

種子の短期的な塩水浸漬がクロマツ(*Pinus thunbergii* Parl)とアカマツ(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)の発芽直後の生長へ与える影響

The effects of salt immersion on initial growth of *Pinus thunbergii* Parl and *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.

伊東 日向*・吉崎 真司*

Hyuga ITO and Shinji YOSHIKAZAKI

要旨:我が国の沿岸域には古来より、クロマツとアカマツを主林木とした海岸防災林が造成されてきたが、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波により東北地方を中心に甚大な被害を受けた。以来、津波など塩水による冠水に対する樹木の耐性に注目が集まっている。本研究では、塩水冠水が種子の発芽直後の出芽から展葉に至る初期生長におよぼす影響を把握するため、クロマツとアカマツについて異なる塩水浸漬期間の試験区を設け、塩水へ浸漬させた種子の播種実験を行った。その結果、5日以上塩水浸漬によって出芽率が著しく低下した。よって、津波や高潮による塩水冠水のような状況が発生した場合、土壌中に塩分が残存することによって種子の塩水浸漬期間が長くなるほど、出芽率は減少すると考えられた。

キーワード: 塩水冠水耐性、海岸林、クロマツ、アカマツ、実生、初期生長

Abstract : In coastal area, plants got serious salt stress by high tide, tsunami and so on. It is important to know the ability of tolerance to salt stress about each species. *Pinus thunbergii* Parl and *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. are typical tree that were planted on coastal area as a disaster prevention forest. In this study, the effects of immersion into salt water on initial growth of *P. thunbergii* and *P. densiflora* were tested. The seeds that were immersed by salt water planted in pot. And initial growth of seeds were measured. The result of this study, lengthiness of salt immersion terms caused reduction of sprouting rate. This result show that after the salt immersion by tsunami or high tide, high salinity in the soil that were maintained for long time causes decrease of number of seedlings in the coastal forest.

Key Words : tolerance to salt water, coastal forest, *Pinus thunbergii*, *Pinus densiflora*, seedling, initial growth

はじめに

我が国の沿岸域には古来より、クロマツとアカマツを中心とした海岸林が造成されてきた(中島・岡田, 2011; 近田, 2013; 太田, 2012)。海岸林は防災林として飛砂、潮風、高潮など沿岸域特有の自然災害から人々の暮らしを守ってきた(河口, 2000)。一方で、20世紀初頭から蔓延しているマツ材線虫病に伴うマツ枯れによる海岸林の機能低下は未だに深刻な問題となっている(梅津, 2016)。また近年では、価値観の多様化に伴い生物多様性保全機能やアメニティー機能など森林としての多面的機能も海岸林に求められるようになった(中島ほか, 2011)。加えて、東北地方太平洋沖地震に伴う大津波以降、海岸林の津波に対する減災効果についての研究がすすんでいる(佐藤ほか, 2012)。そこでは、クロマツと広葉樹との複層林や樹林配置、天然更新の利用など様々な造成手法や維持管理手法などが検討されている(吉崎, 2012; 坂本, 2012)。

沿岸域では津波や高潮に伴ない、塩水による冠水が発生する(中村ほか, 2012)。東北地方太平洋沖地震に伴う津波では、仙台市において汀線から3~4km内陸で5日間の塩

