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

降雨に伴う自然排水がもたらす除塩の効果

誌名	森林総合研究所研究報告
ISSN	09164405
著者名	小野,賢二 平井,敬三
発行元	森林総合研究所
巻/号	12巻1号
巻号補足	
掲載ページ	p. 41-47
発行年月	2013年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

「森林総合研究所研究報告」(Bulletin of FFPRI) Vol.12 No.1 (No.426) 41 - 47 March 2013

論　文 (Original article)

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 —降雨に伴う自然排水がもたらす除塩の効果—

小野賢二 [1)*]、平井敬三 [2)]

Effect of natural rainfall on desalination of seawater-inundated soil in forest damaged by 2011 Heisei Sanriku Mega-tsunami following Tohoku earthquake of the eastern Pacific coast

Kenji ONO[1)*], Keizo HIRAI[2)]

Abstract

The 2011 Heisei Sanriku Mega-tsunami destroyed much forest along the eastern Pacific coastline of Japan. Remote coastal forests such as cedar (*Cryptomeria japonica*) that received direct tsunami impact suffered damage from salination of forest soils resulting from seawater inundation. In our prior study, we clarified the distribution of the salination damage in cedar forests of the Sanriku coastline, and determined causes of this damage. In the present study, we continuously examined the progress of improvement in soil and forest floor conditions over time in seawater-inundated forests. A_0 layers and understory vegetation that were completely washed away from the forest floor by the tsunami gradually reformed and recovered owing to newly deposited litterfall and intrusion of herbaceous plants. Increases in pH(H_2O), electric conductivity (EC), and exchangeable Na^+ saturation percentage in seawater-inundated soils were halted, and soil improved with time. In June 2012, these measurements in inundated forest soils decreased to nearly the same levels as non-inundated soils. According to meteorological data from Kamaishi automatic weather station near the experimental sites, monthly precipitation from May to August 2011 ranged from 51 to 215 mm month^{-1}, less than or equal to the average. However, in September 2011, a typhoon dropped more than 400 mm of rain on this site in one event, which is equal to one quarter the annual precipitation. High levels of precipitation such as in this event may efficiently remove sea salt from seawater-inundated soils. In conclusion, the present study found an important role for natural precipitation in desalination of seawater-inundated forest soils.

Key words : desalination, precipitation, Sugi stand, Sanriku coast, salt injury, 2011 Heisei Sanriku Mega-tsunami, seawater inundation

要旨

東日本大震災では東日本の太平洋沿岸に大津波が襲来し、沿岸の海岸林は未曾有の被害に見舞われた。さらに津波による直接的な破壊を免れ震災直後には健全にみえた海岸林でも時間とともに針葉が赤褐色に変色する塩害が顕在化した。震災直後の調査では三陸沿岸の斜面に分布するスギ林における塩害の発生状況とその原因を解明した。本研究ではその後の時間経過に伴う林床環境や土壌の改善経過を検討した。津波により剥離され消失した A_0 層や林床植生は徐々に赤褐化したスギ針葉が枯死・脱落して堆積し、さらに林床に草本が侵入したため、14 ヶ月後には林床の被覆度は回復していた。津波到達箇所の土壌 pH（H_2O）や電気伝導度（EC）、交換性 Na^+ 濃度は津波未到達箇所の土壌に比べ大きかったが、2011 年 10 月以降、津波未到達箇所の土壌に近い状態にまで低下した。当該試験地近くのアメダス釜石観測所における 2011 年 5 ～ 8 月の月別降水量をみると 51 ～ 215 mm/ 月で、平年並から平年以下の降水量であったが、9 月には平成 23 年台風 15 号に伴う大雨によって 400 mm 超の降雨に見舞われた。これは平均年降水量の 4 分の 1 以上に匹敵する量であり、この降水が被災林における土壌の除塩に寄与したと思われる。以上から、斜面においては自然起源の降雨に伴う土壌からの自然排水によって、津波による塩類土壌に対して除塩の効果が期待できることが明らかとなった。

キーワード：除塩効果、降雨、スギ林、平成三陸大津波、土壌塩害、海水浸漬

原稿受付：平成 24 年 9 月 20 日 Received 20 September 2012　原稿受理：平成 24 年 11 月 21 日 Accepted 21 November 2012

