

平成 30 年度 博士学位論文

沿岸域に生育する樹木の発芽および初期生育における
塩水冠水耐性に関する実験的研究

東京都市大学大学院環境情報学研究科

1593101 伊東 日向

目 次

第1章	研究背景と目的	1
1.1	研究背景	
1.2	研究目的	
第2章	研究の構成と位置づけ	4
2.1	研究の構成と位置づけ	
第3章	先行研究	6
3.1	海岸林の機能と役割	6
3.2	海岸環境が植物へ与える生理的影響について	8
3.3	植物の耐塩性	26
第4章	発芽における塩水浸漬の影響	45
4.1	塩水浸漬がクロマツ種子の吸水と発芽へ及ぼす影響	46
4.2	塩水浸漬期間とクロマツとアカマツの種子内部への塩分蓄積量の関係について	54
4.3	塩水浸漬がクロマツとアカマツの発芽に及ぼす影響	61
4.4	第4章のまとめと考察	70
第5章	短期的塩水浸漬による出芽と初期生長への影響	73
5.1	短期的塩水浸漬がクロマツ種子の発芽及び出芽へ及ぼす影響	74
5.2	短期的塩水浸漬がクロマツとアカマツの発芽直後の生長に与える影響	82
5.3	短期的塩水浸漬がクロマツと広葉樹の出芽と初期生長へ及ぼす影響	99
5.4	第5章のまとめと考察	108
第6章	実生および幼木の塩水冠水耐性	111
6.1	塩水浸漬処理がクロマツと広葉樹の実生の苗の生存率と生存期間に及ぼす影響	112
6.2	塩水浸漬がクロマツと広葉樹の幼木における各器官のイオン含有率に及ぼす影響	118
6.3	第6章のまとめと考察	139
第7章	総括	141
7.1	短期的な塩水浸漬に対するクロマツとアカマツの種子の応答について	141
7.2	短気的な塩水浸漬に対するクロマツ，アカマツと広葉樹の種子の応答について	141
7.3	苗木の塩水冠水耐性	141
7.4	結論	142
7.5	今後の展望	147
参考資料		150
引用及び参考文献		155

本研究における用語の定義

- ・「成長」と「生長」の使い分けについて

岩波 生物学辞典（山田ら，1983）では「成長」および「生長」の使い分けはされておらず，同じ項目として並列して掲載されており定義の違いもない。よって，本研究では引用文献の引用部分については原文の表現に従い「成長」あるいは「生長」を用い，それ以外の文章においては「生長」を用いることとした。

- ・「砂漠」および「沙漠」の使い分けについて

本研究では他の文献または研究論文，報告書などにおける引用部分については引用文献の表現に従い「砂漠」あるいは「沙漠」を用い，それ以外の文章においては「沙漠」を用いることとした。

本研究における植物の学名の表記

本研究における実験で用いた樹種の和名については，各実験の実験材料もしくは供試種の項に和名と合わせてカッコ内に学名を命名者まで記載した。学名はイタリック体で表記した。例えばクロマツの場合，クロマツ（*Pinus thunbergii* Parl.）と表記する。その他，引用文献内の植物の種名は引用部分の原文のまま表記した。

本研究における引用の表記について

本研究の本文中における引用箇所には著者名，発行年を記載した。日本語文献，外国語文献いずれの場合も（著者名字，発行年）と記載した。日本語文献では著者が3名以上の場合，第2著者以降を「ら」と表記した。外国語文献では著者が3名以上の場合，第2著者以降を「*et al.*」と表記し，大文字および小文字の表記は原文の表記に従った。下記に日本語文献および外国語文献の表記例を示す。

1. 日本語文献の場合における表記例

- ・著者が1名

- …海岸林が造られてきた（河口，2000）。（p.1 1.1 研究背景 第1段落4行目）

- …また，千葉（2012）の報告で…（p.17 3.2.5.1 塩水冠水期間 3行目）

- ・著者が2名

- …ようになった（中島・岡田，2011）…（p.1 1.1 研究背景 第1段落6行目）

- …また，松木・森下（1986）は…（p.17 3.2.5.1 塩水冠水期間 第2段落1行目）

- ・著者が3名以上

- …言われている（宮本ら，2012）。（p.2 1.1 研究背景 1行目）

- …仰木ら（1961）が1959年…（p.17 3.2.5.2 樹木の被害 第2段落4行目）

2. 外国語文献の場合における表記例

- ・著者が1名

- …もある（Roberts，2007）。（p.26 3.3.1 塩生植物と非塩生植物 第2段落6行目）

- …した。Woodell（1985）の…（p.42 3.3.5 仮説 第2段落8行目）

- ・著者が2名

- …されている（Parida and Das，2005）。（p.28 3.3.2 耐塩性のメカニズムについて 第1段落6行目）

- …について Zakharin and Panichkin（2009）…（p.26 3.3.1 塩生植物と非塩生植物 第1段落4行目）

- ・著者が3名以上

- …である（Ahmad *et al.*，2013）…（p.26 3.3.1 塩生植物と非塩生植物 3行目）

- …Tobe *et al.*（2001）による…（p.69 4.3.4 考察 第2段落 6行目）

第1章 研究背景と目的

1.1 研究背景

日本は四方を海に囲まれた島国である。日本の沿岸域では海からの強風によって砂が内陸へ飛ばされることにより生ずる飛砂害、高潮や津波による内陸への海水の侵入による潮害などの自然災害が発生する。沿岸域では飛砂害や潮害などの自然災害から人々の暮らしや農地を守るため海岸林が造られてきた（河合，1993；河口，2000）。その結果，我が国の海岸線には約4,000kmに及ぶ海岸林が存在している（橋岡，1991）。海岸林には主にクロマツが植栽されているが，東北地方の岩手県や宮城県など一部ではアカマツも植栽されている（中村，2014）。

我が国において，海辺に生育しているマツに関する記録で最も古いものは733年に編纂された風土記であると言われている（小田，2003）。マツを用いた海岸林造成における最古の事例とされているのは1573年から1592年に武田勝頼軍が駿河湾岸でマツ林を伐採した後，農民が植えた千本松原の植栽事例である（太田，2012）。その後，1600年代から，砂留め工事と合わせて海岸林の造成が積極的に行われるようになり，1897年に明治政府は砂防方や森林法を制定し国によって海岸砂防事業が行われるようになった（中島・岡田，2011）が，明治38年に北米から長崎へ入ってきたマツ材線虫病が瞬く間にクロマツ海岸林に蔓延した（吉田，2006；太田ら，1996）。その結果，マツ枯れに伴う疎林化が進行し，未だに防災機能の急激な低下が問題となっている（中島・岡田，2011）。

近年では環境問題への関心の高まりや，東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波をきっかけとした海岸林の減災機能に対する関心の高まりから，海岸林に対して多面的機能が求められている（中島・岡田，2011）。そこで，海岸林への広葉樹の導入や天然更新による維持管理が検討されている。広葉樹の導入とは，クロマツを主林木とした海岸林へ広葉樹を導入し，海岸林の構成樹種の多様化をはかることによりマツ枯れに対する抵抗性や自然災害に対する減災機能の向上を目的としたものである（坂本，2014；佐々木ら，2013；吉崎，2011；吉崎，2012-a）。日本海岸林学会が東北地方太平洋沖地震による津波に被災した海岸林について調査結果を取りまとめた石巻声明においても，「マツ類だけでなく，求められる機能や立地によっては広葉樹の導入も必要と考えられ，今後，広葉樹による海岸林造成の研究も積極的に進めていく必要がある。」とされている。天然更新による海岸林の再生は，外部から持ち込んだ苗でなく，その地に生育している樹木の実生を活かした造林であり，生物多様性に配慮した再生手法であると言われている（大澤ら，2016；池田・小倉，2014；八神，2015）。このように，生物多様性の保全や減災機能の向上，マツ材線虫病に対する抵抗性の向上などの多面的機能を持つ海岸林を造成することが検討されている（河合，1993；中島・岡田，2011）。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において巨大津波による海水が沿岸域に侵入し，多くの場所が塩水により冠水した。沿岸域の農地や海岸林をはじめとする樹木において塩害と思われる被害が発生した（原ら，2011）。農地では，宮城県亘理町長瀬地区内

の汀線から内陸に約 3km 地点にあるイチゴ栽培ハウスにおいて、津波による冠水が 5 日間程度継続したと言われている（宮本ら，2012）。また、太平洋側の汀線から約 4km 西に位置する宮城県名取市内の水田においても海水に 5 日間程度冠水したことが報告されている（千葉ら，2012）。農地の塩害対策や作物の耐塩性に関する研究は過去に多くなされており、被災後ただちに除塩のために代かき除塩、堆砂土砂の除去、雨水や水道水、地下水による灌水などの除塩対策が行われた（永沢ら，2016；玉手・上山，2013）。また、対策後の土壌や作物の生育に対する除塩効果の検証も宮城県、福島県、岩手県、青森県などの農地で行われた（三浦，2015；谷川ら，2015；阿部・村主，2015；阿部・平，2015；斎藤，2015）。海岸林においても新たな維持管理手法の検討のため、大規模な高潮や津波に伴う塩水冠水が海岸林に与える影響について調査や研究が必要であるが、海岸林をはじめとする沿岸域の樹木について大規模な塩水冠水が発生した後の対策や、塩水冠水が樹木に与える影響や樹木の耐塩性に関する研究事例は少ない（吉崎，2012-b）。例えば、1953 年の台風 13 号による高潮（谷口，1954）や 1951 年のルース台風による高潮（西・木村，1954）、1896 年の明治三陸沖地震による津波（後藤，1899）、1983 年の日本海中部地震における津波（農林省林業試験場，1986）について現場における植物の被害についての踏査が行われ、矢幡（1996）は樹木の対塩性機構に関して、浅野はクロマツとアカマツの種子について耐塩性の比較およびメカニズムについて（浅野，1963）研究を行っている。現地踏査では可視被害の程度によって耐塩性を推測し、矢幡（1996）や浅野（1963）の実験は基礎的な耐塩性の実験であり、津波や高潮を想定した実験ではない。一般的に海岸林は砂質な未成熟土の上に成立している（小野ら，2014-a）。砂質土壌は養分の保持能力が低いいため、排水が良ければ雨水による除塩が期待できる（小野ら，2014-b）。従って、塩水による冠水によって砂質土壌中の塩分濃度が高くなっても降雨により速やかに塩分が溶脱されると考えられる。このことから、海岸防災林の砂質土壌に生育する植物や種子は短期的な塩分ストレスを受けることが推察される。よって東北地方太平洋沖地震以来、クロマツを含む日本に生育する樹木が高潮や津波によって受ける短期的な塩水冠水に対する耐性が注目されており、被災地における踏査（中村ら，2012）を含め短期的な塩水冠水を再現した研究が 2011 年以降にクロマツや広葉樹を対象として行われてきている（井上ら，2015；伊東・吉崎，2013；伊東・吉崎，2014；立石ら，2014）。しかし、種子の発芽や実生へ与える影響に着目した事例は少ないのが現状である。

2011 年の東日本大震災以来、クロマツ（針葉樹）を主とする海岸林では減災機能の向上や病害虫に対する脆弱性の補完を目的とした、広葉樹の導入が検討されていること、生物多様性の保全など環境にも配慮した樹林造成方法として、外部から苗木を持ち込まず、現地で結実した種子や発生した実生を用いた保育管理に対する関心も高まってきていることから、今後、天然更新の利用などについて、樹種構成や配置等の検討提案していくためには、種子から発芽、実生そして成木に至るまでの各生育段階における塩水冠水に対する耐性に関する基礎的知見の蓄積が重要である。

1.2 研究目的

本研究では、発芽および初期生育に着眼し、その生育過程を発芽（浅野，1963），出芽（阿部・橋本，2007），実生（清水，2001），幼木の段階に分けてそれぞれ定義をした（図 1.1.1）。本研究は、津波や高潮による冠水に対する耐性を「塩水冠水耐性」と定義し、発芽から幼木に至るまでの各段階における短期的な塩分ストレスの影響とそれに対する耐性の把握のため、我が国の海岸防災林の主要な構成種であるクロマツおよびアカマツの種子を対象に、短期的な塩分ストレスが発芽におよぼす影響の検証，加えてクロマツ，アカマツおよび今後海岸林への導入が期待されている広葉樹を対象に短期的な塩分ストレスが発芽後の初期生育におよぼす影響の検証，クロマツと広葉樹を対象として実生苗，幼木に高潮または津波が及ぼす短期的な塩分ストレスに対する耐性の把握を目的としている。

発芽および初期生育

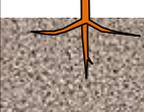
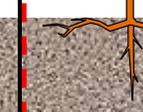
章	第4章		第5章		第6章							
	【種子】	▶	【発芽】	▶	【出芽】	▶	【実生】	▶	【幼木】	▶	【成木】	
各生育段階の模式図												
本研究における定義		外種皮が裂けてわずかに幼根の先端が見えていること（浅野，1963）	発芽した種子が生長し，上胚軸が地表面から確認できる状態になったこと（阿部ら，2008）	子葉または第一葉をつけた状態の幼植物（清水，2001）	1年生の若い樹木。通常，植栽される苗木は主に3年生（中島ら，2011）							
各生育段階の写真												
実験目的	クロマツとアカマツの耐性比較						クロマツと広葉樹の耐性比較					

図 1.1.1 本研究が対象とする生育段階の定義（浅野，1963；阿部・橋本，2008；清水，2001；中島・岡田，2011）

第2章 研究の構成と位置づけ

2.1 研究の構成

本研究は第1章～第7章で構成されている（図 2.1.1）。

第1章では、本研究の背景と目的、第2章では研究の構成と位置づけについて述べた。

第3章は先行研究の整理結果を、海岸林の機能と役割、海岸環境が植物へ与える生理的影響、植物の耐塩性の三つの視点から取り纏めた。

第4章では、クロマツとアカマツの種子を対象として短期的な塩水浸漬が発芽へ及ぼす影響について検証した。

第5章では、発芽後の実生への影響に着目し、クロマツと広葉樹の種子を用いて塩水浸漬後の出芽および出芽後の生長と実生への塩水浸漬の影響について検証した。

第6章では、クロマツおよび広葉樹の苗木を対象として幼木の耐塩性について塩水を用いた水耕栽培実験を行い、比較評価を試みた。

第7章（総括）では、第4章から第6章の実験結果から、クロマツおよび常緑広葉樹の発芽および初期生育時における耐塩性の評価を行い、大規模な高潮や津波の後における種子の発芽や発芽後の初期生長への影響を考察した。

2.2 研究の位置づけ

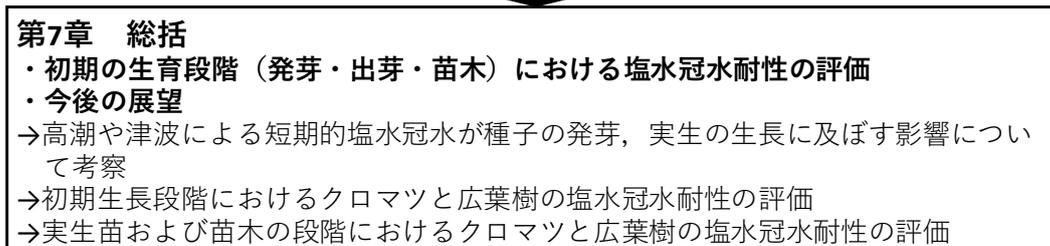
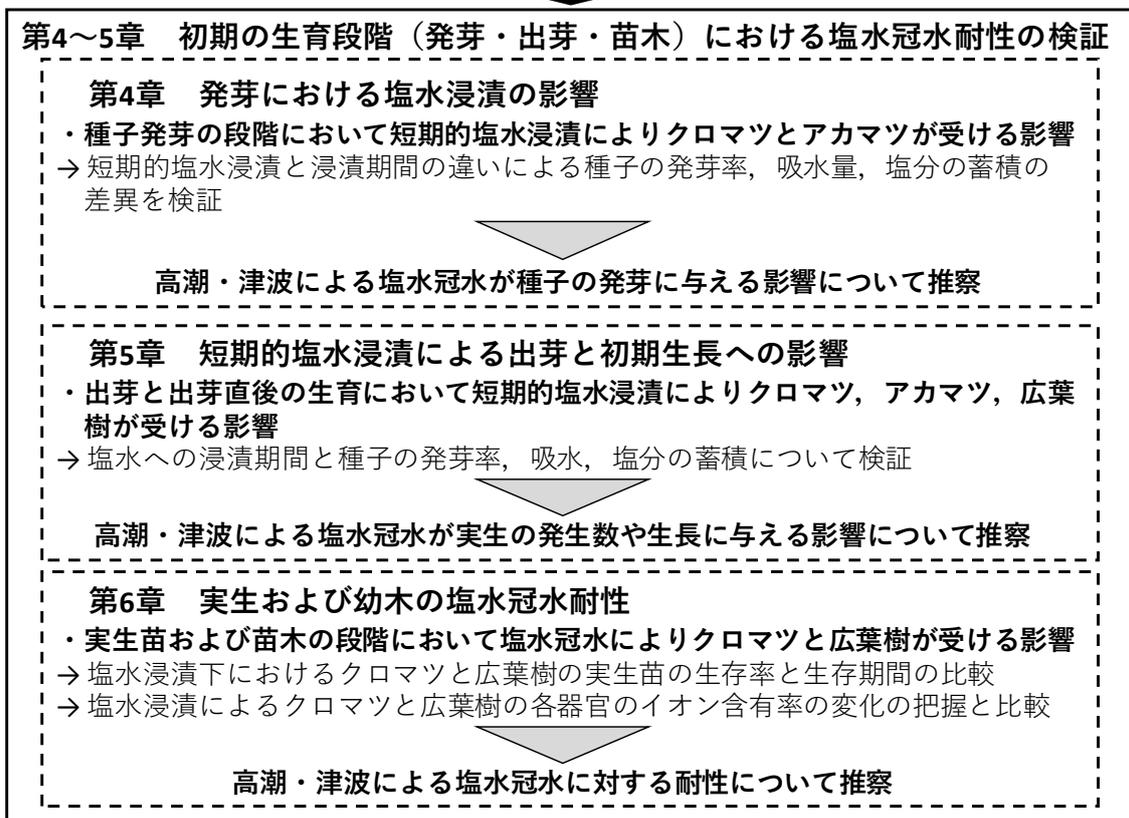
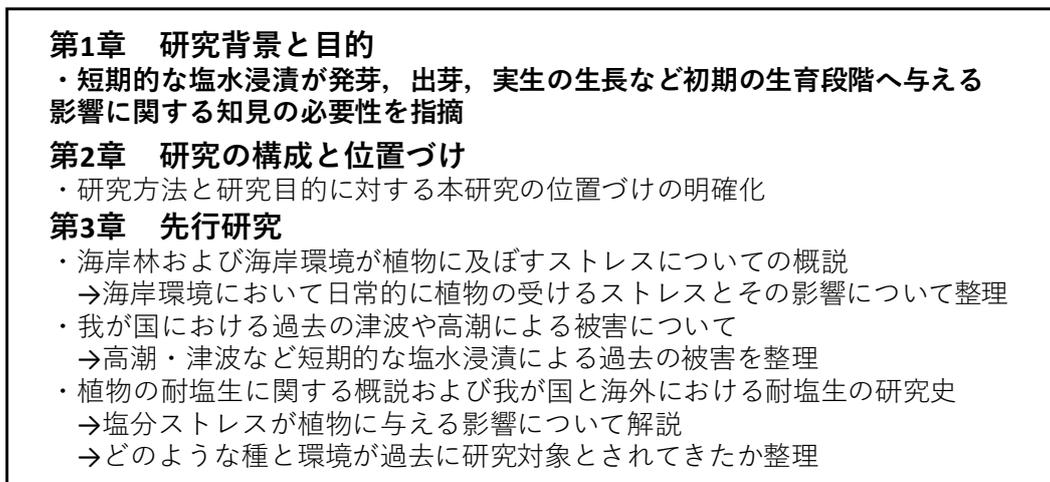


図 2.1.1 研究の構成図

第3章 先行研究

3.1 海岸林の機能と役割

海岸林とは海岸の塩風の環境のもとで成立している森林群落であると定義されている（中島・岡田，2011）海岸林は海からの強風，潮風，飛砂などの災害から内陸に居住している人々の暮らしを守るために植栽されてきた。従って植栽される樹種は海岸地域特有の災害や環境に耐えられなければならない。そこで，北海道や東北地方を除いた地域において古くから海岸林に植栽されてきた樹種がクロマツである（吉田，1970；吉崎，2012-a）。クロマツは貧栄養で保水性の乏しい砂地においても活着でき，強風により基盤の砂が移動する不安定な立地においても生育できる特性（吉崎，2012-b）を持つ。また，クロマツは塩水に対する耐性も高いとされている（堀江，1966）。よって，海岸地域の特異的な環境下においても，クロマツは海岸林の構成樹種として植栽されてきた。また海岸林の中でも，保安林として飛砂防備保安林，防風保安林，潮害防備保安林，防霧保安林に指定されているものを一般的に「海岸防災林」という（河口，2000）。保安林とは公的機能の発揮が特に要請される森林であり，立木の伐採や土地の形質の変更等の行為が規制されているものである（林野庁，2014）。海岸防災林は沿岸域に居住している人々の暮らしを沿岸域特有の災害から守るための防災施設である。その他に，海岸林には魚付き保安林，航行目標保安林，保健保安林，風致保安林などの保安林に指定されているものがある（河口，2000）。それぞれの保安林の種類と目標については表1にまとめた。さらに近年，保安林としての機能の他に森林としての多様な機能が求められている（表2）。そして，津波に対する減災効果も注目されている（佐々木ら，2013）。津波に対する減災効果は2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震と今後発生することが危惧されている東南海地震により着目されている機能である。海岸林の防風機能（佐藤ら，2009）や飛砂防止効果（電力中央研究所，1972）などや潮風害による影響に関する研究（倉内，1956；沖中ら，1990）は現在までに行われてきたが，塩水による冠水に対する耐性に関する科学的な知見はなお不足している（吉崎，2012-a）。

表 3.1.1 保安林の種類と目標 (佐々木ら, 2013)

保安林の種類	目標
1 水源涵養保安林	水源の涵養
2 土砂流出防備保安林	土砂流出の防備
3 土砂崩壊防備保安林	土砂崩壊の防備
4 飛砂防備保安林	飛砂の防備
5 風害防備保安林	風害の防備
6 水害防備保安林	水害の防備
7 潮害防備保安林	潮害の防備
8 干害防備保安林	干害の防備
9 雪害防備保安林	雪害の防備
10 霧害防備保安林	霧害の防備
11 なだれ防止保安林	なだれの危険の防止
12 落石防止保安林	落石の危険の防止
13 防火保安林	火災の防備
14 魚つき保安林	魚つき
15 航行目標保安林	航行の目標の保存
16 保健保安林	公衆の保健
17 風致保安林	名所又は旧跡の風致の保存

表 3.1.2 海岸林に求められている新しい機能 (中島・岡田, 2011)

機能	効果
生物多様性保全	生物の生息地、緑の回廊
CO ₂ 固定機能	クロマツ林による炭素吸収
景観向上機能	観光資源、心理的安らぎ
森林セラピー機能	森林の癒し効果
環境教育機能	自然科学的、社会科学的な教材
廃材材料の使用	腐植層の処理、堆積マツ葉の有効利用
食材の生産	土壌環境の改善、観光資源としての利用



図 3.1.1 海岸林に防砂機能および海岸環境に対する耐性に関する主な既往研究

3.2 海岸環境が植物へ与える生理的影響について

3.2.1 海岸環境の特徴

海岸林とは、樹木や草本など生物によって成立（林野庁, 2014）した防災林施設である（中島・岡田, 2011）。沿岸域では高波や夏季の高温、強風に伴う砂の移動、潮風、飛砂などが起こる。また、植生の基盤となっているのは主に内陸部の山から運び出されてきた砂である（村井ら, 1992）。砂質土壌の粒径は粗く、保水性・保肥性に乏しく乾燥、貧栄養状態となりやすい（小野ら, 2014-b）。そのような外圧にさらされている海岸は植物にとって非常に厳しい環境である。

3.2.2 飛砂と潮風が植物の生育に及ぼす影響

飛砂害とは、飛砂の堆積により幼齢木が埋没したり、あるいは樹木が傷つけられたりして、はなはだしい場合には枯死に至る害のことを指すが（中島・岡田 2011）、飛砂は地上 1m の高さの風速が 5~6m/S 以上になると発生（村井ら, 1992）する。高谷・河口（1993）は日向灘において、強風時の飛砂によりワシントンニアパームの樹皮が徐々に剝離され、折損するという被害を報告している。

また、風に運ばれた海水の微粒子によって植物が害される現象（村井ら, 1992）を潮風害と呼ぶが、植物の外見上としては、軽いものでは風上側の樹冠表面の葉の先端や葉の緑色が部分的に変色または枯死するだけであるが、ひどいものでは樹冠の全面にわたって変色や枯れ（三田ら, 2009）といった特徴がみられる。飛砂により梢頭や葉が傷つけられると、植物体内への潮風による塩分の侵入が起こりやすくなる。光合成器官である葉表面への塩分の付着あるいは葉内への侵入は植物の生理に悪影響を与える（図 3.2.2）。生理作用の阻害として、①付着した塩分が気孔をふさぐことによるガス交換（図 3.2.3）の阻害、②

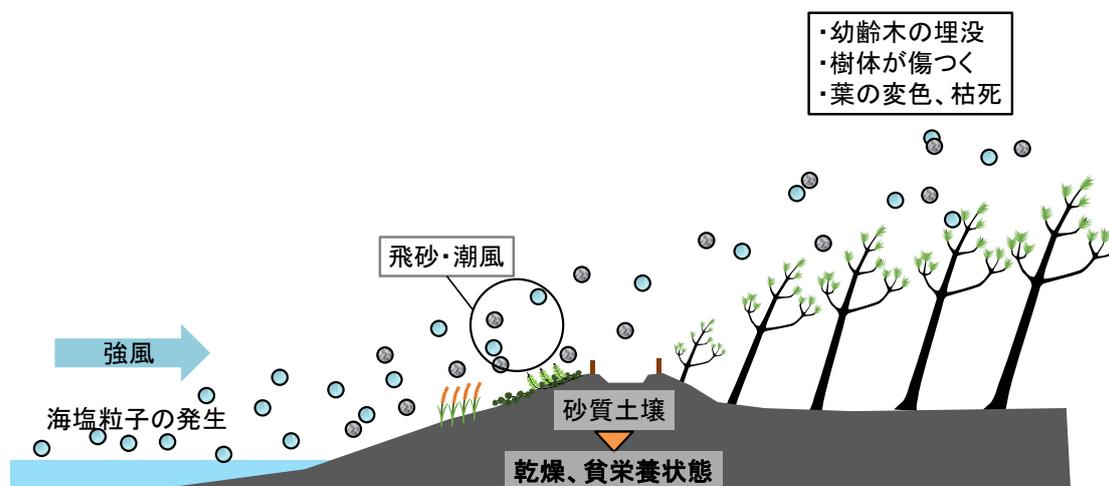


図 3.2.1 海岸林における潮風害と飛砂害の模式図



写真 3.2.1 潮風害により枯れ上がったと考えられる
湘南海岸砂防林の犠牲帯（2013年6月12日撮影）



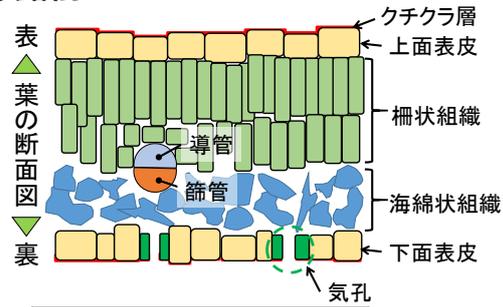
写真 3.2.2 葉に付着した海塩（2015年8月22日湘南海岸にて撮影）

気孔、表皮、傷口からの塩分侵入により細胞内では塩分が高濃度化することによる通常の生理作用の阻害（三田ら，2009）が挙げられる。

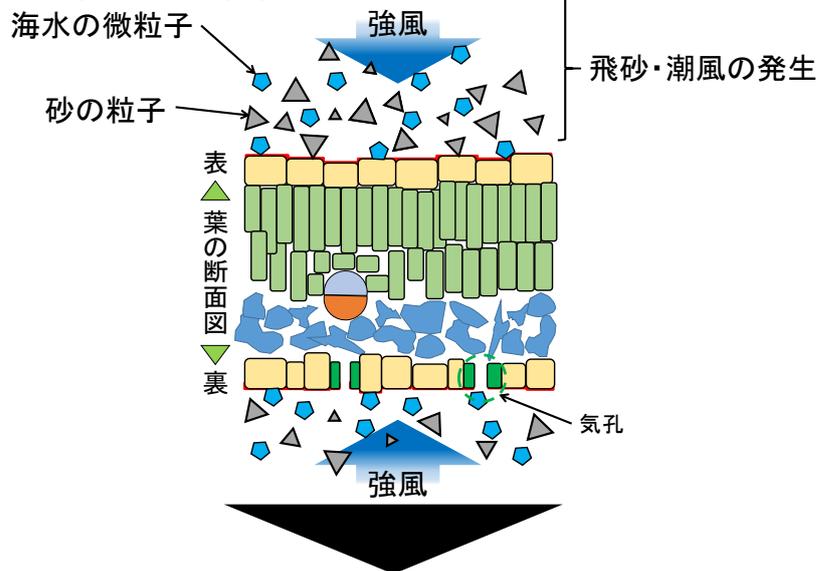
①付着した塩分が気孔をふさぐことによるガス交換の阻害について

植物は O_2 、 CO_2 の交換と水の蒸散を行う組織である気孔を開閉することにより光合成や呼吸を行う。光合成は、光エネルギーを利用し、 CO_2 と H_2O から有機物（糖）を生産する一連の反応（米山ら，2010）である。つまり気孔がふさがれると、 CO_2 からブドウ糖に作りかえる炭酸同化を行えなくなる。植物における呼吸は、光呼吸と暗呼吸に分かれている。光呼吸の役割は、PGA という光合成の過程において必要な物質を生産する酸素化反応によって「やむを得ず」生産されるホスホグリコール酸という有毒な物質の処分と考えられている

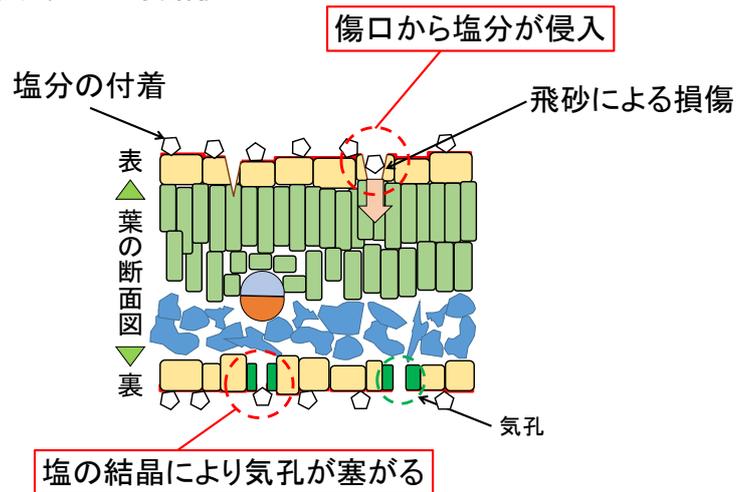
①飛砂潮風への曝露前



②飛砂・潮風への曝露



③飛砂・潮風への曝露後



- ・ 気孔が塞がれる → **ガス交換阻害**
- ・ 細胞内塩分が高濃度化 → **生理作用阻害**

図 3.2.2 飛砂・潮風害の影響の模式図(三田ら, 2009 を基に作成)

(甲山, 2004)。暗呼吸の役割は、糖として蓄積していた還元物質からエネルギーを ATP のかたちで取り出すことにある。ブドウ糖はでんぷんにかえられ、さらにでんぷんからショ糖にかえられ他の器官（分裂組織、種子、果実、貯蔵組織）へ篩管を通過して転流され（ラルヘル, 2004）、植物体の伸長、生殖などの目的に必要とされている重要な栄養である。よって気孔をふさがれることは植物体の伸長、生殖機能を妨げる要因のひとつともなりうると思われる。

②気孔、表皮、傷口からの塩分侵入により細胞内で塩分が高濃度化することによる通常の生理作用の阻害

塩分侵入により細胞中の原形質内で、ナトリウムイオン Na^+ 、塩素イオン Cl^- が過剰な状態になってしまう（ラルヘル, 2004）。原形質中のイオンバランス（カリウムイオン (K^+) やカルシウムイオン (Ca^{2+}) の量に対するナトリウムイオン Na^+ の比) が崩れると、酵素タンパク質と膜（細胞膜など）機能に対し悪影響を与える（吉川ら, 2011 ; Munns and Tester, 2008 ; Munns, 2002）（図 3.2.4）。酵素とは生体内の化学反応に必要なエネルギーを低くする触媒の働きをするものである（日田, 1998）。

酵素タンパク質と膜（細胞膜など）機能への悪影響の結果、光リン酸化によるエネルギー生産も呼吸鎖のリン酸化によるエネルギー生産もほとんど停止（ラルヘル, 2004）してしまう。光リン酸化反応とは光合成をおこなう過程のひとつである。つまり、光リン酸化反応によるエネルギー生産が停止してしまうと光合成による炭酸同化が行えなくなってしまう。

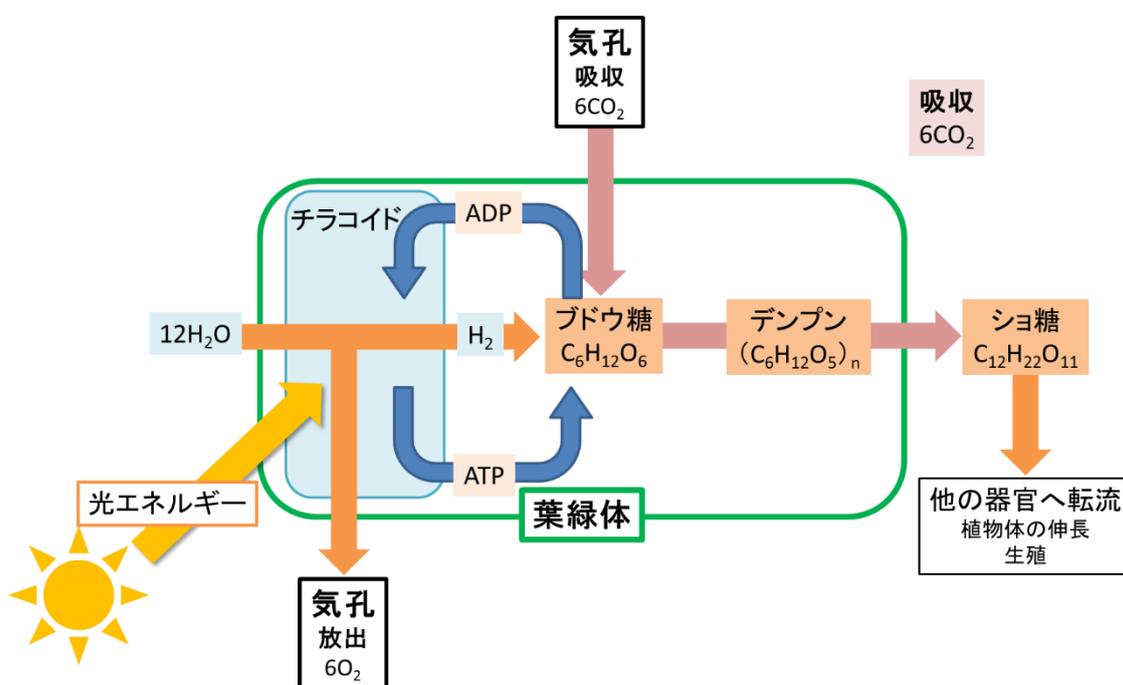
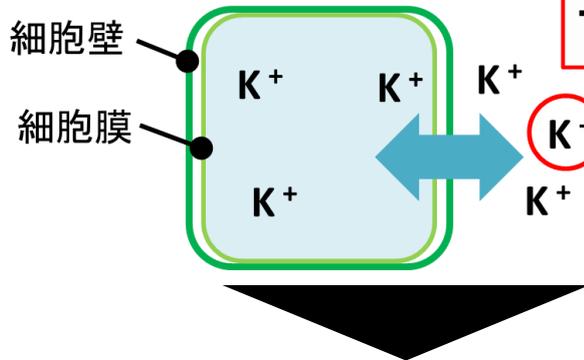


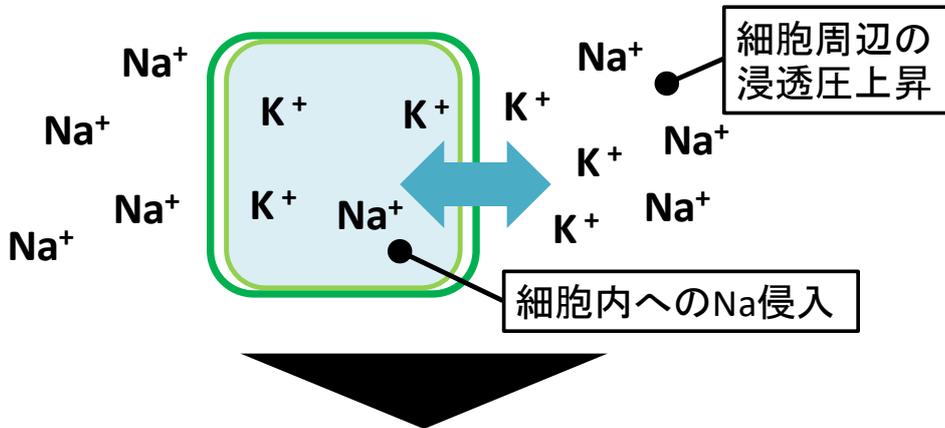
図 3.2.3 光合成における葉緑体内のガス交換と炭酸同化の模式図
(米山ら, 2010 ; ラルヘル, 2004 を基に作成)

①健全な植物細胞でのKの出入り

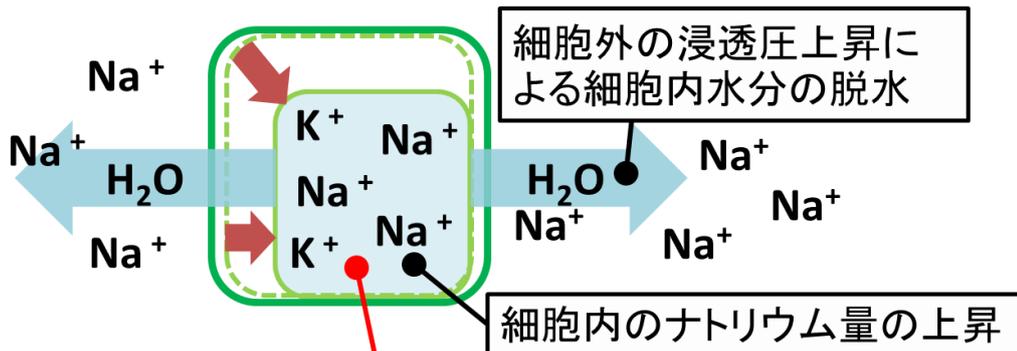


カリウムの役割
 ・浸透圧調節(量的機能)
 ・酵素作用の活性(質的機能)
 (Peng *et al.*, 2004)

②植物体内へのNa侵入



③Naによる障害の発生



ナトリウムによる影響
 ・原形質分離の発生
 ・細胞内のナトリウム量上昇による酵素作用の阻害
 (Munns and Tester, 2008)

図 3.2.4 植物細胞内における Na の影響の模式図
 (Peng *et al.*, 2004 ; Munns and Tester, 2008 を基に作成)

潮風害による葉内への塩分の侵入のしやすさを左右する要因として倉内(1956)は、樹木の葉が付着型か侵入型かを挙げている。主に常緑樹は葉内に塩分が侵入しにくい付着型の葉であり落葉樹は塩分が侵入しやすい侵入型の葉であるとしている

2.2.3 潮水害と植物への影響

潮水害とは、高潮などで海水が林地に流入することによって植物が害される現象を指す(村井ら, 1992)。2011年3月11日に起きた東日本大震災の津波による潮水害について長島ら(長島・攝待, 2012)の調査報告がある。この調査報告によると、カイヅカイブキやスギの葉が茶変したと報告している。また、1946年の南海地震時の津波被害調査によると、ウバメガシ、アオキ、ママモモ(原文ママ※ヤマモモと思われる)、トベラは海水に浸かっても害は無かったが、クスノキ科は枯死した(半田ら, 1993)という報告がある。

生育障害の原因として、①培地浸透圧の上昇による植物の水吸収障害(浸透圧ストレス)(Ahmad *et al.*, 2013; 甲山, 2004; 米山ら, 2010; 間藤, 1997)、②植物体内の塩濃度が高くなることに起因する代謝自体の阻害による生育障害(イオンストレス)(米山ら, 2010; 間藤, 1997)、③高濃度の塩が他の必須元素の吸収を抑制することによる生育障害(養分ストレス)があげられる(甲山, 2004)。

①浸透圧ストレスについて

浸透圧とは水が濃度の低い溶液から高い溶液へ移動するときの力のことである(日田, 1998)。植物の吸水は体内外の水ポテンシャルの勾配に従う物理過程であり(甲山, 2004)、浸透圧は水ポテンシャルを決める要因である(藤田, 1995)。植物の根は、根の水ポテンシャルが根の周囲にある土壌の水ポテンシャルより低いときにだけ、土壌の水を吸収することができる(ラルヘル, 2004)。つまり植物は根による水分の吸収を根内部と土壌中との濃度差によって行っている(図3.2.5)。しかし、潮水により土壌が浸水すると土壌中の塩分濃度が上昇する。すると、根内部の水分より土壌中の塩分濃度が濃い状態になってしまう。つ

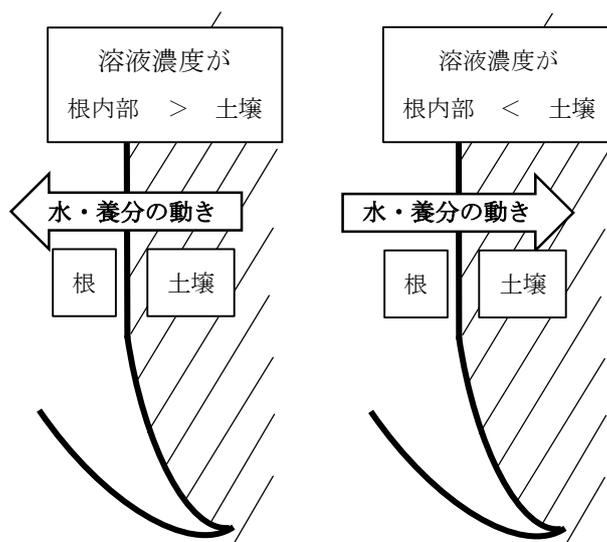


図 3.2.5 根における浸透圧ストレスの仕組み(日田, 1998; 甲山, 2004 を基に作成)

まり根の吸水能の低下が誘引され、むしろ脱水されてしまう（甲山，2004）。

②イオンストレス，③養分ストレスについて

土壌中の高濃度の Na は K, Mg, Ca の吸収を低下させる（甲山，2004）。つまりこれらの栄養が欠乏した状態になってしまう。これが養分ストレスである。養分ストレスにより，植物体内は K, Mg, Ca 欠乏で，Na 過剰による他の塩基（K, Mg, Ca）バランスがくずれ（甲山，2004）てしまう。つまり，飛砂・潮風害と同様にイオンバランスの崩れによる生理阻害というイオンストレスも引き起こす。特に K 欠乏は気孔の開閉に大きな影響がある。気孔の孔辺細胞の K の濃度は気孔開閉と密接な関係があり，気孔が開いているときには K の濃度が高い（甲山，2004）。つまり欠乏すると気孔の開閉が困難になってしまうと考えられる。

3.2.4 貧栄養土壌と植物への影響

海岸環境の特徴で紹介したように，植生の成立基盤となっているのは主に砂である。わが国の海浜における砂地では，砂の成分中，石英が 70～90%を占めることが多い。石英はほとんど純粋なケイ酸であり，他のミネラル類の含有率が低いうえ難溶解性であるから，砂地には養分が乏しいという事になる（半田ら，1993）（図 3.2.6）。さらに，砂のように粒径が大きく粗い生育基盤は養分および水分を吸着する能力が小さいため保肥性・保水性が低い（森本ら，2007）。また，クロマツ海岸林の林床には堆積有機物や腐植に由来する有機酸が存在する（小野ら，2014-a）。よって，海岸林内は特に A 層など表層部の土壌において強い酸性を示す（半田ら，1993）。酸性が強いということは H^+ 濃度が高いということである（松中，2003）。 H^+ は土壌の負電荷に吸着されている Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ といった交換性陽イオンをイオン交換によって土壌から確実に洗い流していく（松中，2003）。これを溶脱という。石英の多い砂質土壌であること，土壌の粒径が粗いこと，土壌が強い酸性を示すことなどから海岸環境は貧栄養土壌となっている。植物にとって，こうした環境ではいかに効率よく栄

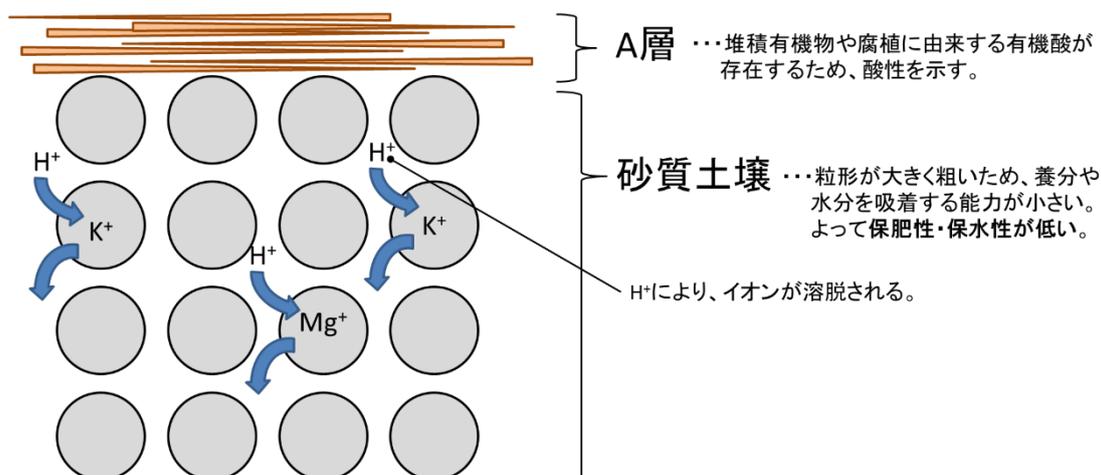


図 3.2.6 海岸林の貧栄養土壌の模式図
（半田ら，1993；小野ら，2004-a；森本ら，2007；松中，2003 を基に作成）

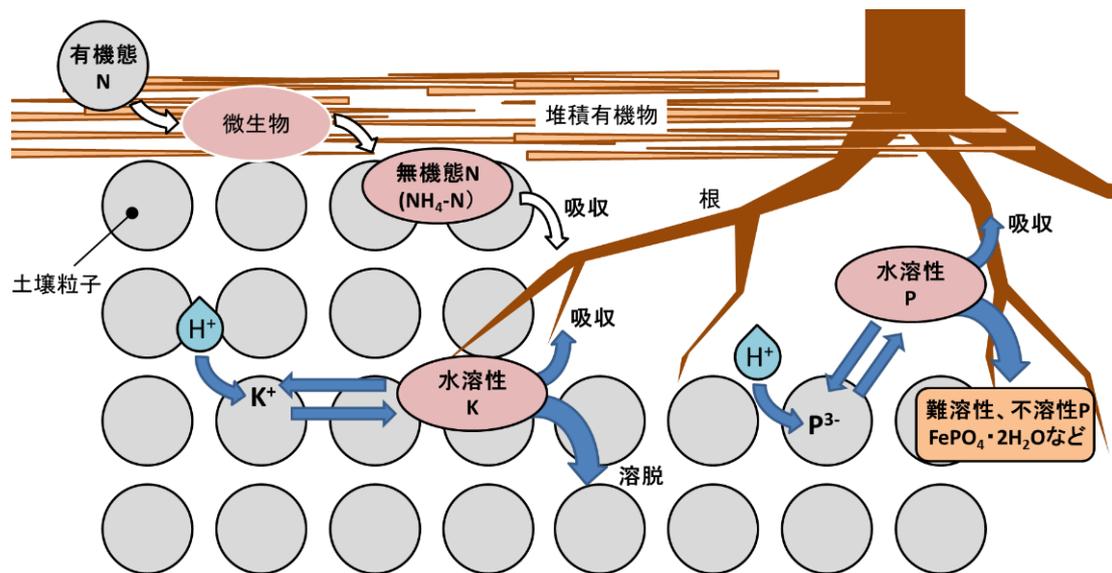


図 3.2.7 海岸林の貧栄養土壌中における N、P、K の動きの模式図
(日田, 1998 ; 松中, 2003 を基に作成)

養塩を回収するかが生き残るカギとなる。針葉樹は広葉樹よりも回収効率がよく、針葉樹の貧栄養土壌への適応の一つとされている (甲山, 2004)。

貧栄養土壌により植物は栄養不足に陥る。N は微生物によって土壌中に固定される。そして、植物が吸収可能な無機態 N であるアンモニア態 N ($\text{NH}_4\text{-N}$) まで分解される (図 3.2.7) (松中, 2003)。したがって、微生物の数と活動が制限された土壌では N は不足しがちである。P は難溶性の塩を作りやすく不溶化するなど自然界で最も利用されにくい元素 (松中, 2003) である (図 3.2.7)。K は海浜砂地では溶脱されやすく不足しやすい (図 3.2.7)。そこで N、P、K の欠乏が植物に与える影響について解説することにする。まずそれぞれの栄養素についての植物生理における役割を整理し、次に欠乏した場合の影響を解説していく。

N は土壌中の微生物のはたらきによって硝酸イオン、アンモニウムイオンに変換される。そして植物体内でアミノ酸に合成され、それをもとに核酸や ATP、クロロフィルが作られる。なかでもクロロフィル、ATP は、光合成に深くかかわっており、緑葉の全 N 含量の 80% までが葉緑体の構成成分であり、N 吸収量が増加すると光合成が促進され生育量が増加する (米山ら, 2010) ことが知られている。このことから、N が欠乏となるとクロロフィルによる光エネルギーの吸収、ATP の分解によって発生するエネルギーの利用がうまくいかなることが考えられる。外部徴候としては、古い葉から新しい葉に黄化が進み、草丈が伸びず全体が小型となる (米山ら, 2010)。

P は母岩から溶脱されて可溶性のリン酸になり、これが植物や土壌微生物によって直接吸収される (松中, 2003 ; 甲山 ; 2004)。そして吸収された P は DNA、RNA などの構成要素として、遺伝情報物質、タンパク質合成の鋳型として機能し、植物体内でおこる化合物の合成・代謝と細胞分裂に必須の元素 (米山ら, 2010) として利用される。そのため、P の欠乏

は植物の代謝に広く影響を及ぼし、生育に大きなダメージを与えられられる。外部徴候として葉幅が狭く、葉色は暗緑色となり下葉は紫色となる。葉は小型になる(米山ら, 2010)などの特徴が見受けられる。

K については潮水害の項で説明をしたので詳しくは取り扱わないが、主な機能は①細胞の浸透圧を作り出すこと(量的機能)と、②酵素反応を活性化すること(質的機能)にある(米山ら, 2010; Peng *et al.*, 2004)。種間差はあるものの液胞におけるカリウムイオンの機能は細胞の水ポテンシャルを低下させることであり、この機能はナトリウムイオンでも代替できる(米山ら, 2010)ということも知られている。しかし、質的機能である酵素反応の活性化はナトリウムイオンによる代替はできない(米山ら, 2010)。このことから、K 欠乏は主に光合成に関して植物へ悪影響を与えるのではないかと思われる。欠乏時の外部徴候としては全体の葉が暗緑色で下葉の先端、葉緑が黄化、やがて褐色となり壊死する(米山ら, 2010)などの特徴が確認できる。

以上の N, P, K における植物体内の働きと欠乏する要因を表 3.2.1 及び表 3.2.2 に示す。

表 3.2.1 海岸林の貧栄養土壌中における N、P、K の欠乏要因(松中(2003)より作成)

元素	海岸林環境における砂質土壌での欠乏要因
N	有機物が乏しく微生物の活動が制限されるため土壌中に固定されづらい。
P	難溶性の塩を作りやすく、不溶化してしまう。つまり植物が吸収しやすい状態になりづらい。
K	海浜砂地では容易に溶脱される。

表 3.2.2 N、P、K の植物体内での働き(松中(2003)を一部改)

元素	植物体内での主な働き
N	タンパク質、葉緑素、核酸など植物体の生命にかかわる成分の構成成分
P	ATP(アデニン三リン酸)として体内のエネルギー移動に重要、多くのタンパク質、核酸、代謝基質の構成成分
K	植物体の構成成分としては存在しない。光合成、炭水化物の移動、タンパク質の合成などの制御機構に関与

3.2.5 高潮・津波と塩水冠水期間並びに樹木の被害

3.2.5.1 塩水冠水期間

東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波における塩水冠水の期間について、宮本（2012）によると宮城県亘理町長瀬地区内の汀線から内陸に約 3km 地点にあるイチゴ栽培ハウスにおいて津波による冠水が 5 日間程度継続したことが分かっている。また、千葉（2012）の報告では汀線から約 4km 西に位置する宮城県名取市内の水田においても海水に 5 日間程度冠水したことが報告されている。名取市、岩沼市、亘理町では岡田ら（2014）による聞き取り調査によって、概ね 2～3 日間の冠水が発生したことが確認されている。よって、東北地方太平洋沖地震による津波では沿岸域においては、2～5 日間にわたって塩水に冠水したと推察される。また、1953 年の台風 13 号では高潮発生後に植物の塩水冠水による塩害の調査が谷口（1954）によって行われている。三重県志摩市浜島町では宇気比神社付近で 1 日間の冠塩水が認められた。津市橋北地方の安濃川以北では海岸地帯で 1 日、地上役 50cm 地点で 2 日間、海岸砂地において 1 ヶ月間、海岸から 1km 離れた地点で 1 日間の冠塩水が認められた。同じく三重県津市贅崎では海岸の針広混交マツ林で 2 日間、安濃川堤防付近で 3 日間、津市贅崎付近の畑地で 10～11 日間の間塩水が認められた。志摩的矢村小学校前では 1 日間の冠塩水が認められた。宇治山田市外江村では 1～19 日間の冠塩水が認められた。よって台風 13 号においては 1 日から長くて 1 ヶ月間の塩水冠水が発生したことになる。

また、松木・森下（1986）は 1959 年に発生した伊勢湾台風では伊勢湾、三河湾沿岸地域の平地約 37,000ha の広範囲に及ぶ都市、農村地帯が数十日にもわたり長期間湛水したと報告している。

3.2.5.2 樹木の被害

高潮や津波に被災した後の樹木の被害状況についての記録は、1896 年の明治三陸地震、1951 年のルース台風、1953 年の台風 13 号、1959 年の伊勢湾台風、1960 年のチリ地震、2011 年の東北地方太平洋沖地震についての報告がある。

後藤（1899）は 1896 年に発生した明治三陸地震における樹木の津波被害について報告している（表 1.3-1）。高潮による樹木の被害状況については、西・木村（1954）が 1951 年に発生したルース台風による高潮害について、谷口（1954）が 1953 年に発生した台風 13 号について、仰木ら（1961）が 1959 年に発生した伊勢湾台風の高潮について報告している。また、中野ら（1962）は 1960 年に発生したチリ地震における沿岸域の樹木の津波被害について報告をしている。更に、東北地方太平洋沖地震については中村ら（2012）や永幡（2012）による報告がある。

明治三陸地震津波における調査では、樹種ごとの被害状況から津波に対する耐性を 5 段階で評価しており、最も耐性の高い樹種から順に第一級、第二級、…、第五級とし、最も低いものが第五級である。各階級の評価基準は、第一級は幼木、老齢木ともに全く被害を受け

なかつた樹種，第二級は海水によって葉縁あるいは新芽が萎凋または枯死するが樹冠は枯死しない樹種，第三級は海水に浸かつた葉は全て枯死するが再び新芽を出す樹種，第四級は海水によって基幹部は完全に枯死するが再び萌芽する樹種，第五級は海水によって植物体が完全に枯死する樹種となっている（表 3.2.3）。評価の結果は表 3.2.4 のとおりである。

表 3.2.3 耐性の階級と評価基準（後藤，1899）

耐性の階級	評価基準
第一級	幼木，老齡木ともに全く被害を受けなかつた樹種
第二級	海水によって葉縁あるいは新芽が萎凋または枯死するが樹冠は枯死しない樹種
第三級	海水に浸かつた葉は全て枯死するが再び新芽を出す樹種
第四級	海水によって基幹部は完全に枯死するが再び萌芽する樹種
第五級	海水によって植物体が完全に枯死する樹種

表 3.2.4 後藤（1899）による明治三陸地震における樹木の津波被害

樹種	被害	耐性
クロマツ	老幼樹共に海水に依て全被害を受けざりし樹種	第一級
ムロ	老幼樹共に海水に依て全被害を受けざりし樹種	第一級
ビシャクシン	老幼樹共に海水に依て全被害を受けざりし樹種	第一級
カキ	老幼樹共に海水に依て全被害を受けざりし樹種	第一級
ハマナス	老幼樹共に海水に依て全被害を受けざりし樹種	第一級
ハナビハ	老幼樹共に海水に依て全被害を受けざりし樹種	第一級
トベラ	老幼樹共に海水に依て全被害を受けざりし樹種	第一級
タコノキ	老幼樹共に海水に依て全被害を受けざりし樹種	第一級
リヨクサンゴ	老幼樹共に海水に依て全被害を受けざりし樹種	第一級
エノキ	海水に依て稍害を蒙る者即ち葉縁或は新芽は海水に遇て凋枯するも其樹冠は依然枯死せざる樹種	第二級
ケヤキ	海水に依て稍害を蒙る者即ち葉縁或は新芽は海水に遇て凋枯するも其樹冠は依然枯死せざる樹種	第二級
コナラ	海水に依て稍害を蒙る者即ち葉縁或は新芽は海水に遇て凋枯するも其樹冠は依然枯死せざる樹種	第二級
カキ	海水に依て稍害を蒙る者即ち葉縁或は新芽は海水に遇て凋枯するも其樹冠は依然枯死せざる樹種	第二級
カジハ	海水に依て稍害を蒙る者即ち葉縁或は新芽は海水に遇て凋枯するも其樹冠は依然枯死せざる樹種	第二級
ヤナギ類	海水に依て稍害を蒙る者即ち葉縁或は新芽は海水に遇て凋枯するも其樹冠は依然枯死せざる樹種	第二級
ツバキ	海水に依て稍害を蒙る者即ち葉縁或は新芽は海水に遇て凋枯するも其樹冠は依然枯死せざる樹種	第二級
マンサク	海水に依て稍害を蒙る者即ち葉縁或は新芽は海水に遇て凋枯するも其樹冠は依然枯死せざる樹種	第二級
タケ類	海水に依て稍害を蒙る者即ち葉縁或は新芽は海水に遇て凋枯するも其樹冠は依然枯死せざる樹種	第二級
ムクゲンジ	海水に依て稍害を蒙る者即ち葉縁或は新芽は海水に遇て凋枯するも其樹冠は依然枯死せざる樹種	第二級
マユミ	海水に依て稍害を蒙る者即ち葉縁或は新芽は海水に遇て凋枯するも其樹冠は依然枯死せざる樹種	第二級
マサキ	海水に依て稍害を蒙る者即ち葉縁或は新芽は海水に遇て凋枯するも其樹冠は依然枯死せざる樹種	第二級
クリ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
ホオノキ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
シナノキ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
ニガキ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
クマシデ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
ソロ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
ウシコロシ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
アワブキ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
ウコギ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
シヤラ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
ネムノキ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
グミ類	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
ヒメグルミ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
オニグルミ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
イボクノキ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
ニシキギ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
ノイバラ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
ネズミモチ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
キフヂ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
ツツヂ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
ナンテン	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
フヂ	海水に依て稍多く害を蒙る者即ち海水に浸されし葉は全く凋枯するも再び新芽を出す樹種	第三級
クハ類	海水に依て多く害を蒙る者即ち其幹部は海水に遇ひ全く枯死するも其根株より再び萌芽する者	第四級
ガマズミ	海水に依て多く害を蒙る者即ち其幹部は海水に遇ひ全く枯死するも其根株より再び萌芽する者	第四級
ニガキ	海水に依て多く害を蒙る者即ち其幹部は海水に遇ひ全く枯死するも其根株より再び萌芽する者	第四級
イヌガヤ	海水に依て多く害を蒙る者即ち其幹部は海水に遇ひ全く枯死するも其根株より再び萌芽する者	第四級
ボタン	海水に依て多く害を蒙る者即ち其幹部は海水に遇ひ全く枯死するも其根株より再び萌芽する者	第四級
アカマツ	海水に依て最も多く害を蒙る者即ち海水に遇ひ全植物體の全く枯死する者	第五級
スギ	海水に依て最も多く害を蒙る者即ち海水に遇ひ全植物體の全く枯死する者	第五級
サハラ	海水に依て最も多く害を蒙る者即ち海水に遇ひ全植物體の全く枯死する者	第五級
クハ類(大樹)	海水に依て最も多く害を蒙る者即ち海水に遇ひ全植物體の全く枯死する者	第五級
サクラ	海水に依て最も多く害を蒙る者即ち海水に遇ひ全植物體の全く枯死する者	第五級
カイダウ	海水に依て最も多く害を蒙る者即ち海水に遇ひ全植物體の全く枯死する者	第五級
サハミヅキ	海水に依て最も多く害を蒙る者即ち海水に遇ひ全植物體の全く枯死する者	第五級
クロムメモドキ	海水に依て最も多く害を蒙る者即ち海水に遇ひ全植物體の全く枯死する者	第五級
ヤムザクラ	海水に依て最も多く害を蒙る者即ち海水に遇ひ全植物體の全く枯死する者	第五級
ボウダラ	海水に依て最も多く害を蒙る者即ち海水に遇ひ全植物體の全く枯死する者	第五級

1960年に発生したチリ地震に伴う津波について、中野ら（1962）による岩手県田老町から南へ宮城県仙台市海岸に至る地域の樹木の津波被害は表 3.2.5 のとおりである。

表 3.2.5 中野ら（1962）によるチリ地震における樹木の津波被害

樹種	被害
クロマツ稚幼樹	枯死するもの。
スギ	枯死するもの。
ボブラ	枯死するもの。
カマツカ	枯死するもの。
ソメイヨシノ	枯死するもの。
ニワトコ	枯死するもの。
アカマツ	枯死または浸塩水後落葉するがその後ふたたび新葉を出す。また葉の周辺が変色するが健全な冬芽をもつもの・浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
イヌコリヤナギ	枯死または浸塩水後落葉するがその後ふたたび新葉を出す。また葉の周辺が変色するが健全な冬芽をもつもの・浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ドクウツギ	枯死または浸塩水後落葉するがその後ふたたび新葉を出す。また葉の周辺が変色するが健全な冬芽をもつもの・浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ネコヤナギ	枯死または浸塩水後落葉するがその後ふたたび新葉を出す。また葉の周辺が変色するが健全な冬芽をもつもの・浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ニセアカシヤ稚幼樹	浸塩水後落葉するがその後ふたたび新葉を出す。また葉の周辺が変色するが健全な冬芽をもつもの。
カワヤナギ	浸塩水後落葉するがその後ふたたび新葉を出す。また葉の周辺が変色するが健全な冬芽をもつもの。
キハギ	浸塩水後落葉するがその後ふたたび新葉を出す。また葉の周辺が変色するが健全な冬芽をもつもの。
ケヤキ	浸塩水後落葉するがその後ふたたび新葉を出す。また葉の周辺が変色するが健全な冬芽をもつもの・浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
オニグルミ	浸塩水後落葉するがその後ふたたび新葉を出す。また葉の周辺が変色するが健全な冬芽をもつもの・浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ナツグミ	浸塩水後落葉するがその後ふたたび新葉を出す。また葉の周辺が変色するが健全な冬芽をもつもの・浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
クロマツ（樹高1 m以上）	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ニセアカシヤ成木	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
コナラ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ヤマウルシ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ミズナラ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ネムノキ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
コバノネリコ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ヤマグワ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
クマイザサ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
イクチハギ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ハマナス	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
マサキ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
オオバイボタ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ノイバラ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ムラサキシキブ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ヤダケ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
イブキ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ハイネズ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ヤマハギ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
サンショウ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ガズミ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
クコ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ハナイカダ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ハマゴウ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
アズマネザサ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ノブドウ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
センニンソウ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
フジ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ツタウルシ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
スイカズラ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
サルトリイバラ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ナワシロイチゴ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。
ヤマブドウ	浸塩水しても反応がなく健全と思われるもの。

西・木村（1954）が1951年に発生したルース台風による高潮害について調査した結果をまとめたものが表3.2.6である。また、谷口（1954）が1953年に発生した台風13号における高潮被害について調査した結果を表3.2.7に示す。

表 3.2.6 枕崎市立神防潮林における台風15号による高潮被害の調査結果
（西・木村，1954）

地区	樹種	被害の程度								本数計
		A: 殆ど被害なきもの		B: 被害はあつたが発芽しておるもの		C: 上方が枯れて根元より発芽しおるもの		D: 全く枯死せるもの		
		本数	百分率	本数	百分率	本数	百分率	本数	百分率	
海側	トベラ	44	52	21	24			21	24	86
	ハマビワ	17	33	18	35	11	22	5	10	51
	ツバキ	1	11	8	89					9
	ハマヒサカキ	8	80	2	20					10
	シャリンバイ	3	75	1	25					4
	イヌビワ	1	100							1
	マルバグミ			1	100					1
	マサキ	3	60	1	20	1	20			5
	タブ							1	100	1
陸側	トベラ	47	84	7	12			2	4	56
	ハマビワ	18	78	1	4	2	9	2	9	23
	ツバキ			8	80			2	20	10
	ハマヒサカキ	3	100							3
	シャリンバイ	2	67	1	33					3
	イヌビワ	3	50	2	33.33	1	16.67			6
	マルバグミ	1	50	1	50					2
	マサキ	5	100							5
	タブ	1	100							1
	ネズミモチ	1	50	1	50					2
クロキ			1	100					1	