水による冠水の発生が報告されている(千葉ほか, 2012; 宮本ほか, 2012)。加えて、塩水冠水による塩害と思われる樹木の被害が報告されている(中村ほか, 2012)。また、津波に被災した海岸林において被災後の実生の発生時期がクロマツとアカマツで1年の差があったとの報告がある(大澤ほか, 2016)。以来、塩水による冠水がクロマツや広葉樹などの樹木へ与える生理的な影響に関する研究が進められている(立石ほか, 2014; 伊東・吉崎, 2014; 伊東・吉崎, 2013)。しかし、発芽および初期生長に対して塩水による冠水が与える影響についての研究事例は少ない。浅野(1963)はクロマツとアカマツの種子を対象とした耐塩性の比較実験を行っているが、これは種々の塩分濃度に対するクロマツとアカマツの発芽経過を比較した実験であり、津波や高潮の様に数日間の短期的な塩水冠水を再現した実験ではない。また、既往研究において、種子内へ塩水が侵入することにより代謝の攪乱、細胞膜の機能が阻害され、発芽率の減少および初期生長の抑制が発生するとの研究事例もある(Ahmad *et al.*, 2013; 浅野, 1963)。しかし、既往研究は乾燥地の塩類集積地に生育する植物や作物(Tobe *et al.*, 2001; Khodarahmpour *et al.*, 2012)を対象とした研究が中心である。すなわち、日本に生育する木本植

* 東京都市大学大学院 環境情報学研究科

物について、短期的な塩水冠水が種子の発芽や初期生長に与える影響や、その種間差について比較した研究事例は少ない。よって今後、マツ林再生のための多様な造成手法、維持管理手法について検討するためには、津波や高潮による塩水冠水を想定した数日間の塩水浸漬に対する樹木の耐性について生理的な影響に加えて発芽や初期生長に関する知見も重要である。特に種子が発芽した直後の出芽から展葉に至るまでの生長は天然更新によって成立する樹林の密度等にも影響を与えると考えられる。そこで本研究では、海岸林の主林木であるクロマツおよびアカマツを対象に塩水浸漬が発芽直後の生長へ及ぼす影響について把握するため、異なる期間の塩水浸漬処理を施した種子を播種し、クロマツとアカマツの塩水浸漬期間による出芽から展葉に至る、発芽直後の初期生長への影響の把握を試みた。

1. 研究の方法

本研究では津波や高潮による塩水冠水を再現するため、前処理として種子に塩水浸漬処理を行った。なお、塩水へ浸漬させる日数は伊勢湾台風と東北地方太平洋沖地震における塩水冠水日数を参考にした(谷口, 1954; 千葉ほか, 2012; 宮本ほか, 2012)。塩水浸漬処理後、蒸留水によって種子に付着した塩水を素早く洗い流し、川砂を充填させたプラスチックポットへ種子を播種した。

1. 1 実験材料

実験は2017年1月11日から同年の2月17日にかけて行った。実験対象種としてクロマツ(*Pinus thunbergii* Parl.)とアカマツ(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)を用いた。

1. 2 塩水浸漬処理

ろ紙を敷いたシャーレに15粒の種子を播種した。1シャーレを1反復とし、各試験区3反復の実験を行った。対照区として塩水浸漬処理を行わない0日区、処理区として1日区・5日区・10日区・15日区を設定した。0日区の種子は塩水への浸漬処理を行わずホワイトポットへ播種した。処理区では塩水を播種した種子の半分が漬かるまで注水し塩水浸漬処理を行った。なお、塩水は塩分濃度が海水とほぼ同様となるように滅菌水へNaClを3.5%濃度で溶解させたものを用いた。NaClを溶解させた塩水のECは51.47 mS/m、pHは8.41であった。塩水浸漬処理は25℃恒温、暗条件下のインキュベーター(SANYO社製, MIR-153)内にシャーレを静置し行った。塩水浸漬処理期間中におけるカビの発生を防ぐため、実験に用いるシャーレや道具はオートクレーブ(アルプ株式会社, KT30SD)にて120℃で30分間の滅菌処理を行った。また、シャーレ、ろ紙、塩水は1日おきに滅菌した新しいものと交換した。

1. 3 塩水浸漬後の処理

塩水浸漬処理後はグロースチャンバー(SANYO社製, MLR-351)内で25℃恒温、12時間毎に明暗転の条件下に1/10000aのホワイトポット(直径約12cm、高さ19cm)を静置し実験を行った。ホワイトポットはポットの底に軽石を5cm敷き詰め、軽石の上に川砂を深さ8cm充填した後、塩水浸漬処理後の種子を地表面から0.5cmの深さに播種した。1シャーレに1ポットを準備し、塩水浸漬処理と同様に1ポットを1反復として各試験区3反復とした。播種直後、種子の乾燥を防ぐため約500mLの水道水を灌水した。実験期間中はポットに充填した川砂の表面が乾燥しないよう適宜灌水を行った。

