

森林総合研究所研究報告

Vol.11-No.2 (No.423)

BULLETIN

of the
Forestry and
Forest Products
Research Institute



June 2012

独立行政法人 森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute

The Chief Editor

篠原 健司 SHINOHARA Kenji (Principal Research Coordinator,FFPRI)

The Vice-Chief Editor

赤間 亮夫 Akama Akio (Forest Radioecology Coordinator,FFPRI)

Editor

立花 敏	TACHIBANA Satoshi (Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)
佐藤 明	SATO Akira (Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture)
飛田 博順	TOBITA Hiroyuki (Department of Plant Ecology,FFPRI)
稲垣 善之	INAGAKI Yoshiyuki (Department of Forest Site Environment,FFPRI)
神崎 菜摘	KANZAKI Natsumi (Department of Forest Microbiology,FFPRI)
佐藤 大樹	SATO Hiroki (Department of Forest Entomology,FFPRI)
村田 仁	MURATA Hitoshi (Department of Applied Microbiology,FFPRI)
毛綱 昌弘	MOZUNA Masahiro (Department of Forest Engineering,FFPRI)
原田 真樹	HARADA Masaki (Department of Wood Engineering,FFPRI)
齋藤 英樹	SAITO Hideki (Department of Forest Management,FFPRI)
溝口 康子	MIZOGUCHI Yasuko (Hokkaido Research Center,FFPRI)
堀野 眞一	HORINO Shinichi (Tohoku Research Center,FFPRI)
黒川 潮	KUROKAWA Ushio (Kansai Research Center,FFPRI)
衣浦 晴生	KINUURA Haruo (Kansai Research Center,FFPRI)
倉本 哲嗣	KURAMOTO Noritsugu (Forest Tree Breeding Center,FFPRI)
秦野 恭典	HATANO Yasunori (Research Information Division,FFPRI)

This journal is indexed in CAB Abstracts.

表紙写真 Photograph in Cover

青森県白神山地津軽峠のブナ
Fagus crenata tree in Shirakami Mountains, Aomori Prefecture.

福島県南会津のブナ林
Fagus crenata forest in Minami-Aizu district, Fukushima Prefecture.

(本文38ページ)
津波が到達し、海水が浸水したスギ林林床の状況(岩手県釜石市)
Forest conditions after seawater inundation with the Heisei Sanriku Massive Tsunami.

目 次

論 文

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

小野 賢二、平井 敬三 33

ヤツバキクイムシの発育への温度と日長の影響

上田 明良、尾崎 研一 43

キバチ科 2 種 (ヒゲジロキバチ・オナガキバチ) における
 α ピネンへの誘引反応の違い (英文)

松本 剛史、佐藤 重穂 51

短 報

リグノセルロース分解酵素生産菌のスクリーニング:

Aspergillus tubingensis の生産する酵素によるスギパルプの分解 (英文)

下川 知子、澁谷 源、石原 光朗、山口 宗義、太田 祐子、
宮崎 和弘、池田 努、真柄 謙吾、野尻 昌信 57

菌床栽培エノキタケの害虫イシハラナミキノコバエ

Mycetophila ishiharai Sasakawa (双翅目キノコバエ科)

末吉 昌宏、村上 康明 65

日影森で発生した地すべりの流動化機構の土質力学的検討

岡田 康彦、黒川 潮、浅野 志穂 71

研究資料

東栗駒山ドゾウ沢崩壊地周辺の崩壊発生 1 年後の
崩壊堆積物における侵食と植生回復

小川 泰浩、大丸 裕武、村上 亘、
岡田 康彦、杉田 久志、江坂 文寿 77

CONTENTS

Original article

- Needle discoloration of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) along the Pacific coastline of Sanriku, Japan, after the Heisei Sanriku Massive Tsunami with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake
ONO Kenji and HIRAI Keizo 33
- Influence of temperature and photoperiod on the development of *Ips typographus japonicus* (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae)
UEDA Akira and OZAKI Kenichi 43
- Differential responses to α -pinene of two horntail wasps, *Urocerus antennatus* and *Xeris spectrum* (Hymenoptera: Siricidae)
MATSUMOTO Takeshi and SATO Shigeo 51

Note

- Screening of lignocellulolytic enzyme producers: enzyme system from *Aspergillus tubingensis* for hydrolysis of sugi pulp
SHIMOKAWA Tomoko, SHIBUYA Hajime,
ISHIHARA Mitsuro, YAMAGUCHI Muneyoshi,
OTA Yuko, MIYAZAKI Kazuhiro, IKEDA Tsutomu,
MAGARA Kengo and NOJIRI Masanobu 57
- Mycetophila ishiharai* Sasakawa (Diptera: Mycetophilidae), new pest of *Flammulina velutipes* cultivated on artificial medium
SUEYOSHI Masahiro and MURAKAMI Yasuaki 65
- Examining fluidisation mechanisms of Hikagemori landslide by means of soil tests
OKADA Yasuhiko, KUROKAWA Ushio and ASANO Shiho 71

Research material

- Erosion and vegetation recovery on the landslide deposit one year after the dozou-sawa deep landslide at Mount Higashikurikoma-yama, northeast Japan
OGAWA Yasuhiro, DAIMARU Hiromu,
MURAKAMI Wataru, OKADA Yasuhiko,
SUGITA Hisashi and ESAKA Fumitoshi 77

論文 (Original article)

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

小野 賢二^{1)*}、平井 敬三^{1),2)}

Needle discoloration of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) along the Pacific coastline of Sanriku, Japan, after the Heisei Sanriku Massive Tsunami with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

Kenji ONO^{1)*} and Keizo HIRAI^{1),2)}

Abstract

The Heisei Sanriku Massive Tsunami caused by the earthquake in 2011 ruined many forests along the Tohoku Pacific coast. Cedar (*Cryptomeria japonica*) forests along this remote coastline began to show damage over time, although they seemed to be healthy and thriving immediately after the tsunami. Specifically, their needles became discolored turning from green to reddish-brown starting in mid-May 2011, probably being caused by sea salt injury resulting from seawater inundation. We explored the distribution of the salt injury in cedar forests along the Sanriku coastline and tried to determine the cause of the damage. The extent of cedar needle discoloration seen in the forests was fundamentally consistent with seawater-inundated areas. In the seawater-inundated cedar forest at Kamaishi-City, Iwate-Pref., the tsunami wave carried in and deposited sea sand onto the forest floor and washed away the A_0 layers and surface soils. Seawater inundation caused incremental changes to the pH(H_2O), EC, and concentration of water-soluble and exchangeable Na^+ in these forest soils. We assumed the dissolution of superfluous Na^+ in soil water and the related changes in soil chemistry caused the sea salt injury seen in planted trees in these seawater-inundated cedar forests. In general, the causes of salt injury to soil were excessive absorption and accumulation of Na^+ in the plant body, competitive inhibition of nutrient uptake by Na^+ , and a decrease in the suction potential caused by low osmotic pressure between the soil matrix and plant roots. Consequently, cedar needles in seawater-inundated forests turned brownish after fresh needle expansion. It is difficult to remove sea salt from these forested lands because most Japanese forests grow in steeply sloped mountainous areas. However, high levels of precipitation in Japan may remove sea salt from tsunami-created saline soils. Therefore, reforestation efforts in seawater-inundated forests along the Sanriku coastal areas will require continued soil chemistry monitoring.

Key words : The Heisei Sanriku Massive Tsunami, saline soil, salt injury, seawater inundation, degree of cation saturation

要旨

2011年3月の東日本大震災では太平洋沿岸に大津波が襲来し沿岸の海岸林をほぼ壊滅させた。また震災直後に健全だった津波浸水後背地スギ林では時間経過と共に各地で針葉が赤褐化する塩害に起因すると考えられる現象が拡大した。ここでは三陸沿岸津波浸水後背地のスギ針葉変色の実態を現地踏査により把握しその原因を検討した。三陸沿岸の塩害範囲は津波到達箇所と概ね一致した。但し針葉の赤褐化は5月上旬まで認められなかったことから休眠期から生育期に移行した後に変色が顕在化したとみられた。スギ林の津波到達箇所では土壌への海砂堆積や混入、土壌pHやECの上昇、水溶性および交換性 Na^+ 濃度の極端な増加が認められた。この結果は、海水が浸水した土壌には Na^+ が過剰に付加され、それが塩として集積したことを示唆する。つまり土壌に過剰付加された Na^+ は、そこに生育する樹木体内への塩分の過剰吸収、過剰塩分による養分の拮抗的吸収阻害、樹体内外の浸透圧差減少による水ポテンシャルの低下を誘引し、結果としてスギの針葉が変色した可能性が考えられた。日本の森林の多くは急傾斜地にあり、土壌改良材施用、耕起・砕土・弾丸暗渠施工などの除塩作業を農地同様に実施することは困難であるが、梅雨や台風等のまとまった降雨によって除塩を期待できる可能性は残る。津波浸水地における森林再生に向けて森林土壌の継続調査による土壌化学性の改善状況を把握することが重要となる。

キーワード：平成三陸大津波、塩害土壌、堆砂、海水浸水、塩基飽和度

原稿受付：平成23年11月23日 Received 23 November 2011 原稿受理：平成24年2月6日 Accepted 6 February 2012

