

論文 (Original article)

東北地方太平洋沖地震による大津波の襲来を受けた 東北太平洋沿岸の海岸マツ林の土壌環境 — 津波浸漬 7 ヶ月後の現地調査から —

小野賢二^{1)*}、中村克典¹⁾、田中永晴²⁾、古澤仁美²⁾、平井敬三²⁾

Soil conditions in coastal pine forests damaged by the Heisei-Sanriku Mega-tsunami following Tohoku Earthquake along the eastern Pacific coast of Japan 2011

Kenji ONO^{1)*}, Katsunori NAKAMURA¹⁾, Nagaharu TANAKA²⁾,
Hitomi FURUSAWA²⁾, Keizo HIRAI²⁾

Abstract

We analyzed the seawater-inundated forest soils that are typically dominated by Japanese black and red pine along the eastern Pacific coastline of Japan to evaluate the influence of seawater inundation from the 2011 Heisei-Sanriku Mega-tsunami on coastal forest soils. Seawater inundation from the tsunami brought the following distinctive changes to the morphology of coastal forest soils: 1) complete washout of the litter layer and understory vegetation from forest floors, 2) deposited sea sand on forest floors, and 3) buried A (2A) horizons under sea sand deposits. Also, seawater inundation caused extreme incremental changes to the soil pH(H₂O) in 2A horizons with a large amount of humic substrates. Original values of the soil pH(H₂O) in surface A horizons are primarily acidic because of an abundance of humified organic acids in soil. Thus, soil pH(H₂O) in upper layers is generally acidic and that in lower layers is neutral or basic. Seawater inundation and the sea sand deposits on coastal forest soils carried a large influx of strong base cations, which neutralized organic acids in the humus-rich A horizons and eventually caused an increase in the soil pH(H₂O). Before the Mega-tsunami, surface A horizons contained rhizospheres, which are areas of active symbiosis between mycorrhiza and roots. Therefore, the incremental changes of soil pH(H₂O) in the 2A horizons caused by the tsunami may strongly affect the microenvironments of the rhizospheres and in turn cause severe damages, including needle discoloration, debilitation, droop, and finally death, to broad areas of pine forests along the eastern Pacific coastline. Other measures of soil chemistry (e.g., electric conductivity, exchangeable cation content) were little changed after seawater inundation because coastal forest soils are classified as sand-rich immature soils. In conclusion, reforestation efforts in seawater-inundated forest along the Pacific coastal areas affected by the tsunami will require continued soil chemistry monitoring and rehabilitation.

Key words : Reforestation, coastal pine forest, the Heisei-Sanriku Mega-tsunami, seawater inundation, soil pH(H₂O), rhizosphere

要旨

2011 年 3 月の平成三陸大津波が海岸林土壌に与えた影響を検討するため東北沿岸の津波被災マツ林を対象に土壌調査を行った。津波は①リター層と林床植生の流失、②海砂による堆砂層の形成、③堆砂層下への A 層の埋没等、海岸林土壌に形態的变化をもたらした。海岸林土壌は一般に腐植と養分に乏しい砂質な未熟土が多いことから、津波によって断面形態は変化していなかったと推察される。土壌化学性については、埋没 A 層 (2A 層) での pH (H₂O) 上昇が顕著に認められた。電気伝導度や塩基交換容量、交換性塩基含量には明瞭な影響を認めなかった。これは海岸林土壌が砂質であることによる。一般に海岸林土壌の pH (H₂O) は腐植が多量に混入する土壌表層で低く、下層で高い。pH≥8 の海水浸漬や海水・海塩を含む海砂堆積が海岸林土壌に大量の強い塩基類をもたらした、リター分解に伴って生成される土壌中の有機酸を中和したため、土壌 pH (H₂O) は上昇したと考えられる。津波被害前に表層土壌であった 2A 層にはマツや林床植生の根系が発達し養分吸収を助ける根圏微生物の活動層が認められた。2A 層の pH (H₂O) 上昇はマツの根やそれと共生関係にある菌根菌等の微生物相に著しく影響し、海岸マツ林に針葉変色や衰弱、萎凋、枯損等被害をもたらしたと考えられた。海岸林再生のため植栽する苗木への津波浸漬の影響を抑えるには、土壌環境や理化学性を把握した上で生物活性の高い A 層の化学性改善を図る必要がある。

キーワード : 海岸林再生、マツ林、東日本大震災、土壌 pH、海水浸漬、根圏土壌

原稿受付：平成 24 年 10 月 29 日 Received 29 October 2012 原稿受理：平成 25 年 1 月 22 日 Accepted 22 January 2013

1) 森林総合研究所東北支所 Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 森林総合研究所立地環境研究領域 Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* 森林総合研究所東北支所 〒020-0123 岩手県盛岡市下厨川鍋屋敷 92-25 Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 92-25 Nabeyashiki, Shimo-Kuriyagawa, Morioka, Iwate 020-0123, Japan.

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に宮城県太平洋沖を震源として発生した東北地方太平洋沖地震では、大規模な津波が東北地方の太平洋沿岸に襲来し、未曾有の大災害を引き起こした。海岸前線部に生育していたクロマツやアカマツ（両種を区別しない場合、あわせてマツとする）やその後背地に分布していたスギなどから成る海岸林の多くは、倒伏、根返り、傾斜や折損など直接的な被害を受けた（坂本 2011, 2012, 中村ら 2012, 星野 2012）。この津波による青森、岩手、宮城、福島、茨城、千葉の6県の海岸林の浸水被害は、約3,660haにも及んだ（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）。

一方で、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が震災直後から2011年6月頃まで沿岸の各地に存在した（中村ら 2012）。しかし、こうした海岸林でも、時間経過に伴って針葉の変色・萎凋、樹勢衰退、さらには枯死が見られるようになった（河北新報社 2011, 中村ら 2012）。これらの海岸林では土壌が津波襲来の際には海水によって冠水し、さらにその地表面には大量の海砂が堆積していた（中村 2011, 中村ら 2012）。したがって、大津波がもたらした塩分が針葉変色・萎凋、樹勢衰退・枯死などの現象を引き起こした可能性がある。

高潮や潮風害などによって農地に生じる土壌塩害については、古くから多くの研究がなされてきた（米田 1958a, b, c, 間藤 1989, 1997）。土壌への海水浸水やその地表面への海砂の堆積は、そこに生育する樹体内への過剰な塩分吸収・集積、塩分の拮抗作用による養分吸収阻害、植物内外の浸透圧差減少による吸水能の低下（米田 1958a, b, c, 農林水産省農村振興局 2011）を引き起こすとされる。津波被災林においてもこれらの要因は樹木の萎凋や生育不良、枯死の原因となる。また津波浸水地を対象として造林をする際には苗木の活着や生育不良の原因となる。したがって、海岸林の再生に向け、津波被災後の土壌環境を把握することが必要である。

本論では、東北沿岸地域の海岸林で土壌調査した結果を解析し、津波被災7ヶ月後の海岸林土壌の実態を明らかにする。津波浸水後背地に位置するスギ林に関しては、すでに報告済みである（小野・平井 2012）。本論では海岸前線部に位置し、主要な海岸林であるマツ林に焦点を絞って議論する。津波の被害を受けていない林分の土壌化学性については、これまでの研究成果（農林水産技術会議事務局 1987, 田中ら 1992a, b）を参考に、津波侵入・海水浸水の有無による違いを比較、検討する際のリファレンスデータとした。一部の未測定項目については今回、保存土壌試料を利用して新たに分析を行った。