1. 4 発芽直後の初期生長の測定

各ポットにおける出芽数、苗高、根長、地際直径、地上部および地下部の乾燥重量を計測した。種子の出芽が確認されてから展葉するまで苗高を毎日記録した。展葉は束状に密着している子葉が展開し始めた時とした。展葉が確認された実生は根を傷つけないように慎重に掘り出し採取した。採取した実生の苗高、根長、地際直径を記録し、風袋に入れ80℃で48時間以上、通風乾燥機で乾燥させた。乾燥後、実生の地上部および地下部の乾燥重量を記録した。なお、本実験における出芽は地表に現れた胚軸が目視にて確認できたものを発芽した個体とし、各試験区で最後に出芽した個体が採取されるまで記録し続け、最後の個体が採取された時に最終的な出芽率を算出した。また、苗高は各試験区で最後に出芽した個体が展葉するまで記録を続けた。苗高は地際から頂芽までの高さとした。根長は根を伸ばしたときの地際から根の先端までの長さとした。植物体の内、地際から地上に出ている部分を地上部とし、地際から地中にある部分を地下部とした。

1. 5 生長比率の算出

苗高、根長、地際直径、地上部および地下部の乾燥重量の解析を行うにあたり、0日区・1日区・5日区・10日区・15日区を3つに分けた。対照区である0日区、処理区である1日区・5日区・10日区・15日区の3つの試験区をまとめた5-15日区とした。各試験区の苗高、根長、地際直径、地上部および地下部の乾燥重量の値を下記の式(1)を用いて0日区との比率を算出した。

$$0日区との比率 = \frac{\text{各試験区の値}}{0日区の値} \times 100 \quad (1)$$

1. 6 統計解析

異なる日数の冠塩水処理が種子の初期生長へおよぼす効果を検定するため各測定項目について多重比較検定を行った。Levene検定により等分散性の検定を行った。等分散性が認められた群間に対してTukey検定($p < 0.05$)を、等分散性が認められなかった群間に対してはKruskal-Wallis

