

東北地方太平洋沖地震に伴う大津波が沿岸の海岸林土壤にもたらした影響

小野 賢二^{1,*}・中村 克典¹・平井 敬三²

¹独立行政法人森林総合研究所東北支所・²独立行政法人森林総合研究所立地環境研究領域

東日本大震災の大津波による海岸林の復旧・再生に向け、林野庁は、防潮堤の復旧等の基盤造成が完了した箇所から植栽を行って、概ね10年で植栽事業を完了できるよう取り組んでいる。これまでの研究により、土壤への海水浸水や地表面への海砂の堆積は樹木の過剰な塩分吸収や集積、海水由来の塩分の拮抗作用による養分の吸収阻害、根の細胞内外の浸透圧差の減少に起因した樹木の吸水能力の低下を起こすことが知られている。効率的に海岸林の再生・復興を進めるには、津波被災後の土壤環境を把握して対策を講ずる必要がある。被災林の土壤調査の結果から、海塩付加による土壤への過剰なNa⁺集積や、樹木の養分吸収を助ける菌根菌が活発に活動するA層のpH環境の激的な変化、地盤沈下に伴う地下水面の相対的な上昇が、樹木根系に著しい影響を与え、海岸林構成樹における針葉の褐色化、赤枯れ発生の原因となったと考えられた。海水の影響を受けた森林土壤は除塩の実施が必要であるが、森林を対象とした除塩事業の実施はその立地条件等から困難であることから、梅雨や台風など自然の降雨に期待せざるを得ない。効率的に除塩を進めるには排水溝の施工等の被災土壤における排水環境の改善が重要である。海岸林の再生を果たすため、今後も被災海岸林の土壤環境の改善状況を継続的にモニタリングしていく必要がある。

キーワード：東日本大震災、土壤塩害、海岸防災林、除塩

Kenji Ono, Katsunori Nakamura, Keizo Hirai : Soil conditions in seawater-inundated coastal forests damaged by the 2011 mega-tsunami following the Tohoku earthquake along the eastern Pacific coast of Japan. *Japanese Journal of Forest Environment* 56:37-48, 2014.

The 2011 Heisei Sanriku mega-tsunami destroyed most of the forests along the eastern Pacific coastline of Japan. The Forest Agency of Japan (FAJ) has played a positive role in the restoration of tsunami-damaged coastal forests by constructing tide embankments and planting trees. Seawater inundation and sea-sand deposition in and on topsoil generally lead to excessive Na⁺ absorption and accumulation in plants, competitive inhibition of nutrient uptake by Na⁺, and a decrease in suction potential caused by low osmotic pressure between the soil matrix and plant roots. During the disaster, excessive Na⁺ absorption in topsoil, incremental changes in soil pH (H₂O), and deterioration in ground water drainage due to ground subsidence strongly affected rhizosphere microenvironments. These changes in turn caused severe damage, including needle discoloration, debilitation, droop, and finally death, to broad areas of the eastern Pacific coastal forests. Rehabilitation of tsunami-created saline soils in these forested lands requires the removal of sea salt, a difficult task as most Japanese forests have poor irrigation facilities. Efficient removal of sea salt from the soils must therefore rely on high-precipitation events, such as typhoons and the rainy season in Japan. Reforestation of seawater-inundated forests along the Pacific coastal areas affected by the tsunami will require continued soil chemistry monitoring and rehabilitation.

Key words : tsunami-hit foresland, soil, desalinization, seawater inundation

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災から間もなく3年が経過する。東北地方太平洋沖地震津波による海岸林の浸水被害は約3,060haで(東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会, 2012)、青森県から千葉県にかけての太平洋沿岸部総延長約140kmにおいて津波被害を回避および軽減させるための防災施設、すなわち、防潮・防波堤や海岸林地盤の損壊・沈下・流亡や、海岸林を構成する樹木の倒伏・折損・流亡などの被害が発生した(林野庁, 2013)。この地震に伴う大津波による海岸林被害は広域かつ甚大であり、海岸林の完全な復旧・再生には多くの年数が必要である(東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会, 2011, 2012)。林野庁は、津波被災海岸林の復旧に向けて、震災後5年程度で

防潮堤の復旧と盛土など海岸林造成に必要な植栽基盤を整備し、基盤造成が完了した箇所から順次植栽を行い、概ね10年間で植栽を完了する事業計画を策定して、海岸林再生への取り組みを進めている(林野庁, 2013)。津波で被災した海岸林を訪れてみると、その多くですでに被害木および瓦礫の撤去や整地がなされ、また震災直後に作られた多くの瓦礫処理場もその役目を終えつつあることを実感する。一部では海岸林を再生するための植栽も進み、復旧・復興の歩みは徐々にではあるが着実に前進している(写真-1)。

津波による極端な樹体の損傷を受けず見かけ上は健全な海岸林でも、2013年5月下旬以降、時間経過に伴って針葉の変色・萎凋、樹勢衰退、さらには枯死する事例が確認された(河北新報社, 2011; 中村ら, 2012; 小野・平井, 2012, 2013)。これらの海岸林では津波が浸入し、土壤は海水に

* 連絡・別刷請求先(Corresponding Author) : 〒020-0123 岩手県盛岡市下厨川字鍋屋敷92-25 独立行政法人森林総合研究所東北支所 : Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 92-25, Nabeyashiki, Shimo-Kuriyagawa, Morioka, Iwate 020-0123, Japan
E-mail : don@ffpri.affrc.go.jp

1 Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2 Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

(2014年1月23日受付, 2014年3月11日受理)

宮城県東松島市浜市 2012年7月



青森県三沢市三川目 2013年5月



青森県八戸市市川 2013年3月



写真-1. 復旧が進む海岸林被災地

よって浸漬された(中村, 2011; 中村ら, 2012)ことから、津波がもたらした海水由来の塩分が針葉変色・萎凋、樹勢衰退・枯死などの現象を広範に引き起こした可能性が考えられた。

既往研究においては、高潮や潮風・塩風害によって生じる土壤塩害の実態やその原因について、多くの知見が蓄積されてきた(例えば、米田, 1958a, b, cなど)。すなわち、津波による土壤への海水浸水や地表面への海砂堆積は、そこに生育する樹木による過剰な塩分吸収・集積、塩分の拮抗作用による養分吸収阻害、樹木の根の細胞内外の浸透圧差が小さくなることによる吸水能の低下を誘引する(米田, 1958a, b, c; 農林水産省農村振興局, 2011)。これらの要因は被災海岸林においても樹木の萎凋や生育不良、枯死を引き起こす。また津波浸水地を対象として再造林をする際には苗木の活着や生育不良の原因ともなり得る。海岸林の再生・復興の歩みを確実に進める上では、津波被災後の土壤環境を把握し、適切な対策を講ずることが重要である。

そこで、以下では、東北太平洋沿岸の津波被災林を対象とした土壤調査(小野・平井, 2012, 2013; 小野ら, 2013)や既往研究における海岸林の土壤調査(農林水産技術会議事務局, 1987)を基にして、今回の震災による海岸林の土壤塩害の実態とその後の経過状況を要約して紹介し、海岸林の再生に向けた津波被災土壤の取り扱いに関する課題を解説することとする。