表 3.2.7 台風 13 号における高潮被害の調査結果（谷口，1954）

樹種	地名	冠水期間	被害
アカマツ	津市橋北地方	1日間	異常なし(稚樹)
アカメガシワ	津市橋北地方	2日間	わずかに葉が赤褐色化(幼樹)
アカメガシワ	宇治山田市外江村	1日間	葉が全枯死
アカメガシワ	志摩的矢村小学校前	1日間	葉が全枯死
ウバメガシ	志摩的矢村小学校前	1日間	葉縁枯死
クコ	津市鬻崎海岸	2日間	異常なし
クロガネモチ	津市橋北地方	2日間	異常なし
クロマツ	津市橋北地方	2日間	わずかに葉が赤褐色化(幼樹)
クロマツ	宇治山田市外江村	1日間	全て枯死(高さ1m未満の幼樹)
クロマツ	宇治山田市外江村	1日間	葉がほとんど赤茶変
クロマツ	津市鬻崎海岸	2日間	異常なし
クロマツ	津市鬻崎海岸	3日間	僅少な被害
クロマツ	津市鬻崎海岸	10~11日間	異常なし
サカキ	宇治山田市外江村	1日間	葉が全枯死
サツキ	宇治山田市外江村	1日間	葉が全枯死
シャリンバイ	志摩的矢村小学校前	1日間	異常なし
スギ	津市橋北地方	1日間	葉が全枯死(10年生)
スギ	津市橋北地方	1日間	先端の芽が傷められた(2~3年生)
ソヨゴ	宇治山田市外江村	1日間	異常なし
タブノキ	津市鬻崎海岸	2日間	異常なし
ツバキ	津市橋北地方	2日間	異常なし
ツルグミ	津市鬻崎海岸	2日間	異常なし
トベラ	津市橋北地方	2日間	異常なし
トベラ	津市鬻崎海岸	2日間	異常なし
トベラ	津市鬻崎海岸	10~11日間	異常なし
ナワシログミ	津市鬻崎海岸	2日間	異常なし
ナワシログミ	津市鬻崎海岸	10~11日間	異常なし
ネズミモチ	宇治山田市外江村	1日間	約1/3の葉が枯死
ネズミモチ	津市鬻崎海岸	2日間	わずかに褐色化(稚樹)
ネズミモチ	津市鬻崎海岸	2日間	異常なし
ネズミモチ	津市鬻崎海岸	10~11日間	異常なし
ノイバラ	志摩的矢村小学校前	1日間	異常なし
ノリウツギ	宇治山田市外江村	1日間	約1/2の葉が枯死
ハマゴウ	宇治山田市外江村	1日間	約1/2の葉が枯死
ヒサカキ	宇治山田市外江村	1日間	葉が全枯死
ヒサカキ	志摩的矢村小学校前	1日間	葉が少し赤褐色化
ヒノキ	津市橋北地方	2日間	わずかに葉が赤褐色化
ヒノキ	津市橋北地方	1日間	幹に近い部分の葉が赤褐色化(20年生)
ヒノキ	津市橋北地方	1日間	先端の芽が傷められた(2~3年生)
ヒヨクヒバ	津市橋北地方	1日間	約1/4の葉が枯死(20年生)
マサキ	津市橋北地方	2日間	異常なし
マサキ	津市鬻崎海岸	2日間	わずかに褐色化(稚樹)
マサキ	津市鬻崎海岸	2日間	異常なし
ムベ	志摩的矢村小学校前	1日間	異常なし
モチノキ	津市鬻崎海岸	2日間	異常なし
ヤマモモ	宇治山田市外江村	1日間	葉がほとんど赤茶変
ヤマモモ	志摩的矢村小学校前	1日間	約1/2の葉が枯死

中村ら (2012) や永幡 (2012) による報告を表 3.2.8 に、筆者が 2012 年 6 月におこなった千葉県における現地踏査の結果を表 3.2.9 にまとめた。クロマツは傾斜・倒伏・折損など物理的な被害に加えて葉の赤褐色化が被災後に発生したが、宮城県名取市や岩手県宮古市では稚樹の生長や河口付近のクロマツ林の陸側において外見上健全な状態を維持していたことが確認されている。

アカマツは被災後 6 月までにはほぼすべての木で針葉が変色し、そのほとんどが秋には枯死したことが東松島市浜市の海岸後背地において認められている。一方で、岩手県宮古市田老において河口付近の山裾のアカマツは被災年の 8 月に外見上健全な状態を維持していたことが報告されている。スギは 2011 年 4 月までは外見上の被害は見られなかったが、5 月から広汎な葉の変色が発生したことが報告されている。

2012 年に筆者が行った千葉県内の片貝漁港付近から犬吠崎付近までの樹木の被害状況を調査において、被害が確認できた樹種は、クロマツ、イブキ、イヌマキの常緑針葉樹、タブノキ、ハマヒサカキ、クロガネモチ、ヤマモモ、トベラ、マサキの常緑広葉樹、ハンノキ、アオギリ、ネムノキの落葉広葉樹である。海岸林のクロマツは海側の前線部と陸側とで被害に差がある傾向が確認できた。前線部に生育していたクロマツは葉が茶変し、倒伏し枯死、あるいは立枯れしている個体が多く見られた。一方、後背部に生育していたクロマツは目立った可視被害などは見られなかった。イブキは全体が茶変し枯死していた。イヌマキは枯死しているものと、目立った可視被害が見られず枯死していないものの二通り確認できた。枯死していないイヌマキは津波直後に真水をかけた個体であることが住民へのヒアリングの結果から分かっている。片貝漁港付近に生育していたタブノキは枝の葉がすべて落葉し、新しい葉が胴吹きしていた。トベラは生育している場所によって被害が異なり、海岸林内に生育していた個体は葉量が減っているように見られ、片貝漁港付近に生育していた個体は目立った落葉は認められず、可視被害は見られなかった。ハマヒサカキ、クロガネモチ、ヤマモモ、マサキは葉や枝に可視被害は見られなかった。ハンノキは葉が落ち、幹から新たな葉が胴吹きしていた。片貝漁港付近に生育していたアオギリ、ネムノキには可視被害は見られなかった。クロマツについては海岸林の海側前線部に植栽されていた個体は倒伏や立ち枯れなどにより枯死しており、海岸林の内陸側に植栽されていた個体は生存していた。

表 3.2.8 東北地方太平洋沖地震における樹木の被害
(中村ら, 2012 ; 永幡, 2012)

樹種	立地環境	被災直後の状態	被災後の樹木の様相	文献
クロマツ	海岸前線 (巨理町吉田浜)	傾斜・倒伏・折損・ほぼすべての針葉が赤褐変	枝の先端から新芽を出したものの、2011年9月までにすべて枯死	中村ら(2012)
		傾斜・倒伏はほぼなし	2011年夏以降に針葉の変色が進行し海岸前線部分を中心に壊滅的な被害が発生	中村ら(2012)
	海岸後背地 (巨理町吉田浜)	地盤沈下などにより根元まで海水が侵入	2011年10月ごろ新たにクロマツ林の衰弱や枯死が発生	中村ら(2012)
		傾斜・倒伏、折損(小径木)	2011年6月には針葉が赤褐変	中村ら(2012)
	海岸後背地 (八戸市市川)	傾斜・倒伏なし	小径の被圧木に針葉の変色が見られたが、大径の優勢木は2011年9月でも外見上健全な状態を維持	中村ら(2012)
		傾斜・倒伏なし	全ての針葉が変色・脱落した木の割合が徐々に増加(2011年5月に1割、10月に3割、2012年7月に9割)	中村ら(2012)
海岸 (名取市広浦)	傾斜・倒伏・折損・ほぼすべての針葉が赤褐変	2011年7月時点ではほぼすべてのクロマツが赤褐色化していたが、稚樹の生長が見られた	永幡(2012)	
河口付近の平坦地 (宮古市田老)	陸側は傾斜・倒伏はほぼなし	2011年8月時点では海に面したクロマツのみ枯死し、陸側は海水に根まで冠水したが外見上健全な状態	永幡(2012)	
アカマツ	海岸後背地 (東松島市浜市)	傾斜・倒伏はほぼなし	・2011年6月までにほぼすべての木で針葉が変色し一部が新芽を拭く ・多くは秋までに枯死したが一部に緑葉が増えて回復してきている木も確認された ・最終的な枯死率は近隣のクロマツより明らかに高かった	中村ら(2012)
	河口付近の山裾 (宮古市田老)	傾斜・倒伏なし	2011年8月時点では外見上健全な状態	永幡(2012)
スギ	平地? (東松島市) 斜面 (釜石市、南三陸町) 河口付近の山裾 (宮古市田老)	傾斜・倒伏なし	2011年4月時点では可視被害は見られず、同年5月から広汎な針葉変色被害が生じた	中村ら(2012)
オニグルミ	河口 (宮古市田老)	傾斜・倒伏なし	2011年5月に最初に芽吹いた葉は萎れたが、後から健全な葉が芽吹いた	永幡(2012)
ヤマグワ	河口 (宮古市田老)	傾斜・倒伏なし	2011年6月には衰弱していたが、同年秋には外見上樹勢の回復が見られた	永幡(2012)

表 3.2.9 千葉県における東北地方太平洋沖地震による樹木の被害

樹種	立地環境	被災直後の状態	被災後の樹木の様相
イブキ	沿岸平地 (千葉県)	傾斜・倒伏なし	2012年6月時点で全ての葉が茶変し枯死していた
イヌマキ	沿岸平地 (千葉県)	傾斜・倒伏なし	葉が落ち枯死していたが、震災後に水道水をかけた個体は生存していた
ハマヒサカキ	沿岸平地 (千葉県片貝漁港付近)	傾斜・倒伏なし	葉に可視被害は見られなかった。
ハンノキ	沿岸域湿地 (千葉県)	傾斜・倒伏なし	枝には葉はついていなかったが、葉が胴吹きしていた。
アオギリ	沿岸平地 (千葉県片貝漁港付近)	傾斜・倒伏なし	衰弱など可視被害は見られなかった。
ネムノキ	沿岸平地 (千葉県片貝漁港付近)	傾斜・倒伏なし	衰弱など可視被害は見られなかった。
クロガネモチ	沿岸平地 (千葉県片貝漁港付近)	傾斜・倒伏なし	衰弱など可視被害は見られなかった。
タブノキ	沿岸平地 (千葉県片貝漁港付近)	傾斜・倒伏なし	枝には葉はついていなかったが、葉が胴吹きしていた。
ヤマモモ	沿岸平地 (千葉県)	傾斜	可視被害は見られず、新しい葉が展葉していた。
トベラ	沿岸平地 (千葉県)	傾斜・倒伏なし	少ないが葉がついていた。
	沿岸平地 (千葉県片貝漁港付近)	傾斜・倒伏なし	目立った落葉は認められず、可視被害は見られなかった。
マサキ	沿岸平地 (千葉県片貝漁港付近)	傾斜・倒伏なし	目立った落葉は認められず、可視被害は見られなかった。
クロマツ	海岸林 (千葉県)	前線部では倒伏・立枯れ 後背部では生存木あり	前線部では葉が茶変し、倒伏し枯死、あるいは立枯れしていた。 後背部では、生存木多く目立った可視被害などは見られなかった。

3.2.6 津波と農地の被害

寺崎（2013）は2011年11月に宮城県名取市牛野伊藤の水田を対象として除塩工事中の土壤塩の挙動を7日間調べている。その結果、以下の5つのことが明らかとなった。

1. 除塩効果（Cl⁻の溶出）は地表から200mmまでの耕起層で明確に認められ、地表に近いほど顕著に現れた。また、地表から200mm以深（難透水層）では除塩効果はごくわずかであった。
2. 除塩効果は灌水直後から2日までの間に著しく、時間の経過とともに小さくなり、灌水直後から4日後以降は少ない。
3. 灌水期間中の土壤のECは地表から150mmまでは灌水直後から96時間後まで減少し、それ以降の減少率は鈍化した。また、地表から200mm以深ではECの減少は無視できるほど小さい。
4. 灌水期間中の土壤から灌水への塩分供給は灌水直後より2日に顕著に現れ、それ以降の供給速度は鈍化した。
5. 今回の除塩工事に限れば、約53%の塩分排出効果が得られた。

星・遊佐（2012）は水田では麦などを除いて、作物の直接的被害は少なかったが、海水の流入や土砂・ガレキの堆積などが多く、農作物の生産ができる状況ではなかったと報告している。その他にも施設の倒壊流出や排水機場の倒壊被害による被害や復旧の遅れが発生したという。

2016年に農林水産省統計部が発表した「2015年農林業センサス結果における被災3県の概要（平成28年3月25日）」に岩手県、宮城県、福島県における津波被災農地の面積と復旧状況が報告されている。岩手県の被災面積は730haであり、26年度までに営農再開が可能である面積が450haで被災面積の62%、27年度以降営農再開見込みが220haで被災面積の30%、農地転用等が60haで被災面積の8%を占める。宮城県の被災面積は14,340haとなっており、26年度までに営農再開が可能である面積が12,030haであり被災面積の84%、27年度以降営農再開見込みが1,680haで被災面積全体の12%、農地転用地等が630haで被災面積全体の4%となっている。福島県の津波被災面積は14,340haであり、26年度までに営農再開が可能である面積が1,630haであり被災面積の30%、27年度以降営農再開見込みが1,130haであり被災面積の21%、避難指示区域等関連農地が2120haであり被災面積の39%、農地転用等が580haで11%を占める。

3.3 植物の耐塩性

3.3.1 塩生植物と非塩生植物

植物は塩分濃度に対する耐性の高さと、塩分ストレスに対する耐塩生機構の違いによって塩生植物 (halophyte) と非塩生植物 (glycophyte) に分けることができ、塩生植物とは高い塩分濃度条件下においても生育しライフサイクルを完結する植物である (Ahmad *et al.*, 2013) とされている。塩生植物と非塩生植物の違いについて Zakharin and Panichkin (2009) は、塩生植物たちは遺伝的に耐塩性が決められた生物であるが、一方で非塩生植物は常在型ではない誘発性の塩分耐性のみを発揮するとしている。耐塩性の仕組みも塩生植物と非塩生植物とは異なり、それらの違いをもとに塩性植物と非塩性植物について様々な定義がなされている (表 3.3.1)。

Flower and Colmer (2008) は、すべての生長段階において塩化ナトリウム (NaCl) 濃度が 200mM 以上の高塩分環境下でも生存できる植物とするものとしている。また、間藤 (1997) は塩生植物を 100mM NaCl が存在しても生活環を全うできる植物としている。更に、100-200 mM の NaCl によって著しく阻害または枯死させられることすらある植物を非塩生植物、対して 300mM の過度な塩分においても生き残ることができる植物を塩生植物と定義しているものもある (Roberts, 2007)。海水の 10% の濃度でさえ耐えられない植物は中生植物または非塩生植物とするものもある (Choukr-Allah *et al.*, 1995 ; CHERIAN *et al.*, 1999 ; Parida and Das, 2005 ; Yadav *et al.*, 2011 ; Mane *et al.*, 2011)。また、塩分に対する特殊な器官や仕組みを持っているものを塩性植物とする定義もあり、葉身に輸送されたナトリウムに対して、塩毛へ蓄積し塩毛ごと捨て去ったり、塩腺から体外へ分泌したりすることや、葉肉細胞内の巨大な液胞へ蓄積し隔離することで無害化し細胞の膨圧をつくり出すことに利用することができる植物が塩性植物とされる (日本土壤肥料学会, 1991)。

塩生植物は、さらに耐塩性の高さや生育環境によって分けられることがある。例えば耐塩性の違いによって絶対塩生植物と条件的塩生植物に分けて定義されている (ラルヘル, 2004)。絶対的塩生植物とは、塩分をある程度吸収する方が生長が促進されるが、非常に高くなると生長が抑制される植物 (アッケシソウ属, オカヒジキ属, マツナ属など) である。条件的塩生植物はやや塩分の多い場所に生育するが、塩分濃度が上昇するとすぐに生長が抑制される (イネ科, カヤツリグサ科, イグサ科など) 植物で、わずかな塩分に対して耐性を持つが、普段は塩分が特に多くない土壤に生育するものと定義されている。また、生育環境によって塩生植物を湿塩生植物 (hydro-halophyte) と乾塩生植物 (xero-halophyte) に分ける定義もある (吉川ら, 2004)。湿塩生植物は海水の影響を受ける場所、もしくは塩田に生育する塩生植物を示し、乾塩生植物は塩類集積地などに生育する塩生植物を示す (吉川ら, 2004)。

表 3.3.1 非塩性植物と塩性植物の定義

非塩性植物 (Glycophyte)	塩性植物 (Halophyte)	参考文献 (Reference)
海水の10% できえ耐えられない植物は中生植物または非塩性植物とするものもある		Choukr-Allah <i>et al.</i> (1996), CHERIAN <i>et al.</i> (1999) Parida and Das (2005), Yadav <i>et al.</i> (2011) A. V. <i>et al.</i> (2011)
200mM/LのNaClによって著しく阻害または枯死させられることすらある植物	300mM/Lの過度な塩分においても生き残ることができる植物	Roberts (2007)
	すべての生長段階において塩化ナトリウム (NaCl) 濃度が200mM以上の高塩分環境下でも生存できる植物	Flower and Colmer (2008)
	塩性植物を100mM NaClが存在しても生活環を全うできる植物	間藤 (1997)
土壤中の乾土当たり塩分が0.1~0.2%以上の濃度に耐性のない植物	0.2~0.25% 以上の塩分濃度においても生育できる植物	巖佐ら (2003)
	<p>絶対塩性植物 塩分をある程度吸収する方が生長が促進されるが、非常に高くなると生長が抑制される植物 (アッケシソウ属, オカヒジキ属, マツナ属など)</p> <p>条件的塩性植物 やや塩分の多い場所に生育するが、塩分濃度が上昇するとすぐに生長が抑制される植物 (イネ科, カヤツリグサ科, イグサ科など)</p>	ラルヘル (2004)
	<p>湿塩性植物 海水の影響を受ける場所, もしくは塩田に生育する塩性植物</p> <p>乾塩性植物 塩類集積地などに生育する塩性植物</p>	吉川ら (2004)

3.3.2 耐塩性のメカニズムについて

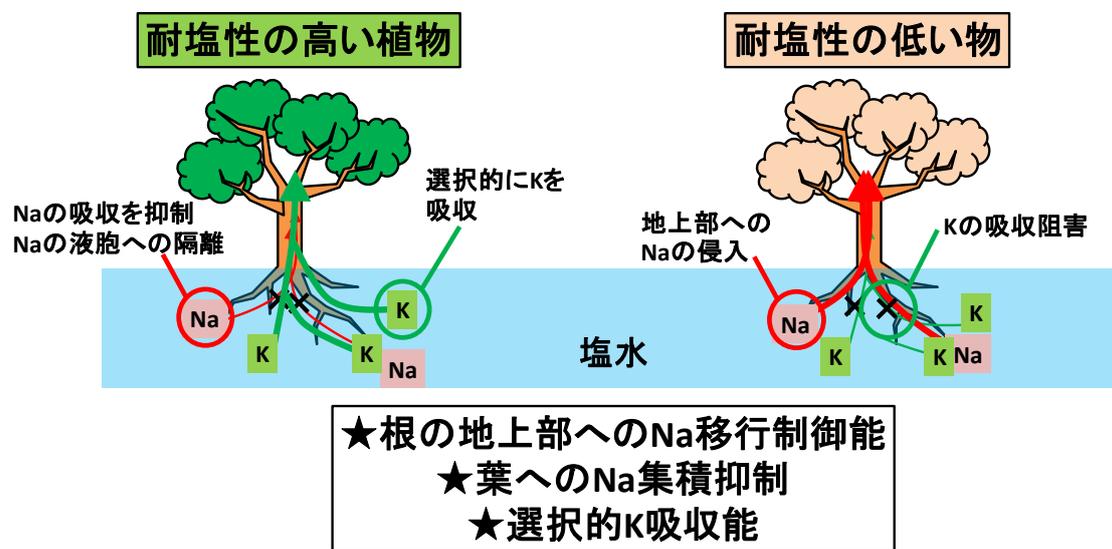


図 3.3.1 主な耐塩性のメカニズム
(但野 1987, Matsushita and Matoh 1991 を参考に作成)

植物の耐塩性の仕組みは主に、根の地上部への Na 移行制御能、葉への Na 集積抑制、選択的 K 吸収の 3 つである (但野, 1987 ; Matsushita and Matoh, 1991)。耐塩性の仕組みは塩生植物と非塩生植物で異なる。塩生植物と非塩生植物の耐塩性メカニズムの違いは表 3.3.2 のようになる。塩生植物、非塩生植物ともに、塩分を選択的に吸収する能力や地上部への輸送抑制、適応溶質の蓄積などの能力などの共通するメカニズムがあるが、それぞれ塩生植物の方がより高い能力を持つとされている (Parida and Das, 2005)。また、塩生植物に特有の耐塩性機構については塩毛や塩腺、古葉への Na の蓄積などが挙げられており、これらの器官は塩分を植物体内から除去することに特化している (日本土壤肥料学会, 1991)。

表 3.3.2 非塩性植物と塩性植物の耐塩性機構

非塩性植物 (Glycophyte)	塩性植物 (Halophyte)	参考文献 (Reference)
根にナトリウムの障壁を抑制する障壁があり、根の中で塩分をろ過する		高橋 (1991), ラルヘル (2004), Parida and Das (2005)
流入したナトリウムを根や茎や葉柄の部分にためて葉身への輸送を抑える		高橋 (1991), ラルヘル (2004), Parida and Das (2005)
地上部への上ったナトリウムを根へ再転流し、排出する		高橋 (1991)
細胞質には生理作用を営むのに邪魔にならない、カリウム、ショ糖、アミノ酸(プロペリン、ベタインなど)の濃度を高めて浸透圧をつくりだす(適応溶質)		高橋 (1991), ラルヘル (2004), 間藤 (1997), Parida and Das (2005)
	葉身に送られたナトリウムを、表皮細胞から分化した塩毛にたくわえ、塩毛組織の崩壊によって除去を行う	高橋 (1991), 甲山ら (2004), ラルヘル (2004), Ahmad <i>et al.</i> (2013)
	葉面に塩腺という特殊な組織を分化させ、光合成のエネルギーを使って、ナトリウムを体外に分泌する	高橋 (1991), 甲山ら (2004), ラルヘル (2004)
	葉肉細胞の液胞中にナトリウムをためこみ、重要な生理作用の営まれる細胞質から隔離するとともに、細胞の膨圧をつくりだす	高橋 (1991), 米山ら (2010), 間藤 (1997)
	古葉に集積して脱落	甲山ら (2004), ラルヘル (2004)
	揮発性メチルハロゲン化物として放出	ラルヘル (2004)
	NaイオンとClイオンとを篩管に再転流し、活発に蒸散している葉で蓄積する高濃度の塩分を、植物体全体に再転流することにより希釈する	ラルヘル (2004)
	カリウムによって浸透圧調整を行いナトリウムの吸収を抑える	間藤 (1997)

3.3.3 塩分ストレスが発芽と初期生長へ与える影響について

種子は水分を供給することで発芽する。発芽の過程における水の役割は種子内を膨潤させ細胞小器官や高分子物質の再活性化することと代謝活動の溶媒として働くことである(吉岡・清和, 2009)。一般的な種子の水分吸収過程はA相, B相, C相の3相に大別されている(中村, 1985; 鈴木, 2003)。図3.3.2はA相, B相, C相の吸水過程における種子の水分量の変化を模式的に示した図である。A相は吸水過程の始まりである。A相では受動的な吸水が活発に行われる。すなわち, 自然に水分が種子にしみこんでいく過程である。次の吸水過程はB相である。B相における吸水量はほぼ平衡状態にある。この給水量の平行状態は種子の内部と外部の水ポテンシャルが平行に達することによるものである(吉岡・清和, 2009)。B相では発芽が誘発されるために必要な代謝系が活性化している。C相は最後の過程である。C相における吸水は生長に先立って行われる吸水と幼芽, 幼根の活発な生長ともなう生長期の吸水である。種子はストレスの少ない条件であれば以上の吸水過程を経て発芽し生長を開始するが, 塩分ストレスによって吸水や発芽, 生長は阻害されてしまう(図3.3.3)。培地の塩分濃度が低く低レベルの塩分ストレスであれば種子は休眠するが, 高レベルの塩分ストレスにさらされると代謝のかく乱など生理的な悪影響があるといわれている(Yupsanis *et al.*, 1994; Khan and Rizvi, 1994; Dantas *et al.*, 2007; Gomes *et al.*, 2008)。その結果, 発芽率の低下や初期生長の阻害が起こる(Khan *et al.*, 2006; Kaveh *et al.*, 2011)。Ahmad *et al.* (2013)によると塩分ストレスにさらされている状況における種子の発芽率は図3.3.4, 初期生長におけるシュート生長率は図3.3.5のようになる。種子の発芽率は塩分ストレスの影響が中程度であれば発芽の遅れ, 塩分ストレスの影響が大きい場合はさらに発芽が遅れ, 発芽率も低下する(図3.3.5)。初期生長においては塩分ストレスの影響は2段階に分けられており, 1段階目が浸透圧ストレスで2段階目が代謝の阻害などの塩分特有ストレスとなっている。2段階目の影響については塩分ストレスに対する感受性によってことなるとされている。すなわち, 塩分ストレスに対する感受性が低く耐塩性が高い種は浸透圧ストレスによりシュートの生長率が低下するものの, 低い生長率を維持することができる。一方, 塩分ストレスに対する感受性が高く耐塩性の低い種は2段階目の塩分特有のストレスによってシュート生長率が低下してしまう。

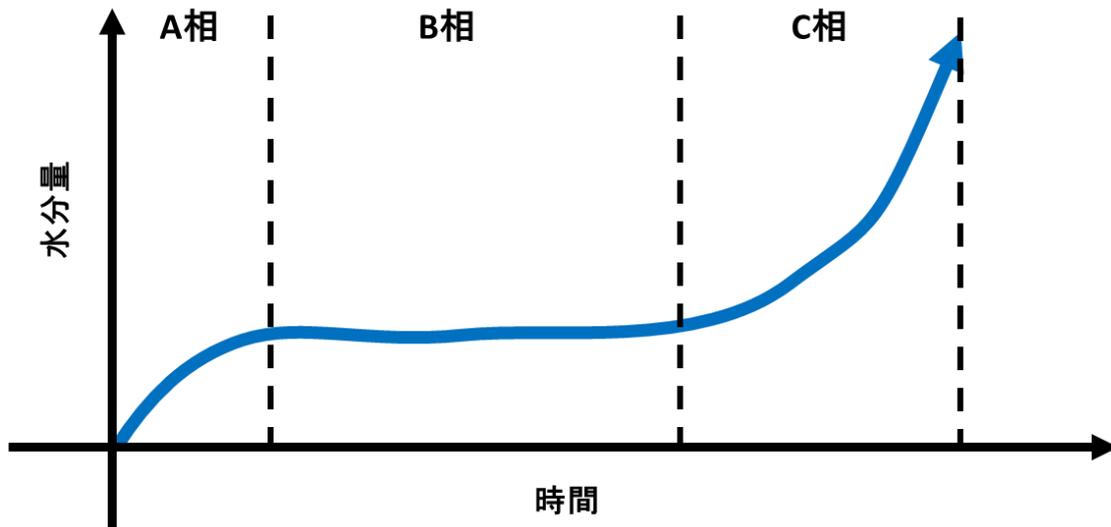


図 3.3.2 種子の吸水過程（鈴木, 2003 を一部改変）

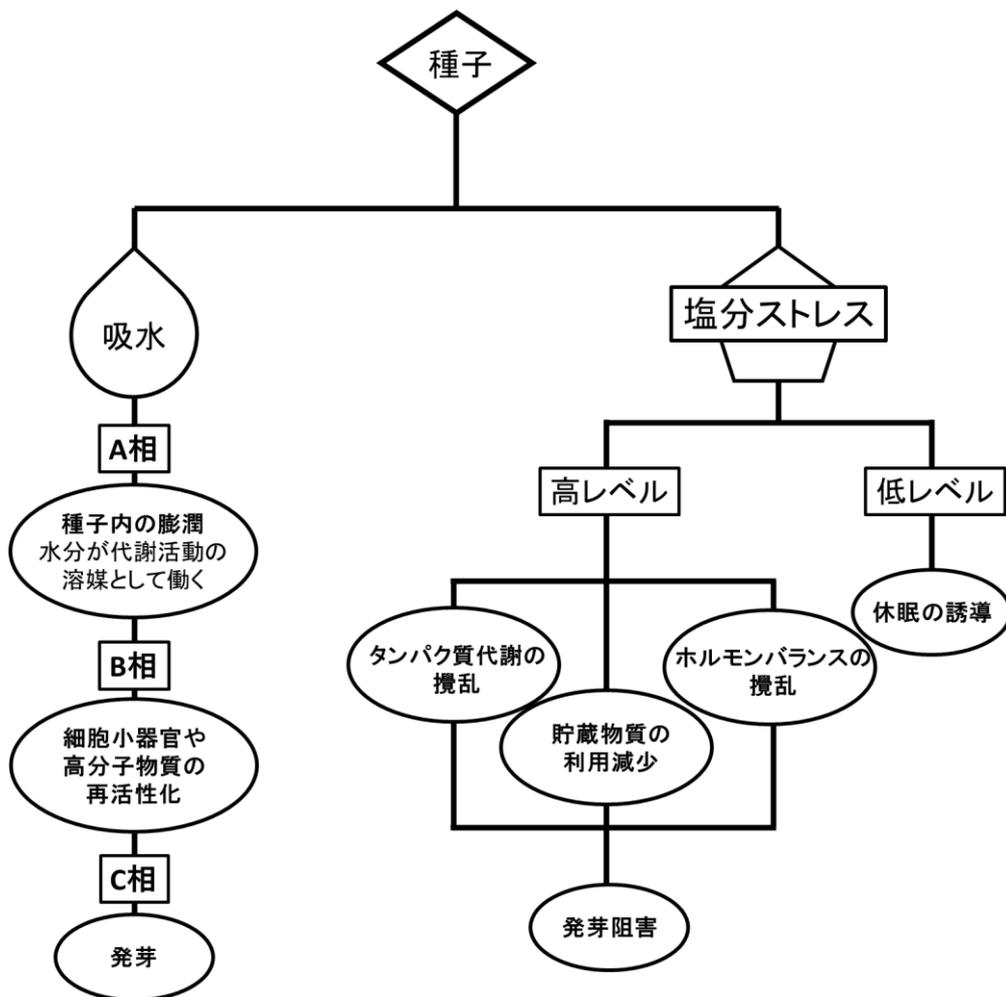


図 3.3.3 一般的な種子の吸水過程と塩分ストレスが種子へ与える影響

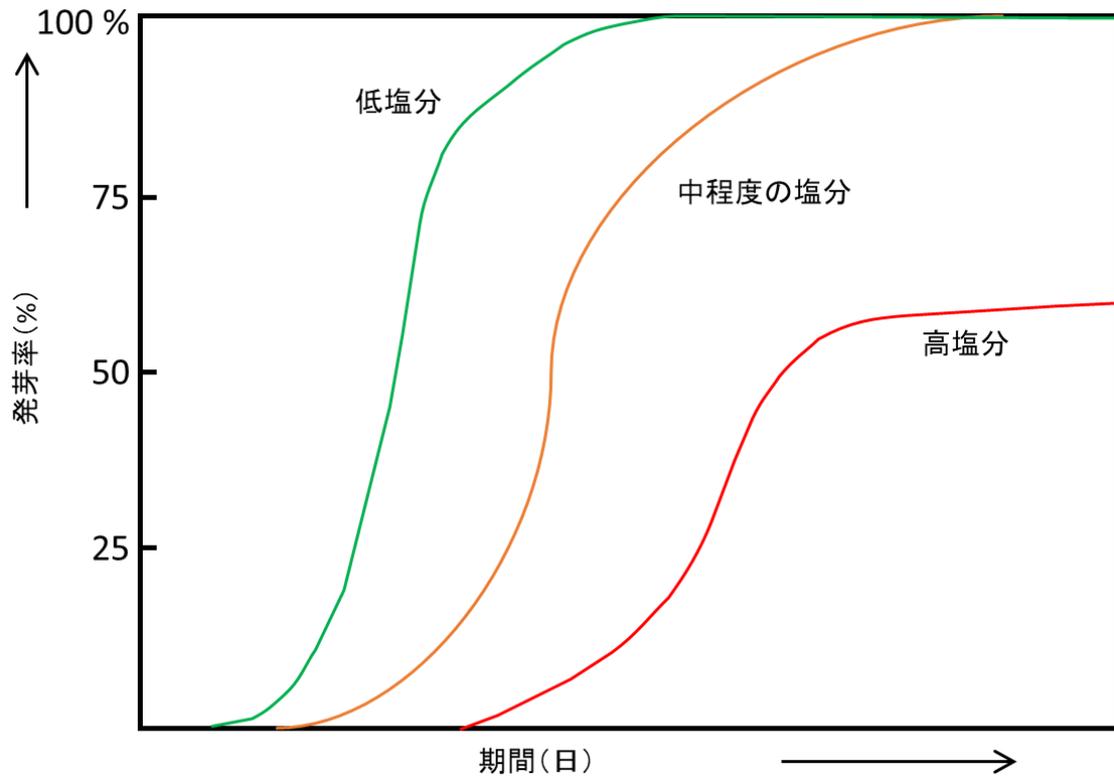


図 3.3.4 異なる塩分濃度における発芽率と置床後時間の関係
(Ahmad *et al.*, 2013 より作成)

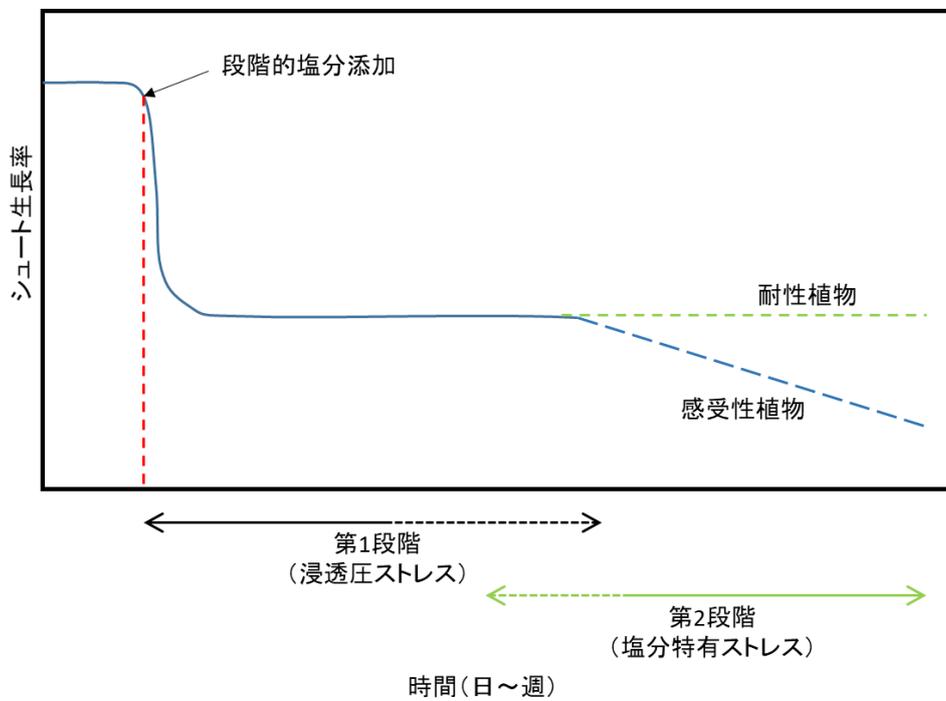


図 3.3.5 シュート生長率におよぼす塩分ストレスの影響
(Ahmad *et al.*, 2013 より作成)

また、海浜植物 30 を対象として種子を塩分濃度の異なる塩水によって 18～25 日間浸け、その後真水によって 18～25 日間培養する実験が過去に行われている (Woodell, 1985)。実験の結果、塩水による浸漬処理が実験中の発芽率の変化へ及ぼす影響は大きくタイプ 1～3 の 3 つに分けられると指摘している (図 3.3.6, 表 3.3.3)。浸漬した塩水の塩分濃度が高いほど真水における発芽率が低下する種をタイプ 1, 塩水中では発芽率が強く抑制されたが真水へ播種すると初めから真水へ播種した種子を同等の発芽率を示す種をタイプ 2, 塩水の塩分濃度が高いほど真水における発芽率が高くなった種をタイプ 3 としている。このように、短期間の塩水浸漬への処理は塩水から真水へ播種した後の発芽に影響し、種によって応答が異なることが確認されている。また、タイプ 3, タイプ 2, タイプ 1 の順に自然環境下における海水による冠水や塩水飛沫へ暴露される頻度が多い環境に生育している傾向があることが指摘されている。すなわち、短期的塩水浸漬に対する種子発芽の傾向の違いは生育環境と関係がある可能性が示唆されている。

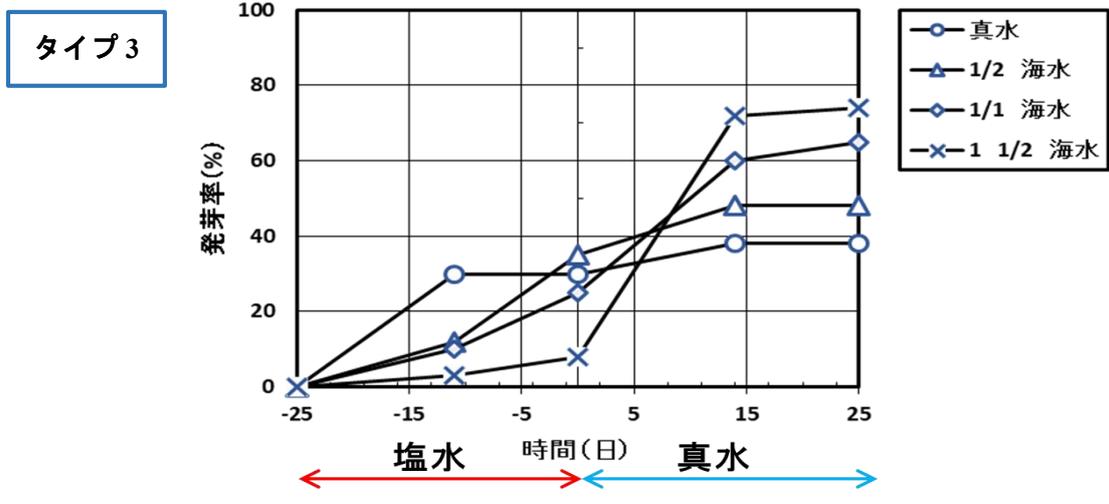
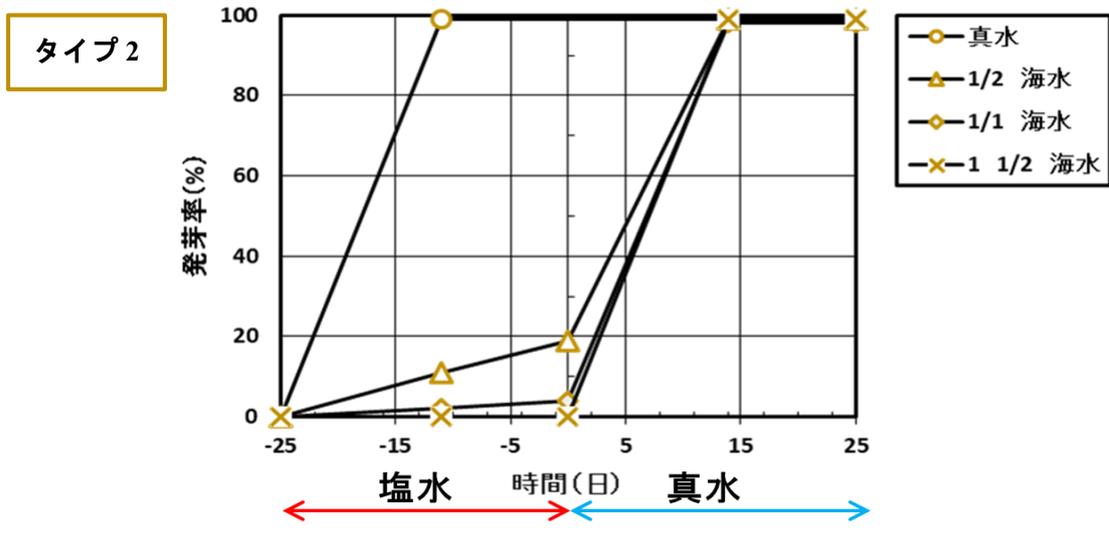
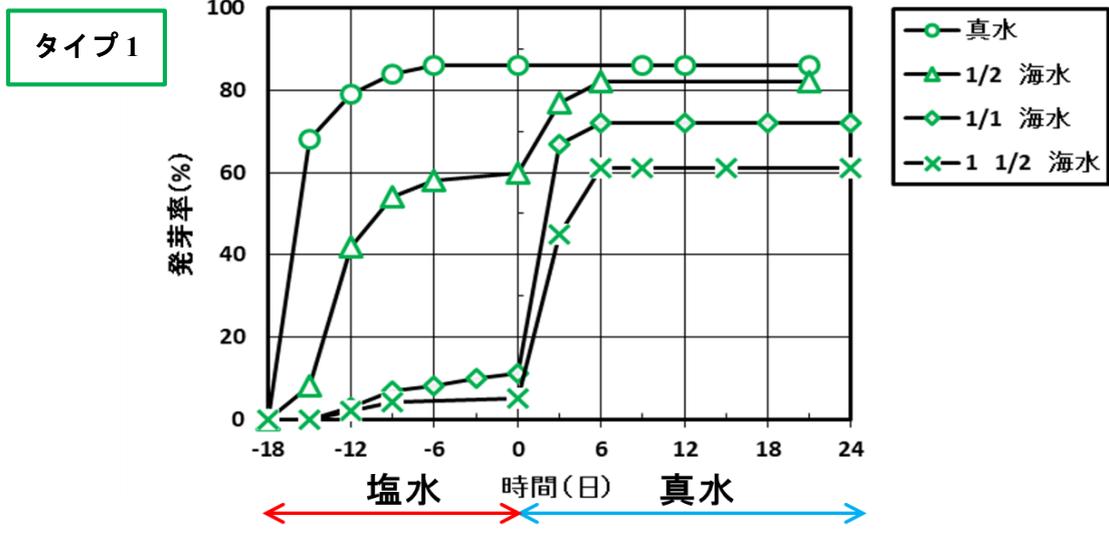


図 3.3.6 短期的塩水浸漬が真水浸漬後の発芽率へ及ぼす影響 (Woodell, 1985 より作成)

表 3.3.3 各タイプに分けられた種名と各試験区の発芽率
(Woodell, 1985 より作成)

種名	各試験区間の塩水における発芽率(%)				浸漬期間 (日)	各試験区間の蒸留水における発芽率(%)				浸漬期間 (日)	生育地
	0mM	300mM	600mM	900mM		0mM	300mM	600mM	900mM		
タイプ1											
<i>Ammophila arenaria</i>	8	0	0	0	18	10	4	2	4	20	砂丘
<i>Aster tripolium</i>	78	58	24	2	25	80	67	80	54	20	湿地
<i>Atriplex glabriuscula</i>	17	1	5	0	18	18	4	11	5	20	driftline
<i>A. laciniata</i>	19	4	0	0	25	25	18	21	11	40	driftline
<i>A. littoralis</i>	2	0	0	0	25	5	3	5	3	30	driftline
<i>Cakile maritima</i>	10	3	0	0	18	13	11	10	8	24	driftline
<i>Elymus arenarius</i>	7	5	0	0	25	11	4	6	2	40	砂丘
<i>E. farctus</i>	53	18	5	0	25	76	53	47	28	40	砂丘
<i>Lotus corniculatus</i>	19	1	0	0	20	23	11	9	6	30	砂丘
<i>Salsola kali</i>	86	62	12	0	18	88	82	72	61	20	driftline
<i>Suaeda maritima</i>	6	2	1	7	18	9	3	2	1	25	driftline
<i>Tripleurospermum maritimum</i>	53	1	0	0	18	68	60	66	27	20	driftline
タイプ2											
<i>Armeria maritima (dune)</i>	92	6	0	0	18	94	72	77	75	20	砂丘
<i>Armeria maritima (marsh)</i>	97	17	6	0	18	98	94	90	92	24	湿地
<i>Carex arenaria</i>	59	0	0	0	18	85	80	84	88	20	砂丘
<i>Centaurium erythraea</i>	96	4	0	0	20	97	91	95	91	25	砂丘
<i>Limonium binervosum</i>	99	19	4	0	18	99	99	98	99	20	砂利海岸
<i>Plantago coronopus</i>	83	0	0	0	18	93	83	91	90	20	砂利海岸
<i>P. maritima</i>	67	9	0	0	18	71	61	56	59	20	湿地
<i>Rumex crispus (seeds only)</i>	98	1	0	0	25	99	98	98	96	20	driftline
<i>Silene maritima</i>	91	4	0	0	18	92	83	87	84	20	砂利海岸
タイプ3											
<i>Crambe maritima</i>											
種子のみ	9	0	0	0	25	14	14	21	23	35	driftline
果実含む	10	0	0	0	25	4	1	3	6	35	driftline
<i>Honkenya peploides</i>	1	0	0	0	18	4	1	3	6	24	driftline
<i>Juncus maritimus</i>	84	27	1	0	18	84	29	47	74	20	湿地
<i>Limonium bellidifolium</i>	49	5	5	2	25	50	97	99	94	25	湿地/砂利
<i>L. bellidifolium</i>	23	23	10	7	25	23	32	25	34	25	湿地/砂利
<i>L. humile</i>	21	19	1	1	25	33	51	62	53	25	湿地
<i>L. vulgare</i>											
Missel Marsh	31	6	3	6	20	55	39	47	53	20	湿地
Upper Hut Marsh	30	35	3	1	25	38	63	65	74	20	湿地
Plantago Marsh	18	12	10	0	25	22	38	69	67	20	湿地
Upper Plover Marsh	24	18	6	0	25	31	54	61	62	25	湿地
<i>Rumex crispus ft.</i>	77	0	0	0	25	79	93	93	92	25	driftline
<i>Suaeda vera</i>	7	2	1	0	20	11	8	23	23	100	湿地
<i>Triglochin maritima</i>	5	2	0	0	18	7	7	11	11	20	湿地

3.3.4 日本国内における耐塩生に関する研究小史

表 3.3.4～表 3.3.7 に 1950 年から現在に至るまでの日本国内における耐塩性の研究を示す。また、図 3.3.1 に 1950 年から現在に至るまでの耐塩生研究のテーマ傾向を示す。対象とした学術雑誌は日本土壌肥料学雑誌，日本砂丘学会誌，海岸林学会誌，日本森林学会誌とその前身である日本林學會誌，園芸学研究とその前身である園芸学会雑誌，日本緑化工学会誌とその前身である緑化工技術，熱帯農業研究とその前身である熱帯農業である。

1950 年代，国内における耐塩性に関する研究は作物を対象としたものがほとんどであった。1951 年に集計された全国の沿岸地域における塩害地の面積は約 1500 町歩（約 15km²）となっており，海水が種々の原因によって畑地土壌に侵入したことによるものとされている（今津・大沢，1954）。また，人口増加に伴い新たな農地が求められ，その結果沿岸域に造成された干拓地において塩害が発生（下瀬，1958）しており，そういった背景から作物を対象とした研究が行われた。また，1957 年頃からビニールハウスが普及し，施設土壌で塩類集積が問題になっていたという報告もある（日本土壌肥料学会，1991）。

1960 年代においても 1950 年代と同様の背景から作物を対象とした耐塩性の研究が盛んにおこなわれた。作物以外を対象とした研究として，日本砂丘学会誌において海岸砂防林への導入検討のためにマサキを対象とした研究（大神・長沢，1967）があった。

1970 年代には静岡県海岸近くの施設園芸地帯においてかん水用井戸水へ海水が混入することにより作物へ悪影響を及ぼしたことから，キクやカーネーション，バラなどの園芸種を対象とした研究が行われている（石田ら，1978；石田ら，1979-a；石田ら，1979-b）。また，熱帯農業より乾燥地および半乾燥地における塩分濃度の高い地下水を用いた農業による塩害を背景として，アルファルファや大麦を対象とした研究がなされている（上田・西川，1970；菅沼，1978）。

1980 年代から 1990 年代においても農作物を対象とした研究が多い傾向にあるが，1980 年代では乾燥地の飼料作物である *Atriplex nummularia* を対象とした研究が内山や杉本らによって行われた（内山，1981；内山，1985-a；内山，1985-b；内山，1985-c；内山，1985-d；内山，1986-a；内山，1986-b；内山，1986-c；内山，1988；杉本ら，1988）（表 3.3.5，表 3.3.6）。

2000 年代では，国内や乾燥地の作物を対象とした研究に加えナシ属などの果樹を対象としたものや，乾燥地に生育する植物を対象とした耐塩性の研究が行われていた（表 3.3.6）。

2010 年代では，東北地方太平洋沖地震以降に津波に伴う塩害を背景として作物や樹木を対象とした研究が盛んである（表 3.3.7）。

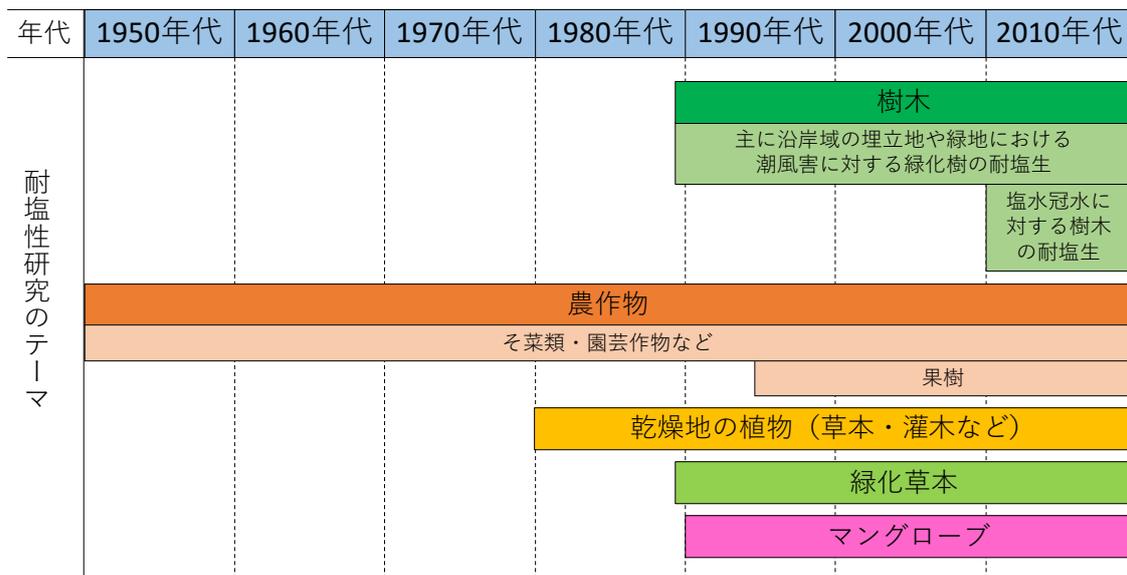


図 3.3.7 1950 年以降の日本国内における 7 種の学会誌を対象とした耐塩生研究 190 報のテーマ傾向

3.3.5 種子の耐塩性に関する日本国外の研究の動向

表 3.3.7 に種子の耐塩性に関する日本国外の研究の動向を示す。日本国外における種子の耐塩性に関する研究は、1850 年代に始まったと思われる。1855 年に Darwin (1855) は穀物や野菜などの種子を海水へ浸け、どれだけ長く植物の種子は海水への浸漬に耐えることができるか、そしてなおも生命力を維持できるかについて実験した結果について論文を執筆している。Darwin の実験は植物の分布拡大、海流による種子散布について考察することを目的として行ったものである。また、こういった種子を海水へ浸漬させる実験について Darwin は 1855 年の論文内で「私の知る限り、植物学者によって試みられたことがない」と述べている。1950 年代から作物や乾燥地・塩性湿地の塩生植物の生態解明に焦点を当てた研究が中心に行われ、1978 年に UNGAR (1978) が塩性植物の種子発芽についてそれまでの研究成果をまとめたレビューを作成している。1985 年に Woodell (1985) が塩水浸漬後 (18-25 日)、淡水へ浸漬させる実験を海浜性の植物 30 種を対象として行った。Woodell の実験は沿岸域に生育する異なる種の発芽反応の違いを識別し、種の生育地の違いとの関係に関する考察を行うことを目的とした実験である。その後、Woodell が行った実験の様に、種子を一時的に塩水へ浸漬させた後に淡水へ浸漬させる実験が行われるようになった。現在までに Ramagopal (1990), Khan and Ungar (1997), Tobe *et al.* (2000), Tobe *et al.* (2001), Podda *et al.* (2017) によって穀物、作物、乾燥地の植物を中心に一時的な塩ストレスを再現した研究が行われている。

表 3.3.5 わが国における耐塩性に関する研究史 (1950~1980 年代)

発行年	論文/書名	著者名	雑誌名	巻(号) Vol.(No.)	始頁 終頁
1950年代	1954 数種蔬菜の生育に関する研究	今津 正・大沢 孝也	園芸学会雑誌	22(4)	197-202
	1958 干拓地における作物の生理化学的研究(第4報):新干拓地土壤に生育した水稻の無機成分吸収について	下瀬 昇	日本土壤肥料学雑誌	29(11)	477-479
	1958 作物に対する塩素の生理作用(第4報):水稻生育に及ぼす過剰塩化塩と硫酸塩との影響についての比較	下瀬 昇	日本土壤肥料学雑誌	29(4)	158-162
	1960 砂耕による蔬菜の耐塩性に関する研究(第1報) 葉菜類について	大沢 孝也	園芸学会雑誌	29(4)	294-304
1961 砂耕による蔬菜の耐塩性に関する研究(第4報) 特に無機栄養より見た蔬菜の相対的耐塩性と塩害について	大沢 孝也	園芸学会雑誌	30(3)	241-252	
1961 砂耕による蔬菜の耐塩性に関する研究(第2報) 葉菜類について	大沢 孝也	園芸学会雑誌	30(1)	48-56	
1961 砂耕による蔬菜の耐塩性に関する研究(第3報) 根菜類について	大沢 孝也	園芸学会雑誌	30(2)	161-166	
1962 蔬菜の塩害と窒素供給形態ならびにカルシウム栄養の関係	大沢 孝也	園芸学会雑誌	31(3)	227-234	
1962 蔬菜の塩害と窒素供給形態の関係(第1報)	大沢 孝也	園芸学会雑誌	31(1)	53-63	
1962 蔬菜の塩害と窒素供給形態の関係(第2報)	大沢 孝也	園芸学会雑誌	31(2)	157-167	
1960年代	1963 作物の塩害生理に関する研究(第3報):イグサの耐塩性について	下瀬 昇	日本土壤肥料学雑誌	34(5)	147-149
	1963 作物の塩害生理に関する研究(第1報):塩化ナトリウム、硫酸ナトリウムの等浸透圧溶液が水稻生育および無機成分吸収におよぼす影響	下瀬 昇	日本土壤肥料学雑誌	34(4)	107-110
	1964 作物の塩害生理に関する研究(第4報):トマトとタニコの耐塩性について	下瀬 昇	日本土壤肥料学雑誌	35(4)	143-147
	1966 数種蔬菜の生育段階と耐塩性	大沢 孝也	園芸学会雑誌	35(3)	291-296
	1966 メロンの養分吸収に関する研究(第6報)	増井 正夫・水田 士華毅	園芸学会雑誌	35(2)	127-133
	1967 海岸砂防樹種としてのマサキの試用について(第IV報) マサキの耐塩性	大神 又三・長沢 喬	日本砂丘学会誌	14(1)	
	1968 作物の塩害生理に関する研究(第6報):トウモロコシ、ルーサン、イタリアンライグラスの耐塩性について	下瀬 昇	日本土壤肥料学雑誌	39(12)	554-557
	1968 作物の塩害生理に関する研究(第7報):タマネギ、セルリー、ホウレン草、キウリ、インゲン豆の耐塩性について	下瀬 昇	日本土壤肥料学雑誌	39(12)	548-553
	1969 作物に対する塩類の濃度障害に関する基礎的研究(第1報):単一塩類溶液におけるキュウリ根の活性の変化について	嶋田 典司	日本土壤肥料学雑誌	40(1)	26-31
	1970 被覆下栽培における肥培の研究(第1報) 菜類の塩類高濃度障害について	位田 藤久太郎	園芸学会雑誌	39(3)	251-255
	1970 作物に対する塩類の濃度障害に関する基礎的研究(第3報):塩類処理による作物根の二・三のレスポンスについて	嶋田 典司	日本土壤肥料学雑誌	41(4)	162-166
	1970 塩水灌漑がアルファルファ組織の形態に及ぼす影響	上田 義夫・西川 五郎	熱帯農業	13(4)	211-214
	1971 被覆下栽培における肥培の研究(第2報) 菜類の塩類高濃度障害について	位田 藤久太郎	園芸学会雑誌	40(2)	121-127
	1971 水稻の耐塩性と窒素ならびに珪酸肥料との関係	青木 正剛・石川 春彦	日本土壤肥料学雑誌	42(4)	167-170
1974 高濃度肥料溶液が作物の発芽および根の伸びにおよぼす影響(第1報):各種肥料溶液における作物の発芽および根の伸びについて	田中 房江・藤沼 善亮	日本土壤肥料学雑誌	45(12)	582-587	
1974 第5部門 植物の無機栄養および養分吸収	尾形 昭彦	日本土壤肥料学雑誌	45(3)	108-116	
1970年代	1975 植物の栄養特性	高橋 英一	日本土壤肥料学雑誌	46(9)	407-417
	1976 植物の耐塩性について(3) サウキビの場合	幸喜 善福	日本砂丘学会誌	23(1)	
	1977 エダマメの耐塩性	鎌谷 明ら	園芸学会雑誌	46(1)	18-25
	1977 希釈海水かんがい下でのシュガービートの耐塩性(英文)	E.R.R.アイエンガ・J.B.バンデア	日本砂丘学会誌	24(1)	421-424
	1978 キウの耐塩性	石田 明ら	園芸学会雑誌	47(3)	41-42
	1978 作物による二価陽イオンの吸収ならびに移行に対する高濃度の塩化ナトリウムおよび塩化カリウムの影響(第1報):水耕栽培実験	河崎 利夫・森次 益三	日本土壤肥料学雑誌	49(1)	46-52
	1978 塩水かんがいが大麦の生育に及ぼす影響	菅沼 浩敏	熱帯農業	21(2)	114-120
	1979 砂耕及び土耕栽培におけるカーネーションの耐塩性	石田 明ら	園芸学会雑誌	48(3)	322-326
	1979 砂耕及び土耕栽培におけるバラの耐塩性	石田 明ら	園芸学会雑誌	47(4)	517-523
	1979 トマトの耐塩性	鎌谷 明ら	園芸学会雑誌	48(1)	73-81
	1980 異なる培地におけるメロンの耐塩性	鎌谷 明ら	園芸学会雑誌	49(3)	354-360
	1980 砂耕と養液耕におけるメロンの耐塩性	鎌谷 明ら	園芸学会雑誌	49(1)	93-101
	1980 異なる塩類土壌におけるメロンの耐塩性	鎌谷 明ら	園芸学会雑誌	48(4)	468-474
	1981 砂耕におけるエダマメの耐塩性と硫酸カルシウム施用との関係	鎌谷 明ら	園芸学会雑誌	50(3)	326-331
1982 各種塩類が土耕におけるエダマメの耐塩性に及ぼす影響	鎌谷 明ら	園芸学会雑誌	51(1)	62-69	
1982 各種塩類が砂耕におけるエダマメの耐塩性に及ぼす影響	鎌谷 明ら	園芸学会雑誌	50(4)	487-496	
1982 深埋立地地帯に形成された塩類集積地の土壌と植生:東京湾東部の深埋立地地の土壌(第2報)	岡崎 正規ら	日本土壤肥料学雑誌	53(4)	283-290	
1983 希釈した海水が異なる生育段階のメロンの耐塩性に及ぼす影響	鎌谷 明ら	園芸学会雑誌	52(3)	286-293	
1983 各種塩類が養液耕におけるメロンの耐塩性に及ぼす影響	鎌谷 明ら	園芸学会雑誌	52(2)	167-173	
1983 水稻における塩化ナトリウム高濃度処理による生育障害の軽減に対するカルシウムイオンの効果	山内 益夫ら	日本土壤肥料学雑誌	54(6)	499-504	
1984 養液耕における異なる生育段階の海水希釈液処理がメロンの耐塩性に及ぼす影響	鎌谷 明ら	園芸学会雑誌	53(2)	168-175	
1984 各種塩類が土耕におけるメロンの耐塩性に及ぼす影響	鎌谷 明ら	園芸学会雑誌	52(4)	420-428	
1984 キュウリ・トウモロコシ・ホウレンソウによるカチオン吸収の生育時期別変化と塩分抵抗性との関係	森下 豊昭ら	日本土壤肥料学雑誌	55(3)	263-268	
1985 <i>Atriplex nummularia</i> の耐塩性に関する研究 第4報 培養液の窒素濃度レベルと耐塩性	内山 泰孝	熱帯農業	29(3)	151-156	
1985 <i>Atriplex nummularia</i> の耐塩性に関する研究 第3報 培養液の三要素濃度レベルと耐塩性	内山 泰孝	熱帯農業	29(3)	146-150	
1985 <i>Atriplex nummularia</i> の耐塩性に関する研究 第2報 異なる温度条件下で生育する <i>Atriplex nummularia</i> の耐塩性について	内山 泰孝	熱帯農業	29(2)	98-103	
1985 <i>Atriplex nummularia</i> の耐塩性に関する研究 第1報 高塩濃度条件下における生育量	内山 泰孝	熱帯農業	29(2)	92-97	
1985 オウライ、ハウサイ、ナタネの耐塩性	下瀬 昇・黒坂 啓介	熱帯農業	29(4)	203-207	
1985 カブ、レタス、ニンジンおよびピーマンの耐塩性	下瀬 昇・黒坂 啓介	熱帯農業	29(4)	208-212	
1980年代	1986 <i>Atriplex nummularia</i> の発芽および苗立ちと塩分環境 第1報 発芽および苗立ちに及ぼすNaCl濃度および温度の影響	内山 泰孝	熱帯農業	30(2)	94-99
	1986 <i>Atriplex nummularia</i> の発芽および苗立ちと塩分環境 第II報 異なる塩分条件下で生産された種子の発芽時の耐塩性	内山 泰孝	熱帯農業	30(2)	100-104
	1986 <i>Atriplex nummularia</i> の耐塩性に関する研究 第5報 培地の塩濃度と飼料成分生産量との関係	内山 泰孝	熱帯農業	30(1)	6-11
	1986 シュンギク、カリフラワー及びトマトの耐塩性	下瀬 昇・竹中 史人	熱帯農業	30(1)	1-5
	1987 数種類の台木におけるリンゴ樹の耐塩性の比較	本杉 日野ら	園芸学会雑誌	56(2)	135-141
	1987 耐塩性の品質間差とナトリウムの吸収・移行特性との関係(1):イネ	山内 益夫ら	日本土壤肥料学雑誌	58(5)	591-594
	1987 オオムギ根中のNaClストレス関連ペプチド	竹林 伸夫ら	日本土壤肥料学雑誌	58(6)	696-701
	1987 アツケシソウ、イグサ及びセイタカアワダチソウの耐塩性	下瀬 昇ら	熱帯農業	31(3)	179-184
	1987 イネの耐塩性機構に関する研究	前川 寛之ら	熱帯農業	31(2)	92-98
	1988 熱帯乾燥地のアカザ科植物 <i>Atriplex nummularia</i> の耐塩性に関する研究	内山 泰孝	熱帯農業	32(3)	195-196
	1988 Sahbush, ハマアカザ属植物の生育に関する研究 第2報 砂土耕の <i>Atriplex nummularia</i> の収量に及ぼす各種塩水濃度の影響	杉本 勝男ら	熱帯農業	32(3)	129-139
	1988 オオミトケイソウ及びキイロクダモノトケイソウの幼木の生長及び塩害積に及ぼすNaClの影響	宇都宮 直樹・重永 昌二	熱帯農業	32(3)	147-153
	1988 塩水灌漑がアルファルファの生育、飼料成分組成並びに養分収量に及ぼす影響	香川 邦雄ら	熱帯農業	32(4)	215-222
	1989 ソナレンシ <i>Sporobolus virginicus</i> (L.) Kunt の耐塩性とその塩回避機能	白田 和ら	日本土壤肥料学雑誌	60(3)	220-225
1989 アズキにおける耐塩性の品種間差の発現機構	山内 益夫ら	日本土壤肥料学雑誌	60(4)	325-334	
1989 ダイズにおける耐塩性の品種間差の発現機構	山内 益夫ら	日本土壤肥料学雑誌	60(5)	437-444	
1989 高等植物のナトリウム栄養	間藤 徹	日本土壤肥料学雑誌	60(3)	187-188	
1989 イネにおける耐塩性の品種間差の発現機構	山内 益夫	日本土壤肥料学雑誌	60(3)	210-219	
1989 第5部門:植物の無機栄養および養分吸収	但野 利秋ら	日本土壤肥料学雑誌	60(6)	526-539	
1989 臨海部緑地における気象環境と樹木葉面の塩分付着量について	五十嵐 鉄朗・鍛冶 清	日本緑化学会誌	15(4)	36-42	
1989 砂漠緑化研究の推進に向けて	村井 宏	日本緑化学会誌	15(1)	24-28	

表 3.3.6 わが国における耐塩性に関する研究史 (1990~2000 年代)