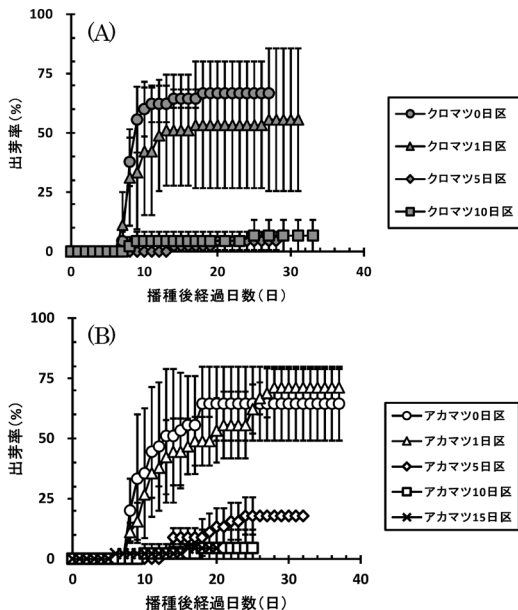


図1 クロマツ (A) とアカマツ (B) の試験区ごとの出芽率の推移

検定を用いた。同一処理区間の供試種2種間における各測定項目については t 検定を用いた (IBM SPSS Statistics ver. 19)。

2. 結果

2. 1 出芽率

図1にクロマツおよびアカマツの各試験区における出芽率の推移を示す。また、図2に実験終了時の各試験区における出芽率を示す。図1～図2よりクロマツ、アカマツともに塩水浸漬処理の日数が長い試験区ほど最終的な出芽率が低下し、出芽率の上昇傾向が緩やかとなる傾向を示した。図2より、クロマツの出芽率は対照区に比べて1日区で11.1%、5日区・10日区・15日区では60.0～66.7%低くなった。アカマツの出芽率は1日区で対照区に比べて6.67%高くなったが、5日区・10日区・15日区で46.7～60.0%対照区に比べて低くなった。両種ともに5日以上塩水浸漬処理を行った試験区において出芽率が対照区に比べて大きく低下する傾向を示した。統計解析の結果、クロマツでは0日区と5日区・15日区の間、アカマツでは0日区と5日区・10日区・15日区の間有意差が認められた。そこで、苗高、根長、地際直径、乾燥重量については対照区である0日区、出芽率の低下が小さかった1日区、出芽率が著しく低下した5-15日区の3試験区に分けて解析を行った。

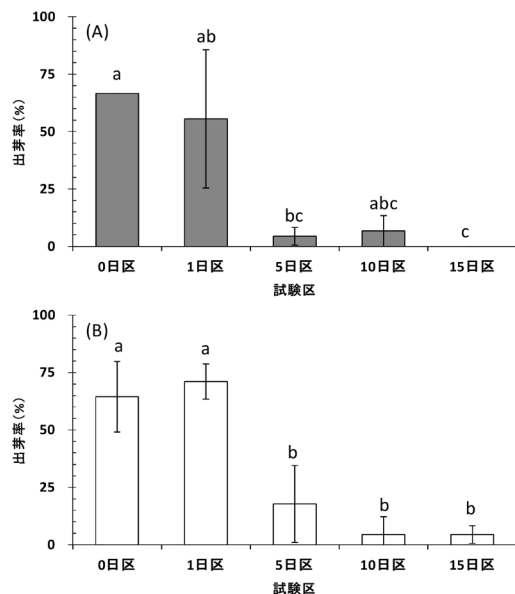


図2 各試験区におけるクロマツ (A) とアカマツ (B) の出芽率の比較

エラーバーは標準偏差を示す。

アルファベットの差異は各種ごとに試験区間で有意差があることを示す。(アカマツ Tukey test, $p < 0.05$, クロマツ Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$)

