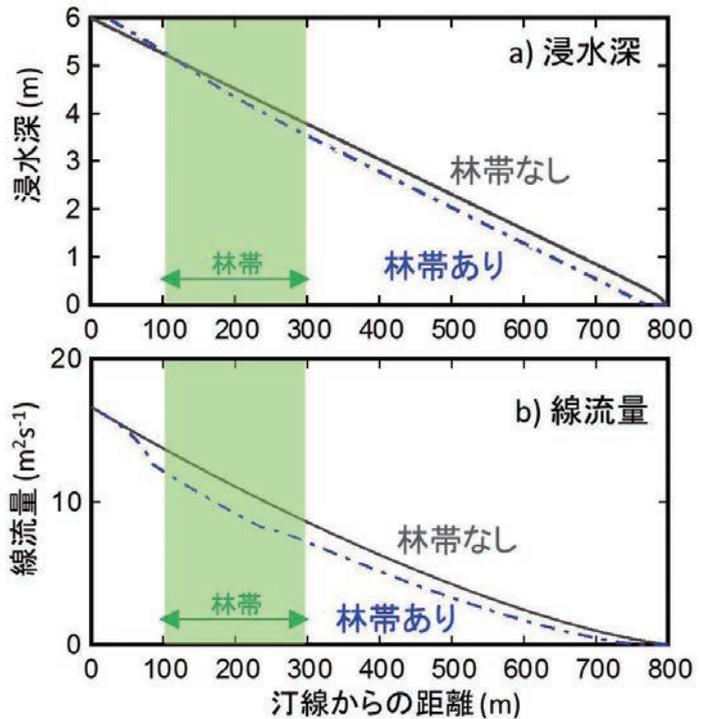


図 1 汀線での最大波高 6.0m の場合の浸水深と線流量の最大値の分布

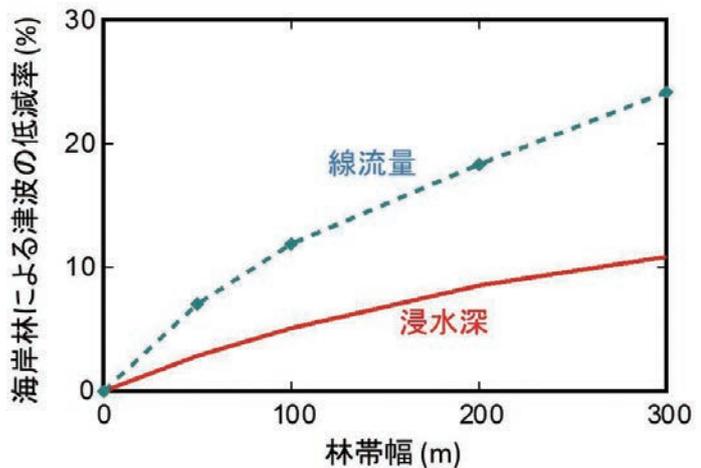


図 2 林帯の内陸部（汀線から 400m）の地点での浸水深および線流量の海岸林による低減率と林帯幅の関係

《より詳しく知りたい方のために》

野口宏典・佐藤創・鳥田宏行・真坂一彦・阿部友幸・木村公樹・坂本知己（2012）2011 年東北地方太平洋沖地震津波によるクロマツ海岸林被害の数値シミュレーションを用いた検討－青森県三沢市の事例－，海岸林学会誌，11（2），47-51.

野口 宏典（東北支所）

### 3.8. 津波を弱めるのに効果的な海岸林の姿は？

#### < 回 答 >

過密になり細い木で構成されたクロマツ林よりも、密度管理によって立木密度は減っても適正な太さの木で構成されたクロマツ林の方が津波に対する耐性が高く、より大きな津波に対しても津波を弱める効果を発揮できます。また、クロマツ林の下層に広葉樹を導入することにより、より効果的な海岸林になると考えられます。

#### < 解 説 >

どのような海岸林が津波を弱めるのに効果的であるのかを明らかにするために、細いクロマツ（形状比 106）で構成された過密林（過密クロマツ林）、密度管理が行われて適正な太さ（形状比 60）のクロマツで構成されている林（適正クロマツ林）、適正クロマツ林の下層に広葉樹（形状比 120）を導入した林（広葉樹導入クロマツ林）の3つの典型的なタイプの海岸林（図1）がそれぞれ汀線（海岸線）から 100 m から 300 m の位置に幅 200 m にわたり存在する場合を想定し、津波の数値シミュレーションを行いました。

樹木に幹折れや根返りといった物理的被害を発生させる力の大きさを、津波を受けた時に根元にかかる回転モーメント<sup>1</sup>で表現しました。そして、被害が発生する限界の大きさに対する回転モーメントの比率を、物理的被害の発生しやすさの指標としました。同じ規模の津波に対するこの値は、小さい方から順に、適正クロマツ林、過密クロマツ林、クロマツ林に導入された広葉樹、となりました（図2）。

樹木が津波によって物理的被害を受けないと仮定して行った数値シミュレーションの結果

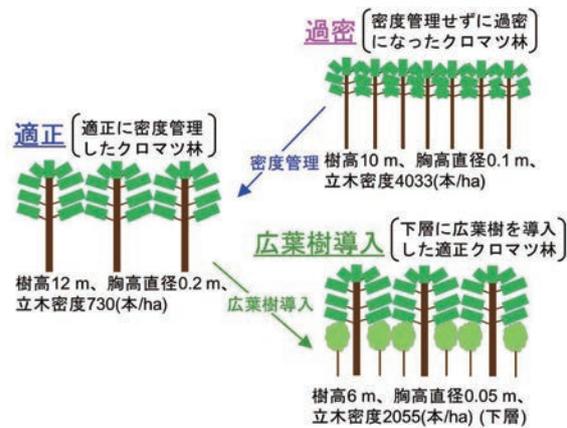


図1 設定した3つの典型的な海岸林の概要

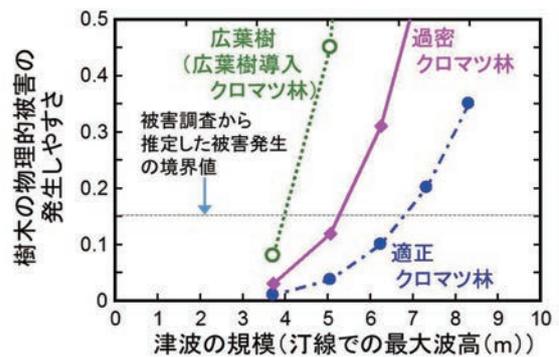


図2 樹木の物理的被害の発生しやすさと津波規模の関係

<sup>1</sup> 物体に回転を生じさせるような力の性質を表す量。ここでは、根元を中心として立木を回転させて引き倒そうとする力の量を表す。

から、海岸林が波力を抑え、浸水深や線流量（単位幅当たりの流量）を低下させる効果は、過密クロマツ林と広葉樹導入クロマツ林で同等で、それらに比べて、適正クロマツ林の効果は半分程度であることが分かりました（図3、図4）。また、林帯による低減率は津波の規模が小さい場合に大きく、津波の規模が大きくなっていくと減少しながら一定の値に近づきました（図4b）。

津波を抑える効果と物理的被害の発生しやすさの2点を合わせて考えると、適正クロマツ林は過密クロマツ林に比べて、過密クロマツ林でも被害を受けない規模の津波では、津波を抑える効果が小さいものの、より大きな規模の津波に耐え、津波を弱める効果を発揮できることが推定されました（図4b）。また、下層に広葉樹を導入することにより、広葉樹が耐えられる程度の規模の津波に対してではありますが、津波を抑える効果を高めることができると推定されました。

以上のことから、過密になり細い木で構成されたクロマツ林よりも密度管理されて適正な太さの木で構成されたクロマツ林の方が望ましい姿であると考えられます。また、クロマツ林の下層に広葉樹を導入することにより、津波をより効果的に弱める海岸林になると考えられます。

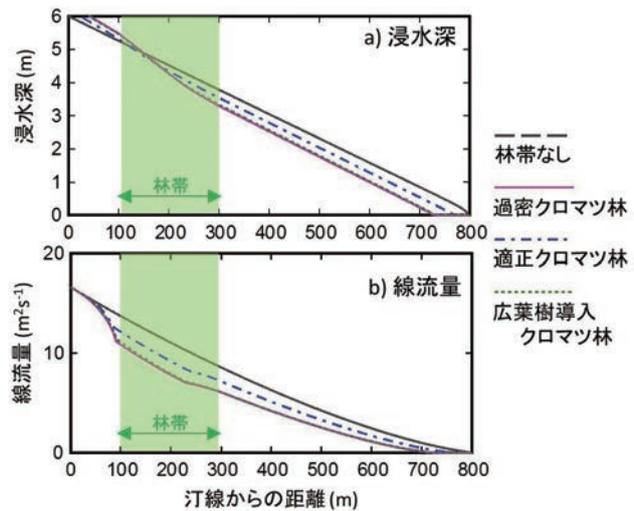


図3 汀線での最大波高 6.0m の場合の浸水深と線流量の最大値の分布

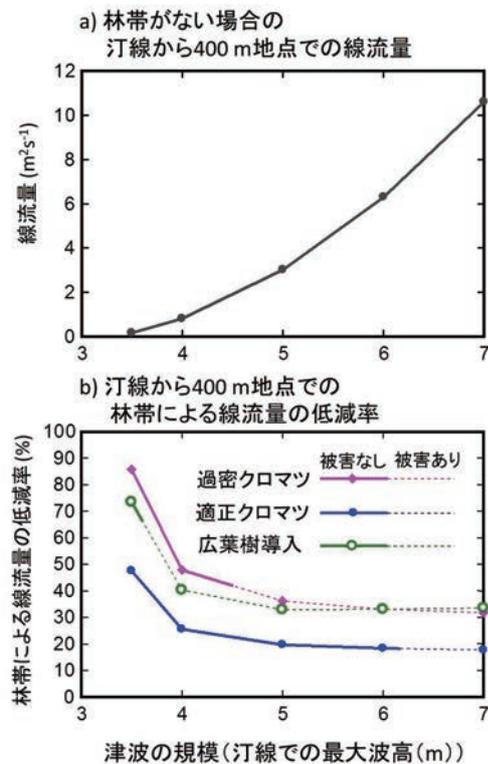


図4 汀線から 400m での線流量 (a) と林帯による線流量の低減率 (b) と津波の規模との関係

《より詳しく知りたい方のために》

野口宏典・新田響平・金子智紀・上野満・渡部公一・坂本知己 (2014) 密度管理と広葉樹導入がクロマツ海岸林の津波減衰効果に及ぼす影響、平成 26 年度日本海岸林学会田原大会講演要旨集、36-37.