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 月に発生した東北地方太平洋沖地震により太平洋沿岸に大津波が襲来し、海岸林を壊滅させた。さらに、大津波による倒伏、根返りや折損などの直接的な破壊を免れて震災直後には健全にみえた海岸林でも、時間経過とともに針葉が赤褐化する現象が顕在化した。筆者らは、先行研究において、三陸沿岸津波浸水後背地のスギ林を現地踏査し、スギ針葉変色の実態を把握し、その発生原因を明らかにした（小野・平井 2012）。津波が浸水した土壌には、海水由来のナトリウムイオン（Na^+）が集積し、土壌 pH（H_2O）や電気伝導度（EC）を上昇させた。それにより、①樹木への過剰な塩分吸収、②樹木が必要とする養分の吸収阻害、③浸透圧低下に伴う土壌中の水ポテンシャルの低下（米田 1958a; b; c）が誘因され、結果として、東北太平洋沿岸の津波浸水を受けたスギ林において針葉の赤褐変化が広範囲に発生したと結論した（小野・平井 2012）。

津波被災林の再生に際しては新規植栽木に対する津波浸漬の影響を排除するために、津波浸水地における塩類土壌を継続調査することによって土壌の化学性の改善状況を把握する必要がある。我が国の森林の多くは急傾斜地にあるため、津波被災林の除塩について農地同様に実施することは困難である。しかし、梅雨や台風等のまとまった降雨があるので、降雨による除塩が期待される。そこで、本論では、岩手県釜石市における津波被災スギ林において継続的に現地調査を行い、時間経過に伴うスギの被害進行状況や土壌化学性の変化を把握した。本研究はこれらの結果を基に津波被災林における降雨による除塩効果を明らかにすることを目的とした。

2. 調査地および方法

調査地は同一斜面上で針葉の赤褐変化が確認された被害林と未被害林が存在する岩手県釜石市鵜住居町のスギ林である（北緯 39°19.7'、東経 141°53.8'、標高 10 m）（Fig. 1）。土壌は適潤性褐色森林土（B_D）（土じょう部 , 1976）であり、表層地質は固結堆積物および古生代の泥岩である（経済企画庁総合開発局 , 1975）。試験地に最も近いアメダス釜石観測所（北緯 39°16.2'、東経 141°52.7'、標高 5 m）における 2001 年から 2010 年の平均年降水量は 1,677 mm/ 年であった（気象庁 , http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php）。震災以降の 2011 年 5 月から 2012 年 5 月までの月別降水量および 1981 年 3 月から 2011 年 2 月までの平均月別降水量を Fig. 2 に示した。なお、2011 年 3 月、4 月における降水量は東日本大震災の影響で欠測している。

2011 年 6 月に設定したライントランセクト上の各調査地点において、2011 年 10 月および 2012 年 6 月に

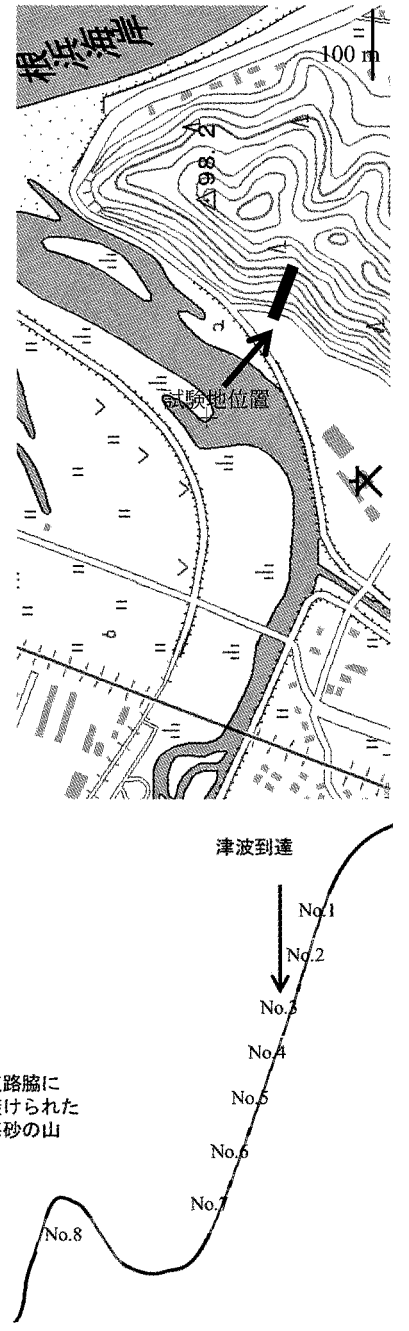

図 1. 調査地の位置図（1:25,000 国土地理院地形図（釜石）参照）（上図）およびライントランセクト配置の模式図（下図）
Figure 1. Location of the studying sites and line transect arrangement