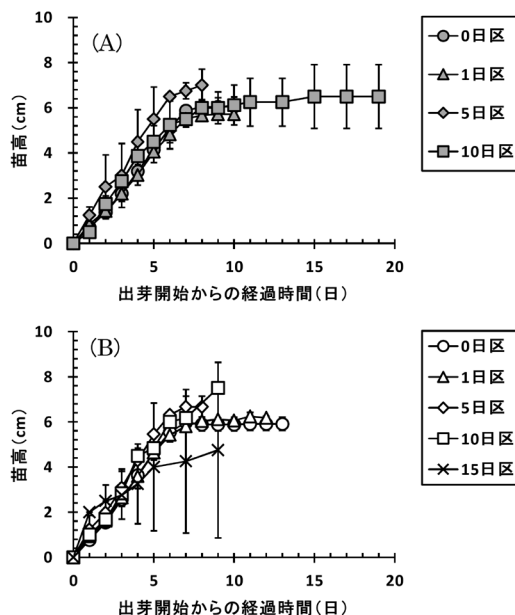


図3 クロマツ (A) とアカマツ (B) の試験区ごとの苗高の推移

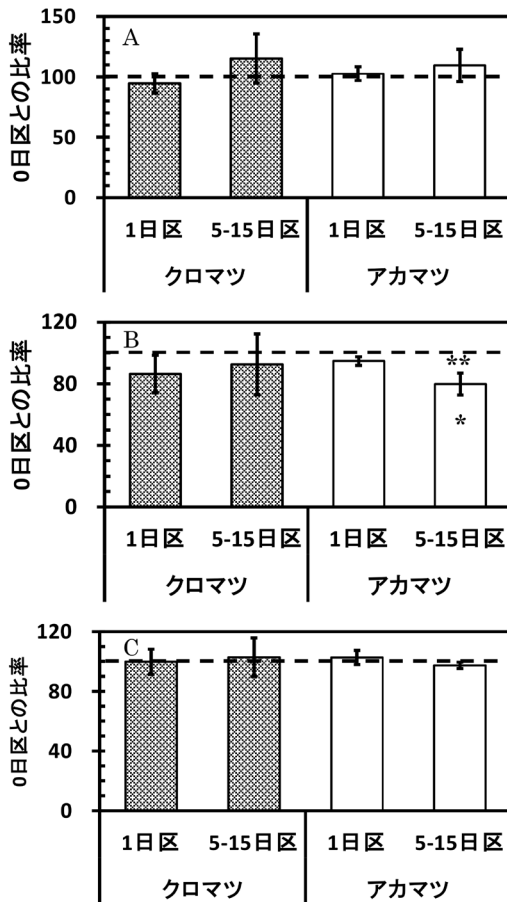


図4 クロマツとアカマツの各試験区における苗高 (A)、根長 (B)、地際直径 (C) の0日区との比率の比較

エラーバーは標準偏差を示す。

プロットエリアの破線は0日区の値を示す。

*は樹種間における有意差を示す。

**は対照区との有意差を示す。

2. 2 苗高, 根長, 地際直径

図3にクロマツとアカマツの苗高の推移を示す。また、図4にクロマツとアカマツの各試験区における苗高、根長、地際直径の0日区と各試験区との比率を示す。図3より、両種ともに出芽から展葉するまでの苗高の変化傾向は対照区である0日区とその他の処理区との間で著しい差異は認められなかった。0日区の苗高に対する各試験区の苗高の比率は、クロマツでは1日区で94.5となり5-15日区で115.08となり、アカマツでは1日区で102.60となり5-15日区で109.50となった。クロマツ、アカマツともに5-15日区の苗高が0日区より高くなったが、樹種間および試験区

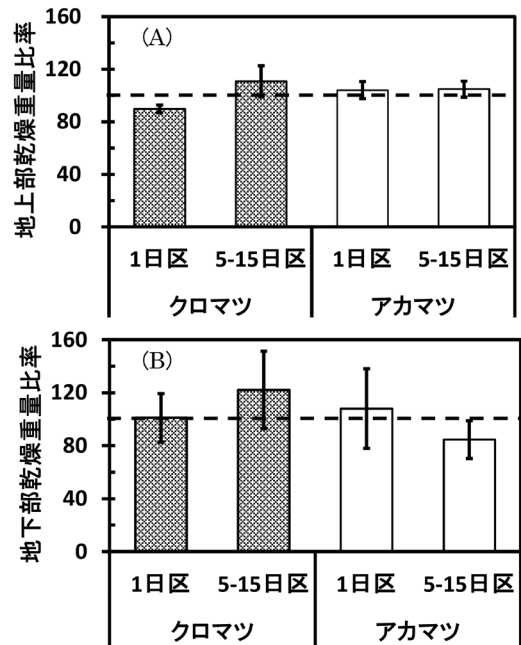


図5 クロマツとアカマツの各試験区における地上部 (A) および地下部 (B) の乾燥重量の比較

エラーバーは標準偏差を示す。

プロットエリアの破線は0日区の値を示す。

*は樹種間における有意差を示す。

**は対照区との有意差を示す。

間の有意差は認められなかった。根長について0日区に対する各試験区の比率は、クロマツでは1日区において86.31、5-15日区では92.54となり、アカマツでは1日区で94.61となり5-15日区で79.83となった。いずれの樹種および試験区においても根長は0日区に比べて低かった。最も根長の生長比率が低かった試験区は5-15日区のアカマツであり、0日区に比べ20.17低く、統計的な有意差も認められた。地際直径の0日区に対する各試験区の比率は、クロマツでは1日区で99.84、5-15日区で102.83となり、アカマツでは1日区で102.69となり、5-15日区で97.43となった。クロマツとアカマツともに地際直径については、樹種間および試験区間における有意差も認められなかった。