野口 宏典 (東北支所)

### 3.9. 森林土壌の除塩<sup>巻末 iii</sup>は必要か？

#### < 回 答 >

降雨や降雪などにより自然に除塩が進むのを待つのが一番でしょう。なぜならば、森林が立地している箇所には農地のような灌漑、排水用水が整備されていないため、森林を対象に農地と同様の除塩を実施することは困難であるためです。日本は梅雨や台風など多雨に恵まれた環境なので、こうした降雨により森林の除塩は徐々に進んでいます。

#### < 解 説 >

東北太平洋沿岸の津波被害を受けた森林土壌は、pH や EC（電気伝導度）、交換性ナトリウム濃度などが高くなります（3.3 参照）が、降雨による除塩の効果によりそれらが下がることを継続的な追跡調査により明らかにしました。

海岸から比較的離れたスギ林では、津波の発生から 7 ヶ月後の調査において、津波を受けて上昇した pH などの土壌の化学特性値が津波未浸漬の状態までに低下したことを確認しました（図 1）。このことは、海岸の後背地に位置したスギ林の多くは、海岸から遠く水はけのよい傾斜地に分布するので、土壌にたまっていた塩分は雨水の流出とともに自然に除塩されたことを示しています。

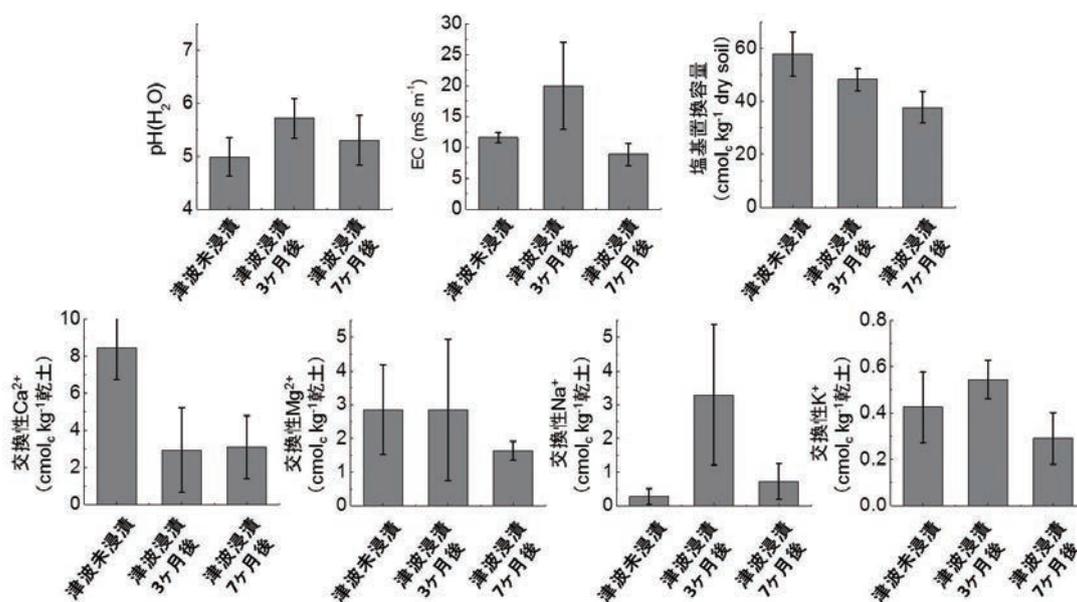


図 1 時間経過に伴うスギ林土壌の除塩効果（岩手県釜石市の結果）

上段：左から、土壌 pH (H<sub>2</sub>O)、電気伝導度、陽イオン交換容量、下段：左から、交換性カルシウム、マグネシウム、ナトリウム、カリウムの各濃度。縦棒は標準偏差。

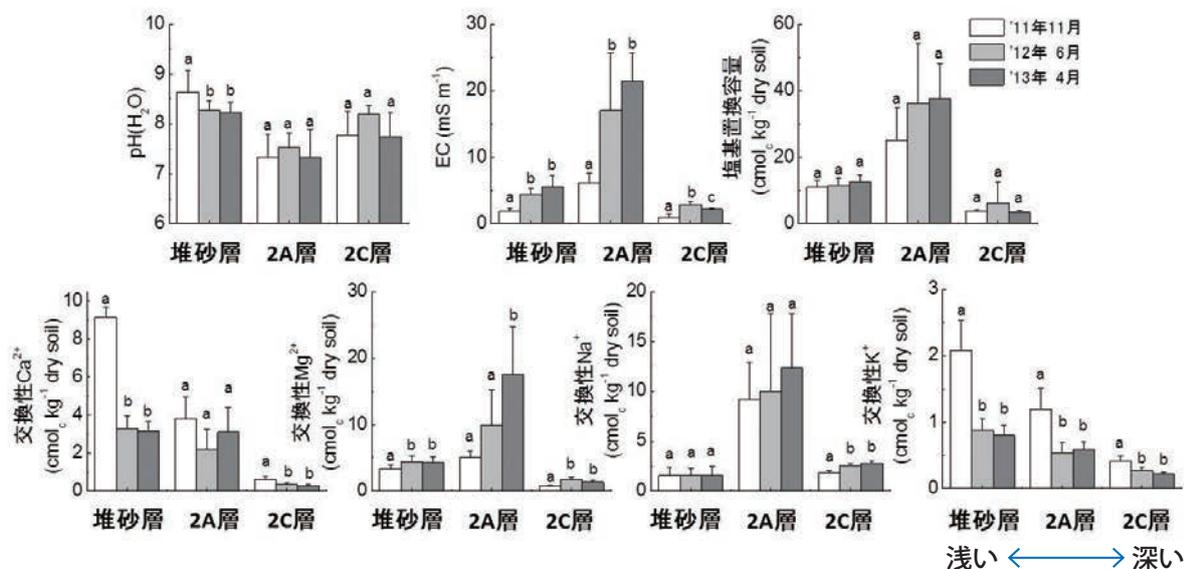


図2 時間経過に伴うマツ林土壤の除塩効果（宮城県東松島市の結果）

上段：左から、土壌pH（H<sub>2</sub>O）、電気伝導度、陽イオン交換容量、下段：左から、交換性カルシウム、マグネシウム、ナトリウム、カリウムの各濃度。縦棒は標準偏差。

一方、汀線近くのマツ林は、地表面に分厚い堆砂層が形成されて大量の海塩が付加されたため、表層土壌のpHや交換性カルシウム、カリウムの濃度は津波7ヶ月後も高いままでした（3.3参照）。しかし、さらに時間が経過した1年後には、pHや交換性カルシウム、カリウムの濃度が低下し、堆砂層を中心に除塩が進んでいることが確認できました（図2）。津波侵入時に形成された堆砂層（津波浸水時に堆積した土砂）より下層のもともとの土壌（2A層、2C層）では、時間とともにECや交換性マグネシウム、ナトリウムの濃度が上昇しました（図2）が、これは降雨によって地中に入った水が堆砂層から下層へ移動した際に、土壌中の塩分も水に溶けて一緒に移動したためと考えられました。汀線近くの平坦地に成林した海岸林では地下水位が高く、排水不良であるため、除塩の効果が認められるまでに時間がかかりますが、それでも土壤に残った津波由来の塩分は、時間とともに雨水の流出に伴って徐々に排出されていくことが確認できました。

#### 《より詳しく知りたい方のために》

小野賢二・平井敬三（2013）東北地方太平洋沖地震による大津波を受けた三陸沿岸のスギ林土壌における塩害とその後の土壤環境の変化。－降雨に伴う自然排水がもたらす除塩の効果－。森林総合研究所研究報告 12：41-47

小野賢二・中村克典・平井敬三（2014）津波被災海岸防災林砂質未熟土における土壌化学性の経時変化。日本森林学会誌 96：301-307

小野 賢二（東北支所）

### 3.10. 赤枯れしにくい海岸林をつくるには？

#### < 回 答 >

クロマツを主体とする海岸林における赤枯れの被害は、低地の平坦地や凹地形の場所に集中しており、傾斜地や凸地形では被害が少なくなっていました。赤枯れしにくい海岸林をつくるには、造成時に海水を速やかに排水する効果が期待できる凸地形や水路をあらかじめ用意することが効果的です。

#### < 解 説 >

東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波により、青森県の太平洋沿岸の海岸林は広範囲にわたって浸水し、前線部を中心に幹折れや根返り・流失が生じました。しかし、浸水から2～3か月経過しても海岸林のクロマツの多くは、緑の葉を着けて枯れることもなく立っており、福島、宮城、岩手などの被災県に比べて被害が軽微だと認識されていました。ところが、その年の夏頃から、広範囲にわたって急激に針葉が赤褐色に変化し、その後、多くの木が立ち枯れてしまいました（図1,2）。

赤枯れの発生状況や枯死の原因を確かめるため、海岸林に帯状の調査区を設け、被害の状態を一本一本調査するとともに（図3）、調査区の周辺を含めて地形測量を行いました。また、モーターパラグライダーを用いてより広い範囲を調査しました（図4）。赤枯れ被害状況と地形を組み合わせると、三次元表示したところ、海水の停滞に関係する地形と被害の状況を視覚的にわかりやすく捉えることができました（図5）。

これらの調査の結果、津波後の赤枯れの被害は低地の平坦地や凹地形で激しく、傾斜地や凸地形では少なく、林内の微地形に大きく影響されたことが明らかになりました。

クロマツは塩害に強く、津波の通過などのように、短時間海水に浸水しただけでは枯れないことが知られています（3.5 参照）（伊藤・今，1970）。しかし、低地や窪地など林内に侵入した海水が長時間溜まるような場所では、塩害に強いとされるクロマツでも枯れが生じたと考えられます。



図1 被災1か月後（平成23年4月5日）  
（©2013 Google, Image©2016 DigitalGlobe, ImageNASA）



図2 被災20か月後（平成24年11月19日）

赤枯れしにくい海岸林をつくるには、造成時に海水を速やかに排水する効果が期待できる凸地形や水路を用意することが有効であると考えられます。特に、林帯幅が狭く、赤枯れが生じると海岸林が失われるような場所で効果的です（図6,7,8）。