土壌表層部の状態 (土性・土色・林床植生・被覆度・堆砂の有無・津波到達の有無) およびスギ針葉の赤褐変化の状況を目視によって観察した。さらに表層土壌（0-10 cm）を採取して持ち帰り、乾燥、調製の後、土壌の一般化学性を分析した。一般化学性の分析項目は、土壌 pH（H_2O）、電気伝導度（EC）、交換性陽イオン濃度、陽イオン交換容量、塩基飽和度である。各項目の分析方法は、小野・平井（2012）と同様に行った。2011 年 6 月、2011 年 11 月、2012 年 6 月における結果を比較して、時間経過に伴う津波被災林の環境改善

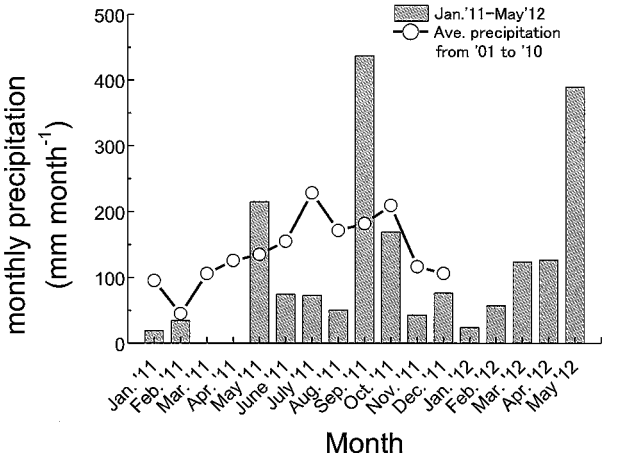

図2. アメダス釜石観測所における月別降水量の推移
Figure 2. Monthly precipitation at Kamaishi meteorological station by AMeDAS (automated meteorological data acquisition system) from 2001 to 2012.

状況を検討した。

3. 結果

1) スギ針葉の変色状況および林床環境の経時変化

津波発生から2ヶ月後の2011年6月23日における目視調査では、大槌湾に面した釜石市鵜住居の津波浸水後背地スギ林における塩害（針葉の赤褐変化）の発生範囲は、海水浸漬箇所に明確に一致した（Table 1）。本調査地における海水浸漬範囲は、津波による林床植生やA_0層の剥離状況から非常に明瞭であった。

その後、津波発生から7ヶ月後（2011年10月11日）、14ヶ月後（2012年6月1日）の当該被災林分の調査では、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た（Table 1）。14ヶ月後の観察において、完全に枯死していたスギ個体は斜面最下部のNo.7, 8地点に集中していた（それぞれの地点の生残率は21%および3%）（Table 1, Photo 1）。それ以外の調査地点において枯死に至った個体は稀であった（Table 1）。また、津波発生2ヶ月後には津波によってA_0層は剥離され、流失していたが、時間の経過とともに赤褐変化したスギ針葉が枯死して落葉して堆積したため、A_0層は7ヶ月後、14ヶ月後には徐々に回復していた（Table 1, Photo 2）。林床植生に関しても、変色針葉の脱落に伴う光環境の変化に伴って林床に草本類をはじめとする植生が侵入し、林床の被覆度は津波発生14ヶ月後には全地点で100%となった（Table 1）。

2) 土壌pH（H_2O）、電気伝導度、交換性陽イオン濃度、陽イオン交換容量および塩基飽和度の経時変化

2011年6月に採取した未風乾新鮮表層土壌（0～10 cm）のpH（H_2O）は、津波未到達箇所（採取地点1～3）では4.7～5.3であったが、津波到達箇所（採取地点4～7）では5.4～6.2に上昇した（Table 2）。その後、津波発生から7ヶ月後および14ヶ月後に津波到達箇所（採取地点4～7）から採取した表層土壌のpH（H_2O）は4.8～5.9であり、津波未到達箇所の土壌pH（H_2O）の値（4.3～5.0）までには回復して

表1. 津波被災スギ林の林床や表層土壌の状態と針葉変色の経時変化
Table 1. The states of forest floor, surface soil, and needle discoloration in the seawater-inundated cedar forest at Kamaishi City, Iwate Prefecture from June 2011 to June 2012.