2. 3 乾燥重量

図5にクロマツとアカマツの各試験区における地上部と地下部の乾燥重量の0日区に対する各試験区の比率を示す。クロマツの地上部乾燥重量について0日区に対する比率は1日区で89.73、5-15日区で110.74となり、アカマツの地上部乾燥重量については1日区と5-15日区でほぼ同じ値となった。また、地下部乾燥重量についてクロマツの0日区に対する比率は、1日区で101.05、5-15日区で122.04で

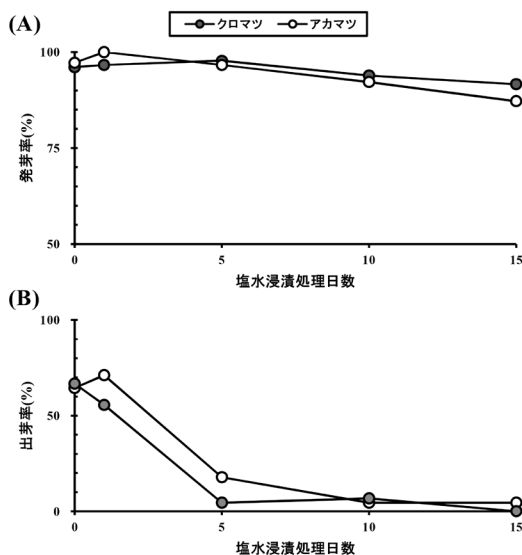


図6 クロマツとアカマツの発芽率 (A) (伊東・吉崎, 2017) と出芽率 (B) の比較

あった。クロマツの地下乾燥重量は塩水浸漬処理日数の長い試験区の方が高い値となった。すなわち、地上部乾燥重量と同様の傾向を示した。一方、アカマツの地下部乾燥重量について、0日区に対する比率は1日区で108.08となり5-15日区で84.54となった。アカマツの地下部乾燥重量は塩水浸漬処理日数が長いほど減少する傾向を示した。しかし、統計的な有意差はクロマツおよびアカマツの地上部乾燥重量および地下部乾燥重量において認められなかった。

3. 考察

3.1 出芽率への影響

図1および図2より、5日間以上の塩水浸漬処理によりクロマツおよびアカマツの出芽率が低下するという結果が得られた。伊東ら(2017)は、クロマツとアカマツの種子を用いて本研究と同様の塩水浸漬期間を設け、塩水浸漬後に真水条件下へ播種する発芽実験を行っている。そこで、本研究における出芽率と伊東ら(2017)における発芽率の変化および最終的な発芽率と出芽率の比較を行った(図6)。その結果、発芽率と出芽率ともに塩水浸漬期間が長いほど低下する傾向を示したが、発芽率は緩やかに低下したのに対して(図6(A)), 出芽率は5日以上の塩水浸漬処理を行った試験区では著しく低下した(図6(B))。種子は発芽後に幼根と胚軸が伸長することで地表面に現れ出芽する。既往研究において、塩分ストレスは生理的攪乱(Ahmad *et al.*, 2013)によって、胚軸や幼根の生長を抑制することが明らかとなっている(Mahdavi *et al.*, 2007; Tobe *et al.*, 2000)。

よって、5日・10日・15日区では幼根あるいは胚軸の生長が塩水の影響で抑制された結果、出芽率が低下した可能性が考えられるが、その実証には細胞膜や細胞壁の変化について、細胞レベルでの更なる検討が必要である。

3.2 発芽直後の初期生長への影響

本研究ではクロマツの種子は塩水浸漬処理を行った1日区、5-15日区と0日区との間に苗高、根長、地際直径、地上部と地下部の乾燥重量の有意差は認められず、アカマツの種子は5日以上の塩水浸漬処理により出芽後の根長の減少および地下部の乾燥重量の減少傾向が認められた(図3~5)。根長に関して、弓場(1984)のクロマツを用いた実験では、「塩水によってクロマツの稚苗を育苗すると根の伸長が抑制される。」という結果が得られており、その要因として「イオン特有の作用によって根の生長が抑制された。」としている。また、発芽後の稚苗を塩水によって生育させる実験は作物や高塩環境下で生育している植物を対象に多く行われており、塩分ストレスによって稚苗の苗高や根長の伸長が抑制されるという結果が得られている