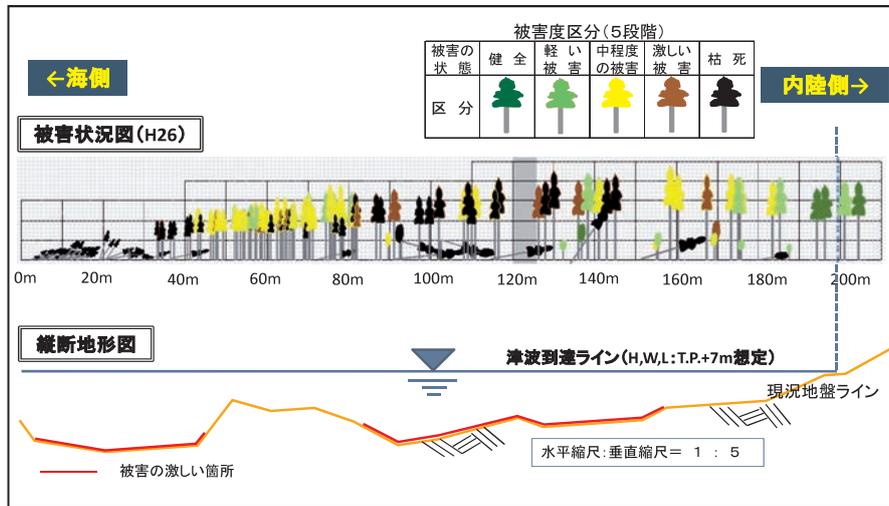


図3 被害の状況と地形の関係（H26の調査結果）

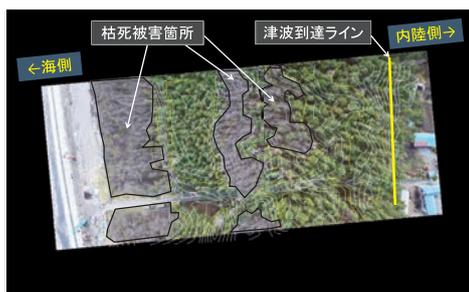


図4 空中写真と等高線の重ね合わせ

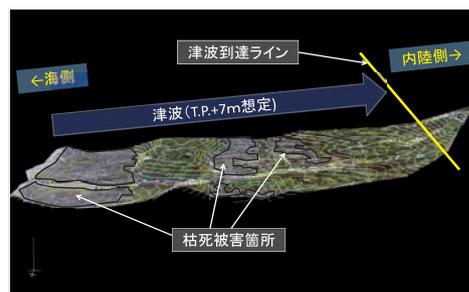


図5 三次元画像処理（高さ5倍）



図6 被害が少ない箇所  
(includes copyrighted material of DigitalGlobe, Inc., All Rights Reserved.)



図7 被害が少ない凸地形箇所



図8 被害が少ない水路工箇所

《より詳しく知りたい方のために》

伊藤重右衛門・今純一（1970）北海道内海岸林用樹種の耐塩性試験 81 回日林講：310-312  
木村公樹（2014）青森県太平洋沿岸の海岸クロマツ林の枯死被害について．森林立地，56，27-36

木村 公樹（青森県林業研究所）

### 3.11. 海岸の砂地に広葉樹を植えても育つの？

#### < 回 答 >

樹種、条件により、十分な活着、成長を期待できる場合があります。しかし、海岸前線に近い厳しい環境でクロマツと同程度の高い適性を示すものは見つかっていません。

#### < 解 説 >

海岸林再生をめぐる議論の中で、広葉樹の活用が強く求められるようになってきました。しかし、これまでの海岸林造成では、北海道から東北でカシワが使われていたり、前線部にトベラやマサキなどの低木が植えられたりという例はあるものの、クロマツが使える場面で大規模に広葉樹が導入された例はありません。また、試験研究レベルでも、そのような設定での植栽はほとんど行われてきませんでした。海浜環境下での植栽で、広葉樹がクロマツと比較してどの程度有効なのかを検討するために、青森県三沢市の海岸クロマツ林津波被害跡地で、ケヤキ、コナラ、カシワの広葉樹3種とクロマツの植栽試験を実施しました。

試験地は三八上北森林管理署により震災翌年の2012年春に造成された事業植栽区画内に設定しました。各植栽区画は高さ約1mの静砂垣で囲まれています（写真1）。試験区は、海側（汀線まで約100m）と陸側（海側試験区から内陸に30m）の2区に分かれ、このうち陸側の試験区には、クロマツ、カシワ、ケヤキ、コナラの4樹種の普通苗またはポット苗を、春植え（2012年5～6月）または秋植え（同年10月）しました。海側試験区には4樹種のポット苗を春植えしました。

クロマツは春植えであれば陸側でも海側でも、また普通苗でもポット苗でも順調に活着し、旺盛な成長を示しました（写真2）。これに対し秋植え苗では活着も成長も著しく悪くなり、マツ植栽について従来から言われている通り春植えが良いという結果となりました。カシワは普通苗を使うと活着がよくないのですが、ポット苗であれば海側植栽や秋植えでも順調な生育を示しています。ただし、初期成長ではクロマツに劣ります。ケヤキは、陸側の静砂垣沿いのような条件のよい場



写真1 植栽試験地の概況（2012年6月）

所で極端に成長が良いものがある一方、海側試験地や秋植え苗では激しい枯れ下がりや葉の矮小化がみられ、生育は全般に不調です。しかし、枯れ下がった幹の根元から萌芽を出して生き残っているものが多くあります。コナラもほぼ同様な傾向ですが、ケヤキに比べると生死がはっきり分かれることが多く、特に海側試験地での枯死が目立っています。以上から、海岸砂地への植栽という観点から見たカシワの適性は低くなく、ケヤキやコナラも前線部でなければ活用可能であると言えそうですが、いずれもクロマツには大きく及びません。

海岸林植栽への広葉樹の導入を図るには、このような樹種ごとの特性に基づき、適地適木の考え方をもって進めるのがよいでしょう。

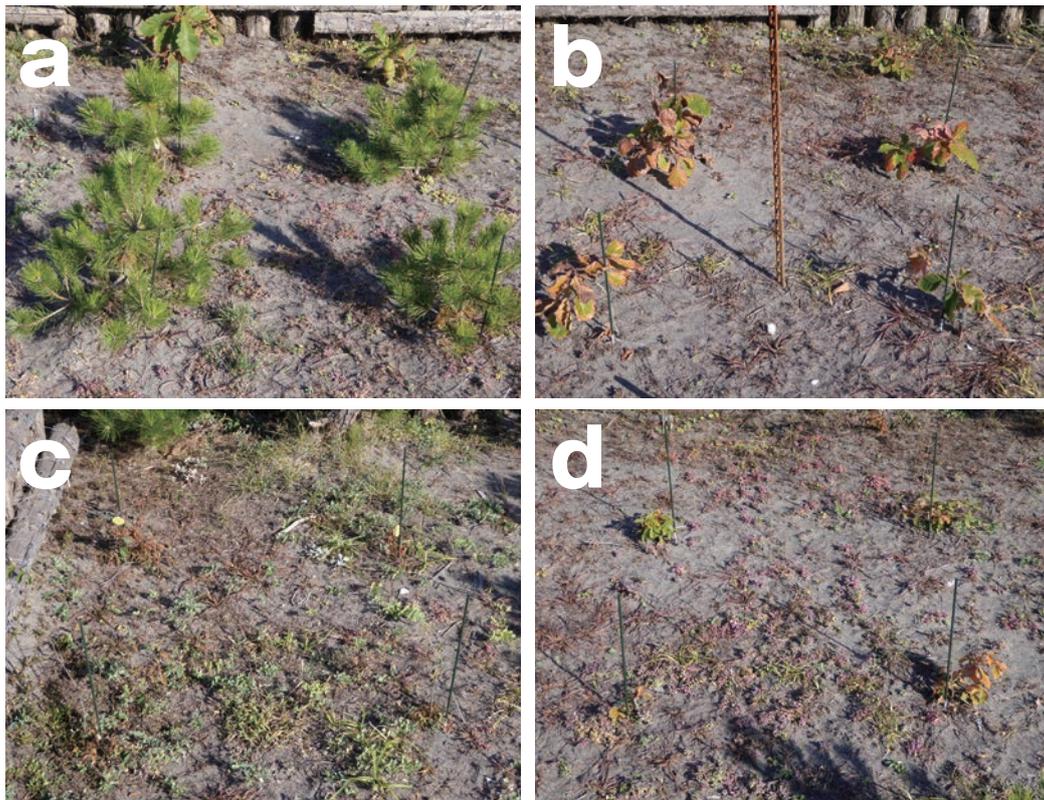


写真2 植栽した4樹種の生育状態（海側調査区、2014年10月）

a：クロマツ、b：カシワ、c：ケヤキ、d：コナラ

### 《より詳しく知りたい方のために》

金子智紀（2005）秋田県中央部の海岸砂丘後背地に植栽した広葉樹混交林の成長．東北森林科学会誌 10（2）：90-94.

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．秋田県林業技術センター研究報告 17: 37-60.

中村克典（2015）植栽試験に基づいて津波跡地の海岸林再生を考える．みどりの東北 134: 6.

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法：松枯れから防災機能を守るための広葉樹林化．森林総合研究所多摩森林科学園、東京 45p.