採取地点No.	1	2	3	4	5	6	7	8[a]
斜度	34°	42°	38°	48°	38°	30°	30°	0°
津波到達	無	無	有(境界)	有	有	有	有	有
土壌への海砂混入	無	無	有	有	有	有	有	有
針葉の変色								
(11年 6月時点)	無	無	無	一部の枝	全枝	全枝	全枝	--
(11年10月時点)	無	無	一部の枝	一部の枝	一部の枝	一部の枝	全枝	--
(12年 6月時点)	無	無	無	無	無	一部の枝	殆どの枝	--
生残率(12年6月時点)	17/17	12/12	14/14	9/9	6/6	6/8	3/14	1/33
下層植生								
(11年 6月時点)	有	有	無	無	無	無	無	--
(11年10月時点)	有	有	まれ	まれ	極まれ	極まれ	極まれ	--
(12年 6月時点)	有	有	有	少	少	少	まれ	--
A_0層								
(11年 6月時点)	有	有	有	まれ	まれ	まれ	まれ	--
(11年10月時点)	有	有	有	有	有	有	有	--
(12年 6月時点)	有	有	有	有	有	有	有	--
林床の被覆度*								
(11年 6月時点)	>80%	>80%	70%	10%	10%	10%	5%	--
(11年10月時点)	100%	100%	80%	60%	40%	30%	30%	--
(12年 6月時点)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	--
A層土性	壌土	壌土	壌土	壌土	壌土	壌土	壌土	砂

林床の被覆度*: 目視による林床植生および堆積有機物を合わせた被覆度
[a]採取地点No. 8は海から運ばれた堆砂溜まりの砂

表 2. 津波被災スギ林の表層土壌（0-10 cm 深）における生土の pH(H_2O)、電気伝導度、交換性陽イオン濃度、および陽イオン交換容量の経時変化

Table 2. The values of pH(H_2O) and the concentrations of water-soluble cations in the soil suspension of each sampling point of seawater-inundated cedar forest at Kamaishi City, Iwate Prefecture from June 2011 to June 2012.

