海水浸漬がタブノキ, アカマツ, クロマツの生理に与える影響の経時変化

立石麻紀子^{1,2)}・Ailijian Maimaiti²⁾・辻 将大²⁾・井上美那²⁾
谷口武士²⁾・山本福壽³⁾・山中典和^{*2)}

1) 九州大学農学部附属福岡演習林 Kasuya Research Forest, Kyushu University

2) 鳥取大学乾燥地研究センター Arid Land Research Center, Tottori University

3) 鳥取大学農学部 Faculty of Agriculture, Tottori University

摘要: 海岸林の塩害や海水浸漬ストレスが樹木に与える影響の経時変化を明らかにするために、タブノキ、アカマツ、クロマツの苗木を24時間海水に漬けた後、被害の推移を2ヶ月間観察した。被害程度は葉の変色度合いの目視による観察に加え、樹液流計測とクロロフィル蛍光収率測定を併せて行った。海水浸漬の被害はタブノキで最も早く現れ、90%以上の葉で変色した。アカマツは18日後に変色が発現し、38日後に95%以上の葉で変色した。クロマツでは18日後に一部変色が生じたが、実験終了時点でも60%以上の針葉は変色しなかった。いずれの樹種も、樹液流速やクロロフィル蛍光が低下した後に葉の変色が現れていた。さらに、クロマツでは海水浸漬により樹液流速の減少やクロロフィル蛍光の低下が生じた後、回復傾向が見られたが、可視被害では回復傾向は観察されなかった。

キーワード: 海岸林, 耐塩性, 津波

TATEISHI, Makiko, AILLJIAN, Maimaiti, TSUJI, Masahiro, INOUE, Haruna, TANIGUCHI, Takeshi, YAMAMOTO, Fukuju and YAMANAKA, Norikazu: **Temporal changes in effects of sea water flooding on physiology of *Machilus thunbergii*, *Pinus densiflora* and *P. thunbergii*.**

Abstract: To evaluate chronological trend in damage of salinity on coastal forest species, we monitored transition of damages in *Machilus thunbergii*, *Pinus densiflora* and *P. thunbergii* saplings for three months after sea water immersion for 24 hours. The damage was evaluated from discolored-leaves rate by visual observation, and physiological observation using sap flow and chlorophyll fluorescence. Salinity damage appeared dramatically in *M. thunbergii*, saplings were discolored 1 days later and died 18 days later. *P. densiflora* saplings were partly discolored within 18 days and most leaves were discolored 38 days later. *P. thunbergii*, on the other hand, more than 60% of leaves were undamaged at the end of experiments. Physiological parameters indicated damages prior to visual observation in all species. *P. thunbergii* showed trend of recovery in sap flow and chlorophyll Fluorescence, however, it was not observed visually.

Key words: coastal forest, salt tolerance, tsunami

1. はじめに

東日本大震災の大津波は、海岸林にも大規模な被害をもたらした。その浸水被害面積(約3,660ha)のうち、75%では甚大な被害を受けたとされる²⁾。しかし、津波による塩害や海水の浸水が海岸林に与える被害は、ある程度時間が経過してから見えることが多い。東日本大震災後、三陸海岸域のスギ林にて行われた調査では、震災直後には健全と考えられていたスギに、5月上旬になってから葉の赤褐色化が認められている¹²⁾。その他にも、津波による浸水被害の影響は被災地の各地で時間の経過とともに報告されている^{10, 12, 13)}。

樹木周囲の土壌が高塩分濃度になることで、樹木は過剰な塩類を吸収・集積し、養分吸収阻害が生じる。また、土壌の

水ポテンシャルが低下し植物内外の浸透圧差が減少するため、葉の水ポテンシャルが低下して吸水できなくなる^{7, 8)}。これらは樹木の成長不良や枯死の要因となりうる。

吉崎¹⁹⁾は日本のこれまでに起きた大震災で海岸林における津波被害をまとめ、その被害は樹種によっても過去の津波の事例においても一様ではないことを指摘している。東日本大震災後も、被災地の各地で被害状況調査が進められており^{10, 12, 13)}、今後これらの地域で海岸林の修復・再生を進めるには、時間を経て発現する影響のモニタリングを行い、海岸林樹木の塩水冠水耐性の評価をすすめることが必要である¹⁹⁾。

クロマツ(*Pinus thunbergii* Parl.)は耐塩性が高く海岸林として古くから利用されてきた樹種である^{2, 20)}。アカマツ(*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.)はクロマツと同じマツ