中村 克典（東北支所）

### 3.12. 海岸林造成にコンテナ苗を使うメリットは？

#### < 回 答 >

コンテナ苗は簡単に効率よく植栽できます。また、コンテナ育苗は、直根が明瞭なクロマツの樹種特性に適した育成技術です。

#### < 解 説 >

海岸林造成では、普通の山地での造林地よりもずっと高密度に植栽されることが多いため、効率がとくに望まれます。元々、海岸林造成地は、山地に比べて平坦であることに加えて植栽前は他の植生の少ない状態にしますので、山地での植栽に比べると効率がよいのですが、コンテナ苗＋専用植栽器具の組合せ（写真1）であれば、裸苗＋クワと比較してさらに高能率に植栽できます。

これまでの調査で、スギのコンテナ苗を一般的な林地に植栽するときには裸苗の2倍程度の作業能率を挙げられることがわかっていますが、今回の津波で海岸林が失われた跡地に、現地の砂を使って造った平坦な盛土でクロマツコンテナ苗の植栽試験を行ったところ、さらに高能率に植栽できることがわかりました。

すなわち、クロマツの1本あたり植栽所要時間は、裸苗で約24秒、コンテナ苗で約11秒でしたが、別の調査で得た山地林のスギの植栽作業の事例では、裸苗を約56秒、コンテナ苗を約29秒かけて植栽しています（図1）。山地林でのスギの植栽と比較すると、海岸林でのクロマツの植栽は裸苗で2.3倍、コンテナ苗で2.7倍の作業能率を上げることができました。また海岸林クロマツ同士で比較すると、コンテナ苗は裸苗の

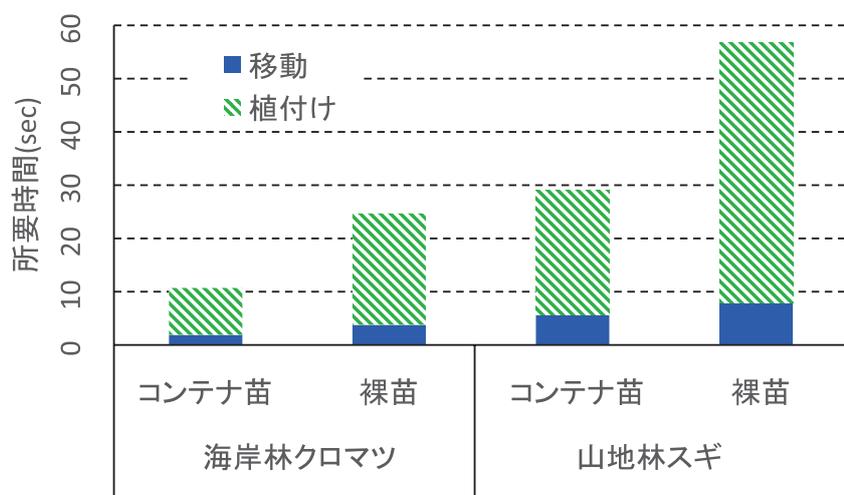


図1 植栽作業工程（1本あたり所要時間）



写真1 プランティングチューブを用いたコンテナ苗の植栽

2.3 倍の作業能率を上げることができました。ただし、海岸林造成の際には植栽だけでなく、強風対策・静砂のために藁立て・藁敷き作業等（写真 2、3、4）が必要で、それには植栽の数倍の時間がかかります。

1 日の労働時間を 6 時間として 1 日当たりコンテナ苗植栽作業能率を算出すると、約 2000 本/人日となります。これは 1000 本/人日を超えることがない日本の事例や約 1100 本/人日、約 1800 本/人日が報告されている海外の事例（Stjernberg, 1988；Stjernberg, 1991）と比べて高い作業能率です。

クロマツは直根が深く伸びる深根性樹種で、苗圃で育苗される裸苗は深く直根を下ろしています。そこで、掘り取り、植栽の際に深く掘らずにすむように一定の深さで根を切断する根切りを行います。しかし、クロマツの深根性による物理的な強度を生かすために、また植栽後の成長量を確保するために、極力直根を切りたくないところです。コンテナ苗であれば、直根はコンテナ底面で空気根切りされて自然に伸長を止めるので、物理的な根切りのような根系の変形や損傷がなく、植栽後にすぐに成長できる状態を保っています。コンテナ育苗はクロマツの育成に適した技術であり、クロマツはコンテナ育苗のメリットが得やすい樹種であるということが出来ます。

また、コンテナ苗は、植栽に際して特に熟練を必要としないので、ボランティアなどの未熟練者が作業を行っても失敗することが少ないという利点もあります。



写真 2 藁立て作業



写真 3 個別藁立て・藁敷き施工



写真 4 区割り周囲藁立て・藁敷き施工

### 《より詳しく知りたい方のために》

- Stjernberg E. I. (1988) A study of manual tree planting operation in central and eastern Canada, FERIC Technical Report-79  
Stjernberg E. I. (1991) Planter productivity in prepared and unprepared ground : a case study, FERIC Technical Note-162

山田 健（林業工学研究領域）

### 3.13. クロマツコンテナ苗は海岸でも時期を選ばずに植えられるのか？

#### < 回 答 >

寒い地域の厳冬期や、暑い地域や猛暑の年の真夏を除けば、通年で植栽できます。

#### < 解 説 >

クロマツの植栽に適した時期は、開葉前の春と成長終了後の秋がありますが、春の方がより一般的です。これは開葉前の方が、植え付け後すぐにクロマツが活動期に入り、根が速やかに伸びると考えられるためです。特に東北地方では植栽後に厳しい冬を迎える秋の植栽を避けることが多いため、春に植栽作業が集中してしまう問題があります。植栽が大面積になる海岸林の再生事業では植栽時期を分散させるためには、植栽時期を選ばない苗が求められます。そこで、細根を含む根系が保たれているために裸苗と比較して植栽時のストレスが少ないとされるクロマツコンテナ苗を用いて通年での植栽の可能性を検討しました。

仙台市の荒浜地区に山砂を材料に造成された盛土上で、コンテナ苗を厳冬期の1月を除いて2013年11月から2ヶ月おきに2014年の9月まで、時期を変えて植栽し、その後の生存と成長を調査しました(写真1～5)。コンテナ苗は内面リブ式300ccのものを用いて、2013年春に播種して育苗されたものを使用しました。

植栽翌春(11月植栽は翌々春)の苗の生存率は、98%以上と高く、生存率から見た場合、植栽時期による問題はみられませんでした。次に成長の面ですが、植栽時と1成長期が完了した2014年11月に、幹長と地際直径を測定しました。育苗中にすでに幹長成長していた5月植栽、7月植栽、9月植栽の苗は、植栽後にはほとんど幹長成長が見られませんでした(図1)、これらの苗は、育苗期間中の5月下旬までにはほぼ幹長成長を終えており、この育苗期間中の成長量を合わせた場合には、11月植栽と3月植栽の苗と比較して幹長成長量が



写真1 11月植栽 翌々春(植栽後の成長期は1回)の様子



写真2 3月植栽 翌春の様子 後方は裸苗



写真3 5月植栽 翌春の様子

きくなっていました。

5月植栽、7月植栽、9月植栽の苗では、育苗期間中を含む2014年の幹の伸長部が現地で伸長した11月植栽や3月植栽の苗に比べて長く、やや徒長傾向がありました。このため、このことが今後の成長に影響しないか、調査を継続しています。

直径成長は、5月植栽、7月植栽の苗では11月植栽、3月植栽の苗より小さくなっていました(図2)が、比較のために植栽した3月植栽の裸苗とは同等の成長を示しました。一方、9月下旬植栽では、直径成長はみられず、育苗期間中に直径成長もすでに終了していたと考えられました。

これらの結果から、クロマツコンテナ苗は、生存率だけでなく、成長面から見ても、ほぼ通年での植栽が可能であると考えられました。しかし、東北地方などでは、海岸であっても、厳冬期には積雪や土壌凍結の影響があり、作業を行うことは困難でしょう。真夏に関しては、本研究事例では7月下旬の植栽でも、翌春に100%生存していましたが、植栽を行う場所の環境や、その年の降水量にも左右されると考えられますので、真夏の植栽は、よく検討した上で実行する必要があるでしょう。



写真4 7月植栽 翌春の様子



写真5 9月植栽 翌春の様子

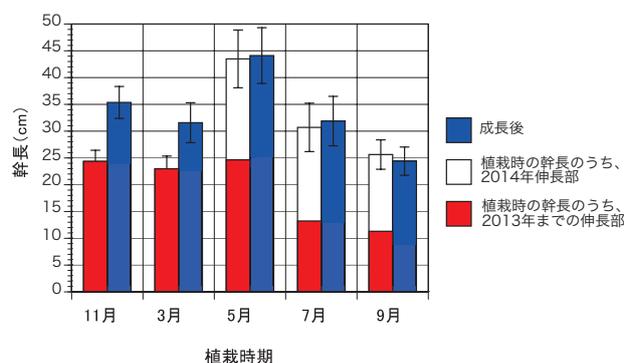


図1 コンテナ苗の植栽時と2014年の成長期終了後の幹長 (八木橋ら2015より改変)

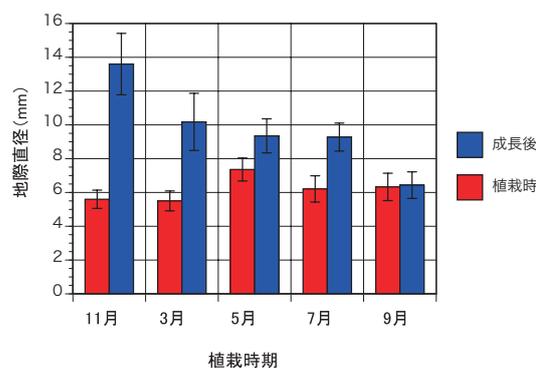


図2 コンテナ苗の植栽時と2014年の成長期終了後の地際直径 (八木橋ら2015より改変)

《より詳しく知りたい方のために》

八木橋勉・中村克典・齋藤智之・松本和馬・八木貴信・柴田銃江・野口麻穂子・駒木貴彰 (2015) クロマツコンテナ苗の当年生苗利用と通年植栽の可能性. 日本森林学会誌 97: 257-260.