採取地点No.	1	2	3	4	5	6	7	8[a]
津波到達	無	無	有(境界)	有	有	有	有	有
生土pH(H_2O) (1:2.5=土:水)								
(11年 6月時点)	4.74	5.25	5.28	5.70	5.44	5.95	6.21	7.94
(11年10月時点)	4.61	4.44	4.52	5.25	5.67	5.64	5.44	8.31
(12年 6月時点)	4.61	4.33	5.00	4.82	5.88	5.89	5.89	7.40
EC (dS m^{-1})*								
(11年 6月時点)	0.14	0.16	0.15	0.10	0.19	0.33	0.25	0.56
(11年10月時点)	0.12	0.11	0.10	0.14	0.07	0.07	0.07	0.18
(12年 6月時点)	0.10	0.13	0.08	0.09	0.06	0.07	0.07	0.20
塩基交換容量 ($cmol_c$ kg^{-1}乾土)**								
(11年 6月時点)	52	64	48	45	50	44	55	7
(11年10月時点)	55	48	46	42	33	33	35	14
(12年 6月時点)	66	70	60	58	47	59	45	12
交換性Ca^{2+}濃度 ($cmol_c$ kg^{-1}乾土)**								
(11年 6月時点)	7.2	9.7	3.0	1.2	2.1	1.6	6.8	4.8
(11年10月時点)	10.1	5.6	5.4	4.4	1.5	2.0	2.2	8.9
(12年 6月時点)	9.7	11.5	9.1	6.3	3.8	5.2	2.8	7.0
交換性Mg^{2+}濃度 ($cmol_c$ kg^{-1}乾土)**								
(11年 6月時点)	1.9	3.8	1.8	1.4	2.2	2.2	6.5	3.0
(11年10月時点)	2.3	1.5	2.1	1.6	1.4	1.7	1.3	1.5
(12年 6月時点)	2.8	4.2	2.5	4.5	3.2	3.3	3.5	3.4
交換性Na^+濃度 ($cmol_c$ kg^{-1}乾土)**								
(11年 6月時点)	0.11	0.44	1.74	1.77	2.80	3.37	6.81	3.40
(11年10月時点)	0.13	0.08	0.04	1.39	0.78	1.0	0.39	2.05
(12年 6月時点)	0.14	0.23	0.10	0.58	1.23	0.78	0.91	2.01
交換性K^+濃度 ($cmol_c$ kg^{-1}乾土)**								
(11年 6月時点)	0.32	0.53	0.46	0.47	0.55	0.59	0.65	0.55
(11年10月時点)	0.22	0.23	0.24	0.19	0.22	0.34	0.46	1.07
(12年 6月時点)	0.30	0.51	0.30	0.61	0.73	0.36	1.04	0.64
交換性Ca^{2+}飽和度(%) (=交換性Ca^{2+}/CEC×100)								
(11年 6月時点)	14	15	6	3	4	3	13	68
(11年10月時点)	18	11	12	11	5	6	6	63
(12年 6月時点)	15	16	15	11	8	9	6	58
交換性Mg^{2+}飽和度(%) (=交換性Mg^{2+}/CEC×100)								
(11年 6月時点)	4	6	4	3	4	5	12	43
(11年10月時点)	4	3	4	4	4	5	4	10
(12年 6月時点)	4	6	4	8	7	6	8	28
交換性Na^+飽和度(%) (=交換性Na^+/CEC×100)								
(11年 6月時点)	0.2	0.7	3.7	4.0	5.6	7.6	12.5	48
(11年10月時点)	0.2	0.2	0.1	3.3	2.3	3.1	1.1	15
(12年 6月時点)	0.2	0.3	0.2	1.0	2.6	1.3	2.0	17
交換性K^+飽和度(%) (=交換性K^+/CEC×100)								
(11年 6月時点)	0.6	0.8	1.0	1.1	1.1	1.3	1.2	7.8
(11年10月時点)	0.4	0.5	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	7.6
(12年 6月時点)	0.4	0.7	0.5	1.0	1.6	0.6	2.3	5.3
全塩基飽和度(%) (=交換性Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+/CEC)								
(11年 6月時点)	18	23	15	11	15	17	38	167
(11年10月時点)	23	15	17	18	12	15	12	95
(12年 6月時点)	20	23	20	21	19	16	18	108

*1:5水浸出法

**peech法

[a]採取地点No. 8は海から運ばれた堆砂溜まりの砂

写真 1. 調査地の遠景（釜石市鵜住居地区, 2012 年 6 月撮影）
Photo 1. Distant view of the study site.

写真 2. 津波浸水 14 ヶ月後の調査地スギ林林床の様子（釜石市鵜住居地区，2012 年 6 月撮影）
Photo 2. Forest conditions 14 months after seawater inundation with the Heisei Tohoku Massive Tsunami.

いないものの、時間経過に伴って低下していた（Table 2）。海から運ばれた堆砂（採取地点 8）の pH（H_2O）は 7.4 ～ 8.3 を示し、津波発生 14 ヶ月後においても高い値を示した（Table 2）。津波到達箇所より採取した表層土壌の電気伝導度（EC）は、2011 年 6 月で 0.10 ～ 0.33 dS m^{-1} であったが、津波発生 14 ヶ月後には 0.1 dS m^{-1} 以下の値を示した（Table 2）。堆砂溜まりの砂においても、時間経過による EC の低下が認められた。

2011 年 6 月の時点の津波到達箇所における交換性 Na^+ 濃度は 1.8 ～ 6.8 $cmol_c$ kg^{-1} 乾土を示し、津波未到達箇所の 0.1 ～ 1.7 $cmol_c$ kg^{-1} 乾土に比して最大で 60 倍も大きかった。しかし、それらの地点の交換性 Na^+ 濃度は時間とともに低下し、津波浸水後 14 ヶ月後におい 0.6 ～ 1.2 $cmol_c$ kg^{-1} 乾土を示した。これらの値は 2011 年 6 月の値に対し最大でも 4 割のレベルまで低下した（Table 2）。堆砂においても時間経過に伴う交換性 Na^+ 濃度の低下は認められた。一方で、Na^+ を除く交換性 Ca^{2+}, Mg^{2+}、K^+ 濃度および陽イオン交換容量（CEC）はそれぞれ 1.2 ～ 10.1、1.4 ～ 6.5、0.2 ～ 1.0、および 33 ～ 70 $cmol_c$ kg^{-1} 乾土と、試料採取時期や地点間で変動がみられたものの、津波浸水の有無や調査日時の違いによる差違は認められなかった（Table 2）。なお、堆砂の CEC については 7 ～ 14 $cmol_c$ kg^{-1} 乾土と、表層土壌に比べ著しく低い値を示した。