2. 調査地および方法

1) 調査地の概要および現地調査項目

津波を受けた海岸マツ林における土壌の状況を把握するため、青森県八戸市市川（北緯40°35.0′、東経141°28.2′）、宮城県東松島市浜市（北緯38°23.0′、東経141°11.0′）、同亘理町吉田浜（北緯37°59.9′、東経140°54.8′）の海岸前線部とその後背地、または後背地の前縁とその背後に調査地を設定した（図1）。いずれの試験地も、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）である。また、試験地すべてにおいて、東日本大震災では津波が浸入し、海水によって浸漬された。被災7ヶ月後の2011年10月に、各試験地で樹木の衰弱程度や津波到達の有無、土壌表層の土性、土色、下層植生、A₀層の有無、堆砂を調査した。さらに、各試験地のそれぞれ3箇所ですり土壌断面調査と層位ごとに土壌試料の採取を行い、化学性の分析に供した。

2) 土壌の化学性の分析

土壌化学性の分析は国有林林野土壌調査方法書（林野庁・林業試験場 1955）に準じて行った。採取した土壌試料は風乾し、風乾試料を2 mm メッシュの円孔篩を用いて篩別した後、分析に供した。分析項目は、pH (H₂O)、電気伝導度 (Electrical Conductivity, 以下、「EC」という)、交換性塩基含量、塩基交換容量 (Cation Exchangable Capacity, 以下、「CEC」という)、塩基飽和度である。土壌のpH(H₂O)は、乾土10 gに対して水25 mlの割合で脱イオン水に懸濁し、ガラス電極法により測定した。土壌懸濁液のECは1:5水浸出法に準じて測定した。CECと交換性塩基含量はpeeche法により抽出し、それぞれ比色法（インドフェノール青法）および原子吸光法（株式会社日立ハイテクノロジー Z-5310）で分析した。

3) リファレンスデータ

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、海岸林の土壌断面形態および化学性についての調査結果が報告されている（農林水産技術会議事務局 1987, 田中ら 1992a, b）。本研究では、調査報告書および当時の野帳、分析ノートから必要な分析値を記述し、1987年および1992年当時に未分析であった項目については、森林総合研究所立地環境研究領域に保存されている土壌試料を分析して求めた。この研究課題で対象とされた茨城県東海村村松（北緯36°26.9′、東経140°36.3′）および同北茨城市大津港

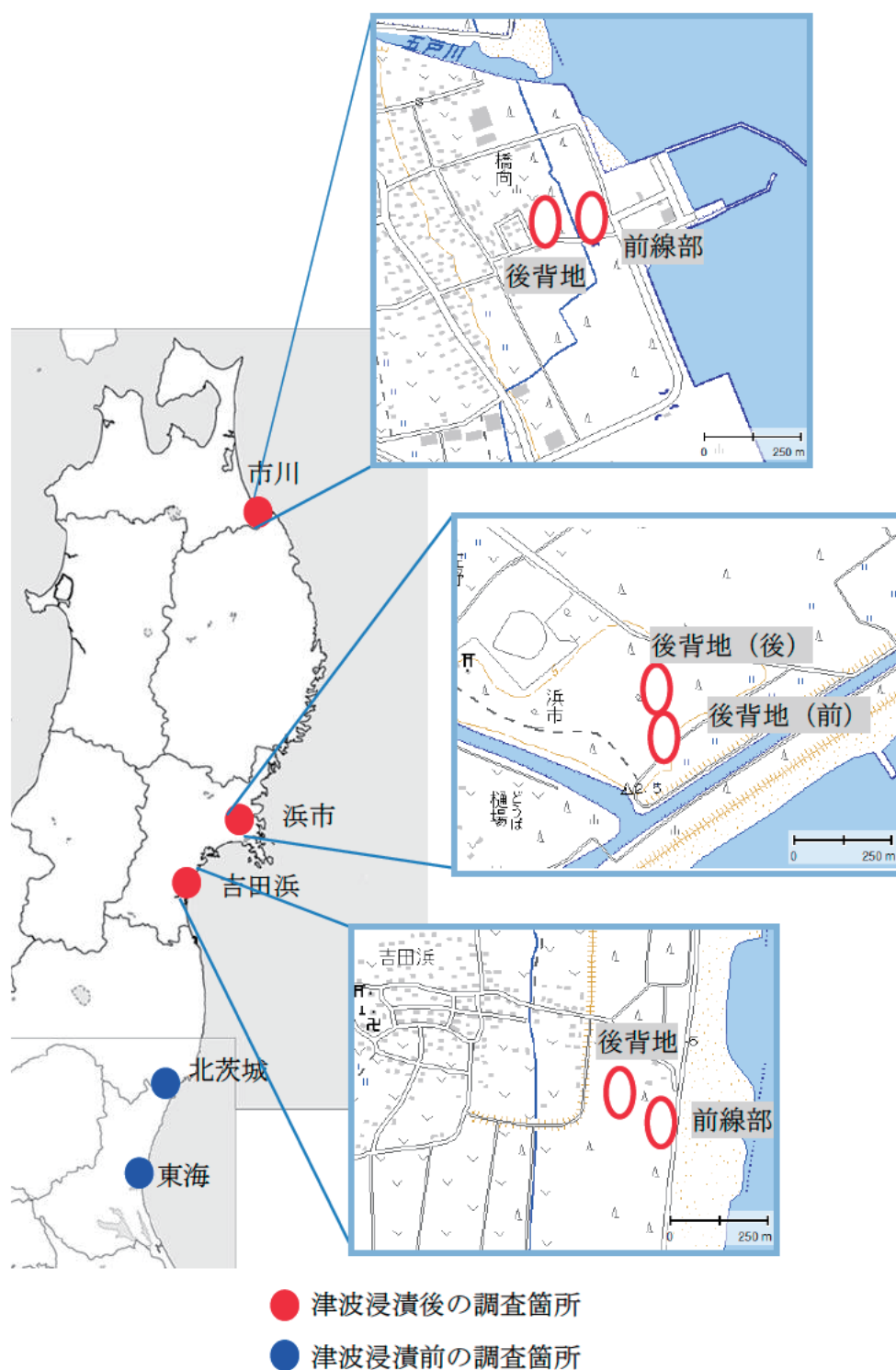


図 1. 本研究における調査地位置と各試験地の概略図
Figure 1. Studying sites in the present study.

南（北緯 $36^{\circ}48.6'$ 、東経 $140^{\circ}45.9'$ ）の海岸林土壌のデータをリファレンスデータとして利用した。

3. 結果

1) 津波被災後のマツ海岸林土壌の断面形態

前線部、後背地に関わらず、今回調査の全試験地で、津波が浸入し、海水浸漬の被害を受けた。試験地内には津波による倒伏、根返り、折損を免れたマツが残存していたが、被災7ヶ月後の2011年10月時点では、その多くで針葉が褐色化しており、樹木の萎凋・衰弱

が認められた（Photo 1）。場所によってはほぼ全個体が枯死した試験地もあった（Table 1）。これらの試験地の林床には、津波によって運ばれた海砂が堆積していた（Table 1, Photo 2）。宮城県亘理町吉田浜および青森県八戸市市川では、前線部、後背地問わず30 cm以上の非常に厚い堆砂が認められた（Photo 2）。津波発生から7ヶ月余りが経過していたこともあり、林床には海岸性植物の侵入が認められ、下層植生が回復していた（Table 1, Photo 3）。さらに針葉の赤褐化の後、枯死して脱落したマツ落葉などの堆積により0～