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

2) 現所属：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字鍋屋敷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日本太平洋沖地震では、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。三陸海岸は青森県南東部から宮城県北東部にわたる、総延長 600 km 余のリアス式海岸である。複雑に入り組む湾が連なる海岸であるため、津波の最大遡上高は 40.5m (岩手県宮古市重茂半島) にも及んだ (全国津波合同調査チーム, 2011)。大津波の発生は防潮・防砂・防風林としての機能を持つ海岸前縁部のアカマツ・クロマツ海岸林をはじめ、東日本太平洋沿岸の森林に壊滅的な被害をもたらした。この地震による我が国森林の被害面積は、2011 年 10 月 17 日現在、1,065 ha にも及んだ (林野庁, 2011)。

10 m 超の大津波が広範囲に押し寄せた三陸沿岸地域では、海岸前縁部における海岸林の直接的な被害に加え、その後背地に位置する森林でも、時間経過に伴って針葉変色や萎凋が現れた (中村, 2011)。すなわち、極端な樹体の損傷を受けずに、津波直後の 3～4 月において外見上健全とみられたスギやアカマツ、クロマツ (両種を区別しない場合、あわせてマツと略す) の生立木においても、休眠期から生育期への移行に伴い、その針葉が赤褐色化する現象が沿岸各地で確認された (例えば、宮城県南三陸町のスギ林 (河北新報社, 2011)、青森県八戸市のマツ林 (中村, 2011) など)。これらの被災林

では、土壌が海水によって冠水し、さらにその地表面に海砂が堆積しており、大津波がもたらした塩害に起因した現象であると推察される。

津波による土壌塩害の実態や原因については、農地を対象に研究がなされ、古くからその知見は蓄積されてきた (例えば、米田, 1958a, b, c など)。土壌への海水浸水や地表面への海砂の堆積は、生育する樹木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水ポテンシャルの低下 (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ている。つまり、これらの要因は津波被災林において樹木の萎凋や生育不良、ひいては枯死の原因となり、今後も津波による塩害被災林の拡大が懸念される。

本論では、三陸沿岸地域における森林を踏査した結果を検討し、津波によって被害を受けた土壌や樹木の塩害の実態を報告する。海岸林を構成する最も主要なマツ林の津波被害調査は、震災直後から多くの実地調査が行われ、既に報告されている (例えば、中村, 2011; 星野, 2011; 坂本, 2011)。したがって、マツ林の被害実態の報告はこれらの既往の調査に委ねることとし、本論では、津波浸水後背地の主な構成種であるスギ林における塩害実態に焦点を絞り、津波による海水浸水や海砂の堆積が土壌の化学的性質にもたらした影響について検討し、針葉の赤褐色化現象との関連を考察することとした。

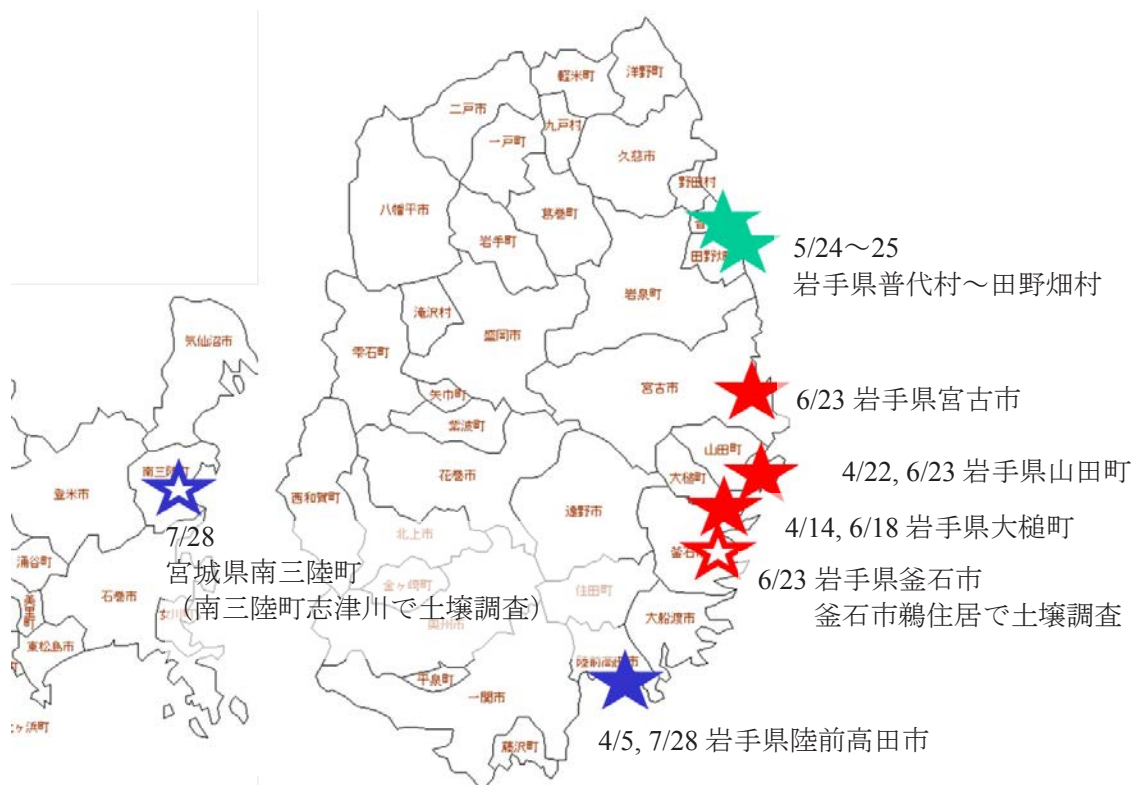


図 1. 本研究における調査箇所および調査日時

Figure 1. Studying sites and dates in the present study.

地図は <http://www.8toch.net/gappei/map.cgi> より借用。白抜きは土壌採取箇所、塗り潰しは目視による林分状況の観察のみ。

2. 調査地および方法

1) 踏査地域および現地調査法の概要

津波浸水後背地のスギ林に生じた塩害実態は、三陸沿岸を走る国道45号線沿いを中心として、目視によって針葉の赤褐色変化の有無を確認した。調査日時および調査地点はFig. 1に示した。

2011年6月以降の調査時において、同一斜面上で針葉の赤褐色変化が確認された林分と確認されなかった林分が現存した釜石市および南三陸町のスギ林において、ライントランセクトを設定し(Fig. 2)、2m毎に土壌表層部の状態(土性・土色・下層植生・被覆度・堆砂の有無・津波到達の有無)を観察し、スギ針葉変色の発生との関連を検討した。さらに各調査地点において表層土壌(0-10 cm)およびその上に堆積した海砂(堆砂)を採取して持ち帰り、化学性の分析に供した。

2) 土壌の化学性の分析

土壌のpH(H₂O)は採取直後の新鮮な堆砂および表層土壌を用いて、風乾前に乾土10gに対して水25mlの割合になるように脱イオン水を加えて懸濁し、ガラ

ス電極法により測定した。

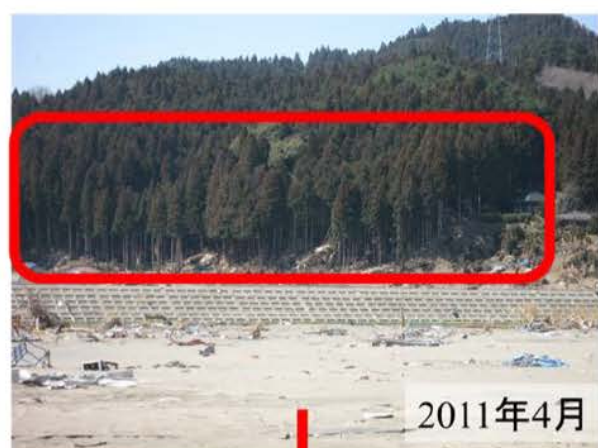
水溶性陽イオン濃度に関して、採取直後の新鮮な堆砂および表層土壌に対して、風乾前に乾土10gに対して水25mlとなるよう脱イオン水を加えて一時間振盪し、その懸濁液を吸引濾過して水抽出液を得、得られた水抽出液における陽イオン濃度を、原子吸光法によって測定した。

土壌懸濁液の電気伝導度(Electrical Conductivity, 以下、「EC」という)は、風乾試料を2mmメッシュの円孔篩を用いて篩別し、1:5水浸出法に準じて測定した。さらに、1M酢酸アンモニウム吸引抽出(peeche法)による陽イオン交換容量(Cation Exchangeable Capacity, 以下、「CEC」という)をインドフェノール青法で、交換性陽イオン量を原子吸光法によって分析した。

3. 結果

1) 三陸沿岸地域スギ林における塩害状況

三陸沿岸地域の現地調査では、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



陸前高田市



大槌町

写真1. 塩害によるスギ針葉の赤褐色化現象の進行

Photo 1. Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) forests changed needle color being due to the sea salt injury with the Heisei Sanriku Massive Tsunami.