* 連絡先著者 (Corresponding author) : E-mail : yamanaka@alrc.tottori-u.ac.jp

〒680-0001 鳥取県鳥取市浜坂 1390 1390 Hamasaka, Tottori, 680-0001, Japan

属であるが、クロマツに比べると内陸に生育し、海岸のクロマツ林の後背林として植栽されることもある¹⁰⁾。タブノキ (*Machilus thunbergii* Siebold & Zucc.) は沿岸地に主に分布し¹⁾、マツ材線虫病被害が深刻なクロマツにかわり内陸側の海岸林として、植栽される樹種のひとつである¹¹⁾。広葉樹の中では比較的潮風に強いことが報告されている^{5, 9)}。津波被害を受けた海岸林の再生に際し、クロマツやアカマツ、タブノキは植栽樹種として提案されている²⁾。

本研究では上記3樹種を対象とし、海岸林樹種の耐塩性に関するデータ蓄積をすすめるために、従来の可視評価に加えて生理特性の状態も評価し、どのような過程で枯死に至るかを明らかにすることを目的とした。海岸林に用いられる樹種の苗木を用いて室内実験を行い、樹液流速や葉の生理特性、陽イオン濃度を調べることで、海水浸漬の影響が時間経過とともにどのように推移するのかについて複数の手法を用いて明らかにすることを試みた。

2. 材料ならびに方法

2.1 実験材料

本実験には2年生苗木を用いた。実験開始時の胸高直径と樹高は、タブノキで 1.03 ± 0.06 cm と 105.3 ± 2.5 cm、アカマツで 1.61 ± 0.16 cm と 161.8 ± 7.6 cm、クロマツで 1.53 ± 0.13 cm と 158.2 ± 9.8 cm であった。苗木は一本ずつ鳥取砂丘砂 (50%粒径 0.289 mm)⁴⁾を充填したプラスチックポット (直径約 25 cm, 高さ 30 cm) に植え替えた。ポットは鳥取大学乾燥地研究センターの大型ガラス室に設置し、圃場水を灌漑した。

2.2 実験設定

本研究は、分析のための葉の採取が樹木に与える影響を考慮して、対照区、海水処理区 I, II の3つのグループを設置し、ストレス度合いを外観や樹液流計測から観察するための実験1と、葉の陽イオン濃度の経時変化を調べるための実験2の二つに分けて行った。各区で直径と平均樹高に差が生じないよう苗木を選別し、各処理区7個体ずつ用いた。

海水処理は、まず、ポットの排水口にゴム栓をして閉じ、土壌から数 cm 上に水位がくるようにポットに海水を注ぎ、ポット内を海水で満たした。その状態に24時間置いた後、ゴム栓をはずして排水した。その翌日から3日に一度、2 L の圃場水をポットに灌漑しながら観察を続けた。海水注入、灌漑はともに苗木の根元付近で行い、葉にはかからないようにした。

実験1では、海水処理区 I と対照区を用いた。被害の程度は、葉の変色観察、クロロフィル蛍光の測定、および樹液流計測を用いて判定した。海水浸漬は樹液流計測を開始してから1週間後の7月25日に行った。約2ヶ月後の9月27日に刈り取り調査を行った。

実験2では、葉と土壌の陽イオン濃度の経時変化を調べるため、海水処理区 II の個体から、週に1度、葉と土壌の採取

を行った。葉の偏りを最小限にするため、クロマツとアカマツでは当年葉と古い葉から同量採取して1サンプルとした。土壌は樹木のすぐ横でポットの深さの半分まで小型スプーンで掘り採取した。海水浸漬は9月5日に行った。実験1における可視被害は約1ヶ月で樹種間の差が顕著になること (結果参照)、特にタブノキで葉が少なく、サンプリング回数が限られること、さらに、10月に入ると気温が下がり環境条件が大きく異なることなどから、1ヶ月でサンプリングを終了した。本研究に用いた海水は鳥取市の賀露港から汲み上げた。この海水の電気伝導度 (EC) は 38.2 mS cm^{-1} 、pH は 7.45 であった。

2.3 葉の変色とクロロフィル蛍光収率 (Fv/Fm) の計測

葉の変色度合いは目視により判断し、全体を100%とした変色部分の割合で評価した。クロロフィル蛍光収率は携帯型クロロフィル蛍光測定器 (MINI-PAM, WALZ 社) で計測した。計測する葉は変色していないものを用い、深夜に測定した。針葉での測定は、あらかじめクリップで複数の針葉を平行に固定した⁶⁾。初期値は海水処理の前日に計測した。