八木橋 勉 (東北支所)

### 3.14. コンテナの形状の違いは何か影響があるのか？

#### < 回 答 >

成長や根系の発達に関しては、クロマツの育苗には、内面リブ式コンテナよりもサイドスリット式コンテナの方が適しています。

#### < 解 説 >

育苗履歴や植栽時期と活着・成長の関係を明らかにするため、津波被害跡地に周囲の砂を盛り上げて作った盛土上に、サイドスリット式コンテナ、内面リブ式コンテナ（写真1）で育成した当年生または1年生の苗木を、それぞれ、2012年7月（夏）、同11月（秋）、2013年4月（春）に植栽、2013年4月には2年生の裸苗も同時に植栽して、活着・成長を調査しました。



写真1 サイドスリット式コンテナと内面リブ式コンテナ

生存率は、2012年7月植栽のものは2014年12月時点でサイドスリット式コンテナ苗（以下スリット式）が73%、内面リブ式コンテナ苗（以下リブ式）が83%でしたが、それ以外はいずれも100%生存しました。

2種類のコンテナ苗、裸苗で植栽後の樹高の推移を比較すると、裸苗およびスリット式はリブ式よりも植栽時点での樹高が高く、成長量は3種類とも似たような値を示したため、植栽時の樹高の差がそのまま維持されました（図1）。直径は、植栽当初は裸苗が大きく両コンテナ苗が小さかったのですが、裸苗とスリット式の成長量が大きくリブ式の成長量が小さかったため、後に太い順に裸苗、スリット式、リブ式という序列がつかれました（図2）。すなわち当初は相対的に、樹高において裸苗≒スリット式>リブ式、太さにおいて裸苗>スリット式≒リブ式、という関係であったのが、成長に従って樹高において裸苗≒スリット式>リブ式、太さにおいて裸苗>スリット式>リブ式、となりました。ここで、>は5%水準の有意差があり、≒は有意差がないことを示しています。使用した2種類のコンテナ苗は、育苗コンテナ以外は全く同じ育苗履歴を持っており、両コンテナの形状＝根鉢の形状の差が、育苗段階および植栽後の成長においてスリット式がリブ式を上回った要因と考えられます。また、スリット式は植栽時期の遅いものほど当初の樹高が高い（図3）のに対し、リブ式は当

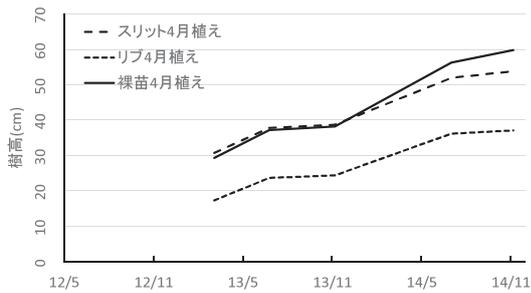


図1 苗種別樹高

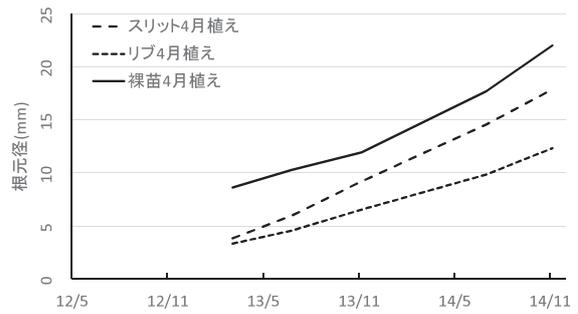


図2 苗種別根元径

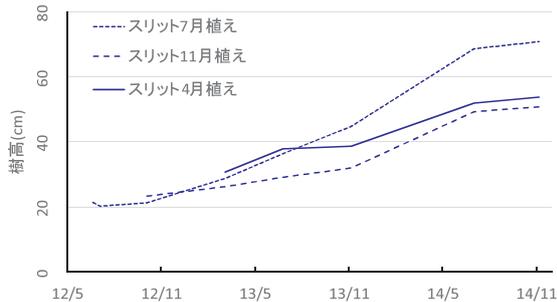


図3 植栽時期別サイドスリット式コンテナ苗の樹高



図4 植栽時期別内面リブ式コンテナ苗の樹高

初樹高があまり変わらず、育苗中に成長が頭打ちになっています（図4）。スリット式、リブ式とも、育苗段階の早い時期に植えたものほど成長量が多い傾向が見られます。

2012年7月植栽のコンテナ苗の一部を2012年11月に掘り取り、深さ25mmおきに直根の直径を測定したところ、ほとんどすべての深さでサイドスリット式コンテナ苗の方が内面リブ式コンテナ苗よりも有意に太くなっていました。根系形状を比較すると、サイドスリット式コンテナ苗では根鉢全体から側根が生じているのに対して、内面リブ式コンテナ苗では根鉢先端からしか新たな根系が伸びず、全体の根量が少なくなっていました（写真2）。根系の発達においても、サイドスリット式コンテナ苗は内面リブ式コンテナ苗より優れていると言えます。

育苗時および植栽後の成長、根系の発達状況から判断すると、海岸林造成用のクロマツ苗木の育成には、内面リブ式コンテナよりもサイドスリット式コンテナの方が適していると考えられます。



写真2 植栽1年後の根系形状

山田 健（林業工学研究領域）

### 3.15. 盛土の表面に水溜まりができることがあるのはなぜか？

#### < 回 答 >

植栽木の生育基盤として造られた盛土のうち初期に造られた一部では、盛土材料の山砂が造成工事での重機走行により締め固まり、硬くなって水はけが悪くなったからです。

#### < 解 説 >

海岸林の復旧現場では、植栽木の根系成長を促し、津波に対して根返りしにくい森林の再生を目指して、地面を嵩上げた盛土の上に、クロマツが植栽されています。盛土材料は、近隣の丘陵地帯から運んできた「山砂」です。この山砂は、透水性、レキ含有量、電気伝導度、pH等の生育基盤の材料としての一定の物理的・化学的な基準を満たしています。しかし、初期に



写真1 水溜まりが生じた植栽現場 宮城県亘理町

造成された盛土では、水はけが悪く、多少の雨でも、水溜まりが生じる場所もありました(写真1)。

水溜まりとなる場所を調べたところ、堅密で、透水性が非常に悪い土層が存在していることが分かりました。土壌深5～30cmの範囲では、滞水によると思われるグライ層<sup>巻末iv</sup>が形成されていました(写真2)。また、土壌深0～5cmの範囲には酸化鉄の色に由来する明褐色を呈した層状の斑紋(膠結)が観察されたことから、造成時に圧密が繰り返されたことにより、層状の水みち(水の通り道)が形成されて、その表面には酸化鉄が生成されたと考えられました(写真3)。

こうした観察結果から、①盛土における水溜まりの発生は、生育基盤造成時の重機走行の繰り返しによって締め固まった土壌が、堅密になって、土壌内の間隙が減少したこと、②更には締め固めによって少なくなった土壌内の間隙に細粒成分が水とともに移動して、目詰まりを起こしたこと、が主な原因と考えられました。その他、造成後の降雨による土壌の水締め<sup>巻末v</sup>も一因と考えられます。また、生育基盤の材料として今回使われている「山砂」は、海岸砂丘地帯の「海砂」と性質を異にすることも、一因と考えられます。「山砂」には砂成

分のほかに粘土など細粒成分が少なからず混じるため、海砂に比べると締め固まりやすく、一度締め固まると、極端に透水性が悪くなる性質を有しているためです。

この問題を解決するため、現場では、盛土造成時に重機の走行回数を減らすなど、造成方法を改良することにより、締め固めの低減を図っています。さらに、完成した盛土では、盛土地表面に出来た水溜まりの解消と、締め固まった土層の物理性改善を目的として、バックホウなどの重機を使って、造成された盛土の掻き起こしを進めています。今後、森林総合研究所では、掻き起こしの効果を評価していくとともに、効果の持続性について検証を行い、生育基盤として適正な盛土造成法の提案につなげていきます。



写真2 盛土内部の状態 宮城県仙台市



Fe<sup>3+</sup>の集積。  
圧密による  
水みちの  
形成を示唆

写真3 造成時に繰り返された重機走行の痕跡と、それにより形成された水平方向の水みち。鉛直方向への水みちがないので、土壌の浸透能が低下する。

《より詳しく知りたい方のために》

森林・林業白書 第1部 森林及び林業の動向 第VI章 東日本大震災からの復興 平成27年版 林野庁 p191-206.

伊藤智弥 (2014) 盛土を伴う海岸防災林復旧工事と植栽までの手順. 第54回治山研究発表会 (治山研究会主催) 要旨. p32-33

小野賢二、今矢明宏、高梨清美、坂本知己 (2016) 海岸防災林復旧・再生事業における生育基盤盛土の現状 - 事業着手初期の未耕起盛土の物理性および盛土への各種耕起工が土壌硬度鉛直分布に及ぼす効果の評価 - . 森林総合研究所研究報告 Vol.439, p65-78.

小野 賢二 (東北支所)

### 3.16. 山砂で造った生育基盤に菌根菌を人為的に導入できるのか？

#### < 回 答 >

山砂による盛土で造った生育基盤には、噴火被災地や露天掘り鉱山跡地などと同様に菌根菌はいませんが、導入は可能です。海岸林跡地の土壤に生き残った菌根菌を利用する客土法と、健全な海岸林に発生する菌根菌を苗木に接種しておいて植栽する菌根菌定着苗法です。

#### < 解 説 >

技術的に最も単純で導入が容易な、海岸林跡地の土壤を使う客土法の可能性を検証しました。2015年1月に、山砂を使って造成して約1年経過した盛土の土と、津波被災地で菌根菌が生き残っていることが確認された海岸林跡地の土壤(3.5参照)とを採取し、消毒したビニールポットに充填して、クロマツの芽生え(実生)を1本ずつ植えました。実生は準無菌的に育成して菌根が形成されていないものを用いました。菌根菌の空中からの侵入を厳重に防いだ空調温室で半年間育成後、実生を掘り取って根系を観察した結果、海岸林跡地の土壤では18本中半数にあたる9本が菌根化していたのに対し、盛土の土では17本中1本しか菌根化していませんでした(図1)。このことから、盛土材料の山砂には、菌根菌がほとんどいないことが分かりました。一方で、海水をかぶった海岸林跡地の土壤の中には、津波後も孢子などの耐久体が生存していたと考えられ、植えられた苗木と共生して菌根を作れることが分かりました。このことから、海岸林跡地の土壤を盛土面に客土すれば菌根菌を速やかに導入することが可能と考えられます。

客土法は単純ですがどのような菌が定着するかの予測が困難なため、苗木の生長促進効果などの性質がわかっている菌根菌を選んで苗木に接種し菌根菌定着苗とする方法として、コンテナ苗に菌根菌を付加して育成する方法を検討しました。耐塩性が高く水ストレス緩和機