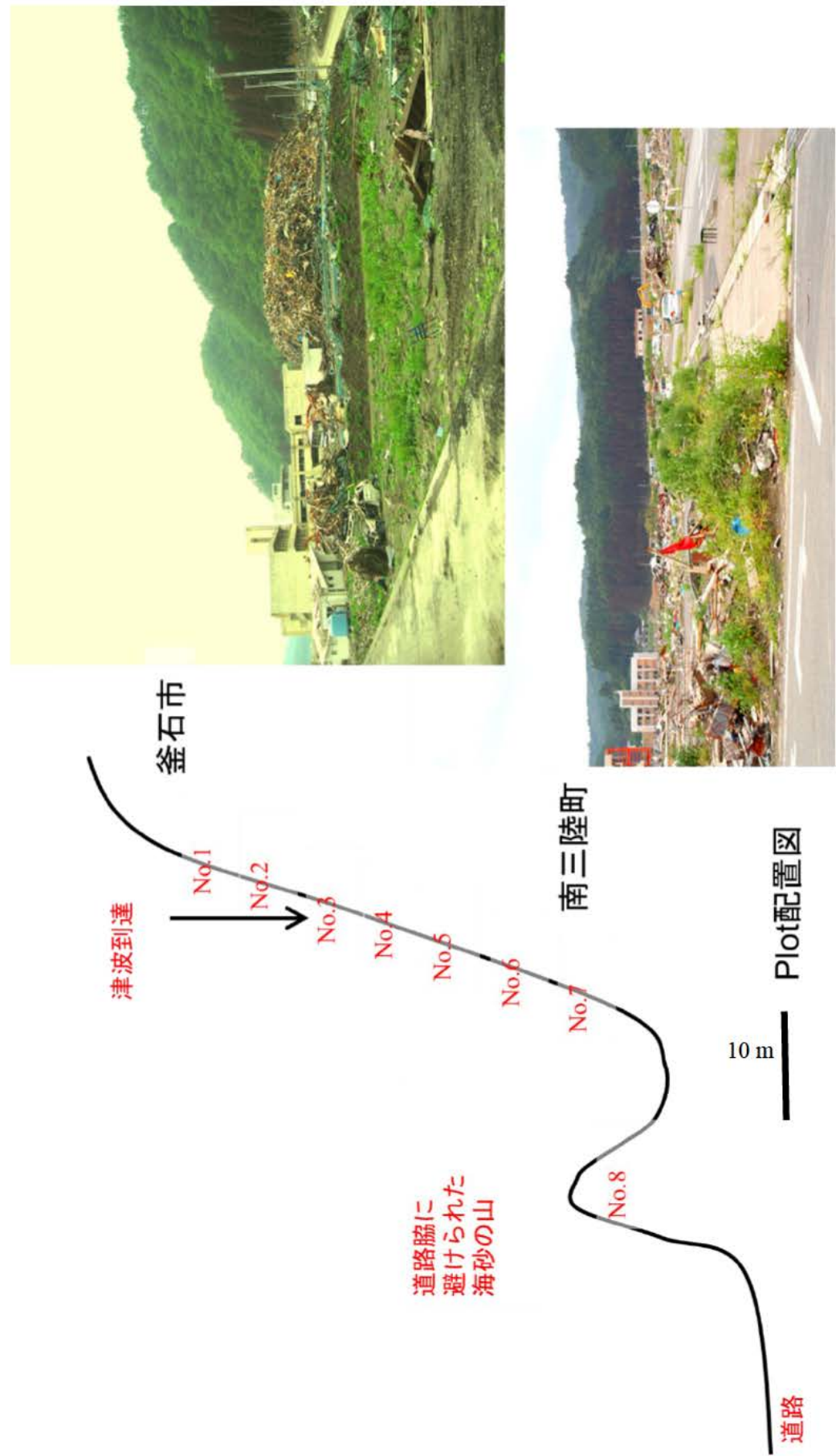


図2. 調査地の遠景とライントランセクト配置
Figure 2. Distant views of the study sites and line transect arrangement

箇所と一致していた。ただし、スギ針葉の赤褐変化は2011年4月には認められなかった(Photo 1)ことから、例年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(Photo 2)。

2) 津波到達、海水浸水を受けたスギ林の林床や土壌の状態

大槌湾に面した釜石市鶴住居町における津波浸水後背地スギ林では、大津波の塩害によるとみられるスギ針葉の赤褐変化が顕在化した林分と健全林分が同一斜面上に存在した。そこで、2011年6月23日に、斜面方向にライントランセクトを設定し、2 m 毎に土壌断面表層を観察し、津波到達の有無によるスギ針葉の赤褐変化の状況、林床や土壌の状態の違いを比較した(Table 1)。本調査地の土壌型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った(経済企画庁総合開発局, 1975)。本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。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、海砂の堆積、表層土壌への海砂混入が認められた(Photos 3, 4)。また津波到達箇所ではスギ針葉の赤褐色変化が認められた。斜面上部の津波未到達箇所の立木は針葉の変色はなく、健全であった(Table 1)。津波到達、海水浸水

を受けた宮城県南三陸町のスギ人工林においても、釜石市と同様、スギ針葉の赤褐変化や下層植生や A₀ 層の剥離、表層土壌洗掘による樹木細根の表出、海砂の堆積、表層土壌への海砂混入など、同様事象が観察された(図表省略)。

3) 堆砂および表層土壌の pH (H₂O) およびそれらの水抽出液中の陽イオン濃度

2011年6月に釜石市のスギ人工林において採取した未風乾新鮮表層土壌の pH (H₂O) は、津波未到達箇所では 4.7 ~ 5.3 であったが、津波が到達した箇所では 5.3 ~ 5.7、堆砂があった場所では 6.0 ~ 6.2 (堆砂層の pH (H₂O) は 6.4 ~ 6.7) に上昇した(Table 2)。また津波未到達箇所では 4 ~ 9 mg L⁻¹ であった水抽出液中 Na⁺ 濃度は、津波到達箇所では 26 ~ 56 mg L⁻¹ (堆砂層では 20 ~ 39 mg L⁻¹) と著しく増加した(Table 2)。道路脇に堆積していた海砂における水抽出液や、海水の pH (H₂O) および Na⁺ 濃度はそれぞれ 7.9 と 232 mg L⁻¹ (Table 2)、8.0 と 1.1 g L⁻¹ (海水の一般参考値: 松井・一国, 1970) であり、いずれも表層土壌の値より高く、津波到達箇所の土壌は海水浸水による海水の影響を強く受けていた。一方、表層土壌の Ca²⁺ と Mg²⁺ 濃度は、津波未到達箇所ではそれぞれ 4.0 ~ 5.2 と 1.5 ~ 1.8 mg L⁻¹ であったが、到達箇所ではそれぞれ 0.0 ~ 0.3 と 0.3 ~ 0.9 mg L⁻¹ に大きく減少した(Table 2)。K⁺ 濃度は津波到達の有無にかかわらず、4.7 ~ 8.6 mg L⁻¹ の範囲にあり、海水の影響はほとんどみられなかった(Table 2)。

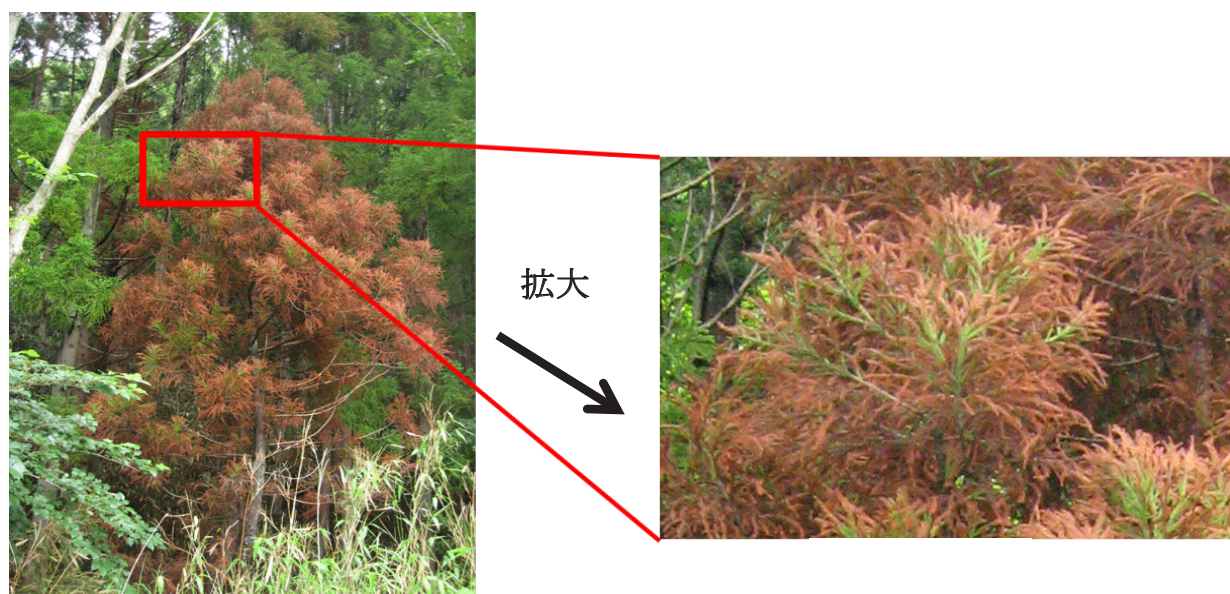


写真2. スギ針葉の赤褐変化の状況と当年新たに伸長した針葉の変色(岩手県宮古市)

Photo 2. Discoloration of young needles in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*).

拡大したスギの葉の写真(右)中の針葉先端の変色部分が当年新たに伸長した針葉

表 1. 岩手県釜石市スギ林における、津波による海水浸水の林床や表層土壌への影響と針葉変色の状況

Table 1. The states of forest floor, surface soil, and needle discoloration in the seawater-inundated cedar forest at Kamaishi City, Iwate Prefecture.