2. 海岸マツ林における津波浸漬による土壤塩害の実態と針葉変色の原因

今回の津波災害が海岸林の土壤へもたらした影響を明らかにするために、津波で被災した東北太平洋沿岸のクロマツ林およびアカマツ林において土壤調査を行った。一般に海岸林の主な構成樹種はクロマツであるが、東北地方では岩礁海岸を中心にアカマツが優先していた場所も多い。ここでは、特別に両種を区別しない場合、単に「マツ」と記すこととする。以下では、まず津波の影響のない海岸林土壤について既往の研究結果を参考に記述し、その特徴と津波浸漬土壤を比較することで、今回の津波災害が海岸林の土壤へもたらした影響について解説する。

2.1 津波の影響のない海岸マツ林の土壤環境

飛砂・潮風防止、高潮・津波被害低減などの環境保全機能の維持強化を目指した海岸林の管理方法の策定のために、1978年から1982年にかけて環境庁一括計上国立機関公害防止等試験研究課題「環境変化に対応した海岸林の環境保全機能の維持強化技術の確立に関する研究」が行われ、その中で海岸林の土壤断面形態および化学性に関する調査・分析がなされた(農林水産技術会議事務局, 1987; 田中ら, 1992a, b)。ここでは、この研究課題で得られた土壤分析値および森林総合研究所立地環境研究領域に保存されている土壤試料を精査・分析し、この課題で研究対象地であった茨城県東海村村

松および同北茨城市大津港南の海岸林(図-1)にて採取した土壌のデータをリファレンスデータとして、津波の影響を受けていない海岸林の土壌環境について議論することとした。

当該調査地の主な構成樹種はクロマツであったが、植生のない後浜に位置する海岸前縁部や砂丘凹地で地下水面の高い箇所、壮齢のモミ林が分布する箇所も存在した(小野ら, 2013)。土壌は全層が砂土または壤質砂土からなるC層か、あるいはC層上にA層, H層(まれに薄いB層)が存在する未熟土であり、それらの層位は主として砂の粒径の違いと根の侵入程度、土色によって区分された(小野ら, 2013)。土壌構造の発達には認められなかった。A層では腐植の混入が認められたが、層位の発達程度はあまり明瞭ではなかった。これらの試験地における土壌のpH(H₂O)は、H層およびA層では酸性~弱酸性を示し、A層の下にあるAB層, B層, BC層, C層では酸性~アルカリ性であった(図-2)。このような土壌断面内のpH(H₂O)の垂直的变化は海岸林土壌の最も大きな特徴である。海岸林の林床から土壌表層においては堆積有機物や腐植に由来する有機酸が存在しているため、その存在が土壌の

pH(H₂O)に影響していた。そのため、特にA層やHA層などの表層部では土壌の酸性化が認められた(図-2)。後浜に位置する、比較的汀線に近い場所ではA層やH層などの腐植に富んだ土壌層が未発達なため、土壌全層でアルカリ性を示し(小野ら, 2013)、海水の影響を強く受けていると考えられる。電気伝導度(以下、「EC」という。)は砂質土壌にもかかわらず比較的高く、多くの層位で0.01dS m⁻¹以上の値を示した(図-2)。後浜の汀線に近い場所の土壌や一部の表層土壌では、0.40 dS m⁻¹以上と非常に高い値を示すものも確認された。これらの高いEC値は潮風に乗って頻繁に海岸林へもたらされた飛砂や飛塩(村井ら, 1992)が土壌上層部および海側の海岸林土壌に恒常的に降下し、その塩類を蓄積させていることを示唆するものである。陽イオン交換容量(以下、「CEC」という)は全般的に10 cmol_c kg⁻¹以下と極めて低い値を示したが、H層やHA層など一部の層位で、20 cmol_c kg⁻¹を超えた土壌が確認された(図-2)。交換性Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺含量は、多くの土壌で1 cmol_c kg⁻¹以下を示し、全般に低かった(図-2)。後浜の汀線に近い場所の土壌のみ、



図-1. 調査地位置図

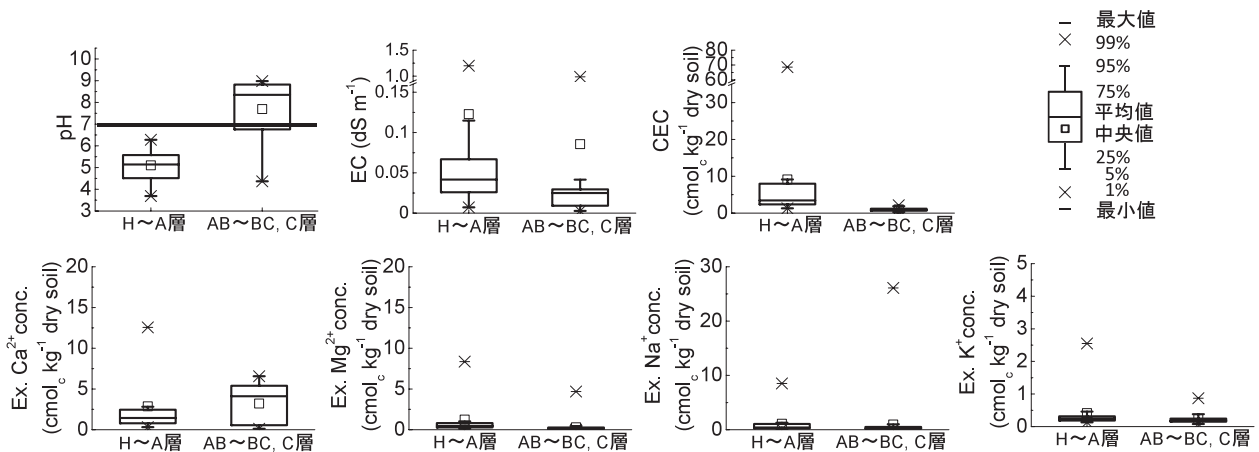


図-2. 津波の影響のない海岸マツ林土壌の化学性

pHを示す図中の実線は、海水の一般参考値(松井・一国, 1970)。

交換性Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺含量は5 cmolc kg⁻¹以上の高い値を示した。この傾向はCECと同様であった。土壌における交換性塩基の状態を指標する際に、しばしばCECに対する塩基合計量、あるいはそれぞれの塩基成分の飽和度が用いられることがある。海岸林土壌の塩基飽和度に関しては、極端に低いCEC値を反映し、多くの土壌でCa²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺の各飽和度は10%を超えた(小野ら, 2013)。そのため、全塩基飽和度は多くの箇所では100%を超え、特に後浜の汀線に近い場所では全層で全塩基飽和度が1000%超であった(小野ら, 2013)。これらは、粘土や腐植が乏しく、主に砂で構成される未熟土では交換性塩基を吸着する能力が著しく低いことに起因したものである。

以上より、海岸砂丘地の土壌は、山地の森林土壌に比べて極めて未熟で、かつ若い土壌であるといえる。このことから、pH(H₂O)や塩類含量、塩基飽和度などの土壌化学性の観点から、植物の生育上、大変厳しい土壌環境であると考えられる。