発行年	論文・書名	著者名	雑誌名	巻(号) Vol.(No.)	始頁- 終頁
1990	ウリ科作物における各種無機要素の吸収・移行に及ぼす塩化ナトリウム添加の影響	山内益夫ら	日本土壌肥科学雑誌	61(1)	1-7
1990	テンサイ、イネ、ダイズ、アズキとインゲンにおける各種無機要素の吸収・移行に及ぼす塩化ナトリウム添加の影響	山内益夫ら	日本土壌肥科学雑誌	61(2)	173-176
1990	水辺の緑化に関する実験的研究 ヨシ、ガマ、オギの発芽特性について	高橋 新平・近藤 三雄	日本緑化工学会誌	16(3)	31-38
1990	マンゴビーン耐塩性品種のスクリーニング	アシュラフ Mら	熱帯農業	34(3)	169-175
1990	アッケンソウの耐塩性に関する研究	上田 堯夫・志水 勝好	熱帯農業	34(3)	163-168
1991	水耕ミトマトの果実品質および収量に及ぼす培養液濃度と塩類処理の影響	太田 勝巳ら	園芸学会雑誌	60(1)	89-95
1991	ハゲイトウ、ヨモギ、ナス、およびシシンの耐塩性	下瀬 昇ら	熱帯農業	35(1)	16-19
1992	ヨシ地上部からのNaイオンの排除に関するヨシ茎基部の機能: Soil Science and Plant Nutrition掲載論文要旨Vol.38.No.3(1992年9月)	松下 信利・間藤 徹	日本土壌肥科学雑誌	63(6)	737-
1992	寒冷地水稲のナトリウムの吸収と登熟との関係	清野 馨ら	日本土壌肥科学雑誌	63(1)	25-30
1992	乾燥地の自然と緑化 (I) アラブ首長国連邦とカタールの植物	山本 福壽・吉川 賢	日本緑化工学会誌	18(4)	227-235
1993	砂土におけるグレイソルガムの塩化栽培 (IV) 耐塩性の品種間差異	山根 昌勝	日本砂丘学会誌	40(2)	
1993	第5部門: 植物の無機栄養および養分吸収	森 敏ら	日本土壌肥科学雑誌	64(5)	527-537
1993	アラブ首長国連邦における主要な砂漠緑化樹種の発芽および初期生育におよぼすNaClの影響	吉崎 真司・横田 博英	日本緑化工学会誌	19(2)	91-102
1993	塩生植物の生育基盤構造に関する研究	半田 真理子ら	日本緑化工学会誌	19(4)	267-274
1993	乾燥地の自然と緑化 (II) アラブ首長国連邦とカタールのマングローブ	吉川 賢・山本 福壽	日本緑化工学会誌	19(1)	21-26
1993	耐塩性の簡易検定法	スカーリン ビモラットら	熱帯農業	37(1)	42-45
1993	異なる生育段階における六倍体ライコムギの耐塩性	コリム モハマッド アブドゥルら	熱帯農業	37(4)	298-304
1994	中性植物の耐塩性 (1)	山内益夫	日本砂丘学会誌	41(1)	
1994	中性植物の耐塩性 (2)	山内益夫	日本砂丘学会誌	41(2)	
1994	マサ土壤における乾燥地条件下での水・塩類の動態とオオムギの要素吸収について	季 品芳ら	日本砂丘学会誌	41(2)	
1994	各種作物におけるカチオンの吸収に及ぼす高濃度ナトリウム塩添加の影響	山内益夫ら	日本土壌肥科学雑誌	65(2)	164-157
1994	乾燥地の自然と緑化 (III) クウェートの自然と植物	吉川 賢・山本 福壽	日本緑化工学会誌	20(2)	111-115
1994	塩分濃度に対する六倍体ライコムギ、コムギ、ライムギおよびオオムギの干実収量の反応	コリム モハマッドアブドゥルら	熱帯農業	38(1)	16-25
1994	高温条件下におけるイチシク樹の生育に及ぼすNaClの影響	大久保 昌幸・宇都宮 直樹	熱帯農業	38(4)	305-313
1994	塩水処理下でのアッケンソウ (<i>Salicornia herbacea</i> L.) の生育に及ぼすK及びCaの影響	志水 勝好ら	熱帯農業	38(1)	8-15
1994	アッケンソウの二形性及び発芽に影響を及ぼす要因	志水 勝好・上田 堯夫	熱帯農業	38(3)	181-186
1995	中性植物の耐塩性 (3)	山内益夫	日本砂丘学会誌	42(1)	
1995	中性植物の耐塩性 (4)	山内益夫	日本砂丘学会誌	42(2)	
1995	ダイズとイネにおけるカリウム、カルシウム、マグネシウムの吸収・移行に及ぼす塩化ナトリウム添加効果の比較	山内益夫ら	日本土壌肥科学雑誌	66(1)	32-38
1995	乾燥地の自然と緑化 (VI) サウジアラビアの農業、緑化および自然保護	山本 福壽・吉川 賢	日本緑化工学会誌	21(1)	29-33
1996	アスバラガス、テールビートおよびウラギクウの発芽および栄養生長における耐塩性の評価	宇野 雄一ら	園芸学会雑誌	65(3)	579-585
1996	イネおよびオオムギにおける耐塩性機構の差異	中村 卓司ら	日本土壌肥科学雑誌	67(4)	459-
1996	土壌中の高濃度ナトリウム塩および塩化物がキュウリの生育と無機成分の吸収に及ぼす影響	松丸 恒夫	日本土壌肥科学雑誌	67(4)	377-383
1996	アッケンソウの植物体地上部における塩の移動及び排出	志水 勝好・上田 堯夫	熱帯農業	40(1)	20-25
1997	インゲン (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) における耐塩性およびカチオンの吸収・移行に及ぼすナトリウムの影響の品種間差	山内益夫ら	園芸学会雑誌	65(4)	737-745
1997	スイカにおける耐塩性の品種および系統間差	藤井 信一郎ら	日本砂丘学会誌	44(1)	
1997	キョウチクトウ (<i>Nerium oleander</i> L.) の耐塩性における窒素源としてのアンモニア態および硝酸態の役割	アブドゥルザデー アーマッドら	日本緑化工学会誌	23(4)	237-248
1997	塩類が <i>Lolium multiflorum</i> , <i>L. perenne</i> および <i>Festuca arundinacea</i> の成長およびイオン含有率におよぼす影響	アブドゥルザデー アーマッドら	日本緑化工学会誌	23(3)	161-169
1997	塩水処理栽培がアッケンソウの茎葉及び種子の化学成分組成に及ぼす影響	志水 勝好ら	熱帯農業	41(1)	1-6
1998	NaCl ストレス下におけるペニバナ、クリサンセム、ハルドーサム、ウラギクのイオン吸収、適合溶質の蓄積および浸透ポテンシャル	松村 智広ら	園芸学会雑誌	67(3)	426-431
1998	NaCl ストレス下におけるキク科花き植物の種子発芽および初期生育	松村 智広ら	園芸学会雑誌	67(4)	626-631
1998	アラブ首長国連邦の農耕地における土壌塩類集積とアルファルファの無機成分含有量に及ぼす灌漑水質の影響	切岩 祥和ら	日本土壌肥科学雑誌	69(4)	348-354
1998	養分窒素源の違いが塩類ストレス条件下におけるキョウチクトウ (<i>Nerium oleander</i> L.) の炭素化合物配分と窒素同化におよぼす影響	アブドゥルザデー アーマッドら	日本緑化工学会誌	24(1)	22-29
1999	植物の無機栄養 (第4部門 植物栄養)	間藤 徹	日本土壌肥科学雑誌	70(5)	647-652
1999	イネ品種における土壌高塩分に対する反応の生育にともなう変化	横原 大悟ら	熱帯農業	43(4)	285-294
1999	塩処理による活性酸素の誘導と消去活性における耐塩性の異なるイネ2品種間の差異	沈 利星ら	熱帯農業	43(1)	32-41
2000	パキスタン、マルダン地域の塩類土壌におけるいくつかの <i>Atriplex</i> と <i>Maireana</i> 種の生育	Muhammad IRSHADら	熱帯農業	44(4)	245-251
2000	塩水処理濃度を異にした条件下におけるアッケンソウの生育と化学成分変化—ローズグラスおよびアルファルファとの比較—	志水 勝好	熱帯農業	44(1)	146-146
2001	種差地型収量における発芽時および生育ステージ別の耐塩性差異	前田 良之ら	日本緑化工学会誌	23(3)	499-506
2001	アッケンソウ (<i>Salicornia herbacea</i> L.) の耐塩性および利用に関する研究	志水 勝好	熱帯農業	45(5)	379-381
2001	塩ストレス下におけるダイズの光合成に及ぼす非気孔的要素の影響	梅澤 泰史ら	熱帯農業	45(1)	57-63
2002	NaClの施用条件がキャベツセル成型苗の苗質に及ぼす影響	藤原 隆広ら	園芸学会雑誌	1(3)	169-173
2002	NaCl 施用によるキャベツセル成型苗の徒長抑制・順化効果	藤原 隆広ら	園芸学会雑誌	71(6)	796-804
2002	耐塩性の異なる植物における塩ストレス下でのCa ²⁺ の動き	海野洋輝ら	日本土壌肥科学雑誌	73(6)	715-718
2002	植物の無機栄養 (第4部門 植物栄養)	間藤 徹	日本土壌肥科学雑誌	73	646-652
2002	オオムギとソルガムの乾物生産に対する灌漑水NaCl濃度と土壌水分の影響	角 明夫ら	熱帯農業	46(3)	175-182
2003	培養液中NaCl濃度がビートハッグ栽培イチゴの生育、収量と品質に及ぼす影響	吉田 裕一ら	園芸学会研究	2(3)	171-174
2003	NaCl処理がカラチヤ幼齢実生樹のNaおよびClプロリンベタイン含量ならびに根の細胞壁の変化に及ぼす影響	崔 世茂ら	園芸学会雑誌	72(1)	49-55
2003	塩水灌漑下の砂質土壌におけるギンドロの成長及び土壌水分・塩分動態について	劉 洪慶ら	日本砂丘学会誌	49(3)	
2003	ダイズとキュウリのNaClおよびCaCl ₂ に対する反応の違い	逢布希拉因 逢布希拉因 池田 元輝	日本土壌肥科学雑誌	74(4)	459-465
2004	アイスプラントを用いた土壌脱塩技術の可能性	東江 栄	熱帯農業	48(5)	294-298
2005	植物の栄養生態 (第4部門 植物栄養)	関本 均	日本土壌肥科学雑誌	76	744-748
2005	生長・乾物生産からみた野生種 <i>Oryza latifolia</i> Desv. の耐塩性	仲村 一郎ら	熱帯農業	49(1)	70-76
2005	塩ストレス下における個葉の光合成特性からみた野生種 <i>O. latifolia</i> Desv. の耐塩性	仲村 一郎ら	熱帯農業	49(1)	77-83
2005	リョクトウ (<i>Vigna radiata</i> Wiczek L.) の耐塩性に及ぼす窒素肥料の影響	カビール エマルら	熱帯農業	49(2)	119-125
2006	ナン属植物の耐塩性は根から葉への Na および Cl イオンの転流量と関係がある	松本 和浩ら	園芸学会雑誌	75(5)	385-391
2006	地中海沿岸部原産のナン台木種 <i>P. amygdaliformis</i> および <i>P. elaeagnifolia</i> の耐塩性はアジア原産の台木種に比べ強い	松本 和浩ら	園芸学会雑誌	75(6)	450-457
2006	アーバスキュラー菌根菌がおよび塩類ストレス、並びに灌水条件下における <i>Sclerocarya birrea</i> の樹勢および養分吸収に及ぼす影響	Muok Bernard Oula・石井 孝昭	熱帯農業	75(1)	26-31
2006	サゴヤシ (<i>Metroxylon sagu</i> Roth.) の塩ストレス回避機構	江原 宏ら	熱帯農業	50(1)	36-41
2007	マンシュウメナシ台木によるニホンナシの耐塩性向上	松本和浩ら	園芸学会研究	6(1)	47-52
2007	土壌中の塩濃度が作物の水分消費と過水抵抗に及ぼす影響	丸居 篤ら	日本砂丘学会誌	54(1)	
2007	牛ふん炭化物の施用量および多量施用土壌の除塩がコマツナの生育と養分吸収および溶脱塩類に及ぼす影響	真行 孝・松丸 恒夫	日本土壌肥科学雑誌	78(4)	355-362
2008	土壌塩分組成と濃度が <i>Tamarix austromongolica</i> N. の体内塩分組成と分泌塩分組成に及ぼす影響	田村 悠起ら	日本緑化工学会誌	34(1)	27-32
2009	異なる塩ストレス下におけるアラバマツ (<i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.) 苗木の生存及び成長と菌根形成	田中一平ら	日本緑化工学会誌	35(1)	33-38

表 3.3.7 わが国における耐塩性に関する研究史 (2010 年代)

発行年	論文・書名	著者名	雑誌名	巻(号) Vol.(No.)	始頁- 終頁
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塩性比較	中島 有美子・吉崎 真司	日本緑化工学会誌	36(1)	219-222
2010	植物の水および塩ストレス耐性の栄養生理学的研究(日本土壌肥科学会賞受賞)	実岡 寛文	日本土壌肥科学雑誌	81(5)	447-450
2010	内モンゴル西部の3地点における塩生植物3種の葉の水ポテンシャルの日中変化	韓 文軍ら	熱帯農業研究	3(2)	79-82
2011	トランスポーター研究が土壌・肥料・植物栄養学にもたらすインパクト : 5. 植物のNa循環系と耐塩性	魚住 恒之	日本土壌肥科学雑誌	82(1)	65-69
2011	植物の有養元素(第4部門 植物栄養 部門別進歩総説特集号)	信濃 卓郎・渡部 敏裕	日本土壌肥科学雑誌	82(6)	504-510
2011	異なる塩水灌漑条件下における塩生植物 <i>Tamarix ramosissima</i> Ledeb. の Na ⁺ 動態	今田 省吾ら	日本緑化工学会誌	37(1)	50-54
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	伊東 日向・吉崎 真司	日本緑化工学会誌	39(1)	117-120
2013	西表島に生育するマングローブ4種の浸透調節物質の濃度変化と陽イオンとの関係	岩永 史子ら	日本緑化工学会誌	39(1)	21-26
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	岡田 穰ら	海岸林学会誌	13(1)	15-24
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	伊東 日向・吉崎 真司	日本緑化工学会誌	40(1)	203-206
2014	海水による土壌冠水がホウライチク(<i>Bambusa multiplex</i>) の生育に及ぼす影響	井上 美那ら	日本緑化工学会誌	40(1)	43-48
2014	好塩性植物の硝酸イオン吸収と移行におけるナトリウムの役割	北川誠子・藤山英保	日本砂丘学会誌	61(1)	
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	立石 麻紀子ら	日本緑化工学会誌	40(1)	54-59
2014	水耕栽培下における塩濃度の違いがヒルギダマシ (<i>Avicennia marina</i>) とメヒルギ (<i>Kandelia obovata</i>) 種樹の生育および樹体内のイオン含有量に及ぼす影響	岩永 史子ら	日本緑化工学会誌	40(1)	49-53
2014	中国毛烏素砂地に生育する <i>Arenaria ordosica</i> Krasch. と <i>Caragana korshinskii</i> Kom. の水分生理特性と浸透調節	岡田 憲和ら	日本緑化工学会誌	40(1)	25-30
2014	塩水処理がケナフ (<i>Hibiscus cannabinus</i> L.) 発芽および生育に及ぼす影響	志水 勝好ら	熱帯農業研究	7(2)	41-46
2015	4種の野菜の種子の塩ストレス下における発芽および吸水応答	松本法子・藤山英保	日本砂丘学会誌	61(3)	
2015	異なる生育段階におけるズッキーニの耐塩性	松本法子・藤山英保	日本砂丘学会誌	61(3)	
2015	津波被災農地の除塩対策 : 5. 宮城県における作物収量に影響を及ぼさない許容ECLレベル(進歩総説: 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策)	阿部倫則・村主栄一	日本土壌肥科学雑誌	86(5)	430-431
2015	除塩対策に関する基礎情報 : 2. 作物の塩害生理と栽培管理(進歩総説: 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策)	近藤 始彦	日本土壌肥科学雑誌	86(5)	387-392
2015	除塩対策に関する基礎情報 : 3. 津波被災・除塩土壌の水稲生産上の問題とカルシウム資材による改善(進歩総説: 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策)	伊藤 豊彰	日本土壌肥科学雑誌	86(5)	393-395
2015	塩ストレス、特にソーダ質土壌障害に対する植物の応答に関する栄養生理学的研究	藤山志保	日本土壌肥科学雑誌	86(5)	360-363
2015	津波被災農地の除塩対策 : 16. 東北地域の津波被災農地土壌の除塩対策(進歩総説: 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策)	三浦 憲蔵	日本土壌肥科学雑誌	86(5)	459-462
2015	津波被災農地の除塩対策 : 11. 宮城県の津波被災園芸畑土壌における除塩後の塩類推移の実態(進歩総説: 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策)	稲生 栄子ら	日本土壌肥科学雑誌	86(5)	443-444
2015	モモ栽培における塩化カリウムと硫酸カリウムの比較	井上 博道ら	日本土壌肥科学雑誌	86(6)	539-543
2015	海水による土壌冠水が東日本太平洋沿岸域に分布する木本植物17種の生育に及ぼす影響	井上美那ら	日本緑化工学会誌	41(1)	73-78
2015	模擬海水に水没後の土壌の冠水環境がヌマスギ (<i>Taxodium distichum</i> (L.) Rich.) とクロマツ (<i>Pinus thunbergii</i> Parl.) 苗木の生存と成長におよぼす影響	沖田 総一郎ら	日本緑化工学会誌	41(1)	67-72
2015	塩ストレスがウラルカンゾウ (<i>Glycyrrhiza uralensis</i> Fischer ex Candolle) 1年生苗の成長と生理に及ぼす影響	岡村怜美ら	日本緑化工学会誌	41(1)	33-38
2015	複数の耐塩性指標による觀賞植物3種の評価をその生理的機構の分類	斎藤宏二郎ら	日本緑化工学会誌	41(1)	21-26
2016	塩条件下におけるコキア (<i>Kochia scoparia</i> (L.) Schrad.) の Na、K、Ca、Mg および P 吸収特性	山田 智ら	日本砂丘学会誌	63(3)	
2016	異なる環境条件が塩生植物 <i>Suaeda</i> 種の生育と無機成分吸収に及ぼす影響	足立里奈ら	日本砂丘学会誌	63(1)	
2016	塩ストレス下におけるCa添加と日長条件が塩生植物 <i>Suaeda saba</i> の生育および花芽形成に与える影響	足立里奈ら	日本砂丘学会誌	63(2)	
2016	津波により冠水した砂質水田における除塩に伴う塩化物イオン及びナトリウムイオンの挙動と交換性陽イオンへの影響	永沢 朋子ら	日本土壌肥科学雑誌	87(1)	15-21
2017	イネとトマトにおけるNaClストレス下でのイオン輸送の違いと耐塩性との関連	馬場貴志	日本砂丘学会誌	63(3)	
2017	塩生および好塩性植物のナトリウム吸収能評価	馬場貴志ら	日本砂丘学会誌	63(3)	
2018	塩処理条件下における異なる栽培温度とCaCl ₂ 添加が塩生植物 <i>Suaeda saba</i> の生育と無機成分吸収に及ぼす影響	中原浩貴ら	日本砂丘学会誌	64(2)	

表 3.3.8 海外における種子の耐塩性に関する研究史

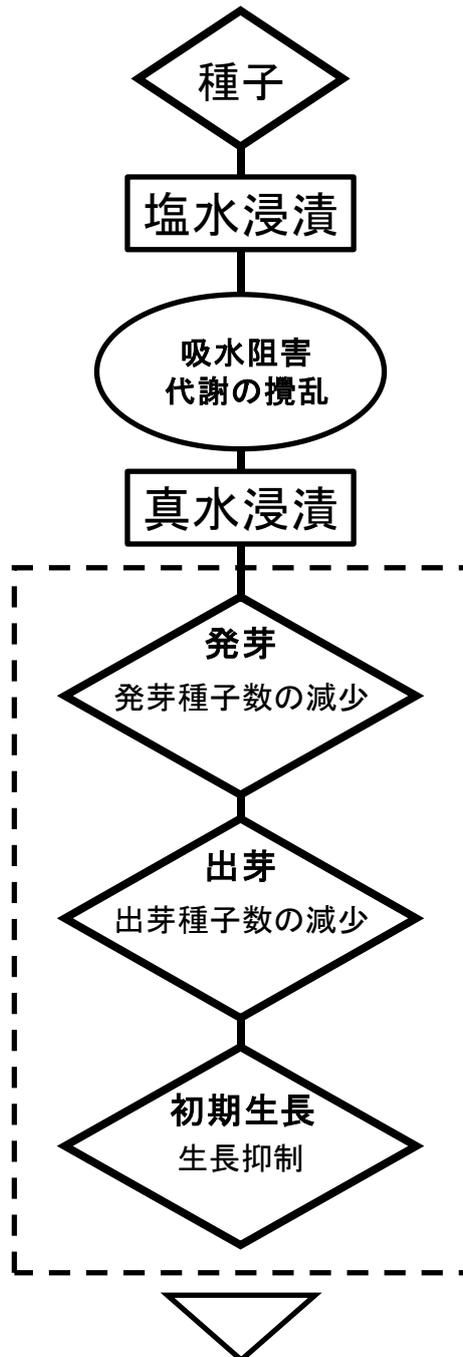
年	タイトル	著者	雑誌名	巻(号) Vol.(No.)	ページ
1855	Does Sea-Water Kill Seeds?	C. Darwin	Gardeners' Chronicle and Agricultural Gazette	(21)	356-357
1856	On the Action of Sea-water on the Germination of Seeds	C. Darwin <i>et al.</i>	The Botanical Journal of the Linnean Society	1(3)	130-140
1958	Salt Water Tolerance of Seeds of <i>Gossypium</i> Species as a Possible Factor in Seed Dispersal	S. G. Stephens	The American Naturalist	92(863)	83-92
1969	Effect of sea water on seed germination in two Pacific atoll beach species	G. L. Lesko and R. B. Walker	Ecology	50(4)	730-734
1971	The effects of salinity on germination and early growth of <i>Puccinellia nuttalliana</i>	A. J. Macke and I. A. Ungar	Canadian Journal of Botany	49(4)	515-520
1978	Halophyte seed germination	I. A. Ungar	Botanical Review	44(2)	233-264
1985	Salinity and seed germination patterns in coastal plants	S. R. J. Woodell	Vegetatio	61	1-3
1990	Inhibition of Seed Germination by Salt and its Subsequent Effect on Embryonic Protein Synthesis in Barley	S. Ramagopal	Journal of Plant Physiology	136(5)	621-625
1997	Effects of thermoperiod on recovery of seed germination of halophytes from saline conditions	M. A. Khan and I. A. Ungar	American Journal of Botany	84(2)	279-283
2001	Characteristics of seed germination in five non-halophytic Chinese desert shrub species	K. Tobe <i>et al.</i>	Journal of Arid Environments	47(2)	191-201
2010	Interactive effects of salt and alkali stress on seed germination, germination recovery, and seedling growth of halophyte <i>Spartina alterniflora</i> (Poaceae)	R. Li <i>et al.</i>	South African Journal of Botany	76(2)	380-387
2017	Seed germination, salt stress tolerance and seedling growth of <i>Opuntia ficus-indica</i> (Cactaceae), invasive species in the Mediterranean Basin	L. Podda <i>et al.</i>	Flora	229	50-57

3.3.5 仮説

以上の先行研究のレビューから、本研究における仮説を立てた。図 3.3.8 に、本研究の第 4 章から第 5 章にあたる種子の発芽から出芽、初期生長へ短期的な塩水浸漬が及ぼす影響と塩水冠水耐性についての仮説を示す。また、図 3.3.9 に本研究の第 6 章にあたる実生および幼木に対して短期的な塩水浸漬が及ぼす影響と塩水冠水耐性についての仮説を示す。

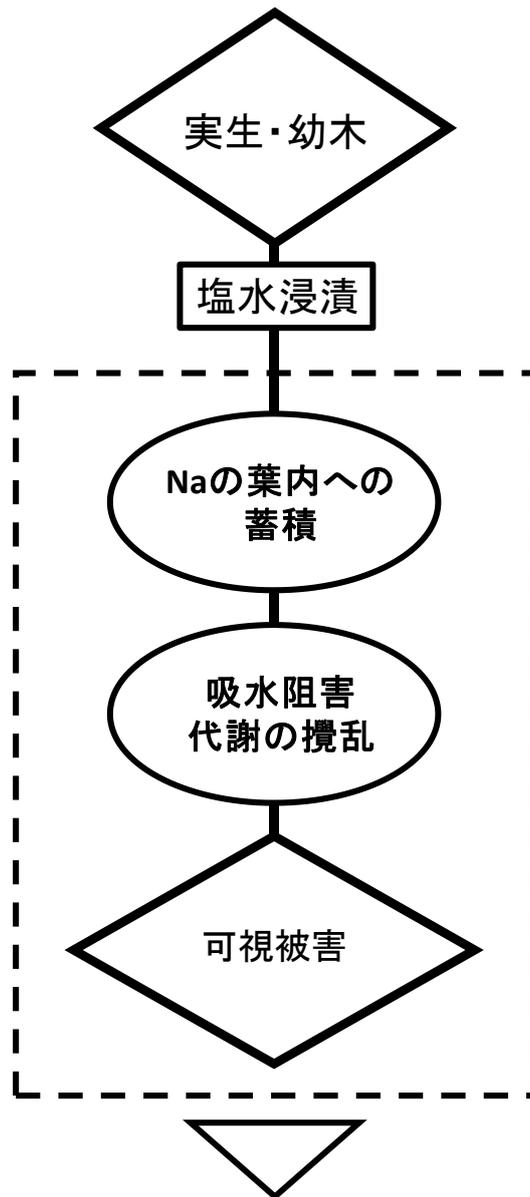
種子の発芽や初期生長へ塩分ストレスが及ぼす影響について、吸水阻害や代謝のかく乱など生理的な悪影響がある (Yupsanis *et al.*, 1994 ; Khan and Rizvi, 1994 ; Dantas *et al.*, 2007 ; Gomes *et al.*, 2008) とされており、また、発芽率の低下や初期生長の阻害が起こる (Khan *et al.*, 2006 ; Kaveh *et al.*, 2011 ; Ahmad *et al.*, 2013) ことが確認されている。よって、本研究において塩水浸漬処理の期間が長くなるほどクロマツやアカマツ、広葉樹の種子の発芽種子数や出芽数、初期生長が抑制されると考えられる。また、種子の塩水浸漬処理による影響はクロマツが最も小さく、次いでアカマツ、沿岸性の広葉樹、内陸性の広葉樹の順になると考えた。すなわち、塩水冠水耐性はクロマツ、アカマツ、沿岸性の広葉樹、内陸性の広葉樹となると推察した。Woodell (1985) の研究や Tobe *et al.* (2000 ; 2001) の研究においては塩水浸漬後に真水へ種子を置くと種子が発芽し、発芽数が始めから真水へ置いた種子と変わらない数になる種が確認されているが、Woodell (1985) や Tobe *et al.* (2000 ; 2001) は塩生植物を対象としており、他方、本研究の対象種は非塩生植物であり、一般的に塩生植物に比べ耐塩性が低いといわれている (Ahmad *et al.*, 2013) ことから、発芽率は塩水浸漬処理により低下すると推察した。

本研究の対象とした実生、幼木より樹齢の高い苗木を用いた先行研究ではクロマツは広葉樹に比べ高い耐塩生を持つことが認められている (井上ら, 2015 ; 立石ら, 2014)。他方、生育段階によって耐塩性が異なること (米田, 1958 ; ラルヘル, 2004) が指摘されており、加えて、大規模な高潮や津波後の調査報告においてはクロマツと広葉樹の被害が地域によって異なっている (後藤, 1899 ; 中野ら, 1962 ; 西・木村, 1954 ; 谷口, 1954 ; 中村ら, 2012 ; 永幡, 2012)。よって、実生や幼木では広葉樹でも沿岸性の樹種であればクロマツに比べて塩水冠水耐性が高い可能性があると考えられる。すなわち、実生および幼木の生育段階における塩水冠水耐性は、沿岸性の広葉樹の中でもクロマツと比較して高い樹種、低い樹種があり、順位性のようなものが存在すると推察した。また、Na が植物体内に侵入すると、代謝の阻害やそれに伴う生長の阻害が発生すると言われており (Munns, 2002 ; Munns and Tester, 2008 ; Ahmad *et al.*, 2013)、植物は耐塩性の機構として、根の地上部への Na 移行制御能、葉への Na 集積抑制能、選択的 K 吸収能 (但野, 1987 ; Matsushita and Matoh, 1991) などを持つと言われている。よって、塩水冠水耐性の低い樹種は塩水冠水耐性高い樹種に比べ、葉への Na の集積や代謝の攪乱の影響を受けやすく、可視被害が発生しやすい推察した。



- 塩水浸漬期間の長いほど，影響が大きくなる。
- 【発芽】塩水浸漬の影響
アカマツ>クロマツ
- 【出芽・初期生長】塩水浸漬の影響
・アカマツ>クロマツ
・内陸性の広葉樹>沿岸性の広葉樹>クロマツ
- 塩水冠水耐性
・【発芽・出芽】クロマツ>アカマツ
・【出芽】クロマツ>沿岸性の広葉樹>内陸性の広葉樹

図 3.3.8 塩水浸漬が種子の発芽，出芽，初期生長へ及ぼす影響についての仮説



- 塩水浸漬期間の長いほど、影響が大きくなる。
- 【実生】塩水浸漬の影響
沿岸性の広葉樹＞クロマツ・沿岸性の広葉樹
- 【幼木】塩水浸漬の影響
沿岸性の広葉樹＞クロマツ・沿岸性の広葉樹
- 塩水冠水耐性の順位性
 - ・【実生】沿岸性の広葉樹＞クロマツ＞沿岸性の広葉樹
 - ・【幼木】沿岸性の広葉樹＞クロマツ＞沿岸性の広葉樹

図 3.3.9 塩水浸漬が実生および幼木へ及ぼす影響についての仮説

第4章 発芽における塩水浸漬の影響

第4章では初期生育段階における発芽に注目した実験を行った。第4章の構成と概要を図4.1に示す。4.1項では、クロマツの種子を用い、塩分ストレスが種子の吸水と発芽に及ぼす影響を検証した。4.2項および4.3項ではクロマツとアカマツの種子を用いた。クロマツは本州では海岸林の主林木とされており、アカマツは東北地方の岩手県や宮城県などではクロマツと合わせて海岸林の主林木となっている(中村, 2014)。よって、海岸林の主林木であるクロマツとアカマツの比較を目的として実験を行った。4.2項ではクロマツおよびアカマツの種子を用いて塩水への浸漬期間と種子内への塩分蓄積量の関係を検証した。4.3項ではクロマツとアカマツの種子を用いて、塩水への浸漬期間が発芽率へ及ぼす影響を検証した。

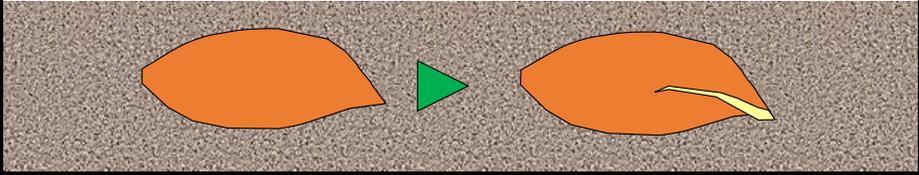
章	第4章 発芽における塩水浸漬の影響		
生育段階の定義と模式図	【種子～発芽】		
			
実験対象	クロマツ	クロマツ・アカマツ	
実験	4.1 塩分ストレスが吸水と発芽に及ぼす影響	4.2 塩水浸漬期間と塩分蓄積量の関係	4.3 塩水浸漬期間と発芽率の関係
実験期間	2014年11/20～12/9	2017年6/13～6/28	① 2016年5/7～7/27 ② 2016年7/3～7/27
試験区	0%区 (対象区) 1.75%区 3.5%区	0日区 (対象区) 1日区 5日区 10日区 15日区	0日区 (対象区) 1日区 5日区 10日区 15日区
各試験区の播種数	5粒	8粒	15粒
調査項目	種子の吸水率 発芽種子数	陽イオン含有率 (Na・K・Mg・Ca)	発芽種子数 発芽速度 種子の吸水率

図4.1 第4章の構成と概要

4.1 塩水浸漬がクロマツ種子の吸水と発芽へ及ぼす影響

4.1.1 実験目的及び概要

培地における塩分濃度の違いがクロマツ種子の吸水率と発芽種子数へ及ぼす影響について検証することを目的として、クロマツ種子の吸水実験を行った。塩分濃度の異なる培地へクロマツの種子を播種し、種子の重量の変化と発芽種子数の記録を行った。

4.1.2 実験方法

4.1.2.1 実験材料

材料は、2013年10月に藤沢土木事務所汐見台庁舎敷地内で採取したクロマツ (*Pinus thunbergii* Parl) の種子を用いた。クロマツの成木から球果を採取し、東京都市大学横浜キャンパスにて天日干しにした。乾燥し裂開した球果から種子を脱粒し、翼を取り除いた後、一昼夜真水へ浸け、浮いている種子を取り除き沈んでいる種子のみを一昼夜乾燥させた。乾燥させた種子を風袋へ入れ、更にジッパー付きのポリ袋へ入れ冷暗所にて保存した。実験へ用いた種子の平均重量は $0.0131\text{g} \pm 0.0005$ であった。

4.1.2.2 実験場所

東京都市大学横浜キャンパスにあるフィールド演習室内のインキュベータ (MIR-153) を用いて実験を行った。実験は 25°C の恒温条件で行った。

4.1.2.3 実験期間

実験は2014年11月20日に開始し、12月9日に終了した。培地の塩分濃度がクロマツ種子の吸水経過へ与える影響についての実験は一部の種子にカビが発生した12月2日まで行



写真 4.1.1 インキュベータ (MIR-153) 内における実験の様子

った。塩水浸漬後の種子の発芽能力に関する検証実験は12月6日から11日まで行った。

4.1.2.3 実験処理

実験に用いる種子は冷暗所から取り出した後、一昼夜、室温にて風乾させた。培地の塩分濃度により種子の吸水過程に差異が表れるか検証するため、3種類の処理区を設けた。処理区の種類は0%区、1.75%区、3.5%区である。0%区は蒸留水をオートクレーブ（アルプ KT-30SDP）で120℃にて30分間滅菌した滅菌水を10mLろ紙へ注水した。1.75%区は滅菌水へNaClを1.75%溶解した塩水を注水した。3.5%区は滅菌水へNaClを3.5%溶解した塩水を注水した。塩水の水ポテンシャルは参考資料1をもとに算出し、NaCl濃度が1.75%で約-1.5MPa、3.5%で約-3.0MPaとなった。各処理区に種子を5粒ずつ播種したシャーレを3つ設け、3回繰り返しとした。3つのシャーレをそれぞれ①、②、③とした（表4.1.1、写真4.1.2）。

表 4.1.1 各処理区の種子数

処理区	シャーレ—No.		
	①	②	③
0%区	5粒	5粒	5粒
1.75%区	5粒	5粒	5粒
3.5%区	5粒	5粒	5粒



写真 4.1.2 シャーレに播種したクロマツ種子

4.1.2.4 種子重量の計量

実験に用いたクロマツの種子は、24 時間空気中にさらして風乾させた。その後、風乾重量を計量した。風乾重量を計量した種子を各処理区のシャーレに並べ24 時間ごとに重量の計量を行った。計量の際には、ピンセットを用いて種子を取り出しキムワイプで種子の表面を静かに拭いた。そして、電子天秤で種子の重量を計量した。種子による吸水を定量的に表現するため、種子の重量から吸水率（内山，1981）を算出した。

$$\text{吸水率 (\%)} = \frac{x \text{ 日目種子重量 (g)}}{0 \text{ 日目種子重量 (g)}} \times 100 - 100 \quad (4.1.1)$$



写真 4.1.3 種子重量の計量の様子



写真 4.1.4 種子重量の計量の様子

4.1.2.5 統計処理

処理区ごとの吸水率および発芽種子数の実験日ごとの値について有意差を検定するため、各処理区間にお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い、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 Kuruskal-Walls 検定 ($p < 0.05$) を用いた (IBM SPSS Statistics ver. 19)。

4.1.3 結果

4.1.3.1 吸水率の経時変化

図 4.1.1 に処理区ごとの置床後の吸水率の推移を示す。また、図 4.4.2~4.4.4 に各処理区における吸水率の経時変化について有意差を示す。図 4.4.1 および図 4.4.2 より、0%区では、置床後 0 日目から 1 日目にかけて種子の吸水率は 16.83%上昇した。置床後 1 日目から 5 日目にかけて種子の吸水率は 0 日目より有意に高くなり、1 日平均 3.44~7.25%上昇した。置床後 6 日から 12 日後にかけては 1 日平均 10.9~32.8%上昇する傾向を示した。1.75%区では、置床後 0 日目から 1 日目にかけて種子の吸水率は 16.83%上昇した。置床後 2 日目から 12 日目にかけて種子の吸水率は 1 日平均 0.85~5.79%上昇し、置床後 3 日目から 0 日目との有意差が見られた (図 4.1.3)。また、3.5%区では置床後 2 日目から 12 日目まで種子の吸水率は 1 日平均で-0.62~3.50%変化し、置床後 10 日目以降の吸水率において 0 日目との有意差が認められた (図 4.1.4)。実験終了時の吸水率は 23.41%であり、0%区と 1.75%区における吸水率と比較して低い値であるが、種子が吸水していることが認められた。

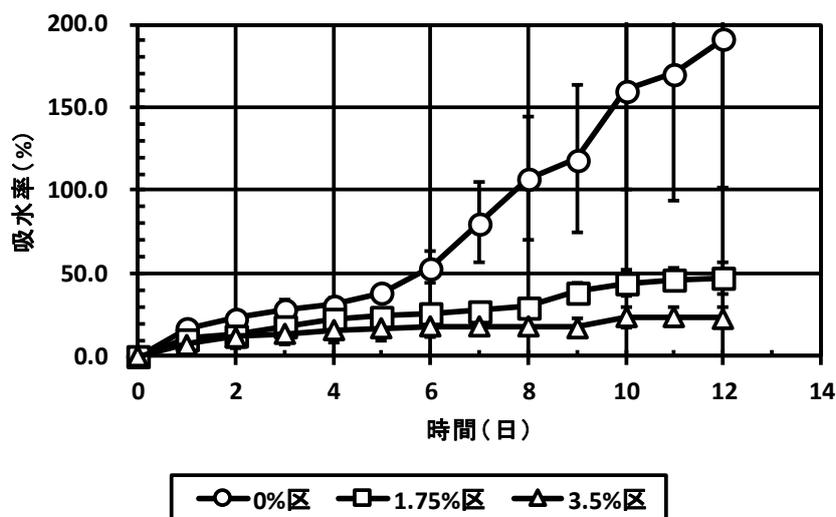


図 4.1.1 処理濃度別の吸水率の推移

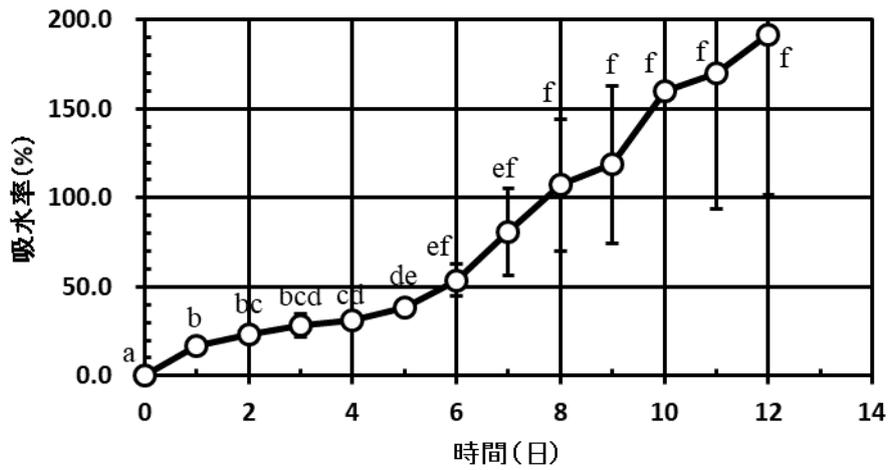


図 4.1.2 0%区における吸水率の推移と実験日ごとの吸水率の有意差
 ※アルファベットの差異は有意差を示す

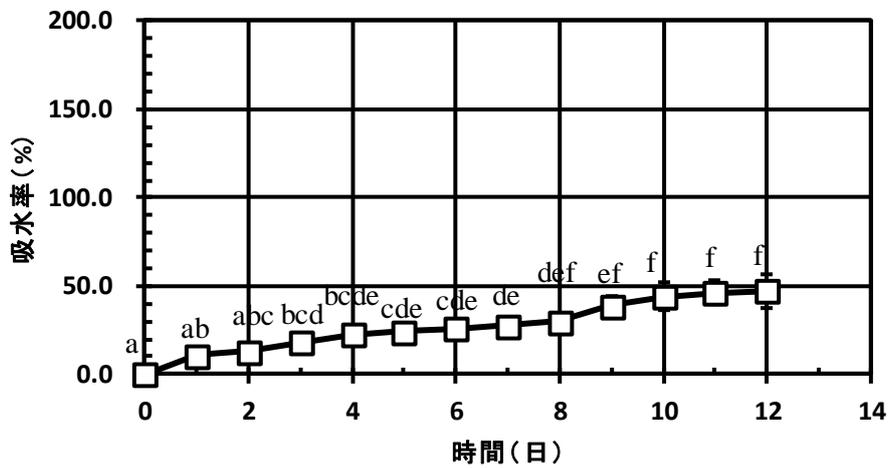


図 4.1.3 1.75%区における吸水率の推移と実験日ごとの吸水率の有意差
 ※アルファベットの差異は有意差を示す

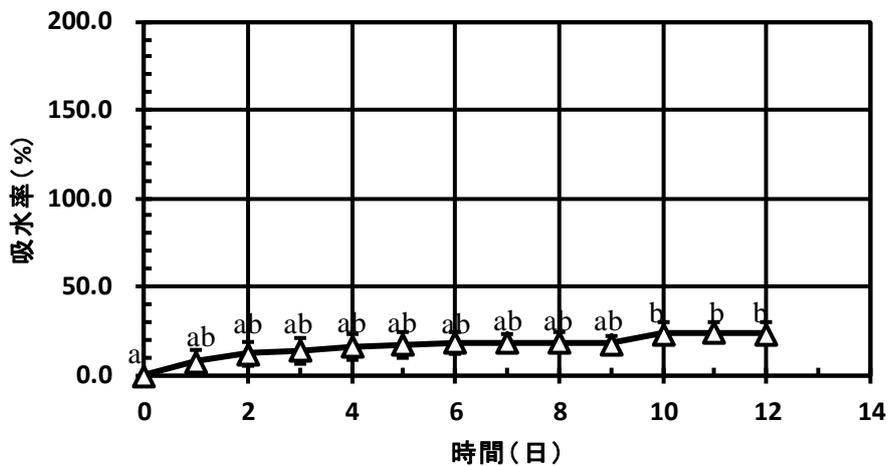


図 4.1.4 3.5%区における吸水率の推移と実験日ごとの吸水率の有意差
 ※アルファベットの差異は有意差を示す

4.1.3.2 種子の発芽種子数と吸水率の推移

図 4.1.5~4.1.7 に処理区ごとの発芽種子数と吸水率の推移を示す。図 4.1.5 より 0%区では実験開始から 4 日後に発芽が始まった。0%区が発芽開始時における吸水率は 31.14%であった。また、発芽種子数は 0.33 であった。そして、実験開始から 9 日後に 0%区が発芽種子数は飽和した。0%区が発芽種子数が飽和した時点の吸水率は 118.67%であった。発芽開始時の吸水率に比べ発芽種子数が飽和した時点の吸水率は 87.53%高かった。また、飽和した時

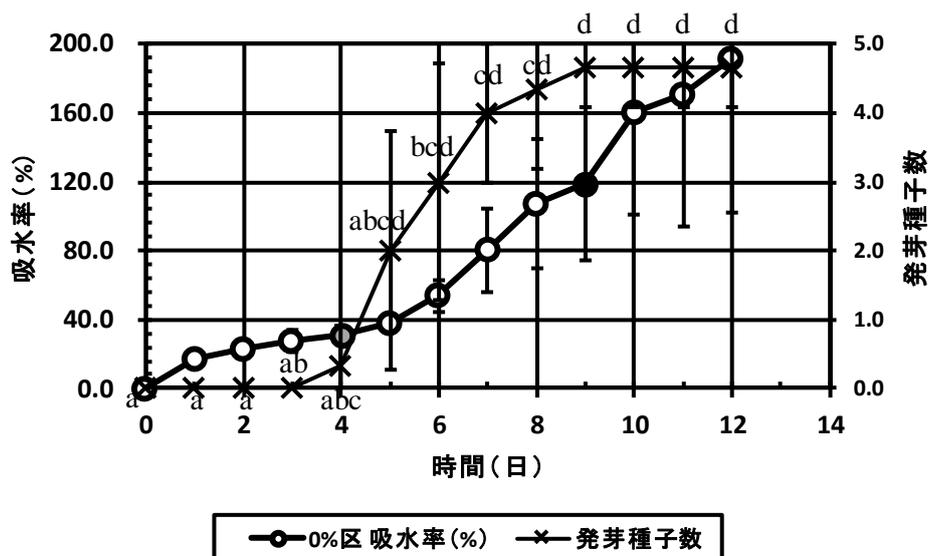


図 4.1.5 0%区における発芽種子数と吸水率の推移

※重量増加率の灰色の点は発芽の開始、黒色は発芽種子数の飽和した時点を表す
※アルファベットの差異は有意差を示す。

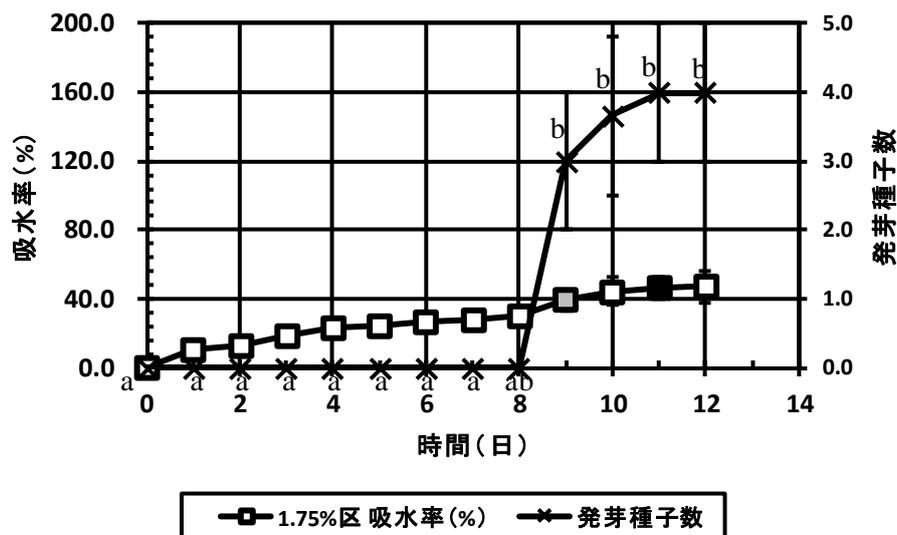


図 4.1.6 1.75%区における発芽種子数と吸水率の推移

※重量増加率の灰色の点は発芽の開始、黒色は発芽種子数の飽和した時点を表す
※アルファベットの差異は有意差を示す。

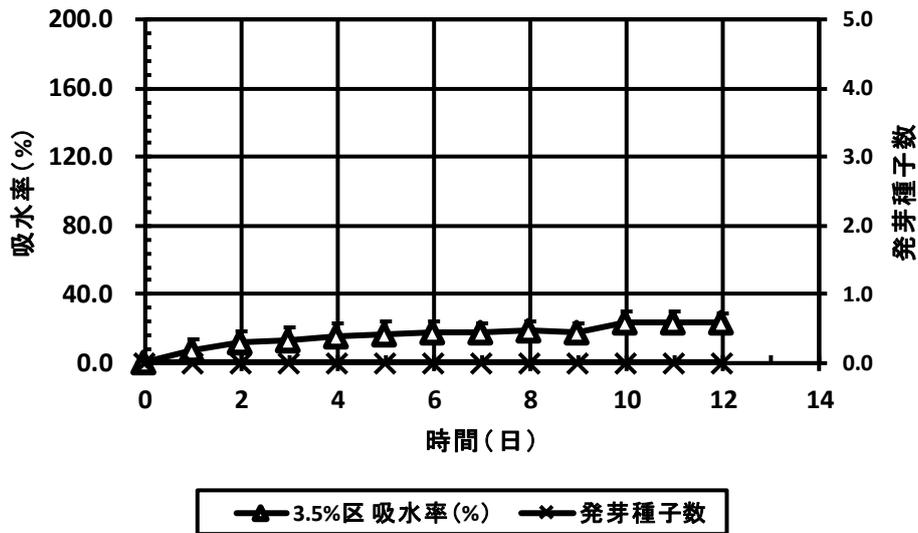


図 4.1.7 3.5%区における発芽種子数と吸水率の推移
 ※重量増加率の灰色の点は発芽の開始，黒色は発芽種子数の飽和した時点を表す
 ※アルファベットの差異は有意差を示す。

点の発芽種子数は 4.67 だった。図 4.1.6 より 1.75%区では実験開始から 9 日後に発芽が始まった。1.75%区の発芽開始時における吸水率は 39.07%，発芽種子数は 3.00 であり，発芽種子数の飽和は実験開始から 11 日後となった。発芽種子数が飽和した時点の吸水率は 46.08%，発芽種子数は 4.00 であった。図 4.1.7 より，3.5%区では種子の発芽は認められず，実験終了時の吸水率は 23.41%となった。

実験開始から発芽種子数の上昇が見られるまでの日数は 0%区より 1.75%区の方が 5 日遅かった。また，実験開始から発芽種子数が飽和するまでの日数は 0%区と 1.75%区ともに 9 日間であった。発芽種子数が飽和した時点の発芽種子数は 0%区の方が 1.75%区より 0.67 多かった。

4.1.4 考察

4.1.4.1 重量増加率の経時変化

図 4.1.1 より，0%区の吸水率の曲線について，3つの過程に分かれる傾向がみられた。まず置床直後から 1 日間の急な重量増加を示す過程，そして置床後 2 日から 5 日後にかけての緩やかな上昇過程，置床後 6 日から 12 日後にかけての急激な上昇過程である。1.75%区と 3.5%区ともに置床後 1 日で吸水率は 7.56~10.80%上昇したが，0%区において認められた 3つの吸水過程は認められなかった。一般的に植物の種子の水分吸収過程は A 相，B 相 (B₁相，B₂相)，C 相の 3 相に大別されている (中村，1985)。A 相では種子内外の水ポテンシャルの差に従って吸水が起こる (吉岡・清和，2009；鈴木，2003)。B 相では種子内外の水ポテンシャルが平衡状態となり緩やかな吸水あるいは停滞が起こる (吉岡・清和，2009；鈴木ら，2003)。そして C 相では発芽が開始し始めて幼根や幼芽の生長に伴い急激な吸水が起こる (吉岡・清和，2009；鈴木，2003)。また，クロマツの種子の吸水時における重量変化に

についても3つの過程に分かれる傾向が既往研究において認められている(米田, 1985)。従って, 0%区の種子においてはA相, B相, C相の水分吸収過程を経た吸水が行われたと考えられる。一方, 1.75%区および3.5%区において3つの吸水過程が表れなかった。また, 実験期間中, 0%区に比べてNaCl濃度の高い処理区ほど吸水率は低くなる傾向を示した。1.75%区および3.5%区で水分吸収過程の変化が0%区と異なり, 実験期間中の吸水率が低かった要因として培地の水ポテンシャルの影響が考えられる。種子の吸水は種子内外の水ポテンシャルの差によって行われる(吉岡・清和, 2009; 鈴木, 2003)ため, 塩分を多く含む土壌では, 種子への水の吸水が阻害される(Derek and Michael, 1994)。郷(1956)の実験により, クロマツの種子の水ポテンシャルは約-3.0Mpaであることが分かっている。1.75%区と3.5%区の培地における塩水の水ポテンシャルは, 1.75%区では約-1.5Mpa, 3.5%区では約-3.0Mpaである。種子と培地の塩水との間における水ポテンシャルの差を処理区ごとに比較すると, 3.5%のNaCl溶液では1.75%のNaCl溶液に比べて水ポテンシャルの差が小さく塩水と種子の水ポテンシャルが近い値であることが分かる。従って, クロマツの種子は培地のNaCl濃度が上昇すると水ポテンシャルの種子内外の差が小さくなり, 1.75%のNaCl溶液, 3.5%のNaCl溶液と濃度が高くなるにつれて吸水阻害の影響が大きくなったと考えられる。

4.1.4.2 種子の発芽種子数と吸水率の推移

発芽開始時における吸水率は0%区で31.14%, であった。1.75%区では発芽が見られた日の前日には29.80%まで上昇し, 39.07%となった。すなわち, 1.75%区の発芽前日の吸水率は0%区における発芽時の吸水率である31.14%に近い吸水率まで上昇していることが認められた。一方, 発芽の見られなかった3.5%区では, 実験終了時の吸水率は23.41%であり, 0%区と1.75%区の発芽時の吸水率よりも低かった。郷(1956)によると, クロマツ種子は吸水率26%で胚の核分裂がはじまり, 発芽時には41.8~55.5%になることが認められている。植物の種子は種子内の水分量が不十分であると発芽は起こらない(吉岡・清和, 2009)が, 発芽に必要な水分は必ずしも一定しておらず, 発芽限界付近の水分であれば, それに長く置かれると次第に発芽するようになると言われている(中村, 1985)。また, 種子の吸水は水ポテンシャルの差によって行われており(鈴木, 2003), 水ポテンシャルはクロマツ種子が-3.0MPa(郷, 1956)であり, 1.75%区の塩水では-1.5MPa, 3.5%区の塩水では-3.0MPaであることがわかった。よって, 海水の約半分のNaCl濃度の塩水では種子が発芽に必要な吸水量付近まで吸水しすることができるが, 海水とほぼ同じNaCl濃度の塩水では種子が発芽に必要な水分量まで吸水することができないことが示された。

4.2 塩水浸漬期間とクロマツとアカマツの種子内部への塩分蓄積量の関係について

4.2.1 実験の目的

本実験では、塩水へ浸漬する期間の違いが種子内の陽イオン含有率や塩分の蓄積に及ぼす影響を検証することを目的に、海岸林の主林木であるクロマツと東北地方の一部で海岸林へ用いられるアカマツを対象とした実験を行った。

4.2.2 実験方法

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1953年の台風13号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、1日、5日、10日、15日とした（谷口，1954；千葉ら，2012；宮本ら，2012）。また塩水浸漬処理をしない場合（浸漬日数0日）を対照区とした。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、種子内の陽イオン濃度（Na, K, Mg, Ca）を測定した。

4.2.3 実験材料

供試種としてクロマツ（*Pinus thunbergii* Parl）とアカマツ（*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.）を用いた。クロマツの種子は2016年の10月に神奈川県藤沢市で採取したものを、また、アカマツの種子は2016年10月に岩手県盛岡市にて採取されたものをを用いた。実験開始時に量った種子200粒の平均重量はクロマツで $0.0138 \pm 0.0005\text{g}$ 、アカマツで $0.0095 \pm 0.0004\text{g}$ であった。

4.2.4 実験期間

実験は2017年6月13日から6月28日にかけて行った。

4.2.5 実験条件

実験は25°C恒温、暗条件下のインキュベーター（SANYO社製，MIR-153）内で行った。塩水浸漬処理には直径10cmのシャーレを用い、オートクレーブ（アルプ株式会社，KT30SD）にて120°Cで30分間の滅菌処理を行ってから実験に供した。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。塩水の水ポテンシャルは参考資料1より、NaCl 3.5%で約-3.0MPaとなった。シャーレ内へは発芽床としてろ紙を敷き、1シャーレに8粒の種子を播種した後、各塩水浸漬処理ごとに塩水または滅菌水を種子が半分浸漬するまで注水した。なお、本実験では1シャーレを1反復とし、各処理区3反復の実験を行った。また、種子は一日おきに新しいシャーレへ移した。設定した日数の塩水浸漬処理の後、種皮を取り除き滅菌水にて種子を洗った後、80°Cで48時間以上の通風乾燥を行った。乾燥後、湿式灰化法により塩酸溶液とした。湿式灰化法については

参考資料の資料 2 に詳細を示す。作成した液体試料を 100 倍に希釈した後、Na, K, Mg, Ca, の含有率を分析した。

分析にはイオンクロマトグラフィー（サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社, ICS-1100_AS-AP）を用いた。イオンクロマトグラフィーのカラムは Ion Pac CS12A（サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社）を用い、溶離液は 20mM メタンスルホン酸を用いた。分析時の圧力は 800~1400psi, セル温度は 35°C, カラム温度は 35°C, 1 サンプルの分析実行時間は 16 分間に設定し分析を行った。検出ピークは Li, Na, NH₄, K, Mg, Ca の順番で検出される。

4.2.6 統計解析

異なる日数の塩水浸漬処理における種子の塩分含有率を検定するため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 検定 ($p < 0.05$) 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 ($p < 0.05$) を用いた (IBM SPSS Statistics ver. 19)。

4.2.7 結果

クロマツおよびアカマツの種子内の陽イオン含有率を表 4.2.1 に示す。クロマツでは Na 含有率が塩水浸漬期間の長い処理区ほど高くなる傾向を示したが、各処理区間に有意差は認められなかった。アカマツの Na 含有率も塩水浸漬期間が長いほど高くなる傾向を示し、15 日区、10 日区と対照区である 0 日区との間に有意差が認められた。両種の Na 含有率の差は 0 日区・1 日区では 0.07~0.06%だったが、5~15 日区では 0.11~2.31%と差が大きくなりアカマツの方が高かった。5~15 日区では Na 含有率の種間差は塩水浸漬期間が長いほど大きく、15 日区では有意差が認められた (表 4.2.1, 図 4.2.1)。

K 含有率について、両種ともに各処理区間に有意差は認められなかった。また、樹種間の有意差も認められなかった (表 4.2.1, 図 4.2.2)。

Mg 含有率は、両種ともに処理区間における有意差や傾向は見られなかったが、全ての処理区においてアカマツの方がクロマツより含有率が高く、有意差が認められた (表 4.2.1, 図 4.2.3)。Ca 含有率は、両種ともに処理区間の有意差は認められなかった。また、樹種間の差を比較したところ、10 日区以外でクロマツよりアカマツの Ca 含有率が高くなり、5 日区のみで有意差が認められたが他の処理区における樹種間差は認められなかった (表 4.2.1, 図 4.2.4)。

クロマツとアカマツの各処理区における K/Na 比を図 4.2.5 に示す。クロマツの K/Na 比は塩水浸漬期間の長い処理区ほど低くなり、15 日区と 0 日区の間で有意差が認められた。アカマツもクロマツと同様に塩水浸漬期間の長いほど K/Na 比が低下した。各処理区間の比較を行った結果、アカマツでは 0~5 日区と 10 日区, 15 日区との間で有意差が認められた。

表 4.2.1 クロマツ (*P. thunbergii*) とアカマツ (*P. densiflora*) の各処理区における種子内のイオン含有率

※小文字アルファベットの差異は各種における処理区間での有意差を示す(Tukey test, $p < 0.05$, Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$)。

※大文字アルファベットの差異は処理区内における種間の有意差を示す (T test, $p < 0.05$)。

樹種	処理区	イオン含有率 (%)±Sd.				
		Na	K	Mg	Ca	K / Na
クロマツ <i>P. thunbergii</i>	0日区	0.33±0.03	1.04±0.04	0.53±0.01 A	0.53±0.16	3.68±0.40 a
	1日区	0.46±0.24	1.18±0.28	0.53±0.05 A	0.48±0.15	3.08±1.26 ab
	5日区	0.40±0.08	1.01±0.05	0.50±0.04 A	0.43±0.01	2.92±0.55 ab
	10日区	0.48±0.06	1.03±0.07	0.52±0.02 A	0.45±0.08	2.35±0.18 ab A
	15日区	0.67±0.08 A	0.90±0.05	0.51±0.03 A	0.40±0.03	1.41±0.18 b A
アカマツ <i>P. densiflora</i>	0日区	0.40±0.12 a	1.11±0.09	0.69±0.04 B	0.62±0.34	3.28±0.75 a
	1日区	0.40±0.06 a	1.11±0.07	0.69±0.04 B	0.55±0.15	3.28±0.29 a
	5日区	0.51±0.14 ab	1.12±0.21	0.69±0.08 B	0.56±0.05	2.56±0.57 a
	10日区	0.71±0.14 bc	1.02±0.07	0.69±0.06 B	0.44±0.01	1.52±0.21 b B
	15日区	0.98±0.08 bc B	0.89±0.02	0.74±0.07 B	0.48±0.06	0.93±0.10 B

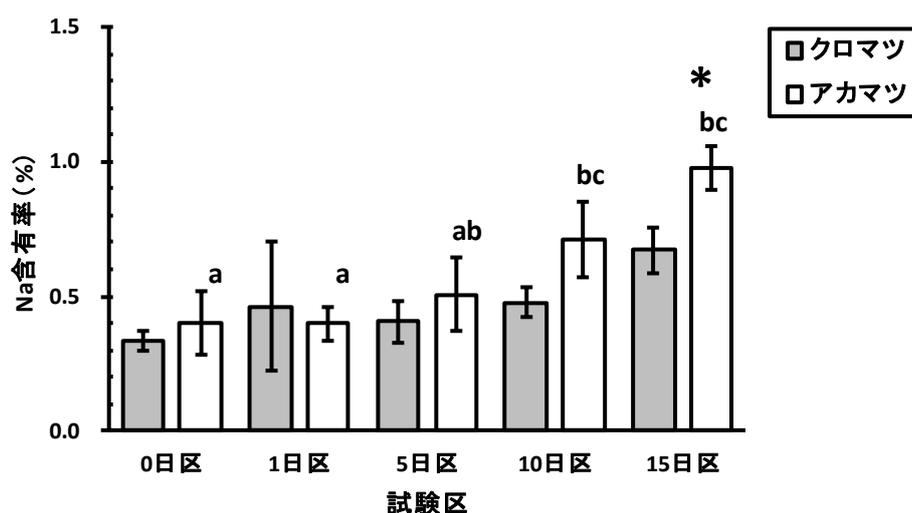


図 4.2.1 各処理区におけるクロマツとアカマツの種子内の Na 含有率

※エラーバーは標準偏差を表す。

※アルファベットの差異は各種における処理区間での有意差を示す(Tukey test, $p < 0.05$)。

※アスタリスクは処理区内における種間の有意差を示す(T test, $p < 0.05$)。

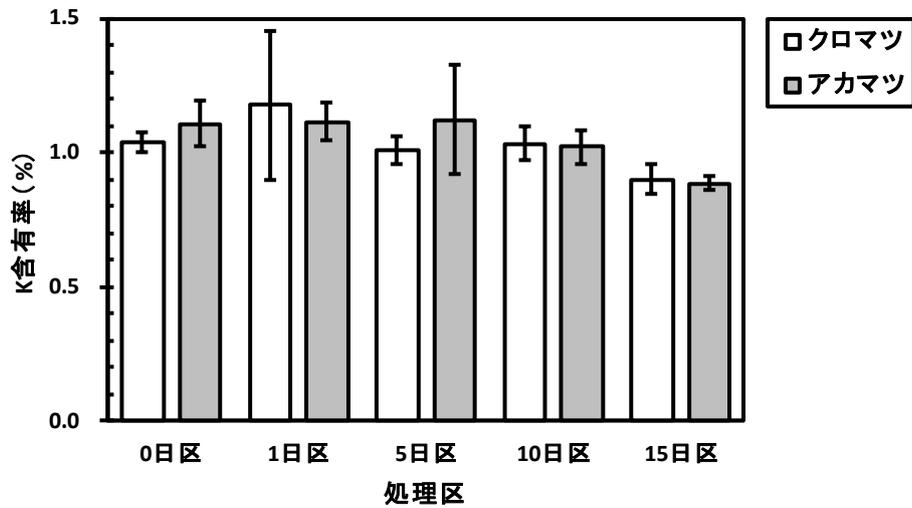


図 4.2.2 各処理区におけるクロマツとアカマツの種子内の K 含有率

※エラーバーは標準偏差を表す。

※アルファベットの差異は各種における処理区間での有意差を示す(Tukey test, $p < 0.05$)。

※アスタリスクは処理区内における種間の有意差を示す(T test, $p < 0.05$)。

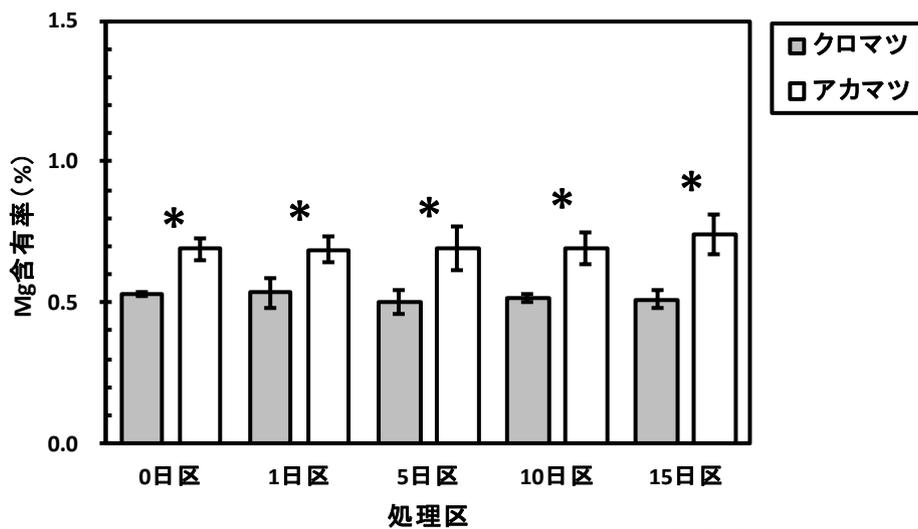


図 4.2.3 各処理区におけるクロマツとアカマツの種子内の Mg 含有率

※エラーバーは標準偏差を表す。

※アルファベットの差異は各種における処理区間での有意差を示す(Tukey test, $p < 0.05$)。

※アスタリスクは処理区内における種間の有意差を示す(T test, $p < 0.05$)。

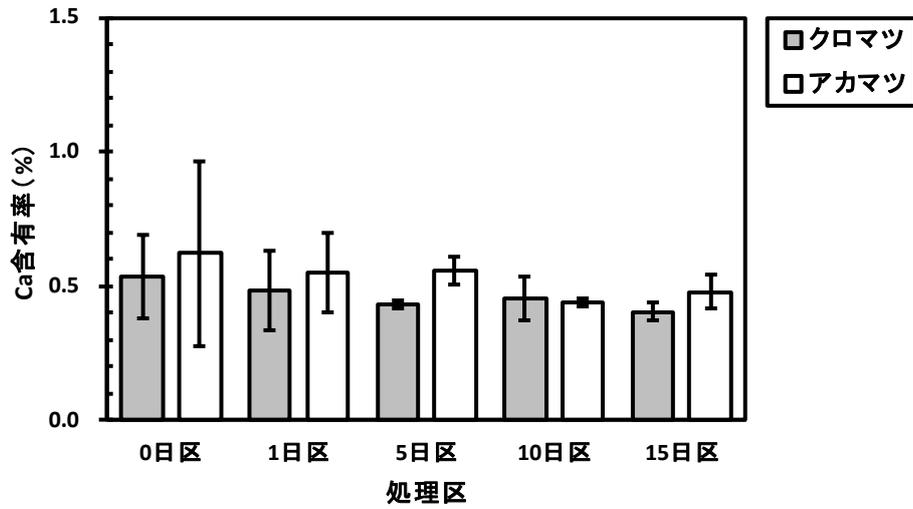


図 4.2.4 各処理区におけるクロマツとアカマツの種子内の Ca 含有率
 ※エラーバーは標準偏差を表す。
 ※アルファベットの差異は各種における処理区間での有意差を示す(Tukey test, $p < 0.05$)。
 ※アスタリスクは処理区内における種間の有意差を示す(T test, $p < 0.05$)。