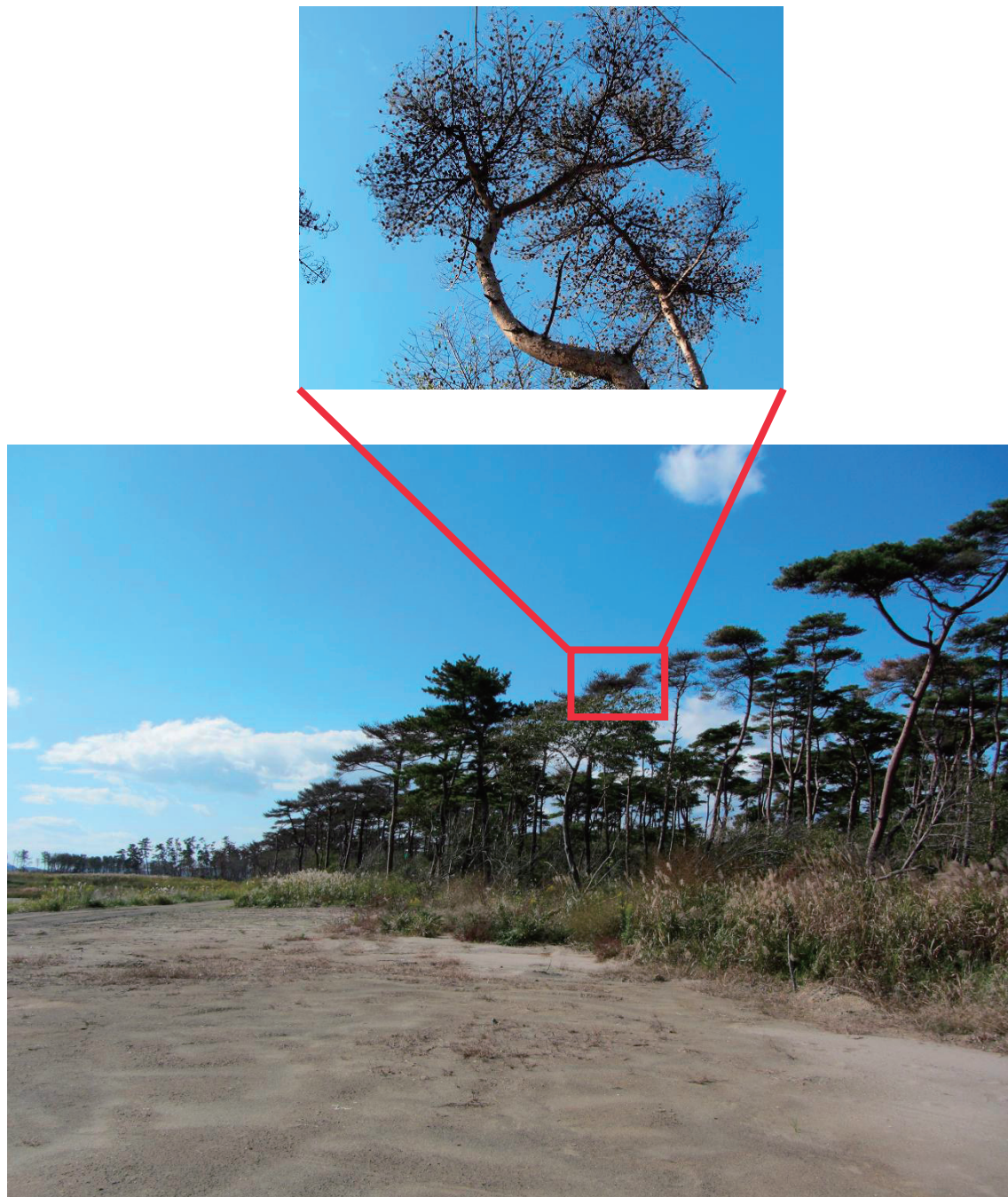


写真1. 津波浸漬を受けた海岸マツ林（宮城県東松島市浜市2011年10月撮影）

各地で、針葉の変色、樹勢の衰弱、多数の結実などが確認された。

Photo 1. Coastal pine forests affected by the Heisei-Sanriku Mega-tsunami following Tohoku Earthquake along the eastern Pacific coast of Japan 2011.

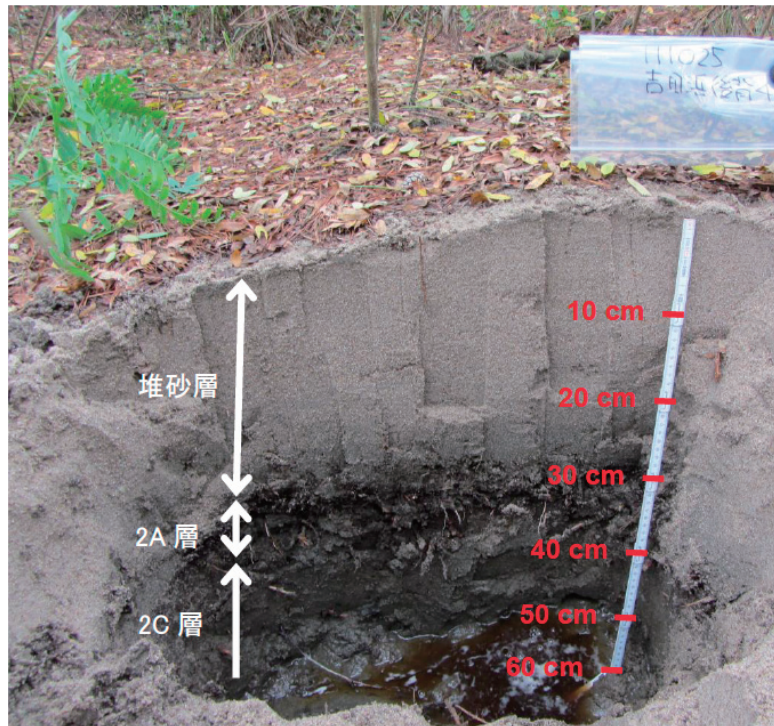


写真2. 津波浸漬を受けた海岸マツ林の土壌（宮城県亶理町吉田浜 2011年10月撮影）
Photo 2. Soil profiles of the coastal pine forests affected by the Heisei-Sanriku Mega-tsunami following Tohoku Earthquake along the eastern Pacific coast of Japan 2011



写真3. 津波浸漬を受けた海岸マツ林林床の様子（宮城県亶理町吉田浜 2011年10月撮影）リターが堆積し、下層植生の回復が始まっていた。

Photo 3. Forest floor of the coastal pine forests affected by the Heisei-Sanriku Mega-tsunami following Tohoku Earthquake along the eastern Pacific coast of Japan 2011.