2.2 津波浸漬による海岸マツ林土壌への物理的影響

津波を受けた海岸クロマツ林およびアカマツ林における土壌の状況を把握するために、被災7ヶ月後の2011年10月に、青森県八戸市市川、宮城県東松島市浜市、同東松島市野蒜、同巨理町吉田浜、同山元町山下浜に調査地を設定し(図-1)、調査を行った。これらの調査地内には、被災直後、津波による倒伏・折損・流亡を免れたマツが残存していたが、被災7ヶ月後の2011年10月までに、多くの個体が針葉が褐色化し、樹木の萎凋・衰弱が認められるようになった(中村ら, 2012)。場所によっては、吉田浜の前縁部などほぼ全個体が枯死した調査地もあった。前項における津波の影響のない海岸マツ林土壌の特徴を参考に、今回の津波災害がもたらした海岸マツ林土壌への影響について、以下に解説する。

今回調査を行った海岸林における被災土壌の断面形態の記載を表-1に示す。いずれの調査地でも土壌は未熟土であり(土じょう部, 1976)、表層地質は砂を中心とした未固結堆積物(経済企画庁総合開発局, 1970, 1972)であった。調査地の林床には、津波によって運ばれた海砂が堆積していた(写真-2)。宮城県巨理町吉田浜および青森県八戸市市川では30 cm厚以上の非常に厚い堆砂が認められた(表-1)。津波被災から7ヶ月以上の時間が経過していたこともあり、林床にはイタチハギやテリハノイバラなどの海岸性植物のほか、フジヤササ、ニセアカシヤ、ツタウルシなどが侵入し、徐々にではあるが下層植生の回復が確認された。マツ針葉が赤褐変化した後、枯死して脱落した落葉などが堆積したことにより、0~3 cm厚程度のA₀層(L層)の形成も認められた(写真-2)。土壌断面調査では、いずれの調査地でも堆砂層の下に3~9 cm厚の赤黒色(2.5YR2/1)~赤褐色(2.5YR3/1)~極暗赤褐色(2.5YR2/3)~暗赤褐色(2.5YR3/2~3)の埋没A層(2A層)が認められた(表-1)。2A層内にはマツ細根や津波被災前に生育していた下層植生の根系と、それらに由来する腐植の混入が認められた。2A層の下には、すぐに砂質の2C層が存在した。宮城県巨理町吉田浜および同山元町山下浜では60 cmの深度に地下水面が確認され、被災前に発達していたマツ根系が水没していた。

2.3 津波浸漬による海岸マツ林土壌への化学的影響

元来、海岸林土壌は海岸より風によって供給された海砂が堆積した未熟土であるため、その土壌の化学的特性値にはばらつきはあるものの、調査箇所における明確な差違を認めることはできない。未風乾新鮮土壌のpH(H₂O)は表層の堆砂層では中性~アルカリ性を示した。2A層およびその下の2C層では弱酸性~弱アルカリ性で、表層の堆砂層よりやや低かつ

表-1. 津波被災マツ林の林床や表層土壌の状態

| 調査地 | 市川 | | 浜市 | | 野蒜 | 吉田浜 | | 山下浜 |
|----------------------|---------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|--------------|
| | 前縁部 | 後背地 | 後背地(前) | 後背地(後) | | 後背地 | 前縁部 | |
| 林冠構成種 | クロマツ | クロマツ | アカマツ | アカマツ | アカマツ | クロマツ | クロマツ アカマツ | クロマツ アカマツ |
| マツの被災状況 | 一部枯死 | 一部枯死 | 生存 | 一部生存 | 一部生存 | 枯死 | 一部枯死 | 一部枯死 |
| 帯水層の深度(cm) | -- | -- | -- | -- | -- | 65 | 65 | 60 |
| 下層植生 | ツタウルシ ヤマグワ | ツタウルシ ヤマグワ | カスミザクラ ニセアカシア ツタウルシ ヤマウルシ | カスミザクラ ニセアカシア ツタウルシ ヤマウルシ | 整理伐採後に 整地 | ニセアカシア フジ テリハノイバラ | ニセアカシア イタチハギ ヤマウルシ カスミザクラ | 記載無し |
| 層厚 | | | | | | | | |
| A ₀ 層(cm) | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | わずか | 0.5 | 0.5 |
| 堆砂厚(cm) | 32 | 50 | 13 | 6 | 3 | 48 | 32 | 23 |
| 2A層厚(cm) | 4 | 8 | 9 | 5 | 3 | 3 | 5 | 4 |
| 2C層厚(cm) | 22+ | 14+ | 28+ | 29+ | 40+ | 13+ | 28+ | 33+ |
| 有効土壌深(cm) | 58+ | 72+ | 50+ | 40+ | 46+ | 65+ | 65+ | 60+ |
| 土性* | | | | | | | | |
| 堆砂層 | S | S | S | S | S | S | S | S |
| 2A層 | S | S | S | S | S | LS | LS | LS |
| 2C層 | S | S | S | S | S | S | S | S |
| 土色 | | | | | | | | |
| 堆砂層 | 2.5Y4/2 | 2.5Y4/2 | 2.5Y4/4 | 2.5Y4/3 | 2.5Y4/2 | 2.5Y4/3 | 2.5Y4/2 | 2.5Y5/2 |
| 2A層 | 2.5Y2/1 | 2.5Y2/1 | 10YR2/3 | 10YR2/2 | 2.5Y3/2 | 2.5Y2/1 | 2.5Y3/1 | 2.5Y2/1 |
| 2C層 | 2.5Y3/1 | 2.5Y3/2 | 10YR3/4 | 10YR4/4 | 2.5Y4/4 | 2.5Y5/3 | 2.5Y4/4 | 2.5Y3/3 |

*S: 砂土, LS: 壤質砂土

た(図-3)。未風乾新鮮土壌のECは全般に高く、2A層における平均値は 0.03 dS m^{-1} で、堆砂層と2C層の平均値、 0.01 、 0.007 dS m^{-1} と比べると、極めて高いレベルにあった(図-3)。1:2.5水浸出法による未風乾新鮮土壌における水抽出液中の各塩基濃度も全般に高く、特に2A層における Na^+ 濃度は著しく高かった(図-3)。海水中の Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ の各濃度は、それぞれ 0.40 、 1.27 、 10.56 、 0.38 g L^{-1} (松井・一国, 1970)であることから、これらの値と比べれば、水抽出液中の各塩基濃度は50~1,000分の1のレベルであったが、それでも、堆砂層および2A層では津波浸漬によってもたらされた残留海塩の影響を強く受けていることが示唆された。また、交換性塩基に関しては、各層のCECは全般に低く、堆砂層の平均値は 5.7 、2A層で 20.2 、2C層で $4.6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ であった(図-3)。これは、いずれの調査地も土性が砂土または壤質砂土であり、腐植や粘土に乏しい未熟土であるためと考えられた。一方、交換性塩基の各濃度に関しては、その種類によってその値に差が見られた(図-3)。交換性 Ca^{2+} は、堆砂層で $5.9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (平均値)、また2A層で $4.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ とやや高く、2C層では $0.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ と低い傾向を示した(図-3)。交換性 Mg^{2+} と Na^+ は、2A層でそれぞれ 3.9 、 $4.7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (いずれも平均値)と高く、堆砂層、2C層の交換性 Mg^{2+} はそれぞれ 2.3 、 $0.7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 、交換性 Na^+ は 1.3 、 $1.1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ であり、ともに2A層に比べて低い値を示した(図-3)。交換性 K^+ 含量は全層とも低く、平均値は $0.3\sim 0.8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ の範囲にあった(図-3)。海岸林の未熟土壌のCECが元来低く、かつ土壌へ恒常的に海塩が付加されるため、それぞれの塩基飽和度は津波影響に関わらず高い値を示し、調査地の場所や土壌層位とは関連性が認められなかった。また、宮城県亶理町吉田浜や青森県八戸市市川の堆砂層などでは成分によって100%を超えるものが認められた(小野ら, 2013)。全塩基飽