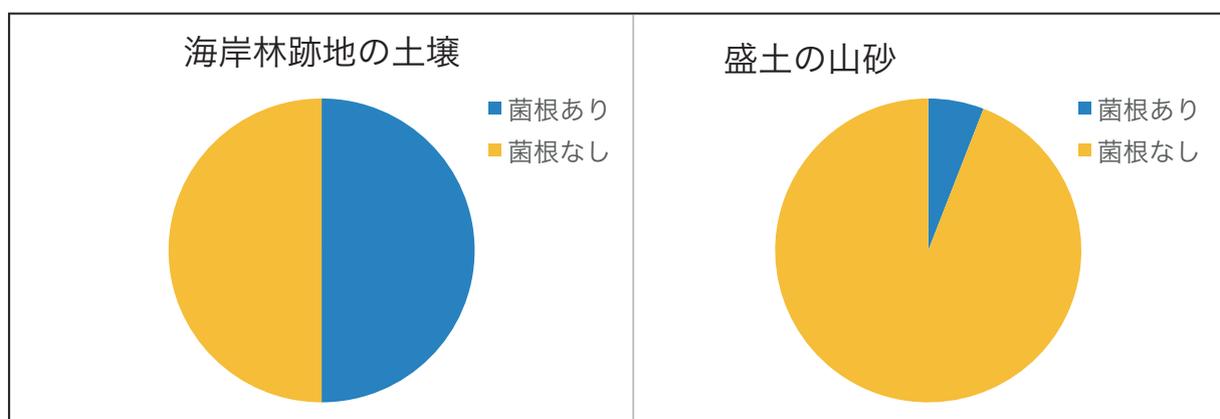


図1 菌根の形成率  
海岸林跡地の土壤と盛土の山砂に植えたクロマツ芽生えのうち菌根化した個体の割合



写真1 菌根を形成したコンテナ苗  
白く見えるのが菌根とそこから伸びる菌糸

能がある菌根性きのこであるショウロの胞子をコンテナ苗用培土に加えることで、コンテナ苗に効率よく菌根を形成させることができました。

菌根菌定着コンテナ苗の生産のため、まずコンテナ間移植による接種を試みました。100mlの小型コンテナで1年育成した苗木の根鉢から土壌と細根を落とし、胞子を混ぜ込んだ土壌を用いて大きめのコンテナに植え直すという方法です。菌根化率100%という結果が得られました(写真1)が、接種作業に大変手間がかかるため大量生産には向きません。

次に、最初から胞子を添加した培土にクロマツを播種することによる一段階でのコンテナ苗生産を試みました。こうして育成した苗木を調べたところ、86%の個体で菌根が形成されていました。一般的な菌根化に好適な条件(乾燥・貧栄養)とコンテナ苗の育成条件(湿潤・富栄養)は正反対なのですが、コンテナ苗育成条件でもクロマツとショウロであれば安定して菌根を形成できること、胞子入り培土でも菌根が形成されることが分かりました。

#### 《より詳しく知りたい方のために》

「菌根の生態学」(1995) M. F. アレン(中坪孝之・堀越孝雄 訳) pp.146-160, 169-170. 共立出版株式会社 ISBN4-320-05424-5

「森林微生物生態学」二井一禎・肘井直樹(編) pp.57-66. 朝倉書店 ISBN4-254-47031-2

Mycorrhizae and Plant Health (1994) Pflieger F L, Linderman R G (Ed) APS Press(アメリカ植物病理学会) pp.261-282. ISBN0-89054-158-2

明間 民央(森林微生物研究領域)

### 3.17. クロマツの植栽本数を標準（10,000本/ha）より少なくしても大丈夫か？

#### < 回 答 >

砂の動きが抑えられて、潮風からも守られた植栽地では植栽本数を減らすことは可能であり、条件のいいところでは3,000本/haまで減らすことも可能と考えられます。

#### < 解 説 >

海側の砂浜からの飛砂が砂草などにより抑えられ、防風柵などにより潮風から守られた植栽地では、植栽木への飛砂と潮風の影響が少なく、冬の季節風による春先の葉の赤褐色化（写真1）が見られません。このような場所では、樹高が防風工の高さを超えるまでは樹高成長が見込めます。なお、条件の厳しいところでは、樹高が防風工の高さを超えるようになると、梢端部分は潮風・飛砂の影響を直接受けるため、樹高成長はほとんど期待できず、樹高は防風工の高さ程度に抑えられます。このように立地条件により最終的な樹高が決まると、災害に強い形状比（樹高÷胸高直径：60～70が目安）との関係で、目標となる胸高直径が決まります。樹高と胸高直径が決まれば、隣接する枝葉が重なる林冠の閉鎖する立木密度が決まります。よって、理屈上の最低の植栽密度は



写真1 春先の植栽木

飛砂と潮風の影響が大きい植栽地では、葉が赤褐色化します。

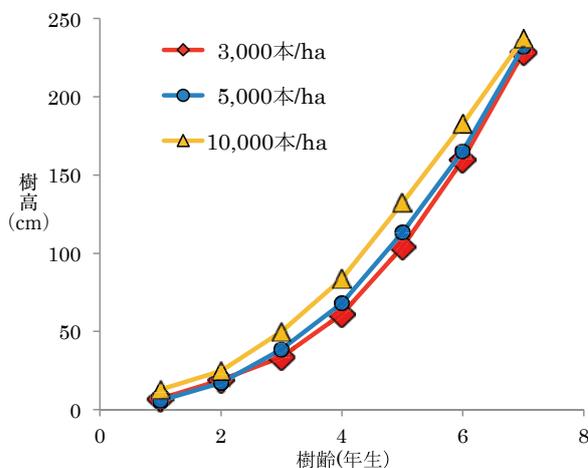


図1 植栽密度毎の樹高成長

想定される最終的な樹高に対応した立木密度になります。実際は枯損に備え、また、優勢木を残すため、余裕を見て植栽する必要があります。

図1は、飛砂と潮風の影響が少ない植栽地における10,000本/ha、5,000本/ha、3,000本/ha植栽の平均樹高の推移を示しています。これらの植栽地の前線部には高さ5m程度の人工砂丘があり、その上には高さ2mの丸太防風柵が設置されています。植栽地は高さ2mの静砂垣で一辺30mの方形に区切られており、

さらにその中は高さ 1m の静砂垣で一辺 10m の方形に区切られています。樹高は、10,000 本/ha 植えが他より高いもののその差はほとんど無く、少なくとも樹高が防風工より低い期間においては、植栽密度の違いによる差は見られませんでした。

図 2 は、樹高が防風工の高さを超えた林分と超えていない林分の前縁のクロマツを対象に、H25、26 年の春に葉の褐変化位置、樹高を調べた結果です。調査地には汀線から約 100m 陸側に高さ 4m 程度の人工砂丘が設置され、その上には高さ 2m の丸太防風柵が設置されています。H25 から H26 年の 1 年間の樹高の伸びは、平均樹高が防風工の高さを超えている H14、15 年度植栽地では 5cm 程度しかありませんが、平均樹高が防風工の高さを超えていない H16、17 年度植栽地では 50cm 以上ありました。また、樹高が防風柵より低い植栽木では冬の季節風による褐変化が見られません。このように、樹高が防風工の高さに達するまでは、植栽木が受ける潮風・飛砂の影響は少なく樹高成長が見込めると考えられました。

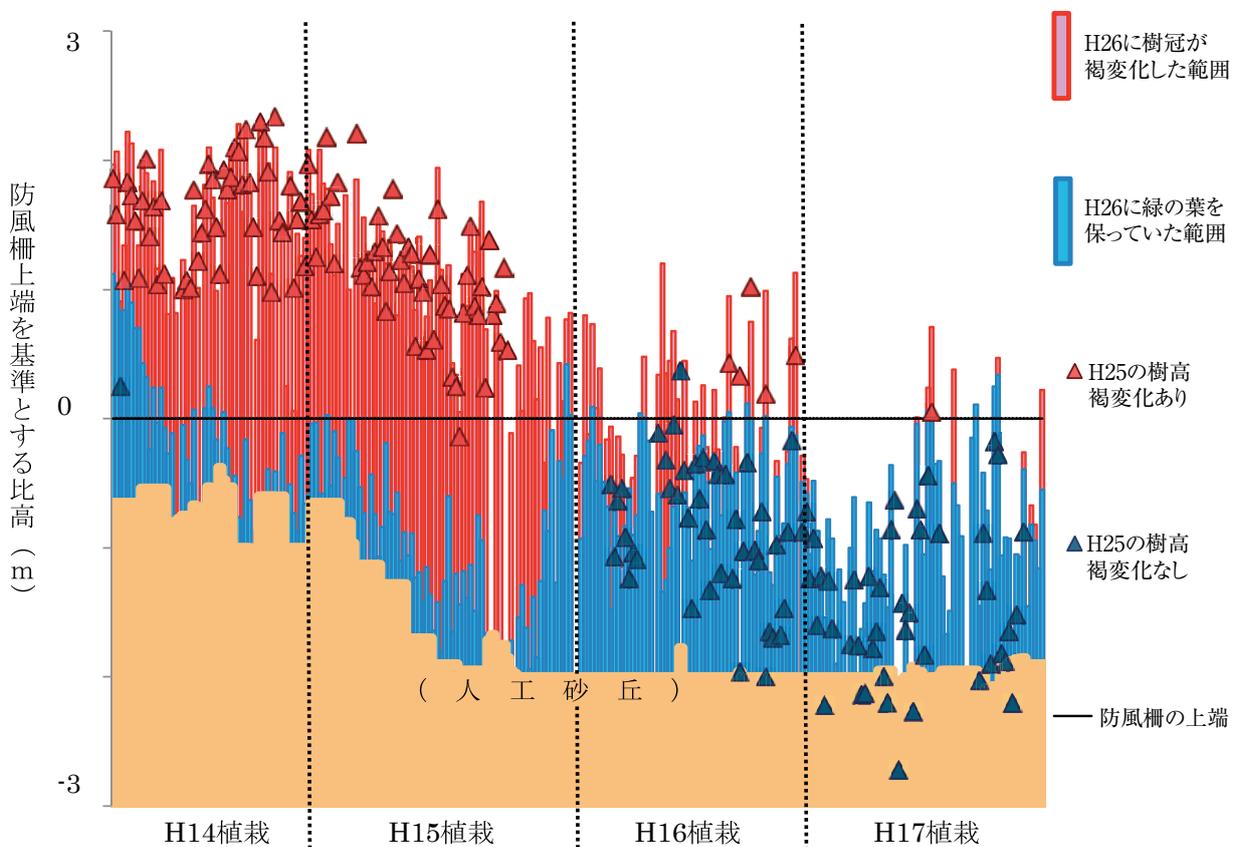


図 2 前縁部の植栽木における、樹高・葉の褐変化位置・防風工の高さ

各棒は 1 本のクロマツに対応し、上端が H26 の樹高を示す。赤い部分は葉が褐変化していることを、青い部分は葉が緑を保っていることを示す。

### 《より詳しく知りたい方のために》

小倉晃・坂本知己 (2015) 日本海側の海岸クロマツ林における 5 千本植栽の生育状況 (I) - 十分な防風対策下での植栽事例 -, 海岸林学会誌, 14, 21-26

小倉 晃 (石川県林業試験場)