3 cm 厚程度の A₀ 層 (L 層) の形成が認められた (Table 1, Photos 2, 3)。土壌断面調査を行ったところ、いずれの試験地でも堆砂層の下には 3 ~ 9cm 厚の赤黒色 (2.5YR2/1) ~ 赤褐灰色 (2.5YR3/1) ~ 極暗赤褐色 (2.5YR2/2 ~ 3) の埋没 A 層 (2A 層) が認められた。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 (Photo 2)。2A 層の下には、すぐに砂質の 2C 層が存在した。宮城県亘理町吉田浜の試験地では 65 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の根系が水没していた (Photo 2)。

2) 津波被災マツ林土壌の化学性

土壌化学性は各試験地の前線部、後背地による違いは認められなかった (Table 1)。未風乾新鮮土壌の pH (H₂O) は表層の堆砂層で 7.0 ~ 9.6 と、中性 ~ アルカリ性を示した。2A 層の pH (H₂O) は 6.6 ~ 7.7、その下の 2C 層は 6.9 ~ 8.1 と、中性 ~ 弱アルカリ性で、堆砂層よりやや低い値であった (Table 1)。表層土壌の EC は全般に高く、2A 層で 1.5 ~ 6.9 mS m⁻¹ で、堆砂層と 2C 層は 0.4 ~ 2.4 mS m⁻¹ であった (Table 1)。各層の CEC は全般に低く、堆砂層で 1.5 ~ 12.0、2A 層で 16.1 ~ 26.7、2C 層で 3.1 ~ 7.6 cmol_c kg⁻¹ の範囲であった。これは、どの試験地も土性が砂土 (S) または壤質砂土 (LS) であり、腐植が乏しい未熟土であるためと考えられた。ただし、交換性塩基含量に関しては、その種類によってその値に差が見られ、交換性 Ca²⁺ は、堆砂層で 0.6 ~ 9.7、2A 層で 1.6 ~ 7.2 cmol_c kg⁻¹ とやや高く、2C 層では 0.2 ~ 1.8 cmol_c kg⁻¹ と低い傾向を示した (Table 1)。交換性 Mg²⁺ と Na⁺ は、2A 層でそれぞれ 2.9 ~ 5.6、1.5 ~ 9.2 cmol_c kg⁻¹ と高く、次いで堆砂層でそれぞれ 1.2 ~ 3.5、0.3 ~ 2.5 cmol_c kg⁻¹ であり、C 層はともに低くそれぞれ 0.4 ~ 0.9、0.5 ~ 1.9 cmol_c kg⁻¹ であった (Table 1)。交換性 K⁺ 含量は全層で大きな差はなく、0.2 ~ 2.2 cmol_c kg⁻¹ の範囲にあった (Table 1)。塩基飽和度は CEC が低いと全般に高く、試験地の場所や層位の違いによらず、宮城県亘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 (Table 1)。したがって、全塩基飽和度はいずれも 20% 以上であった (Table 1)。

3) 津波未被災海岸林の立地環境とその土壌化学性

津波未被災海岸林の立地環境とその土壌化学性の結果を Table 2 にまとめた。この調査地の主な構成樹種はクロマツ (樹齢 11 年 ~ 67 年生) であったが、植生のない海岸前線部 (調査地 1) や砂丘底地で地下水面の高い地点 (調査地 10)、樹齢 125 年生のモミが分布する地点 (調査地 海 4) も存在した (Table 2)。土壌は全層が砂土 (S) または壤質砂土 (LS) の C 層か、

あるいは C 層上に A 層、H 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。土壌構造の発達には認められない。A 層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。これらの調査地の土壌の pH (H₂O) は、H 層および A 層では 3.7 ~ 6.3 で酸性を示し、A 層の下にある AB 層、B 層、BC 層、C 層では 4.4 ~ 9.0 と酸性 ~ アルカリ性であった (Table 2)。汀線に近い海岸前線部の調査地 1 は全層でアルカリ性を示し、海水の影響を強く受けていると考えられる。EC は全般に高く、多くの層位で 1 mS m⁻¹ 以上の値を示した (Table 2)。さらに海岸前線部に位置した調査地 1 では C 層で 40 mS m⁻¹ 以上の高い値を示し、また、HA 層でも 120 (調査地 海 7)、51 mS m⁻¹ (同 海 2) と極端に高い土壌も一部確認された (Table 2)。CEC は全般的に 10 cmol_c kg⁻¹ 以下で低く、H 層や HA 層でのみ 20 cmol_c kg⁻¹ を超えた土壌が一部確認された (Table 2)。交換性 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺ 含量は多くの土壌で 1 cmol_c kg⁻¹ 以下で全般に低かった。調査地 海 2、3、7 の H 層や HA 層、海岸前線部 (調査地 1) の交換性 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺ 含量は 5 cmol_c kg⁻¹ 以上の高い値を示していた。これは CEC と同様な傾向であった (Table 2)。以上の結果を反映して Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺ の各飽和度は 10% を超える土壌が多く、全塩基飽和度は多くの地点で 100% を超えており、特に海岸前線部の調査地 1 では全層で全塩基飽和度が 1000% を超えていた (Table 2)。

4. 考察

1) 津波が海岸林未熟土に及ぼした影響

本研究による津波被災マツ林における土壌調査結果と既往の海岸林研究の土壌調査結果の比較から、海水浸漬は海岸マツ林土壌の理化学性に強く影響したことが明らかとなった。

津波被災マツ林の土壌断面形態から、1) もともとのリター層と林床の下層植生が津波によって剥離、流失したこと、2) 林床には津波によって運ばれた海砂が厚く堆積したこと、3) もともとの土壌表層を構成していた A 層が堆砂層の下に埋没したこと、の 3 点を津波による最も特徴的な影響として挙げるができる (Table 1)。

土壌の化学性に関しては、堆砂下に埋没した A 層 (2A 層) で、津波の影響がより顕著に現れた (Table 1)。津波浸漬土壌における pH (H₂O) は、全般に堆砂層で著しく高く (7.0 ~ 9.6)、2A 層、2C 層も中性 ~ 弱アルカリ性の値 (それぞれ 6.6 ~ 7.7、6.9 ~ 8.1) で高い傾向を示した (Table 1)。一方で、津波未浸漬土壌の A 層は明らかに酸性であったことから (Table 2)、pH が 8.0 程度とされる海水 (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

pH (H₂O) 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、津波未浸漬土壌と同等のレベルを示した (Table 1)。EC は全般に高く、特に腐植に富む 2A 層では著しく高い値であった。一方、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。津波浸漬土壌では低い CEC 値を反映して交換性 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺ 含量も全般に低かった。また、堆砂層および 2A 層での交換性 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺ 含量は、2C 層に比べ高い傾向がみられた。これは特に堆砂層および 2A 層において海水 (海塩) の影響が強く残っていることを示している。各塩基の飽和度は、CEC の値が低いいため、全般に高く、100% を超える土壌も多く存在した (Table 1)。調査時期や調査箇所などが異なるため、単純に比較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これまで調査された海岸林土壌の範囲内にあり、津波浸漬に関する塩基状態への影響は明らかでなかった (Tables 1 & 2)。

今回の東日本大震災では、東太平洋沿岸の各地で地盤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)。本研究の調査地である吉田浜の試験地では 65 cm の深度に地下水面が確認された (Table 1, Photo 2)。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、本研究では地下水に水没したマツの根系が確認された (Photo 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考えられるので、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ものと考えられる。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。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を認めなかった (Tables 1 & 2)。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している。

2) 津波の被害を受けていない海岸林の未熟土における土壌化学性の検討

これまでの研究結果によると、海岸林の土壌はおおむね未熟土であり、主として腐植に極めて乏しい砂の堆積層で構成され、土壌構造や土壌層位の分化、発達は認められない (農林水産技術会議, 1987, 田中ら, 1992a, b)。これは海岸林砂丘における土壌断面の特徴であり、北陸地域の海岸林土壌の調査結果とも一致していた (千木 1993, 2005, 河田 1987a, b)。

また、津波の被害を受けていない海岸林土壌の EC

は土壌上層部や海側の調査地を中心に全般的に高かった (Table 2)。千木 (2005) は、スギなどの耐塩性の低い樹種を除き海岸砂地における土壌 EC は 0.2 dS m⁻¹ 以下であれば海塩による生育障害は問題ないとしている。対象地である茨城県の海岸林では、A 層や HA 層の土壌上層部や最も汀線に近い海側の調査地では 0.2 dS m⁻¹ を超えていた (Table 2)。こうした高い 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している。一方、CEC や交換性塩基含量は低かった (Table 2)。これ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する。