和度はいずれの土壌でも20%以上を示し、大変高いレベルであった(小野ら, 2013)。

以上の結果を総合して、津波浸漬が与えた海岸マツ林土壌の化学性への影響を考察する。土壌の化学性に対して津波浸漬の影響は堆砂下に埋没した2A層において顕著に現れた。津波浸漬土壌における $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ は、全般に堆砂層で著しく高く、2A層、2C層でも中性~弱アルカリ性を示して高い傾向を示した(図-3)。一方で、津波の影響のない土壌のA層は明らかに酸性であったことから(図-2)、 pH が 8.0 とされる海水(松井・一国, 1970)の浸漬や海水や海塩を含む海砂の堆積が、津波浸漬土壌の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ に顕著な影響を与えたと考えられる。津波浸漬土壌におけるECやCEC、交換性塩基含量は津波の影響のない土壌と同等のレベルを示した(図-2, 3)。ECは砂質土壌であるにも関わらず、全般に高い値を示し、特に腐植に富む2A層では著しく高い値である一方で、CECは砂質で構成される未熟土であることを反映して全般に低かった(図-2, 3)。加えて、低いCEC値を反映し、海岸林土壌の交換性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 含量も全般に低かった(図-2, 3)。津波浸漬土壌における堆砂層および2A層の交換性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 含量は2C層に比べ高かった(図-3)が、これは堆砂層および2A層に津波浸漬、海塩付加の影響が強く残っていることを示している。各塩基飽和度は、砂質未熟土の低いCEC値を反映して全般に高く、100%を超える土壌も多く存在した。調査時期や調査箇所などが異なるため、単純に津波の影響のみを言及することはできないが、津波浸漬7ヶ月後の海岸林における土壌中の塩基含量は津波の影響を受けていない海岸林土壌と同等の範囲にあり、津波浸漬に関する塩基状態への影響は明瞭ではなかった(図-2, 3)。

2.4 マツ針葉の赤褐化の原因

津波被災海岸林における土壌調査の結果より、東北地方太

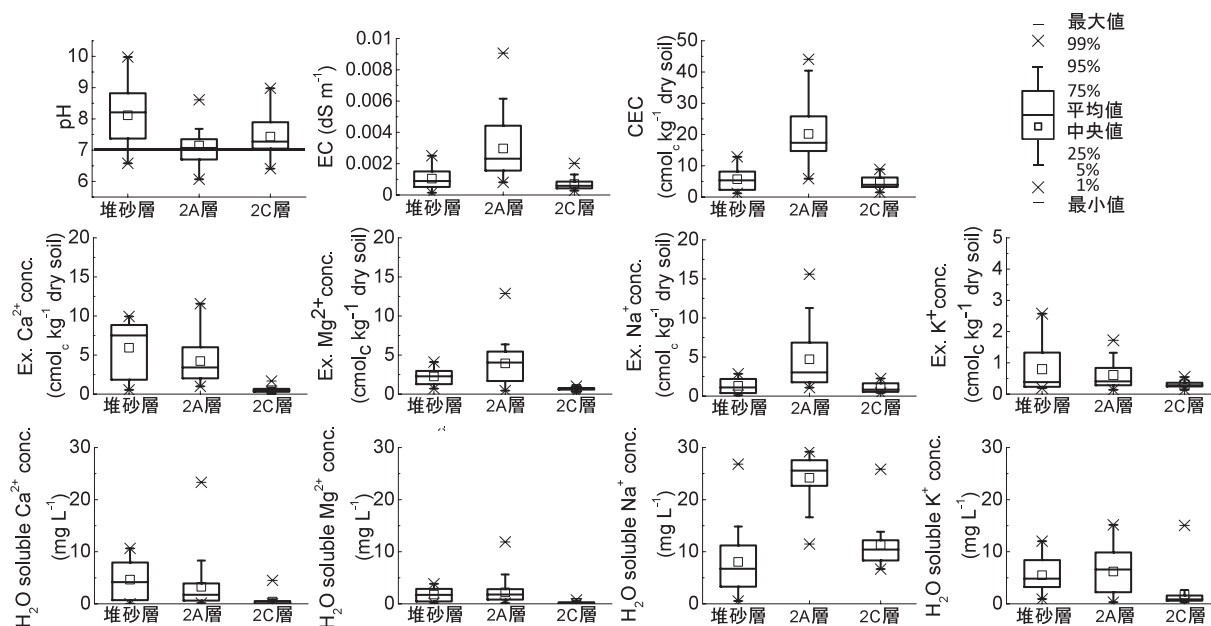


図-3. 津波浸漬海岸マツ林土壌の化学性
pHを示す図中の実線は、海水の一般参考値(松井・一国, 1970)。

宮城県亙理町吉田浜 2011年10月



青森県八戸市市川 2011年11月



宮城県東松島町浜市
2011年10月



宮城県山元町山下浜
2011年10月



宮城県東松島市野蒜
2011年10月



写真-2. 津波被災直後の海岸マツ林土壌の様子

平洋沖地震津波による海水浸水が海岸マツ林土壌の化学性に対して著しい影響を及ぼし、マツ針葉の褐色化や萎凋、樹勢衰退、枯死をもたらしたことは明らかである。一方で、今回の東日本大震災では、東北地方太平洋沿岸の各地で地盤が沈下したことが報告されている(国土交通省東北地方整備局, 2011a, b)。津波被災後に調査を行った宮城県亙理町吉田浜や同山元町山下浜の調査地では60 cmの深度に地下水面が確認された(表-1)。本来、樹木の根系は地下水に触れない土壌深で発達するが、我々の調査では地下水に水没したマツの根系が確認された(写真-2)。津波浸漬前は表層土壌であった2A層は樹木や下層植生の根系が発達し、植物の養分吸収を助ける根圏微生物の活動層であったと推察されるので、この層位におけるpH(H₂O)の劇的な変化がマツの根やマツと共生関係にある菌根菌等の生物相に与えた影響は著しく大きい。同時に地下水面の相対的な上昇とそれに起因する根圏土壌の水没は、マツ細根の腐れや生理活性低下などを招く直接的なストレスの原因になったと推察される。以上のような土壌への複合的な影響によって、海岸マツ林においては広範囲に針葉変色が発生し、一部は枯死に至ったと考えている。

一方、交換性塩基含量に関する分析では下層部のC層において津波浸漬による明瞭な影響が認められなかった(図-2, 3)。このことは排水不良のため、津波浸漬7ヶ月後においても土壌上層で認められた津波浸漬による土壌化学性への影響が下層にまで及んでいない可能性を示唆するものであろう。