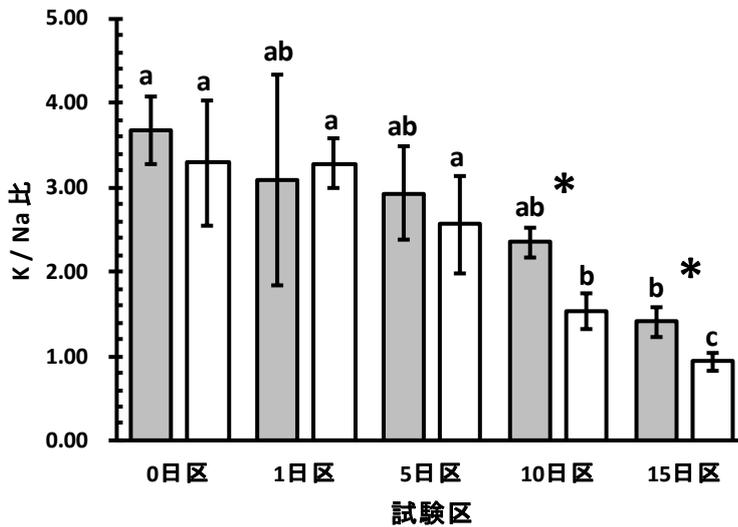


図 4.2.5 各処理区におけるクロマツとアカマツの種子内の K/Na
 ※エラーバーは標準偏差を表す。
 ※アルファベットの差異は各種における処理区間での有意差を示す(Tukey test, $p < 0.05$)。
 ※アスタリスクは処理区内における種間の有意差を示す(T test, $p < 0.05$)。

4.2.8 考察

実験の結果、両種ともに塩水浸漬期間が長いほど多くの Na が増加する傾向が認められ、クロマツでは処理区間の有意差は認められなかったものの、アカマツでは 10 日、15 日区で 0 日、1 日区に比べ有意に高くなった。一方で、クロマツとアカマツともに K, Mg, Ca は試験区間の有意差は認められなかった。すなわち、塩水浸漬期間の長いほど Na が蓄積しすることが分かった。一方で K, Mg, Ca は塩水浸漬期間の長くなっても蓄積あるいは排出はほとんどされず、種子内に潜在的に存在した量から変わらなかったと考えられる。Na の種子内部への侵入はタンパク質代謝の攪乱、ホルモンバランスの攪乱、種子貯蔵物の減少などの影響をおよぼすことが確認されており (Ahmad *et al.*, 2013), その結果として発芽と実生の生長が抑制される (Tsegay and Gebrellassie, 2014; KATEMBE *et al.*, 1998; Sima *et al.*, 2013; Mahdavi and Sanavy, 2007; Meloni *et al.*, 2008) と言われている。クロマツおよびアカマツの種子においても、培地の塩分濃度が高くなるほど種子の発芽率が低下することが分かっており、その原因として Na による代謝の攪乱が指摘されている (浅野, 1963)。また、両種とも塩水浸漬期間が長いほど K/Na 比が低下しており (表 4.2.1), K より Na の含有率が相対的に高くなっていく傾向が認められた。植物体内で Na が過剰な状態となると K とのイオンバランスが乱れることによって代謝の攪乱やエネルギー生産の阻害が発生する (ラルヘル, 2004) ため、K/Na 比は耐塩性についての重要な決定要因のひとつ (MAATHUIS and AMTMANN, 1999) とされている。よって、耐塩性の高い植物は植物体内への Na の侵入を防ぐ (Parida and Das, 2005) ため、K/Na 比の高い状態を維持する (Zhang and Shi, 2013) とされている。よって、クロマツおよびアカマツともに塩水浸漬期間の長いほど種子内部へ Na が蓄積し、K/Na 比が低下していることから、イオンバランスが乱されている可能性が示された。

クロマツとアカマツの種子を比較すると、15 日区では Na 含有率がアカマツの方が有意に高く、10 日以上塩水浸漬処理を行った処理区ではクロマツはアカマツに比べ K/Na 比が高く統計的な有意差が認められた。種子の吸水は種皮などの包皮組織の透過性による影響も受ける (鈴木, 2003)。よって、塩水の種子内への侵入しやすさも種皮透過性の影響を受けると考えた。郷 (1956) によりクロマツとアカマツの種子について、種皮、胚乳、胚の重量の割合はほとんど変わらないことが示されている。また、クロマツとアカマツの種子の重量を比較するとクロマツの方がアカマツの種子に比べて重い傾向が本研究および既往の文献 (浅川ら, 1981) より認められている (表 4.2.2, 表 4.2.3)。すなわち、クロマツの種子はアカマツの種子に比べておおきく、種皮が厚い可能性が推察される。よって、クロマツの種子はアカマツの種子に比べて厚く透過性が低いため、塩水の侵入が抑制されたため、アカマツに比べて Na の蓄積が抑えられたと考えられる。

表 4.2.2 既往文献（浅川ら，1981）におけるクロマツとアカマツ種子の 1000 粒重（g）

1000粒重（g）		参考データ
クロマツ	アカマツ	
13.00	9.00	大阪営林局（1952）
15.20	12.60	山田（1929）
13.69	9.28	柳沢（1955）
13.40	9.30	竹内（1975）
11.95	9.31～11.84	小野（1971）
9.03～17.85	5.39～11.65	遠山ら（1954）

表 4.2.3 本研究において各実験に用いた種子の平均重量（mg）

種子平均重量（mg）		参考データ
クロマツ	アカマツ	
13.12		2013年 採取種子（45粒）
15.07		2014年 採取種子（80粒）
16.09	7.67	2015年 採取種子（150粒）
13.76	9.48	2016年 採取種子（200粒）
19.32		2017年 採取種子（5粒）

4.3 塩水浸漬がクロマツとアカマツの発芽に及ぼす影響

4.3.1 実験の目的

クロマツとアカマツの種子を塩水へ浸漬させ、その後に真水を用いて培養することで、短期的な塩水冠水がクロマツおよびアカマツの種子の発芽へ及ぼす影響を検証した。高潮または津波による短期的な塩分ストレスを再現するため、東北地方太平洋沖地震および1953年台風13号における冠塩水期間(千葉ら, 2012; 宮本ら, 2012; 谷口, 1954)をもとに、0日, 1日, 5日, 10日, 15日間の塩水浸漬期間を設けた。塩水冠水後、降雨により海岸防災林が成立する砂質土壌中の塩分濃度が容易に低下すると考えられることから、塩水浸漬後に真水へ浸漬させ培養した。

4.3.2 実験材料

クロマツ (*Pinus thunbergii* Parl) とアカマツ (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) の種子を実験に用いた。クロマツは2014年の秋に神奈川県藤沢市にある藤沢土木事務所汐見台庁舎にて採取したものである。また、アカマツは2015年の秋に岩手県八幡平市安比高原で採種した。クロマツとアカマツともに球果ごと採取し、東京都市大学横浜キャンパスにて天日干しにした。乾燥し裂開した球果から種子を脱粒し、翼を取り除いた後、風袋を用いて冷暗所にて保存した。種子の平均重量はクロマツで 0.0151 ± 0.001 g, アカマツで $0.0077 \text{g} \pm 0.0002$ であった。

4.3.2.1 実験期間

発芽実験は2016年5月7日から2016年7月27日までの間に3回行った。1回目の実験は2016年5月7日から5月31日までの24日間、2回目および3回目の実験は同年7月3日から7月27日までの24日間行った。ただし、1回目の一部の処理区において異常値と思われる発芽率となった処理区があったので、再試験を7月3日から7月27日まで24日間行った。

4.3.2.2 発芽実験

塩水浸漬期間の差異が種子の発芽へ与える影響を検証するため、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日区を設定した。実験に用いた塩水は、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50.37 mS/m, pHは8.43であった。また、塩水の水ポテンシャルは参考資料1より、NaCl 3.5%で約-3.0MPaとなった。

実験には、直径10cmのシャーレを用いた。シャーレはオートクレーブ(アルプ株式会社, KT30SD)にて120°Cで30分間の滅菌処理を行ったものを実験に用いた。シャーレ内の発芽床としてろ紙を敷いた。シャーレには各浸漬処理ごとに塩水または滅菌水を種子が半分浸

漬する程度に注水した。1 シャーレ当たりの種子数は 20 粒とした。本実験では 1 シャーレを 1 反復とし、1 回の実験で処理区ごとに 3 反復実施した。なお、種子は 1 日ごとに新しいシャーレに移した。

実験中、処理区ごとに設定した日数の塩水浸漬を行った後、塩水を滅菌水に交換した。塩水を滅菌水に交換する際には種子に付着した塩水を滅菌水によって洗い流したのち、滅菌水を注水したシャーレへ播種した。

実験は 25°C に設定した恒温器にて暗条件下で行った。1 回目の実験はインキュベーター (SANYO 社製, MIR-153) で行った。2 回目の実験では 1 回目の実験と同じインキュベーターを用いた。3 回目の実験は 2 回目の実験と同時に行うこととしたため、グロスチャンバー (SANYO 社製, MLR-351) を用いて 1 回目、2 回目と同じ条件で実験を行った。

4.3.2.3 吸水量の測定

発芽実験と同条件下にて吸水量の測定を行った。測定期間は 2016 年 10 月 16 日から同年 10 月 26 日まで行った。実験は発芽実験と同条件に設定したインキュベーター (SANYO 社製, MIR-153) 内で行った。実験に用いたシャーレおよび滅菌処理、培養液の交換、設定した処理区は発芽実験と同様である。1 シャーレ当たりの種子数は 10 粒とした。1 シャーレを 1 反復とし、処理区ごとに 3 反復実施した。

4.3.2.4 発芽数の記録と評価

発芽数は実験開始から実験終了時まで毎日記録した。本実験における発芽は既往研究 (浅野, 1963) を参考に種皮が裂けて、わずかに幼根が見え出しているものとした。発芽した種子はシャーレから取り除いた。記録した発芽数から発芽率、発芽指数 (GI)、平均発芽時間 (MGT) を算出した。発芽指標 (GI) は式 (4.3.1) により算出した (Kandil *et al.*, 2012 ; Karim *et al.*, 1992)。発芽指標とは対照区の発芽率を基準として処理区における発芽率への影響を示す指標である。平均発芽時間 (MGT) は式 (4.3.2) により算出した (Meloni *et al.*, 2008)。平均発芽時間とは 1 粒の種子が発芽するまでにかかった日数の平均値である。式 (4.3.2) の f は x 日に新たに発芽をした種子の発芽数を示す。 x は実験開始から f が記録されるまでの日数示す。

$$GI = \frac{\text{試験区ごとの発芽率}(\%)}{\text{対照区の発芽率}(\%)} \times 100 \quad (4.3.1)$$

$$MGT = \frac{\sum (fx)}{\sum f} \quad (4.3.2)$$

4.3.2.5 種子重量の記録と吸水率の計算

播種から発芽するまでの種子の重量を実験開始から実験終了時まで毎日記録した。記録した種子の重量から吸水率 (内山, 1981) を算出した。吸水率は式 (4.3.3) により算出した。

$$\text{吸水率(\%)} = \frac{n\text{日目の種子重量(g)}}{0\text{日目の種子重量(g)}} \times 100 - 100 \quad (4.3.3)$$

4.3.2.6 統計処理

異なる塩水浸漬期間が発芽へおよぼす効果を検定するため発芽指標、平均発芽時間について同種の 5 処理区間にお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 Scheffé 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 Kuruskal-Walls 検定を用いた。同一処理区間の供試種 2 種間における発芽率、発芽指標、平均発芽時間、平均発芽時間については t 検定を用いた (IBM SPSS Statistics ver. 19)。

4.3.3 結果

4.3.3.1 積算発芽率の推移

図 4.3.1 にクロマツ種子の各処理区における積算発芽率の経時変化を示す。また、図 4.3.3 にアカマツ種子の各処理区における積算発芽率の経時変化を示す。クロマツの 0 日区および 1 日区は播種から 2 日後に積算発芽率が上昇した。また、5 日区、10 日区、15 日区は播種から 6 日後に積算発芽率が上昇し始めた。10 日区と 15 日区の積算発芽率は、はじめ緩やかな上昇傾向を示した後、10 日区では播種後 10 日目に 20%、15 日区では播種後 15 日目に 28%となり、真水へ播種した後に急激に上昇した。アカマツは全処理区において発芽の開始がクロマツに比べて遅れる傾向を示した。0 日区、1 日区、5 日区では播種から 4~6 日後に発芽が開始し、10 日区では 11 日後、15 日区では 16 日後に発芽が見られた。すなわち、真

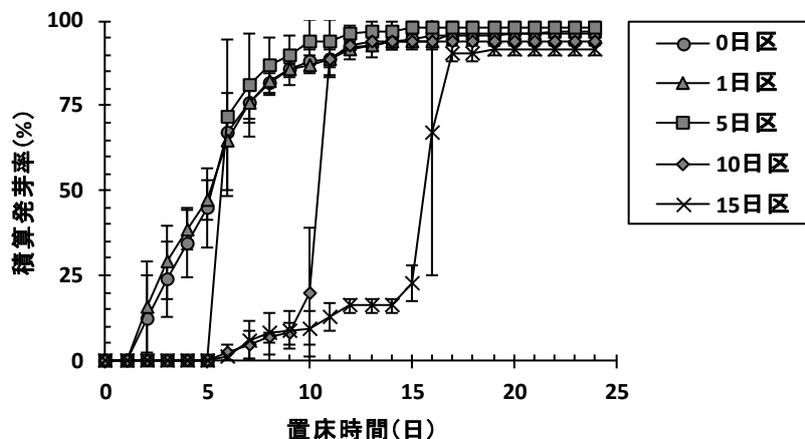


図 4.3.1 クロマツ種子の各処理区における発芽率の経時変化

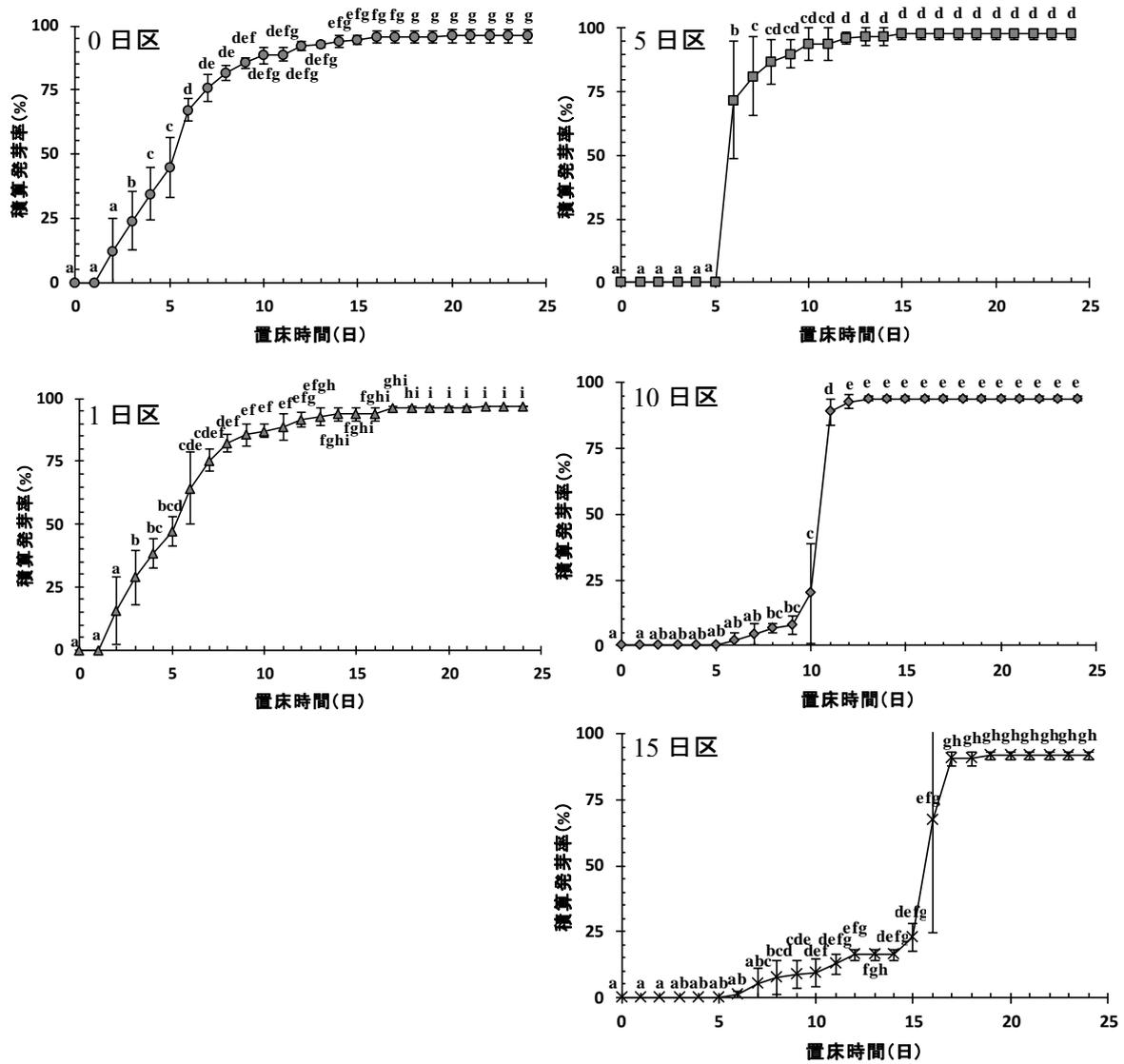


図 4.3.2 各処理区ごとのクロマツの発芽率の推移

※アルファベットの差異は有意差を示す

水へ播種した後に発芽が始まった。また、積算発芽率は急速に上昇する傾向を示した。

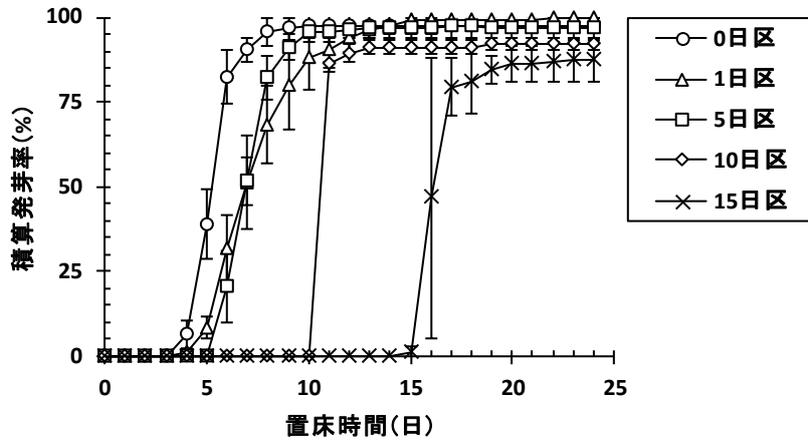


図 4.3.4 アカマツ種子の各処理区における発芽率の経時変化

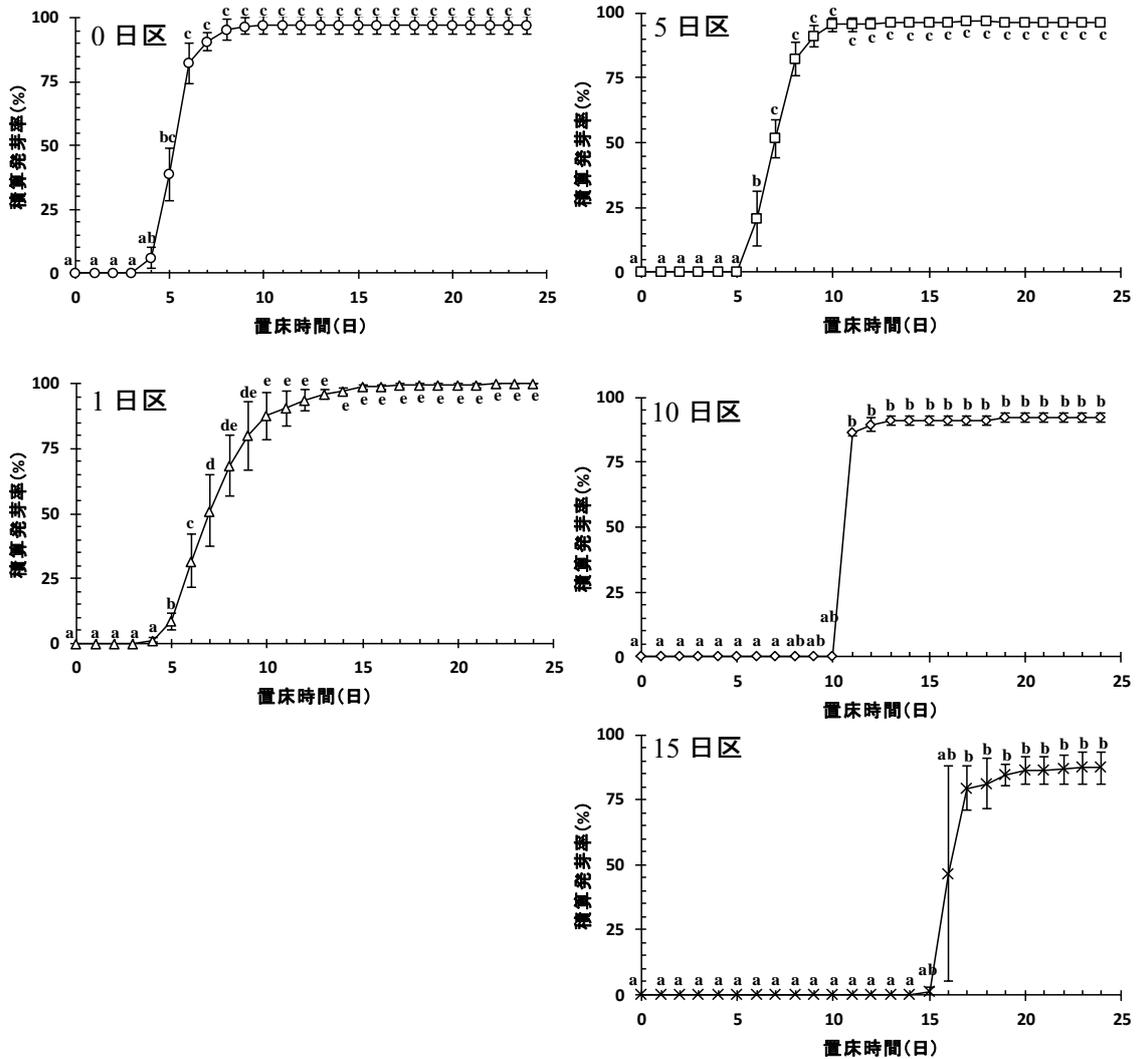


図 4.3.5 各処理区ごとのアカマツの発芽率の推移

※アルファベットの差異は有意差を示す

4.3.3.2 発芽指標 (GI)

図 4.3.6 に実験終了時のクロマツとアカマツの発芽指標 (GI) を示す。クロマツは 1~15 日区で 95~102 となり、塩水浸漬の長い処理区ほどわずかに低くなる傾向を示したが、各処理区間の有意差は認められなかった (Scheffé test, $p < 0.05$)。アカマツは 1~15 日区で 89~102 となり、クロマツと同様に塩水浸漬日数が長いほどやや低下する傾向を示したが、各処理区間の有意差は認められなかった (Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$)。また、処理区内ごとのクロマツとアカマツとの間の有意差も認められなかった (t 検定, $p < 0.05$)。

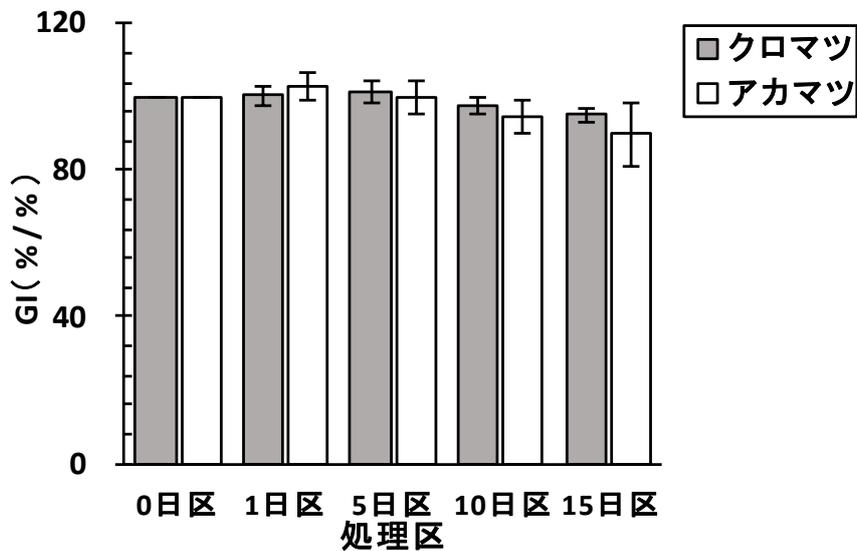


図 4.3.6 実験終了時の各処理区におけるクロマツとアカマツの発芽指標 (GI)

※エラーバーは標準偏差を示す。

4.3.3.3 平均発芽時間 (MGT)

図 4.3.7 に各処理区におけるクロマツとアカマツの平均発芽時間 (MGT) を示す。クロマツの平均発芽時間は塩水浸漬期間の長い処理区ほど、長くなる傾向を示した。また、各処理区間の平均発芽時間を比較した結果、15 日区と対照区である 0 日区との間に有意差が認められた (Scheffé test, $p < 0.05$)。一方で、1 日区、5 日区、10 日区と対照区である 0 日区との間には有意差は認められなかった。アカマツの平均発芽時間においても塩水浸漬期間が長い処理区ほど長くなる傾向を示した。アカマツの各処理区間の平均発芽時間を比較した結果、1 日区、5 日区、10 日区、15 日区と対照区である 0 日区との間に有意差が認められた (Scheffé test, $p < 0.05$)。また、各処理区内においてクロマツとアカマツの平均発芽時間の種間比較を行った結果、全ての処理区においてクロマツの平均発芽時間がアカマツの平均発芽時間より短くなり、1 日区、10 日区、15 日区において有意差が認められた (t 検定, $p < 0.05$)。

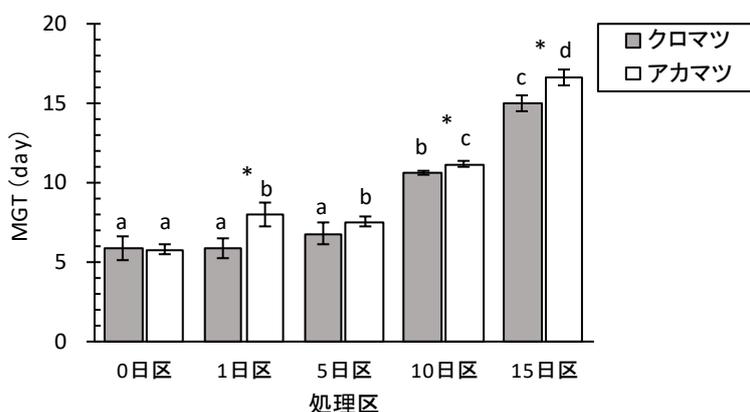


図 4.3.7 各処理区におけるクロマツとアカマツの平均発芽時間 (MGT)

※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処理区間で有意差があることを示す。(アカマツ Scheffé test, $p < 0.05$, クロマツ Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$)

※アスタリスクは処理区ごとに樹種間で有意差があることを示す (t 検定, $p < 0.05$)。

4.3.3.4 吸水率

図 4.3.8 にクロマツ種子の播種から発芽開始までの吸水率の変化を示す。また、図 4.3.9 にアカマツ種子の播種から発芽開始までの吸水率の変化を示す。クロマツの吸水率は播種から 1 日後に 0 日区で 26%, 1~15 日区で 15~22%まで上昇した。その後、発芽にかけて吸水率が全処理区において上昇する傾向を示した。0 日区と 1 日区は同様の傾きで上昇し、5~15 日区は 0~1 日区に比べ緩やかに上昇した。アカマツについても播種から 1 日後に 0 日区で 14%, 1~15 日区で 11~14%まで上昇した後、発芽にかけて吸水率が上昇する傾向が認められた。また、アカマツにおいても吸水率の上昇は全体的にはクロマツ同様緩やかであった。

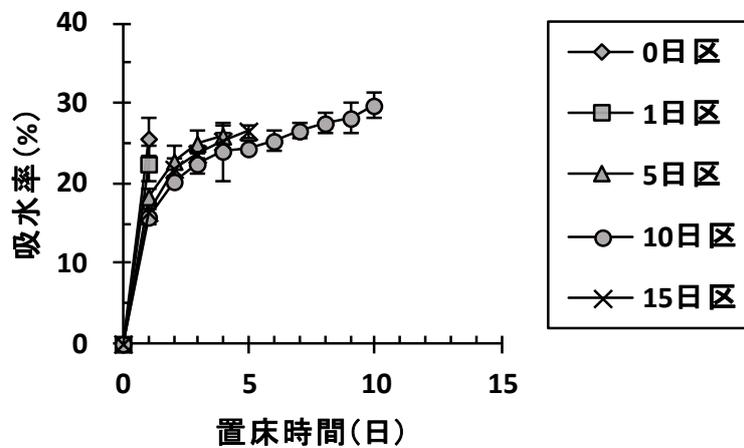


図 4.3.8 クロマツ種子の各処理区における吸水率の経時変化

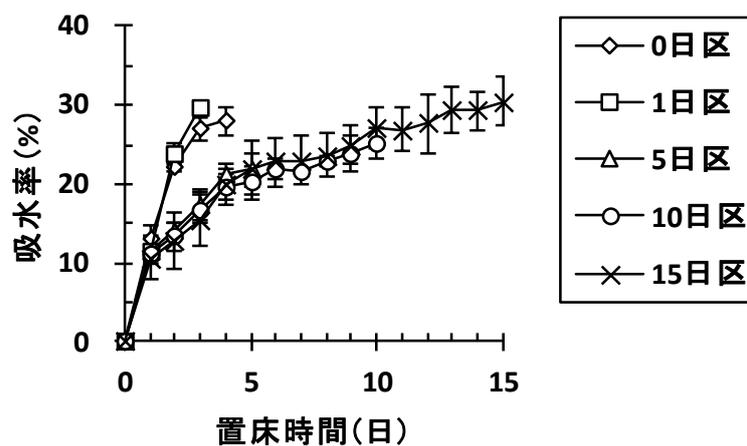


図 4.3.9 アカマツ種子の各処理区における吸水率の経時変化

4.3.4 考察

本研究では、短期的な塩水浸漬がクロマツ、アカマツの発芽に及ぼす影響を実験的に評価しようとした。種子を1~15日間塩水浸漬した後真水に移す発芽実験では、クロマツとアカマツともに発芽率は真水浸漬後に急速に上昇し、両種とも最終的な発芽指標に塩水浸漬期間の長さの違いによる有意差は認められなかった(図 4.3.6)。なお、塩水中での発芽はクロマツでのみ見られた(図 4.3.1, 図 4.3.4)。平均発芽時間は塩水浸漬日数が長いほど長期化し、クロマツで10日以上、アカマツで1日以上浸漬で対照区に比べ有意に低くなった(図 4.3.7)。加えて、発芽実験と同条件におかれたクロマツ、アカマツ種子の吸水実験の結果、両種ともに種子内へ塩水が侵入している可能性が示された(図 4.3.8, 図 4.3.9)。種子内へ塩水が侵入すると代謝が攪乱されることによる発芽率の低下(Ahmad *et al.*, 2013; Kandil *et al.*, 2012; Karim *et al.*, 1992) や平均発芽時間の増加(Guma *et al.*, 2010; Kandil *et al.*, 2012;)

Meloni *et al.*, 2008 ; Tsegay and Gebrellassie, 2014) が発生すると言われている。クロマツおよびアカマツにおいても種子内への塩水の侵入による代謝攪乱の可能性が浅野 (1963) により指摘されており、培地の塩分濃度が高いほど発芽の開始が遅延し発芽率が低下することが明らかになっている。よって、本研究で見られたクロマツ、アカマツの平均発芽時間の低下も、発芽前の短期的な塩水浸漬期間中に種子内に侵入した塩水により代謝が攪乱されたことの効果と考えられる。

本研究において、種子の塩水浸漬による発芽遅延はクロマツで塩水浸漬期間が 5~15 日以上の処理区で認められたのに対し、アカマツでは 1 日以上処理区において認められた (図 4.3.7)。また、クロマツの種子は塩水浸漬中に発芽を開始するものが見られた (図 4.3.1)。これらのことから、クロマツはアカマツに比べ塩水冠水への耐性が高いことが示された。一方、クロマツ、アカマツともに 15 日までの短期的塩水浸漬の後に真水に移した種子の発芽率は高かった (図 4.3.3)。Tobe *et al.* (2001) による中国の沙漠に生育する低木の種子を対象とした発芽実験では、塩水により培養した後真水に浸漬することで発芽能力が回復する樹種と回復しない樹種が存在することが確認されている。本研究の結果は、クロマツ、アカマツでは発芽前の塩水浸漬により発芽阻害ないし平均発芽時間低下が発生するが、早期に脱塩されれば発芽が回復することを示したものである。

大澤ら (2016) は 2011 年 3 月の津波で被災した東北地方の海岸林において被災年に実生が発生したのはクロマツのみであったこと、およびアカマツは被災年の翌年から実生が発生したことを確認し、この違いの原因として両種の発芽あるいは実生の初期生長における耐潮性の差が関与した可能性を指摘している。しかし、本研究の結果は、短期間の塩水浸漬によりクロマツ、アカマツの発芽指標は低下せず種間の差はない。すなわち両種とも塩水浸漬直後に発芽できることを示している。したがって、塩水浸漬した種子の発芽率のみから、大澤ら (2016) が報告したクロマツ、アカマツの回復状況の違いを説明することはできないかもしれない。一方、塩分ストレスは発芽後の初期生長に対しても害作用を及ぼすことが既往研究 (KATEMBE *et al.*, 1998 ; Sima *et al.*, 2013 ; Mahdavi *et al.*, 2007 ; Meloni *et al.*, 2008) により明らかにされている。よって、今後は短期的塩水浸漬が初期生長におよぼす影響について把握する必要があると考えられる。

4.4 第4章のまとめと総合考察

第4章において明らかとなったことを図4.4.1, 図4.4.2に示す。

クロマツの種子を用いた塩水浸漬実験より、クロマツの種子は海水とほぼ同濃度の NaCl 溶液下では発芽が見られず、発芽に必要な水分量まで吸水することができないことが分かった。また、4.3 より、アカマツについても海水とほぼ同濃度の NaCl 溶液下で発芽は認められていない。一方、塩水浸漬期間の長いほど発芽が遅延したが、真水へ種子を播種した後はクロマツ、アカマツともに対照区と同等の発芽率まで上昇した。種子の吸水は水ポテンシャルの差によって行われている（鈴木, 2003）。クロマツとアカマツの種子ともに塩水中では、塩水と種子内の水ポテンシャルの勾配が緩やかとなることによって、吸水が阻害されており、発芽が抑制される。その結果、塩水浸漬期間の長いほど発芽が遅延したと考えられる。塩水から真水へ播種すると、種子内と真水の水ポテンシャルの勾配が大きくなり種子が吸水できるようになったと考えられる。その結果、発芽に必要な量の水分を吸水して種子が発芽したと考えられる。

本実験においては、クロマツとアカマツともに塩水へ15日程度浸漬した種子であっても、真水へ浸漬した後の発芽率の低下などの阻害的な影響は認められなかった。既往研究において、沙漠に生育する低木（Tobe *et al.*, 2001）や海浜植物（Woodell, 1985）についても塩水浸漬後、真水へ浸漬すると発芽率が上昇する種が存在することが認められている。一方で、塩水へ浸漬している期間の長いほど種子内へNaが蓄積していることがクロマツとアカマツともに認められ、イオンバランスも攪乱されている可能性がK/Na比から認められた。Naは種子の生理的な代謝などに対する阻害的な影響があるとされており（Khan and Rizvi, 1994）、その結果として発芽率の低下や発芽の遅延が発生すると言われている（Ahmad *et al.*, 2013）。また、Naが種子内に蓄積することで種子の発芽にとって有効な種子貯蔵物質を減少させることが確認されている（Ahmad *et al.*, 2013）。よって、15日程度の短期的な塩水浸漬では、クロマツとアカマツの種子の発芽種子数への影響は小さいが、より長期間の塩水浸漬によって種子内へNaが蓄積すると代謝の攪乱や有効な種子貯蔵物質の減少によって発芽に対して阻害的な影響が発生すると考えられる。

クロマツに比べアカマツの種子の方がNaを蓄積しやすく、イオンバランスの攪乱や、発芽の遅延などの影響が大きいことが分かった。クロマツの方がアカマツに比べて種子の塩水冠水耐性は高いことが示された。既往研究（浅川ら, 1981; 郷, 1956）より、クロマツの種子の方がアカマツの種子より大きく、種皮が厚い可能性が示されている。よって、クロマツはアカマツに比べ種皮の透過性が低く、Naの侵入が抑制されたため、Naによる阻害的影響がアカマツより軽微であったと考えられるが、種子の構造の差異や生理的メカニズムについての更なる検討が必要である。

章	第4章 発芽における塩水浸漬の影響		
生育段階の定義と模式図	【種子～発芽】		
実験対象	クロマツ	クロマツ・アカマツ	
実験	4.1 塩分ストレスが吸水と発芽に及ぼす影響	4.2 塩水浸漬期間と塩分蓄積量の関係	4.3 塩水浸漬期間と発芽率の関係
塩水冠水の影響	<ul style="list-style-type: none"> ・吸水の阻害 海水とほぼ同濃度のNaCl溶液では、発芽に必要な水分量を確保できない。 ・発芽の抑制 海水とほぼ同濃度のNaCl溶液では、発芽がほぼ認められなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・Naの蓄積 塩水浸漬期間の長いほど、種子内のNa含有率が上昇する。アカマツの方が含有率は高かった。 ・K/Na比の低下 Na含有率の上昇にともない、種子内のイオンバランスが乱れている可能性が認められた。 	<ul style="list-style-type: none"> ・発芽の遅延 塩水浸漬期間の長いほど遅延する。アカマツの方が遅延の影響は大きかった。
短期的塩水冠水に対する耐性		クロマツ	
		アカマツ	

図 4.4.1 第4章のまとめ

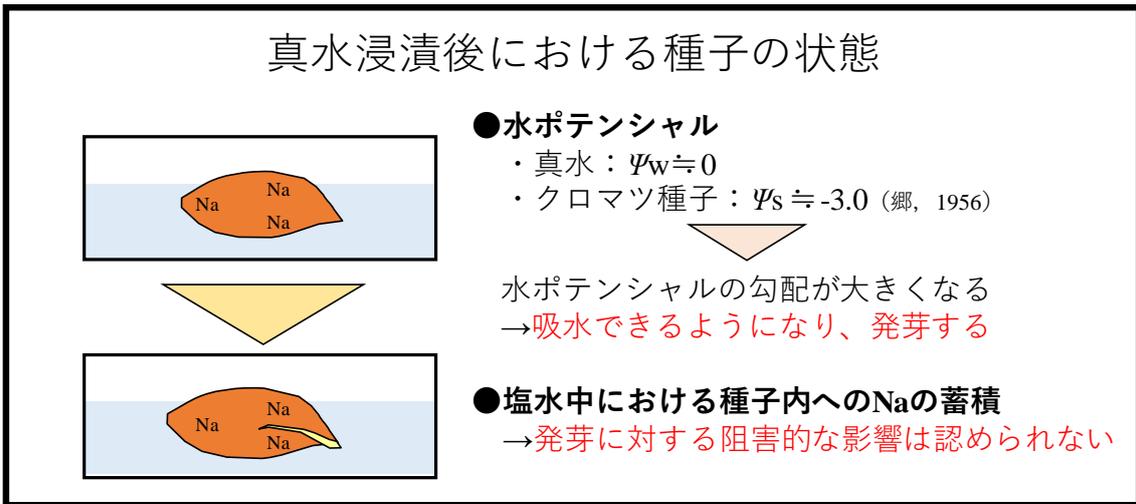
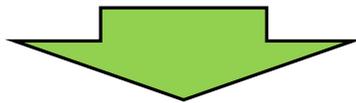
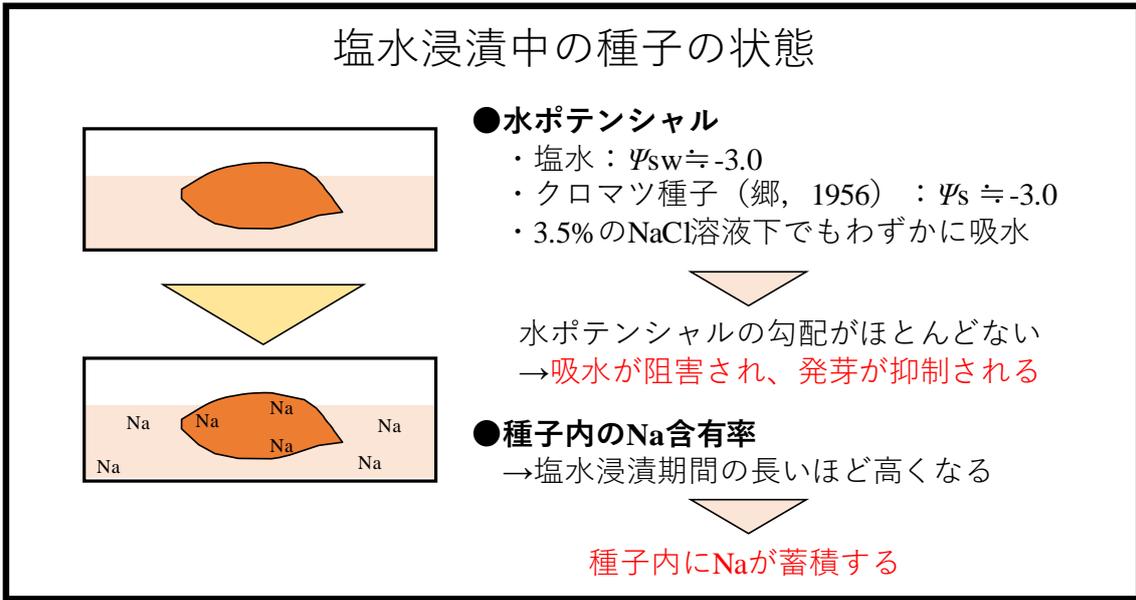


図 4.4.2 短期的塩水浸漬が種子へ与える影響の模式図

第5章 短期的塩水浸漬による出芽と初期生長への影響

第5章では短期的な塩水浸漬が初期生育段階における発芽および生長に与える影響について注目した。第5章の構成と概要を図5.1に示す。短期的な塩水浸漬が及ぼす影響について各項において検証した影響を示す。5.1項ではクロマツを対象とし、種子の発芽および出芽へ及ぼす影響について検証した。5.2項ではクロマツとアカマツの種子を対象として、発芽直後の生長に与える影響について検証した。5.3項ではクロマツと広葉樹を対象として、出芽と初期生長へ及ぼす影響について検証した。

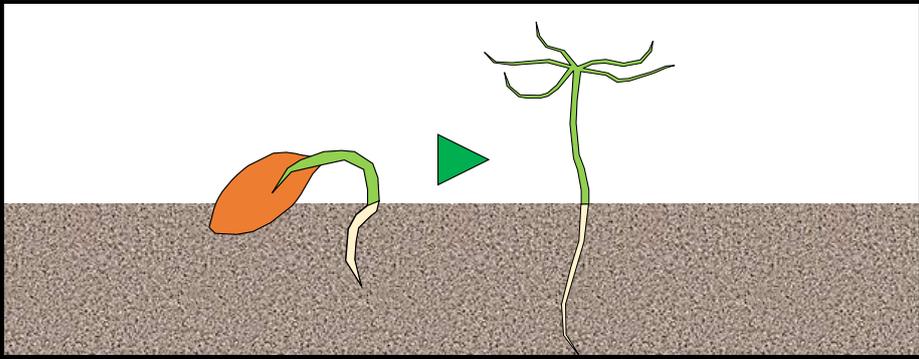
章	第5章 短期的塩水浸漬による出芽と初期生長への影響		
生育段階の定義と模式図	【 出 芽 ～ 実 生 】		
			
実験対象	クロマツ	クロマツ・アカマツ	クロマツ・広葉樹
実験	5.1 種子の発芽及び出芽へ及ぼす影響	5.2 発芽直後の生長に与える影響	5.3 出芽と初期生長へ及ぼす影響
実験期間	2015年8/31～10/2	2017年1/11～2/17	2018年8/19～10/10
試験区	0日区 (対象区) 1日区 6日区 10日区	0日区 (対象区) 1日区 5日区 10日区 15日区	0日区 (対象区) 1日区 5日区 10日区 15日区
各試験区の播種数	15粒	15粒	15粒
調査項目	出芽率 発芽率	出芽数 苗高・根長 新鮮・乾燥重量	発芽種子数 発芽速度 種子の吸水率

図 5.1 第5章の構成と概要

5.1 短期的塩水浸漬がクロマツ種子の発芽および出芽へ及ぼす影響

5.1.1 実験目的

クロマツ種子が津波や高潮により一時的に塩水浸漬した場合、発芽や出芽にどのような影響がおよぼされるか検証することを目的として短期的な塩水浸漬実験を行った。

5.1.2 実験概要

東北地方太平洋沖地震に伴う津波と台風 13 号による高潮における塩水冠水期間（谷口，1954；千葉ら，2012；宮本ら，2012）を参考に，種子が播種されたビニルポットを一定期間塩水へ浸漬させ，その後真水により塩分を洗い流して出芽と発芽の観察を行った。実験は2015年8月31日から同年の10月2日まで行い，播種から32日間の出芽数および実験終了時の発芽種子数を記録した。

5.1.2.1 供試植物

実験では，クロマツ (*Pinus thunbergii* Parl) の種子を用いた。種子は2014年10月に湘南海岸（神奈川県藤沢市）において採取したものである。実験開始時に量った種子80粒の平均重量はクロマツで $0.015 \pm 0.001\text{g}$ であった。

5.1.2.2 実験方法

実験は東京都市大学環境学部，フィールド演習室内のグロースチャンバー内（MLR-351，SANYO）において行った。ビニルポット（高さ9 cm，上部直径9.5 cm，底面直径6.5 cm）へ川砂を充填し，ひとつのビニルポットへクロマツの種子を15粒播種した。種子は川砂の表面から約1 cmの深さに播種した。処理区は塩水への浸漬期間ごとに对照区である0日区，処理区である1日区，6日区，10日区を設けた。各処理区には3ポットずつビニルポットを用い，3回繰り返しの実験とした。種子を播種したビニルポットは0日区を除き，処理区ごとに設定した期間の塩水浸漬処理を行った（写真5.1.1）。なお，実験に使用した塩水は水道水へNaClを溶解させ，NaClの濃度を海水とほぼ同濃度の3.5%に調整したものをを用いた。塩水の水ポテンシャルについて参考資料1をもとに算出した結果，NaCl濃度が3.5%で約-3.0MPaとなった。塩水浸漬処理を行ったビニルポットは約500 mLの真水を地表面全体にまんべんなく灌水し，塩分を洗い流した。その後，グロースチャンバー内へ設置し真水を灌水しながら栽培した（写真5.1.2）。ビニルポットへの灌水は川砂の表面がわずかに乾き始めたときに行った。グロースチャンバー内は気温25°Cの恒温条件とし，光は5000Lx.に設定し12時間ごとに明転と暗転を繰り返した。実験期間中，地表面から胚軸が確認できたら出芽とし，各ポットの出芽数を記録した。出芽数の記録は，実験開始から32日間，1日おきに行なった。6日区のみ30日から32日にかけて出芽数が増加したため36日目まで出芽数の記録を行ったが，33日目以降は，出芽数が増加しなかった。よって，実験結果としては6日

区も 32 日までの結果を示した。出芽数の記録を終了した後、各ポットの種子を掘り出して幼根が目視できる種子を発芽した種子として発芽種子数を記録した。出芽数から出芽率、出芽数と発芽種子数から発芽率を算出した。

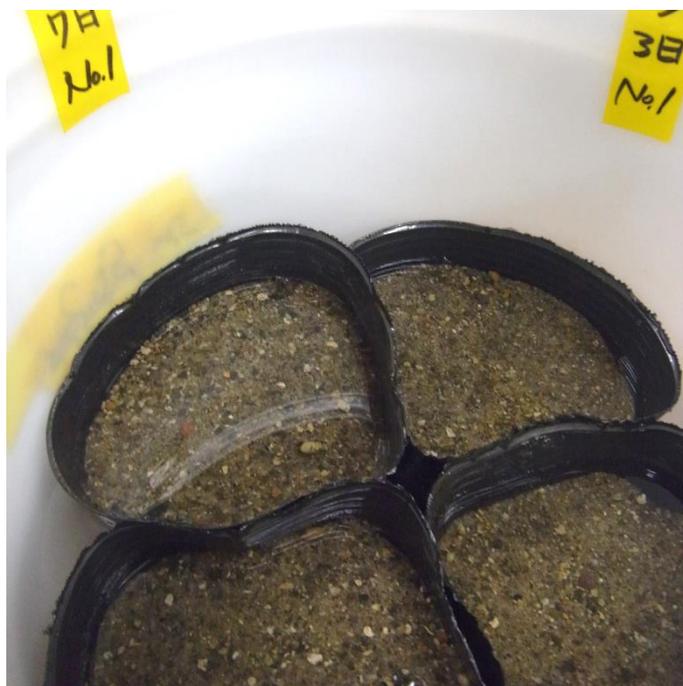


写真 5.1.1 塩水浸漬処理の様子



写真 5.1.2 グロースチャンバー内の様子

5.1.2.3 平均出芽時間の算出

塩水浸漬期間の違いによって出芽が遅延するか確認するため、平均出芽時間を式 (5.1.1) によって算出した。なお、式 (5.1.1) は Meloni *et al.* (2008) の平均発芽時間の式をもとに作成した。平均出芽時間とは、1 粒の種子が出芽するまでにかかった時間の平均値を表す指標である。式 (5.1.1) の x は実験を開始してからの経過日数を示し、 f は x 日において計測された出芽率を示す。

$$MST = \frac{\sum(fx)}{\sum f} \quad (5.1.1)$$

5.1.2.4 統計解析

処理区間の出芽率、苗高、平均出芽時間の有意差について統計解析を行った。Levene 検定により等分散性の検定を行い、等分散性が認められたものについては Tukey 検定、等分散性が認められなかったものについては Kruskal Wallis 検定をおこなった。解析ソフトは SPSS (SPSS Statistics ver. 19, IBM) を用いた。

5.1.3 結果

5.1.3.1 出芽率の推移

実験開始から実験終了までの各処理区における出芽率の経時変化を図 5.1.1 に、平均出芽時間を図 5.1.2 に示す。図 5.1.1 より、0 日区と 1 日区は実験開始から 10 日後に出芽がはじまり、出芽開始直後に急激に出芽率が上昇した。一方、6 日区は実験開始から 16 日後、10 日区は実験開始から 20 日後に出芽がはじまったが、0 日区および 1 日区に比べて出芽率の変化が緩やかであった。図 3-2 より、平均出芽時間は塩水浸漬期間が長い処理区ほど長くなり、出芽が遅延する傾向が見られた。また、0 日・1 日区の平均出芽時間と 6 日・10 日区の平均出芽時間との間に有意差が認められた。

5.1.3.2 発芽率と出芽率

各処理区における発芽率を図 5.1.3 に、出芽率を図 5.1.4 に示す。また、塩水浸漬期間と発芽率および出芽率の関係を示したグラフを図 5.1.5 に示す。

図 5.1.3 より、発芽率は 0 日区で 85.0%、1 日区で 95.0%、6 日区で 87.0%、10 日区で 90.0% となり、各処理区の間には有意差は見られなかった。

図 5.1.4 より、実験終了時の出芽率は 0 日区が 85.0%、1 日区が 95.0%、6 日区が 22.5%、10 日区が 12.5% となった。1 日区が最も出芽率が高くなり、0 日区が次いで高くなった。6 日区と 10 日区は 0 日区および 1 日区に比べて 82.5~62.5% 低下し、有意差が認められた。6 日以上塩水浸漬を行った処理区では塩水浸漬期間が長いほど出芽率が低下した。各処理区の出芽率と発芽率の比較を図-5 に示す。0 日区と 1 日区の出芽率と発芽率は同じ値となったが、6 日区および 10 日区は出芽率に比べて発芽率が 64.5~77.5% 高くなった。すな

わち，0日区と1日区は発芽した種子のすべてが出芽したが，6日区と10日区では発芽後に出芽しなかった種子があったことが確認された。

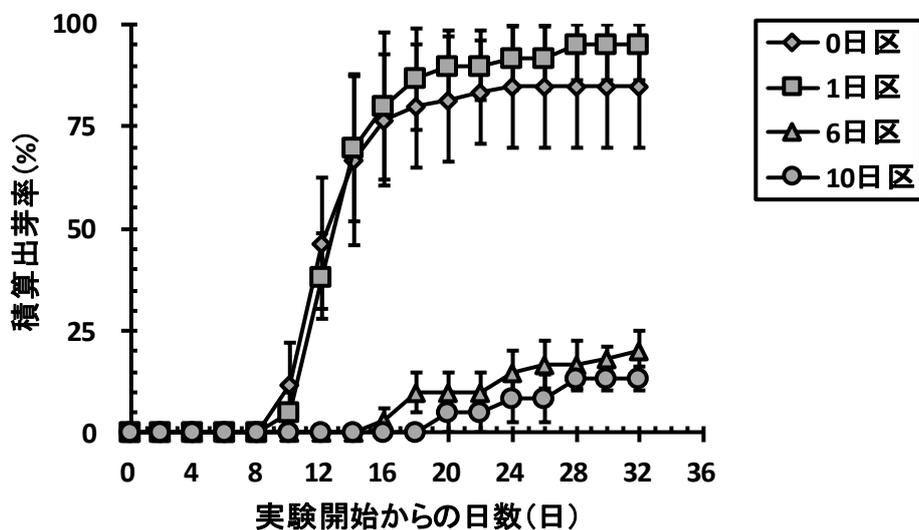


図 5.1.1 実験開始から終了までの出芽率の変化

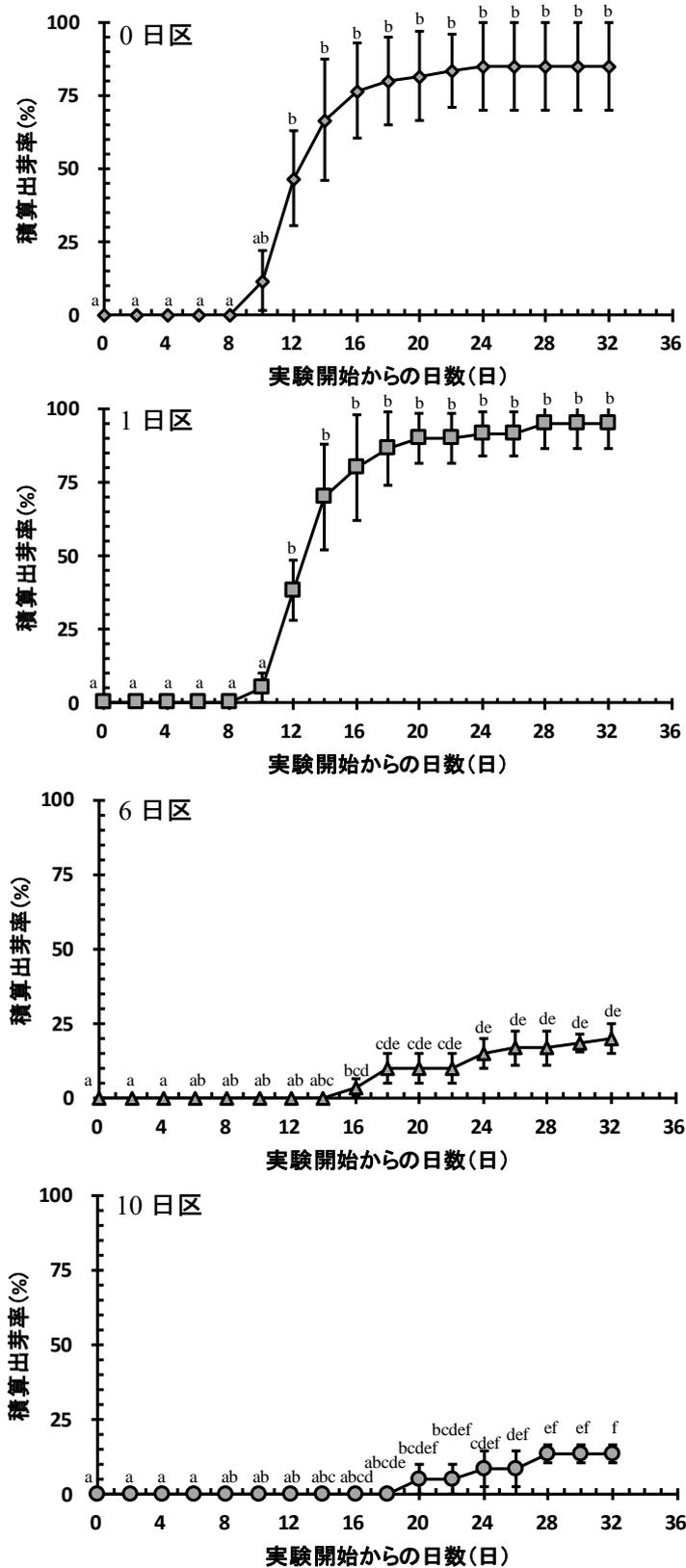


図 5.1.2 各試験区ごとの積算出芽率の推移
 ※アルファベットの差異は有意差を示す

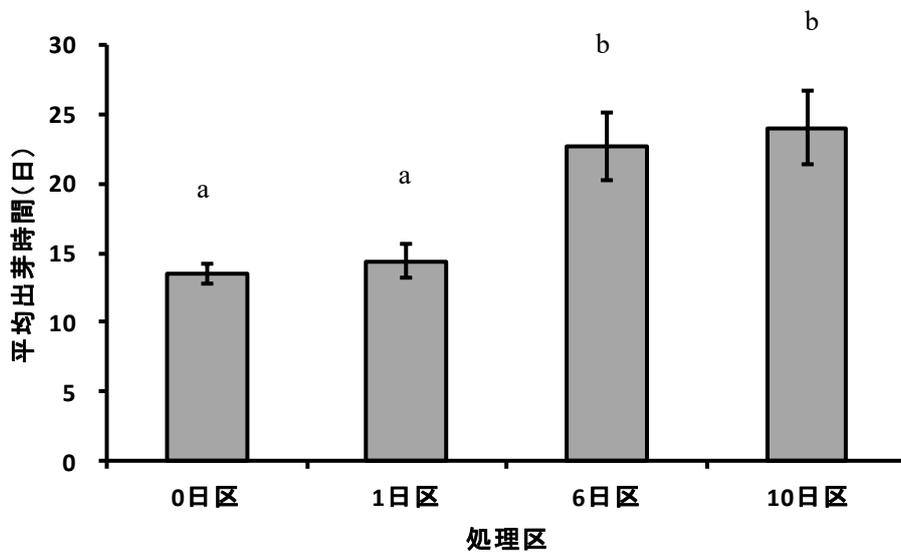


図 5.1.3 各処理区における平均出芽時間
 ※アルファベットの差異は有意差をあらわす ($p < 0.05$)

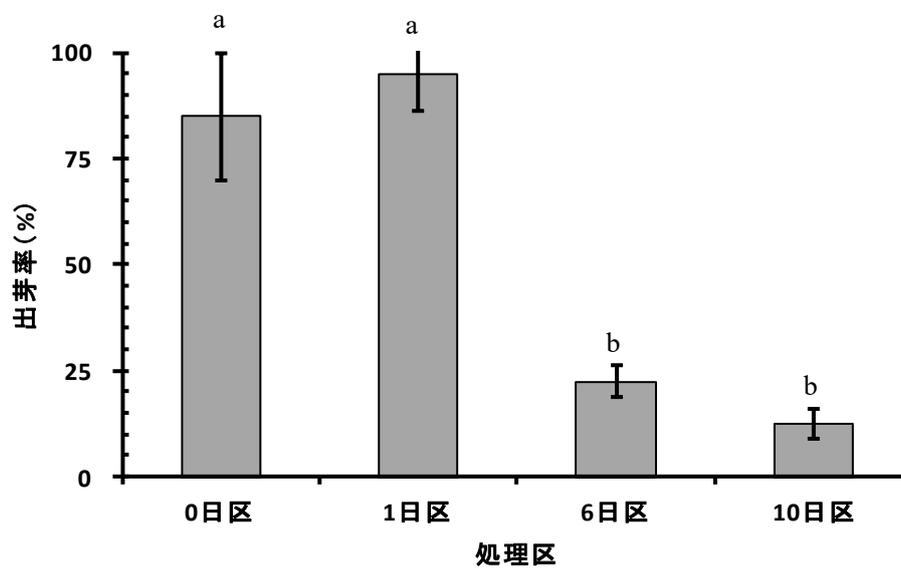


図 5.1.4 各処理区における実験終了時の出芽率
 ※アルファベットの差異は有意差をあらわす ($p < 0.05$)

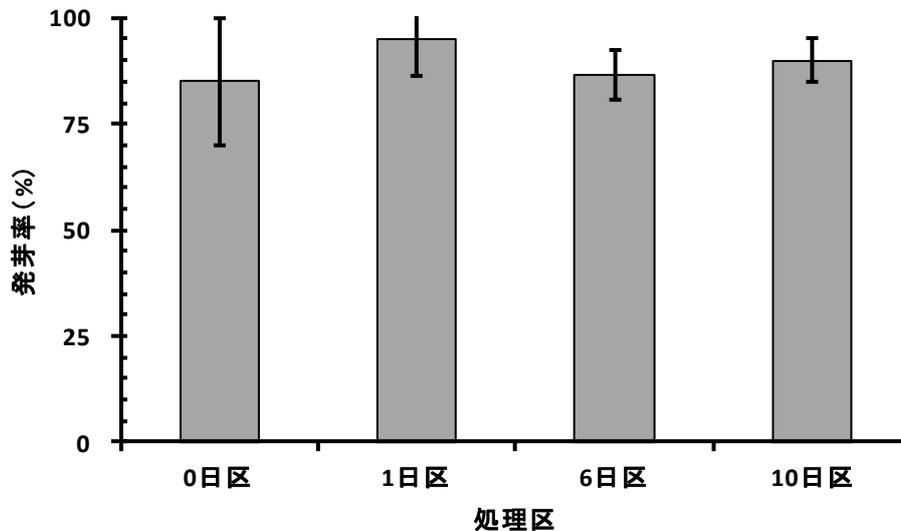


図 5.1.5 各処理区における実験終了時の発芽率
 ※アルファベットの差異は有意差をあらわす ($p < 0.05$)

5.1.4. 考察

5.1.4.1 実験終了時の発芽率

実験終了時の発芽率については塩水浸漬期間の差異による有意差は認められなかった (図 5.1.3)。塩分ストレスは種子の発芽を抑制されているが (Ahmad *et al.*, 2013), 既往研究において、塩水を含んだ培地で発芽を抑制されていた種子が、塩水を洗い流し真水を含んだ培地へ播種されると発芽することが報告されている (Li *et al.*, 2010 ; Tobe *et al.*, 2001)。また、種によっては本研究と同様に真水に播種されたときの発芽率と塩水処理から真水へ播種したときの発芽率が同等になることが確認されている (Tobe *et al.*, 2001)。本実験においては発芽の開始が塩水浸漬中か塩水浸漬後なのか明確ではないが、既往研究と同様にクロマツの種子の発芽は発芽前の塩水浸漬による抑制的な影響をほとんど受けなかったと推察される。