採取地点No.	1	2	3	4	5	6	7	8
斜度	34°	42°	38°	48°	38°	30°	30°	0°
津波到達	無	無	有(境界)	有	有	有	有	有
針葉の変色	無	無	無	一部の枝	全枝	全枝	全枝	--
表層土壌への海砂混入	無	無	有	有	有	有	有	有
下層植生	有	有	無	無	無	無	無	--
A ₀ 層	有	有	有	まれ	まれ	まれ	まれ	--
林床の被覆度*	>80%	>80%	70%	10%	10%	10%	5%	--
堆砂厚(cm)	0	0	0	0	0	0.5	4	
A層土性	壤土	壤土	壤土	壤土	壤土	壤土	壤土	砂
土色								
堆砂層						7.5Y2/1	7.5Y3/2	7.5Y3/1
A層	7.5YR2/1	7.5YR2/1	7.5YR2/2	7.5YR2/1	10YR1.7/1	10YR2/1	10YR2/1	

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

表 2. 各調査地点における土壌懸濁液の pH(H₂O)、および水抽出液中の陽イオン濃度Table 2. The values of pH(H₂O) and the concentrations of water-soluble cations in the soil suspension of each sampling point of seawater-inundated cedar forest.

採取地点No.	1	2	3	4	5	6	7	8	海水*
津波到達	無	無	有(境界)	有	有	有	有	有	
pH(H ₂ O)									8
堆砂層						6.37	6.68	7.94	
A層	4.74	5.25	5.28	5.70	5.44	5.95	6.21		
Ca (mg L ⁻¹ 抽出溶液)									40
堆砂層						1.1	0.2	25.1	
A層	5.2	4.0	0.3	0.0	0.1	0.1	0.1		
Mg (mg L ⁻¹ 抽出溶液)									127
堆砂層						1.7	0.5	16.1	
A層	1.8	1.5	0.9	0.3	0.6	0.6	0.5		
Na (mg L ⁻¹ 抽出溶液)									1056
堆砂層						38.9	19.7	232.3	
A層	4.2	8.8	33.3	26.0	43.4	55.7	31.2		
K (mg L ⁻¹ 抽出溶液)									38
堆砂層						25.5	7.0	33.4	
A層	4.7	6.0	6.6	6.7	7.3	8.6	5.4		

*一般参考値 (松井義人・一國雅巳 訳 メイスイ一般地球科学 岩波書店 1970より)



写真 3. 津波が到達し、海水が浸水したスギ林林床の状況 (岩手県釜石市)

Photo 3. Forest conditions after seawater inundation with the Heisei Sanriku Massive Tsunami.

No.3



林床

No.7



林床



土壌断面



土壌断面

写真 4. 津波到達箇所（境界）(No.3) および津波到達箇所（No.7）の表層土壌および林床の様子
Photo 4. Conditions of forest floor and soil surface at the sampling points (No. 3 & 7) with seawater inundation.

4) 表層土壌の EC、CEC および交換性陽イオンの濃度

表層土壌の 1:5 水浸出法による土壌懸濁液の EC は、津波未到達箇所では $0.14 \sim 0.16 \text{ dS m}^{-1}$ 、津波が到達した箇所では堆砂無しの箇所では $0.10 \sim 0.19$ 、堆砂有りの箇所では $0.25 \sim 0.33 \text{ dS m}^{-1}$ （堆砂層では $0.22 \sim 0.93 \text{ dS m}^{-1}$ ）であった（Table 3）。道路脇に堆積していた海砂の EC は 0.56 dS m^{-1} で、林床の堆砂や表層土壌に比べ、著しく高い値を示した（Table 3）。

peechn 法に準じて求めた表層土壌の交換性 Na^+ 濃度は、津波未到達箇所では $0.1 \sim 0.4 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$ 乾土であったが、津波到達箇所では $1.7 \sim 6.8 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$ 乾

土（斜面下部の堆砂は $1.7 \sim 3.4 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$ 乾土）と未到達箇所の $4 \sim 60$ 倍超の大きな値を示した（Table 3）。一方で、表層土壌の CEC、交換性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} および K^+ 濃度はそれぞれ $44 \sim 64$ 、 $1.2 \sim 9.7$ 、 $1.4 \sim 6.5 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$ 乾土であり、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。また、津波未到達箇所における塩基飽和度は $18 \sim 23\%$ であり、その $6 \sim 7$ 割は交換性 Ca^{2+} に起因するものであった（Table 3）。一方、津波到達箇所の塩基飽和度は堆砂がなかった箇所では $11 \sim 16\%$ と低めの値を示したのに対し、斜面下部の堆砂があった

表 3. 各調査地点における EC、CEC、交換性陽イオン濃度、および各交換性塩基飽和度

Table 2. The values of EC, CEC, exchangeable cation concentration, and cation saturation percentage in each sampling point of seawater-inundated cedar forest.

採取地点No.	1	2	3	4	5	6	7	8
津波到達	無	無	有(境界)	有	有	有	有	有
EC (dS m ⁻¹)*								
堆砂層						0.22	0.93	0.56
A層	0.14	0.16	0.15	0.10	0.19	0.33	0.25	
塩基交換容量 (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)**								
堆砂層						23	12	7
0-10 cm	52	64	48	45	50	44	55	
交換性Ca ²⁺ 濃度 (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)**								
堆砂層						5.1	2.6	4.8
0-10 cm	7.2	9.7	3.0	1.2	2.1	1.6	6.8	
交換性Mg ²⁺ 濃度 (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)**								
堆砂層						5.1	2.5	3.0
0-10 cm	1.9	3.8	1.8	1.4	2.2	2.2	6.5	
交換性Na ⁺ 濃度 (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)**								
堆砂層						1.7	1.0	3.4
0-10 cm	0.1	0.4	1.7	1.8	2.8	3.4	6.8	
交換性K ⁺ 濃度 (cmol _c kg ⁻¹ 乾土)**								
堆砂層						0.67	0.40	0.55
0-10 cm	0.32	0.53	0.46	0.47	0.55	0.59	0.65	
交換性Ca ²⁺ 飽和度(%) (=交換性Ca ²⁺ /CEC×100)								
堆砂層						23	22	68
0-10 cm	13.9	15.2	6.3	2.8	4.3	3.5	13	
交換性Mg ²⁺ 飽和度(%) (=交換性Mg ²⁺ /CEC×100)								
堆砂層						22	21	43
0-10 cm	3.7	5.9	3.7	3.2	4.5	5.0	12	
交換性Na ⁺ 飽和度(%) (=交換性Na ⁺ /CEC×100)								
堆砂層						7.6	9	48
0-10 cm	0.2	0.7	3.7	4.0	5.6	7.6	12	
交換性K ⁺ 飽和度(%) (=交換性K ⁺ /CEC×100)								
堆砂層						3.0	3.4	7.8
0-10 cm	0.6	0.8	1.0	1.1	1.1	1.3	1.2	
全塩基飽和度(%) (=交換性Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ /CEC)								
堆砂層						55	55	167
0-10 cm	18	23	15	11	15	17	38	

*1:5水浸出法

**peech法

箇所では 17 ~ 38% (堆砂は 69 ~ 209%) と高めの値を示した (Table 3)。津波到達箇所の土壌における塩基飽和度は交換性 Ca²⁺ と交換性 Na⁺ に起因しており (ともに 2 ~ 4 割程度の寄与率)、表層土壌の化学性は津波到達による海水起源の Na⁺ の影響を強く受けたことが明らかとなった。

4. 考察

1) 浸水後背地におけるスギ林土壌の化学性への津波の影響

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)。本研究における三陸沿岸地域津波浸水後背地の現地踏査でも、塩害によるとみられるスギ針葉赤褐色化の範囲は、津波到達箇所との一致が確認できた。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箇所でのみ認められ、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。

また、津波が到達した岩手県釜石市におけるスギ林

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。すなわち、津波到達により土壌の pH (H_2O) や EC、水溶性および交換性 Na^+ 濃度の上昇が認められた。こうした傾向は仙台南東部における津波被災農地（水田）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 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ の順であるといわれている（河田, 1989）が、津波到達、海水浸水による過剰な Na^+ の付加によりそのバランスは崩れていた。水溶性および交換性 Ca^{2+} 濃度は津波到達によって大きく減少した（Tables 2, 3）。これは、津波が到達し、海水が地表面から地中へ浸水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 Ca^{2+} と交換、遊離され、土壌から洗脱したことに起因したと考えられる。 Mg^{2+} および K^+ に関して水溶性、交換性イオン濃度は、津波到達の有無による変化は認められなかった。

2) 津波浸水後背地における塩害の原因

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, 1958 a, 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、土壌懸濁液の EC で、 0.7 dS m^{-1} （熊本県農政部, 1999）、 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）、 0.5 dS m^{-1} （中田, 2011）、 $0.3 \sim 0.6 \text{ dS m}^{-1}$ （JA 全農, 2011）とされている。本研究における岩手県釜石市のスギ林では、津波到達箇所の土壌の EC は未到達箇所に比べ、上昇は認められたものの、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（Table 2）、農地土壌の指標では、作物の生育上問題のない値を示した。樹木の耐塩性の面から考慮すると、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）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。

土壌における交換性塩基の状態を表す場合に、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によって指標することが多い。一般には、交換性塩基の中で最も主要な塩基である Ca^{2+} と Mg^{2+} を用いてその飽和度で指標する場合が多く（河田, 1989）、日本の森林土壌における Ca^{2+} 飽和度は $\text{tr.} \sim 60\%$ 、 Mg^{2+} 飽和度は $\text{tr.} \sim 20\%$ 程度である（河田・小島,