### 3.18. 植栽本数（植栽密度）を減らすことの利点は？

#### < 回 答 >

植栽本数（植栽密度）を減らすことで苗木本数、植栽費、除伐（本数調整）費を削減できることに加えて、初回の除伐の時期を遅らせ、過密化を防ぐ効果も期待されます。

#### < 解 説 >

従来、海岸クロマツ林では10,000本/haという密植が行われてきましたが、防風工の発達等により、場所により植栽密度を下げることも可能になりました。植栽密度10,000本/ha、5,000本/ha、2,500本/haのそれぞれが樹高5.5m立木密度2,500本/haになる時までの直接工事費（表1）は、植栽本数を半分にすると経費も半分程度、植栽本数を4分の1にすると経費も4分の1程度になりました。植栽密度を下げることは鬱閉時期を遅らせるので、下刈り期間が長くなる場合もありますが、植栽後5年程度になると、樹高は1m以上となり、多くの場所で下刈りの必要は無くなると思われれます。経費における苗木代と植栽費はいずれの植栽密度においても大きな割合を占め、さらに、除伐（本数調整）費も削減できることから、植栽本数を減らすとこと経費は大きく下がります。また、植栽密度を下げることで、初回の除伐の時期を遅らせることができます。通常の場合、適正な立木密度にするために林冠高が3.0mに達する前から除伐を始め、その後も頻繁に除伐を行なう必要があります。除伐は

表1 植栽・育林コスト費

項目	単価	単位	植栽密度(本/ha)		
			10,000	5,000	2,500
苗木代	抵抗性	524 (円/本)	5,240,000	2,620,000	1,310,000
	普通	56 (円/本)	560,000	280,000	140,000
植栽費		270 (円/本)	2,700,000	1,350,000	675,000
下刈り			285,834	381,112	381,112
内訳	1年生	95,278 (円/ha)	95,278	95,278	95,278
	2年生	95,278 (円/ha)	95,278	95,278	95,278
	3年生	95,278 (円/ha)	95,278	95,278	95,278
	4年生	95,278 (円/ha)	0	95,278	95,278
除伐			1,470,000	490,000	—
内訳	1回目 1伐3残	196 (円/本)	490,000	—	—
	2回目 1伐2残	196 (円/本)	490,000	—	—
	3回目 1伐3残	196 (円/本)	245,000	245,000	—
	4回目 1伐2残	196 (円/本)	245,000	245,000	—
合計	抵抗性	(円/ha)	9,695,834	4,841,112	2,366,112
	普通	(円/ha)	5,015,834	2,501,112	1,196,112

初期ほど重要で、これまで多くの海岸林ではこの初期の除伐が適切な時期に行われずに過密化が進みました。除伐の開始時期を遅らせることには、その手間や経費の削減に加えて、過密化しやすい期間を減らすという大きな利点があります。

一方で、植栽密度を下げることで飛砂防備機能を発揮し始める時期が遅れる心配があります。そこで、それがどれくらい遅れるかについて検討しました。林冠（林床）が閉鎖した時点を植栽地から飛砂の発生がなくなり、飛砂防備機能が発揮され始める時期とすると、樹高と枝張りの関係（図1）から、10,000本/ha植栽（植栽間隔約1m）では植栽後4年程度で、5,000本/ha植栽（植栽間隔約1.4m）では植栽後5～6年程度で、3,000/ha植栽（植栽間隔約1.8m）では植栽後6～7年程度で、その機能が発揮されます。確かに植栽密度を下げることで飛砂防備林として機能し始める時期は若干遅くなりますが、林冠が閉鎖されるまで全く機能しないわけではなく、静砂垣の効果も見込めるので、植栽密度を減らすことは大きな問題ではありません。

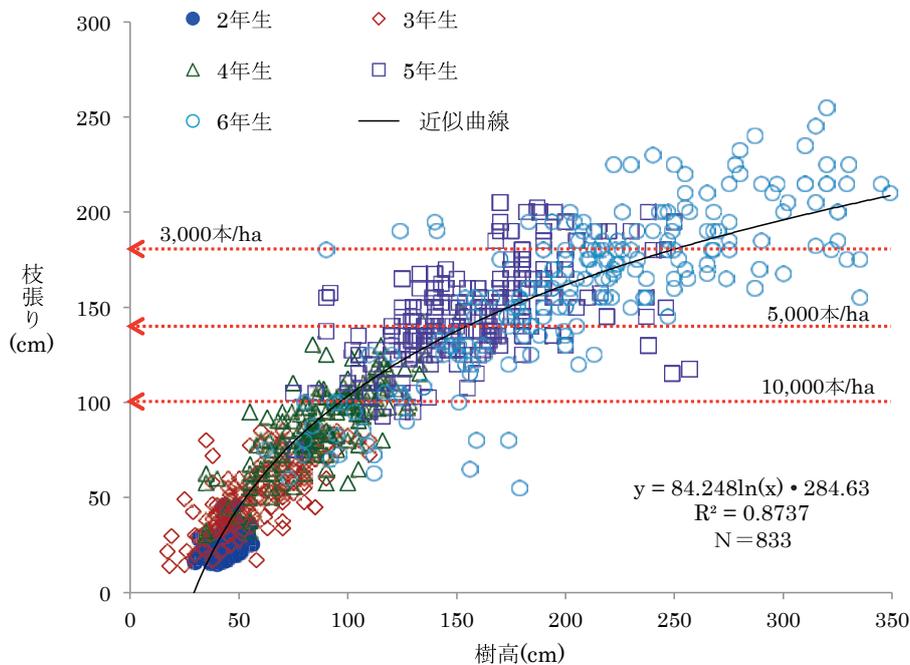


図1 樹高と枝張りの関係（5,000本/haのデータ、樹高350cmまで）  
（赤い点線は、各密度の植栽間隔を示す）

《より詳しく知りたい方のために》

小倉晃・坂本知己（2015）日本海側の海岸クロマツ林における5千本植栽の生育状況（Ⅰ）－十分な防風対策下での植栽事例－，海岸林学会誌，14，21-26

小倉 晃（石川県林業試験場）

## 4. コンテナ苗の基礎知識

### コンテナ育苗技術開発の経緯

コンテナ育苗技術は、北欧では1970年代から開発が進められ、すでに確立した技術ですが、我が国では2007年に初の国産育苗コンテナが供給されるようになって、まだ9年程度しか経過していません。日本は夏季の高温乾燥、雑草木の繁茂が著しいなど北欧とは自然条件が大きく異なり、また造林樹種の特徴の違いも大きいので、海外のコンテナ育苗技術を直接導入することは困難です。すなわち、灌水のより有効な利用、雑草木による被圧に耐えるための大きなサイズ、後述する種子発芽率の低さへの対処など、独自の技術開発が求められます(1)。

以前は林業用の苗木といえば、苗圃から掘り取ったままの裸苗しかありませんでした。その後、植えやすさや活着率向上の点から鉢付き苗への関心が生じ、容器栽培して鉢付きで出荷するポット苗が考案されました。紙製のペーパーポット(写真1)、ビニル製のビニルポット(写真2)等が代表例です。一時ポット苗の育成が盛んに行われましたが、普及するに従い、熱帯林などで植栽したポット苗の樹勢が数年後に衰え、やがて枯死に至る例が数多く発生しました。調べてみると、育苗中に苗の根系が容器内で周回し、それが植栽後に変形を残したまま成長して根系の成長不良を生じ、樹勢の衰えに至ることがわかりました(2)。



写真1 ペーパーポット苗



写真2 ビニルポット苗



写真3 コンテナ苗

この育苗時に根系が周回する現象を「根巻き」と呼びます。根巻きは苗の側根が放射状に伸びて側壁に突き当たり、そこから側壁に沿って周回しながら下方に向かうことにより生じます。下方に向かって底面に突き当たると、側壁と底面の境界に沿って際限もなく周回し、深刻な根巻きを生じることになります。一方主根は下方に伸びて底面に突き当たり、そこから側面に向かって側壁に突き当たり、同様に根巻きを生じます。これら根巻きを回避することを目的として開発されたのがコンテナ育苗技術(写真

3) です。

コンテナには側壁内面に縦方向の突起「リブ」を設けることで、側壁に突き当たった根系を周回させることなく下方に誘導します。さらに底面を開放形状として根系を「空気根切り」して、そこで伸長を止めます。その結果、底面に根端が多数のぞいた根鉢が形成されます。このような形状の小容器（キャビティ）を多数連結したのが、「マルチキャビティコンテナ」(写真4)です。その後、後述するように、内面リブの代わりに側面にスリットの入ったコンテナが開発されて、現在はサイドスリット式コンテナが主流となりつつあります。



写真4 マルチキャビティコンテナ

## 1粒播種の可能性

コンテナ苗は、容器内に詰めた人工培地で育成されます。露地育苗も可能ですが、一般にはビニルハウス内で灌水、施肥、日照などをコントロールして育苗されます。海外ではコンテナキャビティに種子を1粒ずつ播種して育苗する方法が確立されていますが、主要国産造林樹種であるスギ、ヒノキは種子の発芽率が低いため、多くの場合苗床で発芽させた幼苗をコンテナに移植する方法が主体となっています。この方法は移植にかかるコストが大きく、苗木価格を押し上げる要因の一つとなっています。海岸林造成に用いられるクロマツはスギ、ヒノキと比較すると自然状態での種子発芽率は高く、精選の精度によってはコンテナへの直接播種での育苗も可能となります。実際に、北欧などではマツ科の造林樹種の種子を、洗練された選別技術により発芽率100%近くに向上させて1粒播種で育苗して、高い得苗率を得ています。今回の試験(3.12参照)で使用したクロマツコンテナ苗も森林総研で1粒播種で育苗したのですが、まだ得苗率があまり高くなく(本プロジェクトで使用したコンテナ苗では78.9%)、実用化にはもう1段階種子選別技術を向上させる必要があります。

## 育苗期間

一般に裸苗の育苗期間が3年程度かかるのに対し、クロマツを含む多くの樹種でコンテナ苗は播種から1年で育苗できます。春に播種したものを、その年の秋または翌年の春に出荷することが可能です。また、コンテナに直接播種した場合には、育苗途中での床替えの必要はありません。コンテナ苗はまた、育苗期間が短いため、急激な需要の変化に対応することができます。裸苗は3年後の需要を見越して生産調整する必要がありますが、コンテナ苗はより短期的な需給調整が可能です。今回のような突発的な災害へも、コンテナ苗は短期間で対応することができます。

## 植栽効率

コンテナ苗は180～500本/m<sup>2</sup>程度の高密度で育成されるため、スギ、ヒノキ、カラマツ等では出荷時には裸苗よりも背が高く径が細く下枝の少ない形状となります。一方で、クロマツはコンテナ苗と裸苗の形状に上に挙げた樹種ほど差は生じないようです。