5.1.4.2 実験終了時の出芽率

実験の結果、塩水浸漬期間が長いほど出芽が遅延し (図 5.1.2), 出芽率の変化は緩やかになった (図 5.1.1)。また、実験終了時の出芽率は 6 日区と 10 日区で 0 日と 1 日区に比べて著しく低下した (図 5.1.4)。培地の塩分によって、発芽の遅延や種子の胚軸の伸長など初期生長が抑制されると言われている (Ahmad *et al.*, 2013)。既往研究においても塩分濃度が高く、塩分ストレスが高い培地ほど発芽の遅延や幼根や実生の生長が抑制されることが認められている (Kandil *et al.*, 2012 ; Karim *et al.*, 1992 ; Mahdavi *et al.*, 2007 ; Meloni *et al.*, 2008)。よって、本実験では発芽前の種子は塩水に浸漬する期間が長いほど塩分の影響を強く受け、

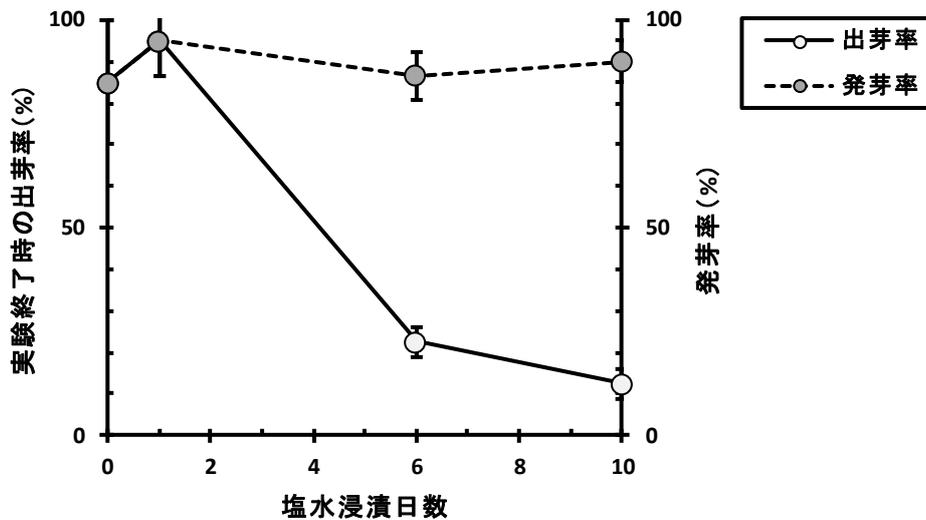


図 5.1.5 各処理区の出芽率と発芽率の比較

塩水を洗い流し真水による灌水を行った後においても出芽の遅延や、出芽率の低下が発生したと考えられる。また、塩水浸漬期間が6日以上処理区において出芽率の著しい減少が見られたことから（図 5.1.4）、ある一定期間以上の塩水浸漬によって種子の出芽が著しく抑制される閾値のようなものが存在すると考えられる。

5.1.5 まとめ

以上の結果より、短期的塩水浸漬はクロマツ種子の発芽より、発芽後の胚軸の生長に対する影響が大きい可能性が示唆された。また、塩水浸漬期間が長いほど発芽後の胚軸の伸長に対する塩分の阻害的な影響は強くなり、その結果として塩水浸漬期間の長い処理区ほど出芽が遅延し、出芽数が減少したと考えられる。

本実験により、海岸林において津波や高潮によって塩水冠水が発生したとき、土壌中の塩分が残留する期間が長いほど出芽が抑制され、発生する実生数が減少する可能性が示された。海岸林の減風機能や津波減衰機能は立木密度や密閉度が関係している（中島・岡田，2011；佐々木ら，2013）。実生数が減少することにより、再生後の海岸林の立木密度や密閉度が低下すると、海岸林は防災機能を十分に発揮できない恐れがある。よって、天然更新による海岸林の再生では、津波や高潮による塩水冠水後に速やかに除塩し、発生する実生数の減少を抑えることが重要である。

海岸林は沿岸域に置いて日常的に発生する潮風や飛砂などに対する防災機能を担っていることから、迅速に再生させることが求められる。よって今後は、発生した実生の生長について経時的な推移を計測することで、天然更新による再生速度に対する塩水冠水期間の影響を把握することが重要である。また、クロマツの出芽が抑制されたことについて、そのメカニズムに関する研究も必要である。

5.2 短期的な塩水浸漬がクロマツとアカマツ種子の発芽直後の生長へ与える影響

5.2.1 目的

本実験では、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。

5.2.2 実験概要

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；千葉ら，2012；宮本ら，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。実験は2017年1月11日から同年の2月17日かけて行った。

5.2.2.1 実験材料

実験対象種としてクロマツ (*Pinus thunbergii* Parl) とアカマツ (*Pinus densiflora* Siebold et Zucc.) を用いた。クロマツの種子は2016年の10月に神奈川県藤沢市で採取したものを、また、アカマツの種子は2016年10月に岩手県盛岡市にて採取されたものを用いた。種子200粒の平均重量はクロマツで $0.0138 \pm 0.0005\text{g}$ 、アカマツで $0.0095 \pm 0.0004\text{g}$ であった。

5.2.2.2 実験方法

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、各処理区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。参考資料1をもとに塩水の水ポテンシャルの算出をした結果、約-3.0MPaとなった。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°C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°C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。

5.2.2.3 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°C 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 反復として各処理区 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。

5.2.2.4 発芽直後の初期生長および生長量の測定

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°C 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出芽した個体とし，各処理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，苗高は各処理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。

5.2.2.5 生長比率の算出

クロマツとアカマツともに 0 日区に対してどの程度影響を受けたかの比較を行うため，各処理区の苗高，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 (5.2.1) を用いて 0 日区との比率を算出した。

$$0 \text{ 日区との比率} = \text{各処理区の値} / 0 \text{ 日区の値} \times 100 \quad (5.2.1)$$

なお，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，各処理区の出芽種子数の関係から，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 つの処理区をまとめた 5-15 日区とした。

5.2.2.6 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 Kuruskal-Wallis 検定 ($p < 0.05$) 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)。

5.2.3 結果

5.2.3.1 出芽率

図 5.2.1 にクロマツおよびアカマツの各処理区における出芽率の推移を示す。また、図 5.2.2 に実験終了時の各処理区における出芽率を示す。図 5.2.1～図 5.2.2 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処理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 5.2.2 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処理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 日区の間に、アカマツでは 0 日区と 5 日区・10 日区・15 日区の間に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 処理区に分けて解析を行った。

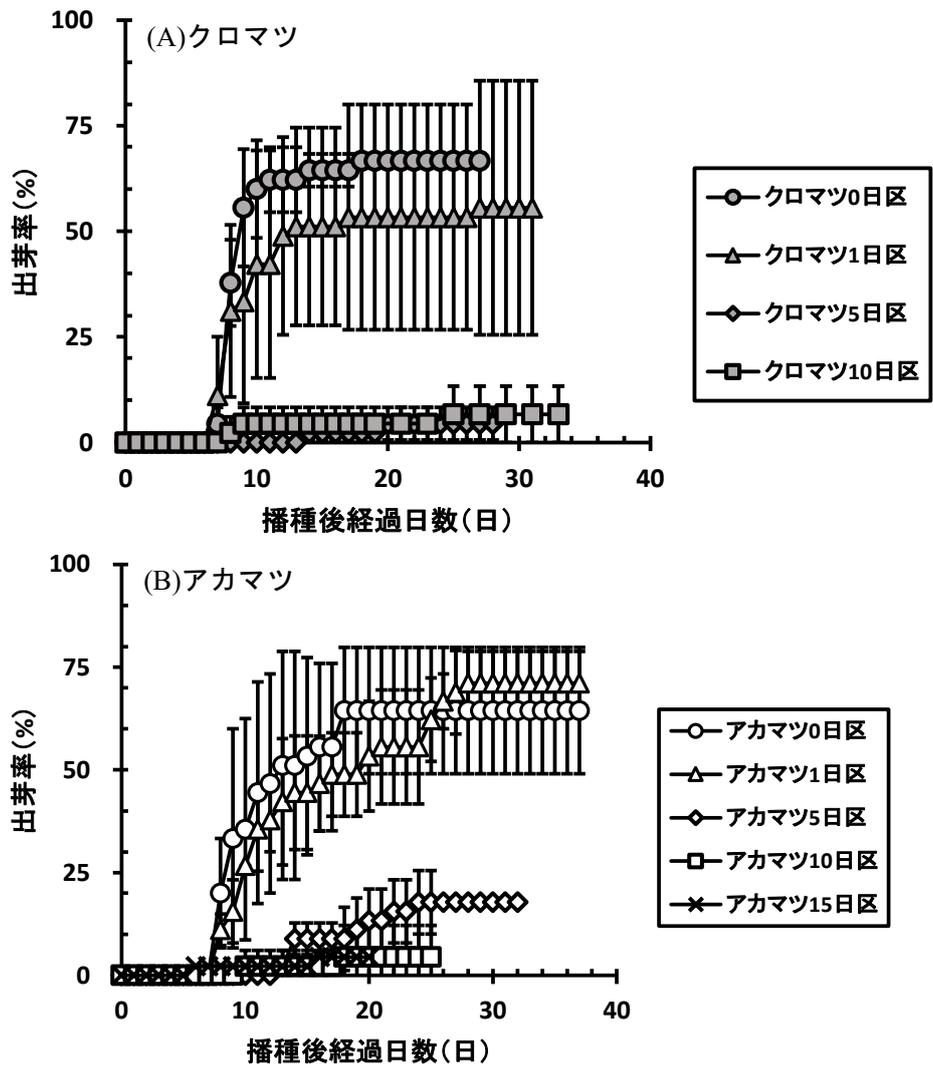


図 5.2.1 クロマツ (A) とアカマツ (B) の処理区ごとの出芽率の推移

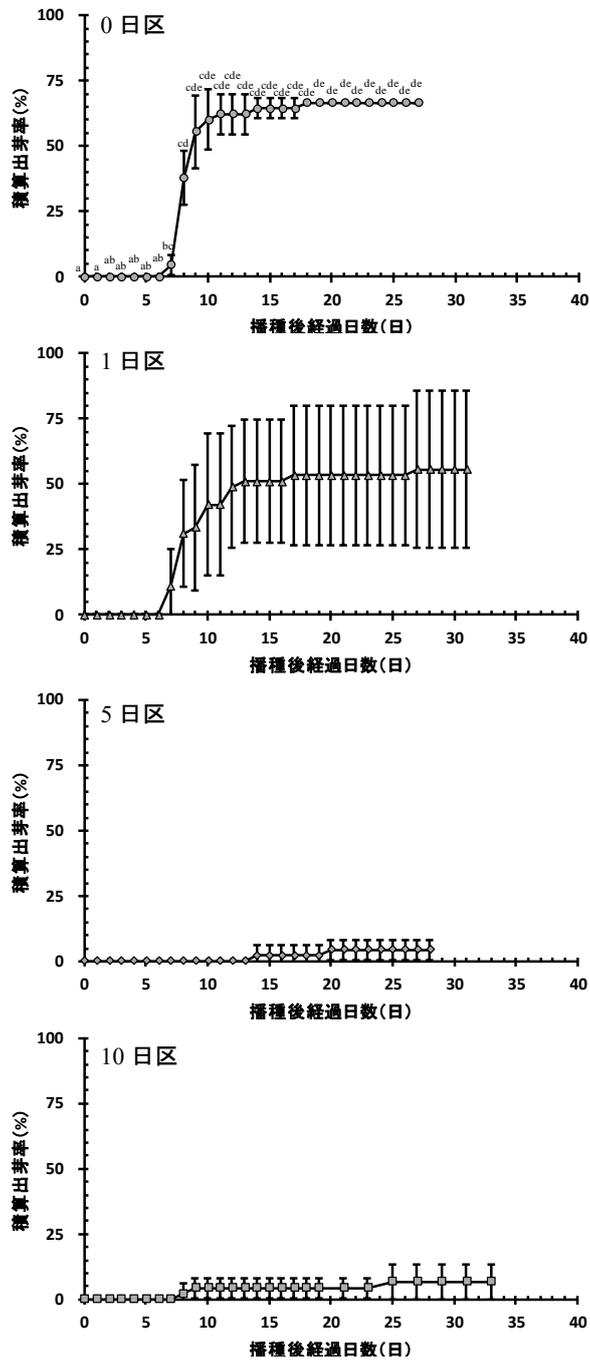


図 5.2.2 クロマツの各処理区における積算出芽率の推移
 ※アルファベットの差異は有意差を示す

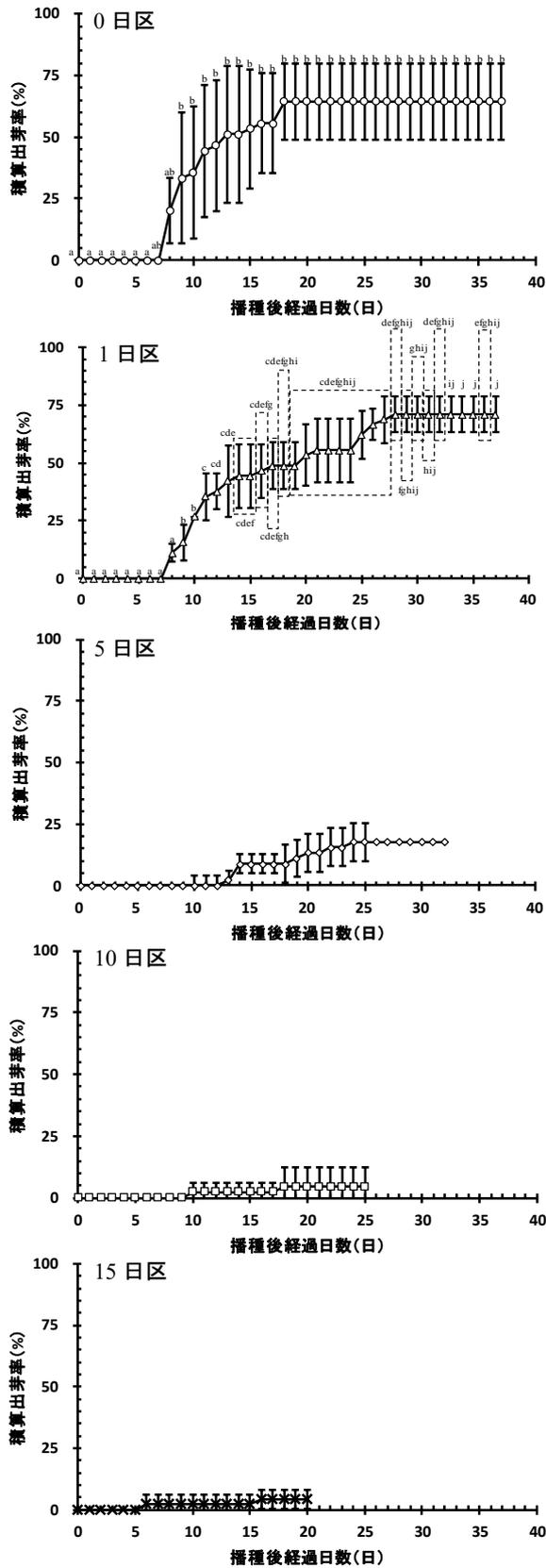


図 5.2.3 アカマツの各処理区における出芽率の推移
 ※アルファベットの差異は有意差を示す

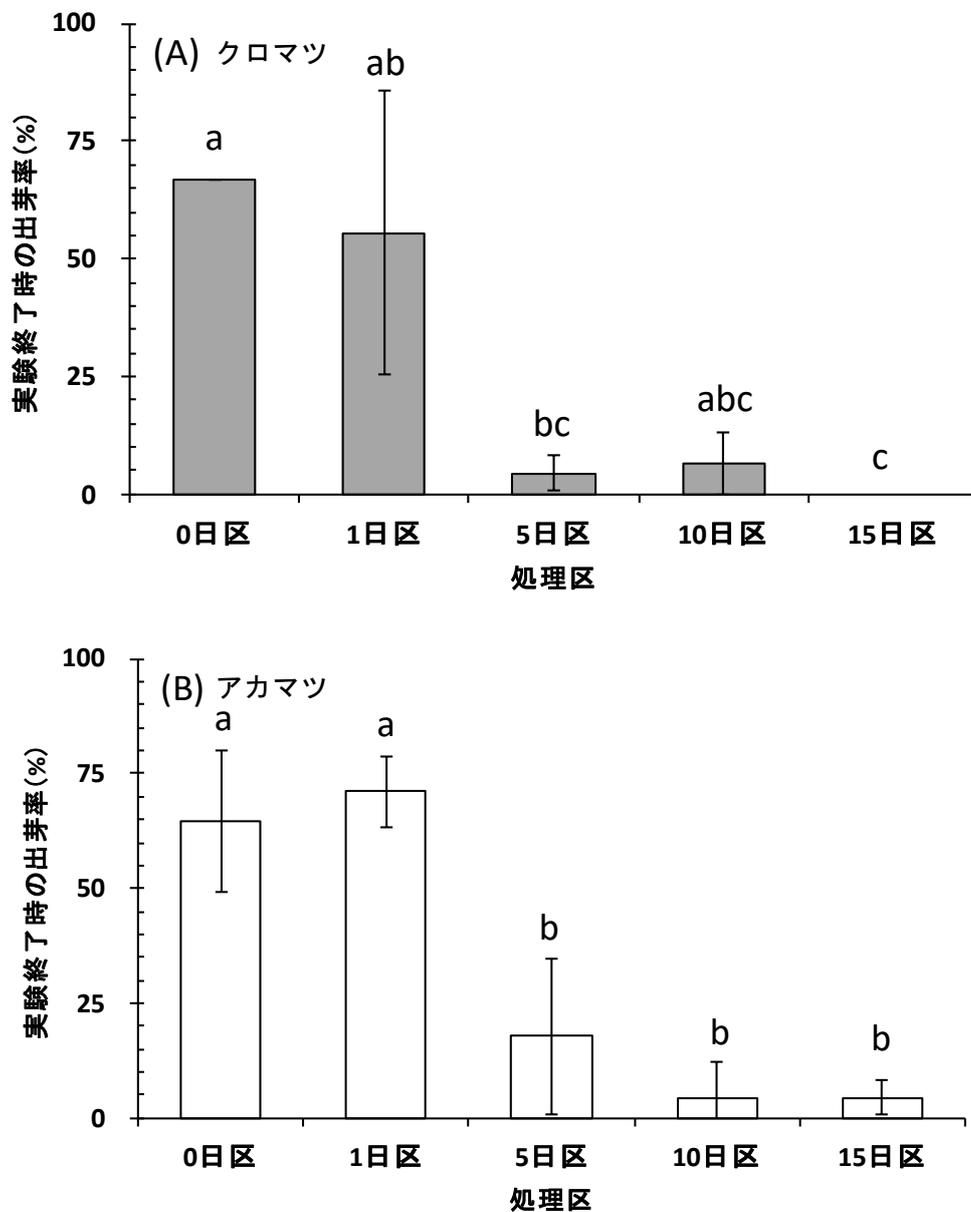


図 5.2.4 各処理区におけるクロマツ (A) とアカマツ (B) の出芽率の比較

※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処理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, $p < 0.05$)

5.2.3.2 苗高の推移

図 5.2.5 にクロマツとアカマツの苗高の推移を示す。図 5.2.5 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。

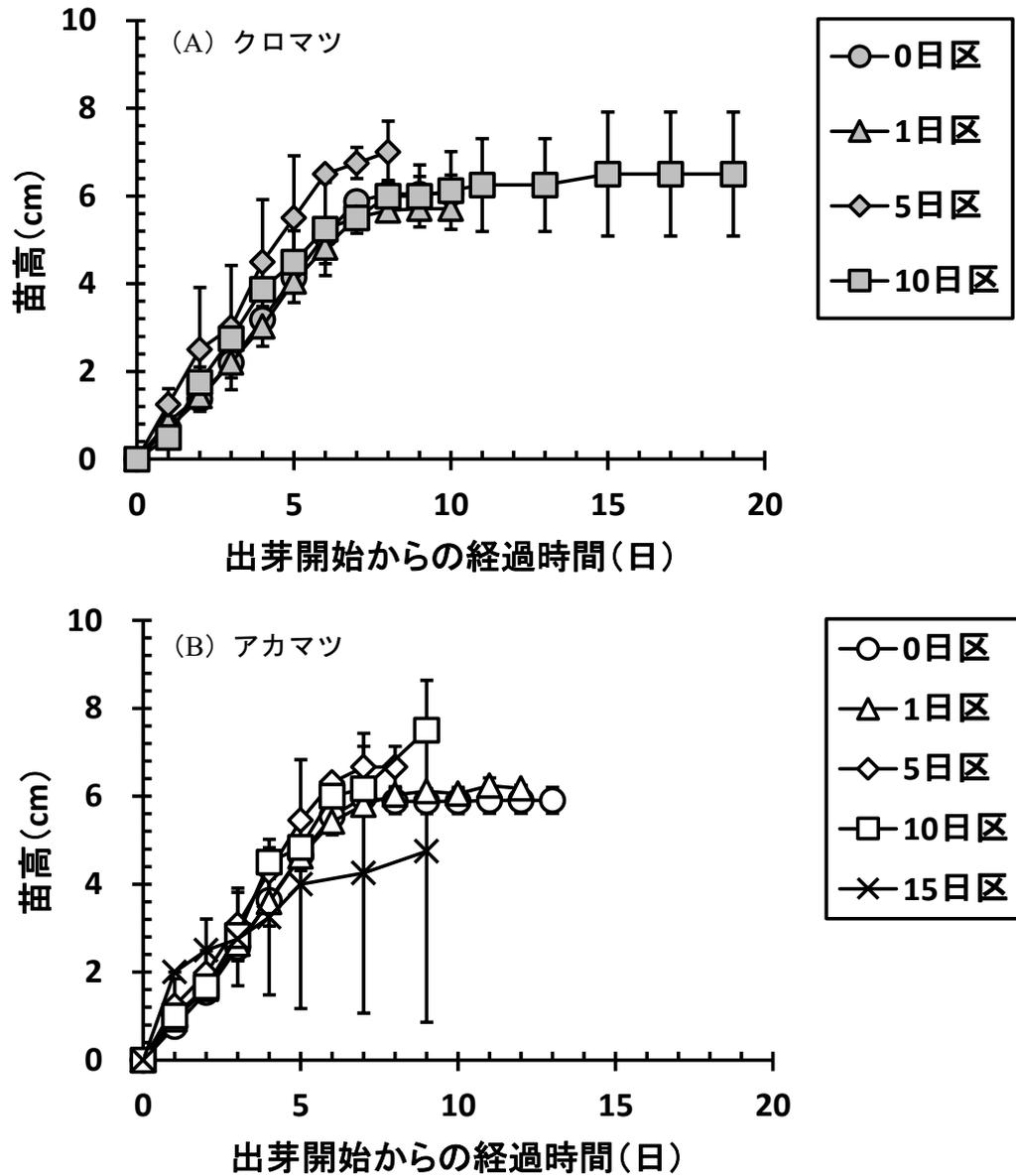


図 5.2.5 クロマツ (A) とアカマツ (B) の処理区ごとの苗高の推移

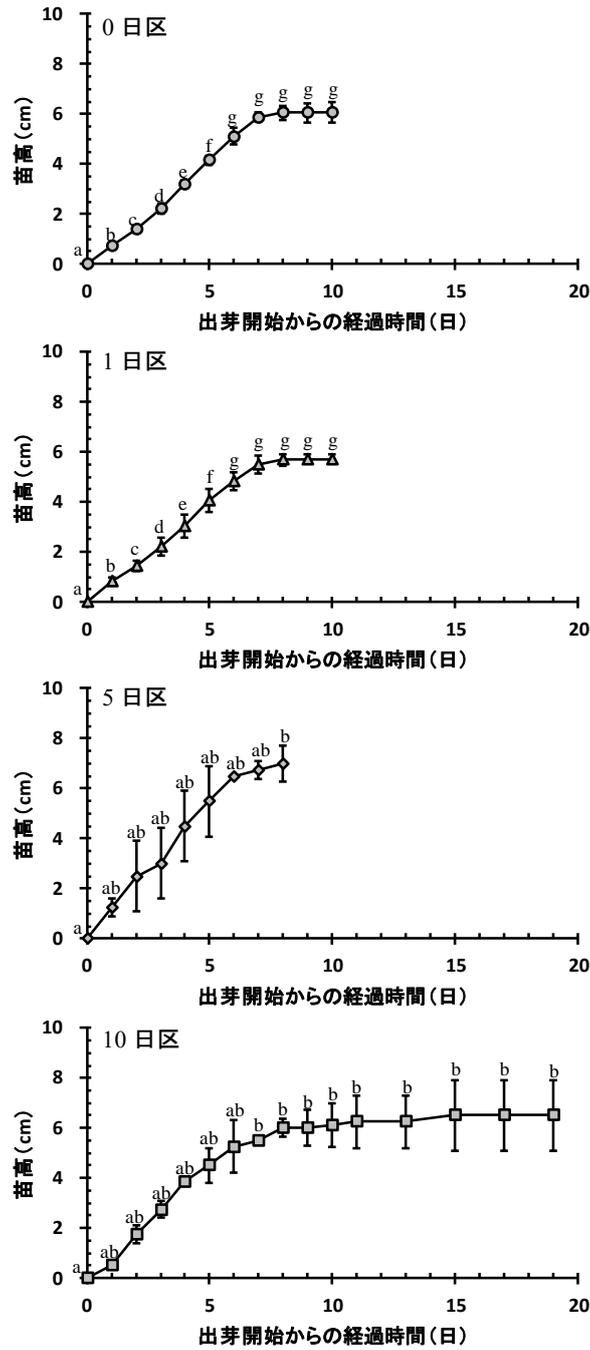


図 5.2.6 クロマツの各処理区における苗高の推移
 ※アルファベットの差異は有意差を表す

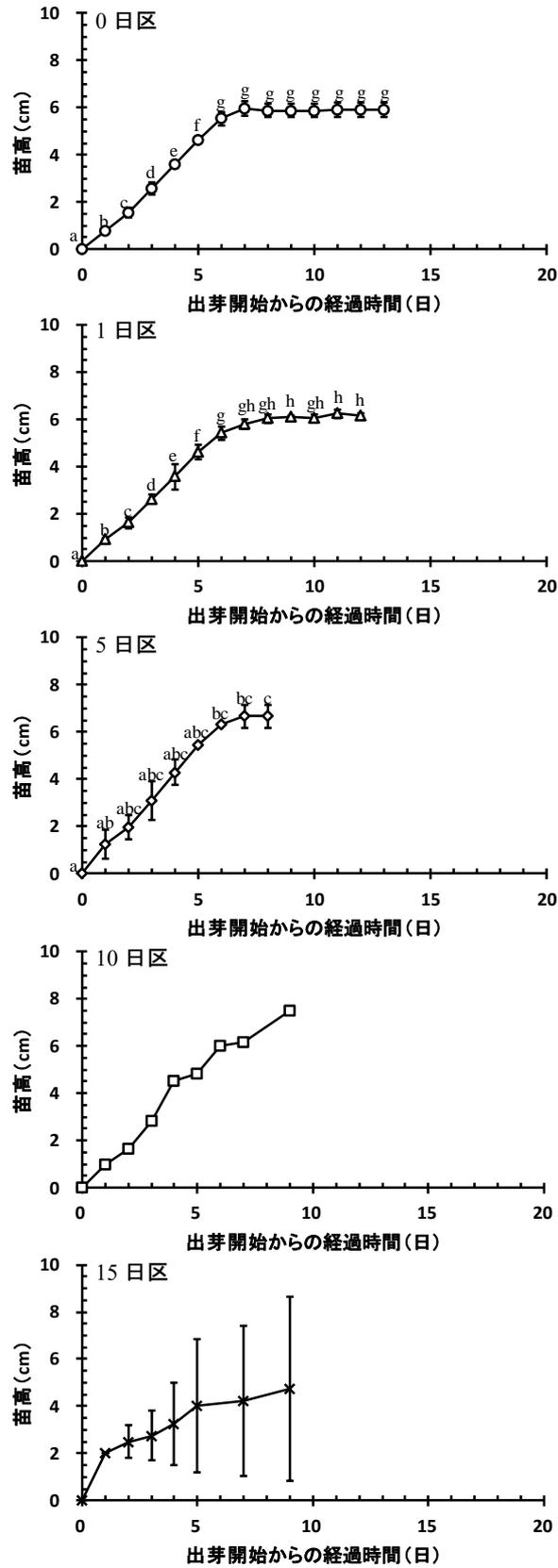


図 5.2.7 アカマツの各処理区における苗高の推移
 ※アルファベットの差異は有意差を表す

5.2.3.2 苗高，根長，地際直径

図 5.2.8 にクロマツとアカマツの各処理区における苗高，根長，地際直径の 0 日区と各処理区との比率を示す。0 日区の苗高に対する各処理区の苗高の比率は，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，樹種間および処理区間の有意差は認められなかった。根長について 0 日区に対する各処理区の比率は，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処理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処理区は 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 日区に対する各処理区の比率は，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，樹種間および処理区間における有意差も認められなかった。

5.2.3.2 乾燥重量

両種の最終出芽率についてクロマツとアカマツともに 0 日区との差は 1 日区に比べ，5～15 日区で大きくなった。そこで，両種ともに出芽した試験区のみを対象として 0 日区，1 日区と 5～15 日区ごとに比較した。

図 5.2.9 にクロマツとアカマツの各処理区における地上部と地下部の乾燥重量の 0 日区に対する各処理区の比率を示す。また，図 5.2.10 にクロマツとアカマツの各処理区における地上部および地下部の乾燥重量の比を示す。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処理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。が，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。地上部および地下部の乾燥重量の比については，クロマツは塩水浸漬期間の処理を行った処理区で 0 日区に比べて低下し，アカマツは 5-15 日区で 0 日区に比べて高い値を示した。地上部および地下部の乾燥重量の比について処理区間，樹種間の有意差を検定したが，有意差は認められなかった。

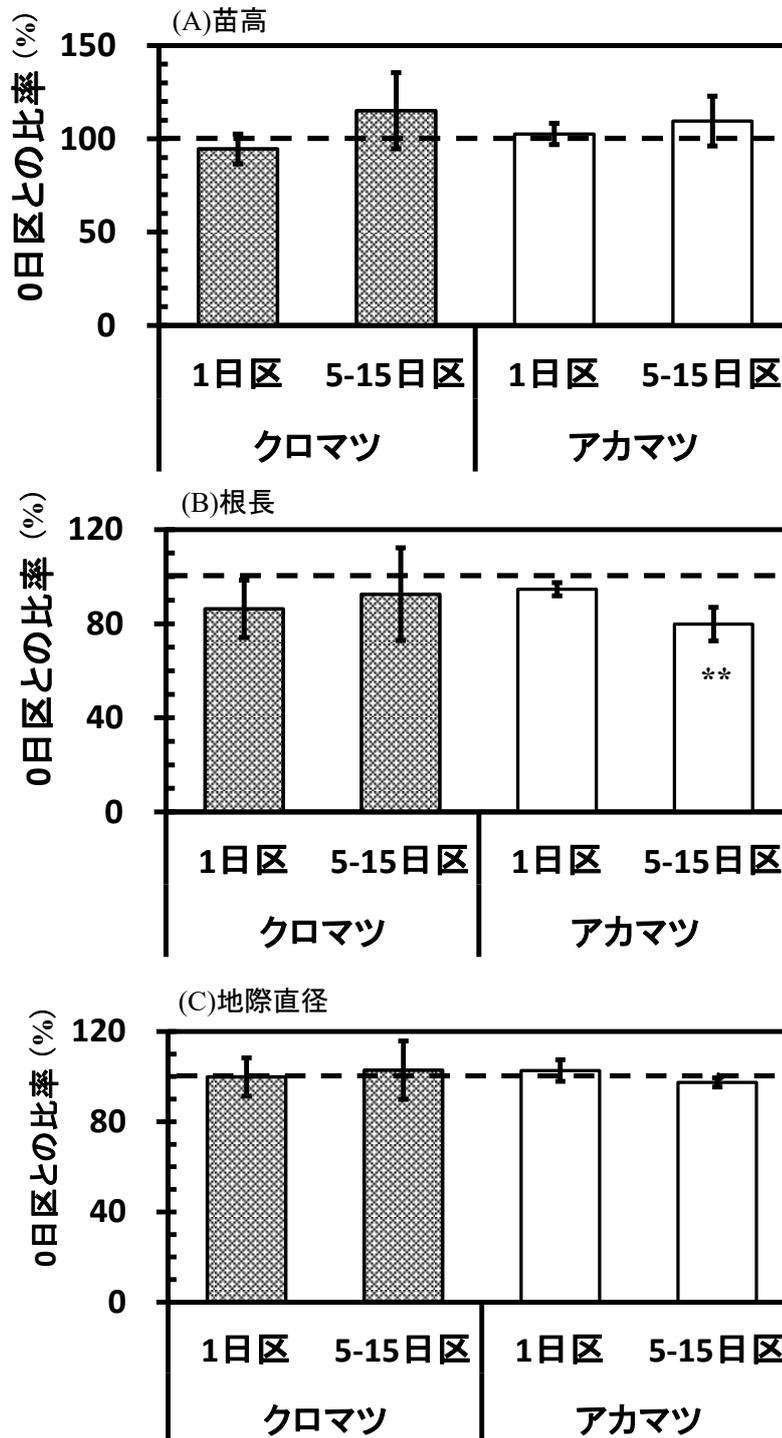


図 5.2.8 クロマツとアカマツの各処理区における苗高 (A), 根長 (B), 地際直径 (C) の 0 日区との比率の比較

※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。

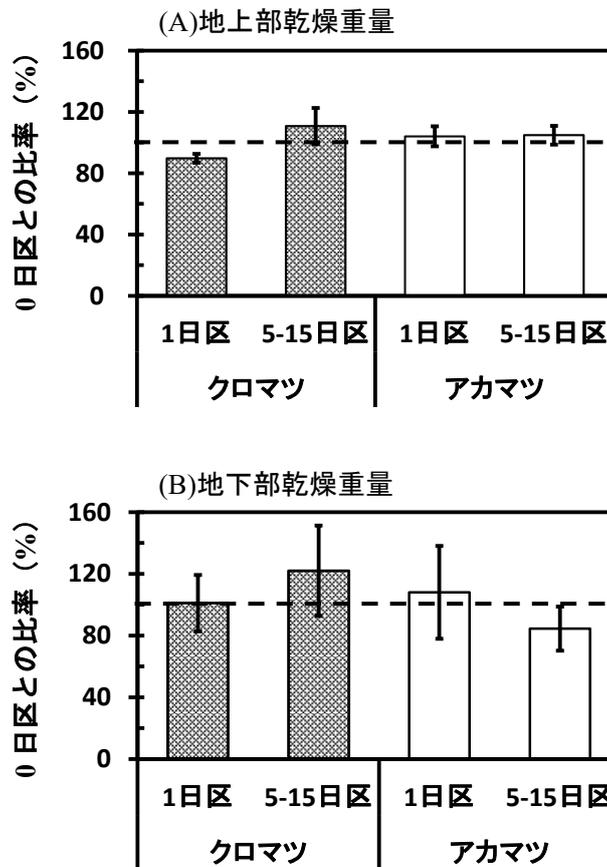
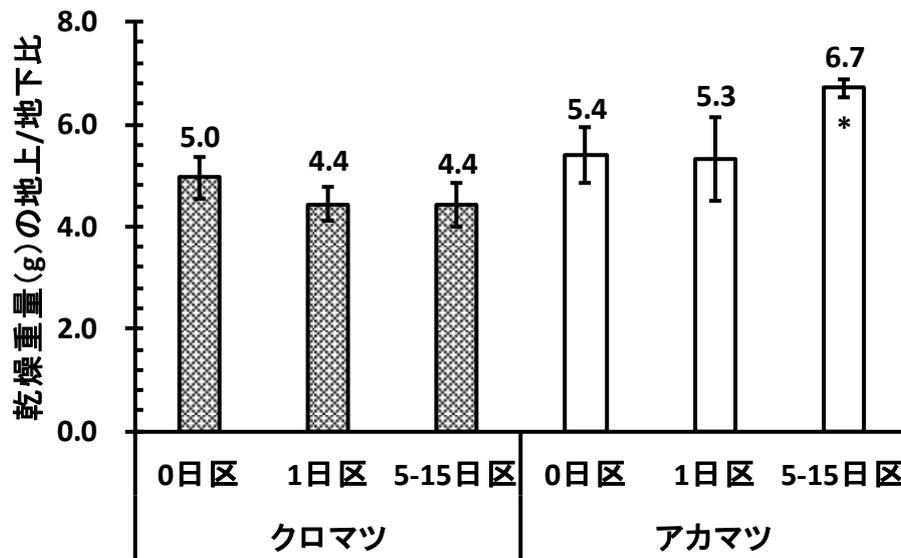


図 5.2.9 クロマツとアカマツの各処理区における地上部 (A) および地下部 (B) の乾燥重量の比較

- ※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。



5.2.10 クロマツとアカマツの各処理区における乾燥重量の地上部と地下部の比
 ※エラーバーは標準偏差を示す。
 ※*は樹種間における有意差を示す。
 ※**は処理区間との有意差を示す。

5.2.4 考察

5.2.4.1 出芽率への影響

図 5.2.1 および図 5.2.4 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 5.2.11)。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 5.2.11 (A))、出芽率は 5 日以上塩水浸漬処理を行った処理区では著しく低下した (図 5.2.11 (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 and Sanavy, 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。

5.2.4.2 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 5.2.8~5.2.9)。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 and Sanavy, 2007)。他方、本研究におけるクロマツとアカマツの実生は弓場 (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ている。すなわち、発芽前の種子への塩水浸漬が出芽直後の生長へ影響することがわかった。種子内への Na の蓄積は種子内における代謝を攪乱し、有効な種子貯蔵物質を減少させることが確認されている (Ahmad *et al.*, 2013)。よって、発芽前の種子に蓄積した Na による生理的な阻害要因が出芽直後の初期生長を阻害したと考えられる。また、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る。

また、地上部および地下部の乾燥重量の比が塩水浸漬期間の長い処理区ほどクロマツは低く、アカマツは高くなる傾向が認められた。すなわち、出芽後の初期生長における栄養配

分がクロマツとアカマツで異なることが示された。クロマツは塩水浸漬期間の長いほど、出芽後の生長において地下部へ栄養を配分し、アカマツは塩水浸漬期間の長いほど地上部へ栄養を配分したと考えられる。よって、種子の塩水浸漬に対する応答がクロマツやアカマツのような近縁の樹種でも異なることがわかった。

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 5.2.11)。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処理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 日以上塩水浸漬を行った処理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。

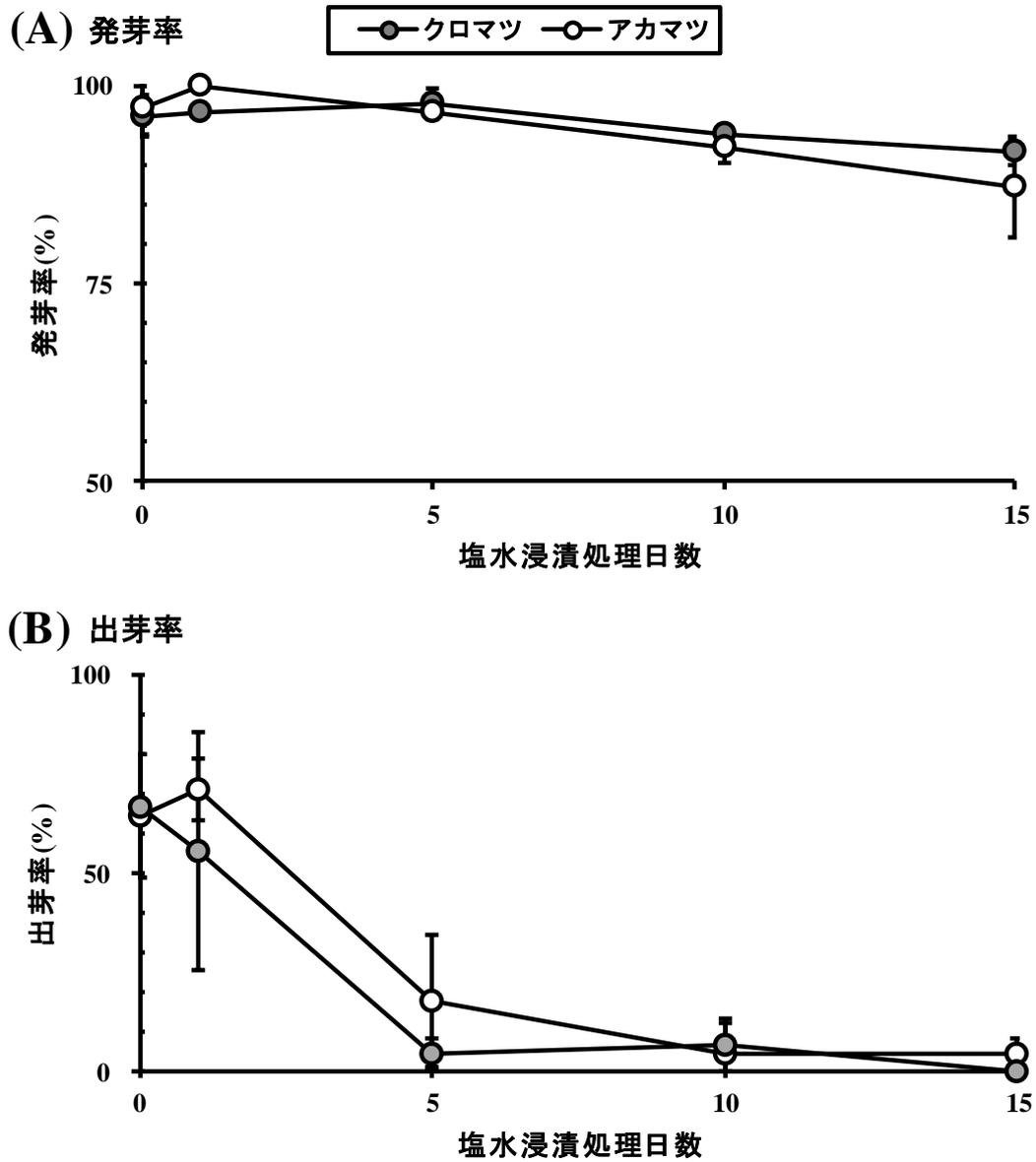


図 5.2.11 クロマツとアカマツの発芽率 (A) (伊東・吉崎, 2017) と出芽率 (B) の比較

5.3 短期的塩水浸漬がクロマツと広葉樹の出芽と初期生長へ及ぼす影響

5.3.1 目的

川砂へ播種したクロマツ，シャリンバイ，トウネズミモチの種子を短期的に塩水へ浸漬させた後，真水を給水し出芽数，出芽後の実生の生長を記録する実験を行った。

5.2 では短期的な塩水冠水が海岸林の主林木であるクロマツおよびアカマツの実生発生数や初期生長へ及ぼす影響について比較し検証するための実験を行った。よって，本実験では短期的な塩水冠水が，海岸林の主林木であるクロマツおよび海岸林前面にも生育でき耐塩生が高いと考えられている広葉樹であるシャリンバイ（野田坂，2012），クロマツやシャリンバイに比べ内陸側に生育しており耐塩生が低いと考えられているトウネズミモチ（野田坂，2012）の実生発生数や初期生長へどのような影響を及ぼすか検証した。

5.3.2 実験方法の概要

実験は2018年8月19日から2018年10月10日まで行った。15cmに切断した内径2.5cmの塩化ビニルパイプを作成し，一方の口を不織布で塞ぎ実験用のポットを作成した（写真5.3.1）。作成したポットへ川砂を充填し種子を播種した。他の実験と同様に過去の津波や高潮による塩水冠水期間を参考に4段階の塩水浸漬期間を設定した。塩水浸漬処理の終了後，真水に浸漬させることによって塩水を洗脱し，適宜灌水を行いながら実験を行った。

5.3.2.1 実験材料と種子の調整

実験にはクロマツ (*Pinus thunbergii* Parl.)，シャリンバイ (*Rhaphiolepis indica* (L.) Lindl.)，トウネズミモチ (*Ligustrum lucidum* Aiton) の種子を用いた。クロマツ，シャリンバイ，トウネズミモチの種子は2017年10月に湘南海岸にて採取した種子を使用した。クロマツの種子は球果ごと採取し，天日干しにした。乾燥し，裂開した球果から種子を取り出し，種子についた翼を取り除いた。翼を取り除いた種子は一昼夜真水へ浸け，浮いた種子を取り除き沈んだ種子のみを採取し乾燥させた後に密閉袋へ入れて冷蔵保存をした。シャリンバイとトウネズミモチは果実のついたまま，2%濃度の次亜塩素酸に2分間さらした後に流水にて30分間さらして洗浄した。その後，水気をキムタオルでよく拭き取りジッパー付きのポリ袋に入れて冷蔵保存をした。種子の平均重量はクロマツで 0.0193 ± 0.0014 g，シャリンバイで 0.5215 ± 0.0717 g，トウネズミモチで 0.1188 ± 0.0160 g であった。

5.3.2.2 実験場所

実験は東京都市大学横浜キャンパス内のフィールド演習室にあるグロースチャンバー（SANYO 社製，MLR-351）内で行った。実験期間中はハイグロクロン（KN ラボラトリーズ，DS1923）により温湿度を記録した。

5.3.2.3 処理区の設定および処理方法

塩水へ浸漬させない対照区を含めて 5 つの処理区を設定した。塩水への浸漬処理を行う処理区の浸漬期間は 1 日, 5 日, 10 日, 15 日とし, 浸漬期間ごとに処理区を 1 日区, 5 日区, 10 日区, 15 日区とした。ポット数はひとつの処理区に 15 ポットとした。塩水浸漬処理に用いる塩水は NaCl 濃度を海水とほぼ同濃度の 3.5% に調整した塩水を用いた。調整した塩水を深さ 17cm, 幅 19.5cm, 奥行 27.8cm の長方形の容器に貯め, 塩水の中へポットを沈めることによって塩水浸漬処理を行った (写真 5.3.2)。塩水浸漬処理の期間中, 水位の低下が見られたときは容器内に貯めた塩水の塩分濃度の変化を防ぐため, 元の水位に戻るまで水道水を注入した。塩水浸漬処理が終了した処理区のポットは塩水から取り出し, ポット内の塩水を真水によって洗浄した。真水による洗浄は, 真水を貯めた容器へ塩水から取り出したポットを 5 分間沈めて取り出し, 再度真水へ沈めることを 20 回繰り返して行った。容器内の真水はポットを取り出す度に新しい真水を交換した。塩水を洗い流したポットはグローブスチャンバー内へ戻し (写真 5.3.3), 川砂の表面が乾き始めたら灌水を行った。ポットへの灌水は地表面の攪乱による種子の埋没深の変化を防ぐため, ポットが冠水しない程度に真水へ沈めることによりポットの底面から川砂へ水分を染み込ませることによって行った。



写真 5.3.1 作成したポットと展葉したクロマツの実生



写真 5.3.2 塩水浸漬処理の様子



写真 5.3.3 塩水浸漬処理後の実験の様子

5.3.2.4 初期生長量の測定

実験期間中は各ポットの出芽の有無，出芽した個体の苗丈，葉長を可能な限り 1 日置きに記録した。出芽は地表面から胚軸が確認できたことと定義した。苗丈は地際から頂芽の頂点までの長さとし，葉長は葉あるいは葉柄と幹の接点から葉の先端までの長さとした。出芽した実生は一定期間生育させた後に採取し，根長と地上部および地下部の新鮮重量を計量した（写真 5.3.4，写真 5.3.5）。出芽後の生育期間はクロマツが 15 日，トウネズミモチとシャリンバイが 20 日とした。苗高，葉長，根長，地上部および地下部の新鮮重量の比較を各供試種の処理区間差，各処理区の樹種間差を比較した。

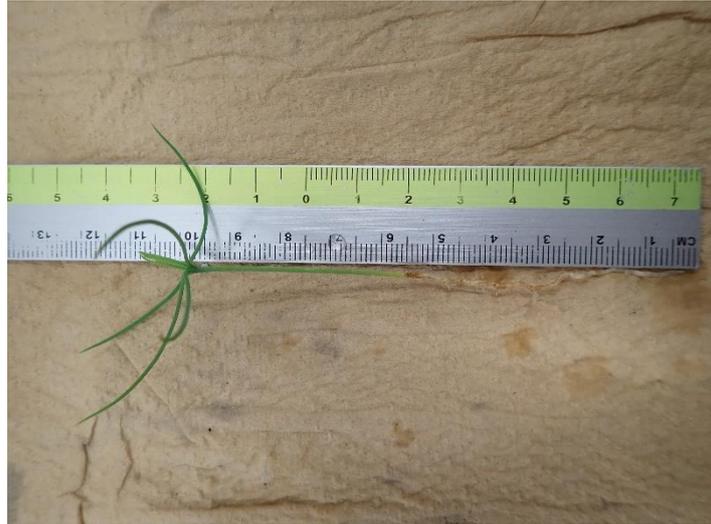


写真 5.3.4 採取した実生の苗高および根長の計測

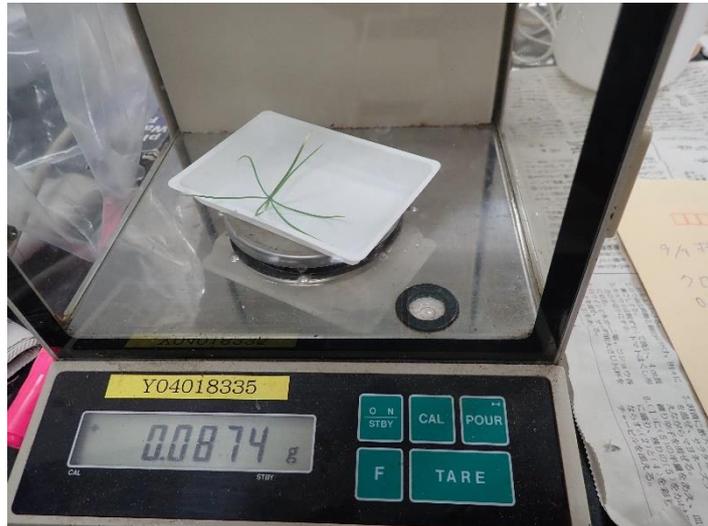


写真 5.3.5 採取した実生の苗高および根長の計測

5.3.3 結果

5.3.3.1 出芽数

図 5.3.1 に各処理区における樹種ごとの出芽数を示す。クロマツの出芽数は 0 日区で 15, 1 日区で 4, 5 日区で 2, 10 日区で 7, 15 日区で 2 であった。トウネズミモチの出芽数は 0 日区で 10, 1 日区, 5 日区, 10 日区, 15 日区では出芽数は 0 であった。シャリンバイの出芽数は 0 日区で 3, 1 日区で 1, 5 日区, 10 日区と 15 日区では出芽数は 0 であった。クロマツ, トウネズミモチ, シャリンバイいずれも 0 日区の出芽数が最も高くなった。クロマツは全ての処理区において出芽が見られたが, トウネズミモチは 1 日区, 5 日区, 10 日区, 15 日区では出芽が認められず, シャリンバイは 10 日区, 15 日区で出芽が認められなかった。すなわち, 10 日以上塩水浸漬を行った処理区で出芽が見られたのはクロマツのみであった。

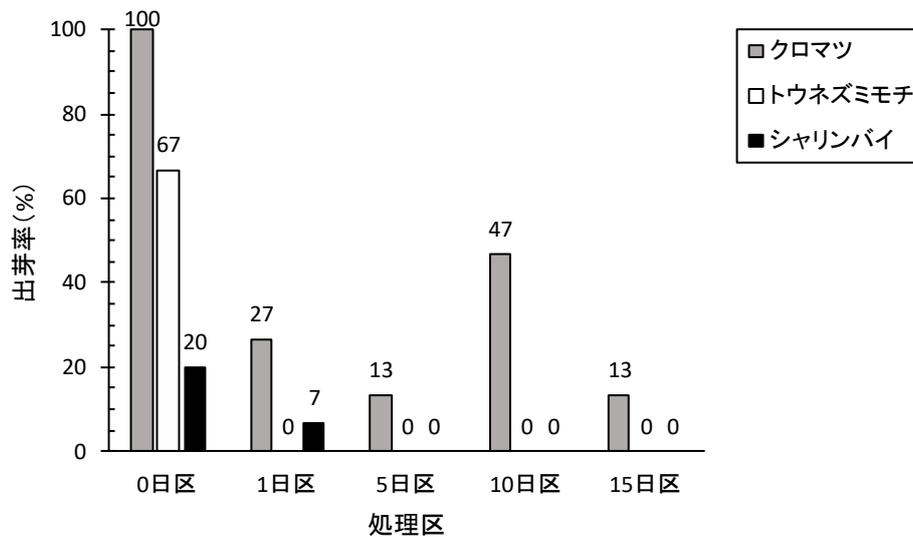


図 5.3.1 各処理区における各樹種の出芽率数

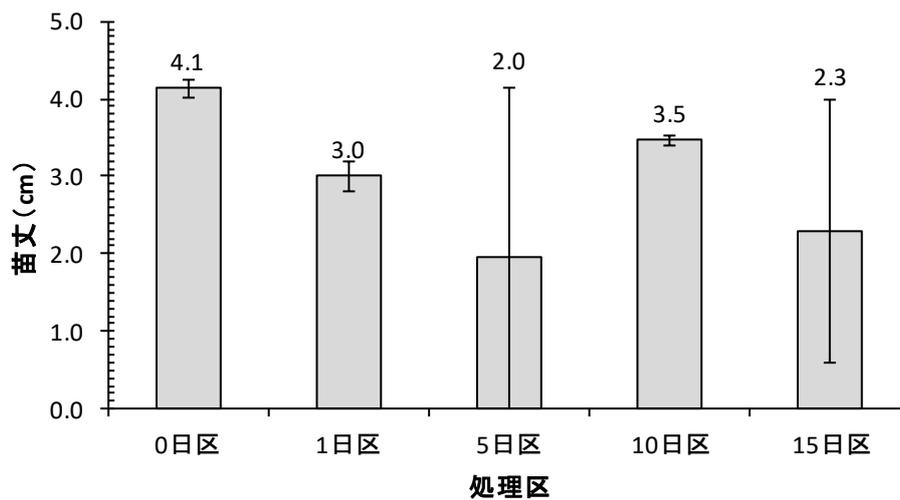


図 5.3.2 クロマツの各処理区における苗丈

5.3.3.2 生長への影響

供試種ごとの各処理区間における苗丈，根長，地上部新鮮重量，地下部新鮮重量について比較を行った。なお，トウネズミモチは 0 日区以外の処理区で出芽が見られなかったため処理区間の比較は行わなかった。また，シャリンバイは 0 日区と 1 日区のみで出芽が認められたため 0 日区と 1 日区の比較のみを行った。

クロマツの各処理区間における苗丈の比較を図 5.3.2 に，根長の比較を図 5.3.3 に，地上部新鮮重量の比較を図 5.3.4 に，地下部新鮮重量の比較を図 5.3.5 に示した。クロマツの苗丈は 0 日区で最も高くなり，他の処理区より 0.5~2.0cm 高かった。クロマツの根長も苗丈同様に 0 日区で最も長く 6.8cm となり，他の処理区よりも 2.5~5.0cm 長かった。また，根

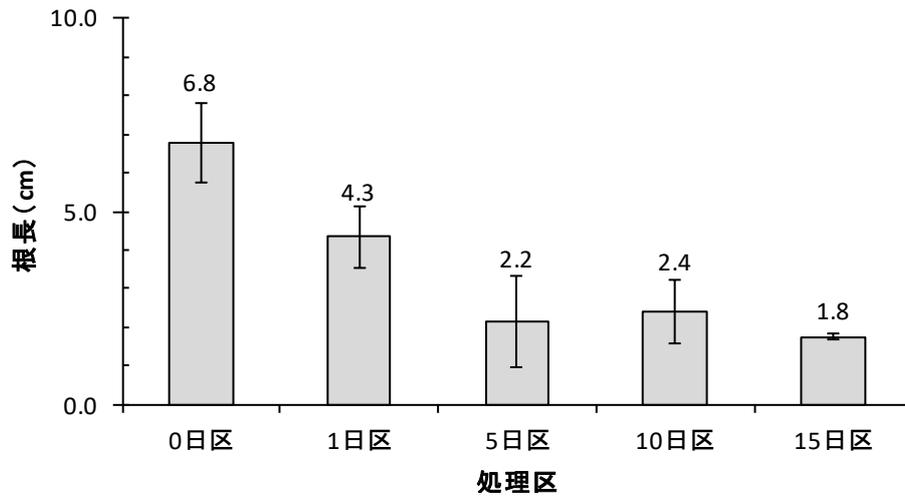


図 5.3.3 クロマツの各処理区における根長

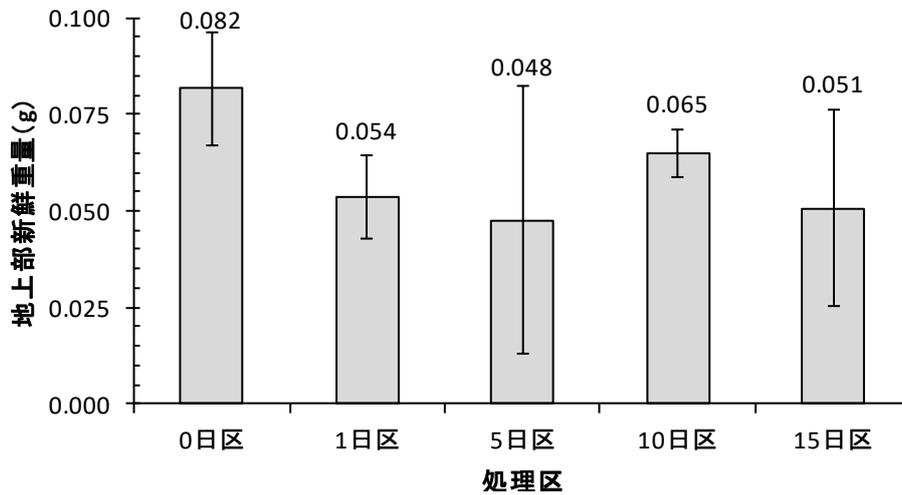


図 5.3.4 クロマツの各処理区における地上部新鮮重量

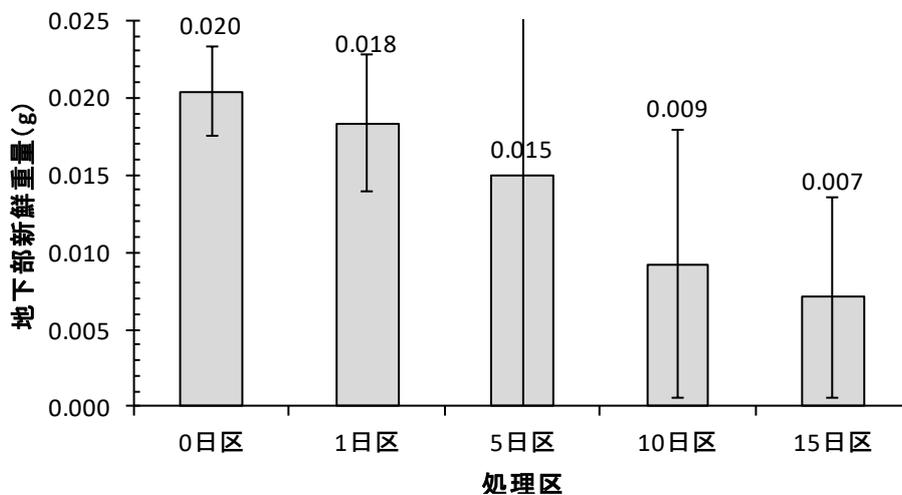


図 5.3.5 クロマツの各処理区における地下部新鮮重量

長の長さは0日区, 1日区, 10日区, 5日区, 15日区の順に長く概ね塩水浸漬日数の長い処理区ほど短くなる傾向を示した。

クロマツの地上部新鮮重量は0日区で最も重く0.082gとなり, 他の処理区より0.017~0.028g高くなった。また, 地下部の新鮮重量は0日区で最も重く0.020gとなり, 他の処理区に比べて0.002~0.013g重くなった。また, 根長と同様に根の新鮮重量は塩水浸漬日数の長かった処理区ほど低くなる傾向が示された。

シャリンバイの0日区と1日区の苗丈の比較を図5.3.6に, 根長の比較を図5.3.7に, 地上部新鮮重量の比較を図5.3.8に, 地下部新鮮重量の比較を図5.3.9に示した。シャリンバイの苗丈, 地上部新鮮重量, 地下部新鮮重量はいずれも0日区の方が1日区より高い値を示す傾向が見られたが, 根長のみ1日区の方が高くなった。

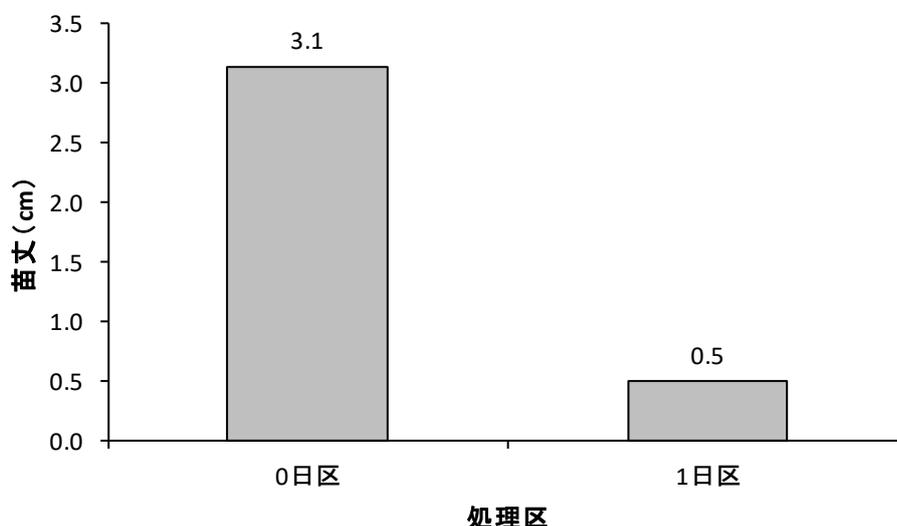


図 5.3.6 シャリンバイの各処理区における苗丈

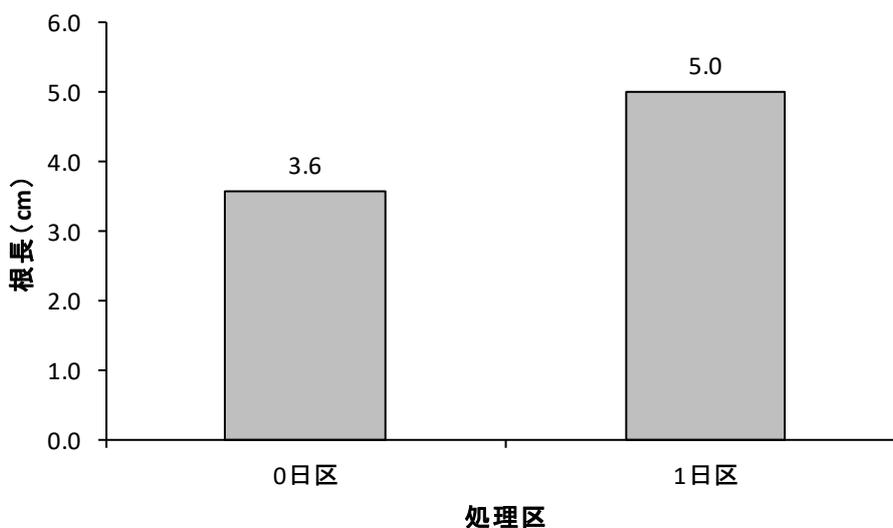


図 5.3.7 シャリンバイの各処理区における根長

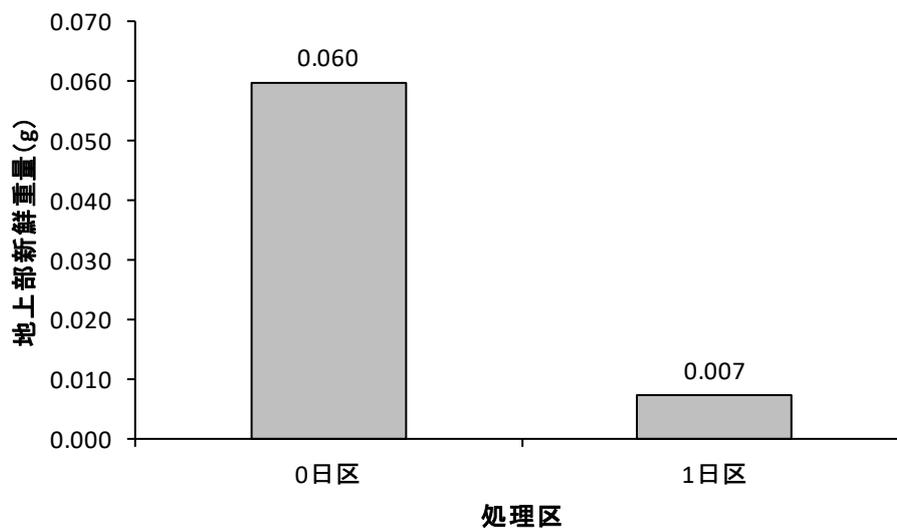


図 5.3.8 シャリンバイの各処理区における地上部新鮮重量

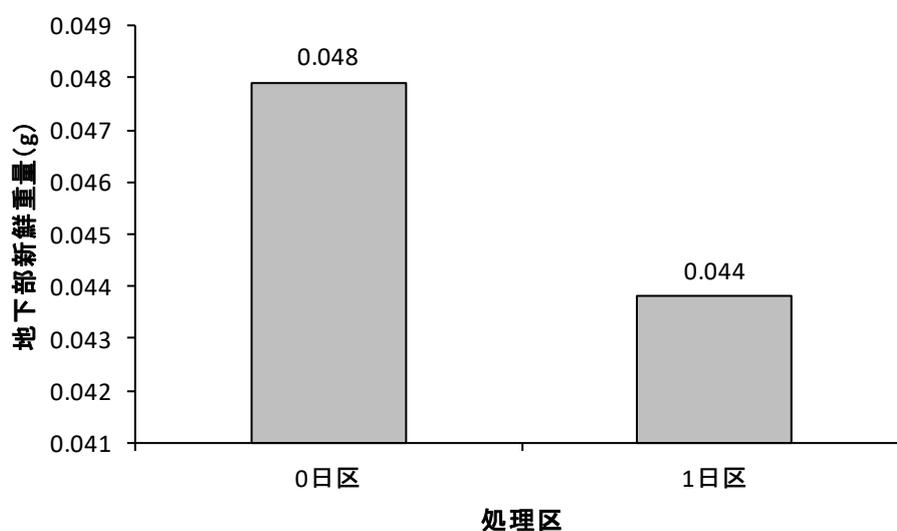


図 5.3.9 シャリンバイの各処理区における地下部新鮮重量

5.3.4 考察

出芽数はクロマツ，トウネズミモチ，シャリンバイのいずれも 0 日区で最も多く，塩水浸漬処理を行った処理区において 1 日区で出芽した種はクロマツとシャリンバイのみであり，10 日区と 15 日区において出芽した種はクロマツのみであった。また，クロマツの苗丈と根長は 0 日区でもっとも高くなり，特に根長と地下部新鮮重量は塩水浸漬期間の長い処