海岸林土壌の pH (H₂O) は腐植の混入が認められた A 層や HA 層で低く、下層ほど高い (Table 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と考えられる。海岸林土壌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) に影響する。そのため、特に A 層や HA 層などの土壌表層で酸性化が認められたと思われる。腐植の混入が少ない下層や、汀線近くの調査地 1 の土壌全層においては土壌の酸性化は認められず、海塩や海砂に由来する高濃度の塩基類を反映した土壌 pH (H₂O) を示しているものと考えられた。これらの結果も、北陸地域の海岸マツ林土壌の特徴と良く一致した (千木 1993, 2005, 河田 1987a)。これらから、海岸砂丘地の土壌は、山地の森林土壌に比べて未熟な土壌であり、pH (H₂O) や塩類含量、塩基飽和度などの土壌化学性からみて、植物の生育上、大変厳しい土壌環境であると言える。

3) 海岸マツ林の再生に向けて

今回の大地震は膨大なエネルギーを有した津波を引き起こし、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)。しかし、津波の直接的なダメージを免れて生残した樹木でもその後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)。こうした状況は、日本の海岸林の主要な構成樹種であるクロマツは、海岸の未熟な土壌でも生育できるが、必ずしも津波に強いとはいいがたく、アカマツについてはむしろ脆弱とさえいえる (中村ら 2012)。このような背景から、海岸林を広葉樹で再生することが検討され始めている (宮城県森林整備課 2012)。

津波浸漬後の海岸林では、マツが枯損したような場所でも残存、生残した広葉樹が各地で確認されている。同様に、津波による林床のリター層や下層植生の流失、さらには厚い海砂の堆積によって裸地化した海岸林跡

地には多くの海岸性草本の侵入も認められている。海岸林は防風、飛砂防止、防潮、防霧、飛塩防止、海岸侵食防備、景観・保健休養ほかの多面的機能をもつ（村井ら 1992）。これらの機能を発揮する海岸林を時間をかけて回復させるのであれば、必ずしもマツだけにこだわる必要はないと考えられる。マツだけでなく広葉樹や海岸性草本類、土木施設等、個々の特性を把握、理解し、それらの利点を活かしながら、海岸林を再生していくことも可能であると思われる。

一方、被災地では早期の生活基盤の復旧、復興を望む声もあり、そのためには飛砂防止や防風効果に効果的な海岸林の早期再生が不可欠である。今後再生が検討される海岸林の造成地の多くは津波浸漬後の砂丘砂地であると考えられるが、広葉樹が生育、更新できるのは土壤が相応に発達して、風衝の弱い場所、あるいは造成工事でそのように改善できる場所である（矢神 2005）。早期の海岸林の復旧には砂質土壤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土壤生成を促した後、広葉樹導入など多様な海岸林に誘導することが望ましい。本研究で示したように、津波被災海岸林の多くでは地盤沈下に伴う排水悪化による土壤への影響が認められている。津波被災海岸林では今後再生に向けた植栽が活発になるとと思われるが、まず生物活性の高い A 層の化学性改善を図り、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必要がある。

本研究の結果は、主に砂で構成され、有機物や養分に乏しい海岸林の砂丘未熟土においては、海水浸漬による土壤環境や理化学性の変化が植物の生育に大きく影響を及ぼす可能性を示している。ここで明らかにした津波浸漬土壤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。これらのデータは、植栽の可否判断のための植栽可能樹種の選定や土壤改良の方針検討に有効と考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、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。本報告をまとめるにあたって、独立行政法人森林総合研究所東北支所 新山馨地域研究監、並びに野口正二森林環境研究グループ長には懇切なご助言、ご指導を頂いた。森林総合研究所多摩森林科学園 勝木俊雄氏には調査地に生育するサクラ類の同定にご協力頂いた。本研究の実施にあたり、宮城北部森林管理署には試験地の提供等でご協力頂いた。これらの方々に深く感謝の意を表する。

本研究は、森林総合研究所運営費交付金「F 2 P

07：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

- 土じょう部（1976）林野土壤の分類（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（2012）“今後における海岸防災林の再生について”，<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/tisan/pdf/120201-01.pdf>, (参照 2012-12-26)
- 星野大介（2012）東北地方太平洋沖地震津波による岩手県沿岸の海岸林と集落の被害状況，日林誌，94, 243-247.
- 宮城県森林整備課（2012）海岸防災林に適した植栽樹種に関する調査報告書 17 pp.
- 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（1987a）海岸砂丘地におけるクロマツ林とニセアカシア林のリターフォールによる土壤への養分還元量の相違とそれが土壤の諸性質に及ぼす影響 新大演報 20, 51-66.
- 河田弘（1987b）海岸砂丘地におけるクロマツ林土壤に関する研究—土壤の理化学的性質および林床植生と微地形との関係— 新大演報 20, 79-100.
- 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（1970）国土調査（青森県）
- 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 (参照 2012-10-19)
- 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/river-hp/kasen/110622-1.pdf> (参照 2012-10-19)
- 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.
- 間藤徹（1989）塩性植物はなぜ塩に強いのか？—耐塩性植物育種の可能性を探る— 生物と科学 27, 139-141.
- 間藤徹（1997）植物の耐塩性メカニズム 植物の化学調節 32, 198-206.
- 村井宏・石川政幸・遠藤治郎・只木良也（1992）日本の海岸林—多角的な環境機能とその活用 株式岩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.
- 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>（参照 2012-10-19）
- 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.
- 林野庁・林業試験場（1955）国有林林野土壌調査方法書 42 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/siryou4.pdf>,（参照 2012-10-19）
- 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.
- 千木容（1993）石川県における森林土壌の分布（I）—砂丘未熟土の分布— 石川県林試研報 24, 37-41.
- 千木容（2005）健全性の保たれている海岸クロマツ林の土壌について 石川県林試研報 37, 9-12.
- 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.
- 矢神徳彦（2005）石川県における海岸林植生と樹種転換に適した樹種の選定 石川県林試研報 37, 1-8.
- 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.

表 1. 津波被災マツ林の林床や表層土壌の状態 (その 1)

Table 1. Conditions of forest and soils in the seawater-inundated pine forests at North Tohoku Pacific coasts (continued, NO.1).

調査地		前線部		吉田浜		後背地	
調査地点の概況		クロマツ 枯死		クロマツ、アカマツ 一部枯死		クロマツ、アカマツ 一部枯死	
林冠構成種		マツの被災状況		イタチハギ、フジ、テリハノイバラ 65+		イタチハギ、ヤマウルシ、オオシマザクラ 65+	
マツの被災状況		下層植生					
有効土壌深(cm)							
土壌断面情報		わずか				0.5	
A ₀ 層厚 (cm)		第1層位 堆砂層 48 S 2.5Y4/3		第2層位 2A 3 LS 2.5Y2/1		第3層位 2C 13+ S 2.5Y5/3	
層位						第1層位 堆砂層 32 S 2.5Y4/2	
層厚 (cm)						第2層位 2A 5 LS 2.5Y3/1	
土性*						第3層位 2C 28+ S 2.5Y4/4	
土色							
土壌化学性		第1層位		第2層位		第3層位	
		測定値	SD	測定値	SD	測定値	SD
pH(H ₂ O)		9.6	0.3	7.1	0.3	7.8	0.9
EC* (mS m ⁻¹)		0.7	0.8	2.4	0.9	0.9	0.6
CEC** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)		1.5	0.2	22.2	15.7	3.6	0.7
Ex. Ca ²⁺ ** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)		6.3	1.1	7.2	4.0	0.8	0.8
Ex. Mg ²⁺ ** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)		1.6	0.9	5.6	6.5	0.7	0.1
Ex. Na ⁺ ** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)		2.3	0.6	3.9	3.2	0.7	0.5
Ex. K ⁺ ** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)		0.2	0.1	0.3	0.2	0.2	0.1
Ca ²⁺ 飽和度 (%)		426.7	88.6	38.8	10.9	19.5	16.6
Mg ²⁺ 飽和度 (%)		111.7	69.3	19.5	11.2	19.4	0.9
Na ⁺ 飽和度 (%)		153.3	44.5	17.7	0.7	18.1	9.6
K ⁺ 飽和度 (%)		16.3	6.2	1.5	0.4	6.0	2.6
全塩基飽和度 (%)		708.0	207.1	77.5	7.7	63.0	24.9
						27.6	21.0
						49.6	4.7