コンテナ苗は、専用器具を使用すると高効率に植栽でき、裸苗の植栽のような熟練も必要ありません。コンテナ苗の専用植栽器具にはプランティングチューブ、スペード、ダブルなどがありますが、一般的なクワでも植栽することができます（写真5）。コンテ



写真5 コンテナ苗植付け器具

左からプランティングチューブ、スペード、ダブル、クワ

ナ苗が普及するに伴い、各地で独自の植栽器具も開発されています。海外ではプランティングチューブにより1000本/人日を超える植栽作業効率を上げている例もありますが、国内の造林現場では苗木の樹種・サイズや自然条件などが異なるため、そこまでの効率を上げることは困難です。しかし、今回のプロジェクトによって、海岸林造成においては、平坦な地形と少ない下層植生、貫入抵抗の少ない土壌などの条件により、海外なみの作業効率を上げることも可能であることがわかりました（3.12参照）。コンテナ苗はコンテナから引抜いて段ボール箱に詰めて出荷することが一般的となっていますが、予定通り植栽作業が終わらなかったような場合でも現地で数日程度は仮植や灌水なしで箱詰めのまま保管することができます。

## 活着率

コンテナ苗に期待されるものとして活着率の高さがありますが、一般的な植栽現場では裸苗も高い活着率を得られるので、コンテナ苗－裸苗間であまり差は見られません。しかし、植栽後に降雨が少なかった場合などには、コンテナ苗の枯死率が裸苗を下回った、という事例が報告されています。条件が厳しくなると、コンテナ苗の優位性が顕著になるということはあるようです（3）。

## 生産コスト

国内でのコンテナ苗の普及に際し現在一番のネックとなっているのが、苗木価格が高いことです。前述の通り、主要国産造林樹種の種子発芽率は低く、確実に得苗するため、苗床苗をコンテナに移植する、あるいはコンテナに種子を複粒播種して発芽後に間引きする、等の手法をとっていますが、これらの工程がコンテナ育苗コストを押し上げています。多くの国

内の林業用種苗業者の生産規模は年間数万本程度（海外の主要苗圃での年間生産量は数百万～数千万本）で、いわゆるスケールメリットが出にくく、省力化のための設備投資が難しいこともコンテナ育苗の低コスト化が進まない要因となっています。

## 育苗コンテナの種類

コンテナ育苗技術はポット苗の「根巻き」を解消することを目的の一つとして開発され、当初は容器内面の上下方向に高さ2 mm程度のリブを設けて、側壁に突当たった根を周回させずに下方に誘導し、底面で空気根切りする方法が主流でした。この方法では、空気根切りされた根端が底面に集中し、植栽後に根鉢先端からしか根が発達しないこととなります。コンテナ苗専用植栽器具の多くは尖ったものを地面に突き刺して植え穴を空けるという作動原理なので、しばしば根鉢の先端と土壌の間に空隙ができて、根端は空気根切りされたままになってしまい、こうなるとしばらくの間根系が成長することが期待できません。そこで、側面に縦長のスリットを設けて側面でも空気根切りすることにより、植栽後の側根の発達を促す手法がとられるようになりました（写真4左）。根鉢側面は植栽方法如何に関わらず土壌と密着しやすいので、この方法であれば根端が土壌と接触することになります。内面リブとサイドスリットの双方を持つコンテナもありますが、これでは結局側壁に突き当たった根系の多くが下方に誘導されて内面リブ方式の特徴が強く現れ、サイドスリット方式の利点が半減してしまうので、近年はサイドスリットのみコンテナが主流となってきています。



写真6 シングルキャビティコンテナ

うのを待つしかありません。そのため、クロマツでは根系形状に内面リブ方式とサイドスリット方式の違いがスギなどより顕著に表れます。

一般的にはコンテナ育苗は多数の小容器が連結したマルチキャビティコンテナで行われますが、小容器が独立していて、それを多連のフレームに格納して育成するシングルキャビティコンテナ（写真6）も使用されます。シングルキャビティコンテナは、未発芽・枯死キャビティを間引きしたり、成長に従って育成密度を調整したりすることが容易にできるという利点がある一方で、培地充填や容器洗浄はマルチキャビティコンテナよりもかなり面倒で、持ち運びや保管にも手間がかかります。

その他、宮崎県林業技術センターが開発したMスターというコンテナ（写真7）も一部で使用されています。これは、波状のプラスチックシートを丸めて多連のフレームに格納したもので、波状の凸部がリブの役割を果たして根巻きを防止します。分類上はシングルキャビティ・内面リブ式コンテナで、長所短所もそれらと同等ということになりますが、巻き径を変えることでコンテナ容積を調整できるという特長があります。



写真7 Mスターコンテナ

海外林業先進国では、林業用種苗の育成に多種多様なコンテナが使用されています(4,5,6)。これらはネット通販等により入手可能で、私達も国産コンテナが開発される前には海外からコンテナを購入して育苗技術開発を進めていました。国産コンテナが供給されている現在でも、もちろん海外製コンテナの購入は可能ですが、これらは原価は安価なものの輸送料が高かついて結局低コストにならないことに留意する必要があります。

これまでクロマツのコンテナ苗の植栽事例は少なく、海岸林造成への適性もよくわかっていませんでした。本プロジェクトではそれらを明らかにするために、仙台市荒浜地区の海岸林被害跡地に試験地を設け、コンテナ育苗したクロマツを植栽して、継続的に調査しました。

#### 《より詳しく知りたい方のために》

---

- (1) コンテナ苗 その特徴と造林方法 林業改良普及双書 178、全国林業改良普及協会、2014
- (2) Michael D. Bengé (1992) The comparative advantages and disadvantages of root trainers, dibble tubes, plastic bags and bare-rooting, Technical series 4, Agency of International Development
- (3) 平成 25 年度農食研事業「東北地方の多雪環境に適した低コスト再造林システムの開発」実績報告書、2014
- (4) BCC 社 HP : <http://www.bccab.com/growing-systems.php>
- (5) Lieco 社 HP : <http://www.lieco.at/lieco+containertypen/1136/html>
- (6) Stuewe & Sons 社 HP : <https://www.stuewe.com/>

山田 健（林業工学研究領域）

## 5. 用語解説

- <sup>i</sup>**赤枯れ**：今回の津波の後、津波に耐えた樹木の中に葉が褐色化するものが現れ、この立ち枯れ現象・状態は、「赤枯れ」と呼ばれました。これは、葉が褐色を呈した状況を表現したもので、菌が感染して起こる樹木病害の「赤枯病」とは無関係です。
- <sup>ii</sup>**松くい虫被害（マツ材線虫病被害）**：マツノザイセンチュウを病原体として生じるマツ類樹木の枯死被害のこと。明治期末に九州で確認され、その後各地で発生することとなった激しいマツの枯死被害は、1970年にマツノザイセンチュウが病原体として特定されるまで長い間、樹皮下を食い荒らす昆虫類（総称して、松くい虫）が原因と考えられてきました。このため、この被害を指して「松くい虫」の用語が今なお通例として使われているのですが、学術的な正式名称は「マツ材線虫病」です。マツ材線虫病は昆虫媒介性の伝染病であり、日本ではマツノマダラカミキリが主な媒介者であることが知られています。これらの他に「松枯れ」という言葉が用いられることがありますが、この言葉は松くい虫（マツ材線虫病）被害だけでなく被陰、干害、他の病虫害などさまざまな原因による松の枯れを含むものと考えべきでしょう。
- <sup>iii</sup>**除塩**：塩分を過剰に含む土壤に大量の真水を導入し、土壤中の塩分を大量の水とともに排出すること、または、その作業そのものを言います。一般的に、津波や高潮により海水が浸入して、塩分が過剰となった土壤の再生に必要な作業とされています。海水に浸かった土壤では塩化ナトリウムを主体とする塩分の濃度が高まり、土壤中の水の浸透圧が高くなるため、植物は水を吸収しにくくなり、塩害が発生します。そのために、塩害を受けた土壤には除塩を実施します。農林水産省では、塩害を受けた農地に対して、排水機場や基幹排水路の復旧による排水経路の確保、土壤改良材の施用、耕起・砕土、弾丸暗渠の施工、灌水・排水の繰り返しによる塩分の洗い出しなど、土壤の理化学的な環境改善に向けた除塩を推奨しています。しかし、日本の大部分の森林は機材、資材の設置が容易でない急傾斜地にあり、また平地にある海岸防災林でも灌漑・排水設備がありません。そのため、農地と同様の除塩は難しく、雨水に頼った自然の除塩を待つことしかできません。日本は降雨に恵まれているので、雨水による自然の除塩が期待出来ます。また、海岸林は、一般に砂質な未熟土の上に成林しています。砂質土壤は塩分の保持能力や保水能力が低いことから、きちんとした排水経路を確保できれば、降雨による除塩は効率的に進むと考えられます。
- <sup>iv</sup>**グライ層**：水浸しの土壤内部では、酸素が不足するため還元条件となります。還元条件下で土壤微生物が有機物を分解する際には、それと並行して土壤中の酸化鉄の還元が起こります。この反応では、有機物が電子供与体、3価鉄 ( $\text{Fe}^{3+}$ ) は電子受容体となって、有機物の分解の際に3価鉄 ( $\text{Fe}^{3+}$ ) が電子 ( $e^-$ ) を受け取り還元されて2価鉄 ( $\text{Fe}^{2+}$ ) が生成されます ( $\text{Fe}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ )。  $\text{Fe}^{2+}$  は淡緑色を呈するので、このような還元反応が起こった層位の土は青～灰色を呈します。このようなグライ化反応によって青～灰色を呈する土層を「グライ層」と言います。根の侵入や亀裂の形成によって空気や新鮮な水が供給されると鉄イオンが酸化され、その部分には明褐色の斑紋が形成されます。
- <sup>v</sup>**水締め**：土に水を加えて飽和状態になった時、土の粒子は水に浮いている状態になります。そこから水を排出することによって、飽和状態前よりも隙間が少ない状態で、土の粒子が締め固まること、また、その現象を意味します。

**表紙写真配置図** (数字は関係する項目を示す)

3.1	3.7	3.17
3.12 3.14		3.15
3.12	3.16	3.10
3.4	3.12	3.17 3.18

**ワンポイント解説 海岸林造成技術の高度化に向けて**

国立研究開発法人 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：2016（平成28）年12月22日  
お問い合わせ先：地域連携推進室  
電話：019-641-2150（代表）  
e-mail：www-thk@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  
電話：019-636-0011