全塩基飽和度は全調査期間で 11 ～ 38% の範囲にあった（Table 2）。津波未到達箇所における全塩基飽和度の 6 ～ 8 割は交換性 Ca^{2+} に起因していた。一方、津波到達箇所においては 2011 年 6 月には交換性 Ca^{2+} と交換性 Na^+ が主に全塩基飽和度に寄与していた（ともに 2 割～ 4 割強の寄与率）が、時間の経過とともに交換性 Na^+ 濃度が低下したために津波発生 14 ヶ月後には交換性 Na^+ の寄与率は 1 割以下であり、一方で交換性 Ca^{2+} の寄与率は 3 割から 7 割強であった。津波浸水により海水由来の Na^+ の影響を強く受けた表層土壌において、時間経過とともに海水由来 Na^+ の影響は次第に低下したことが明らかとなった（Table 2）。

4. 考察

1) 時間の経過に伴う津波被災スギ林における林内環境の変化

今回の大津波のような一時的な海水浸漬による塩害は、土壌への過剰な塩類付加に起因する直接的な植物の生育障害に基づくとされている（米田 , 1958a）。2011 年 6 月に釜石市鵜住居地区で行った調査では、津波浸水後背地スギ林で確認された針葉変色発生範囲

は海水浸漬箇所に明確に一致しており（Table 1）、津波浸水による塩害に起因したものであることが明らかとなった（小野・平井 , 2012）。また、2011 年 10 月、12 年 6 月の追跡調査では、当該被災林分の多くの調査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ていた（Table 1）。一方、斜面最下部の採取地点 No. 8 では変色した枝葉が脱落し、新たな緑葉を着葉せずに枯死に至ったスギ個体が確認されたが（Table 1, Photo 1）、これは、斜面下部では他地点に比べて海水浸漬直後（2011 年 6 月）における土壌へのより高濃度の塩類集積（Table 2）に起因したものであろう。

林床環境については、2011 年 6 月時点で津波により剥離、流去されていた A_0 層は、時間の経過とともに赤褐変化したスギ針葉が枯死して脱落して堆積したため、7 ヶ月後、14 ヶ月後には徐々に回復した（Table 1, Photo 2）。また、針葉変色やその枝葉脱落により林床の光環境も変化したため、津波により完全に流去し消失した林床植生も草本類の侵入により徐々に回復し、林床の被覆度は全調査地点で 100% に達した（Table 1）。当該試験地は斜度が 30° 以上の急傾斜地に位置する（Table 1）が、津波により破壊された林床環境が回復し、林床の被覆度が 100% となったことにより、雨滴衝撃による侵食、表土流亡のおそれは低減されたものと期待される。

2) 津波被災スギ林における土壌塩害の改善経過

大津波に伴う津波浸漬により発生した土壌の塩害に対して、津波被災農地では、排水経路の確保、土壌改良材の施用、耕起・砕土、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、土壌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傾斜地にあるため、津波被災林では農地同様に除塩を実施することは困難である。したがって降雨降雪の効果が期待される。そこで、時間経過に伴う津波被災林の土壌化学性をモニタリングし、降水量との関係から自然降水による除塩効果について検討した。

土壌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（Table 2）。すなわち、2011 年 6 月においては、津波到達箇所で採取した土壌の pH（H_2O）や EC、交換性 Na^+ 濃度は、津波未到達箇所の土壌に比べて大きい値であったが、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（Table 2）。土壌の pH（H_2O）、EC の低下は、強塩基性を呈する、かつ土壌水に対して高い溶解性を有する Na^+ が土壌から徐々に溶脱、除塩されたことに起因したものである。