理区ほど低下する傾向が苗丈と地上部新鮮重量に比べて明確に示された。培地に存在する塩水から種子の内部へ侵入した Na により、タンパク質代謝の攪乱、ホルモンバランスの攪乱、種子貯蔵物の減少などの影響をおよぼすことが確認されており (Ahmad *et al.*, 2013), その結果として発芽と実生の生長が抑制される (Tsegay and Gebrelasse, 2014 ; KATEMBE *et al.*, 1998 ; Sima *et al.*, 2013 ; Mahdavi and Sanavy, 2007 ; Meloni *et al.*, 2008) ことが既往の研究において確認されている。また、本論文の 2 章においてクロマツ種子を対象に行った実験で塩水浸漬期間の長いほどクロマツ種子内の Na 含有率が高くなる傾向が見られている。よって、クロマツは塩水浸漬中に蓄積した Na の影響によって出芽率の低下、生長抑制が発生したと思われる。また、クロマツは地上部に比べて根の方が塩水浸漬による生長抑制の影響を受けやすいと考えられる。一方、トウネズミモチ、シャリンバイは塩水の影響によってクロマツより出芽が抑制されたと推察される。クロマツは海岸林の主林木である (吉崎, 2011)。また、シャリンバイは海岸低木種であり (中島・吉崎, 2017), トウネズミモチはクロマツとシャリンバイよりやや内陸に生育している。よって、樹種ごとの生態的な生育環境が種子の塩水冠水耐性やそのメカニズムに関係している可能性が示唆された。また、海岸の風衝地に生育するクロマツとシャリンバイにおいても生長への影響に差異があったことから、沿岸域に生育する樹種においても塩水冠水耐性に順位性が存在することが分かった。

他方、クロマツとシャリンバイとトウネズミモチの種子の応答の差異については種子の休眠状態の差異が影響している可能性も示唆された。クロマツの種子は吸水により休眠が打破される (畑野, 1957) ことから、実験開始前は休眠状態 (吉岡・清和, 2009) にあったと考えられる。一方、シャリンバイの種子は湿潤型種子であり (小野, 2016), 非休眠種子である (小野, 2007)。また、トウネズミモチを含むイボタノキ属のネズミモチは湿潤型種子であり (秋元, 2002), 非休眠種子である (秋元, 2006)。非休眠種子の胚は散布されるときには十分に発達した状態にある (吉岡・清和, 2009) といわれている。よって、シャリンバイとトウネズミモチの種子は実験に用いた時点では低温により胚の生長が一時的に停止しており、実験開始後、温度の上昇により胚の生長が再開したと考えられる。すなわち、塩水浸漬時の胚の状態について、クロマツは休眠した状態、シャリンバイとトウネズミモチは発達した状態にあった可能性がある。よって、胚の生長状態の差異も塩水浸漬の影響の大きさに関係していると考えられ、自然環境下において散布される時点での種子の状態が樹種ごとにおける種子の塩水冠水耐性に影響する可能性について今後、検討する必要があると考えられる。また、種子の塩水浸漬中に蓄積した Na によるイオンバランスの攪乱など生理的な影響が発芽後の初期生長へ及ぼした影響についても検討する必要があると考えられる。

5.4 第5章のまとめと総合考察

第5章において明らかとなったことを図5.4.1に示す。

クロマツおよびアカマツの出芽と出芽直後の初期生長は塩水浸漬期間の長いほど阻害される傾向が見られた。先行研究では初期生育段階の植物を塩水で生育させる実験が多く行われており、胚軸や根長などの生長は抑制されることが確認されている (Li *et al.*, 2010 ; Mahdavi and Sanavy, 2007 ; Al-Khateeb, 2006)。クロマツについても発芽後2~3週間の稚苗を塩水 (-0.3~-0.7MPa) にて生育させた結果、根の伸長阻害が認められている (弓場・市川, 1978)。これらの先行研究では初期生育段階における塩水による吸水阻害, あるいは植物体内へ侵入したNaによる代謝阻害の影響によって生長が阻害されたと考えられる (Li *et al.*, 2010 ; Mahdavi and Sanavy, 2007 ; Al-Khateeb, 2006 ; 弓場・市川, 1978)。一方, 本研究では発芽前の種子を塩水へ浸漬させ, その後は真水によって生育させている。発芽および出芽と出芽直後の初期生長の時は直接塩水の影響を受けていない。第4章において, 種子の塩水浸漬期間が長いほど, 種子内へNaが蓄積されていくことが確認されている。よって, 発芽前の種子に蓄積したNaが発芽後の初期生長へ阻害的な影響を及ぼしたと考えられる。すなわち, 種子の塩水冠水によって発芽後の実生数あるいは実生の初期生長が抑制される可能性が示された。

また, 出芽直後の初期生長において, 地下部の生長がクロマツに比べてアカマツの方が抑制された。種子のNaの蓄積量はアカマツの方がクロマツに比べて多く, 種子内のイオンバランスの攪乱などが発生している可能性が第4章で認められている。よって, アカマツの種子の方がクロマツに比べてNaを蓄積しやすいため, 蓄積したNaによる出芽直後の初期生長への抑制的な影響が大きくなったと考えられる。

以上の結果を踏まえると短期的な塩水浸漬の影響は種子の発芽に対しては小さいが, 発芽後から出芽までの生長および出芽後の生長に対して大きい可能性が認められた。加えて, クロマツの方がアカマツと広葉樹に比べて短期的な塩水浸漬による出芽および出芽後の生長の抑制に対して耐性のある可能性が示唆された。

クロマツと広葉樹を比較した実験では, 塩水浸漬期間の長いほどクロマツに比べて広葉樹の生長が抑制された。クロマツとアカマツの比較実験と同様に, 発芽前の種子を塩水へ浸漬させ, その後は真水によって生育させており, 発芽および出芽と出芽直後の初期生長の時点は直接塩水の影響を受けていない。よって, 発芽前の塩水浸漬の影響によって発芽後の初期生長が影響を受け, 阻害されたと考えられる。

クロマツ, シャリンバイ, トウネズミモチの順に出芽および出芽直後の生長抑制の影響が小さかった。クロマツは海岸林の主林木である (吉崎, 2011)。また, シャリンバイは海岸低木種であり (中島・吉崎, 2017), トウネズミモチはクロマツとシャリンバイよりやや内陸に生育している。よって, 樹種ごとの生態的な生育環境が種子の塩水冠水耐性に関係している可能性が示唆された。また, 海岸の風衝地に生育するクロマツとシャリンバイにおいても生長への影響に差異があったことから, 沿岸域に生育する樹種においても塩水冠水耐性に

順位性が存在することが分かった。本研究の結果においては、種子の塩水冠水耐性はクロマツ、シャリンバイ、トウネズミモチの順に高いと考えられる

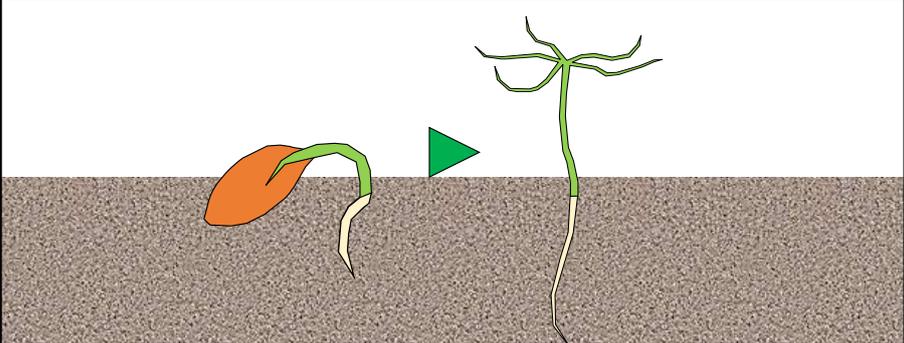
章	第5章 短期的塩水浸漬による出芽と初期生長への影響		
生育段階の定義と模式図	【 出 芽 ~ 実 生 】		
			
実験対象	クロマツ	クロマツ・アカマツ	クロマツ・広葉樹
実験	5.1 種子の発芽及び出芽へ及ぼす影響	5.2 発芽直後の生長に与える影響	5.3 出芽と初期生長へ及ぼす影響
塩水冠水の影響	<ul style="list-style-type: none"> ・ 出芽率の低下 塩水浸漬期間の長い種子ほど出芽率が低下した。特に5日以上浸漬で著しい低下が見られた。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 出芽率の低下 種子の塩水浸漬期間が長いほど、出芽種子数が低下あるいは出芽しなくなる。 クロマツ、アカマツは特に5日以上種子が塩水へ浸漬すると出芽率が低下した。 ・ 根の生長抑制 塩水浸漬期間が長いほど出芽後における根の生長が抑制された。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 出芽率の低下 塩水浸漬期間の長い種子ほど出芽率が低下した。広葉樹の出芽率は塩水浸漬によりクロマツより抑制される傾向が示された。 ・ 生長の阻害 塩水浸漬期間の長い種子ほど出芽後の生長が阻害される。樹種によって影響を大きく受ける器官は異なる傾向が見られた。
短期的塩水冠水に対する耐性	 高 低	クロマツ	クロマツ
			シャリンバイ
		アカマツ	トウネズミモチ

図 5.4.1 第 5 章のまとめ

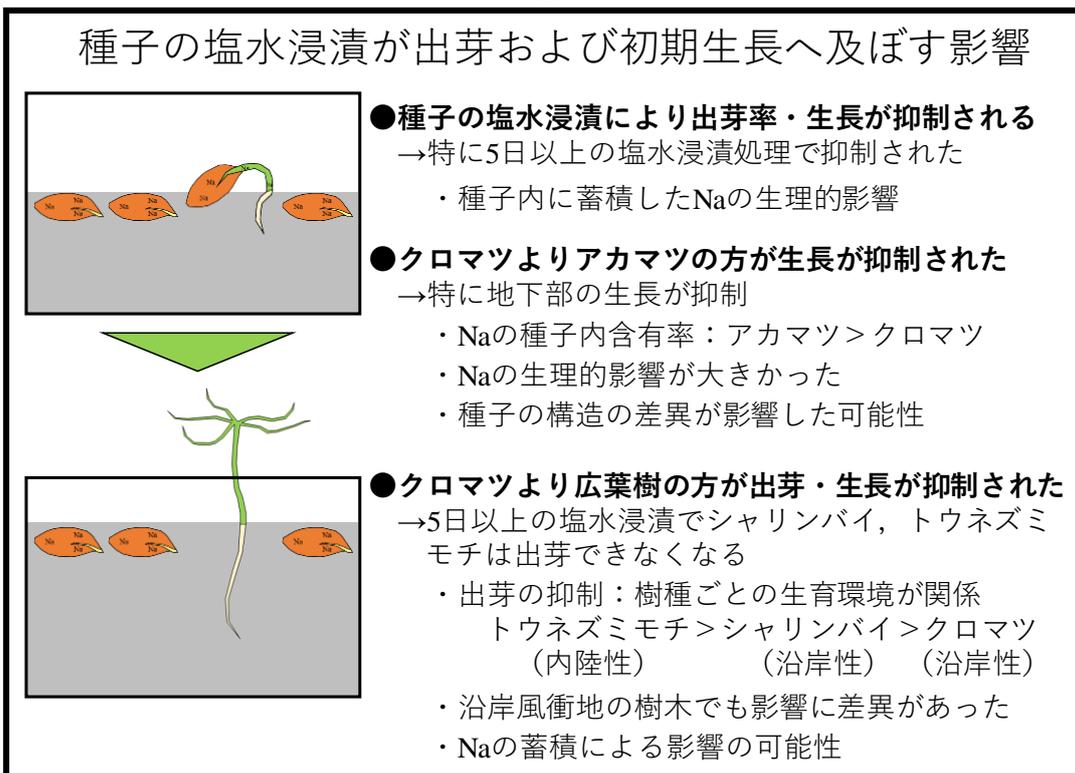
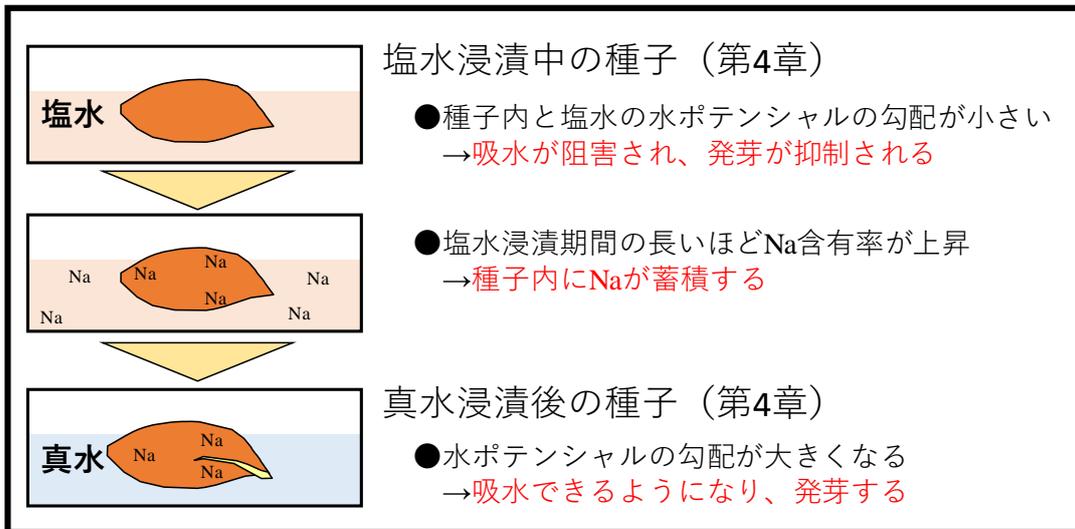


図 5.4.2 種子の塩水浸漬が出芽および初期生長へ及ぼす影響

第6章 実生および幼木の塩水冠水耐性

本項では、実生および樹齢1～2年生の幼木を対象として塩水による冠水に対する耐性の評価を試みた。6.1項ではクロマツ、ヒメユズリハ、トベラ、シャリンバイを対象として発芽から30日後の実生苗の根を異なる濃度の塩水へ浸漬させ、生存率と生存期間へおよぼす影響を比較検証した。6.2項ではクロマツ、トベラ、シャリンバイ、マサキを対象として1～2年生の苗木の根を異なる塩分濃度の塩水へ一定期間浸漬させ、塩水の塩分濃度および浸漬期間が各器官の陽イオン含有率へ及ぼす影響や各種の耐塩性を比較検証した。

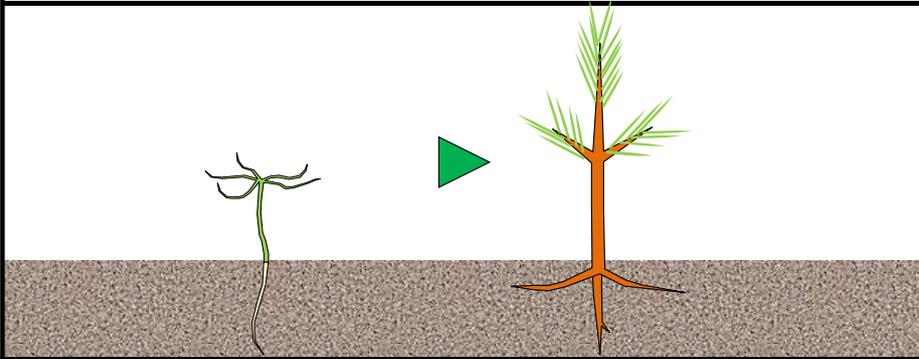
章	第6章 実生苗および幼木の塩水冠水耐性	
生育段階の定義と模式図	【実生苗・幼木】	
		
実験対象	クロマツ・広葉樹	
実験	6.1 塩水浸漬処理がクロマツと広葉樹の実生の苗の生存率と生存期間に及ぼす影響	6.2 クロマツと常緑広葉樹を用いた塩水による水耕栽培実験
実験期間	<ul style="list-style-type: none"> ・実生苗育苗 2014年6/17～7/17 ・塩水浸漬 2014年7/18～11/15 	<ul style="list-style-type: none"> ① 2012年 8/11～9/9 ② 2012年11/2～11/16
試験区	<ul style="list-style-type: none"> 0%区（対象区） 1.75%日区 3.5%日区 	<ul style="list-style-type: none"> 3日区：0%区（対象区），3.4%区 7日区：0%区（対象区），3.4%区
各試験区の個体数	3～6個体	<ul style="list-style-type: none"> 0%区：1個体 3日区・7日区：3個体
調査項目	実生の生存率	葉・茎・根の陽イオン含有率 (Na・K・Mg・Ca)

図 6.1 第6章の構成と概要

6.1 塩水浸漬処理がクロマツと広葉樹の実生苗の生存率と生存期間におよぼす影響

6.1.1 目的

第4章では発芽，第5章では出芽および出芽直後の初期生長を対象とした実験をおこなった。本項では，出芽後の生育段階である実生苗（若い幼木）について，塩水浸漬が生存率を生存期間に及ぼす影響を確認する実験を行った。海岸林の主林木であるクロマツ，沿岸域に生育している高木の常緑広葉樹であるヒメユズリハ，低木の常緑広葉樹であるトベラ，シャリンバイを用い，クロマツと沿岸性の低木の広葉樹（シャリンバイ・トベラ）と高木の広葉樹（ヒメユズリハ）の塩水冠水に対する耐性を比較し検証することを目的とした。

6.1.2 実験概要

6.1.2.1 実験方法

塩水により根が浸漬した状態で樹木が生存できる期間を樹種ごとに比較するため、シー

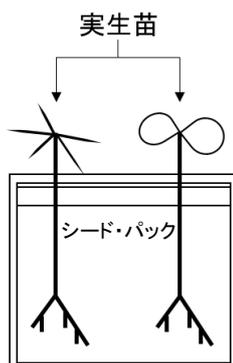


図 6.1.1 シード・パックスの模式図



写真 6.1.2 シード・パックスで実験中の実生苗



写真 6.1.1 シード・パックによる実験の様子（上から見た写真）

ド・パック（種子成長袋）（大起理工業，DIK-710A）を用いた塩水による地下部の浸漬実験を行った。シード・パックは植物生理学・植物病理学などの実験において用いられ，大きさは縦 177mm，幅 163mm である。透明の袋に折りたたんだ紙が入っており，その紙に実生あるいは種子を固定し袋内を溶液で満たして実験を行う。よって，可能な限り成分を調整した溶液そのものの影響を見ることが出来ると考え本実験にて用いた。各供試種のポット苗をシード・パックへ移植し，水道水に液肥を 1000 倍希釈した培養液を与え 2014 年 6 月 17 日から 2014 年 7 月 17 日まで養生させた。実験期間中は枯死した個体数を記録した。枯死の判断は葉の全体が変色した場合を枯死とした。なお，実験は東京都市大学横浜キャンパス内にある吉崎研究室で行った。

6.1.2.2 供試種

実験に用いた実生苗は，クロマツ (*Pinus thunbergii* Parl.)，ヒメユズリハ (*Daphniphyllum teijsmannii* Zoll. ex Kurz)，トベラ (*Pittosporum tobira* (Thunb.) W.T.Aiton)，シャリンバイ (*Rhaphiolepis indica* (L.) Lindl.) の 4 種である。いずれの樹種も 2013 年 10 月に藤沢土木事務所汐見台庁舎にある海浜自然生態園において採取した採取した種子を取り播きし，2014 年 5 月に発芽したものである。実験開始時における苗高の平均値はクロマツで 7.1cm，ヒメユズリハで 5.1cm，トベラで 7.1cm，シャリンバイで 6.9cm だった。

6.1.2.3 実験期間

実験は 2014 年 6 月 17 日から 2014 年 11 月 15 日まで行った。塩水による浸漬は同年の 7 月 18 日から 11 月 15 日まで行った。

表 6.1.1 各樹種の処理区ごとの個体数

	クロマツ	ヒメユズリハ	シャリンバイ	トベラ
対照区	4個体	4個体	6個体	4個体
1.75%区	3個体	4個体	6個体	6個体
3.5%区	3個体	6個体	6個体	5個体

6.1.2.4 実験処理

実験処理は対照区、1.75%区、3.5%区の3区を設けた。対照区では水道水に液肥（（株）ハイポネックスジャパン、ハイポネックス原液）を1,000倍に希釈した培養液を用いた。1.75%区では対照区に用いた培養液へ、NaClを溶解させNaCl濃度を1.75%に調整した培養液を用いた。3.5%区では対照区に用いた培養液へ、NaClを溶解させNaCl濃度を3.5%に調整した培養液を用いた。各処理区への各供試種の個体の割り当ては表1の通りである。

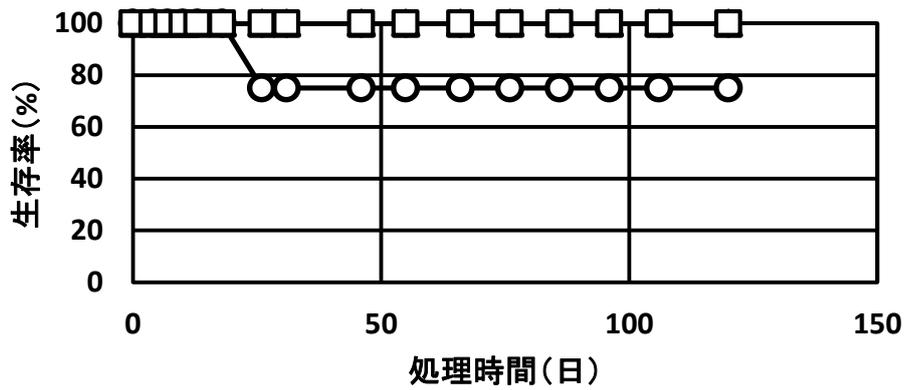
6.1.2.5 統計解析

各供試種の樹種間における平均生存期間の検定するため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検定（ $p < 0.05$ ）を用いた。同一供試樹種の処理区間における各測定項目についてはt検定（ $p < 0.05$ ）を用いた（IBM SPSS Statistics ver. 19）。

6.1.3 結果

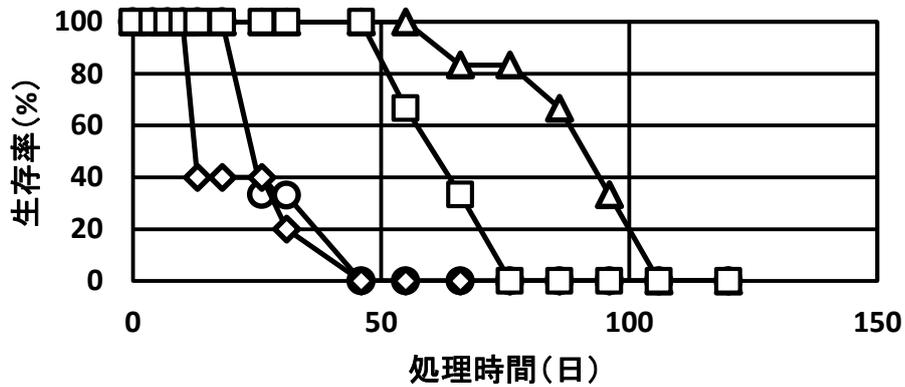
6.1.3.1 各処理区における供試種ごとの生存率の変化

図 6.1.3～6.1.5 に各処理区における供試種ごとの生存率の変化を示す。図 6.1.3 より、対照区においてはクロマツが処理開始から26日目に生存率75%に低下したが、処理開始から26日以降はクロマツの生存率に変化は見られなかった。また、対照区におけるヒメユズリハとシャリンバイ、トベラの生存率は100%のままであった。さらに図 6.1.4 より、1.75%区のヒメユズリハの生存率は処理開始から13日後に60%下がり、46日後に生存率は0%となった。また、1.75%区におけるクロマツの生存率は処理開始から26日後に66.7%下がり、46日後に生存率は0%となった。そして1.75%区におけるトベラの生存率は66日後に34%下がった。一方で、1.75%区におけるシャリンバイの生存率は処理開始から66日後になっても低下は認められなかった。図 6.1.5 より、3.5%区ではヒメユズリハの生存率が処理開始から7日後に33.3%下がり、26日後に生存率は0%となった。そしてクロマツの3.5%区における生存率は処理開始から13日後に77%下がり、26日後に生存率は0%となった。シャリンバイの3.5%区における生存率は46日目に50%となり、66日後に0%となった。また、トベラの3.5%区における生存率は18日後に80%となり、46日後に0%となった。



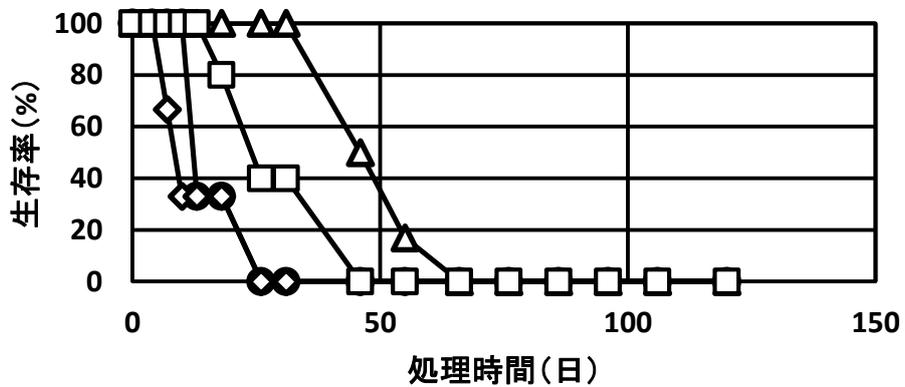
○クロマツ ◇ヒメユズリハ ▲シャリンバイ □トベラ

図 6.1.3 対照区における樹種ごとの生存率の推移



○クロマツ ◇ヒメユズリハ ▲シャリンバイ □トベラ

図 6.1.4 1.75%区における樹種ごとの生存率の推移



○クロマツ ◇ヒメユズリハ ▲シャリンバイ □トベラ

図 6.1.5 3.5%区における樹種ごとの生存率の推移

6.1.3.2 各処理区における供試種ごとの平均生存期間の比較

図 6.1.6 に各処理区における供試種ごとの平均生存期間の比較を、図 6.1.7 に各処理区における NaCl 濃度と樹種ごとの平均生存期間の比較を示す。1.75%区における生存期間は、生存期間が長い順にシャリンバイで 105.7 日、トベラで 74.3 日、クロマツで 32.7 日、ヒメユズリハで 23.2 日となった。また、1.75%区ではシャリンバイ・トベラの平均生存期間とクロマツ・ヒメユズリハの平均生存期間との間に有意差が認められた。3.5%区については、生存期間の長い順に、シャリンバイで 52.3 日、トベラで 32.4 日、クロマツで 17.3 日、ヒメユズリハで 14.3 日となった。また、3.5%区でも 1.75%区と同様に、シャリンバイ・トベラの平均生存期間とクロマツ・ヒメユズリハの平均生存期間との間に有意差が認められた。

供試種ごとの各処理区間における平均生存期間を比較すると、シャリンバイとトベラの平均生存期間は 1.75%区に比べて 3.5%区で有意に低下した。一方で、クロマツとヒメユズリハの平均生存期間では、処理区間の有意差は認められなかった。

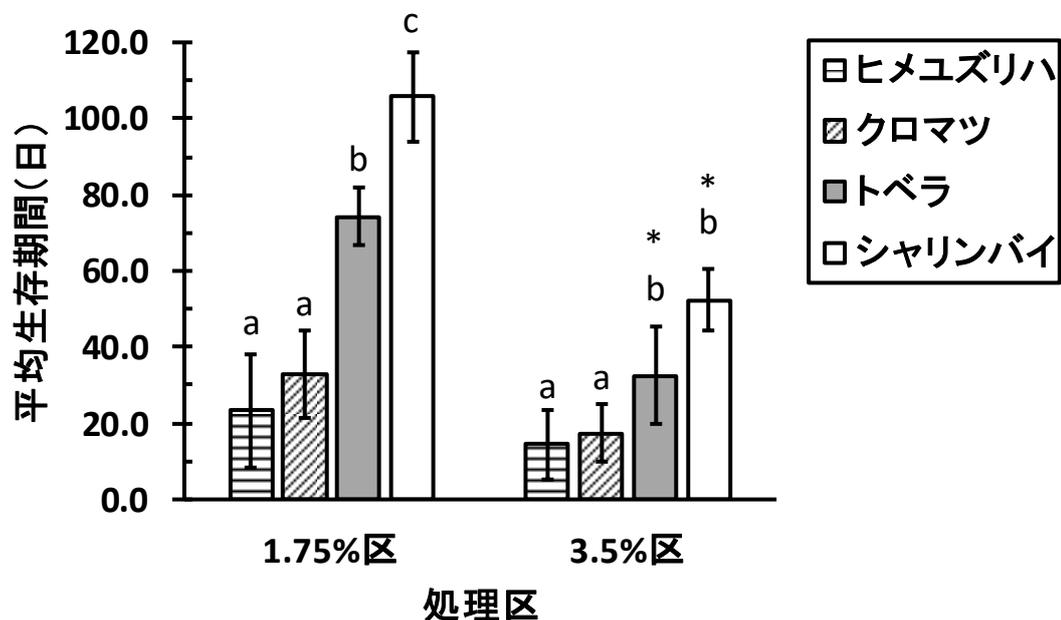


図 6.1.6 各処理区における樹種ごとの平均生存期間の比較

※アルファベットの差異は樹種間の有意差を示す (Tukey test, $p < 0.05$)

※*は処理区間の有意差を示す

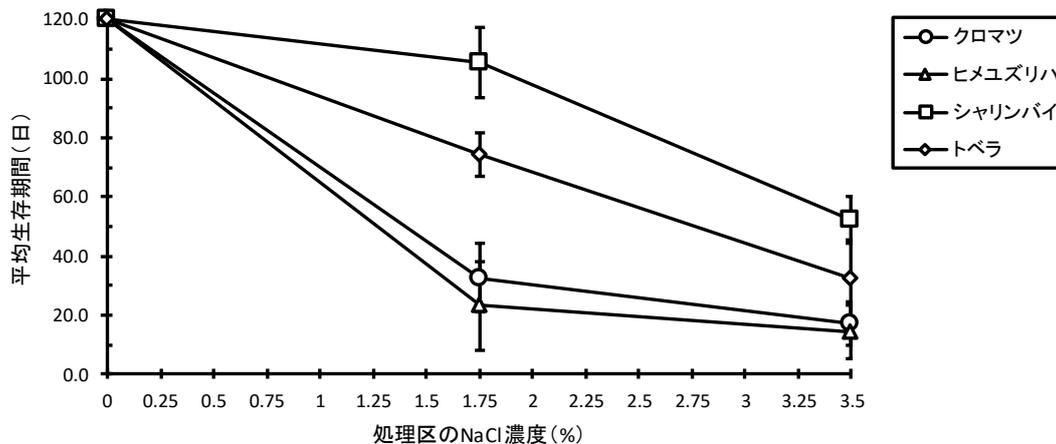


図 6.1.7 各処理区における NaCl 濃度と樹種ごとの平均生存期間の比較

6.1.4 考察

6.1.4.1 各処理区の NaCl 濃度の供試種ごとの生存率，平均生存期間への影響

今回の実験結果より，塩分濃度の高い処理区ほど生存期間が短くなり，1.75%区と 3.5%区ともに生存期間の長さは沿岸性低木の広葉樹であるシャリンバイ，トベラ，海岸林の主林木であるクロマツ，沿岸性高木の広葉樹であるヒメユズリハの順で長かった。培地に存在する塩分は植物に対してイオンストレスによる代謝の攪乱と浸透圧ストレスによる吸水阻害を併せておこす (Munns and Tester, 2008) と言われている。培地の塩分濃度が高いほど幼根，幼芽，実生などの生長が抑制される (Ahmad *et al.*, 2013) と言われている。よって，本実験においても塩分濃度の高い処理区ほどイオンストレスと浸透圧ストレスの影響が大きく実生苗の生存期間が短くなったと考えられる。また，出芽から 1 か月程度の実生苗の塩水冠水に対する耐性については，海岸林の主林木であるクロマツより高い耐性を持つ種がある可能性が示唆された。

弓場 (1984) は発芽後 2~3 週間のクロマツの実生を用いて，培地における水ポテンシャルの低下と塩分の存在が与える影響について水分生理的な面で検証する水耕実験を行っている。実験の結果，培地の水ポテンシャルが-1.0Mpa まで下がると根の伸長や乾燥重量の低下し，組織の壊死と思われる根表皮の破壊と膨らみが見られること確認している。また，4 日間-1.5Mpa の水耕液にて栽培した実生の葉の全細胞において原形質分離の発生が認められている。加えて，同じ水ポテンシャルの水耕液でも，PEG を加えた水耕液より NaCl を加えた水耕液の方がクロマツの実生の生長を大きく阻害することを明らかにしており，*Atriplex prostrata* と *Atriplex patula* の種子を用いた研究でも同様の傾向が見られている (KATEMBE *et al.*, 1998)。本実験において用いた塩水の水ポテンシャルは 1.75%区で約-1.5Mpa，3.5%区で-3.0Mpa となる。よって，本実験においてクロマツの実生苗では培地の水ポテンシャルによる浸透圧ストレスにより，原形質分離が発生していたと推察される。加えて，イオンストレスによる代謝攪乱が発生し，実生が枯死したと考えられる。

6.2 塩水浸漬がクロマツと広葉樹の幼木の各器官におけるイオン含有率に及ぼす影響

6.2.1 目的

本項では、実生の次の生育段階として1~2年生の幼木を対象とした実験を行った。海岸林の主林木であるクロマツと沿岸域に生育している耐塩生の高い広葉樹の塩水冠水耐性を検証することを目的とし、塩水による水耕栽培実験を行った。

6.2.2 実験概要

6.2.2.1 実験方法

苗木を用いた水耕栽培実験を行った。基準溶液で栽培後、NaCl溶液で栽培を行い、原子吸光光度計を用いて各器官の陽イオン (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) 濃度を測定した。

6.2.2.2 実験期間

実験は2度行った。1度目は2012年8月11日から9月9日まで行った。8月11日に開始し、9月6日まで基準培養液で栽培した。NaCl濃度処理は9月6日に開始し、3日後の9月9日に終了した。2度目の水耕栽培は、2012年11月2日に開始し、11月16日まで基準溶液にて実施した。NaCl濃度処理は11月17日に開始し、1週間後の11月23日に終了した。

6.2.2.3 実験場所

東京都市大学横浜キャンパス内のビニルハウス内で行った。実験期間中はハイグロクロン (KN ラボラトリーズ, DS1923) により温湿度を記録した。ビニルハウス内の気温は1度目の水耕栽培では平均 26.8°C, 最高 45.2°C, 最低 22.0°C, 2度目では平均 9.4°C, 最高 16.0°C, 最低 4.0°C, 湿度は1度目の水耕栽培では平均 77.8%, 最高 96.5%, 最低 39.8%, 2度目では平均 75.2%, 最高 94.4%, 最低 42.1%であった。

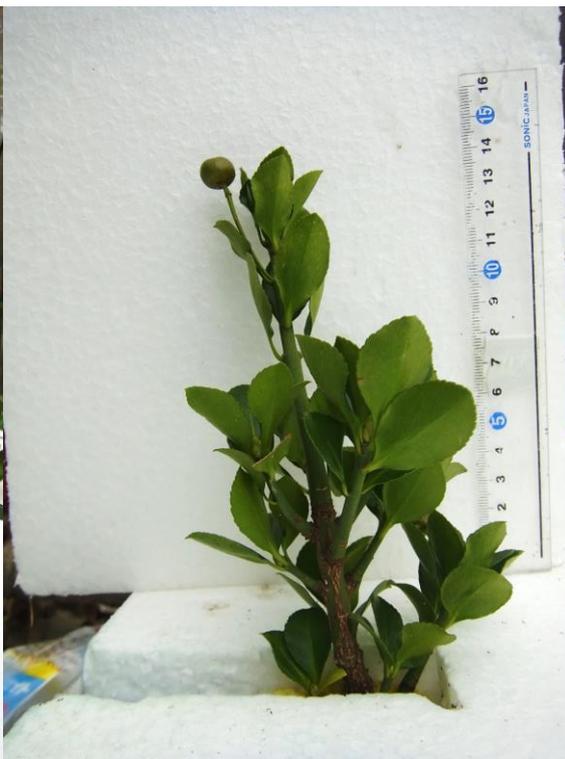
ビニルハウス内で実験を行うことにより、根の塩水冠水以外の被害要因を極力取り除いた実験を行った。

6.2.2.4 供試種

シャリンバイ (*Rhaphiolepis indica* (L.) Lindl.), トベラ (*Pittosporum tobira* (Thunb.) W.T.Aiton), マサキ (*Euonymus japonicus* Thunb.), クロマツ (*Pinus thunbergii* Parl.) の1年生の幼木を用いた。シャリンバイ, トベラ, マサキは常緑性広葉樹の低木である。3種とも沿岸域にも分布しており、原ら (2011) が2011年に行った調査では海水をかぶったと推定される場所でも生育が良好だったという報告がされている。クロマツは海岸砂地における海岸林造成に用いられる常緑性針葉樹の高木である。各供試種の樹高はシャリンバイが約 20cm, マサキが約 15cm, トベラが約 15cm, クロマツが約 15cm であった (写真 6.2.3)。



シャリンバイ



マサキ



トベラ



クロマツ

写真 6.2.3 各供試種の実験に供試した幼木の写真

6.2.2.5 処理内容

処理区はコントロール区を1区、海水とほぼ同濃度のNaCl 3.4%を溶かした3.4%区を3区設けた。実験に供した苗木は、基準溶液で水耕栽培後14日以上経過したものを用いた。

コントロール区では基準溶液による水耕栽培を行った。基準溶液は2.2.6と同様の調整を行った培養液を用いた。なお、使用した水道水には、 Na^+ :6.9mg/L、 K^+ :2.4mg/L、 Ca^{2+} :20mg/L、 Mg^{2+} 4mg/Lが含まれていた。従って、実際の培養液の Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の濃度はこれらの水道水に含まれるカチオンを加えた値になる。

3.4%区では基準溶液へ3.4%濃度のNaClを添加し調整した培養液により水耕栽培を行った。

6.2.2.6 供試種の割り当て

供した苗木は各処理区4本ずつ割り当てた(表6.2.1)。

表 6.2.1 各種の処理区割り当て

	シャリンバイ	トベラ	マサキ	クロマツ
コントロール区	1個体	1個体	1個体	1個体
3.4%区①	1個体	1個体	1個体	1個体
3.4%区②	1個体	1個体	1個体	1個体
3.4%区③	1個体	1個体	1個体	1個体

6.2.2.7 水耕栽培装置

水耕栽培装置の模式図を図6.2.1に示す。タライの中を培養液で浸し、遮光のため発泡スチロール板にてフタをした。発泡スチロール板に苗木を固定する切れ込みを4つ入れ、フタに幼木を固定した。このとき、幼木を固定するため幹にスポンジを巻き苗木と発泡スチロー

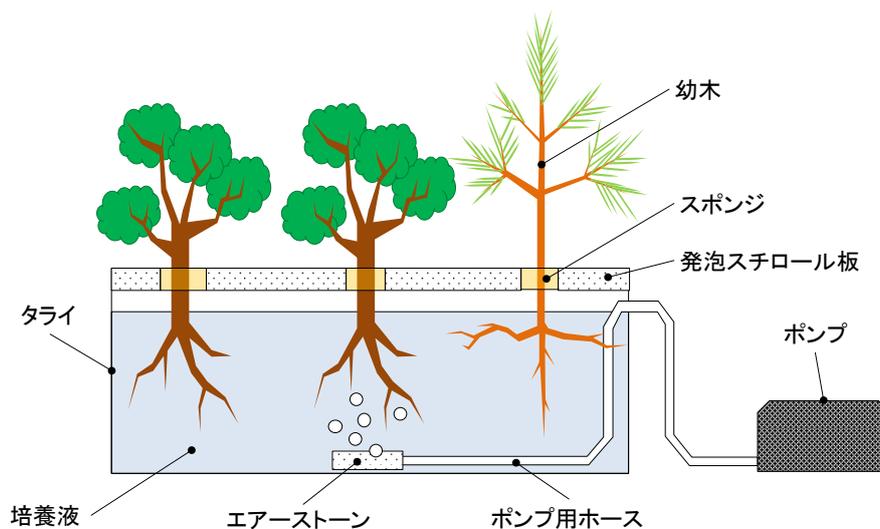


図 6.2.1 水耕栽培装置の模式図



写真 6.2.1 水耕栽培実験の様子

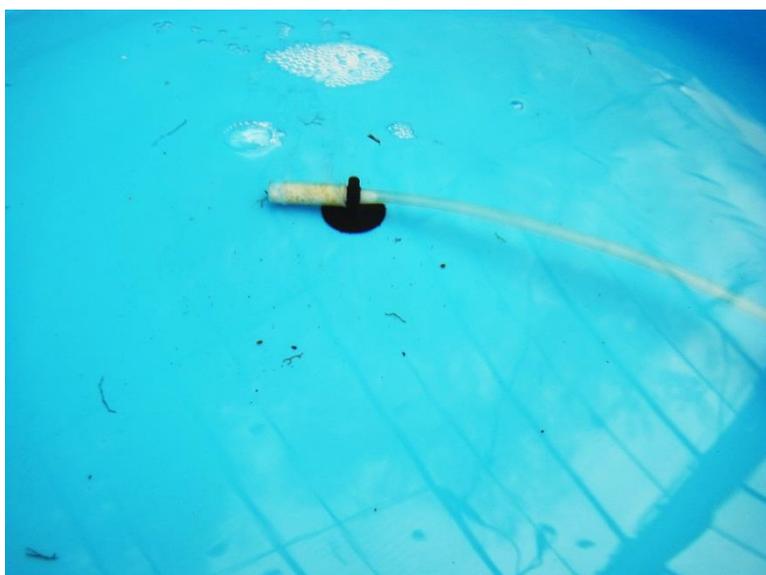


写真 6.2.2 エアポンプによる空気の供給

ル板の隙間を埋めた。エアポンプにエアポンプ用ホース、エアストーンを接続し、エアポンプ用ホースとエアストーンを培養液内に沈め、ホース用の吸盤でタライの底に固定した。水耕栽培中はポンプによるバブリングを行い培養液へ空気の供給を行った。空気を供給することにより、酸素不足による根腐れを防止した。

6.2.2.8 植物体内の陽イオンの測定

苗木の耐塩性を把握し評価するために根、茎、葉ごとに陽イオン (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) の濃度の測定を行った。実験に供した苗木は、栽培終了後速やかに回収し、水道水および蒸留水にて洗浄後表面の水分を拭き取り、植物体を根、茎、葉に分け新鮮重を測定した。80°Cにて48時間乾燥後の重量を測定した。

6.2.2.9 植物体中の無機成分の分析

前項において乾燥させた試料を、湿式灰化法により塩酸溶液とした。湿式灰化法については参考資料の資料 2 に詳細を記載する。作成した塩酸溶液を 100 倍に希釈し、原子吸光光度計 (HITACHI, A-2000) により、植物体中の各器官における陽イオン (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) 濃度を測定した。各イオンの測定に用いたホロカソードランプと波長は、 Na^+ では Prant No. 208-2021 (HITACHI) のランプで波長は 330.2 nm, K^+ では Prant No. 208-2016 (HITACHI) のランプで波長は 404.4 nm, Ca^{2+} , Mg^{2+} では Prant No. 208-2021 (HITACHI) のランプで波長は Ca^{2+} の測定時には 422.7nm, Mg^{2+} の測定時には 285.2nm となっている。分析はアセチレンガスを 75kpa で供給し、測定時間は 3 秒間とし、繰り返しは 3 回に設定した条件で行った。

6.2.2.10 統計解析

各供試種の樹種間における葉内の K/Na 比の平均値の有意差について検定するため、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い、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 検定 ($p < 0.05$) を用いた。同一の供試種の処理区間における有意差については t 検定 ($p < 0.05$) を用いて検定した (IBM SPSS Statistics ver. 19)。

6.2.3 結果

6.2.3.1 実験中における苗木の様子

第 1 回、第 2 回ともに苗木の衰弱やネクロシスの発生などは実験期間中に見受けられなかった。

6.2.3.2 植物体内のイオン含有率の変化

表 6.2.2 に樹種別、器官別の植物体内の陽イオン分析結果と NaCl 添加に対する陽イオン含有率の変化を示す。

表 6.2.2 植物体中の無機成分含有率

種名	処理時間 (日)	処理区	器官	陽イオン含有率(%)					Na ⁺ 根/葉	
				Na	K	Ca	Mg	K/Na		
シャリンバイ	3	コントロール	葉	0.10	1.50	3.00	0.20	15.00	2.00	
			莖	0.10	1.05	0.10	0.02	10.50		
			根	0.20	0.60	1.50	0.15	3.00		
		3.4%	葉	0.83±0.29	0.73±0.56	1.50±0.50	0.18±0.06	1.06±0.96		3.00±1.73
			莖	1.50±0.00	0.58±0.19	0.67±0.29	0.12±0.03	0.39±0.13		
			根	2.17±0.29	0.23±0.03	0.37±0.23	0.05±0.00	0.11±0.01		
	7	コントロール	葉	0.15	1.80	3.00	0.20	12.00	1.00	
			莖	0.25	1.00	1.00	0.15	4.00		
			根	0.15	0.60	1.50	0.10	4.00		
		3.4%	葉	1.00±0.50	1.37±0.15	2.50±0.50	0.22±0.03	1.60±0.72		2.06±2.08
			莖	1.33±0.29	0.70±0.10	1.17±0.29	0.10±0.05	0.56±0.42		
			根	1.83±0.58	0.60±0.10	0.83±0.29	0.07±0.03	0.35±0.07		
トベラ	3	コントロール	葉	0.05	1.50	2.50	0.20	30.00	2.00	
			莖	0.15	0.70	2.00	0.05	4.67		
			根	0.10	0.90	2.50	0.05	9.00		
		3.4%	葉	1.17±0.76	1.23±0.15	1.83±0.29	0.12±0.03	1.37±0.76		3.67±0.58
			莖	1.33±0.58	0.73±0.06	2.33±0.58	0.05±0.00	0.62±0.24		
			根	3.33±0.58	0.68±0.18	1.17±0.76	0.07±0.03	0.21±0.07		
	7	コントロール	葉	0.25	1.50	2.50	0.15	6.00	1.00	
			莖	0.40	0.70	2.00	0.05	1.75		
			根	0.25	0.90	2.50	0.10	3.60		
		3.4%	葉	0.25±0.00	1.90±0.17	3.00±0.50	0.25±0.00	7.60±0.69		9.00±0.29
			莖	0.50±0.00	0.73±0.21	3.17±1.26	0.08±0.06	1.47±0.42		
			根	2.25±0.25	0.92±0.18	1.83±0.29	0.10±0.00	0.41±0.07		
マサキ	3	コントロール	葉	0.10	0.90	3.00	0.10	9.00	1.00	
			莖	0.05	0.60	3.00	0.05	12.00		
			根	0.10	0.30	1.00	0.10	3.00		
		3.4%	葉	0.67±0.29	0.61±0.48	1±0.50	0.12±0.03	0.97±0.94		2.67±0.82
			莖	1.17±0.29	0.36±0.29	1.33±0.76	0.07±0.03	0.29±0.19		
			根	1.83±1.04	0.15±0.00	1.00±0.50	0.07±0.03	0.10±0.05		
	7	コントロール	葉	0.15	0.90	3.00	0.15	6.00	1.33	
			莖	0.35	0.60	3.00	0.10	1.71		
			根	0.20	0.30	1.00	0.05	1.50		
		3.4%	葉	1.50±0.00	0.73±0.12	3.67±0.29	0.15±0.00	0.49±0.08		1.44±1.00
			莖	1.33±0.29	0.40±0.17	2.00±0.87	0.07±0.03	0.30±0.10		
			根	2.17±0.29	0.33±0.15	1.33±0.29	0.07±0.03	0.15±0.05		
クロマツ	3	コントロール	葉	0.10	0.50	0.50	0.05	5.00	0.50	
			莖	0.10	0.25	1.00	0.05	2.50		
			根	0.05	0.15	0.50	0.10	3.00		
		3.4%	葉	1.00±0.00	0.75±0.15	0.63±0.32	0.08±0.03	0.75±0.15		1.67±0.19
			莖	1.50±0.00	0.17±0.06	0.57±0.40	0.02±0.00	0.11±0.04		
			根	1.67±0.29	0.05±0.02	0.18±0.13	0.01±0.01	0.03±0.02		
	7	コントロール	葉	0.20	0.70	0.50	0.10	3.50	0.75	
			莖	0.20	0.40	0.50	0.10	2.00		
			根	0.15	0.35	1.50	0.40	2.33		
		3.4%	葉	1.00±0.50	0.70±0.00	1.00±0.00	0.12±0.02	0.86±0.49		2.94±0.92
			莖	1.67±0.76	0.33±0.12	0.67±0.29	0.04±0.02	0.23±0.15		
			根	2.67±0.76	0.47±0.33	0.70±0.52	0.04±0.02	0.16±0.07		

シャリンバイ：図 6.2.1, 図 6.2.22 に Na^+ , 図 6.2.3, 図 6.2.4 に K^+ , 図 6.2.5, 図 6.2.6 に Ca^{2+} , 図 6.2.7, 図 6.2.8 に Mg^{2+} 含有率の変化を示す。 Na^+ 含有率は3部位全てにおいて処理期間3日ではコントロール区に比べ3.4%区の方が0.68~2.02%, 7日では0.85~1.68%上昇した。部位別にみると葉では処理期間3日で0.68%, 7日で0.85%上昇した。茎では処理期間3日で1.25%, 7日で1.08%上昇した。根では処理期間3日で2.02%, 7日で1.68%の上昇を示した。両方の処理期間で根の含有率の上昇が他の部位に比べて大きくなる傾向が認められた。

K^+ の含有率は処理期間3日では3部位全てでコントロール区より3.4%区の方が0.37~0.77%低下した。処理期間7日では葉と茎で0.30~0.43%低下した。部位別にみると葉では処理期間3日で1.07%, 7日で0.43%低下した。茎では処理期間3日で0.42%, 7日で0.30%低下した。根では処理期間3日で0.37%低下したが, 7日では変化は認められなかった。両方の処理期間でコントロール区に比べ3.4%区で葉, 茎で含有率の低下が認められた。特に葉では, 他の2部位に比べ大きく低下する傾向が示された。根では処理期間3日で緩やかな低下を示し, 処理期間7日では含有率の変化は認められなかった。

Ca^{2+} 含有率は処理期間3日では葉と根でコントロール区より3.4%区の方が1.13~1.50%低下した。処理期間7日では葉と根で0.50~0.67%低下した。部位別にみると葉では処理期間3日で1.50%, 7日で0.50%低下した。茎では処理期間3日で0.57%, 処理期間7日で0.17%上昇した。根では処理期間3日で1.13%, 7日で0.67%低下した。以上から両方の処理期間でコントロール区に比べ3.4%区で葉と根の含有率の低下が認められたが, 茎では含有率の上昇が認められた。

Mg^{2+} 含有率は処理期間3日では葉と根でコントロール区に比べ3.4%区の方が0.02~0.10%低下し, 茎で0.02%上昇した。7日では茎と根で0.03~0.05%低下し, 葉で0.02%上昇した。部位別にみると, 葉では処理期間3日で0.02%低下し, 7日で0.02%上昇した。茎では処理期間3日で0.02%上昇し, 7日では0.05%低下した。根では処理期間3日で0.10%, 7日で0.03%低下した。両方の処理期間でコントロール区に比べ3.4%区で根の含有率が低下する傾向が示された。

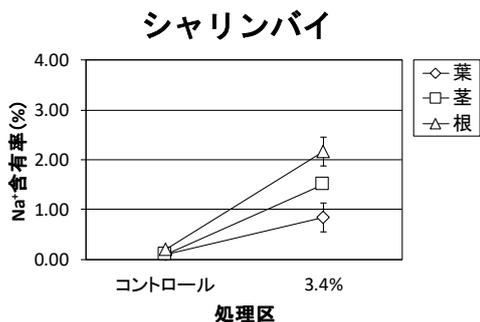


図 6.2.2 処理期間 3 日間での Na⁺含有率の変化

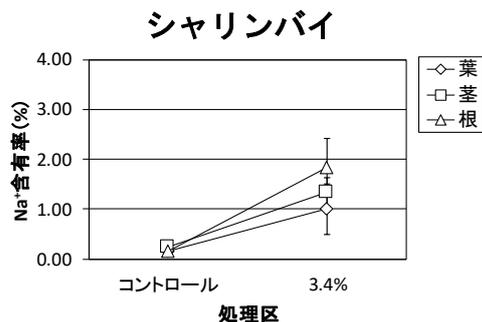


図 6.2.3 処理期間 7 日間での Na⁺含有率の変化

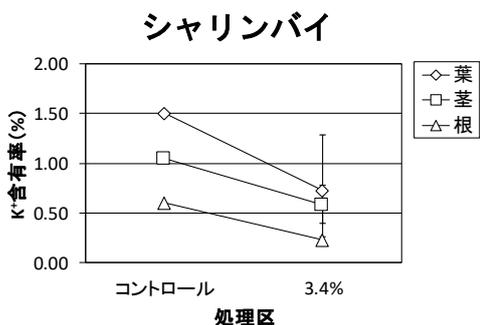


図 6.2.4 処理期間 3 日間での K⁺含有率の変化

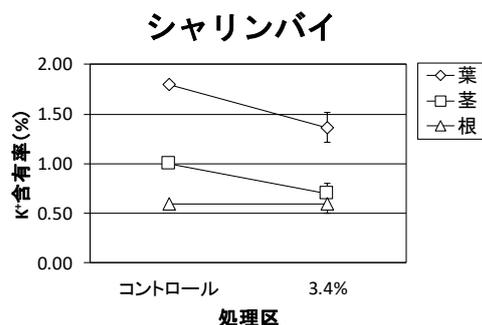


図 6.2.5 処理期間 7 日間での K⁺含有率の変化

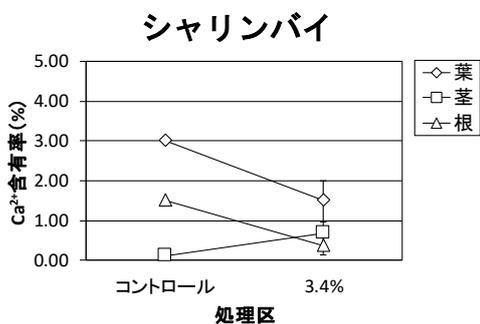


図 6.2.6 処理期間 3 日間での Ca²⁺含有率の変化

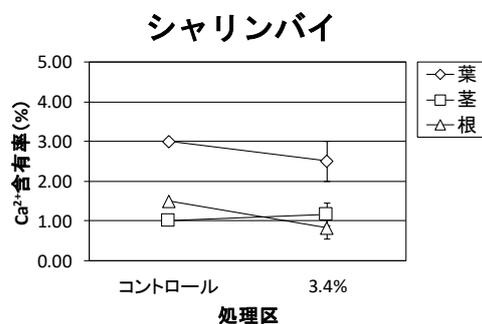


図 6.2.7 処理期間 7 日間での Ca²⁺含有率の変化

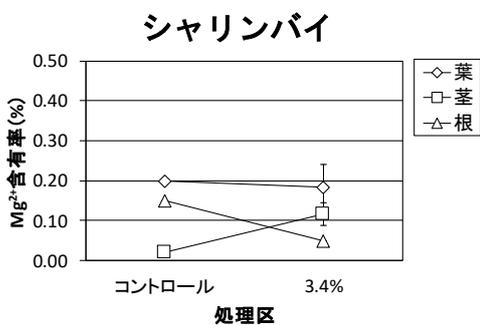


図 6.2.8 処理期間 3 日間での Mg²⁺含有率の変化

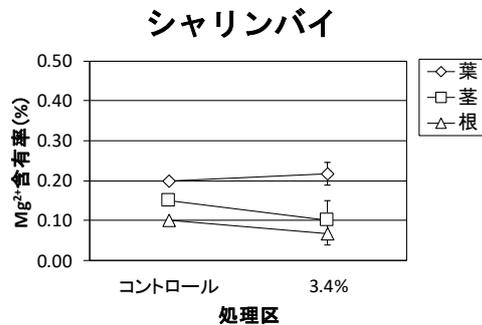


図 6.2.9 処理期間 7 日間での Mg²⁺含有率の変化

トベラ：図 6.2.9, 図 6.2.10 に Na^+ , 図 6.2.11, 図 6.2.12 に K^+ , 図 6.2.13, 図 6.2.14 に Ca^{2+} , 図 6.2.15, 図 6.2.16 に Mg^{2+} 含有率の変化を示す。 Na^+ 含有率は処理期間 3 日では 3 部位全てでコントロール区より 3.4%区の方が 1.12~3.23%上昇した。処理期間 7 日では茎と根で 0.10%~2.00%上昇した。部位別にみると葉では処理期間 3 日で 1.12%上昇したが, 7 日では変化は認められなかった。茎では処理期間 3 日で 1.18%, 7 日で 0.10%上昇した。根では処理期間 3 日で 3.23%, 7 日で 2.00%上昇した。以上から, 両方の処理期間で根は他の 2 部位に比べ含有率が急に上昇する傾向が認められた。

K^+ 含有率は処理期間 3 日では葉と根でコントロール区に比べ 3.4%区で 0.22~0.27%低下したが, 茎では 0.03%上昇した。処理期間 7 日では 3 部位全てで 0.02~0.40 上昇した。部位別にみると葉では処理期間 3 日で 0.27%低下し, 7 日では 0.40%上昇した。茎では処理期間 3 日, 7 日ともに 0.03%上昇が認められた。根では処理期間 3 日で 0.22 低下し, 処理期間 7 日で 0.02 上昇した。両方の処理期間でコントロール区に比べ 3.4%区で茎の含有率の上昇が示された。

Ca^{2+} 含有率は処理期間 3 日では葉と根でコントロール区に比べ 3.4%区の方が 0.67~1.33%低下し, 茎で 0.33 上昇した。処理期間 7 日では葉と茎で 0.50~1.17%上昇し, 根で 0.67%低下した。部位別みると葉では処理期間 3 日で 0.67%低下し, 7 日では 0.50%上昇した。茎では処理期間 3 日で 0.33%上昇し, 処理期間 7 日で 1.17%上昇した。根では処理期間 3 日で 1.33%低下し, 処理期間 7 日で 0.67%低下した。両方の処理期間でコントロール区に比べ 3.4%区で根の含有率の低下が認められた。

Mg^{2+} 含有率は処理期間 3 日では葉と根でコントロール区に比べ 3.4%区の方が 0.02~0.08%低下したが, 茎では変化が認められなかった。処理期間 7 日では葉と茎で 0.03~0.10%上昇し, 根では変化が認められなかった。部位別にみると葉では処理期間 3 日で 0.02%低下し, 7 日で 0.10%上昇した。茎では処理期間 3 日で変化は認められず, 7 日で 0.03%上昇した。根では処理期間 3 日でコントロール区に比べ 3.4%区で 0.02%低下し, 7 日では変化は認められなかった。

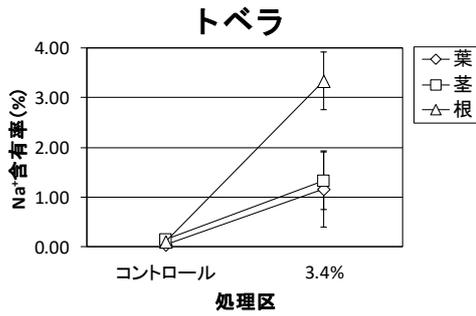


図 6.2.9 処理期間 3 日間での Na⁺含有率の変化

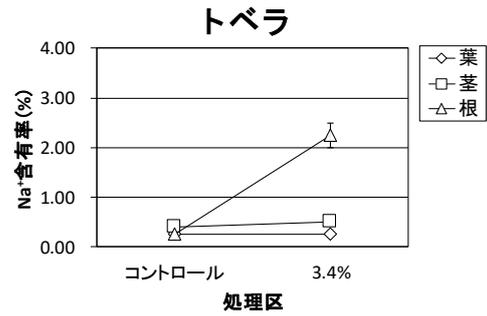


図 6.2.10 処理期間 7 日間での Na⁺含有率の変化

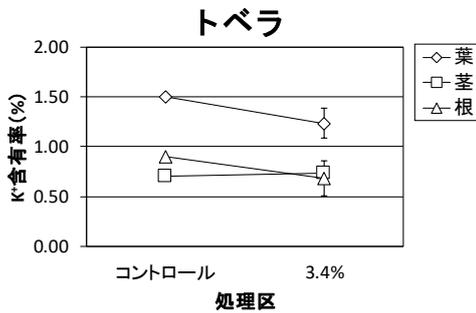


図 6.2.11 処理期間 3 日間での K⁺含有率の変化

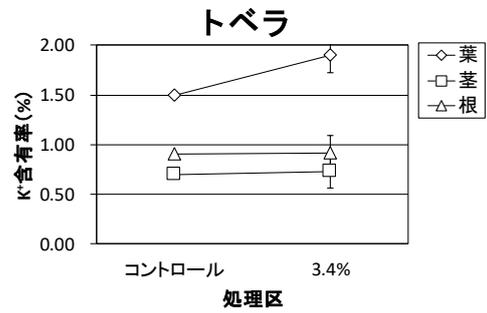


図 6.2.12 処理期間 7 日間での K⁺含有率の変化

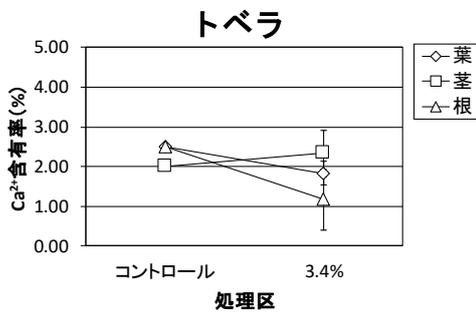


図 6.2.13 処理期間 3 日間での Ca²⁺含有率の変化

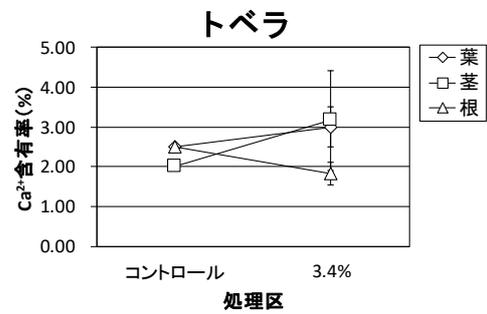


図 6.2.14 処理期間 7 日間での Ca²⁺含有率の変化

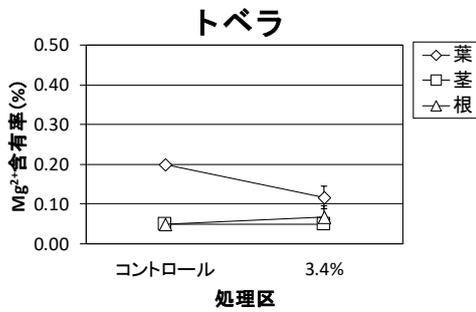


図 6.2.15 処理期間 3 日間での Mg²⁺含有率の変化

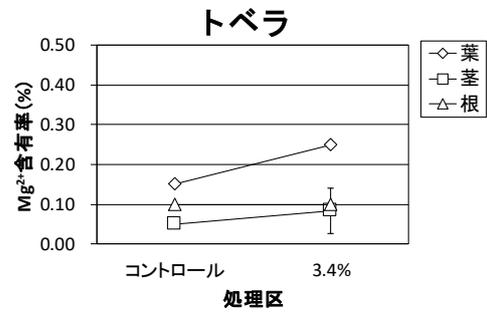


図 6.2.16 処理期間 7 日間での Mg²⁺含有率の変化

マサキ：図 6.2.17, 図 6.2.18 に Na^+ , 図 6.2.19, 図 6.2.20 に K^+ , 図 6.2.21, 図 6.2.22 に Ca^{2+} , 図 6.2.23, 図 6.2.24 に Mg^{2+} 含有率の変化を示す。Na 含有率は両方の処理期間で 3 部位全において NaCl 添加により上昇する傾向を示した。処理期間 3 日では 3 部位で 0.57~1.73%上昇し, 7 日では 0.98~1.97%上昇した。部位別にみると葉では処理期間 3 日で 0.57%, 7 日で 1.35%上昇した。茎では処理期間 3 日で 1.12%, 7 日で 0.98%上昇した。根では処理期間 3 日で 1.73%, 7 日で 1.98%の上昇を示した。以上から根は NaCl 添加により他の 2 部位に比べ含有率が急に上昇する傾向があることが認められた。

K^+ 含有率は処理期間 3 日では 3 部位全てでコントロール区に比べ 3.4%区の方が 0.15~0.29%低下し, 7 日では葉と茎で 0.17~0.20%低下した。部位別にみると葉では処理期間 3 日で 0.29%, 7 日で 0.17%低下した。茎では処理期間 3 日で 0.24%, 7 日で 0.20%低下した。根では処理期間 3 日で 0.15%低下, 7 日で 0.03%上昇した。以上より, 根に比べ他の 2 部位では含有率が急に低下する傾向が示された。