3. 海岸後背地スギ林における津波浸漬による土壌塩害の状況と針葉変色の原因

スギは、平野部において屋敷林などに広く植栽されており、また三陸地方のリアス式海岸部においては平野部が少なく海と山が近接しているため、海岸近くの斜面下部まで植林されている。このようなスギ林に津波が到達し、2011年5月以降にスギ針葉の変色・萎凋、樹勢衰退、さらには枯死などの被害が生じた(河北新報社, 2011; 中村ら, 2012; 小野・平井, 2012)。今回の大津波のような一時的な海水の侵入による塩害は、土壌への塩類過多に起因する直接的な生育障害に基づくと言われている(米田, 1958a)。ここでは、津波浸漬がスギ林土壌にもたらした影響を明らかにするため、2011年6月に岩手県釜石市鶴住居のスギ林で、同7月に宮城県南三陸町志津川のスギ林(図-1)で調査・分析した結果を検討し、土壌塩害とスギ林針葉の赤褐色化現象の関連を考察した。スギが津波浸漬された際の針葉変色の反応は極めて敏感で、塩害によるとみられるスギ針葉の変色発生範囲は、基本的には津波到達箇所と一致していた(写真-3)。加えて、同一斜面においても、スギ針葉の赤褐色化の発生は津波が到達した範囲でのみ認められ、津波未到達箇所の生立木の針葉は変色しておらず、外見上健全であった。ただし、スギ針葉の赤褐色化は2011年4月には認められなかったことから、休眠期から生育期へ移行する2011年5月以降に顕在化したと考えら

林況および林床の様子



表層土壌の様子



岩手県釜石市鶴住居 2011年6月



宮城県南三陸町志津川 2011年7月

写真-3. 津波被災直後の津波浸漬後背地スギ林の様子

れる。針葉が変色したスギは、当年針葉が伸長していない個体が大勢を占めていたが、一部には当年針葉が伸長し、それらが赤褐変化した個体も認められた(小野・平井, 2013)。以下では、津波浸漬が海岸後背地スギ林の土壌にもたらした影響について記述する。

3.1 津波浸漬によるスギ林土壌への物理的影響

大槌湾に面した岩手県釜石市鶴住居における津波浸水後背地スギ林では、津波浸漬箇所と未浸漬箇所が同一斜面上に存在した。同じく、宮城県南三陸町志津川における津波浸水後背地スギ林にも津波浸漬箇所と未浸漬箇所が同一斜面上に存在した。両林分の斜面方向にライントランセクトを設定し、2m毎に土壌表層の断面観察を行い、津波到達の有無によるスギ針葉の赤褐化の状況、林床や土壌の状態の違いを比較・検討した。調査地の土壌型は、ともに適潤性褐色森林土(B_D)(土じょう部, 1976)であった。表層地質は、釜石市鶴住居で固結堆積物および古生界の泥岩であり(経済企画庁総合開発局, 1975)、南三陸町志津川で沖積堆積物であった(経済企画庁総合開発局, 1972)。調査林分における林内への津波到達の有無は林床の状態から目視で容易に判断できた(写真-3)。林内の津波到達箇所では林床の下層植生やA₀層の剥離、表層土壌洗掘による樹木細根の表出、海砂堆積層の形成、表層土壌への海砂混入が認められた。津波浸漬箇所ではスギ針葉の赤褐色変化が認められた(写真-3)。

3.2 津波浸漬によるスギ林土壌への化学的影響

津波が到達したスギ林土壌の化学性は、津波到達、海水浸水の影響が強く認められた。津波浸漬により土壌pH(H₂O)、EC、水溶性および交換性Na⁺濃度の上昇が認められた。具体的には、表層土壌のpH(H₂O)の平均値は津波未浸漬箇所では4.8であったが、津波浸漬箇所では5.5で、pH(H₂O)の上昇が認められた(図-4)。ECの平均値は津波未浸漬箇所では0.10 dS m⁻¹であったのに対し、津波浸漬箇所では0.35 dS m⁻¹と高い値を示した(図-4)。

水抽出による水溶性Na⁺濃度およびpeeck法による交換性Na⁺濃度(平均値)は、津波浸漬箇所それぞれ40.1 mg L⁻¹および3.7 cmol_c kg⁻¹乾土で、津波未浸漬箇所(それぞれ7.7 mg L⁻¹, 0.4 cmol_c kg⁻¹乾土)と比べ、著しく高い値であった(図-4)。逆に水溶性および交換性Ca²⁺濃度(平均値)は、津波浸漬によって、それぞれ3.8 mg L⁻¹, 6.9 cmol_c kg⁻¹乾土から0.4 mg L⁻¹, 3.8 cmol_c kg⁻¹乾土へと減少傾向を示した(図-4)が、これは津波が到達し、海水が地表面から地中へ浸透したことで土壌中に多量に供給された遊離Na⁺により、土壌中のCa²⁺が交換され、土壌から洗脱したことに起因したと考えられる。一方、表層土壌のCECや、交換性Mg²⁺、K⁺各濃度は地点間で変動が認められたものの、津波到達の有無による大きな差は認められなかった。以上より、塩基飽和度を計算すると津波未浸漬箇所の表層土壌では18~23%を示し、その7割程度は交換性Ca²⁺に起因するものであった。

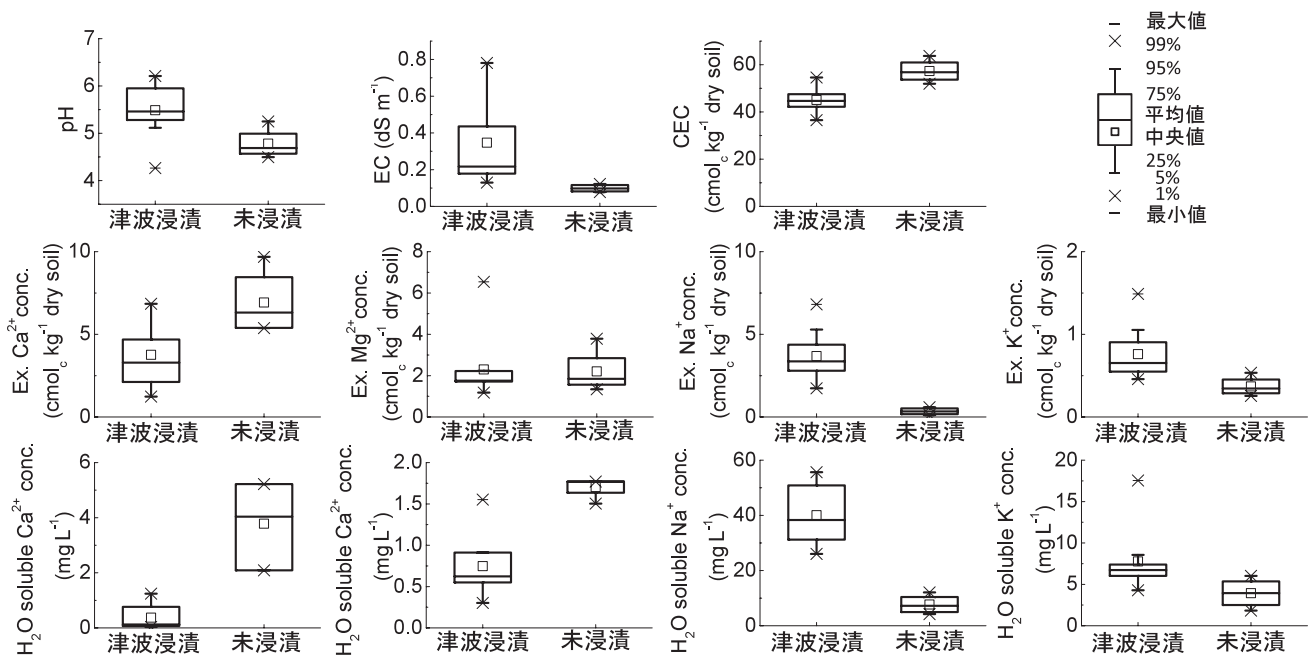


図-4. 津波被災スギ林の土壌化学性

一方で、津波浸漬箇所の塩基飽和度は11~38%であったが、これは交換性Ca²⁺に加え、津波浸漬により増加した交換性Na⁺に起因したものである(ともに2~4割の寄与率)。いずれも津波浸漬箇所の土壌は海水浸水による海水の影響を強く受けたことを示すものである。こうした傾向は仙台南東部における津波被災農地の表層土壌に対する調査報告と概ね一致していた(南條, 2011)。日本の森林土壌では、交換性塩基の含量は一般にCa²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ > Na⁺の順であるといわれている(河田, 1989)が、津波浸水による過剰な海水由来Na⁺の付加が土壌中の塩基バランスを崩したと考えられた。