1976）。本研究の調査地、岩手県釜石市スギ林における Ca^{2+} と Mg^{2+} 飽和度は津波到達の有無に関わらずこの範囲であった（Table 3）。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 $5 \sim 60$ 倍強に上昇した（Table 3）。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 $4 \sim 60$ 倍強の値を示していた。

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変色させた可能性を示唆した。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を行うことのできる農地と異なり、森林の多くは急傾斜地であり、塩害土壌に対して除塩作業を施すことが困難である。しかし、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雨水の供給により、自然に除塩が進む可能性も考えられる。再造林、再植栽に向け、海水浸水を受けた森林土壌の化学性を継続的にモニタリングすることで、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と考えられる。

弔意・謝辞

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、お悔やみ申し上げる。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、蓬田英俊氏には試験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東北支所 山本幸一支所長、中北理産学官連携推進調整監、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、森林総合研究所運営費交付金「G 1 1 3：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、および農林水産省平成 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」によって行われたものである。

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.
- 星野大介 (2011) 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, 日本森林学会誌 (投稿中).
- 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 年度日本土壌肥料学会東北支部会岩手大会講演要旨集, 17.
- JA 全農 (2011) “東北地方太平洋沖井地震対策: 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', (参照 2011-11-22)
- 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 (1975) 国土調査 (岩手県)
- 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.s.affrc.go.jp/docs/pdf/engai_sakumotu_higai_kumamoto_pref.pdf, (参照 2011-11-22)
- 松井義人・一国雅巳 (1970) メイスン一般地球科学, 岩波書店, 402pp.
- 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/ocu6bi00000000io-att/a1305266067652.pdf>, (参照 2011-11-22)
- 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>
- 林野庁 (2011) “東日本大震災に関する情報. 林野関係被害”, http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/rinya_110401_html1.html, (参照 2011-11-22)
- 坂本正巳 (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>, (参照 2011-11-22)
- 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.
- 全国津波合同調査チーム (2011) 朝日新聞朝刊記事, 2011 年 5 月 30 日, 朝日新聞社.

論文 (Original article)

ヤツバキクイムシの発育への温度と日長の影響

上田 明良^{1)*}、尾崎 研一¹⁾

Influence of temperature and photoperiod on the development of *Ips typographus japonicus* (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae)

Akira UEDA^{1)*} and Kenichi OZAKI¹⁾

Abstract

To evaluate the effects of temperature and photoperiod on the developmental of *Ips typographus japonicus* (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae), we reared individuals in bolts of *Picea jezoensis* upon which eggs had been laid in the field in June 2010. Bolts were placed in the laboratory under six temperature regimes (16, 18, 20, 22, 24, 26°C) and with a photoperiod of 15:9 L:D (LD) and at 22°C with a photoperiod of 10:14 L:D (SD). We recorded the date of adult eclosion and emergence for the first generation. The developmental zero and the effective cumulative temperatures under the LD regime estimated using 'Ikemoto and Takai method', were 5.1°C and 412.1 degree days from egg deposition to adult eclosion, 12.7°C and 141.0 degree days from adult eclosion to adult emergence from the bolts, and 9.8°C and 481.9 degree days for the whole developmental period (egg deposition to adult emergence). The developmental rates of the insects reared under 22°C were same between LD and SD, indicating that photoperiod has no effect on the developmental period of the insects during the first generation. Next, adults that had eclosed from the bolts at 22°C and under the two photoperiod regimes were allowed to deposit eggs on new bolts so that we could assess development of the second generation reared under the same conditions as those from the first generation. The developmental rates of the insects reared under LD regime did not differ between the first and second generation. Of those reared under the SD regime, only 2 second-generation adults eclosed and none emerged, suggesting that adults from the first generation had entered reproductive diapause and laid fewer eggs than those reared under the LD regime.

Key words : Diapause, Photoperiod, Developmental rate, Developmental zero, *Ips typographus japonicus*, Effective cumulative temperature

要旨

ヤツバキクイムシ (*Ips typographus japonicus*) の発育に対する温度と日長の効果を調べるために、2010年6月に野外でヤツバキクイムシをエゾマツ丸太に産卵させ、飼育した。丸太を6温度条件(16、18、20、22、24、26°C)下の長日(15:9 L:D)、および22°C短日(10:14 L:D)に置いて、第1世代の羽化日と脱出日を記録した。第1世代の長日下における産卵から羽化まで、および羽化から脱出までの期間のIkemoto and Takai法による発育ゼロ点と有効積算温度は、それぞれ5.1°C、412.1日度と12.7°C、141.0日度で、全発育全期間(産卵から脱出)では9.8°C、481.9日度であった。22°C下で飼育では、発育速度が長日と短日で同じであったことから、日長は第1世代の発育期間に影響しないと考えられた。次に、22°C長日と短日で羽化した第1世代成虫を、それぞれ発育したのと同じ条件下で新しい丸太に産卵させ、第2世代の発育を観察した。長日下の飼育では、発育速度に第1世代と第2世代の間の違いはなかった。短日下の飼育では、2個体が羽化しただけで、脱出はみられなかったことから、22°C短日下で羽化した第1世代は生殖休眠していて、長日下よりも産卵数が少なかったと考えられた。

キーワード: 休眠、日長、発育速度、発育ゼロ点、ヤツバキクイムシ、有効積算温度

1. はじめに

地球温暖化(以下温暖化と略す)は、昆虫の分布、発育、個体群密度、寄主—昆虫—寄生者間の相互作用等に大きく影響する(桐谷・湯川, 2010)。たとえば、1990年以降の北米大陸西部ではクイムシ類(甲虫目ゾウムシ科クイムシ亜科: Coleoptera,

Curculionidae, Scolytinae)の大発生による針葉樹枯死被害が生じているが、その原因のひとつに温暖化が挙げられている(Raffa et al., 2008)。そのうち、アラスカとこれに隣接するカナダ北西部での *Dendroctonus ruffipennis* によるトウヒ類の被害は、伐採や火事の減少による木の肥大および温暖化が主要因と考えられて

原稿受付: 平成23年11月28日 Received 28 November 2011 原稿受理: 平成24年2月24日 Accepted 24 February 2012

1) 森林総合研究所北海道支所 Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* 現住所: 森林総合研究所九州支所 〒860-0862 熊本市黒髪4-11-16, present address: Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, 4-11-16 Kurokami, Kumamoto 860-0862, Japan; e-mail: akira@ffpri.affrc.go.jp

いる (Berg et al., 2006)。すなわち、木のサイズが大きくなり *D. ruffipennis* の加害に適した木の密度が高まったことと (Berg et al., 2006)、温暖化により、従来は2年1化だったものが1年1化へと変わり、増殖速度と分散速度が2倍になったことが原因と考えられている (Hansen and Bentz, 2003; Berg et al., 2006)。また、高温と乾燥による寄主の感受性増加も、被害拡大に影響していると考えられている (Barber et al., 2000)。

一方、我が国ではキクイムシ亜科による最も大きな針葉樹枯死被害は、ヤツバキクイムシ (*Ips typographus japonicus*) とカラマツヤツバキクイムシ (*Ips subelongatus*) によるもので、前者がトウヒ類 (エゾマツ、アカエゾマツなど)、後者がカラマツ類 (カラマツ、グイマツなど) を枯死させる (山口ら, 1963; 小泉, 1977, 1990; 吉田, 1986; 中山ら, 1991; 上田, 2006 など)。ヤツバキクイムシは年1~2化、カラマツヤツバキクイムシは年1~3化で、1年の世代数は気温の影響をうけると考えられている (吉田, 1986; 小泉, 1990)。このことから、今後、温暖化によって世代数が増加することで、被害の急速な拡大が懸念される。これを予測するには、ヤツバキクイムシとカラマツヤツバキクイムシの飼育実験をとおした発育ゼロ点と有効積算温度の推定が必要となる (桐谷・湯川, 2010)。

これら2種の産卵から成虫の羽化までの発育ゼロ点と有効積算温度について、ヤツバキクイムシのユーラシア大陸亜種であるタイリクヤツバキクイムシ (*Ips typographus typographus*) とカラマツヤツバキクイムシにおいて、直線回帰による解析が行われている (Wermelinger and Seifert, 1998; 鈴木・今田, 1993)。しかし、ヤツバキクイムシ、タイリクヤツバキクイムシとカラマツヤツバキクイムシは、いずれも羽化後しばらくの間樹木内に留まって摂食を行ったのち脱出するため、年間世代数の推定には、後食期間 (羽化成虫が樹木から脱出するまでの期間) を含めた全発育期間の発育ゼロ点と有効積算温度のデータが必要となる。ところが、これらの後食期間については、タイリクヤツバキクイムシの20°Cと25°Cにおけるデータしかないため (Wermelinger and Seifert, 1998: この論文では発育障害が生じた30°Cのデータが除外されている)、後食期間および全発育期間の発育ゼロ点と有効積算温度は不明である。

一方、発育ゼロ点と有効積算温度以外にも、日長が関与する休眠の発現は、年間世代数に大きく影響する (桐谷・湯川, 2010)。タイリクヤツバキクイムシを短日条件下で飼育した場合、ほとんどの個体が成虫になっても産卵をしないで休眠に入ることが知られている (Schopf, 1989)。このことから、我が国のヤツバキクイムシとカラマツヤツバキクイムシも、短日下では生殖休眠する可能性がある。そこで、本研究では、ヤツ