2.4 樹液流計測

海水処理区 I のクロマツ、タブノキの個体には茎熱収支法による樹液流計測センサーを設置した。このセンサーは茎に巻きつけたヒーターで定常的に加熱し、放射方向、垂直方向の熱移動を計測する。ヒーター熱量からこれらの熱量を除することで樹液流の移動により失われた熱量を求め、樹液流量を計算する方法である^{14, 17)}。データは1分毎に測定し、30分平均をマルチプレクサ (AM16/32B, Campbell Scientific, Inc.) 及びデータロガー (CR1000, Campbell Scientific, Inc.) を用いて記録した。クロマツ、タブノキそれぞれで1個体のセンサーに断線やログエラーなどの問題が生じたため、6個体のデータについて解析を行った。

蒸散量は日射や飽差といった気象条件によって変化する。海水処理前後の気象条件をそろえるため、観測期間中のうち、日射量が $17.28 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 以上の日のデータを用いた。

2.5 周辺環境計測

実験期間の日射量は乾燥地研究センター本館屋上の観測値 (SS-500, 小笠原計器制作所) を用いた。

実験1では、土壌の電気伝導度 (EC) の経時変化を計測するため、各処理区7個体のうち、2個体ずつのポットに土壌水分・EC計測センサー (5TE, Decagon Devices, Inc.) を設置した。データは10分毎にデータロガー (Em50, Decagon Devices, Inc.) を用いて記録した。

2.6 実験終了後の乾燥重量測定と陽イオン濃度分析

実験1終了後、処理区間で刈り取り調査を行った。植物体は葉、幹、根に分類し80℃で48時間以上乾燥し、乾燥重量を測定した。さらに葉と根は粉碎して約0.1gのサンプルを秤量後、混酸を用いた湿式灰化を行った。カチオン (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) の濃度は原子吸光光度計 (AA-6700S, SHIMADU) を用いて測定し、単位乾重量当たりの含有量を

図-1 タブノキ、アカマツ、クロマツ苗木における葉色変化率の推移

Fig. 1 Ratio of discolored leaves of *M. thunbergii*, *P. densiflora* and *P. thunbergii* saplings with experimental time. Error bars indicate standard deviation.

図-2 タブノキ、アカマツ、クロマツ苗木におけるクロロフィル蛍光収率の推移

Fig. 2 Changes in Fv/Fm ratio of *M. thunbergii*, *P. densiflora* and *P. thunbergii* saplings with experimental time. Error bars indicate standard deviation.

算出した。実験2で得られた葉サンプルについても同様の手順で陽イオン含有量を求めた。

2.7 土壌分析

実験2で得られた土壌試料は、水と質量比 1:5 で混合して作成した土壌溶液をろ過し、原子吸光度計にてカチオン濃度を定量し、単位土壌乾重量当たりの含有量を算出した。

3. 結果

3.1 変色した葉の割合

実験1において、タブノキでは海水浸漬処理後、1日経過した時点で葉の変色が開始した(図-1)。その後、変色部は増加し、18日後には80%以上の葉が変色し、38日後には97%の葉が変色した。クロマツ、アカマツには浸漬直後には変色が認められなかった。9日後にはアカマツの針葉一部で変色が認められる個体が現れ、38日以降、95%以上の葉が変色した。一方、クロマツでは、18日後に4個体に変色が始まった。実験終了時点でのクロマツの変色割合は平均して約34%であったが、個体によって変色割合の大きな違いが観察され、80%もの葉が変色した個体がある一方で、10%にとどまっていた個体も存在した。

3.2 クロロフィル蛍光

クロロフィル蛍光収率は、タブノキでは1日後には0.6まで減少し、2日後には0.25以下に減少した(図-2)。アカマツ

では6日後から若干の低下が認められ、その後急激に低下した。アカマツのクロロフィル蛍光収率の変化は、変色した葉の割合の変化よりも若干早く生じていた。クロマツでは、27日後に0.6まで低下したが、その後、クロロフィル蛍光収率が大きくなっており、回復する傾向がみられた。