3.3 スギ針葉の赤褐化の原因

土壌懸濁液のECはその測定が容易であること、溶液中の溶存イオンの総濃度に比例すること、作物の吸水に直接的に影響する浸透圧と比例すること、などから農地土壌を対象として塩害が起こりうる限界指標によく用いられている(米田, 1958a, b, c; 熊本県農政部, 1999; 岩手県農業研究センター震災復旧・復興支援プロジェクトチーム・県北農業研究所(軽米町), 2011; 中田, 2011; JA全農, 2011)。その限界指標値は、県や地域によって異なる。耐塩性が低いイネの作付け圃場である水田に関する除塩基準は、土壌懸濁液のEC値で、宮城県では0.3 dS m⁻¹(宮城県仙台農業改良普及センター, 2011)、岩手県で0.6 dS m⁻¹(岩手県農業研究センター震災復旧・復興支援プロジェクトチーム・県北農業研究所(軽米町), 2011)、千葉県で0.5 dS m⁻¹(中田, 2011)、0.3~0.6 dS m⁻¹(JA全農, 2011)、熊本県で0.7 dS m⁻¹(熊本県農政部, 1999)、香川県で0.9 dS m⁻¹(香川県農業経営課, 2004)などとされている。こうした基準の違いは土壌懸濁液中のEC値と塩濃度の関係が土壌特性によって異なることに起因している。本研究における岩手県釜石市のスギ林では、津波浸漬

箇所の土壌のECは未浸漬箇所に比べ、高かったものの、最大でも斜面最下部の表層土壌において0.3 dS m⁻¹であり(図-4)、農地土壌の指標では除塩対象基準に満たない値であった。樹木の耐塩性の面から考慮すると、スギは土壌中の過剰な塩類に対して極めて弱いとされている(本間, 1976)ことから、農地土壌の基準では塩分濃度としては作物の生育上問題の無いレベルでも、三陸沿岸の津波が到達したスギ林では針葉の変色という形で塩害が顕在化したものと考えられる。

一般に、森林土壌ではCa²⁺とMg²⁺が交換性塩基の中で最も主要な塩基である(河田, 1989)。そのため、森林土壌の交換性塩基の状態は、Ca²⁺とMg²⁺の飽和度で指標する場合は多い(河田, 1989)。日本の森林土壌におけるCa²⁺飽和度はtr.~60%, Mg²⁺飽和度はtr.~20%程度である(河田・小島, 1976)。岩手県釜石市スギ林におけるCa²⁺とMg²⁺飽和度は津波到達の有無に関わらずこの範囲にあった(図-4)。一方、森林土壌中では一般に低含量である交換性Na⁺濃度は、津波到達、海水浸水に伴う土壌へのNa⁺付加により5~60倍強に上昇した(図-4)。この結果は土壌水の塩濃度に直接的に関係する水溶性Na⁺濃度にも現れており、津波到達箇所の水溶性Na⁺濃度は津波未到達箇所の4~60倍強の値を示していた(図-4)。本研究は、津波到達、海水浸水により付加されたNa⁺が土壌水へ過剰に溶解したために、樹木体内への過剰な塩分吸収・集積、拮抗作用による養分吸収阻害、植物内外の浸透圧差減少による水ポテンシャルの低下などを誘引し(米田, 1958a, b, c; 農林水産省農村振興局, 2011)、結果としてそこに生育するスギの針葉を赤褐色化させた可能性を示唆した。

4. 時間経過に伴う土壤塩害の状況とその対策

大津波に伴う津波浸漬により発生した土壤の塩害に対して、津波被災農地では、排水経路の確保、土壤改良材の施用、耕起・碎土、弾丸暗渠の施工、湛水・排水の繰り返しによる塩分の洗い流しなど、土壤の理化学的な環境改善に向けた除塩作業の実施が可能である（農林水産省農村振興局，2011）。しかしながら、森林の多くは機材、資材の設置が容易でない急



写真-4. 津波浸漬1年3ヶ月後のスギ林の外観(岩手県釜石市)

傾斜地にあたり、灌漑、排水設備が完備されていない海岸部にあたりするため、津波被災林では農地同様の除塩事業を実施することは困難である。一方で、温暖多雨な日本においては、梅雨や台風などによる多量の降雨があるので、こうした降雨降雪による除塩効果が期待される。以下では、津波浸漬を受けた森林土壤における自然降雨による除塩の効果について解説する。

4.1 海岸後背地スギ林の状況

2011年6月にスギの針葉変色が確認された釜石市鶴住居の調査林分では、その後の2011年10月、12年6月の追跡調査によって、当該林分の多くの地点において赤褐変化した針葉を有する枝の割合が減少し、緑葉を有する枝の割合が増加しており、被災直後に針葉変色したスギ個体の一部は枯死にまで至らずに新たに緑葉を伸長させて生残したことが確認された(小野・平井, 2013)。一方、斜面最下部では変色した枝葉が脱落し、新たな緑葉を着葉せず枯死に至ったスギ個体が確認されたが(写真-4)、これは、斜面上中部に比べて斜面下部では海水浸漬直後(2011年6月)における土壤へのより高濃度の塩類集積に起因したものである(小野・平井, 2012)。

当該スギ林の表層土壤の化学性に関して、一部の項目では、2011年6月の時点で海水浸漬の影響が強く認められていたが、時間の経過とともにその影響は徐々に低下していた(図-4, 5)。すなわち、2011年6月においては、津波到達箇所採取した土壤のpH(H₂O)やEC、交換性Na⁺濃度は、津波未到達箇所の土壤に比べて大きい値であった(図-4)が、2011年10月以降の調査では津波未到達箇所のレベルには回復していない項目もあったものの、概ね低下傾向を示した(図-5)。土壤のpH(H₂O)、ECの低下は、強塩基性を呈する、かつ土壤水に対して高い溶解性を有する海塩由来のNa⁺が土壤から徐々に溶脱、除塩されたことに起因したものであると考えられよう。土壤に集積したNa⁺が時間の経過とともに徐々に土壤から溶脱、除塩されたことから、土壤中の塩基バランスが改善され、海水浸漬前の状態に近づいていることも確認された(図-4, 5)。これらの結果は、津波被災農地の塩類土壤の