バキクイムシを様々な温度条件下で飼育し、産卵から脱出までの期間 (= 全発育期間) の発育ゼロ点と有効積算温度をもとめた。また、ヤツバキクイムシを22°C長日と短日条件下で累代飼育し、生殖休眠するかどうかを確かめた。

2. 方法

2.1 越冬世代成虫の捕獲

ヤツバキクイムシの飼育には、野外で産卵させた丸太を用いた。2010年6月14日に森林総合研究所北海道支所実験林内のエゾマツを伐採して、中央直径7.2~10.7cm、長さ約42cmの丸太を作成し、乾燥を防ぐために両木口をパラフィンで覆った。翌6月15日、北海道森林管理局石狩森林管理署管内の千歳風景林5267林班に丸太を運び、13時20分に井桁状に積み上げた (Fig. 1)。井桁最上部の丸太に、集合フェロモン1袋をガンタッカーで固定した。集合フェロモンには、4cm角の脱脂綿を入れた0.06mm厚のチャック付きポリプロピレン製袋に、(S)-cis-verbenol (純度97%, Bedoukian Research Inc., Danbury, USA) と2-methyl-3-buten-2-ol (純度98%, Alfa Aesar, Ward Hill, USA) の1対100混合液を1cc注いだのち、チャックと熱線で密封したものを用いた。10分間隔で外気温の変化を測定するために、2器のデータロガー (KNラボラトリーズ、ハイグロクロン) を発泡スチロール製どんぶり型容器にアルミ箔を貼り付けた屋根の下にそれぞれつるし、丸太設置場所近くの2本の枝に、データロガーの高さが1.2mになるようにそれぞれくくりつけた。その後、6月21日13時に丸太とデータロガーを回収した。



Fig. 1. ヤツバキクイムシの侵入を導くために6月15日に設置した丸太

最上段の丸太に集合フェロモンの入ったポーチを固定した。2010年6月21日に丸太を、様々な温度・日長条件下の恒温器に移した。

Bolts set on 15 June to induce the attack of the beetles

A pheromone pouch was attached on the uppermost bolt. All bolts were moved to the laboratory on 21 June 2010 and placed into the incubators with various temperatures and photoperiods.

2.2 第1世代の飼育と観察

回収した丸太には野外の越冬世代成虫が穿入しており、これを飼育容器に移し、飼育容器を様々な温度・日長の恒温器に設置して、ヤツバキクイムシを飼育した。飼育容器には、46×31×12cmの透明プラスチック容器を用い、フタには換気用に約8×6cmの窓をあけ、0.5mmメッシュの金網を窓に貼った。容器底には湿らせた水苔を約1cm厚に敷き、その上に丸太3本を並べた。恒温器にはSANYO Growth Cabinet HYS-3500を用いた。この恒温器は横4面のうち3面がガラス張りになっていて、ガラス張り面は37W直管蛍光灯を供えた扉で覆われている。明期には37W直管蛍光灯を3方向から1本ずつ（計3本）照射した。日長は、長日（15:9 L:D）、短日（10:14 L:D）とし、温度は、長日16、18、20、22、24、26℃、短日22℃とした。短日を22℃だけにしたのは、今回は休眠の有無を調べることが目的であることから、多数の温度設定が不要であり、タイリクヤツバキクイムシの飼育適温である20～25℃（Wermelinger and Seifert, 1998）のほぼ中央値を用いたことによる。なお、飼育に用いた丸太数は、各区3本（飼育容器1個分）である。

ヤツバキクイムシはオスが樹皮下に穿った短い坑道へメスが入って交尾したのち、メスが樹皮下に直線状の母孔を掘り進みながら産卵し、孵化した幼虫が母孔と垂直方向に幼虫孔を掘り進みながら内樹皮を摂食する（上田, 2007 など）。すなわち、穿入孔に近いほど早くに産卵されるため、発育が最も進んでいる。そこで、7月11日にカッターナイフを用いて各穿入孔近くの樹皮を丁寧に、樹皮が剥げ落ちないように剥ぎ、第1世代の発育状況を観察した。そして観察後すぐに、すき間があかないように樹皮を元に戻した。観察は、各恒温器で最初の羽化（新成虫）が観察されるまで毎日行い、その日を羽化日とした。羽化日以降は、脱出孔（飛孔）数を記録した。後食期間を求めるには、最初に羽化した個体の脱出日を観察する必要があったが、羽化成虫は様々な方向に内樹皮を掘り進みながら摂食するため坑道が錯綜し、各個体の脱出孔を特定するのは困難であった。また、一旦丸太から出ても坑道に戻る個体があるため、脱出孔があっても脱出個体が観察されないことが多く、実際の脱出が行われたかを判断するのが困難であった。その上、脱出して歩行している成虫のなかには再寄生ために脱出した越冬世代（親世代）が混じっていた。20℃以上の温度条件下で飼育した場合、脱出孔数が10以下の日が3～8日続いた後、多数の脱出孔が短期間に集中して形成され、歩行中の新成虫（暗褐色個体）も同時に観察された。また、16℃と18℃では多数の脱出孔が集中して形成される日はなかったが、脱出孔数が10以上になった日に歩行中の新成虫を初めて観察したことから、本研究では、脱出孔数が10以上になった日を脱出日とした。

2.3 第2世代の飼育と観察

22℃長日と短日で羽化した第1世代成虫を親に用い、第1世代と同様な方法で第2世代の飼育を行った。まず、2010年8月5日に両木口をパラフィンで覆ったエゾマツ丸太6本を用意した。翌8月6日には22℃長日と短日下での第1世代が発育した丸太の樹皮を剥ぎ、樹皮下の成虫を取り出した。取り出した成虫のうち、確実に第1世代成虫と判断できる暗褐色成虫20個体ずつを性別不明のまま、湿らせた水苔を敷き、用意した丸太を3本入れた第1世代用と同じ飼育容器に放した。そして、22℃長日からの成虫を放した容器は第1世代と同じ22℃長日に制御した恒温器に、22℃短日からの成虫を放した容器は22℃短日に制御した恒温器に設置した。8月29日以降、第1世代と同じ方法で第2世代の発育状況と脱出孔数を毎日観察し、羽化日と脱出日を記録した。放虫から101日目の11月15日に全ての丸太の樹皮を剥ぎ、樹皮下の成虫を死亡個体も含めて数えた。また、丸太から脱出し、飼育容器内で死亡していた成虫も数えた。生存個体を全て解剖し、生殖腺の形態から雌雄を判別した。但し、割材時に傷がついた個体の一部は性別判定ができなかった。

2.4 発育ゼロ点と有効積算温度の算出

発育ゼロ点と有効積算温度の算出には、従来行われている発育速度（発育日数の逆数）と温度の関係を直線回帰する方法と、Ikemoto and Takai 法（Ikemoto and Takai, 2000, 以下 Ikemoto 法と略す）を用いた。Ikemoto 法は発育日数と温度の積をY軸変数に、発育日数をX軸変数にとり、両者の間の直線関係を不偏最尤法で推定するものである。この方法では、①分散の不均一性による低温部のデータの過小評価と、②X軸変数に誤差があるデータに回帰分析を行う、という従来の方法の問題点が解消されている。また、発育速度と温度が直線関係にないデータについては、全データだけでなく、直線関係を示す部分についても発育ゼロ点と有効積算温度の推定を行った。

3. 結果

3.1 産卵日の推定

野外に丸太を放置していた期間の気温の変化をFig. 2に示した。丸太放置後数日は曇りまたは雨で、6月17日まではほとんど20℃以下で推移した。6月18日は晴天で気温が上がり、8時間連続して20℃を超えた。翌6月19日も晴天で10時間連続して20℃を超えた。続く6月20・21日は気温が上がらず、両日をとおした平均気温はデータロガー1で16.0℃、ロガー2で15.6℃であった。ヤツバキクイムシの飛翔は20℃を超えた状態が一定時間以上継続すると生じる（福山・吉田, 1982）。このことから、6月18日に、最初のオスの穿入が生じ、6月19日に、最初のメスの穿入・

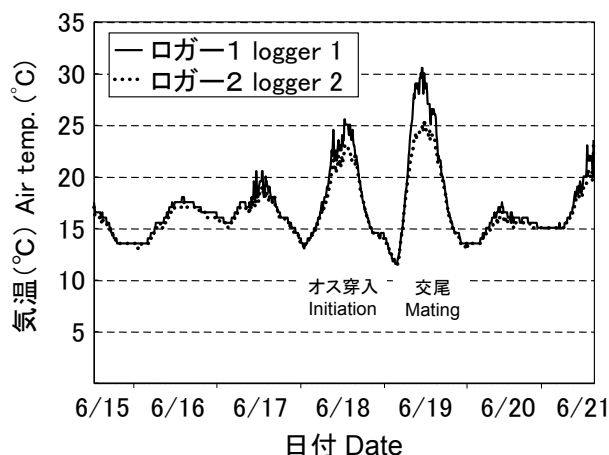


Fig. 2. 野外に丸太を放置した期間の気温変化
Changes in air temperature while the bolts were set in the field

交尾が生じたと判断した。タイリクヤツバキクイムシのメスの穿入後産卵を開始するまでの期間は、15℃下では 2.1 日、20℃下では 1.0 日、25℃下では 1.3 日である (Wermelinger and Seifert, 1999)。このことから、最初の産卵は 6 月 19 日から 2 日後の 6 月 21 日に生じたと判断した。