3.3 樹液流速の経時変化

タブノキの樹液流速は、海水浸漬1日後、実験前の30%以下まで減少した(図-3)。その後も減少を続けて3日目には9%、4日目以降にはほぼ0となり計測不可となった。一方、クロマツでは処理後6日目までは30%以下であったが、22日目には53%まで回復し、実験終了時には海水処理前の約70%程度の樹液流速を示した。

3.4 土壌水分・電気伝導度の経時変化

海水処理前、ECは 0.06 mS cm^{-1} 以下の範囲を変動していた。対照区もほぼ同じ範囲をとっており、海水処理区と対照区とで違いはなかった。海水処理中、センサーの計測上限値($>23 \text{ mS cm}^{-1}$)まで増加した(図-4)。海水排水後のECは急激に減少し、6日目には $0.08\sim0.24 \text{ mS cm}^{-1}$ まで減少したが海水処理前よりも高い値であった。

土壌の Na^+ 濃度は、海水浸漬後1日目は高かったが5日目には急激に減少していた(図-5)。また、 Na^+ 濃度はクロマツ、タブノキ、アカマツの順で大きく、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} でも同様の傾向であった。

図-3 タブノキ (a) とクロマツ (b) の相対樹液流量。海水処理前の平均樹液流量を 1 としたときの相対値。日射量が $17.28 \text{ MJ day}^{-1}$ 以上の日のみ示した。エラーバーは標準偏差を表す。

Fig. 3 Relative sap flow of *M. thunbergii* (a) and *P. thunbergii* (b) with time. Each value was divided by mean sap flow before sea water immersion. Data with $17.28 \text{ MJ day}^{-1}$ of solar radiation is shown. Error bars indicate standard deviation.

図-4 土壌の電気伝導度。計測開始日から海水処理後 30 日までの日平均値を示す。

Fig. 4 Electric conductivity (EC) in soil. Data from the beginning to 30 days after the sea water immersion is shown.

3.5 実験終了後の乾燥重量

すべての樹種において、海水処理した個体は、対照区の個体に比べると乾重量が小さかった (図-6)。しかし、クロマツには有意差はみられなかった (t -test, $P < 0.05$)。葉、枝幹、根に分けて比較したところ、すべての器官において乾燥重量は海水処理区で対照区より小さくなる傾向がみられた。

3.6 植物体の陽イオン濃度

実験終了後の葉と根の陽イオン濃度を表-2 に示す。葉の Na^+ は 3 樹種とも海水処理区 I で大きく、11-61 倍の値を示した。 K^+ はアカマツ、タブノキでは海水処理区 I で大きく、反対にクロマツは小さかった。 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} はタブノキの葉では違いがなかったが、クロマツ、アカマツでは海水処理区で大きかった。根の陽イオン濃度は、葉とは異なる傾向となり、 Na^+ は海水処理区のクロマツ、タブノキで大きかったが、アカマツでは違いが見られなかった。 K^+ は 3 樹種すべてで海水処理区の方が有意に小さく、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} は大きかった。

実験 2 における、葉の陽イオン濃度の経時変化を図-7 に示す。 Na^+ は 3 樹種とも実験後大きく増加しており、アカマツが一番高い値をとった。 K^+ はアカマツではわずかに上昇傾向

図-5 土壌中の Na^+ 濃度。エラーバーは標準偏差を示す。

Fig. 5 Na^+ concentration in soil. Error bars indicate standard deviation.

図-6 実験終了後の乾燥重量。エラーバーは標準偏差を示す。

Fig. 6 Dry weight of saplings at the end of experiment. Error bars indicate standard deviation.

を示した。タブノキではサンプリング日ごとのばらつきがおおきく、クロマツではほぼ変化しなかった。 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} はともにクロマツ、アカマツでは時間につれて増加したが、タブノキでは変化しなかった。

4. 考察

本研究では 3 樹種が同様の海水浸漬を受けた際、タブノキとアカマツに比べクロマツでは被害が小さかった。タブノ

表-2 実験終了後の葉と根の陽イオン濃度。

Table 2 Cation concentration of leaves and roots at the end of experiment.

			Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
			(mg gDW ⁻¹)	(mg gDW ⁻¹)	(mg gDW ⁻¹)	(mg gDW ⁻¹)
<i>M. thunbergii</i>	Leaves	Sea water	13.82 ± 3.76 *	9.93 ± 4.02	3.32 ± 0.80	10.35 ± 2.83
		Control	1.20 ± 0.36	7.92 ± 1.72	3.41 ± 0.38	10.53 ± 1.17
	Roots	Sea water	6.14 ± 1.03 *	1.91 ± 0.54 *	3.78 ± 0.37	3.42 ± 0.59
		Control	4.33 ± 1.34	6.13 ± 0.72	3.29 ± 0.79	2.66 ± 0.59
<i>P. densiflora</i>	Leaves	Sea water	20.73 ± 3.24 *	7.81 ± 1.36 *	3.62 ± 0.69 *	4.30 ± 0.54 *
		Control	0.34 ± 0.05	5.94 ± 0.53	1.95 ± 0.66	2.82 ± 0.70
	Roots	Sea water	3.10 ± 1.45	0.68 ± 0.62 *	2.13 ± 0.77	3.54 ± 0.90 *
		Control	3.16 ± 1.63	2.71 ± 0.25	1.53 ± 0.30	2.23 ± 0.50
<i>P. thunbergii</i>	Leaves	Sea water	10.70 ± 5.22 *	5.06 ± 0.60	2.40 ± 0.53 *	4.81 ± 0.76 *
		Control	0.44 ± 0.11	5.85 ± 0.82	1.32 ± 0.12	2.56 ± 0.80
	Roots	Sea water	4.42 ± 0.91	2.00 ± 0.97	2.34 ± 0.39 *	3.82 ± 0.83
		Control	3.53 ± 0.72	3.35 ± 1.13	1.70 ± 0.14	3.13 ± 0.99

アスタリスクは処理間で有意差があることを示す(t-test, *P*<0.05)。

Asterisks indicate significance at *P*<0.05 between treatments (t-test).

図-7 葉の陽イオン濃度の経時変化。

Fig. 7 Cation concentration of leaves with time.

キは広葉樹の中で比較的耐潮性が高いとされるが^{5,9)}、海水浸漬に対する耐塩性はクロマツ、アカマツに比べると弱いと考えられた。また、20~30cmの苗木を用いて、本研究よりも短い浸漬期間(90分浸漬を2回)で行われた実験では、アカマツはほぼ枯死状態となったが、クロマツでは被害が小さかった^{3,18)}。実験設定が異なるため単純な比較は難しいが、短期の浸漬時間でもアカマツは甚大な被害を受け、浸漬時間が長くなるとクロマツでも被害が大きくなると考えられる。さらに、東日本大震災後の海岸林調査で、海岸後背地のアカマツ林ではクロマツに比べると激しい針葉変色被害が生じ、高い枯死率が観察されており¹⁰⁾、本研究結果も実際の

海岸林調査の結果と合致する。
可視被害とその他の結果にはいくつかの相違点が観察された。まず、タブノキでは比較的早く可視被害が生じたが、変色が全体に及ぶ前に樹液流速及びクロロフィル蛍光収率は大きく低下した。アカマツにおいても、クロロフィル蛍光収率の低下が変色度合いの増加より早く生じていた。
クロマツでは処理直後、可視被害はなかったものの、樹液流速は海水処理前の30%にまで低下した。この期間の土壌はECが高く塩分が残存していたため、吸水阻害が生じたと考えられた。一方、クロロフィル蛍光収率は直後には大きく低下せず、樹液流速の減少よりも遅れて低下していた。したが

って、海水浸漬によりまず吸水障害が生じ、その結果、針葉の光合成機能が低下したと考えられる。また、樹液流速に回復傾向がみられた後、クロロフィル蛍光収率においても遅れて回復傾向がみられ、吸水障害から解放されたことで変色していない葉の機能も回復したと考えられる。したがって、より長期に観察を続けることで、新たな針葉の発現など可視的な回復も考えられる。

土壌の EC が 0.2 mS cm^{-1} 以下であれば植物の成長に問題ないとされる^{12,14)}。本実験では海水浸漬後もこの値をわずかに上回っていたものの、EC も陽イオン濃度も 10 日後には海岸林土壌の値¹²⁾と同程度以下となり、強度の海水ストレスからは解放されたと思われる。実験終了後の根では海水処理区の K^+ が対照区よりも有意に小さく、 Na^+ の吸収により K^+ の溶脱がおきたと考えられたが^{7,8)}、根の Na^+ は海水処理区と対照区との差は小さくなっていた。これは根から吸収された Na^+ が葉へ移動したことや、海水処理後の灌漑によって Na^+ が洗脱したことによるものであると考えられる¹⁵⁾。