*S:砂土, LS:壤質砂土

表 1. つづき (その2)
Table 1. continued. (NO.2)

調査地	浜市		後背地(前)		後背地(後)	
調査地点の概況						
林冠構成種			アカマツ		アカマツ	
マツの被災状況			生存		一部生存	
下層植生			オオシマザクラ、ニセアカシア、ツタウルシ		オオシマザクラ、ニセアカシア、ツタウルシ、ヤマウルシ	
有効土壌深(cm)			50+		40+	
土壌断面情報						
A ₀ 層厚 (cm)			2		2	
層位			第2層位		第2層位	
層厚 (cm)			2A		2A	
土性*			9		5	
土色			S		S	
	第1層位		第3層位		第1層位	
	堆砂層		2C		堆砂層	
	13		28+		32	
	2.5Y4/4		S		S	
	10YR2/3		10YR3/4		2.5Y4/3	
					10YR2/2	
					10YR4/4	
土壌化学性						
pH(H ₂ O)	測定値	SD	第1層位	第2層位	第1層位	第2層位
EC* (mS m ⁻¹)	7.3	0.2	7.0	6.6	7.0	6.9
CEC** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.2	0.1	0.4	0.2	0.4	0.1
Ex. Ca ²⁺ ** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	5.3	0.2	7.6	18.8	5.8	23.3
Ex. Mg ²⁺ ** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.6	0.1	0.3	1.6	1.2	2.0
Ex. Na ⁺ ** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	1.2	0.1	0.6	2.8	1.5	4.5
Ex. K ⁺ ** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.3	0.1	0.2	1.5	0.3	2.6
Ca ²⁺ 飽和度(%)	0.4	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7
Mg ²⁺ 飽和度(%)	11.4	2.2	4.0	8.4	20.2	8.3
Na ⁺ 飽和度(%)	22.5	1.9	7.9	14.7	25.4	9.9
K ⁺ 飽和度(%)	5.4	1.9	8.3	8.1	4.4	2.6
全塩基飽和度(%)	6.9	0.6	3.3	2.1	10.2	3.6
	46.3	3.9	23.4	33.4	60.2	20.9
			5.3	9.9	6.4	23.3

*S:砂土, LS:壤質砂土

表 1. つづき (その 3)
Table 1. continued, (NO.3)

調査地		市川				後背地			
調査地点の概況		前線部							
林冠構成種		クロマツ				クロマツ			
マツの被災状況		一部枯死				一部枯死			
下層植生		ツタウルシ、ヤマグワ				ツタウルシ、ヤマグワ			
有効土壌深(cm)		58+				72+			
土壌断面情報									
A ₀ 層厚 (cm)		3				3			
層位		第1層位 堆砂層				第1層位 堆砂層			
層厚 (cm)		32				50			
土性*		S				S			
土色		2.5Y4/2				2.5Y4/2			
土壌化学性									
pH(H ₂ O)		測定値 SD				測定値 SD			
EC ⁺ (mS m ⁻¹)		8.6 0.5				9.0 0.2			
CEC ⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)		1.7 0.3				2.4 0.5			
Ex. Ca ²⁺ ** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)		8.8 1.5				12.0 1.3			
Ex. Mg ²⁺ ** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)		8.8 0.2				9.7 0.3			
Ex. Na ⁺ ** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)		2.9 0.5				3.5 0.4			
Ex. K ⁺ ** (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)		1.3 0.4				2.5 0.3			
Ca ²⁺ 飽和度(%)		1.8 0.4				2.2 0.1			
Mg ²⁺ 飽和度(%)		101.7 16.5				82.1 10.3			
Na ⁺ 飽和度(%)		32.8 1.3				29.1 3.3			
K ⁺ 飽和度(%)		14.7 4.6				21.3 4.4			
全塩基飽和度(%)		20.8 1.0				18.9 2.6			
		170.0 16.5				151.5 18.6			

*S:砂土, LS:壤質砂土

表 2. 津波の浸漬を受けていない海岸林土壌の立地環境とその土壌化学性 (その 1)

Table 2. Condition of site environments and soil chemistry in the seawater non-inundated coastal forests at Ibaraki Pref. (continued, NO.1)

調査地*	海1 茨城県北茨城市			海2 茨城県北茨城市			海3 茨城県北茨城市			海4 茨城県東海村		
	茨城県北茨城市			茨城県北茨城市			茨城県北茨城市			茨城県東海村		
調査地点の概況	クロマツ、スズダケ			クロマツ、タブ、ツバキ			クロマツ、タブ、ススキ			モミ、ツバキ、スズダケ		
優占種	150			250			180、			770		
海からの距離 (m)	砂丘上			砂丘上			砂丘上			砂丘斜面		
地形	51			51			67			不明		
林齢 (year)	不明			不明			不明			不明		
立木密度 (本/ha)	10.7			10.5			8.0			19.7		
平均樹高 (m)	15.1			28.3			18.4			35.9		
平均胸高直径 (cm)												
土壌断面情報												
層位	第1層位	第2層位	第3層位	第1層位	第2層位	第3層位	第1層位	第2層位	第3層位	第1層位	第2層位	第3層位
層厚 (cm)	A 10	AB 10	BC 60+	HA 3	A 19	AB 40	H 3	A1 7	A2 24	A1 16	AB 16	BC 38+
土性**	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
土壌化学性												
pH(H ₂ O)	5.0	6.9	8.2	4.9	5.5	6.1	3.7	4.2	6.2	4.4	4.4	5.0
EC (mS m ⁻¹)	7.8	3.0	2.0	50.7	3.6	1.8	n.d.***	n.d.***	4.1	11.5	4.2	n.d.***
CEC (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	5.7	2.3	0.8	26.1	3.7	1.1	68.6	8.9	2.3	7.1	2.1	1.1
Ex. Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	2.8	3.3	2.7	9.4	2.1	1.0	10.5	0.9	1.9	1.2	0.3	0.1
Ex. Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	1.0	0.3	0.1	5.5	0.9	0.5	8.4	0.7	0.6	0.6	0.1	0.1
Ex. Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	1.3	0.9	0.5	3.7	1.0	0.4	8.5	1.2	0.8	0.6	0.4	0.6
Ex. K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.3	0.2	0.2	0.9	0.2	0.2	2.6	0.5	0.2	0.3	0.1	0.2
Ca ²⁺ 飽和度(%)	49.3	142.1	335.4	36.1	55.6	94.4	15.3	10.2	83.8	17.5	14.1	12.8
Mg ²⁺ 飽和度(%)	18.0	14.6	15.2	21.2	24.1	41.7	12.2	8.1	26.8	8.1	5.6	7.3
Na ⁺ 飽和度(%)	22.6	40.3	68.4	14.3	25.9	36.1	12.4	13.1	35.1	8.9	16.4	50.5
K ⁺ 飽和度(%)	5.1	7.3	19.0	3.4	4.8	15.7	3.7	5.2	6.6	3.5	6.1	13.8
全塩基飽和度(%)	94.9	204.3	438.0	75.0	110.4	188.0	43.6	36.5	152.2	38.0	42.3	84.4