(Khodarahmpour *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2010; Mahdavi *et al.*, 2007)。これらのことから、本実験で得られたアカマツの根長の抑制について、どのような要因が作用したのかを実証するには更なる検討が必要であるが、本研究では弓場(1984)の実験のようにNaClの存在する培地で育てられた稚苗とは異なり、塩水浸漬後に真水条件下で育てられた結果であることから、発芽前の種子に対する塩水浸漬と発芽後の稚苗に対する塩水浸漬とでは展葉までの生長に与える影響が異なるのではないかと考えられた。

3.3 総合考察

津波に被災した海岸林においてクロマツに比べてアカマツの実生の発生が1年遅かったことが大澤ら(2016)の調査で報告されている。実生の発生時期が異なった原因として、大澤ら(2016)は耐潮性の違いを指摘しているが、本研究では塩水浸漬から出芽までの時間や出芽後の生長速度について種間差は見られなかった。また、出芽率や生長について両種を比較すると、クロマツは15日区では出芽率がゼロであったが、アカマツの出芽率は4%となった(図2)。一方、クロマツは塩水浸漬期間が長くても苗高や根長などの抑制は見られなかったが、アカマツは塩水浸漬期間の長い試験区ほど根の生長が抑制されるという結果が得られた。また、発芽前の塩水浸漬期間が長いほどクロマツとアカマツの出芽率は低下したことから、クロマツについては出芽後から展葉までの初期生長への影響は小さいと考えられた。本研究では5日以上の塩水浸漬を行った試験区で両種ともに著しい出芽率の低下が見られたが、過去の津波や高潮において報告されている塩水冠水期間は長いもので30日にもなる(谷口, 1954)。よって、津波や

高潮による塩水冠水が発生した場合、土壌中に塩分が残存する期間が長いほど、天然更新によって発生する実生の数は減少すると考えられる。天然更新による海岸林の再生において、実生数が減少すると再生後の海岸林が疎林化する可能性がある。海岸林の防災機能において、密閉度は減風効果に関係しており(中島・岡田, 2011)、疎林化し密閉度が低下した海岸林では、減風機能などの防災機能が十分に発揮できない恐れがある。よって、津波や高潮などの被害から天然更新によって海岸林を再生することを検討する場合、速やかに除塩することで、塩水浸漬によって起こる出芽の抑制を軽減できると思われる。今後は、実生が発生し展葉した後の生長について、発芽前の塩水浸漬が及ぼす影響を検証する必要がある。また、発芽前の塩水浸漬が出芽を抑制するメカニズムについて更なる検討が必要である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたって、国立研究開発法人森林総合研究所の中村克典氏にアカマツの種子を提供して頂いた。ここに、厚く御礼を申し上げます。