Ca^{2+} 含有率は処理期間 3 日では葉と茎でコントロール区に比べ 3.4%区の方が 0.33~1.00%低下し, 根では一定であった。7 日では茎で 1.00%低下し, 他の 2 部位では 0.33~0.67%上昇した。以上より, 両期間の茎で含有率の低下する傾向が示された。葉では含有率一定であった。根では含有率は上昇または一定であった。

Mg^{2+} 含有率は処理期間 3 日では 葉と茎で 0.02%上昇し, 根では 0.03%低下する傾向を示した。処理期間 7 日では葉で一定となり, 茎で 0.03%低下, 根で 0.02%上昇する傾向を示した。

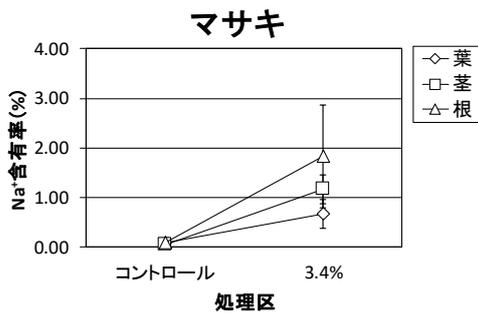


図 6.2.17 処理期間 3 日間での Na⁺含有率の変化

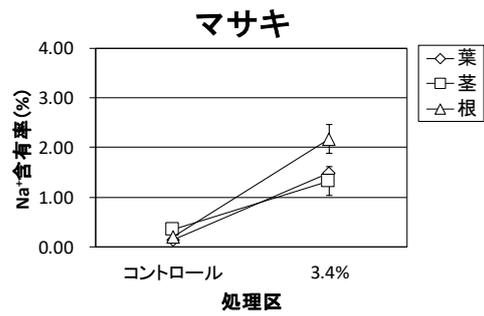


図 6.2.18 処理期間 7 日間での Na⁺含有率の変化

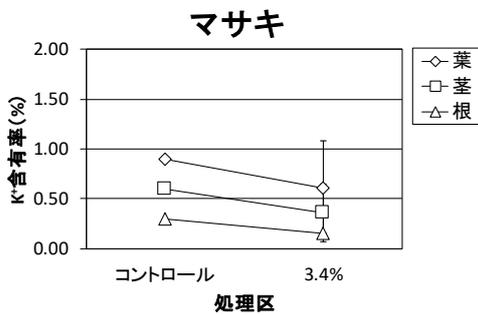


図 6.2.19 処理期間 3 日間での K⁺含有率の変化

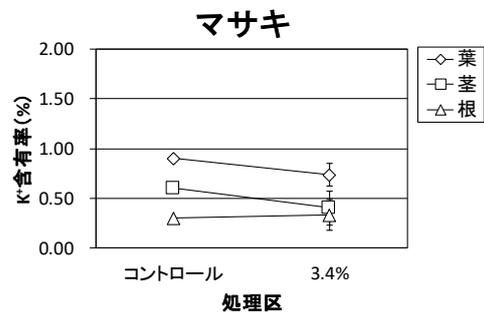


図 6.2.20 処理期間 7 日間での K⁺含有率の変化

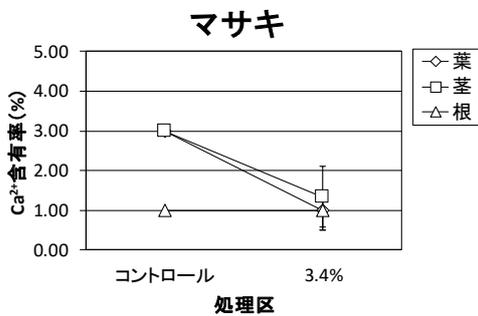


図 6.2.21 処理期間 3 日間での Ca²⁺含有率の変化

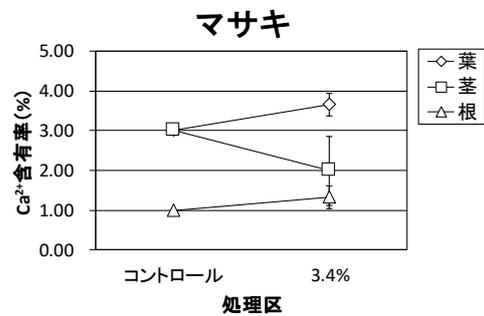


図 6.2.22 処理期間 7 日間での Ca²⁺含有率の変化

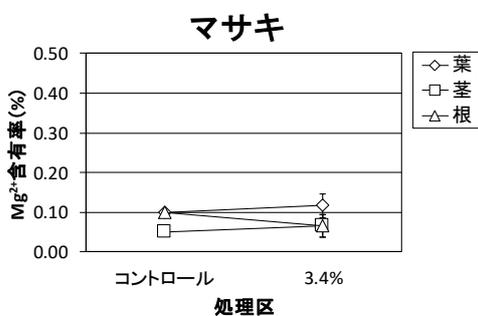


図 6.2.23 処理期間 3 日間での Mg²⁺含有率の変化

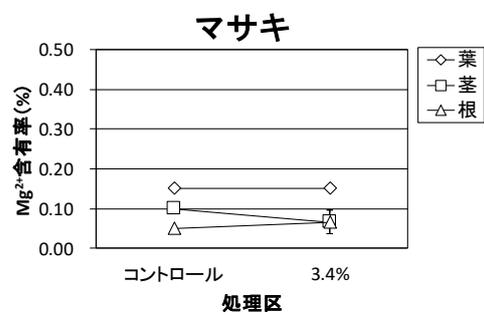


図 6.2.24 処理期間 7 日間での Mg²⁺含有率の変化

クロマツ：図 6.2.25, 図 6.2.26 に Na^+ , 図 6.2.27, 図 6.2.28 に K^+ , 図 6.2.29, 図 6.2.30 に Ca^{2+} , 図 6.2.32, 図 6.2.33 に Mg^{2+} 含有率の変化を示す。 Na^+ 含有率は両方の処理期間, 3 部位全てで NaCl 添加により上昇する傾向を示した。処理期間 3 日では 3 部位全てでコントロール区により 3.4%区の方が 0.90~1.62%上昇し, 7 日でも 3 部位全てで 0.80~2.52%上昇した。部位別にみると葉では処理期間 3 日で 0.9%, 7 日で 0.80%上昇した。茎では処理期間 3 日で 1.40%, 7 日で 1.47%上昇した。根では処理期間 3 日で 1.62%, 7 日 2.52%上昇した。以上より, 根では他の 2 部位に比べ含有率が急に上昇する傾向が示された。特に処理期間 7 日の根では

K^+ 含有率は処理期間 3 日ではコントロール区に比べ 3.4%区の方が茎と根で 0.23~0.30%低下したのに対し葉では 0.05%上昇する傾向を示した。処理期間 7 日では茎で 0.07%低下し, 根で 0.12%上昇したが葉で一定であった。部位別にみると葉では処理期間 3 日で 0.05%上昇し, 7 日で一定であった。茎では処理期間 3 日で 0.23%低下し, 7 日で 0.07%低下した。根では処理期間 3 日で 0.30%低下し 7 日では 0.12%増加した。両方の処理期間とも茎でコントロール区に比べ 3.4%区で含有率の低下する傾向を示した。

Ca^{2+} 含有率は処理期間 3 日では葉と茎でコントロール区より 3.4 区の方が 0.13%上昇し, 茎と根では 0.32~0.07%低下した。処理期間 7 日では葉と茎で 0.17~0.50%上昇し, 根では 0.80%低下した。両方の処理期間で, コントロール区に比べ 3.4 区で葉と茎の含有率が上昇し, 根が低下する傾向が示された。

Mg^{2+} 含有率は処理期間 3 日では葉でコントロール区より 3.4%の方が 0.03%上昇し, 茎と根で 0.03~0.09%低下した。処理期間 7 日では茎と根で 0.06~0.36%低下し, 葉で 0.02%上昇した。両方の期間で茎と根の含有率がコントロール区に比べ 3.4%区で低下する傾向が見られた。

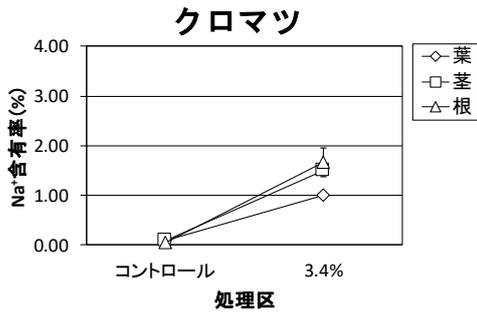


図 6.2.25 処理期間 3 日間での Na⁺含有率の変化

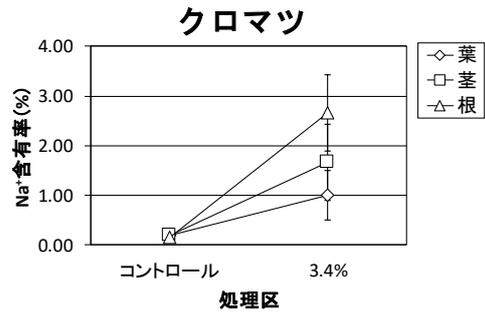


図 6.2.26 処理期間 7 日間での Na⁺含有率の変化

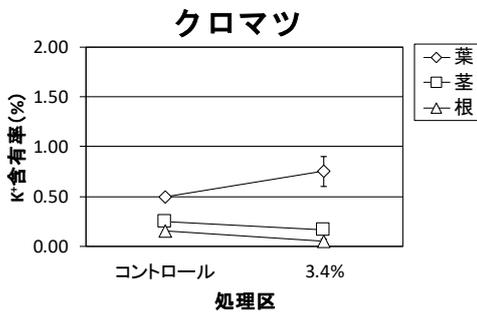


図 6.2.27 処理期間 3 日間での K⁺含有率の変化

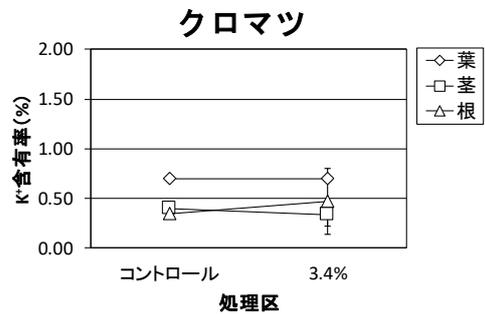


図 6.2.28 処理期間 7 日間での K⁺含有率の変化

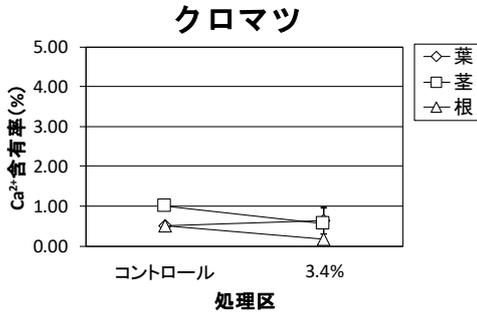


図 6.2.29 処理期間 3 日間での Ca²⁺含有率の変化

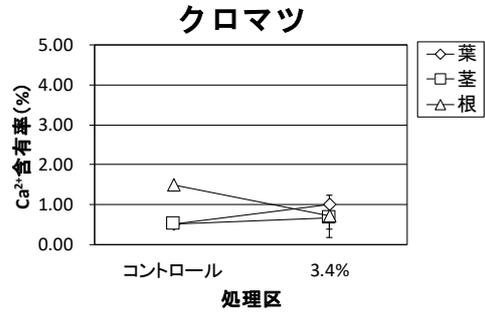


図 6.2.30 処理期間 7 日間での Ca²⁺含有率の変化

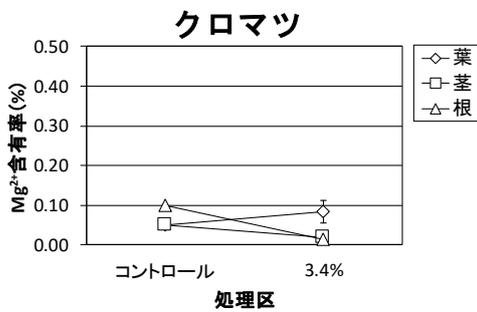


図 6.2.31 処理期間 3 日間での Mg²⁺含有率の変化

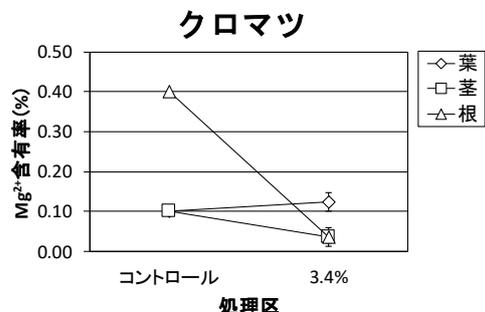


図 6.2.32 処理期間 7 日間での Mg²⁺含有率の変化

6.2.3.3 樹種間のイオン含有率の比較

図 6.2.33～図 6.2.34 に 3 日区, 7 日区における各供試種の器官ごとの Na^+ 含有率, 図 6.2.35～図 6.2.36 に 3 日区, 7 日区における各供試種の器官ごとの K^+ 含有率, 図 6.2.37～図 6.2.38 に 3 日区, 7 日区における各供試種の器官ごとの Ca^{2+} 含有率, 図 6.2.39～図 6.2.40 に 3 日区, 7 日区における各供試種の器官ごとの Mg^{2+} 含有率を示した。

Na^+ 含有率について, 3 日区では全ての供試種において根の含有率が最も高く, 次いで茎の含有率が高くなり, 葉の含有率が最も低い傾向が認められた。7 日区では, クロマツ, シャリンバイ, トベラで 3 日区と同様の傾向が認められたが, マサキのみ茎の含有率が葉の含有率より高くなった。また, 7 日区の葉内 Na^+ 含有率は特にトベラが低くなった。

K^+ 含有率では, 3 日区, 7 日区ともに全ての供試種で葉の含有率が最も高い傾向が見られた。7 日区の葉内の K^+ 含有率はトベラ, シャリンバイ, マサキ, クロマツの順に高かった。

Ca^{2+} 含有率は 3 日区に比べて 7 日区の方が高くなる傾向が各器官において認められた。また, クロマツ, シャリンバイ, マサキは 3 日区, 7 日区ともに葉, 茎, 根の順に含有率が高くなったが, トベラは葉より茎の含有率が 3 日区, 7 日区ともに高くなった。

Mg^{2+} 含有率では, 3 日区と 7 日区ともに全ての供試種で葉, 茎, 根の順に含有率が高くなった。また, クロマツ, シャリンバイ, トベラは葉, 茎, 根いずれの器官の Mg^{2+} 含有率も 3 日区に比べて 7 日区で高くなったが, マサキの茎と根の Mg^{2+} 含有率は 3 日区と 7 日区で同じ含有率となった。

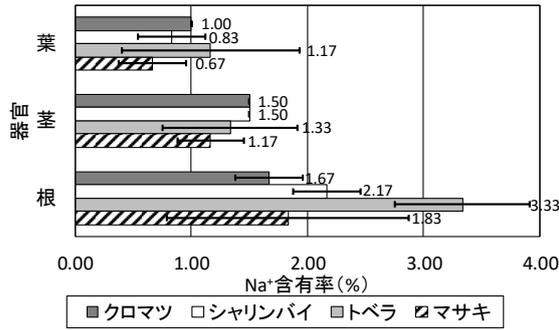


図 6.2.33 各供試種の 3 日区における Na⁺含有率

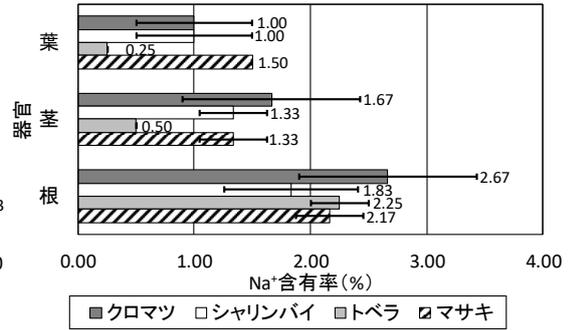


図 6.2.34 各供試種の 7 日区における Na⁺含有率

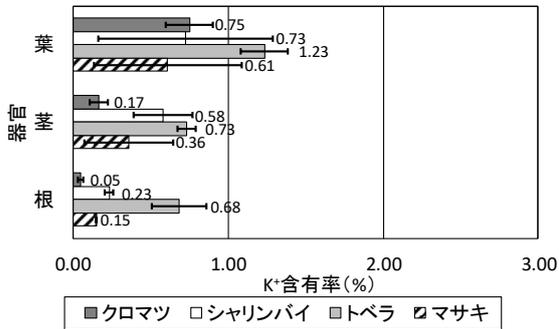


図 6.2.35 各供試種の 3 日区における K⁺含有率

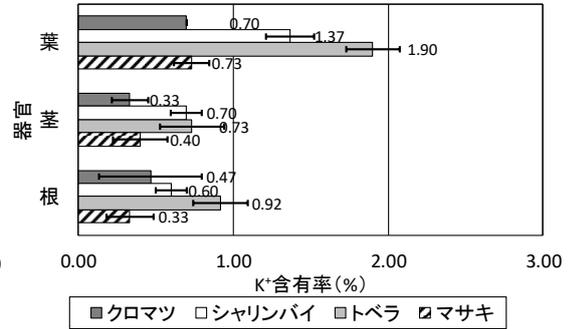


図 6.2.36 各供試種の 7 日区における K⁺含有率

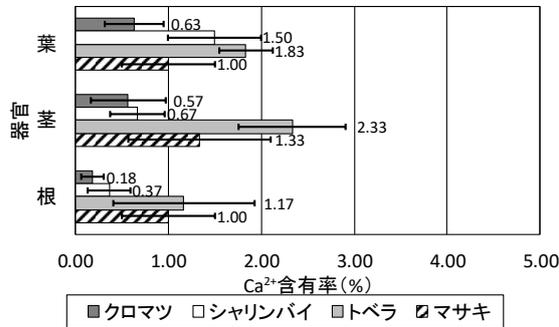


図 6.2.37 各供試種の 3 日区における Ca²⁺含有率

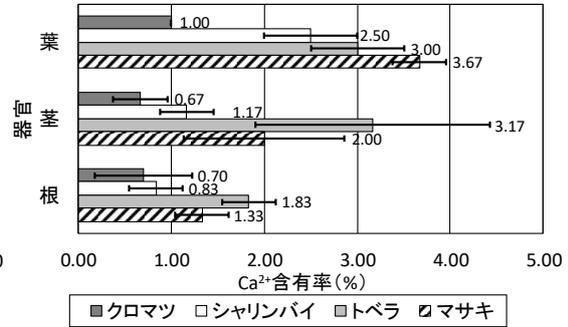


図 6.2.38 各供試種の 7 日区における Ca²⁺含有率

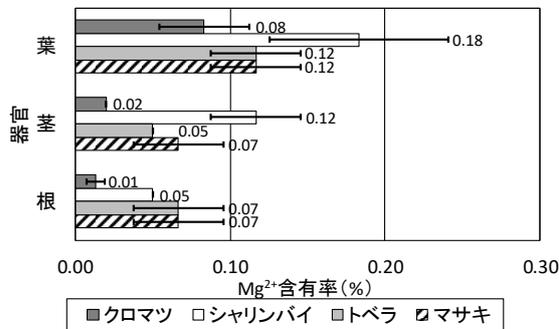


図 6.2.39 各供試種の 3 日区における Mg²⁺含有率

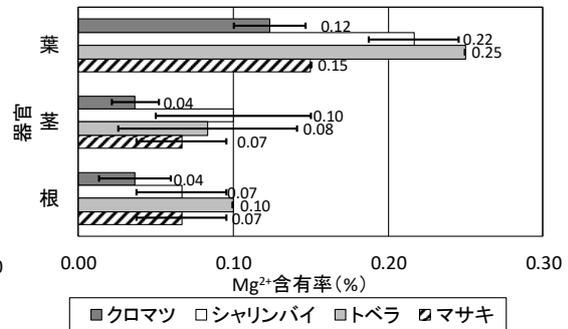


図 6.2.40 各供試種の 7 日区における Mg²⁺含有率

6.2.3.5 葉内の K⁺/Na⁺比

図6.2.41に各種の葉内のK⁺/Na⁺比を示す。また、全個体の葉内のK⁺/Na⁺比と葉中のNa⁺含有率の関係を図6.2.42に、供試種ごとの全個体について同様の図を図6.2.43に示す。加えて、全個体の葉内のK⁺/Na⁺比と個体乾燥重量との関係を図6.2.44に、供試種ごとの全個体について同様の図を図6.2.45に示す。図4.2.41より、K⁺/Na⁺比は処理期間3日ではクロマツ(0.75)<マサキ(0.97)<シャリンバイ(1.06)<トベラ(1.37)であった。処理期間7日ではマサキ(0.49)<クロマツ(0.86)<シャリンバイ(1.60)<トベラ(7.60)であった。両方の処理期間でトベラのK⁺/Na⁺比が最も高い値を示した。また、図4.2.42および図4.2.43より、すべての供試種において葉内におけるNa⁺含有率が上昇すると葉内のK⁺/Na⁺比が急激に減少する傾向が認められたが、他方、図4.2.44および図4.2.45より、個体乾燥重量と葉内のK⁺/Na⁺比との間には関係性は認められなかった。

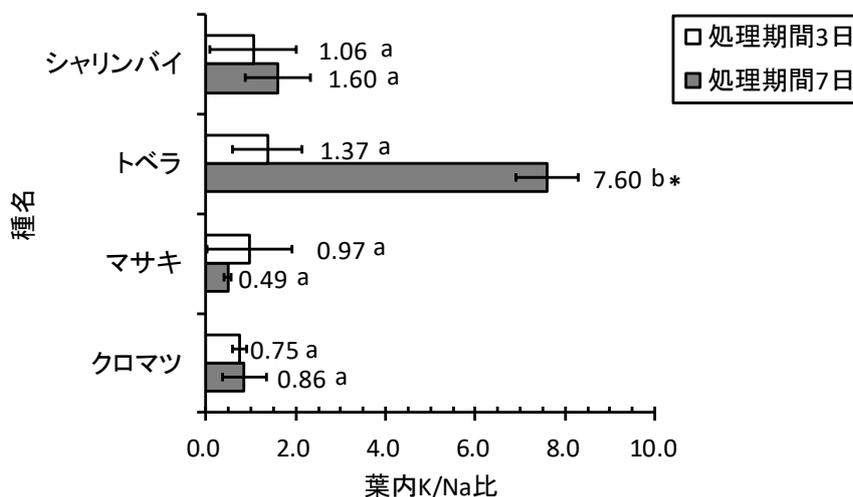


図 6.2.41 各供試種における処理区ごとの葉の K⁺/Na⁺比の比較
 ※アルファベットの差異は各試験区の供試種間の有意差を表す
 ※*は各供試種の処理区間差を表す

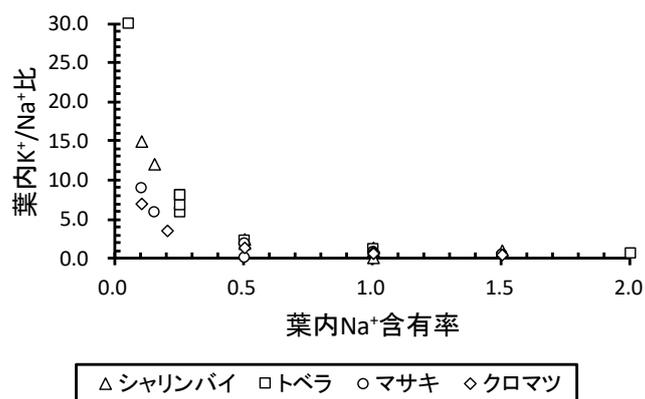


図 6.2.42 全個体の葉の K⁺/Na⁺比と葉内 Na⁺含有率の関係

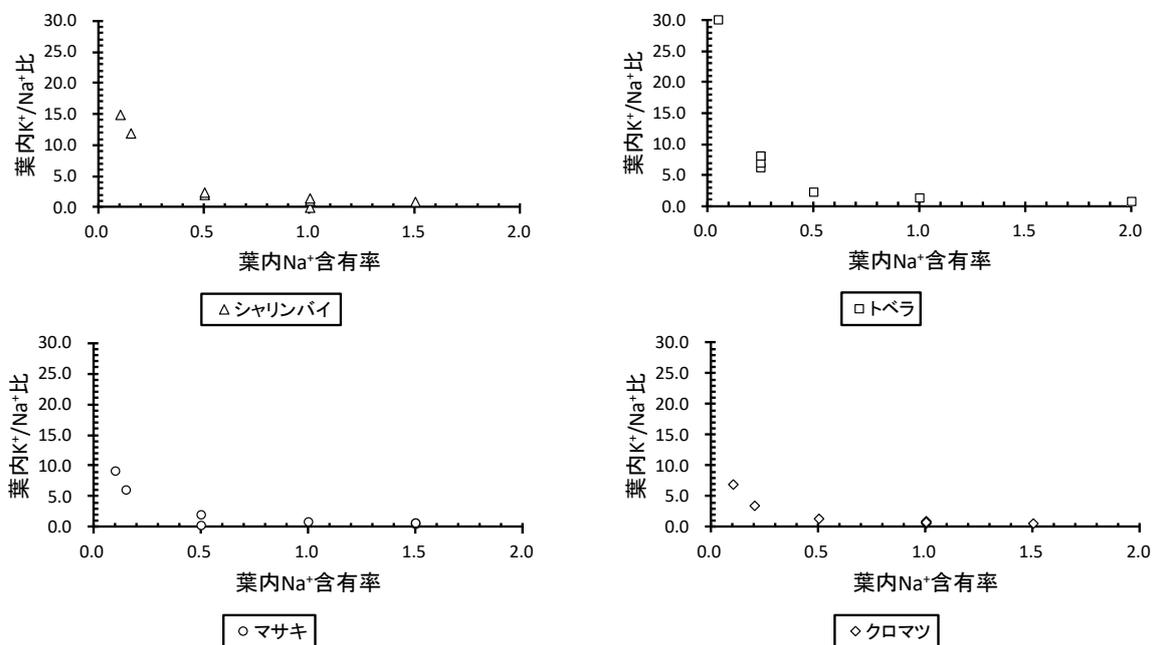
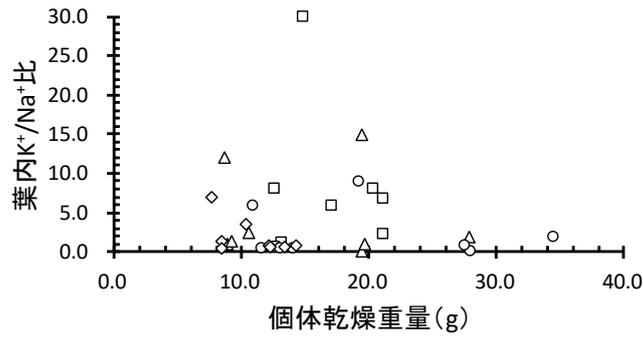


図 6.2.43 供試種ごとにおける全個体の葉の K⁺/Na⁺比と葉内 Na⁺含有率の関係



△シャリンバイ □トベラ ○マサキ ◇クロマツ

図 6.2.44 全個体の葉の K⁺/Na⁺比と個体乾燥重量の関係

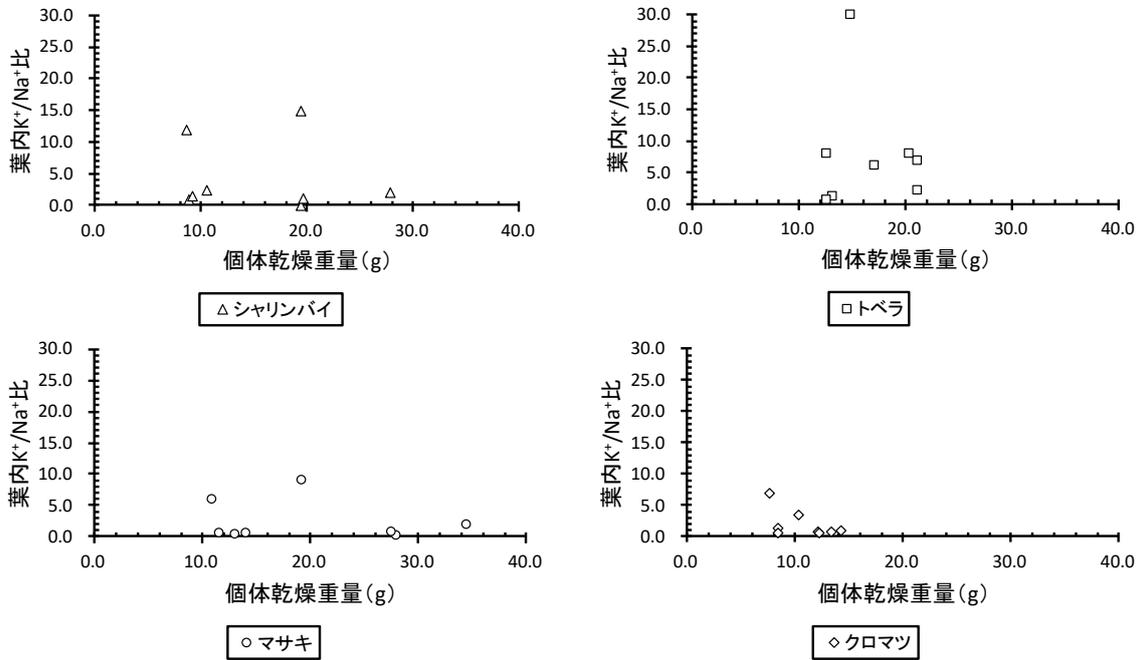


図 6.2.45 供試種ごとにおける全個体の葉の K⁺/Na⁺比と個体乾燥重量の関係

6.2.4 考察

6.2.4.1 Na⁺含有率について

植物の耐塩性を比較する方法として、高橋（1982）は培地中の NaCl 濃度を尺度にする場合と、植物体中のナトリウムあるいは NaCl 濃度を尺度にする場合を挙げている。そして、前者を見かけ上の耐性、後者を真の耐性としている。そこで、本実験では主に植物体中の無機成分（Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺）の含有率から供試種の耐塩性を考察する。

本実験の結果から、供試種の中でトベラが最も耐塩性の高いことが明らかになった。NaCl 添加による Na⁺含有率の変化をみるとトベラは根の含有率の上昇に比べ葉および茎の上昇は低く推移している傾向を示した。他の供試種では根と地上部の Na⁺含有率の上昇にトベラほど差異が見られなかった。また、Na⁺含有率の葉/根の比（表 6.2.2）はトベラが最も低かった。但野（1987）は植物の耐塩性機構として、根におけるナトリウム排除能と地上部移行制御能などを挙げている。本実験の結果からトベラの幼木は他の供試種の幼木に比べて、特に Na⁺の地上部移行制御能が高く、地下部へ Na⁺を蓄積し地上部への移行を低く保ち耐塩性を維持しようとする機構がある可能性が示唆された。したがって、トベラは供試種の中で最も耐塩性の高い種であると考えられる。

6.2.4.2 K⁺含有率の変化について

本実験の結果より相対的な K⁺吸収阻害の影響受けやすさは、シャリンバイ<マサキ<トベラ、クロマツの順に高いと考えられる。K⁺含有率の変化をみると、NaCl 添加に伴い地上部の K⁺含有率が維持される種と低下する種にわかれた。トベラの葉では処理期間 3 日でやや含有率の低下がみられたが、7 日で上昇する傾向がみられた。茎では処理期間 3 日、7 日ともに含有率が上昇する傾向が示された。クロマツの葉では一定かやや上昇傾向を示した。茎では低下傾向を示したがシャリンバイ、マサキに比べ緩やかな低下を示した。シャリンバイ、マサキでは地上部の K⁺含有率が NaCl 添加により他の供試種より低下し、特にシャリンバイで大きく低下する傾向がみられた。一般に培地における高濃度の Na は K, Mg, Ca の吸収を低下させることが分かっている（日本土壤肥料学会, 1991）。そのため耐塩性の高い植物は、K 吸収能に優れていることが知られている（Lerner, 1985）。さらに作物の耐塩性に関する研究では耐塩性の低い植物では K⁺の吸収阻害がみられる（Tattini *et al.*, 2008）ことが、砂漠緑化樹を用いた研究では耐塩性の高い樹種ほど地上部における K⁺含有率の低下が抑えられる傾向が認められている（吉崎・横田, 1993）。トベラでは処理期間 3 日で葉の含有率がやや低下した。しかしその後、葉と茎で上昇し K⁺含有率低下を抑制また、選択的に K⁺を吸収する可能性が示唆された。クロマツは、地上部でも特に葉の K⁺含有率の低下を制御する傾向が認められた。したがって、本実験の結果より相対的な K⁺吸収阻害の影響受けやすさは、シャリンバイ>マサキ>トベラ、クロマツであることが考えられる。

6.2.4.3 その他イオン含有率について

Ca²⁺含有率はシャリンバイにおいて地上部、地下部ともにコントロール区に比べ 3.4%処理区で低下する傾向が両処理期間で示された。トベラ、クロマツでは処理期間 3 日で地上部、地下部ともに低下したが、処理期間 7 日で地上部のみ上昇が認められた。マサキでは地上部で低下し、地下部で上昇する傾向が両処理期間でみられた。

Mg²⁺含有率はクロマツにおいて処理期間 3 日では地上部で一定となり、地下部で低下した。処理期間 7 日では地上部、地下部ともに低下した。トベラは処理期間 3 日では地上部で含有率が低下し、地下部で上昇した。処理期間 7 日では地上部で含有率は上昇し、地下部は一定であった。一般的に Ca と Mg は K 同様、培地の高濃度の Na により吸収阻害が起こることが知られている（日本土壌肥料学会, 1991）。よって、シャリンバイは Ca²⁺吸収阻害の影響を受け、クロマツは Mg 吸収阻害の影響を受けたと考えられる。反して、トベラは処理期間 3 日では吸収阻害の傾向がみられるものの処理期間 7 日では地上部で上昇した。つまり、トベラは Ca²⁺と Mg²⁺の吸収阻害に対して耐性を持っている可能性が示唆された。

6.2.4.4 葉内の K⁺/Na⁺比について

葉内の K⁺/Na⁺比は処理期間 3 日, 7 日ともにトベラが最も高い値を示した。特に処理期間 7 日で他の 3 種の K⁺/Na⁺比と大きな差が認められた。また、処理期間 3 日ではクロマツ<マサキ<シャリンバイ<トベラの順で大きな値を示した。また、処理期間 7 日ではマサキ<クロマツ<シャリンバイ<トベラの順であった。植物体内で Na と K とのイオンバランスが乱れると代謝の攪乱やエネルギー生産の阻害が発生する（ラルヘル, 2004）ため、K/Na 比は耐塩性についての重要な決定要因のひとつ（MAATHUIS and AMTMANN, 1999）とされている。よって、耐塩性の高い植物は植物体内への Na の侵入を防ぐ（Parida and Das, 2005）ため、K⁺/Na⁺比の高い状態を維持する（Zhang and Shi, 2013）とされている。砂漠緑化樹を用いた先行研究では、K⁺/Na⁺比が大きい順番で耐塩性が高い傾向が認められている（吉崎・横田, 1993）。従って、前述のイオン含有率の変化の考察と同様にトベラの幼木の耐塩性が高いことが示された。また、7 日区におけるトベラの幼木の地上部の Na⁺含有率が他の供試種の幼木に比べて低く、一方でトベラの幼木の地上部の K⁺含有率は他の供試種に比べて高かったことから、トベラの幼木は地上部へ Na が転流し蓄積することを回避し、選択的に K⁺を地上部へ転流する機構を持っている可能性が示された。

また、葉内の K⁺/Na⁺比は葉内の Na⁺含有率が上昇すると急激に低下する傾向がすべての供試種において認められた。前述のように、Na⁺と K⁺とのイオンバランスの維持は植物の生理活動において重要であり、K⁺/Na⁺比の高い状態を維持する（Zhang and Shi, 2013）ことが望ましい。よって、Na⁺が地上部へ転流されることによっていずれの供試種もイオンバランスが乱れている可能性が示された。

6.3 第6章のまとめと総合考察

第6章のまとめを図6.3.1に示す。第6章では実生および幼木を対象として塩水浸漬がおよぼす影響について検証した。実生を用いた実験では、塩水浸漬下における生存期間の差異から沿岸性低木の広葉樹であるシャリンバイ、トベラ、海岸林の主林木であるクロマツ、沿岸性高木の広葉樹であるヒメユズリハの順で塩水冠水耐性が高いことが分かった。また、幼木を用いた実験では葉内の K^+/Na^+ 比から、トベラ、シャリンバイ、クロマツ、マサキの順番に塩水冠水耐性が高い可能性が示された。すなわち、クロマツやシャリンバイやトベラなど海岸の風衝地に生育する樹種で、耐潮性の高い樹種（野田坂，2012）としてまとめられていた樹種間で塩水冠水耐性に順位性が認められることがわかった。また、トベラの幼木について、他の樹種に比べて先行研究（但野，1987；Matsushita and Matoh，1991）で耐塩生機構とされているNaの地上部への移行制御やKの選択的な吸収などを持っており、塩水冠水耐性が特に高い可能性が認められた。よって、樹種によっては実生あるいは幼木段階の塩水冠水耐性が海岸林の主林木であるクロマツより高いことがわかった。

本章では、実生については生存率、苗木についてはイオン含有率から塩水冠水耐性の評価を試みた。今後は細胞の構造、生理的な代謝などへの影響、また、幼木については可視被害の程度や生長への影響について、さらに対象種を増やした実験を行うことで塩水冠水耐性の順位性およびその生理的なメカニズムを解明できると考えられる。

章	第6章 実生苗および幼木の塩水冠水耐性		
生育段階の定義と模式図	【 実 生 ・ 幼 木 】		
実験対象	クロマツ・広葉樹		
実験	6.1 塩水浸漬処理がクロマツと広葉樹の実生の苗の生存率と生存期間に及ぼす影響	6.2 クロマツと常緑広葉樹を用いた塩水による水耕栽培実験	
塩水冠水の影響	<ul style="list-style-type: none"> ・ 塩水濃度が高いほど早く枯死 根の漬かっている塩水の濃度が高いほど早く枯死することが共通の傾向として見られた。 塩水へ浸漬してから枯死に至るまでの日数は樹種によって異なった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 葉のK/Naの低下 葉内のNa含有率が上昇するほど、葉のK / Na比が低下する傾向が見られた。 ・ 各器官のイオン含有率変化 樹種によって葉、茎、根のイオン含有率の変化は異なる傾向を示した。 	
短期的塩水冠水に対する耐性	高	トベラ	トベラ
		シャリンバイ	シャリンバイ
		クロマツ	クロマツ
	低	クロマツ・ヒメユズリハ	マサキ

図 6.3.1 第 6 章のまとめ

第7章 総括

7.1 短期的な塩水浸漬に対するクロマツとアカマツの種子の応答について

実験の結果、クロマツとアカマツの種子に対する短期的な塩水浸漬は、塩水浸漬期間の長いほど発芽が遅延するものの、真水へ移した後の発芽種子数への影響は小さいことが認められた。一方で、クロマツの種子において海水とほぼ同濃度の NaCl 溶液下では吸水が強く抑制されること、また、塩水浸漬が長いほど種子内へ Na が蓄積し、Na の蓄積量はクロマツに比べアカマツの方が多いたことがわかった。クロマツの種子水ポテンシャル（郷，1963）と 3.5%の NaCl 溶液の水ポテンシャルを比較するとほぼ同等であることから、海水とほぼ同濃度の NaCl 溶液下では発芽に必要な量の水分を吸水できないことがわかった。また、既往研究（浅野，1963）ではクロマツ、アカマツを対象に塩分濃度の異なる培地において発芽実験を行い、塩分濃度が高いほど種子内に Na が蓄積し、発芽率が低下することが確認されている。よって、短期的な塩水浸漬は既往研究（浅野，1963）とは異なる影響を種子に及ぼす可能性が明らかとなった。また、先行研究（郷，1956）や既往文献（浅川ら，1981）からクロマツの種皮の厚さがアカマツに比べて厚い可能性があり、種皮の厚さの違いが Na の侵入に影響していることが示唆されたことから、種子の構造の差異に着目した検証も必要であると考えられる。今後は胚の生長、発芽における生理的なメカニズムへの影響と合わせて

7.2 短気的な塩水浸漬がクロマツ、アカマツと広葉樹の出芽および初期生長に及ぼす影響について

塩水浸漬処理を施した種子を播種し真水によって生育させた結果、塩水浸漬期間の長い処理区ほど出芽種子数が減少し、出芽後の初期生長が抑制されることがわかった。また、塩水浸漬処理の期間が出芽種子数と初期生長に与える影響については樹種間で差異があることを確認することができた。海岸林の主林木であるクロマツとアカマツの種子は 5 日以上塩水浸漬により出芽種子数、初期生長が抑制され、沿岸性の広葉樹であるシャリンバイは 5 日以上塩水浸漬で出芽が認められず、内陸性の広葉樹であるトウネズミモチは 1 日以上塩水浸漬で出芽が認められなかった。よって、塩水浸漬が及ぼす影響の大きさは沿岸性、内陸性など樹種ごとの生態的な生育環境と関係する可能性が認められた。また、閾値の様に一定期間以上の塩水浸漬で急激に出芽と初期生長が阻害されること、沿岸性の樹種間においても塩水冠水耐性には順位性が存在することがわかった。

7.3 実生および幼木の塩水冠水耐性

実生では、塩水浸漬下の生存率からシャリンバイ、トベラ、クロマツ、ヒメユズリハの順で塩水冠水耐性が高くなった。また、葉内の K/Na 比から幼木では、トベラ、シャリンバイ、クロマツ、マサキの順で塩水冠水耐性が高くなった。高潮や津波における樹木の被害に関する現地調査（後藤，1899；月舘，1984；仰木ら，1961；西・木村，1954；谷口，1954；岡田

ら, 2014) や樹木の海岸の環境に対する耐性についての文献(野田坂, 2012) などでは, 複数の樹種を耐性の高いもの, 中程度のものなどグループに分けて表現している。他方, 本研究では樹種ごとの塩水冠水耐性について順位性があることを確認することができた。また, 実生, 幼木の段階においては広葉樹の中にもクロマツに比べて塩水冠水耐性が高い樹種が存在することを確認することができた。

立石ら(2014) や井上ら(2015) はクロマツやタブノキ, スダジイ, トベラなどの苗木に対して 24 時間の塩水冠水処理を行い, その後の葉の変色や生存個体数などからタブノキ, スダジイ, トベラなどの常緑広葉樹に比べてクロマツの耐塩生が高い可能性を示している。他方, 本研究では実生や幼木においてクロマツよりシャリンバイやトベラの塩水冠水耐性が高いことが認められた。作物などを対象とした研究では, 耐塩生は生育段階によって異なるといわれている(日本土壌肥料学会, 1991; 米田, 1958)。よって, 作物などと同様に樹木においても生育段階が異なると, 塩水冠水耐性の樹種間における順位性が異なってくることを明らかにした。

また, 葉内の K/Na 比および, K や Na の各器官における含有率から, トベラは中生植物の耐塩性機構である Na の吸収抑制能や選択的な K の吸収能など(但野, 1987; Matsushita and Matoh, 1991; Ahmad *et al.*, 2013) がクロマツやシャリンバイ, マサキと比較して高い可能性が認められた。加えて, 塩水冠水による各器官における陽イオンの含有率の変化は樹種ごとに異なることから, 塩水冠水に対する生理的な応答が樹種ごとに異なる可能性が考えられる。

7.4 結論

本研究によって明らかとなった塩水冠水耐性および塩水冠水の影響を図 7.1 に, 仮説との比較を図 7.2, 図 7.3 示す。本研究ではクロマツとアカマツを対象に種子への短期的な塩水浸漬が発芽より出芽と初期生長への影響が大きいことを明らかにした。また, 塩水浸漬期間の出芽と初期生長への影響は閾値のようにある一定期間を超えると著しくなることが, クロマツやアカマツ, 広葉樹において認められた。加えて, クロマツや沿岸性の広葉樹を対象に, 塩水冠水耐性について樹種間の順位性があること, 種子の発芽および出芽から出芽直後の生長, 実生および幼木の初期生育段階ごとに塩水冠水耐性の樹種間の順位性が異なることを明らかにした。本研究の供試種について, 我が国の沿岸域から内陸における分布に関する既往の調査および研究では, 海岸風衝地など沿岸域特有のストレスが最も大きい環境に生育する樹種はクロマツ, トベラ, マサキ, シャリンバイであり, 次いでヒメユズリハとなる(宮脇, 1990)。トウネズミモチは都市域や埋立地など他の供試種に比べ沿岸域特有のストレスが小さい環境に生育していると考えられる(伊藤・藤原, 2007; 飯島・佐合, 2005)。よって, 初期生育段階における塩水冠水耐性は沿岸域に近い環境に生育する樹種ほど高くなる傾向があることを確認することができた。また, 樹木の耐塩生に関連した調査報告(後藤, 1899; 月舘, 1984; 仰木ら, 1961; 西・木村, 1954; 谷口, 1954; 岡田ら, 2014) や文

章	第4章	第5章	第6章		
生育過程	【種子】	【発芽】	【出芽】	【実生】	【幼木】
実験対象	クロマツ・アカマツ		クロマツ・広葉樹		
短期的耐塩冠水に	高				低
塩水冠水の影響	【発芽】 クロマツ アカマツ	【出芽～実生】 クロマツ アカマツ シャリンバイ トウネズミモチ	【実生】 トベラ シャリンバイ クロマツ・ヒメユズリハ	【幼木】 トベラ シャリンバイ クロマツ マサキ	
	<ul style="list-style-type: none"> ・吸水の阻害 海水とほぼ同濃度のNaCl溶液では、発芽に必要な水分量を確保できない。 ・発芽の抑制 海水とほぼ同濃度のNaCl溶液では、発芽がほぼ認められなかった。 ・Naの蓄積 塩水浸漬期間の長いほど、種子内のNa含有率が上昇する。 ・発芽の遅延 塩水浸漬期間の長いほど遅延する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・出芽率の低下 種子の塩水浸漬期間が長いほど、出芽種子数が低下あるいは出芽が見られなくなった。 クロマツ、アカマツは特に5日以上種子が塩水へ浸漬すると出芽率が低下した。 ・生長の阻害 塩水浸漬期間の長い種子ほど出芽後の生長が阻害される。樹種によって影響を大きく受ける器官は異なる傾向が見られた。 	<ul style="list-style-type: none"> ・塩水濃度が高いほど早く枯死 根の漬かっている塩水の濃度が高いほど早く枯死することが共通の傾向として見られた。 塩水へ浸漬してから枯死に至るまでの日数は樹種によって異なった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・葉のK/Naの低下 葉内のNa含有率が上昇するほど、葉のK/Na比が低下する傾向が見られた。 ・各器官のイオン含有率変化 樹種によって葉、莖、根のイオン含有率の変化は異なる傾向を示した。 	

図 7.1 発芽および初期生育における塩水冠水耐性の評価と各生育過程に及ぼす影響

献（野田坂，2012），苗木を対象とした研究（立石ら，2014；井上ら，2015）においてクロマツは広葉樹と比較して耐塩生が高いとされているが，初期生育段階においてはクロマツより塩水冠水耐性が高い広葉樹も存在することが明らかとなった。

本研究で対象とした樹種について，初期生育段階における樹木の塩水冠水耐性から検討した樹種の配置が図 7.4 となっている。クロマツ，ヒメユズリハは実生，幼木の生育段階において塩水冠水耐性が低いため，日常的に高潮への曝露が少ない環境へ配置し，沿岸性の常緑広葉樹であるトベラ，シャリンバイは汀線側に配置することが保育管理上，適切であると考えられる。種子を利用する場合については，クロマツ，アカマツは実生，幼木の塩水冠水耐性が低く，シャリンバイとトウネズミモチは出芽と出芽直後の初期生長における塩水冠水耐性が低いことから，内陸部において保育管理することが適切であると考えられる。ただし，乾燥や潮風，強風，飛砂など他の沿岸域特有のストレスに対する耐性についても把握する必要がある。よって，今後は塩水冠水耐性以外の環境に対する耐性について樹種間の順位性を明らかにすることで，総合的な海岸環境に対する耐性を示すことが可能であると考えられる。

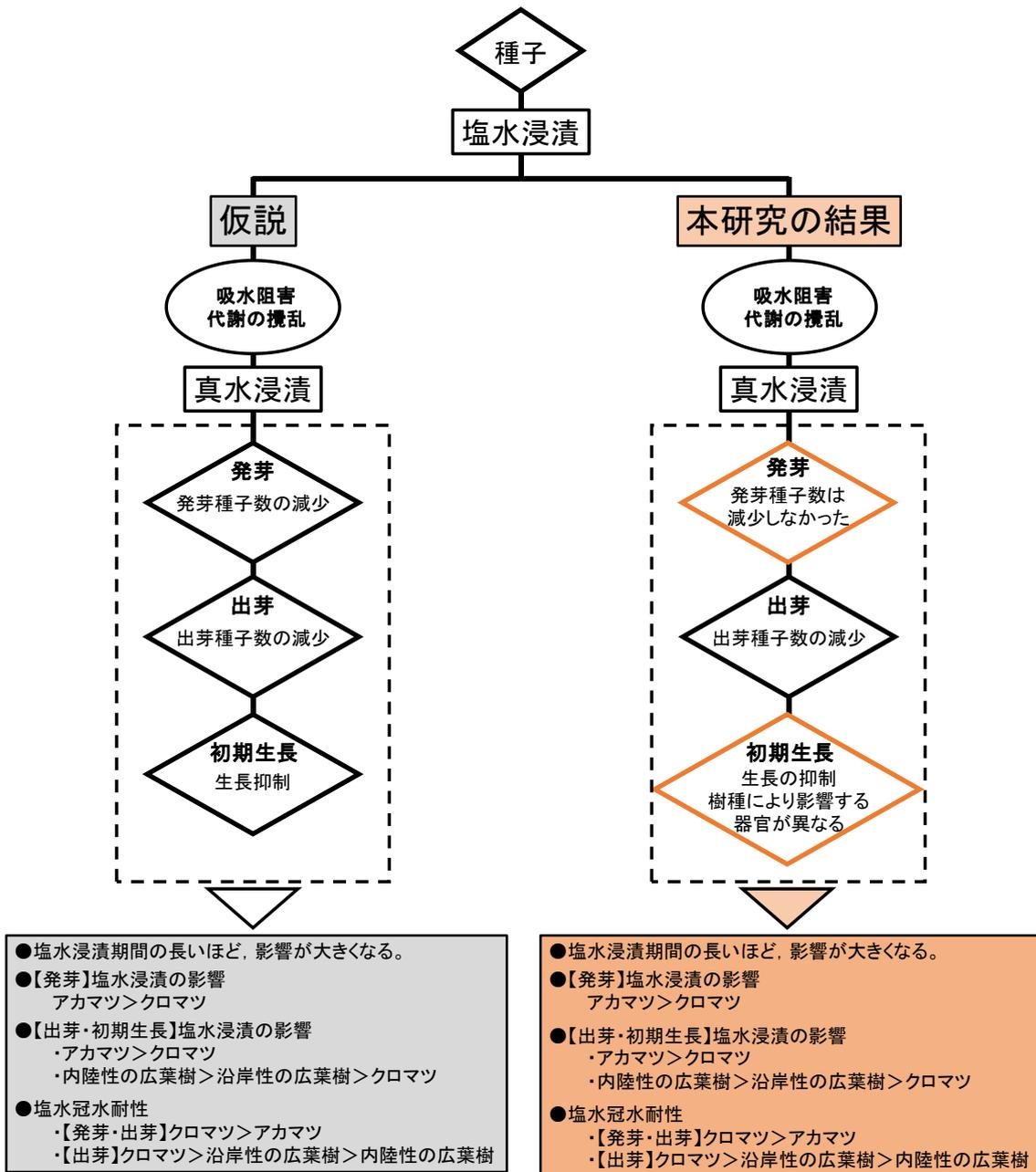


図 7.2 発芽および初期生育における仮説と本研究の結果の比較

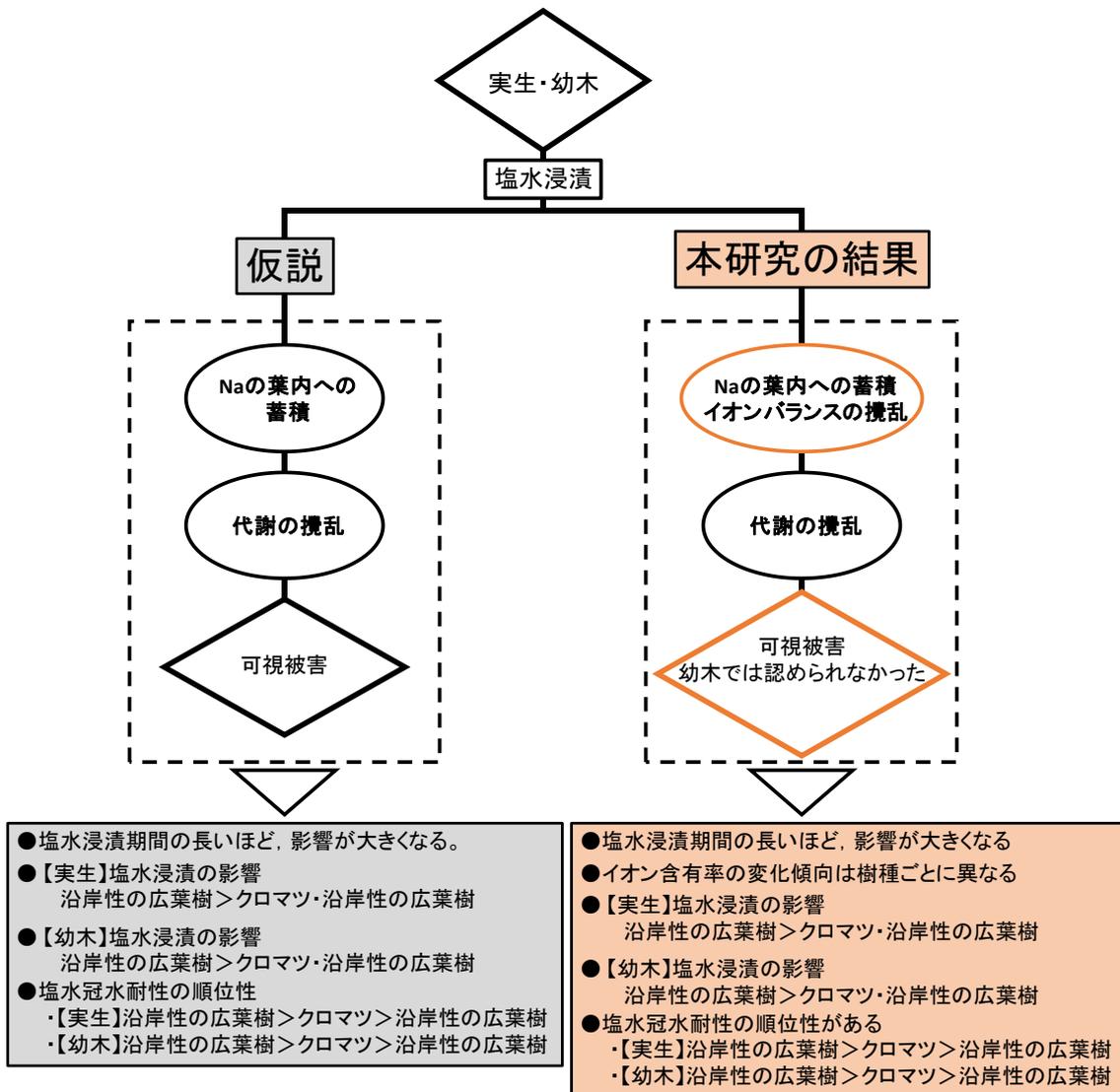


図 7.3 実生と幼木の生育段階における仮説と本研究の結果の比較

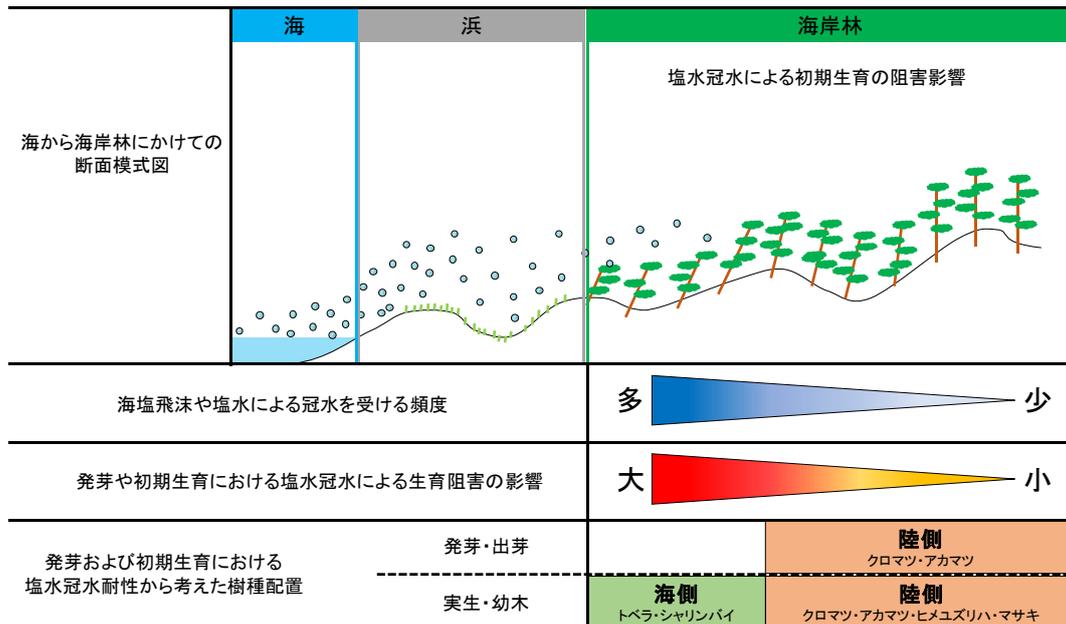


図 7.4 本研究で対象とした樹種について初期生育段階における塩水冠水耐性から検討した樹種の配置

7.5 今後の展望

近年、海岸林では天然更新（中島・岡田，2011；田中，2009）や広葉樹の導入（坂本，2012；佐々木ら，2013；吉崎，2012）などが検討されており，それに関連する研究（立石ら，2014；井上ら，2015；大澤ら，2016；山中，2018；池田・小倉，2014；八神，2015）が行われてきていることは前述したとおりである。本研究では，海岸林への導入樹種やその生育段階の多様化に着目し，沿岸域において発生する大規模な高潮や津波による塩水冠水による生育段階ごとの影響と耐性の評価を試みた。実験結果から，塩水冠水が発芽や発芽後の初期生長へ及ぼす影響および塩水冠水耐性をクロマツや数種の広葉樹について推察することができた。今後はより汎用的な知見の蓄積のため，種子の発芽，出芽，実生の塩水冠水耐性において樹種間の順位性が認められたことから，多様な樹種を用いた塩水冠水耐性の比較と合わせて細胞構造や代謝への影響など生理的な影響やメカニズムを解明することで，塩水冠水の影響を踏まえたより詳細な樹種ごとの配置や海岸林の樹林構造の検討に資すると考えられる。以下に今後の研究における展望を列挙する。

- ・沿岸域への導入が検討されている広葉樹は本研究における供試種以外にもある。よって，種子への塩水冠水が発芽および初期生長に及ぼす影響について，本研究で用いたシャリンバイやトウネズミモチを含めたより多くの広葉樹とクロマツとの比較実験が必要である。
- ・種子への塩水冠水が発芽後の初期生長に及ぼす影響について，生理的なメカニズムを検証するため各器官のイオン濃度の分析などを行う必要がある。発芽の遅延や初期生育段階における生長抑制について，塩水浸漬中において種子内へ蓄積したNaによる代謝阻害，種子貯蔵物質への影響や真水へ移した後のNaの種子内外における移動を検証する必要がある。
- ・応用研究的な知見の蓄積のため，屋外における再現試験を行うことにより，より現場に近い条件下でのデータの蓄積を行うことが必要である。
- ・過去の高潮や津波による塩水冠水の記録では24時間以上の塩水冠水も認められている（谷口，1954；千葉ほか，2012；宮本ほか，2012）。本実験では苗後を最長7日間，塩水へ冠水させた後の各器官のイオン含有率を分析したが，生長や可視被害については検証実験を行っていない。よって，数日間の塩水冠水後の生長や可視被害について着目した研究が必要である。

種子の発芽，出芽，実生の塩水冠水耐性において樹種間の順位性が認められたことから，多様な樹種を用いた塩水冠水耐性の比較と合わせて細胞構造や代謝への影響など生理的な

影響やメカニズムを解明することで、塩水冠水の影響を踏まえたより詳細な樹種ごとの配置や海岸林の樹林構造の検討に資すると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京都市大学環境学部の吉崎真司教授には終始、研究また精神面においても支えていただいた。学部生時代から8年間、吉崎先生が常に味方でいてくれて、丁寧な根気強くご指導いただかなければ、研究を続けて今日を迎えるということは成しえなかった。心より御礼申し上げます。

岩手大学の橋本良二名誉教授（現、放送大学岩手学習センター特任教授）を始め、東京都市大学の宿谷昌則教授、飯島健太郎教授、福田達哉教授には大変きめ細かで多角的なご助言、ご指導をいただいた。先生方のご指導があってこそ研究を独自性のあるものにまとめ上げることができた。ここに、深く感謝申し上げます。

また、東京都市大学環境学部の北村亘准教授、咸泳植准教授、広島工業大学環境学部の岡浩平准教授には暖かい言葉とともに多くのご助言をいただいた。ここに謹んで御礼申し上げます。

実験の遂行にあたって、国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所の中村克典氏には実験に用いるアカマツの種子をご提供いただいた。お忙しい中、快く種子提供のお願いを聞いていただきご協力いただいた。また、東興ジオテック株式会社の吉田寛氏、小野幸菜氏におきましては、発芽実験につきまして大変有意義なご意見、ご指導をいただいた。誠に感謝しております。

吉崎研究室の卒業生、在校生の皆様にも実験や調査において多大なご協力をいただいた。庄司顕則氏、吉田勢氏、宮浦徹氏、柳野遼介氏、柿沼茜氏、深石香氏、稲川崇史氏、深石洋氏をはじめとする卒業生の皆様は研究室に来るたびに励ましの言葉をかけてくださり、様々なご助言をくださった。学部生時代の先輩であり大学院博士後期課程では同期であった中島氏はお忙しい中、重ね重ね迷惑をかけたにも関わらず頼りがいのある先輩としていてくださった。後輩たちは暑い夏も寒い冬も大変献身的に研究を手伝ってくれた。研究室生活において皆様の存在は誠に大きかった。深く御礼申し上げます。

最後に、何も言わずに博士進学を許してくれた両親に御礼申し上げます。研究が辛く心が折れそうになったことはあったが、身体は最後まで大きな病気にも罹らずに研究をやり遂げることができたのは、25年間栄養たっぷりの食事を包丁が握れなくなるまで作ってくれた母のおかげである。直接この論文を渡し、感謝を伝えることはできなかったが、ここに深く深く感謝の気持ちを記します。

2019年
伊東 日向

参考資料

資料 1 水ポテンシャルの算出方法について・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 151

資料 2 湿式灰化法について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 153

資料 1 水ポテンシャルの算出方法について

本研究における NaCl 溶液の水ポテンシャルの算出方法を示す。水ポテンシャルとは単位面積当たりの水の自由エネルギーを表す (J/m) (テイツ・ザイガー, 2004)。水ポテンシャルは以下の式 (1) で表現される。

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_g \quad (1)$$

水ポテンシャル Ψ_w は式 (1) より, Ψ_s , Ψ_p , Ψ_g の和となっている。 Ψ_s は浸透圧ポテンシャル, Ψ_p は静水圧, Ψ_g は重力項である (テイツ・ザイガー, 2004)。重力項 Ψ_g は一般的に水ポテンシャルの式から除外される (テイツ・ザイガー, 2004) ので本研究においても除外した。また, 溶液の Ψ_p は大気と接している仮定し, 溶液の静水圧は大気と同じ圧力 ($\Psi_p = 0$ (MPa)) とする。すなわち,

$$\begin{aligned} \Psi_w &= \Psi_s + \Psi_p + \Psi_g \\ &= \Psi_s + 0 \\ &= \Psi_s \end{aligned} \quad (1)$$

となる。よって, $\Psi_w = \Psi_s$ として計算を行った。

浸透圧ポテンシャル Ψ_s はファンツ・ホッフ式 (テイツ・ザイガー, 2004; 米山ら, 2010; 茅野ら, 1991) によって算出される。ファンツ・ホッフ式を式 (2) に示す。

$$\Psi_s = -i R T C \quad (2)$$

式 (2) における i はファンツ・ホッフ係数, R は気体定数, T は絶対温度, C は溶質のモル濃度を示す。ファンツ・ホッフ係数 i は以下の式 (3) によって求められる (石田ら, 2002)。

$$i = 1 + (n - 1) \alpha \quad (3)$$

式 (3) における n はイオンの種類の数を示しており、 α は電離度を示している。以上の式 (2) と式 (3) から浸透圧ポテンシャル Ψ_s を求める。式 (3) において、イオン数 n は $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ であるから、 $n=2$ となる。また、 NaCl の電離度 α は 1 とする。よって、ファンツ・ホッフ係数 i は、

$$\begin{aligned} i &= 1 + (n - 1) \alpha \\ &= 1 + (2 - 1) 1 \\ &= 1 + 1 \\ &= 2 \end{aligned}$$

となる。また、気体定数 R は $0.00832 \text{ J}/(\text{mmol} \cdot \text{K})$ 、絶対温度 T は実験中の温度と培養液の温度を同じと仮定すると 298 K となる。また、 NaCl のモル質量が 58.44 なので 1.75% の NaCl 溶液における溶質のモル濃度は 299.5 m mol 、 3.5% の NaCl 溶液における溶質のモル濃度は 598.5 m mol となる。よって、 1.75% の NaCl 溶液の浸透圧ポテンシャル $\Psi_{s,1.75}$ および 3.5% の NaCl 溶液の浸透圧ポテンシャル $\Psi_{s,3.5}$ は以下のように求められる。

$$\begin{aligned} \Psi_{s,1.75} &= -2 \times 0.00832 \times 298 \times 299.5 \\ &= -1485136.64 \text{ Pa} \\ &\doteq -1.5 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi_{s,3.5} &= -2 \times 8.32 \times 298 \times 598.9 \\ &= -2969777.408 \text{ Pa} \\ &\doteq -3.0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$\Psi_w = \Psi_s$ なので、 1.75% の NaCl 溶液の水ポテンシャルを $\Psi_{w,1.75}$ とし、 3.5% の NaCl 溶液の水ポテンシャルを $\Psi_{w,3.5}$ とすると、

$$\Psi_{w,1.75} \doteq -1.5 \text{ MPa}$$

$$\Psi_{w,3.5} \doteq -3.0 \text{ MPa}$$

となる。

よって、本研究では 1.75% の NaCl 溶液の水ポテンシャルを約 -1.5 MPa 、 3.5% の NaCl 溶液の水ポテンシャルを約 -3.0 MPa とした。

資料2 湿式灰化法

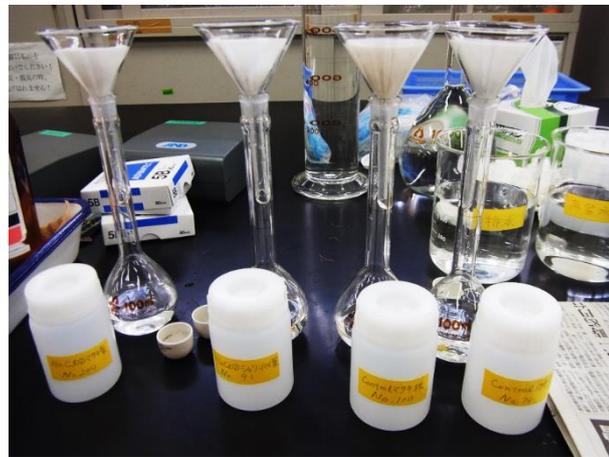
80°Cで48時間以上の通風乾燥機にて通風乾燥を行う。通風乾燥機で乾燥させた植物体を粉砕しする。粉砕した植物体が0.1g以上のものは0.1g, 0.1g未満のものは0.005g定量する。定量したサンプルをろつぼに入れ, マッフル炉 (ADVANTEC, FUL220FA) にて300°Cで1時間, 更に550°Cで5時間かけて灰化する。灰化した試料の写真を資料写真1に示す。放冷後, 水温を90~100°Cに調整したウォーターバス (ADVANTEC, TBS221SA) にルツボをのせ, ルツボ内の灰を数滴の蒸留水で潤した。湿式灰化中のウォーターバスの様子を資料写真2に示す。濃塩酸と蒸留水を1:1の体積比で混合した溶液を2mL加え湯浴上で蒸発固定をさせた。蒸発固定後, 濃塩酸と蒸留水を1:3の体積比で混合した溶液を2mL加え, 湯浴上で90°C位に5分間保った。ルツボをウォーターバスからおろし, 少量の蒸留水を加えガラス棒ですりつぶした。上澄み液をNo.5Bのろ紙でろ過し, 25mlメスフラスコに入れた。この操作を5~10回程度行い, 最後は上澄み液だけでなく全液を流し入れ, 蒸留水でルツボを数回洗いその液もろ過した。上澄み液のろ過工程の様子を資料写真3に示す。ろ紙を完全に水洗いし, 抽出液の入ったメスフラスコを蒸留水でメスアップしたものを塩酸溶液とした。本研究では, 作成した塩酸溶液を100倍に希釈した後, Na, K, Mg, Ca, の含有率を分析した。



試料写真1 マッフル炉で灰化した試料の様子



資料写真2 ウォーターバスでの湿式灰化の様子



資料写真3 上澄み液のろ過の様子

引用及び参考文献

- 1 A. A. Zakharin · L. A. Panichkin (2009) Glycophyte Salt Resistance, Russian Journal of Plant Physiology, 56(1), 94-103.
- 2 A. J. Macke · I. A. Ungar (1971) The effects of salinity on germination and early growth of *Puccinellia nuttalliana*, Canadian Journal of Botany, 49(4), 515-520.
- 3 A.A. Kandil · A.E. Sharief · S.R.H. Ahmed (2012) Germination and Seedling Growth of Some Chickpea Cultivars (*Cicer arietinum* L.) under Salinity Stress, Journal of Basic & Applied Science, 8(2), 561-571.
- 4 アブドゥルザデー アーマッド・嶋 一徹・千葉 喬三 (1997) キョウチクトウ (*Nerium oleander* L.) の耐塩性における窒素源としてのアンモニア態および硝酸態の役割, 日本緑化工学会誌, 23(4), 237-248.
- 5 アブドゥルザデー アーマッド・嶋 一徹・千葉 喬三 (1997) 塩類が *Lolium multiflorum*, *L. perenne* および *Festuca arundinacea* の成長およびイオン含有率におよぼす影響, 日本緑化工学会誌, 23(3), 161-169.
- 6 アブドゥルザデー アーマッド・嶋 一徹・千葉 喬三 (1998) 養分窒素源の違いが塩類ストレス条件下におけるキョウチクトウ (*Nerium oleander* L) の炭素化合物配分と窒素同化におよぼす影響, 日本緑化工学会誌, 24(1), 22-29.
- 7 阿部 信之・橋本 良二 (2007) 播種時におけるコナラ種子の乾燥が芽生えの発達経過と成長量に及ぼす影響, 日本緑化工学会誌, 33(3), 484-491.
- 8 阿部 倫則・村主栄一 (2015) 津波被災農地の除塩対策 : 5.宮城県における作物収量に影響を及ぼさない許容ECレベル(進歩総説: 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策), 日本土壌肥料学雑誌, 86(5), 430-431.
- 9 阿部 倫則・平 直人 (2015) 津波被災農地の除塩対策 : 6.宮城県の津波被災現地ほ場の除塩後のイネまたはダイズ栽培(進歩総説: 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策), 日本土壌肥料学雑誌, 86(5), 432-433.
- 10 足立 里奈・梶原 真悟・近藤 謙介・横山莉奈・安 萍・松添 直隆 (2016) 異なる環境条件が塩性植物 *Suaeda* 種の生育と無機成分吸収に及ぼす影響, 日本砂丘学会誌, 63(1).
- 11 足立 里奈・洲崎 真鈴・近藤 謙介・安 萍・松添 直隆 (2016) 塩ストレス下におけるCa 添加と日長条件が塩生植物 *Suaeda salsa* の生育および花芽形成に与える影響, 日本砂丘学会誌, 63(2).
- 12 東江 栄 (2004) アイスプラントを用いた土壌脱塩技術の可能性, 熱帯農業, 48(5), 294-298.
- 13 秋元 利之・長 信也・江刺 洋司 (2002) 湿潤貯蔵型木本種子の劣化とアセトアルデヒド, 日本緑化工学会誌, 28(1), 177-180.
- 14 秋元 利之・小野 幸菜・吉田 寛・江刺 洋司 (2006) 早期発芽力検定法の後熟型木本休眠種子への適用, 日本緑化工学会誌, 32(1), 187-190.