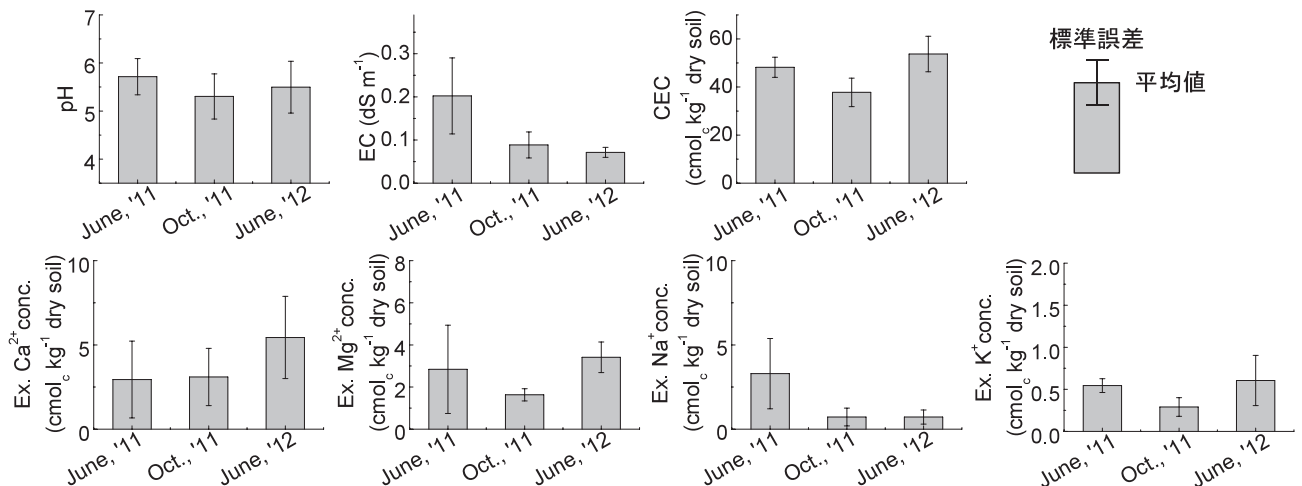


図-5. 津波浸漬後1年3ヶ月間におけるスギ林土壤の化学性の経時変化

中でも比較的排水環境が良好な土壌と、概ね同様な傾向である(宮城県農業・園芸総合研究所, 2012)。一方、排水環境の悪い粘土質の埴土においては、砂土に比べて塩素やナトリウムが土壌中に残存しやすい(宮城県農業・園芸総合研究所, 2012)ことから、自然の降雨による除塩を効果的に行うためにはその排水環境に留意する必要がある。

4.2 海岸マツ林の状況とその対策

津波浸漬から7ヶ月が経過した2011年10月の時点でも、前縁部に位置するマツ林の土壌上層(堆砂層および2A層)に津波浸漬による影響が色濃く残存していたことは既述の通りである。前縁部に位置するマツ林では、復旧工事の進展とともに多くの被災木が伐採、整理されたため、土壌環境の経過を追跡するには多くの困難があり、海岸マツ林における土壌塩害の改善経過の把握は十分とは言えない状況である。現在、残された幾つかの調査地を対象に、検討を進めている。解析中のため本稿において具体的なデータは示すことはできないが、継続調査による海岸マツ林土壌の分析において堆砂層の土壌pH(H₂O)やECの低下は認められている(小野, 未公表データ)。

被災土壌の除塩を効率的に進めるためには、大量の真水を導入して、土壌に集積した塩類を大量の水とともに土壌系外に排出することが基本であり、その実施には排水経路の確保が必要不可欠である(千葉ら, 2012)。とはいえ、多くの日本の森林には、灌漑や排水にかかる設備が完備されておらず、海岸林の除塩には自然の降雨に頼らざるを得ない。一般に海岸マツ林は未熟土の上に成立し、養分の保持能力が低い砂土で構成されており、土壌の保水性が低いことから、排水経路

が確保されていれば効果的な除塩を期待できる。しかし、今回の東日本大震災では東北地方太平洋沿岸の各地で地盤沈下したこと(国土交通省東北地方整備局, 2011a, b)から、海岸林の再生にあたってはその排水環境に留意する必要がある。地盤高が低い海岸林では、地下水位が高い傾向にあるとの報告もある(野口・久保田, 2012)。海岸林を再生するために津波被災木の伐採、整理の後に新たにクロマツが植栽された試験地(青森県三沢市)において、2013年9月15日から16日にかけて通過した台風18号により2日間で140mm余りの降雨がもたらされたが、その際には植栽木根圏に達するまでの地下水位上昇が確認された(写真-5)。上昇した地下水位は数日後には低下した。地下水位が高いと排水が効率良く行われず、土壌深部に海水由来の塩分が残留し、それが再び表層に上昇することがあるので、海岸マツ林の再生にあたっては排水環境の改善を図るなど留意が必要である。

5. おわりに

東日本大震災は膨大なエネルギーを有した津波を引き起こし、海岸前線のマツ林の多くは壊滅的な被害を受け、直後に速やかに枯死した(坂本, 2011, 2012)。立木として残存したマツ、あるいはスギなどの樹木でもその後に塩害による針葉の変色、樹勢衰弱や萎凋が発生した(中村, 2011; 小野・平井, 2012; 小野ら, 2013)。このことは、海岸の未熟な土壌においても大変良く活着、成長することから日本の海岸林の主要な構成樹種となっているクロマツであったとしても、津波を受ければある程度の枯死などの被害が発生することは避けられないことを意味する。アカマツは海水への浸漬に弱



内陸側の調査地点2箇所



海側の調査地点2箇所

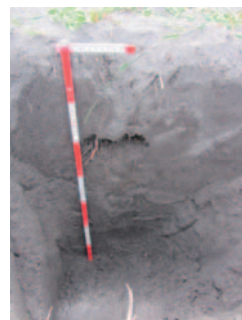


写真-5. 津波被災海岸林植栽試験地における地下水環境の様子(2013年9月青森県三沢市)

く(中村ら, 2012), スギは耐塩性の点で極めて脆弱であるとされる(本間, 1976)。現在, 海岸林の復旧や再生が進められている造成地の多くは津波浸漬後の砂丘砂地である。こうした場所における海岸林の復興の歩みを確実に進める上では, 海岸林がどのような立地環境にあるかを十分に理解し, 津波被災後の土壌の物理的特性や化学的特性, あるいは地形に応じた植栽樹種の選定や土壌環境の改善事業など, 適切な対策を講ずることが重要である。

早期の海岸林復旧のためには, 砂質土壌で造成方法が既に確立されているクロマツをまず植栽して土壌生成を促した後, その他の樹種を植栽することが望ましい。また多くの海岸マツ林では, 地盤沈下に伴う排水悪化による土壌水分環境への影響が認められている。こうした被災海岸林においても, 今後再生に向けた植栽がさらに活発になると思われるが, まず土壌内の残留塩分の除去, 土壌養分や土壌水分に関わる理化学的環境の改善など樹木の生育基盤の整備を行って新規植栽木への影響を排除した後, 海岸林を再生することが重要である。そのためには試験的な植栽を行い, 活着への影響を検討することも必要であろう。

以上に解説した結果は, 津波浸漬がもたらした土壌環境や理化学性の変化によって植栽木の活着や成長が大きく影響される可能性を示している。これまで明らかになった津波浸漬土壌の化学性データは今後の海岸林の再生に向けて重要な指標となる。海岸林の再生に際し, 植栽樹種の選定や土壌改良の方針検討など様々な視点から, 今後も各種土壌特性の改善状況について継続して調査, 検討していくことが重要であると考えている。