*調査地 海1～9は環境庁一括計上国立期間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」

(「農林水産技術会議事務局 1987」)における調査地、調査地1～11はそれ以降の継続調査(田中ら 1992a, b)の調査地

**S:砂土, LS:壤質砂土

***:試料不足のため、測定不可

表 2. つづき (その 2)

Table 2. continued, (NO.2)

調査地*	海5				海6				海7				海8							
	茨城県東海村				茨城県東海村				茨城県東海村				茨城県東海村							
調査地点の概況																				
優占種	クロマツ				クロマツ				クロマツ、トベラ				クロマツ、ハマゴウ							
海からの距離 (m)	800				790				100				80							
地形	砂丘上				砂丘上				砂丘上				砂丘底							
林齢 (year)	47				43				不明				不明							
立木密度 (本/ha)	不明				不明				不明				不明							
平均樹高 (m)	10.0				14.5				不明				不明							
平均胸高直径 (cm)	18.9				26.8				不明				不明							
土壌断面情報																				
層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位	第5層位			
層厚 (cm)	A1	B1	B2	BC	A	B	C		HA	AB	B	C	A	C1	C2	C3	C4			
層厚 (cm)	2	12	8	30	5	10	60+		2	7	12	38	5	10	15	40	35+			
土性*	S	S	S	S	S	S	S		S	S	S	S	LS	LS	LS	LS	LS			
土壌化学性																				
pH(H ₂ O)	4.3	4.8	5.4	7.6	4.5	5.5	7.6		4.6	7.8	8.5	8.7	6.0	8.5	8.9	8.8	8.9			
EC (mS m ⁻¹)	5.6	1.4	0.9	1.6	n.d.**	1.1	3.2		120.1	3.0	2.6	3.0	3.2	2.9	2.6	2.9	2.9			
CEC (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	3.7	1.4	0.5	0.5	3.2	0.9	0.8		21.3	1.9	1.0	1.1	1.3	1.3	1.0	0.6	1.2			
Ex. Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.4	0.1	0.2	0.8	0.6	0.3	4.1		12.6	3.7	6.1	6.6	1.2	5.2	5.8	5.3	5.4			
Ex. Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.3	0.0	0.1	0.3	0.4	0.3	0.2		3.2	0.2	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2			
Ex. Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	1.2	0.6	0.4	0.8	0.3	0.5	0.2		1.0	0.5	0.2	0.2	0.5	0.4	0.2	0.4	0.2			
Ex. K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2		0.8	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2			
Ca ²⁺ 飽和度(%)	10.6	8.4	31.9	163.8	17.2	28.7	524.4		59.1	194.2	588.3	607.4	90.1	385.8	564.7	924.6	466.1			
Mg ²⁺ 飽和度(%)	7.6	2.8	25.5	61.7	12.8	33.3	20.5		15.0	8.5	11.7	11.1	21.4	11.9	11.8	28.1	17.4			
Na ⁺ 飽和度(%)	32.2	42.7	76.6	174.5	8.1	51.7	30.8		4.5	26.5	21.4	22.2	38.2	26.1	21.6	63.2	20.0			
K ⁺ 飽和度(%)	6.0	10.5	42.6	51.1	10.6	19.5	21.8		3.7	9.5	26.2	15.7	18.3	16.4	23.5	33.3	18.3			
全塩基飽和度(%)	56.4	64.3	176.6	451.1	48.8	133.3	597.4		82.2	238.6	647.6	656.5	167.9	440.3	621.6	1049	521.7			

調査地 海1~9は環境庁一括計上国立期間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」

(「農林水産技術会議事務局 1987」)における調査地、調査地1~11はそれ以降の継続調査(田中ら 1992a, b)の調査地

**S:砂土, LS:壤質砂土

***試料不足のため、測定不可

表 2. つづき (その 3)

Table 2. continued, (NO.3)

調査地*	海9										1										2									
	茨城県東海村										茨城県東海村										茨城県東海村									
調査地点の概況	クロマツ、ハマゴウ										無植生										クロマツ									
優占種	80										18										67									
海からの距離 (m)	砂丘斜面										砂丘前線										砂丘上									
地形	不明										0										11									
林齢 (year)	不明																				10000									
立木密度 (本/ha)	不明																				1.7									
平均樹高 (m)	不明																				5									
平均胸高直径 (cm)																														
土壌断面情報																														
層位	第1層位	第2層位	第3層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位	第5層位	第6層位	第7層位	第8層位	第9層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位	第5層位													
層厚 (cm)	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C1	C2	C3	C4	C5													
土性**	25	27	30+	1	3	16	8	10	18	24	7	20+	15	20	22	23	20+													
土性**	LS	LS	LS	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S													
土壌化学性																														
pH(H ₂ O)	8.4	8.8	8.8	8.4	8.7	8.9	8.8	8.9	8.7	8.9	9.0	8.9	8.3	8.7	8.9	8.8	8.9													
EC (mS m ⁻¹)	3.2	2.2	2.9	0.5	98.7	41.9	86.3	40.7	80.9	50.7	44.4	47.9	2.5	2.8	3.0	3.1	3.1													
CEC (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	1.8	0.8	1.7	0.7	0.6	0.6	0.8	0.5	0.7	0.7	0.8	0.7	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7													
Ex Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	5.6	5.1	5.9	6.4	5.2	5.7	6.1	5.5	5.7	5.7	5.8	5.7	4.1	5.4	5.2	5.2	4.9													
Ex Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.3	0.1	0.2	4.7	1.2	0.7	1.1	0.8	1.1	0.9	0.9	0.9	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2													
Ex Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.7	0.2	0.5	26.1	4.4	2.2	3.8	2.4	3.4	2.8	2.5	2.7	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3													
Ex K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.2	0.2	0.2	0.9	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3													
Ca ²⁺ 飽和度(%)	302.7	659.7	341.4	990.8	818.8	956.7	807.9	1009.3	826.1	771.6	748.7	872.3	425.8	604.4	688.0	704.1	704.3													
Mg ²⁺ 飽和度(%)	13.6	15.6	9.2	721.5	189.1	121.7	146.1	140.7	158.0	114.9	117.9	130.8	16.5	13.3	16.0	16.2	22.9													
Na ⁺ 飽和度(%)	39.1	31.2	29.9	4015.4	681.3	358.3	505.3	440.7	487.0	371.6	325.6	410.8	24.7	28.9	28.0	29.7	41.4													
K ⁺ 飽和度(%)	12.5	22.1	10.3	133.8	70.3	75.0	78.9	88.9	72.5	66.2	64.1	67.7	23.7	26.7	34.7	43.2	42.9													
全塩基飽和度(%)	367.9	728.6	390.8	5861.5	1759.4	1511.7	1538.2	1679.6	1543.5	1324.3	1256.4	1481.5	490.7	673.3	766.7	793.2	811.4													

*調査地 海1~9は環境庁一括計上国立期間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」

((農林水産技術会議事務局 1987))における調査地、調査地1-11はそれ以降の継続調査(田中ら 1992a, b)の調査地

**S: 砂土, LS: 塩質砂土

***試料不足のため、測定不可

表 2. つづき (その4)

Table 2. continued, (NO.4)