引用文献

- Ahmad, P., M. M. Azooz and M. N. V. Prasad (2013) Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress, Springer, pp.32~33.
- 浅野 二郎 (1963) 種子の耐塩性を中心とした海岸地帯におけるアカマツおよびクロマツ林の成立に関する研究. 香川大学農学部紀要, (15), pp. 1~64.
- 千葉 克己・冠 秀昭・加藤 徹 (2012) 津波被災農地における暗渠を利用した雨による浸透水除塩. 土壌の物理性, (121), pp.29~34.
- 伊東 日向・吉崎 真司 (2013) 沿岸域に生育する常緑広葉樹を用いた塩水による生育実験. 日本緑化工学会誌, 39(1), 117~120.
- 伊東 日向・吉崎 真司 (2014) 塩水浸漬下で育成された広葉樹体内のイオン含有率の変化について. 日本緑化工学会誌, 40(1), 203~206.
- 伊東 日向・吉崎 真司 (2017) 塩水浸漬がクロマツ(*Pinus thunbergii* Parl.)とアカマツ(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)の発芽に及ぼす影響. 海岸林学会誌, 16(2), 15~19.
- 河口 智志 (2000) 海岸砂丘における海岸砂防林の研究に関する変遷について. 日本砂丘学会誌, 47(2), pp.121~127.
- Khodarahmpour, Z., M. Ifar and M. Motamedi (2012) Effects of NaCl salinity on maize (*Zea mays* L.) at germination and early seedling stage. *African Journal of Biotechnology*, 11(2), pp.298~304.
- 近田 文弘 (2013) なぜ、クロマツなのか?—日本の海岸林の防災機能について—. 海岸林学会誌, 12(2), pp.23~28.
- Li, R., F. Shi and K. Fukuda (2010) Interactive effects of salt and alkali stress on seed germination, germination recovery, and seedling growth of halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae). *South African Journal of Botany*, 76(2), pp.380~387.
- Mahdavi, B. and S. A. Sanavy (2007) Germination and Growth in Grasspea (*Lathyrus sativus*) Cultivars under Salinity Conditions. *Pakistan Journal of Biokogical Sciences*, 10(2), 273~379.
- 宮本 輝仁・亀山 幸司・塩野 隆弘 (2012) 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による津波で冠水被害を受けた砂質畑の土壌塩分モニタリング. 農村工学研究所技報, (213), pp.73~78.
- 中島 勇喜・岡田 穰 (2011) 海岸林との共生. 山形大学出版, pp.30~36.
- 中村 克典 (2014) 東日本大震災津波による海岸マツ林の被害と再生に向けた植栽試験. 森林立地, 56 (1), pp.21~26.
- 大澤 啓志・上野 澤・七海 絵里香 (2016) 仙台湾岸の津波被災海岸林におけるマツ類の実生分布. 日本緑化工学会誌, 42(1), pp.122~127.
- 太田 猛彦 (2012) 森林飽和. NHK 出版, pp.17.
- 坂本 知己 (2012) 海岸林の再生に向けて. 森林科学, (66), pp.21~24.
- 佐藤 創・岡田 穰・野口 宏典 (2012) 海岸林が津波に耐え津波の勢いを弱めた事例. 森林科学: 日本林学会会報, (66), pp.17~20
- Sohrabikertabad, S., A. Ghanbari: H. R. Mohassel Mohamad, M. N. Mahalati and J. Gharekhloo (2012) Effect of Desiccation and Salinity Stress on Seed Germination and Initial Plant Growth of *Cucumis melo*. *Planta daninha*, 31 (4), pp.833~841.
- 谷口 森俊 (1954) 台風 13 号及び異常高潮に依る植物の被害調査報告. 植物生態学会報, 3(4), pp.282~289.
- 立石 麻紀子・AILIJANG Maimaiti・辻 将大・井上 美那・谷口 武士・山本 福壽・山中 典和 (2014) 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. 日本緑化工学会誌, 40(1), pp.54~59.
- Tobe, K., X. Li and K. Omasa (2000) Seed Germination and Radicle Growth of a Halophyte, *Kalidium caspicum* (Chenopodiaceae). *Annals of Botany*, 85(3), 391-396.
- Tobe, K., L. Zhang, G. Y. Qiu, H. Shimizu and K. Omasa (2001) Characteristics of seed germination in five non-halophytic Chinese desert shrub species. *Journal of Arid Environments*, 47(2), 191~201.
- 梅津 勘一 (2016) 海岸林講座第 1 回: 日本の海岸林の成り立ちと推移-庄内海岸林を中心に-. 樹木医学研究, 20(2), pp.104~111.
- 吉崎 真司 (2012) 海岸林再生における広葉樹植栽について. グリーン・エージ, 39 (5), pp.12~15.

(2017 年 10 月 20 日受付, 2018 年 10 月 3 日受理)