一方で、葉の Na^+ はタブノキ、クロマツでは 10 日目以降、変化が見られなかったのに対して、アカマツでは増加していた。本実験では海水浸漬もその後の灌漑も苗木の根元への給水であるため、葉の陽イオン濃度の変化はすべて根からの吸収によるものであるといえる。したがって、タブノキでは早い段階で蒸散ができなくなったため Na^+ は増加しなかったと考えられる。一方、アカマツでは根に吸収された Na^+ の葉への蓄積が続いており、クロマツ同様に浸漬期間後もある程度蒸散を持続した可能性がある。しかし、クロマツでは樹液流が実験終了後まで観察されたものの、実験終了時における葉の Na^+ はアカマツほど上昇しなかった。このクロマツとアカマツの差は、地上部への Na^+ の移動を抑える機能がクロマツで高いことを示唆するものと考えられた。

本研究において、樹液流速とクロロフィル蛍光収率によって海水浸漬が樹木に与える影響の推移をモニタリングしたところ、可視被害の推移とは異なる傾向を観察できた。今回は 2 年生苗木を対象としたため、実際の海岸林や成木においても本研究結果と同様の結果が得られるかについては検証が必要である。今後、海水浸漬により可視被害が生じるまでの過程についてさらなる研究の蓄積が望まれる。

謝辞：文科省特別経費事業「東アジア砂漠化地域における黄砂発生源対策と人間・環境への影響評価」の援助を受けた。

引用文献

- 1) 服部保 (1992) タブノキ型林の群落生態学的研究：I. タブノキ林の地理的分布と環境, 日本生態学会誌, 42(3): 215-230.
- 2) 東日本大震災にかかる海岸防災林の再生に関する検討会 (2012) 今後における海岸防災林の再生について. p4
- 3) 堀江保夫 (1966) 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第 183 号:113-133
- 4) 神谷浩二・Rully Bakrie・本城勇介 (2006) 保水性を制御し不飽和土の透水係数の測定, 土木学会論文集 C, 62(3):679-688
- 5) 倉内一二 (1956) 塩風害と海岸林, 日本生態学会誌, 5(3):123-127
- 6) 小林剛・中谷暢丈・鈴木 雅代・三宅隆之・金度勲・平川 剛・久米篤・中根周歩・佐久川弘 (1997) アカマツ苗木のガス交換とクロロフィル蛍光の日変化, 日本緑化工学会誌, 26(4):343-348.
- 7) Kozlowski, T. T. (1997) Responses of woody plants to flooding and salinity, Tree physiology monograph, 1(1):1-29.
- 8) Lambers H, Chapin FS III, Pons T.L. (1998) Plant physiological ecology, Springer, New York, pp277-280.
- 9) 中島有美子, 吉崎真司 (2010) 沿岸域に生育する常緑広葉樹 5 種の塩分付着による耐潮性比較, 日本緑化工学会誌, 36(1):219-222.
- 10) 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.
- 11) 野堀嘉裕・宮城正明・伊藤聡 (2004) 山形県北部の海岸クロマツ林内に樹下植栽されたタブノキの成長, 東北森林学会誌, 9(1):1-5.
- 12) 小野賢二・飛来敬三 (2012) 東日本太平洋沖地震大津波が三陸沖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(2):33-42.
- 13) 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 ヶ月後の現地調査から-, 森林総合研究所報告, 12(1): 41-47.
- 14) 櫻谷哲夫 (1997) 蒸散量の測定, 日本農業気象学会編, 新訂農業気象の測器と測定法, 農業技術協会.
- 15) Sands, R., and Clarke, A. R. P. (1977) Response of radiata pine to salt stress. I. Water relations, osmotic adjustment and salt uptake. Functional Plant Biology, 4(4):637-646.
- 16) 千木容 (2005) 健全性の保たれている海岸クロマツ林の土壌について, 石川県林業試験場研究報告, 37:9-12.
- 17) Steinberg, S. L., van Bavel, C. H. M. and McFarland, M. J. (1990) Improved sap flow gauge for woody and herbaceous plants, Agronomy Journal, 82 (4):851-854.
- 18) 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第 183 号:131-151
- 19) 吉崎真司 (2011) 海岸林の機能と津波に対する樹木の応答について, 日本緑化工学会誌, 37(2):281-285.
- 20) 弓場譲 (1984) 水および塩類ストレス下におけるクロマツ苗の生長に関する水分生理学的研究, 名古屋大学農学部演習林報告, 7:1-57.

(2014.6.21 受理)