調査地*	3			4			5		
	茨城県東海村			茨城県東海村			茨城県東海村		
調査地点の概況	クロマツ			クロマツ			クロマツ		
優占種	115			150			225		
海からの距離 (m)	砂丘底			砂丘斜面			砂丘斜面		
地形	35			37			44		
林齢 (year)	6900			5800			4400		
立木密度 (本/ha)	2.8			4			6.5		
平均樹高 (m)	4			8			10		
平均胸高直径 (cm)									
土壌断面情報									
層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位	第5層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位
層厚 (cm)	HA	C1	C2	C3	C4	A	C1	C2	C3
土性**	5	5	14	15	24+	6	16	28	16+
	S	S	S	S	S	S	S	S	S
土壌化学性									
pH(H ₂ O)	5.8	6.2	5.9	8.5	8.9	6.3	8.1	8.8	8.9
EC (mS m ⁻¹)	4.2	2.5	2.7	2.8	2.9	4.4	2.5	2.8	2.5
CEC (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	3.1	1.8	1.8	1.3	1.0	2.7	1.5	0.9	0.7
Ex. Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	1.1	1.0	0.9	4.2	5.0	1.7	3.0	5.5	4.4
Ex. Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.7	0.4	0.4	0.3	0.2	0.4	0.1	0.1	0.0
Ex. Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3
Ex. K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2
Ca ²⁺ 飽和度(%)	36.5	56.4	52.0	324.6	505.1	62.4	201.3	619.1	665.2
Mg ²⁺ 飽和度(%)	22.8	22.7	23.2	25.4	16.3	15.4	8.1	9.0	6.1
Na ⁺ 飽和度(%)	9.4	11.6	13.6	24.6	19.4	8.6	22.1	23.6	37.9
K ⁺ 飽和度(%)	9.4	11.6	13.6	20.8	17.3	10.2	25.5	18.0	28.8
全塩基飽和度(%)	78.2	102.2	102.3	395.4	558.2	96.6	257.0	669.7	737.9

*調査地 海1~9は環境庁一括計上国立期間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」

((農林水産省技術会議事務局 1987))における調査地、調査地1-11はそれ以降の継続調査(田中ら 1992a, b)の調査地

**S:砂土, LS:壤質砂土

***:試料不足のため、測定不可

表 2. つづき (その 5)

Table 2. continued, (NO.5)

調査地*	6				7				8						
	茨城県東海村				茨城県東海村				茨城県東海村						
調査地点の概況															
優占種															
海からの距離 (m)															
地形															
林齢 (year)															
立木密度 (本/ha)															
平均樹高 (m)															
平均胸高直径 (cm)															
土壌断面情報															
層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位	第5層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位	第5層位	第6層位
層厚 (cm)	A 10	C1 14	C2 20	C3 36+	A 8	C1 12	C2 18	C3 32	C4 32+	A 5	C1 13	C2 36	C3 20	C4 9	C5 12+
土性**	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
土壌化学性															
pH(H ₂ O)	5.1	8.6	8.7	8.9	5.2	5.7	6.3	6.8	8.8	5.4	5.2	5.7	6.9	6.9	6.9
EC (mS m ⁻¹)	3.2	1.9	2.2	2.2	2.2	1.0	0.8	0.7	2.9	4.5	2.1	0.6	0.4	0.3	0.3
CEC (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	2.2	1.2	1.2	0.9	2.1	1.2	1.1	0.9	0.4	4.5	2.1	0.8	0.5	0.6	0.3
Ex. Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	2.0	5.6	5.3	5.6	0.7	0.6	0.7	0.7	4.7	1.6	0.5	0.3	0.3	0.4	0.4
Ex. Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.0	0.5	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
Ex. Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
Ex. K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
Ca ²⁺ 飽和度(%)	91.2	483.5	460.0	655.8	31.6	51.2	63.1	77.9	1185.0	36.1	23.2	45.3	64.0	70.0	140.0
Mg ²⁺ 飽和度(%)	7.4	7.0	3.5	4.7	5.7	13.2	14.4	24.4	10.0	11.1	8.2	21.3	16.0	13.3	26.7
Na ⁺ 飽和度(%)	11.2	16.5	15.7	27.9	7.1	13.2	12.6	18.6	40.0	4.0	8.2	14.7	34.0	18.3	63.3
K ⁺ 飽和度(%)	7.9	12.2	11.3	20.9	8.5	14.0	16.2	18.6	37.5	6.2	9.2	18.7	26.0	16.7	36.7
全塩基飽和度(%)	117.7	519.1	490.4	709.3	52.8	91.7	106.3	139.5	1272.5	57.4	48.8	100.0	140.0	118.3	266.7

* 調査地 海1～9は環境庁一括計上国立期間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」
(「農林水産技術会議事務局 1987」)における調査地、調査地1～11はそれ以降の継続調査(田中ら 1992a, b)の調査地

** S:砂土, LS:壤質砂土

*** 試料不足のため、測定不可

表 2. つづき (その 6)

Table 2. continued, (NO.6)

調査地*	9						10						11					
	茨城県東海村						茨城県東海村						茨城県東海村					
調査地点の概況																		
優占種	クロマツ						無植生						クロマツ					
海からの距離 (m)	518						573						720					
地形	砂丘斜面						砂丘底						砂丘上					
林齢 (year)	44												50					
立木密度 (本/ha)	5800						0						4600					
平均樹高 (m)	4.4												4.2					
平均胸高直径 (cm)	7												6					
土壌断面情報																		
層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位	第5層位	第6層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位	第5層位	第1層位	第2層位	第3層位	第4層位	第5層位		
層厚 (cm)	A 10	C1 10	C2 18	C3 12	C4 20	C5 30+	A 3	C1 17	C2 30	C3 42	C4 18+	A 3	C1 44	C2 15	C3 13	C4 10		
土性*	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S		
土壌化学性																		
pH(H ₂ O)	5.3	5.6	6.5	6.7	7.5	8.3	5.4	5.5	7.8	7.7	7.3	5.6	6.3	6.4	6.9	7.0		
EC (mS m ⁻¹)	1.9	0.8	0.6	0.7	0.9	1.1	3.0	1.4	1.1	0.5	0.6	8.5	0.5	0.3	0.4	0.6		
CEC (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	2.6	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	2.5	1.6	1.0	0.5	0.4	9.2	0.5	0.4	0.5	0.5		
Ex. Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.4	0.3	0.6	0.8	1.7	1.0	0.9	0.5	1.4	0.5	0.4	5.3	0.5	0.4	0.5	0.5		
Ex. Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.2	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0		
Ex. Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.2	1.0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1		
Ex. K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)	0.2	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1		
Ca ²⁺ 飽和度(%)	16.2	24.1	44.5	63.2	136.5	86.6	36.8	29.7	143.9	108.2	92.5	57.4	98.1	100.0	100.0	104.0		
Mg ²⁺ 飽和度(%)	8.1	18.8	25.8	23.2	6.3	13.4	11.3	10.3	12.2	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0		
Na ⁺ 飽和度(%)	9.3	75.2	18.8	12.0	13.5	11.8	5.7	11.0	14.3	26.5	72.5	2.6	18.5	28.6	36.7	16.0		
K ⁺ 飽和度(%)	8.1	18.8	25.8	23.2	6.3	13.4	7.7	9.7	12.2	24.5	42.5	2.1	20.4	37.1	36.7	24.0		
全塩基飽和度(%)	41.7	136.8	114.8	121.6	162.7	125.2	61.5	60.6	182.7	159.2	207.5	66.6	137.0	165.7	173.5	144.0		

*調査地 海1~9は環境庁一括計上国立期間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」

(農林水産技術会議事務局 1987)における調査地、調査地1~11はそれ以降の継続調査(田中ら 1992a, b)の調査地

**S:砂土, LS:壤質砂土

***試料不足のため、測定不可