第 2 世代については、22℃恒温状態であることから、放虫日がオスの穿入、翌日がメスの穿入・交尾、その翌日を最初の産卵日とした。

3.2 ヤツバキクイムシの発育

長日下での第 1 世代の産卵から羽化までの期間は、温度の上昇にともなってほぼ直線的に短くなり、低温下での著しい発育遅延はみられなかった (Fig. 3 左上)。そのため発育速度と温度の間に直線関係がみられた (Fig. 3 左下)。直線回帰による発育ゼロ点は 4.6℃、有効積算温度は 424.4 日度、Ikemoto 法による発育ゼロ点は 5.1℃、有効積算温度は 412.1 日度であった (Table 1)。22℃における産卵から羽化までの期間は、世代、長日と短日に関わりなく、全て同じであった (Fig. 3 左上)。

長日下での第 1 世代の後食期間は、18℃以下で著しい遅延がみられたが、20℃以上では温度による違いがほとんどなかった (Fig. 3 中央上)。そのため、発育速度と温度の間に直線関係がみられなかった (Fig. 3 中央下)。直線回帰による発育ゼロ点は 9.7℃、有効積算温度は 193.2 日度、Ikemoto 法による発育ゼロ点は 12.7℃、有効積算温度は 141.0 日度であった (Table 1)。しかし、著しい発育遅延がみられた 16、18℃のデータを除いた場合には、いずれの方法でも発育ゼロ点はマイナスになり、有効積算温度は大幅に増加した (Table 1)。22℃長日と短日における後食期間は、脱出がみられなかった第 2 世代の短日条件を除くと、日長間、世代間にほとんど違いはなかった (Fig. 3 中央

上)。

第 1 世代長日下の全発育期間は、後食期間と同様に 18℃以下で発育遅延がみられたため (Fig. 3 右上)、発育速度と温度の関係が明確な直線にはならなかった (Fig. 3 右下)。長日条件下の直線回帰による発育ゼロ点は 7.8℃、有効積算温度は 572.7 日度、Ikemoto 法による発育ゼロ点は 9.8℃、有効積算温度は 481.9 日度であった (Table 1)。しかし、16、18℃のデータを除いた場合には、後食期間と同様に、いずれの方法でも発育ゼロ点はマイナスになり、有効積算温度は大幅に増加した (Table 1)。脱出がみられなかった第 2 世代の短日条件下以外の 22℃長日と短日における全発育期間に、ほとんど違いはなかった (Fig. 3 右上)。

第 1 世代成虫の放虫後 101 日目の総成虫数は、長日では 178 個体、短日では 22 個体であった (Table 2)。このうち長日、短日のそれぞれ 20 個体は放虫した第 1 世代であることから、長日では第 2 世代成虫が 158 個体生産されたのに対し、短日では 2 個体だけであった。性判別できた個体による性比は、ほぼ 1 : 1 であった (Table 2)。長日では、死亡個体が樹皮下で 52 個体、丸太外で 19 個体、合計 71 個体であったのに対し、短日では丸太外に 1 個体みられただけであった (Table 2)。短日では、ほとんどの個体が越冬孔と思われる不規則な坑道内に生息していた。

4. 考察

まず、産卵から羽化までの発育ゼロ点と有効積算温度についてみると、タイリクヤツバキクイムシでは、樹皮をアクリル板で挟んだ飼育容器を用いて、各個体の発育を直接観察することで、直線回帰による発育ゼロ点と有効積算温度が、それぞれ 8.3℃、334.2 日度と算出されている (Wermelinger and Seifert, 1998)。同じ飼育方法でカラマツヤツバキクイムシを直接観察した研究では、11.3℃と 243.3 日度であった (鈴木・今田, 1993)。今回のヤツバキクイムシの同じ期間の発育ゼロ点はこれらよりも低く、有効積算温度は高くなった (4.6℃と 424.4 日度)。発育速度をみると、タイリクヤツバキクイムシは、15℃で 0.021、20℃で 0.035、25℃で 0.051 (Wermelinger and Seifert, 1998)、カラマツヤツバキクイムシでは 16℃で 0.021、19℃で 0.024、22℃で 0.043、25℃で 0.044 (鈴木・今田, 1993)、今回のヤツバキクイムシでは 16℃で 0.027、18℃で 0.030、20℃で 0.037、22℃で 0.042、24℃で 0.045、26℃で 0.050 であった。これらの結果をみると、20℃以上ではタイリクヤツバキクイムシ、カラマツヤツバキクイムシと今回のヤツバキクイムシの間で発育速度に大きな差はないが、20℃未満の低温域では今回のヤツバキクイムシの発育速度が速いことがわかる。一般に、昆虫の発育は低温域の方が高温域よりも期間のばらつきが大きい (池本・高井, 2001)。そのた

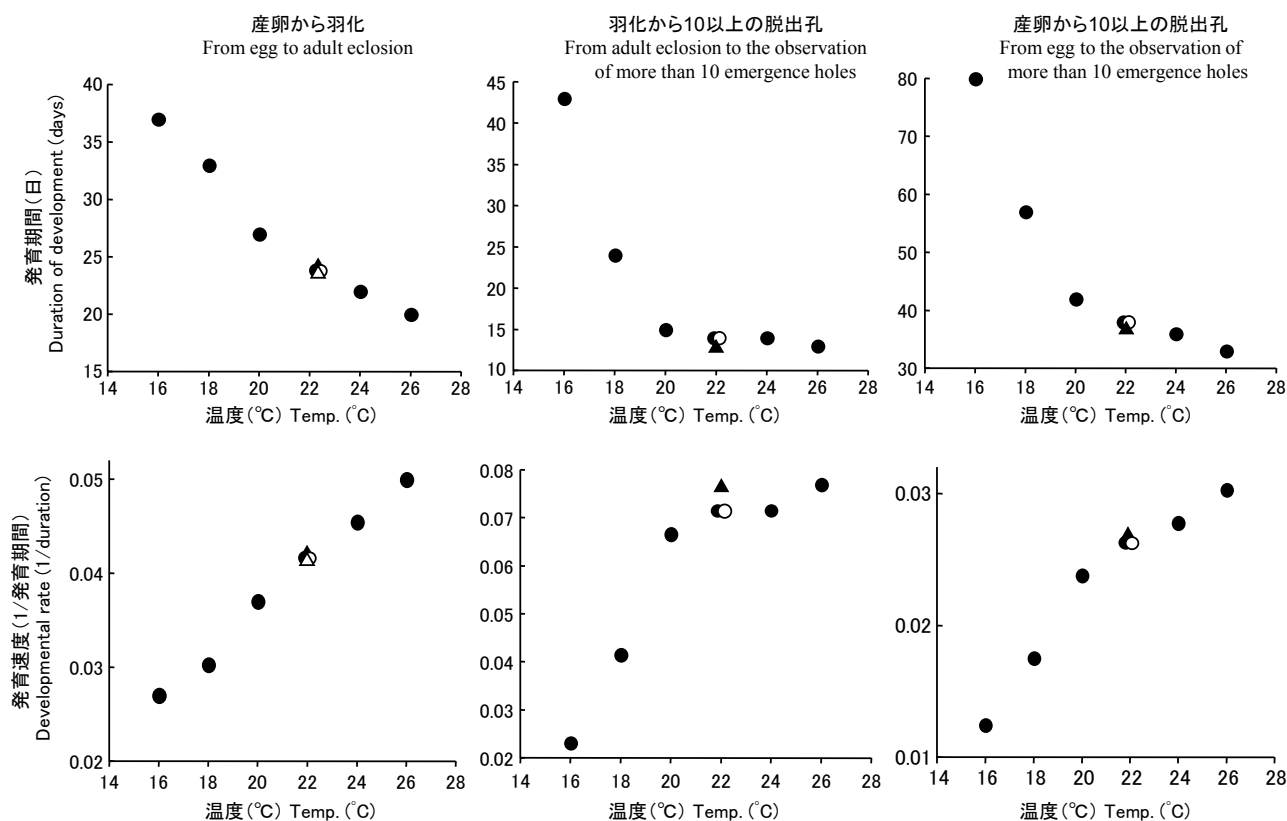


Fig. 3. 飼育温度と発育にかかった日数（上段図）および発育速度（下段図）の関係

黒丸：第1世代長日（15:9 L:D）、白丸：第1世代短日（10:14 L:D）、黒三角：第2世代長日、白三角：第2世代短日。第2世代短日下では脱出がなかった。

Relationships between temperature and duration of development (upper figures) and developmental rate (lower figures)

Black circles: the first generation at LD (15:9 L:D); open circle: the first generation at SD (10:14 L:D); black triangle: the second generation at LD; and open triangle: the second generation at SD. No adults of the second generation emerged from bolts at SD.

Table 1 長日下第1世代の発育ゼロ点（T0）と有効積算温度（K）

Developmental zero (T0) and effective cumulative temperature (K) of the first generation at LD

期間 Stage	直線回帰 linear regression			Ikemoto and Takai 法 Ikemoto and Takai method		
	T0 (°C)	K (日度) (degree days)	R ²	T0 (°C)	K (日度) (degree days)	R ²
産卵～羽化 Egg - adult eclosion	4.63	424.37	0.99	5.09	412.08	0.92
後食（羽化～脱出） Adult eclosion - adult emergence						
全データ All data	9.69	193.17	0.83	12.65	140.97	0.98
16, 18°Cを除く Exclude data at 16 and 18°C	-23.55	650.00	0.90	-23.70	652.24	0.64
全期間（産卵～脱出） Egg - adult emergence						
全データ All data	7.80	572.72	0.94	9.83	481.92	0.95
16, 18°Cを除く Exclude data at 16 and 18°C	-2.83	955.00	0.99	-3.60	983.72	0.51

Table 2 第2世代用飼育丸太割材時の成虫数
Number of adults in- and outside of bolts for the second generation

	長日 LD	短日 SD
樹皮下* under bark*		
オス male	46	10
メス female	55	11
性別不明 sex unknown	6	0
死亡 dead	52	0
丸太外死亡 dead outside of bolts	19	1
計** total**	178	22

*脱出後再侵入した個体があると考えられる。

**放虫した第1世代の成虫20個体が含まれる。

*Beetles reentered into bolts might be included.