謝 辞

本研究の遂行にあたり, 岩手県林業技術センター 成松眞樹氏, 蓬田英俊氏には調査地の設定や森林所有者の確認などにおいて, 独立行政法人森林総合研究所東北支所 澤井恵子氏には本研究における試料調製, 実験補助などにおいて, 多大なるご協力を頂いた。また, 本報告をまとめるにあたっては, 独立行政法人森林総合研究所 元東北支所長 山本幸一博士, 研究管理室長 中北理博士, 国際連携推進拠点長 新山馨博士, 水土保全領域チーム長 野口正二博士, 東北支所主任研究員 安田幸生博士に懇切なご助言, ご指導を頂いた。本研究の実施にあたり, 宮城北部森林管理署には試験地, 調査地の提供等でご協力頂いた。これらの方々には深く感謝の意を表す。本研究は, 森林総合研究所運営費交付金「多雪・寒冷地域における森林の健全性維持管理技術の高度化」の一部, 農林水産省平成23年度新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業緊急対応研究課題「津波で被災した海岸林の赤枯れ現象の実態把握と原因解明」, 森林総合研究所運営費交付金「東日本大震災で被災した海岸林の復興技術の開発」によって行われたものである。

このたびの地震津波で被災された方々に, 心からお見舞い申し上げます。

引用文献

- 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新透水除塩. 土壌の物理性121: 29-34.
- 土しょう部(1976)林野土壌の分類(1975). 林試研報280: 1-28.
- 東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会(2011)今後における海岸防災林の再生について. 中間報告. 19 pp.
- 東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会(2012)今後における海岸防災林の再生について. 22 pp.
- 本間啓(1976)特殊環境地の植物, 遺伝1976年2月号: 41-46.
- 岩手県農業研究センター震災復旧・復興支援プロジェクトチーム・県北農業研究所(軽米町)(2011)岩手県における農地の津波被害の実態と対策. 2011年度日本土壌肥科学会東北支部会岩手大会講演要旨集17.
- JA全農(2011)東北地方太平洋沖地震対策:津波による塩害対策と水田の土壌管理について. http://www.zennoh.or.jp/press/topic/PDF/20110329_1.pdf#search=塩害.
- 香川県農業経営課(2004)農地への海水流入が農作物に及ぼす影響とその対策. 香川県, 1-14.
- 河北新報社(2011)河北新報新聞朝刊記事. 2011年6月7日
- 河田弘(1989)森林土壌学概論. 博友社399 pp.
- 河田弘・小島俊郎(1976)生態学研究法講座30:環境測定法IV. 一森林土壌一. 共立出版株式会社166 pp.
- 経済企画庁総合開発局(1970)国土調査(青森県).
- 経済企画庁総合開発局(1972)国土調査(宮城県).
- 経済企画庁総合開発局(1975)国土調査(岩手県).
- 国土交通省東北地方整備局(2011a)宮城県沿岸部における地震に伴う地盤沈下について. http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/kisya/saigai/images/35353_1.pdf.
- 国土交通省東北地方整備局(2011b)岩手県沿岸部における地震に伴う地盤沈下について. <http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00037/k00290/riverhp/kasen/110622-1.pdf>.
- 熊本県農政部(1999)平成11年9月24日の台風18号による農作物等被害状況及び対策. http://www.saffrc.go.jp/docs/pdf/engai_sakumotu_higai_kumamoto_pref.pdf.
- 松井義人・一国雅巳(1970)メイスン一般地球科学. 岩波書店402 pp.
- 宮城県農業・園芸総合研究所(2012)農業早期復興プロジェクト海水流入のうちの把握と早期改善. 園芸土壌調査 畑作地における塩類濃度の推移の調査. http://www.pref.miyagi.jp/res_center/revival/revival1/revival1_2_1.html.
- 宮城県仙台農業改良普及センター(2011)仙台普及センターだよりBLSSOM号外 震災対策臨時号. 4 pp.
- 村井宏・石川政幸・遠藤治郎・只木良也(1992)日本の海岸林一多角的な環境機能とその活用. 株式会社ソフトサイエンス社513 pp.
- 中村克典(2011)東日本太平洋沖地震津波による被災マツ林で必要とされるマツ材線虫病対策. 森林技術835: 18-22.
- 中村克典・小谷英司・小野賢二(2012)津波被害を受けた海岸林における樹木の衰弱・枯死. 森林科学66: 7-12.
- 中田均(2011)海水の浸水被害を受けた水田土壌の塩類滞留実態と水洗浄による除塩対策のモデル的解析. 富山県農業総合研究センター研究報告2: 27-37.
- 南條正巳(2011)津波をかぶった土の概況. <http://www.agri.tohoku.ac.jp/agri-revival/ocu6bi0000000io-att/a1305266067652.pdf>.
- 野口正二・久保田多余子(2012)7. 海岸林再生のための水文環境調査(海岸林の再生に向けて, 独立行政法人森林総合研究所東北支所編, 17 pp, 森林総合研究所東北支所, 岩手). 12-13.
- 農林水産技術会議事務局(1987)環境変化に対応した海岸林の環境保全機能の維持強化技術の確立に関する研究. 研究成果185: 農林水産省農林水産技術会議事務局144 pp.
- 農林水産省農村振興局(2011)農地の除塩マニュアル. 農林水産省 <http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/saigai/pdf/110414-01.pdf>.

- 小野賢二・平井敬三(2012) 東日本太平洋沖地震大津波が三陸沿岸地域におけるスギ林針葉の赤褐変化に及ぼした影響. 森総研報11: 33-42.
- 小野賢二・平井敬三(2013) 東北地方太平洋沖地震による大津波を受けた三陸沿岸のスギ林土壌における塩害とその後の土壌環境の変化. 一降雨に伴う自然排水がもたらす除塩の効果一. 森総研報12: 41-47.
- 小野賢二・中村克典・田中永晴・古澤仁美・平井敬三(2013) 東北地方太平洋沖地震による大津波の襲来を受けた東北太平洋沿岸の海岸マツ林の土壌環境. 一津波浸漬7ヶ月後の現地調査から一. 森総研報12: 49-66.
- 林野庁(2013) 平成25年版 森林・林業白書. 林野庁226 pp.
- 坂本知己(2011) 現地調査報告. 海岸林被害の視点から. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/pdf/siryoku4.pdf>.
- 坂本知己(2012) 津波によって被災した海岸林の再生にむけて. 水利科学56: 39-61.
- 田中永晴・森田佳行・古澤仁美・小林繁男(1992a) 東海村海岸林砂丘未熟土の細区分(I). クロマツの生育と土壌断面形態, 微地形, 汀線からの距離の関係. 日林論103: 265-266.
- 田中永晴・古澤仁美・森田佳行・小林繁男(1992b) 東海村海岸林砂丘未熟土の細区分(II). 一般化学性および塩基状態. 日林論103: 267-270.
- 米田茂男(1958a) 塩害と土壌 [1]. 農業及園芸33: 1028-2032.
- 米田茂男(1958b) 塩害と土壌 [2]. 農業及園芸33: 1077-1080.
- 米田茂男(1958c) 塩害と土壌 [3]. 農業及園芸33: 1338-1342.