- 15 青木 正則・石川 春彦 (1971) 水稻の耐塩性と窒素ならびに珪酸肥料との関係, 日本土壌肥料学雑誌, 42(4), 167-170.
- 16 浅川 澄彦・勝田 柁・横山 敏孝 (1981) 日本の樹木種子 (針葉樹編), 社団法人 林木育種協会.
- 17 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) 1-64.
- 18 Ashish Vilas Mane · Deshpande T. V. · Wagh V. B. · Karadge B. A. · Samant J. S. (2011) A critical review on physiological changes associated with reference to salinity , International Journal of Environmental Sciences, 1(6), 1192-1196.
- 19 アシュラフ M. · ボカリ M.H. · ワヒード A. (1990) マングビーン耐塩性品種のスクリーニング, 熱帯農業, 34(3), 169-175.
- 20 Asish Kumar Parida · Anath Bandhu Das (2005) Salt tolerance and salinity effects on plants: a review, Ecotoxicology and Environmental Safety, 60(3), 324-349.
- 21 B. Mahdavi · Seyed Ali Mohammad Modarres Sanavy (2007) Germination and Growth in Grasspea (*Lathyrus sativus*) Cultivars under Salinity Conditions, Pakistan Journal of Biological Sciences, 10(2), 273-379.
- 22 馬場 貴志 (2017) イネとトマトにおける NaCl ストレス下でのイオン輸送の違いと耐塩性との関連, 日本砂丘学会誌, 63(3)
- 23 馬場 貴志・青目 皓子・白井 早紀・山田 美奈 (2017) 塩生および好塩性植物のナトリウム吸収能評価, 日本砂丘学会誌, 63(3)
- 24 Bárbara França Dantas · Luciana de Sá Ribeiro · Carlos Alberto Aragão (2007) Germination, initial growth and cotyledon protein content of bean cultivars under salinity stress, Revista Brasileira de Sementes, 29(2), 106-110.
- 25 Berhanu Abraha Tsegay · Berhane Gebrelassie (2014) The effect of salinity (NaCl) on germination and early seedling growth of *Lathyrus sativus* and *Pisum sativum* var. *abyssinicum*, African Journal of Plant Science, 8(5), 225-231.
- 26 Bewley J. Derek · Black Michael (1994) Seeds, Plenum Press.
- 27 Charles Darwin (1855) Does Sea-Water Kill Seeds?, Gardeners' Chronicle and Agricultural Gazette, (21), 356-357.
- 28 Charles Darwin · Esq. · Vice-Pres. R.S. · F.L.S. · c. (1856) On the Action of Sea-water on the Germination of Seeds, The Botanical Journal of the Linnean Society, 1(3), 130-140.
- 29 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), 29-34.
- 30 茅野 充男 (1997) 現代植物生理学 5 物質の輸送と貯蔵, 朝倉書店.
- 31 崔 世茂・清水 誠・藤井 清永・原田 健一・新居 直祐 (2003) NaCl 処理がカラタチ幼齡実生樹の Na および Cl, プロリンベタイン含量ならびに根の細胞核の変化に及ぼす影

- 響, 園芸学会雑誌, 72(1), 49-55.
- 32 D.A. Meloni · M.R. Gulotta · C.A. Martinez (2008) Salinity tolerance in *Schinopisis quebracho* Colorado : Seed germination, growth, ion relations and metabolic responses, *Journal of Arid Environments*, 72(10), 1785-1792.
- 33 達布希拉図 達布希拉図, 池田 元輝 (2003) ダイズとキュウリの NaCl および CaCl₂ に対する反応の違い, *日本土壌肥科学雑誌*, 74(4), 459-465.
- 34 電力中央研究所技術第二研究所 (1972) 電力中央研究所技術第二研究所報告 研究報告, 電力中央研究所技術第二研究所
- 35 E.R.R.アイエンガ · J.B.パンデァ (1977) 希釈海水かんがい下でのシュガービートの耐塩性 (英文, *日本砂丘学会誌*, 24(1))
- 36 江原 宏 · 松井 もえ · 内藤 整 (2006) サゴヤシ (*Metroxylon sagu* Rottb.) の塩ストレス回避機構, *熱帯農業*, 50(1), 36-41
- 37 Enéas Gomes-Filho · Carmen Rogélia Farias Machado Lima · José Hélio Costa · Ana Cláudia Marinho da Silva · Maria da Guia Silva Lima · Claudivan Feitosa de Lacerda · José Tarquinio Prisco (2008) Cowpea ribonuclease : properties and effect of NaCl-salinity on its activation during seed germination and seedling establishment, *Plant Cell Reports*, 27(1), 147-157.
- 38 FRANS J. M. MAATHUIS · ANNA AMTMANN (1999) K⁺ Nutrition and Na⁺ Toxicity: The Basis of Cellular K⁺/Na⁺ Ratios, *Annals of Botany*, 84(2), 123-133.
- 39 藤原 隆広 · 中山 真義 · 菊地 直 · 吉岡 宏 · 佐藤 文生 (2002) NaCl 施用によるキャベツセル成型苗の徒長抑制 · 順化効果, *園芸学会雑誌*, 71(6), 796-804
- 40 G. L. Lesko · R. B. Walker (1969) Effect of sea water on seed germination in two Pacific atoll beach species, *Ecology*, 50(4), 730-734.
- 41 郷 正士 (1956) 吸水曲線にもとづく針葉樹のタネの発芽生理, *東京大学農学部演習林報告*, (51)
- 42 後藤 末吉 (1899) 海嘯に対する海岸保安林論, *大日本山林会報*, (193), 14-32
- 43 H. R. Lerner (1985) Adaptation to salinity at the plant cell level, *Plant and Soil*, 89(1-3), 3-14.
- 44 Hamed Kaveh · Hossein Nemati · Mohammad Farsi · Safieh Vatandoost Jartoodeh (2011) How Salinity Affect Germination and Emergence of Tomato Lines, *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 5(15), 159-163.
- 45 韓 文軍 · 侯 向陽 · 楊 劫 · 志水 勝好 · 濱村 邦夫 (2010) 内モンゴル西部の3地点における塩生植物3種の葉の水ポテンシャルの日中変化, *熱帯農業研究*, 3(2), 79-82
- 46 半田 真理子 · 播本 武史 · 中島 均 · 花城 良廣 (1993) 塩生植物の生育基盤構造に関する研究, *日本緑化工学会誌*, 19(4), 267-274.
- 47 原 正利 · 浅見 佳世 · 富田 瑞樹 · 菅野 洋 · 佐々木 豊 (2011) 植生学会 東日本大震災 南三陸地域調査報告, *日本植生学会*.
- 48 橋岡 伸守 (1991) 日本の主な海岸林, *林業技術*, (593), 21-24.

- 49 畑野 健一 (1957) 林木種子の化学 (II), 日本林学会誌, 39(6), 238-244.
- 50 日田 悌一 (1998) 一目でわかる生物ハンドブック, ナガセ
- 51 村井 宏 (1989) 砂漠緑化研究の推進に向けて, 日本緑化工学会誌, 15(1), 24-28.
- 52 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—, 林業試験場報告, (186), 113-133.
- 53 星 信幸・遊佐 隆洋 (2012) 宮城県における津波による水田への影響と除塩, 日本海水学会誌, 66(2), 74-78.
- 54 藤井 信一郎・米沢 朗・山内 益夫 (1997) スイカにおける耐塩性の品種および系統間差, 日本砂丘学会誌, 44(1).
- 55 藤田 昇 (1995) ヨシの技・サボテンの術—水を上手に使う植物たち, 研成社.
- 56 藤原 隆広・吉岡 弘・熊倉 裕史・佐藤 文生・井上 昭司 (2002) NaCl の施用条件がキャベツセル成型苗の苗質に及ぼす影響, 園芸学研究, 1(3), 169-173.
- 57 藤山 志保 (2015) 塩ストレス,特にソーダ質土壌障害に対する植物の応答に関する栄養生理学的研究, 日本土壌肥料学雑誌, 86(5), 360-363.
- 58 I.R. Guma・M.A. Padron-Mederos・A. Santos-Guerra・J.A. Reys-Betancort (2010) Effect of temperature and salinity on germination of *Salsola vermiculata* L. (Chenopodiaceae) from Canary Islands, Journal of Arid Environments, 74(6), 708-711.
- 59 五十嵐 鉄朗・鍛冶 清 (1989) 臨海部緑地における気象環境と樹木葉面の塩分付着量について, 日本緑化工学会誌, 15(4), 36-42.
- 60 飯島 和子・佐合 隆一 (2006) 東京湾岸浚渫埋立地におけるクロマツ (*Pinus thunbergii* Parl.) 群落とトウネズミモチ (*Ligustrum lucidum* Ait.) 群落の出現要因, 日本緑化工学会誌, 31(3), 373-379.
- 61 池田 虎三・小倉 晃 (2014) 天然更新クロマツ稚樹におけるマツノザイセンチュウ接種試験, 石川県農林総合研究センター林業試験場研究報告, (46), 10-11
- 62 今田 省吾・ACHARYA Kumud・岩永 史子・山中 典和 (2011) 異なる塩水灌漑条件下における塩生植物 *Tamarix ramosissima* Ledeb. の Na⁺ 動態, 日本緑化工学会誌, 37(1), 50-54.
- 63 今津 正・大沢 孝也 (1954) 数種蔬菜の鹽害に関する研究, 園芸学会雑誌, 22(4), 197-202.
- 64 稲生 栄子・玉手 英行・上山 啓一 (2015) 津波被災農地の除塩対策 :11.宮城県の津波被災園芸畑土壌における除塩後の塩類推移の実態(進歩総説: 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策), 日本土壌肥料学雑誌, 86(5), 443-444.
- 65 位田 藤久太郎・橘 昌司・藤城 好信 (1970) 被覆下栽培における肥培の研究 (第1報) そ菜の塩類高濃度障害について, 園芸学会雑誌, 39(3), 251-255.
- 66 位田 藤久太郎・橘 昌司・藤城 好信・丸山 靖志 (1971) 被覆下栽培における肥培の研究 (第2報) そ菜の塩類高濃度障害について, 園芸学会雑誌, 40(2), 121-127.

- 67 井上 美那・香口 成美・立石 麻紀子・谷口 武士・山本 福壽・山中 典和 (2015) 海水による土壌冠水が東日本太平洋沿岸域に分布する木本植物 17 種の生育に及ぼす影響, 日本緑化工学会誌, 41 (1) , 73-78.
- 68 井上 美那・中川 憲一・谷口 武士・山本 福壽・山中 典和 (2014) 海水による土壌冠水がホウライチク (*Bambusa multiplex*) の生育に及ぼす影響, 日本緑化工学会誌 , 40(1), 43-48.
- 69 井上 博道・草場 新之助・中村 ゆり (2015) モモ栽培における塩化カリウムと硫酸カリウムの比較, 日本土壌肥科学雑誌, 86(6), 539-543.
- 70 Muhammad IRSHAD・Anthony Egrinya ENEJI・本名 俊正・山本 定博・Abdul RASHID・遠藤 常嘉 (2000) パキスタン, マルダン地域の塩類土壌におけるいくつかの *Atriplex* と *Maireana* 種の生育, 熱帯農業, 44(4), 245-251.
- 71 IRWIN A. UNGAR (1978) Halophyte seed germination, Botanical Review, 44(2), 233-264.
- 72 石田 明・増井 正夫・糠谷 明・小倉 孝保 (1979-a) 砂耕及び土耕栽培におけるバラの耐塩性, 園芸学会雑誌, 47(4), 517-523.
- 73 石田 明・増井 正夫・糠谷 明・小倉 孝保 (1979-b) 砂耕及び土耕栽培におけるカーネーションの耐塩性, 園芸学会雑誌, 48(3), 322-326.
- 74 石田 明・増井 正夫・糠谷 明・小倉 孝保 (1978) キクの耐塩性, 園芸学会雑誌, 47(3), 421-424.
- 75 石田 寿昌・西庄 重次郎・岡部 亘雄・佐野 洋・土井 光暢 (2002) 薬学のための物理化学, 化学同人.
- 76 伊藤 千恵・藤原 一繪 (2007) 都市域森林群落における外来種トウネズミモチ *Ligustrum lucidum* Ait. の分布と生態的特性 : 在来種ネズミモチ *Ligustrum japonicum* Thunb. と比較して, 保全生態学研究, 12(2), 143-150.
- 77 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.
- 78 伊東 日向・吉崎 真司 (2014) 塩水浸漬下で生育させ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.
- 79 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.
- 80 伊藤 豊彰 (2015) 除塩対策に関する基礎情報 : 3. 津波被災・除塩土壌の水稻生産上の問題とカルシウム資材による改善(進歩総説: 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策), 日本土壌肥科学雑誌, 86(5), 393-395.
- 81 岩永 史子・野口 よしの・山本 福壽・AILJIANG Maimaiti・岡田 憲一・山中 典和・谷口 真吾 (2014) 水耕栽培下における塩濃度の違いがヒルギダマシ (*Avicennia marina*) とメヒルギ (*Kandelia obovata*) 稚樹の生育および樹体内のイオン含有量に及ぼす影響, 日本緑化工学会誌, 40(1), 49-53.

- 82 岩永 史子・山本 福壽・Ailijiang MAIMAITI・吉田 佑美・森 信寛・谷口 真吾・山中典和 (2013) 西表島に生育するマングローブ 4 種の浸透調節物質の濃度変化と陽イオンとの関係, 日本緑化工学会誌, 39(1), 21-26.
- 83 Jin-Lin Zhang・Huazhong Shi (2013) Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance, *Photosynthesis Research*, 115(1), 1-22.
- 84 カビール エマル・ハミッド アブドゥール・ハックェ モイヌール・縄田 栄治・コリム アブドゥール (2005) リョクトウ (*Vigna radiata* Wilczek L.) の耐塩性に及ぼす窒素肥料の影響, 熱帯農業, 49(2), 119-125.
- 85 香川 邦雄・菅沼 浩敏・上田 堯夫・森下 豊昭 (1988) 塩水灌漑がアルファルファの生育, 飼料成分組成並びに養分収量に及ぼす影響, 熱帯農業, 32(4), 215-222.
- 86 間藤 徹 (1997) 植物の耐塩性メカニズム, 植物の化学調節, 32(2), 198-206.
- 87 間藤 徹 (1989) 高等植物のナトリウム栄養, 日本土壤肥料学雑誌, 60(3), 187-188.
- 88 間藤 徹 (1999) 植物の無機栄養 (第 4 部門 植物栄養), 日本土壤肥料学雑誌, 70(5), 647-652.
- 89 間藤 徹 (2002) 植物の無機栄養(第 4 部門 植物栄養), 日本土壤肥料学雑誌, 73(SeparateSpecial), 646-652.
- 90 コリム モハマッド アブドゥール・縄田 栄治・重永 昌二 (1993) 異なる生育段階における六倍体ライコムギの耐塩性, 熱帯農業, 37(4), 298-304.
- 91 コリム モハマッドアブドゥール・縄田 栄治・重永 昌二 (1994) 塩分濃度に対する六倍体ライコムギ, コムギ, ライムギおよびオオムギの子実収量の反応, 熱帯農業, 38(1), 16-25.
- 92 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), 121-127.
- 93 河合 英二 (1993) 海岸林の防災機能と維持管理の問題点, 森林立地, 35(2), 30-38.
- 94 河崎 利夫・森次 益三 (1978) 作物による二価陽イオンの吸収ならびに移行に対する高濃度の塩化ナトリウムおよび塩化カリウムの影響(第 1 報): 水耕栽培実験, 日本土壤肥料学雑誌, 49(1), 46-52.
- 95 Kazuo Tobe・Liping Zhang・Guoyu Yu Qiu・Hideyuki Shimizu・Kenji Omasa (2001) Characteristics of seed germination in five non-halophytic Chinese desert shrub species, *Journal of Arid Environments*, 47(2), 191-201.
- 96 Kazuo Tobe・Xiaoming Li・Kenji Omasa (2000) Seed Germination and Radicle Growth of a Halophyte, *Kalidium caspicum* (Chenopodiaceae), *Annals of Botany*, 85(3), 391-396.
- 97 Keith Roberts (2007) *Handbook of plant science*, Wiley-Interscience.
- 98 切岩 祥和・小澤 晃一・横田 博実・財津 吉寿・三好 洋・大石 惇 (1998) アラブ首長国連邦の農耕地における土壤塩類集積とアルファルファの無機成分含有量に及ぼす灌漑水質の影響, 日本土壤肥料学雑誌, 69(4), 348-354.

- 99 北川 誠子・藤山 英保 (2014) 好塩生植物の硝酸イオン吸収と移行におけるナトリウムの役割, 日本砂丘学会誌, 61(1).
- 100 幸喜 善福 (1976) 植物の耐塩性について (3) サトウキビの場合, 日本砂丘学会誌, 23(1).
- 101 近藤 始彦 (2015) 除塩対策に関する基礎情報 : 2.作物の塩害生理と栽培管理(進歩総説: 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策), 日本土壌肥科学雑誌, 86(5), 387-392.
- 102 甲山 隆司 (2004) 植物生態学—Plant Ecology, 朝倉書店.
- 103 倉内 一二 (1956) 塩風害と海岸林, 日本生態学会誌, 5(3), 123-127.
- 104 李 品芳・山本 太平・長井 武雄・藤山 英保 (1994) マサ土壌における乾燥地条件下での水・塩類の動態とオオムギの要素吸収について, 日本砂丘学会誌, 41(2).
- 105 Lina Podda・Andrea Santo・Carlo Leone・Olga Mayoral・Gianluigi Bacchetta (2017) Seed germination, salt stress tolerance and seedling growth of *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae) invasive species in the Mediterranean Basin, *Flora*, 229, 50-70.
- 106 L. テイツ・E. ザイガー (2004) テイツ/ザイガー植物生理学, 培風館.
- 107 劉 洪慶・玉井 重信・古川 郁夫・片桐 成夫 (2003) 塩水灌漑下の砂質土壌におけるギンドロの成長及び土壌水分・塩分動態について, 日本砂丘学会誌, 49(3).
- 108 M. Ajmal Khan・M. Zaheer Ahmad・A. Hameed (2006) Effect of sea salt and l-ascorbic acid on the seed germination of halophytes, *Journal of Arid Environments*, 67(3), 535-540.
- 109 M. Ajmal Khan・Yasmeen Rizvi (1994) Effect of salinity, temperature and growth regulators on the germination and early seedling growth of *Atriplex griffithii* var . Stocksii, *Canadian Journal of Botany*, 72 (4) , 475-479.
- 110 M. AJMAL KHAN・IRWIN A. UNGAR (1997) Effects of thermoperiod on recovery of seed germination of halophytes from saline conditions, *American Journal of Botany*, 84(2), 279-283.
- 111 M. Tattini・P. Bertoni・S. Caselli (2008) Genotypic responses of olive plants to sodium chloride, *Journal of Plant Nutrition*, 15(9), 1467-1485.
- 112 前田 良之・鶴飼 洋子・武長 宏 (2001) 種寒地型牧草における発芽時および生育ステージ別の耐塩性差異, 日本緑化工学会誌, 23(3), 499-506.
- 113 前川 寛之・臼井 選・内田 直次・安田 武司・山口 禎 (1987) イネの耐塩性機構に関する研究, 熱帯農業, 31(2), 92-98.
- 114 槇原 大悟・津田 誠・森田 美穂・平井 儀彦・黒田 俊郎 (1999) イネ品種における土壌高塩分に対する反応の生育にともなう変化, 熱帯農業, 43(4), 285-294.
- 115 丸居 篤・赫 愛民・中野芳輔・猪迫耕二 (2007) 土壌中の塩濃度が作物の水分消費と通水抵抗に及ぼす影響, 日本砂丘学会誌, 54(1).
- 116 増井 正夫・水田 士華毅 (1966) メロンの養分吸収に関する研究 (第6報), 園芸学会雑誌, 35(2), 127-133.

- 117 松丸 恒夫 (1996) 土壌中の高濃度ナトリウム塩および塩化物がキュウリの生育と無機成分の吸収に及ぼす影響, 日本土壌肥料学雑誌, 67(4), 377-383.
- 118 松本 和浩・千 種弼・田村 文男・鎌本 陽子・田辺 賢二 (2006) ナシ属植物の耐塩性は根から葉への Na および Cl イオンの転流量と関係がある, 園芸学会雑誌, 75(5), 385-391.
- 119 松本 和浩・田村 文男・千 種弼・田辺 賢二 (2006) 地中海沿岸部原産のナシ台木種 *P. amygdaliformis* および *P. elaeagrifolia* の耐塩性はアジア原産の台木種に比べ強い, 園芸学会雑誌, 75(6), 450-457.
- 120 松本 和浩・田村 文男・千種 弼・池田 隆政・今西 久美子・田辺 賢二 (2007) マンシュウマメナシ台木によるニホンナシの耐塩性向上, 園芸学研究, 6(1), 47-52.
- 121 松木 勝・森下 譲二 (1986) 農地の保全と防災 (その9・最終講) 海岸保全, 農業土木学会誌, 54(2), 145-152.
- 122 松本 法子・藤山 英保 (2015) 4種の野菜の種子の塩ストレス下における発芽および吸水応答, 日本砂丘学会誌, 61(3).
- 123 松本 法子・藤山 英保 (2015) 異なる生育段階におけるズッキーニの耐塩性, 日本砂丘学会誌, 61(3).
- 124 松村 智広・金地 通生・稲垣 昇・前川 進 (1998) NaCl ストレス下におけるベニバナ, クリサンセマム・パルドーサム, ウラギクのイオン吸収, 適合溶質の蓄積および浸透ポテンシャル, 園芸学会雑誌, 67(3), 426-431.
- 125 松村 智広・金地 通生・稲垣 昇・前川 進 (1998) NaCl ストレス下におけるキク科花き植物の種子発芽および初期生育, 園芸学会雑誌, 67(4), 626-631.
- 126 松中 照夫 (2003) 土壌学の基礎: 生成・機能・肥沃度・環境, 農山漁村文化協会.
- 127 松下 信利・間藤 徹 (1992) ヨシ地上部からの Na イオンの排除に関するヨシ茎基部の機能: Soil Science and Plant Nutrition 掲載論文要旨 Vol.38, No.3(1992年9月), 日本土壌肥料学雑誌, 63(6), 737
- 128 Md. Abdul Karim・Naoki Utsunomiya・Shoji Shigenaga (1992) Effect of Sodium Chloride on Germination and Growth of Hexaploid Triticale at Early Seedling Stage, Japanese Journal of Crop Science, 61(2), 279-284.
- 129 三田 瞬一・星崎 和彦・佐々木 佳明・金田 吉弘・和田 覚・蒔田 明史・小林 一三 (2009) 2004年台風15号による塩風害が秋田県の樹木に与えた影響: 樹種, 地域による変動及び海岸マツ林の防風効果, 樹木医学研究, 13(3), 125-138.
- 130 三浦 憲蔵 (2015) 津波被災農地の除塩対策: 16. 東北地域の津波被災農地土壌の除塩対策(進歩総説: 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策), 日本土壌肥料学雑誌, 86(5), 459-462.
- 131 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, 農村工学研究技

- 報, (213), 73-78.
- 132 宮脇 昭 (1990) 日本植物群落図説, 至文堂.
- 133 森 敏・稲永 醇二・阿江 教治・間藤 徹 (1993) 第5部門: 植物の無機栄養および養分吸収, 日本土壌肥料学雑誌, 64(5), 527-537.
- 134 森本 幸祐・小林 達明・吉崎 真司 (2007) 最新環境緑化学, 朝倉書店
- 135 森下 豊昭・瀬川 雅裕・岩橋 誠・香川 邦雄・太田 安定 (1984) キュウリ・トウモロコシ・ハウレンソウによるカチオン吸収の生育時期別変化と塩分抵抗性との関係, 日本土壌肥料学雑誌, 55(3), 263-268.
- 136 本杉 日野・杉浦 明・苫名 孝 (1987) 数種類の台木におけるリンゴ樹の耐塩性の比較, 園芸学会雑誌, 56(2), 135-141.
- 137 Muok Benard Oula・石井 孝昭 (2006) アーバスキュラー菌根菌が水および塩類ストレス, 並びに湛水条件下における *Sclerocarya birrea* の樹勢および養分吸収に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, 75(1), 26-31.
- 138 村井 宏・石川 政幸・遠藤 治朗・只木 良也 (1992) 日本の海岸林, ソフトサイエンス社
- 139 永幡 嘉之 (2012) 巨大津波は生態系をどう変えたか 生きものたちの東日本大震災, 講談社.
- 140 永沢 朋子・椎名 勇・八楨 敦 (2016) 津波により冠水した砂質水田における除塩に伴う塩化物イオン及びナトリウムイオンの挙動と交換性陽イオンへの影響, 日本土壌肥料学雑誌, 87(1), 15-21.
- 141 長島 康雄・攝待 尚子 (2012) 2011年東北地方太平洋沖地震津波によって生じた樹木被害の概要, 仙台科学館 研究報告, (21), 12-17.
- 142 中原 浩貴・足立 里奈・近藤 謙介・安 萍・松添 直隆 (2018) 塩処理条件下における異なる栽培温度と CaCl_2 添加が塩生植物 *Suaeda salsa* の生育と無機成分吸収に及ぼす影響, 日本砂丘学会誌, 64(2).
- 143 中島 勇喜・岡田 穰 (2011) 海岸林との共生, 山形大学出版.
- 144 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.
- 145 中島 有美子・吉崎 真司 (2017) 西南日本における暖温帯の常緑広葉樹で構成される海岸林の 群落型と立地条件について, 日本緑化工学会誌, 43(4), 596-604.
- 146 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) , 21-26.
- 147 仲村 一郎・東江 栄・村山 盛一・飛田 哲・柳原 誠司・川満 芳信・本村 恵二 (2005) 生長・乾物生産からみた野生稲 *Oryza latifolia* Desv. の耐塩性, 熱帯農業, 49(1), 70-76.
- 148 仲村 一郎・東江 栄・村山 盛一・飛田 哲・柳原 誠司・川満 芳信・本村 恵二

- (2005)塩ストレス下における個葉の光合成特性からみた野生稲 *O. latifolia* Desv.の耐塩性, 熱帯農業, 49(1), 77-83.
- 149 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 : 日本林学会会報, (66), 7-12.
- 150 中村 俊一郎 (1985) 農林種子学総論, 養賢堂.
- 151 中村 卓司・大崎 満・安藤 理子・但野 利秋 (1996) イネおよびオオムギにおける耐塩性機構の差異, 日本土壌肥料学雑誌, 67(4), 459.
- 152 日本土壌肥料学会 (1991) 塩類集積土壌と農業, 株式会社 博友社, 146-147.
- 153 西力 造・木村 大造 (1954) 南九州地方における防潮林の研究, 鹿児島大学農学部學術報告, 3, 61-79.
- 154 Nobutoshi Matsushita・Tōru Matoh (1991) Characterization of Na⁺ exclusion mechanisms of salt-tolerant reed plants in comparison with salt-sensitive rice plants, *Physiologia Plantarum*, 83(1), 170-176.
- 155 野田坂 伸也 (2012) 海岸造園植栽に適する樹種 グリーン・エージ, (463), 36-37.
- 156 農林水産省 (2015) 2015年農林業センサス結果の概要(概数値)(平成27年2月1日現在), 農林水産省統計部, <http://www.maff.go.jp/j/press/tokei/census/151127.html> (2016年3月25日確認).
- 157 糠谷 明・増井 正夫・石田 明 (1979) トマトの耐塩性, 園芸学会雑誌, 48(1), 73-81.
- 158 糠谷 明・増井 正夫・石田 明 (1980) 異なる培地におけるメロンの耐塩性, 園芸学会雑誌, 49(3), 354-360.
- 159 糠谷 明・増井 正夫・石田 明 (1980) 砂耕と養液耕におけるメロンの耐塩性, 園芸学会雑誌, 49(1), 93-101.
- 160 糠谷 明・増井 正夫・石田 明 (1980) 異なる塩類土壌におけるメロンの耐塩性, 園芸学会雑誌, 48(4), 468-474.
- 161 糠谷 明・増井 正夫・石田 明 (1981) 砂耕におけるエダマメの耐塩性と硫酸カルシウム施用との関係, 園芸学会雑誌, 50(3), 326-331.
- 162 糠谷 明・増井 正夫・石田 明 (1982) 各種塩類が土耕におけるエダマメの耐塩性に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, 51(1), 62-69.
- 163 糠谷 明・増井 正夫・石田 明 (1982) 各種塩類が砂耕におけるエダマメの耐塩性に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, 50(4), 487-496.
- 164 糠谷 明・増井 正夫・石田 明 (1983) 希釈した海水が異なる生育段階のメロンの耐塩性に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, 52(3), 286-293.
- 165 糠谷 明・増井 正夫・石田 明 (1983) 各種塩類が養液耕におけるメロンの耐塩性に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, 52(2), 167-173.
- 166 糠谷 明・増井 正夫・石田 明 (1984) 養液耕における異なる生育段階の海水希釈液処理がメロンの耐塩性に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, 53(2), 168-175.

- 167 糠谷 明・増井 正夫・石田 明 (1984) 各種塩類が土耕におけるメロンの耐塩性に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, 52(4), 420-428.
- 168 糠谷 明・増井 正夫・石田 明・小倉 孝保 (1977) エダマメの耐塩性, 園芸学会雑誌, 46(1), 18-25.
- 169 小田 隆則 (2003) 海岸林をつくった人々—白砂青松の誕生, 北斗出版.
- 170 大沢 孝也 (1960) 砂耕による蔬菜の耐塩性に関する研究 (第1報) 果菜類について, 園芸学会雑誌, 29(4), 294-304.
- 171 大沢 孝也 (1961) 砂耕による蔬菜の耐塩性に関する研究 (第4報) 特に無機栄養より見た蔬菜の相対的耐塩性と塩害について, 園芸学会雑誌, 30(3), 241-252.
- 172 大沢 孝也 (1961) 砂耕による蔬菜の耐塩性に関する研究 (第2報) 葉菜類について, 園芸学会雑誌, 30(1), 48-56.
- 173 大沢 孝也 (1961) 砂耕による蔬菜の耐塩性に関する研究 (第3報) 根菜類について, 園芸学会雑誌, 30(2), 161-166.
- 174 大沢 孝也 (1962) 蔬菜の塩害と窒素供給形態ならびにカルシウム栄養の関係, 園芸学会雑誌, 31(3), 227-234.
- 175 大沢 孝也 (1962) 蔬菜の塩害と窒素供給形態の関係 (第1報), 園芸学会雑誌, 31(1), 53-63.
- 176 大沢 孝也 (1962) 蔬菜の塩害と窒素供給形態の関係 (第2報), 園芸学会雑誌, 31(2), 157-167.
- 177 大沢 孝也 (1966) 数種蔬菜の生育段階と耐塩性, 園芸学会雑誌, 35(3), 291-296.
- 178 大澤 啓志・上野 濤・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), 122-127.
- 179 太田 勝巳・伊藤 憲弘・細木 高志・東村 英幸 (1991) 水耕ミニトマトの果実品質および収量に及ぼす培養液濃度と塩類処理の影響, 園芸学会雑誌, 60(1) 89-95.
- 180 太田 猛彦 (2012) 森林飽和, NHK 出版.
- 181 太田 猛彦・北村 昌美・熊崎 実・鈴木 和夫・須藤 彰司・只木 良也・藤森 隆郎 (1996) 森林の百科事典, 丸善株式会社.
- 182 岡田 穰・坂本 知己・後藤 義明・林田 光裕 (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.
- 183 岡田 憲和・毛 惠平・山中 典和・吉川 賢・王 林和・張 国盛・山本 福壽 (2014) 中国毛烏素砂地に生育する *Artemisia ordosica* Krasch. と *Caragana korshinskii* Kom. の水分生理特性と浸透調節, 日本緑化工学会誌, 40(1), 25-30.
- 184 岡村 怜美・山本 福壽・西原 英治・谷口 武士・山中 典和 (2015) 塩ストレスがウラルカンゾウ (*Glycyrrhiza uralensis* Fischer ex Candolle) 1年生苗の成長と生理に及ぼす影響, 日本緑化工学会誌, 41(1), 33-38.
- 185 岡崎 正規・山根 一郎・小平 哲夫 (1982) 浚渫埋立地に形成された塩類集積地の土

- 壤と植生：東京湾東部の浚渫埋立地の土壌(第2報), 日本土壌肥科学雑誌, 53(4), 283-290.
- 186 沖中 健・賤機 高康・小林 達明 (1990) 緑化樹の潮風害における風衝と付着塩分に関する風洞実験, 千葉大園学報, 43, 121-128.
- 187 沖田 総一郎・半澤 綾菜・坂口 未紗・井上 美那・山本 福壽・山中 典和・岩永 史子 (2015) 模擬海水に水没後の土壌の冠水環境がヌマスギ (*Taxodium distichum* (L.) Rich.) とクロマツ (*Pinus thumbergii* Parl.) 苗木の生存と成長におよぼす影響, 日本緑化工学会誌, 41(1), 67-72.
- 188 小野 賢二・中村 克典・平井 敬三 (2014-a) 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(1), 37-48.
- 189 小野 賢二・中村 克典・平井 敬三 (2014-b) 津波被災海岸防災林砂質未熟土壌における土壌化学性の経時変化, 日本森林学会誌, 96, 301-307.
- 190 小野 幸菜 (2016) コラム 緑化植物 ど・こ・ま・で・き・わ・め・る, シャリンバイ (*Rhaphiolepis umbellata* (Thunb.) Makino), 日本緑化工学会誌, 41(3), 416.
- 191 小野 幸菜・秋元 利之・吉田 寛・江刺 洋司 (2007) 早期発芽力検定法の胚休眠型木本種子への適用, 日本緑化工学会誌, 33(1), 239-242.
- 192 大神 又三・長沢 喬 (1967) 海岸砂防樹種としてのマサキの試用について (第IV報) —マサキの耐塩性—, 日本砂丘学会誌, 14(1)
- 193 大久保 昌孝・宇都宮 直樹 (1994) 高温条件下におけるイチジク樹の生育に及ぼす NaCl の影響, 熱帯農業, 38(4), 305-313.
- 194 仰木 重蔵・坂口 勝美・中野 秀章・檜山 徳治・岩川 幹夫・藍野 祐久・日塔 正俊 (1961)伊勢湾台風下における三重・愛知両県下の海岸防災林の効果と森林の塩風害に関する調査報告, 林業試験場報告, (127)
- 195 Parvaiz Ahmad・M.M. Azooz・M.N.V. Prasad (2013) Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress, Springer, 32-33.
- 196 R. Li・F. Shi・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), 380-387.
- 197 R. Munns (2002) Comparative physiology of salt and water stress, Plant, Cell & Environment, 25(2), 239-250.
- 198 Rana Munns・Mark Tester (2008) Mechanisms of Salinity Tolerance, ANNUAL REVIEW OF PLANT BIOLOGY, 59, 651-681.
- 199 Redouane Choukr-Allah・Atef Hamdy・C. V Malcolm (1995) Halophytes and Biosaline Agriculture, CRC Press.
- 200 林野庁 (2014) 平成 26 年度 森林・林業白書, 一般財団法人 農林統計協会.
- 201 S. G. Stephens (1958) Salt Water Tolerance of Seeds of Gossypium Species as a Possible

- Factor in Seed Dispersal, *The American Naturalist*, 92(863), 83-92.
- 202 S. R. J. Woodell (1985) Salinity and seed germination patterns in coastal plants, *Vegetatio*, 61(1-3), 223-229.
- 203 S.A. Al-Khateeb (2006) Effect of salinity and temperature on germination, growth and ion relations of *Panicum turgidum* Forssk, *Bioresource Technology*, 97(2), 292-298.
- 204 S. Ramagopal (1990) Inhibition of Seed Germination by Salt and its Subsequent Effect on Embryonic Protein Synthesis in Barley, *Journal of Plant Physiology*, 136(5), 621-625.
- 205 齋藤 宏二郎・黒沼 尊紀・金谷 健至・渡辺 均 (2015) 複数の耐塩性指標による観賞植物 3 種の評価をその生理的機構の分類, *日本緑化工学会誌*, 41(1), 21-26.
- 206 齋藤 隆 (2015) 津波被災農地の実態調査 : 6.福島県浜通り北部の津波被災農地における土壌 pH および EC の実態(進歩総説: 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策), *日本土壌肥料学雑誌*, 86(5), 409-411.
- 207 坂本 知己 (2012) 海岸林の再生に向けて, *森林科学 : 日本林学会会報*, (66), 21-24.
- 208 SAM CHERIAN・M.P. REDDY・J.B. PANDYA (1999) Studies on salt tolerance in *Avicennia marina* (Forstk.) Vierh.: effect of NaCl salinity on growth, ion accumulation and enzyme activity, *Indian Journal of Plant Physiology*, 4(4), 266-270.
- 209 実岡 寛文 (2010) 植物の水および塩ストレス耐性の栄養生理学的研究(日本土壌肥料学会賞受賞), *日本土壌肥料学雑誌*, 81(5), 447-450.
- 210 Sangeeta Yadav・Mohd. Irfan・Aqil Ahmad・Shamsul Hayat (2011) Causes of salinity and plant manifestations to salt stress: A review, *Journal of Environmental Biology*, 32(5), 667-685.
- 211 佐々木 寧・田中 規夫・坂本 知己 (2013) 津波と海岸林ーバイオシールドの減災効果ー, 共立出版.
- 212 佐藤 亜貴夫・中島 勇喜・六本木 貞男・柳原 敦 (2009) 庄内海岸砂丘地における防風効果からみた樹林帯配置, *海岸林学会誌*, 8(2), 74-79.
- 213 関本 均 (2005) 植物の栄養生態(第 4 部門 植物栄養), *日本土壌肥料学雑誌*, 76(SeparateSpecial), 744-748.
- 214 中野 秀章・高橋 啓二・高橋 敏男・森沢 万佐男 (1962) 岩手・宮城両県下防潮林のチリ地震津波時における実態・効果と今後のあり方, *林業試験場研究報告*, (140).
- 215 清野 馨・田村 有希博・竹内 誠・上沢 正志 (1992) 寒冷地水稻のナトリウムの吸収と登熟との関係, *日本土壌肥料学雑誌*, 63(1), 25-30.
- 216 沈 利星・成瀬 幸敏・金 榮厚・小林 勝一郎・臼井 健二 (1999) 塩処理による活性酸素の誘導と消去活性における耐塩性の異なるイネ 2 品種間の差異, *熱帯農業*, 43(1), 32-41.
- 217 嶋田 典司 (1969) 作物に対する塩類の濃度障害に関する基礎的研究(第 1 報): 単一塩類溶液におけるキュウリ根の活性の変化について, *日本土壌肥料学雑誌*, 40(1), 26-31.

- 218 嶋田 典司 (1970) 作物に対する塩類の濃度障害に関する基礎的研究(第3報): 塩類処理による作物根の二・三のレスポンスについて, 日本土壤肥料学雑誌, 41(4), 162-166.
- 219 志水 勝好 (2000) 塩水処理濃度を異にした条件下におけるアッケシソウの生育と化学成分変化—ローズグラスおよびアルファルファとの比較—, 熱帯農業, 44(1), 146-146.
- 220 志水 勝好 (2001) アッケシソウ (*Salicornia herbacea* L.) の耐塩性および利用に関する研究, 熱帯農業, 45(5), 379-381.
- 221 志水 勝好・工藤 綾子・熊谷 彩子・加藤 盛夫・石川 尚人・曹 衛東 (2014) 塩水処理がケナフ (*Hibiscus cannabinus* L.) 発芽および生育に及ぼす影響, 熱帯農業研究, 7(2), 41-46.
- 222 志水 勝好・上田 堯夫 (1996) アッケシソウの植物体地上部における塩の移動及び排出, 熱帯農業, 40(1), 20-25.
- 223 志水 勝好・上田 堯夫・香川 邦雄 (1994) 塩水処理下でのアッケシソウ (*Salicornia herbacea* L.) の生育に及ぼす K 及び Ca の影響, 熱帯農業, 38(1), 8-15.
- 224 志水 勝好・上田 堯夫・加藤 盛夫 (1997) 塩水処理栽培がアッケシソウの茎葉及び種子の化学成分組成に及ぼす影響, 熱帯農業, 41(1), 1-6.
- 225 志水 勝好・上田 堯夫 (1994) アッケシソウの二形性及び発芽に影響を及ぼす要因, 熱帯農業, 38(3), 181-186.
- 226 清水 建美 (2001) 図説 植物用語事典, 八坂書房.
- 227 下瀬 昇 (1963) 作物の塩害生理に関する研究(第3報): イグサの耐塩性について, 日本土壤肥料学雑誌, 34(5), 147-149.
- 228 下瀬 昇 (1963) 作物の塩害生理に関する研究(第1報): 塩化ナトリウム, 硫酸ナトリウムの等浸透圧溶液が水稻生育および無機成分吸収におよぼす影響, 日本土壤肥料学雑誌, 34(4), 107-110.
- 229 下瀬 昇 (1964) 作物の塩害生理に関する研究(第4報): トマトとタバコの耐塩性について, 日本土壤肥料学雑誌, 35(4), 143-147.
- 230 下瀬 昇 (1968) 作物の塩害生理に関する研究(第8報): トウモロコシ, ルーサン, イタリアンライグラスの耐塩性について, 日本土壤肥料学雑誌, 39(12), 554-557.
- 231 下瀬 昇 (1968) 作物の塩害生理に関する研究(第7報): タマネギ, セルリー, ホウレン草, キウリ, インゲンの耐塩性について, 日本土壤肥料学雑誌, 39(12), 548-553.
- 232 下瀬 昇 (1958) 干拓地における作物の生理化学的研究(第4報): 新干拓地土壤に生育した水稻の無機成分吸収について, 日本土壤肥料学雑誌, 29(11), 477-479.
- 233 下瀬 昇・黒坂 啓介 (1985) オクラ, ハクサイ, ナタネの耐塩性, 熱帯農業, 29(4), 203-207.
- 234 下瀬 昇・黒坂 啓介 (1985) カブ, レタス, ニンジンおよびピーマンの耐塩性, 熱帯農業, 29(4), 208-212.

- 235 下瀬 昇・関谷 次郎・木村 修・鈴木 泉 (1991)ハゲイトウ, ヨモギ, ナス, およびシンの耐塩性, 熱帯農業, 35(1), 16-19.
- 236 下瀬 昇・竹中 史人 (1986) シュンギク, カリフラワー及びトマトの耐塩性, 熱帯農業, 30(1), 1-5.
- 237 下瀬 昇・竹中 史人・木村 修 (1987) アツケシソウ, イグサ及びセイタカアワダチソウの耐塩性, 熱帯農業, 31(3), 179-184.
- 238 信濃 卓郎・渡部 敏裕 (2011) 植物の有害元素(第4部門 植物栄養, 部門別進歩総説特集号), 日本土壌肥料学雑誌, 82(6), 504-510.
- 239 真行寺 孝・松丸 恒夫 (2007) 牛ふん炭化物の施用量および多量施用土壌の除塩がコマツナの生育と養分吸収および溶脱塩類に及ぼす影響, 日本土壌肥料学雑誌, 78(4), 355-362.
- 240 白田 和人・高岸 秀次郎・市橋 隆寿 (1989) ソナレシバ *Sporobolus virginicus* (L.)Kunth の耐塩性とその塩回避機能, 日本土壌肥料学雑誌, 60(3), 220-225.
- 241 尾形 昭逸・平田 熙・茅野 充男・安藤 忠男 (1974) 第5部門植物の無機栄養および養分吸収, 日本土壌肥料学雑誌, 45(3), 108-116.
- 242 Sohrabikertabad Sima・Ghanbari Ali・Mohassel Mohamad H.R.・Mahalati Nassiri-Mahallati・Gherekhlou Javid (2012) Effect of Desiccation and Salinity Stress on Seed Germination and Initial Plant Growth of *Cucumis melo*, *Planta daninha*, 31(4), 833-841.
- 243 菅沼 浩敏 (1978) 塩水かんがいが大麥の生育に及ぼす影響, 熱帯農業, 21(2), 114-120.
- 244 杉本 勝男・内山 泰孝・竹内 芳親・遠山 証雄 (1988) Saltbush, ハマアカザ属植物の生育に関する研究 第2報 砂土耕の *Atriplex nummularia* の収量に及ぼす各種塩水濃度の影響, 熱帯農業, 32(3), 129-139.
- 245 スカーリン ビモラット・クンパチャラヌラック ウィライラット・岡部 俊 (1993) 耐塩性の簡易検定法, 熱帯農業, 37(1), 42-45.
- 246 角 明夫・片山 忠夫・箱山 晋・鈴木 義則 (2002) オオムギとソルガムの乾物生産に対する灌漑水 NaCl 濃度と土壌水分の影響, 熱帯農業, 46(3), 175-182.
- 247 鈴木 善弘 (2003) 種子生物学, 文一総合出版.
- 248 T. Yupsanis・M. Moustakas・P. Eleftheriou・K. Damianidou (1994) Protein phosphorylation-dephosphorylation in alfalfa seeds germinating under salt stress, *Journal of Plant Physiology*, 143(2), 234-240.
- 249 但野 利秋 (1987) 植物の耐塩性, 熱帯農研集報, (59), 1-14.
- 250 但野 利秋・我妻 忠雄・間藤 徹 (1989) 第5部門: 植物の無機栄養および養分吸収, 日本土壌肥料学雑誌, 60(6), 526-539.
- 251 高橋 英一 (1975) 植物の栄養特性, 日本土壌肥料学雑誌, 46(9), 407-417.
- 252 高橋 英一 (1982) 水ストレスと植物の生育-水不足とのたたかい, 化学と生物, 20(6), 380-389.

- 253 高橋 新平・近藤 三雄 (1990) 水辺の緑化に関する実験的研究 ヨシ, ガマ, オギの発芽特性について, 日本緑化工学会誌, 16(3), 31-38
- 254 高谷 精二・河口 智志 (1993) 一ツ葉有料道路における飛砂による緑化樹木の被害について, 日本緑化工学会誌, 18(3), 176-181
- 255 竹林 伸夫・蜂須賀 正章・森 敏 (1987) オオムギ根中の NaCl ストレス関連ペプチド, 日本土壌肥科学雑誌, 58(6), 696-701.
- 256 玉手 英行・上山 啓一 (2013) 宮城県内における津波被災を受けた園芸農地中の Cl^- と Na^+ 濃度の変動, 日本土壌肥科学雑誌, 87(1), 187-189.
- 257 田村 悠旭・張 文軍・玉井 重信・山中 典和 (2008) 土壌塩分組成と濃度が *Tamarix austromongolica* N. の体内塩分組成と分泌塩分組成に及ぼす影響, 日本緑化工学会誌, 34(1), 27-32.
- 258 田中 房江・藤沼 善亮 (1974) 高濃度肥料溶液が作物の発芽および根の伸びにおよぼす影響(第1報): 各種肥料溶液における作物の発芽および根の伸びについて, 日本土壌肥科学雑誌, 45(12), 582-587.
- 259 田中 一平・谷口 武士・二井 一禎・山中 典和 (2009) 異なる塩ストレス下におけるアブラマツ (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 苗木の生存及び成長と菌根形成, 日本緑化工学会誌, 35(1), 33-38.
- 260 田中 賢治 (2009) 特集「海岸環境と緑化工」海岸林の天然更新への挑戦, 日本緑化工学会誌, 35(4), 518-522.
- 261 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), 282-289.
- 262 谷川 法聖・藤澤 春樹・清藤 文仁 (2015) 津波被災農地の除塩対策 : 1. 青森県おいらせ町津波被災水田の除塩対策(進歩総説: 津波被災農地土壌の実態調査と除塩対策), 日本土壌肥科学雑誌, 86(5), 418-420.
- 263 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), 54-59.
- 264 寺崎 寛章 (2013) 東北塩害農地における除塩事業の事前・事後評価と塩移動の長期モニタリング, 学術研究助成報告集, 2.
- 265 Timothy J. Flowers・Timothy D. Colmer (2008) Salinity tolerance in halophytes, *New Phytologist*, 179(4), 945-963.
- 266 月舘 健 (1984) 能代の海岸砂防林にみる津波被害-くいとめた松林・日本海中部地震津波-, *グリーン・エージ*, (125), 41-45.
- 267 内山 泰孝 (1985-a) *Atriplex nummularia* の耐塩性に関する研究 第4報 培養液の窒素濃度レベルと耐塩性, *熱帯農業*, 29(3), 151-156.
- 268 内山 泰孝 (1985-b) *Atriplex nummularia* の耐塩性に関する研究 第3報 培養液の三要

- 素濃度レベルと耐塩性, 熱帯農業, 29(3), 146-150.
- 269 内山 泰孝 (1985-c) *Atriplex nummularia* の耐塩性に関する研究 第2報 異なる温度条件で生育する *Atriplex nummularia* の耐塩性について, 熱帯農業, 29(2), 98-103.
- 270 内山 泰孝 (1985-d) *Atriplex nummularia* の耐塩性に関する研究 第1報 高塩濃度条件における生育量, 熱帯農業, 29(2), 92-97.
- 271 内山 泰孝 (1986-a) *Atriplex nummularia* の発芽および苗立ちと塩分環境 第I報 発芽および苗立ちに及ぼす NaCl 濃度および温度の影響, 熱帯農業, 30(2), 94-99.
- 272 内山 泰孝 (1986-b) *Atriplex nummularia* の発芽および苗立ちと塩分環境 第II報 異なる塩分条件下で生産された種子の発芽時の耐塩性, 熱帯農業, 30(2), 100-104.
- 273 内山 泰孝 (1986-c) *Atriplex nummularia* の耐塩性に関する研究 第5報 培地の塩濃度と飼料成分生産量との関係, 熱帯農業, 30(1), 6-11.
- 274 内山 泰孝 (1988) 熱帯乾燥地のアカザ科植物 *Atriplex nummularia* の耐塩性に関する研究, 熱帯農業, 32(3), 195-196.
- 275 内山 泰孝 (1981) Saltbushes, *Atliplex* 属植物の発芽に関する研究, 熱帯農業, 25(2), 62-67.
- 276 上田 堯夫・西川 五郎 (1970) 塩水灌漑がアルファルファ組織の形態に及ぼす影響, 熱帯農業, 13(4), 211-214.
- 277 上田 堯夫・志水 勝好 (1990) アッケシソウの耐塩性に関する研究, 熱帯農業, 34(3), 163-168.
- 278 梅澤 泰史・志水 勝好・加藤 盛夫・上田 堯夫 (2001) 塩ストレス下におけるダイズの光合成に及ぼす非気孔的要因の影響, 熱帯農業, 45(1), 57-63.
- 279 海野 洋揮・前田 良之・山本 紳朗・岡本 明治・武長 宏 (2002) 耐塩性の異なる植物における塩ストレス下での Ca^{2+} の動き, 日本土壌肥料学雑誌, 73(6), 715-718.
- 280 宇野 雄一・金地 通生・稲垣 昇・杉本 眞由美・前川 進 (1996) アスパラガス, テーブルビートおよびウラギクの発芽および栄養生長における耐塩性の評価, 園芸学会雑誌, 65(3), 579-585.
- 281 魚住 信之 (2011) トランスポーター研究が土壌・肥料・植物栄養学にもたらすインパクト : 5. 植物の Na 循環系と耐塩性, 日本土壌肥料学雑誌, 82(1), 65-69.
- 282 宇都宮 直樹・重永 昌二 (1988) オオミノトケイソウ及びキイロクダモノトケイソウの幼木の生長及び塩蓄積に及ぼす NaCl の影響, 熱帯農業, 32(3), 147-153.
- 283 W. ラルヘル (2004) 植物生態生理学 第2版, シュプリンガー・フェアラーク東京.
- 284 WILLIAM J. KATEMBE・IRWIN A. UNGAR・JOHN P. MITCHELL (1998) Effect of Salinity on Germination and Seedling Growth of two *Atriplex* species (Chenopodiaceae), *Annals of Botany*, 82(2), 167-175.
- 285 八神 徳彦 (2015) 高密度に更新した幼齢海岸クロマツ林に対する除伐効果, 石川県農林総合研究センター林業試験場研究報告, (47), 27-30.

- 286 矢幡 久 (1996) 樹木の耐塩性の評価方法と生理機作に関する研究, 文部省科学研究費補助金研究成果報告書.
- 287 山田 智・山口 岳人・Raul David LOPEZ Aguilar・Juan Angel LARRINAGA Mayoral (2016) 塩条件下におけるコキア (*Kochia scoparia* (L.) Schrad.)の Na, K, Ca, Mg および P 吸収特性, 日本砂丘学会誌, 63(3).
- 288 山田 常雄・前川 文夫・江上 不二夫・八杉 竜一・小関 治男・古谷 雅樹・日高 敏隆 (1983) 岩波 生物学辞典 第3版, 岩波書店.
- 289 山本 福壽・吉川 賢 (1992) 乾燥地の自然と緑化 (I) アラブ首長国連邦とカタールの植物, 日本緑化工学会誌, 18(4), 227-235.
- 290 山本 福壽・吉川 賢 (1995) 乾燥地の自然と緑化 (VI) サウジアラビアの農業, 緑化および自然保護, 日本緑化工学会誌, 21(1), 29-33.
- 291 山中 啓介 (2018) 密度調整が天然更新した海岸クロマツ林の成長に与える影響, 日本緑化工学会誌, 43(3), 509-515.
- 292 山根 昌勝 (1993) 砂土におけるグレインソルガムの塩水栽培 (IV) 耐塩性の品種間差異, 日本砂丘学会誌, 40(2).
- 293 山内 益夫 (1989) イネにおける耐塩性の品種間差の発現機構, 日本土壌肥科学雑誌, 60(3), 210-219.
- 294 山内 益夫 (1994) 中性植物の耐塩性 (1), 日本砂丘学会誌, 41(1).
- 295 山内 益夫 (1994) 中性植物の耐塩性 (2), 日本砂丘学会誌, 41(2).
- 296 山内 益夫 (1995) 中性植物の耐塩性 (3), 日本砂丘学会誌, 42(1).
- 297 山内 益夫 (1995) 中性植物の耐塩性 (4), 日本砂丘学会誌, 42(2).
- 298 山内 益夫・藤山 英保・小山 泰裕・長井 武雄 (1989) ダイズにおける耐塩性の品種間差の発現機構, 日本土壌肥科学雑誌, 60(5), 437-444.
- 299 山内 益夫・前田 吉広・長井 武雄 (1987) 耐塩性の品質間差とナトリウムの吸収・移行特性との関係(1): イネ 日本土壌肥科学雑誌, 58(5), 591-594.
- 300 山内 益夫・秋 友勝・藤本 貴久・長井 武雄 (1994) 各種作物におけるカチオンの吸収に及ぼす高濃度ナトリウム塩添加の影響, 日本土壌肥科学雑誌, 65(2), 164-157.
- 301 山内 益夫・藤山 英保・木村 嘉孝・長井 武雄 (1990) テンサイ, イネ, ダイズ, アズキとインゲンにおける各種無機要素の吸収・移行に及ぼす塩化ナトリウム添加の影響, 日本土壌肥科学雑誌, 61(2), 173-176.
- 302 山内 益夫・藤山 英保・松本 法子・長井 武雄 (1990) ウリ科作物における各種無機要素の吸収・移行に及ぼす塩化ナトリウム添加の影響, 日本土壌肥科学雑誌, 61(1), 1-7.
- 303 山内 益夫・須崎 静香・湧嶋 俊史・藤山 英保 (1989) アズキにおける耐塩性の品種間差の発現機構, 日本土壌肥科学雑誌, 60(4), 325-334.
- 304 山内 益夫・田中 智・藤山 英保 (1997) インゲン (*Phaseolus vulgaris* L.) における耐

- 塩性およびカチオンの吸収・移行に及ぼすナトリウムの影響の品種間差, 園芸学会雑誌, 65(4), 737-745.
- 305 山内 益夫・小吉 亮・長井 武雄 (1995) ダイズとイネにおかるカリウム, カルシウム, マグネシウムの吸収・移行に及ぼす塩化ナトリウム添加効果の比較, 日本土壌肥科学雑誌, 66(1), 32-38.
- 306 山内 益夫・島田 義明・吉田 昌一 (1983) 水稻における塩化ナトリウム高濃度処理による生育障害の軽減に対するカルシウムイオンの効果, 日本土壌肥科学雑誌, 54(6), 499-504.
- 307 Yan-Hui Peng・Ya-Fang Zhu・Yong-Qiang Mao・Suo-Min Wang・Wei-Ai Su・Zhang-Cheng Tang (2004) Alkali grass resists salt stress through high $[K^+]$ and an endodermis barrier to Na^+ , *Journal of Experimental Botany*, 55(398), 939-949.
- 308 米田 茂男 (1958) 塩害と土壌 [3], 農業及園芸, 33(9), 1337-1342.
- 309 米山 忠克・長谷川 功・関本 均・牧野 周・間藤 徹・河合 成直・森田 明雄 (2010) 新植物栄養・肥料学, 朝倉書店.
- 310 吉田 成章 (2006) 研究者が取り組んだマツ枯れ防除 : マツ材線虫病防除戦略の提案とその適用事例(<特集>マツ枯れ), 日本森林学会誌, 88 (5) , 422-428
- 311 吉田 重幸 (1970) アカマツおよびクロマツの耐塩性に関する研究, 香川大学農学部学術報告, 21(48) , 67-72.
- 312 吉田 裕一・宮田 英幸・後藤 丹十郎 (2003) 培養液中 $NaCl$ 濃度がピートバッグ栽培イチゴの生育, 収量と品質に及ぼす影響, 園芸学研究, 2(3), 171-174.
- 313 吉川 賢・大手 信人・山中 典和 (2004) 乾燥地の自然と緑化—砂漠化地域の生態系修復に向けて, 共立出版.
- 314 吉川 賢・山本 福壽 (1993) 乾燥地の自然と緑化 (II) アラブ首長国連邦とカタールのマングローブ, 日本緑化工学会誌, 19(1), 21-26.
- 315 吉川 賢・山本 福壽 (1994) 乾燥地の自然と緑化 (III) クウェートの自然と植物, 日本緑化工学会誌, 20(2), 111-115.
- 316 吉川 賢・山中 典和・吉崎 真司・三木 直子 (2011) 風に追われ水が蝕む中国の大地 : 緑の再生に向けた取り組み, 学報社
- 317 吉岡 俊人・清和 研二 (2009) 発芽生物学 : 種子発芽の生理・生態・分子機構, 文一総合出版
- 318 吉崎 真司 (2012-a) 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), 12-15.
- 319 吉崎 真司 (2012-b) 今日の海岸林の課題, *水利科学*, 56(3), 14-27.
- 320 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.
- 321 吉崎 真司・横田 博実 (1993) アラブ首長国連邦における主要な砂漠緑化樹種の発芽

- および初期生育におよぼす NaCl の影響, 日本緑化工学会誌, 19(2), 91-102.
- 322 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.
- 323 弓場 譲・市川 清 (1978) 水耕液に添加した塩類とクロマツのメバエの生長, 日本林学会誌, 60 (12) , 464-466.
- 324 Z. Khodarahmpour・M. Ifar・M. Motamedi (2012) Effects of NaCl salinity on maize (*Zea mays* L.) at germination and early seedling stage, African Journal of Biotechnology, 11(2), 298-304.