日本の森林土壌では、交換性塩基の含量は一般に $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ の順である（河田, 1989）。2011 年 6 月の時点において津波によってもたらされた海水由来の Na^+ が土壌に過剰に集積していたことにより、試験地林分の土壌中の交換性 Na^+ 濃度は高く、土壌中の塩基バランスが悪化していた（Table 2, 小野・平井 , 2012）。しかし、これらの Na^+ は時間の経過とともに徐々に土壌から溶脱、除塩されたことから、土壌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が確認された（Table 2）。これらの結果は、津波被災農地の塩類土壌の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）。なお、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）。

農地土壌において塩害が起こりうる限界評価指標の一つに、Na^+ 飽和度（CEC に対する交換性 Na^+ 量の割合で表したもの）がある。一般に、農地土壌においては、Na^+ 飽和度が 15% を超えると土壌の悪化が明確になるとされている（南條 , 2012）。本試験地の土壌の Na^+ 飽和度は海水浸漬直後の 2011 年 6 月時点でさえ 15% を超える箇所はなく、農地土壌の基準では問題の無いレベルであった（Table 2）。しかしながら、スギは土壌中の塩分に対して極めて弱いとされている（本間 , 1976）。そのため、農地土壌の基準では問題の無いレベルでもスギ針葉の変色という形で塩害が顕在化し（小野・平井 , 2012）、極端に Na^+ 飽和度の高かった斜面最下部（地点 No. 8）においては枯死に至ったものと推察される（Photo 1）。したがって、森林土壌には、農地土壌の基準をそのまま適用することはできない。

降水は除塩に大きく寄与すると考えられる。本試験地に最も近いアメダス釜石観測所（北緯 39° 16.2'、東経 141° 52.7'、標高 5 m）のデータによると、岩手県釜石地域の平均年降水量は 1,677 mm/ 年である（気象 庁 , http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php）。津波以後の月別降水量は、2011 年 5 月は 215 mm の降水があったものの、6 月から 8 月にかけては 51 ～ 75 mm/ 月で寡雨であった（Fig. 2）。しかし、9 月になると平成 23 年台風 15 号に伴う大雨によって 437 mm/ 月の降雨があった（Fig. 2）。これは平均年降水量の 25% 強に匹敵する。一降雨によりもたらされた降水量から類推すると、2011 年 9 月 20 日前後の台風 15 号に伴う降水が当該試験地の津波被災林土壌の除塩に大きく寄与したものと思われる。

森林の多くは急傾斜地であり、塩害を受けた津波被

災林土壌に対して農地同様の除塩作業を施すことは困難であるが、本研究における津波被災林土壌のモニタリング調査により、自然起源の降雨に伴う土壌からの自然排水によって、津波被災土壌に対して除塩の効果がみられることが明らかとなった。本試験地は津波浸水後背地斜面上にあるスギ林であった。津波浸水を受けた森林は、こうした津波浸水後背地ばかりでなく、海岸前線部の平坦地に広大に成立するクロマツを中心とした海岸林である。海岸林の復旧、再生に向けて、津波被災林の土壌の化学性を広域的、かつ継続的にモニタリングすることで、今後も土壌の化学性の改善状態を随時把握していくことが重要である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、岩手県林業技術センター研究部　成松眞樹氏並びに蓬田英俊氏には試験地の設定や森林所有者の確認などにご高配いただいた。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整、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東北支所　新山馨地域研究監、中村克典博士に懇切なご助言、ご指導を頂いた。これらの方々に深く感謝の意を表する。

本研究は、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」および森林総合研究所運営費交付金プロジェクト「東日本大震災で被災した海岸林の復興技術の高度化」など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る。

引用文献

土じょう部 (1976) 林野土壌の分類 (1975), 林試研報 , 280, 1-28.

本間　啓 (1976)　特殊環境地の植物 , 遺伝 1976 年 2 月号 , 41-46.

河田　弘 (1989)　森林土壌学概論 , 博友社 , 399 pp.

経済企画庁総合開発局 (1975) 国土調査（岩手県）

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　海水流入のうちの実態把握と早期改善　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,（参照 2012-9-8）

南條正巳 (2012) “一般社団法人日本土壌肥料学会　土と肥料の講演会　農耕地土壌における大津波の被害実態と塩害対策の概要”,　http://jssspn.jp/info/nuclear/2012, (参照 2012-9-8)

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，森林総合研究所研究報告，11, 33-42.

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.