**Including 20 released beetles of the first generation.

め、最も発育が早い個体の値を用いた今回のヤツバキクイムシでは、20℃未満の低温域であるほど平均値から離れたデータを用いていたと考えられ、これが平均値を用いたタイリクヤツバキクイムシとカラマツヤツバキクイムシよりも発育ゼロ点を低くし、有効積算温度を高くしたと考えられる。

次に、後食期間と全発育期間についてみると、今回、産卵から羽化までの期間ではみられなかった低温域での発育遅延が後食期間でみられ、これに呼応して全発育期間でも低温域での発育遅延が表れた (Fig. 3)。ヤツバキクイムシと同属で北米に産する *Ips calligraphus* では、オスの穿入から次世代脱出までの期間が調べられていて、今回と同様な低温域での発育遅延が観察されている (Wagner et al., 1987)。このような低温域での発育遅延が生じた16℃と18℃のデータを除外して、後食期間および全発育期間の発育ゼロ点を求めると、今回直線回帰と Ikemoto 法ともにマイナスとなった (Table 1)。日本産の昆虫、ダニ、線虫の発育ゼロ点に関する約600例の報告をまとめた桐谷 (1997) によると、発育ゼロ点がマイナスになる例はハエ、アブラムシ、ダニのうちのそれぞれ1例だけで、甲虫では例がない。また、これらマイナスの発育ゼロ点は、それぞれ -2.4℃、-0.4℃、-0.8℃であったのに対し (桐谷, 1997)、今回の直線回帰と Ikemoto 法による後食期間の発育ゼロ点はそれぞれ -23.6℃と -23.7℃、全発育期間の発育ゼロ点はそれぞれ -2.8℃と -3.6℃ (Table 1) と、これまで報告された値より著しく低かった。16℃と18℃のデータを除外した場合、発育ゼロ点がこのような低温になったのは、20℃から26℃の間の後食期間の差がわずか2日であったことに起因する (Fig. 3)。タイリクヤツバキクイムシでは、オスは精子を、メスは3～5個の卵黄卵を形成するまで生殖

腺を成熟させた段階で脱出する (Dolezal and Sehnal, 2007)。ヤツバキクイムシにおいて20℃以上で後食期間がほぼ同一であったのは、生殖腺成熟の速度が、20℃以上であれば温度の影響を受けないことを示唆する。

一方、直線回帰と Ikemoto 法の違いに目を向けると、低温域で発育遅延がみられた後食期間と全発育期間について、16℃と18℃のデータを除外した解析による回帰係数 (R^2) は、直線回帰ではそれぞれ0.90と0.99であったが、Ikemoto 法ではそれぞれ0.64と0.51となり、直線回帰よりも Ikemoto 法の方が低かった (Table 1)。これに対し、全ての飼育温度の値を含むデータについて得られた回帰係数は、直線回帰で0.83と0.94、Ikemoto 法で0.98と0.95となり、Ikemoto 法の方が高くなった (Table 1)。Ikemoto 法は低温部の発育データ点を入れた解析に優れている (池本・高井, 2001) ことから、発育遅延がみられる場合の全データを用いた解析では Ikemoto 法の方で回帰係数が高くなったと考えられる。

次に、日長条件や世代の違いと発育についてみると、日長が産卵から羽化までの期間に影響しないことがタイリクヤツバキクイムシで知られている (Dolezal and Sehnal, 2007)。これは、今回のヤツバキクイムシも同じであった (Fig. 3 左上)。その上に、産卵から羽化までの期間には世代間においても差がないことが、今回初めて明らかとなった (Fig. 3 左上)。また、後食期間も日長と世代の両方の影響を受けないことが、今回初めて明らかとなった (Fig. 3 中央上)。但し、第2世代短日では脱出がみられなかったのも、後食期間のデータはない。全発育期間については、タイリクヤツバキクイムシでは、短日下で継続飼育した場合、約10%の個体しか脱出しないが、それら10%の個体の脱出時期は長日下と同じであることが知られている (Dolezal and Sehnal, 2007)。これは、ヤツバキクイムシ第1世代の全発育期間が、長日下と短日下で同じであったという結果 (Fig. 3 右上) と一致する。

最後に、生殖休眠についてみると、Schopf (1989) や Dolezal and Sehnal (2007) は、短日下でタイリクヤツバキクイムシを飼育すると、約90%が脱出せず、脱出個体の飛翔も観察されなかったことから、生殖休眠していると判断した。これについて、今回のヤツバキクイムシでも22℃で第1世代を飼育した丸太の割材時に、短日下の丸太で長日下の丸太よりも脱出孔数が少なく、樹皮下にいる個体が多い傾向が観察されたが、長日下の丸太では樹皮の一部が剥げ落ちていて、脱出孔数を数えられなかったため短日下と比較可能なデータを得ることができなかった。また、第2世代の短日下では、成虫になったのはわずか2個体で、脱出孔が形成されず、羽化個体が樹皮下で生殖休眠していたと考えられる (Table 2)。このように、今回は短日条件下での脱出状況の観察による休眠の有無を調査でき

なかったが、短日下で発育した第1世代を丸太に穿入させて繁殖するかを観察することで、ほとんどの個体が休眠状態にあったことを明らかにできた。すなわち、第2世代の剖材調査で短日での成虫数が長日に比べ著しく少なかった (Table 2) のは、短日下で発育したのち短日下に放された成虫は、丸太に穿入しても越冬孔のような坑道を掘るだけで、ほとんどの個体が繁殖行動に至らなかったことに起因し、生殖休眠していたと考えられる。また、短日下の方が長日下よりも死亡個体数が少なかったのは、放された成虫と羽化成虫のどちらもが樹皮下で静止しており、繁殖活動をしないため、消耗が少なく、生残できたと考えられる。

タイリクヤツバキクイムシでは、生殖休眠の臨界日長が調べられている。Schopf (1989) は、オーストリアの個体群を 20℃ 下で飼育し、12L から 16L の間に臨界日長があるとした。Dolezal and Sehna (2007) はさらに詳しく調査し、チェコの個体群では 20℃ 下の臨界日長が 14.7L であることを示した。また、23℃ 以上では 12L であっても休眠しないことや、平均気温が 20℃ であっても 26℃ と 13℃ の変温条件下では 13L でも休眠しないことを示し、臨界日長は気温によって変化することを明らかにした (Dolezal and Sehna, 2007)。その上、スウェーデンの個体群では、20℃ 18L でも休眠することを示し、緯度も臨界日長に影響することを明らかにした (Dolezal and Sehna, 2007)。また、感応期は3齢幼虫から後食中の成虫の期間にあるが、蛹期に6日間短日に置いただけでは休眠しない (Dolezal and Sehna, 2007)。今回、北海道のヤツバキクイムシでは、22℃ 下で 10L と 15L の間に臨界日長があることがわかった。今後、温暖化による世代数変化を予想するには、休眠誘導についてのより正確な臨界日長や、臨界日長への気温・緯度の影響、および日長の感応期を調べる必要がある。

謝辞

試験地を提供していただいた北海道森林管理局石狩森林管理署に深謝する。英文校閲を引き受けていただいた Atlantic Forestry Center, Canadian Forest Service の Dr. Robert Johns に深謝する。なお、本研究は農林水産技術会議委託プロジェクト「農林水産分野における地球温暖化対策のための緩和及び適応技術の開発」の助成を受けて行った。

引用文献

Barber, V. A., Juday, G. P., and Finney, B. P. (2000) Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress, *Nature*, 405, 668-673.

Berg, E. E., Henry, J. D., Fastie, C. L., Volder, A. D. D., and Matsuoka, S. M. (2006) Spruce beetle outbreaks on the Kenai Peninsula, Alaska, and Kluane National Park and Reserve, Yukon Territory: Relationship to summer temperatures and regional differences in disturbance regimes, *For. Ecol. Manage.*, 227, 219-232.

Dolezal, P. and Sehna, F. (2007) Effects of photoperiod and temperature on the development and diapause of the bark beetle *Ips typographus*, *J. Appl. Entomol.*, 131, 165-173.

福山研二・吉田成章 (1982) ヤツバキクイムシの飛しょうと温度の関係, 日林北支講, 31, 146-148.

Hansen, E. M. and Bentz, B. J. (2003) Comparison of reproductive capacity among univoltine, semivoltine, and re-emerged parent spruce beetles (Coleoptera: Scolytidae), *Can. Ent.*, 135, 697-712.

Ikemoto, T. and Takai, K. (2000) A new linearized formula for the law of total effective temperature and the evaluation of line-fitting methods with both variables subject to error, *Environ. Entomol.*, 29, 671-682.

池本孝哉・高井憲治 (2001) 有効積算温度法則パラメータの新しい推定法, 植物防疫, 55, 311-315.

桐谷圭治 (1997) 日本産昆虫, ダニ, 線虫の発育零点と有効積算温度, 農環研資料, 21, 1-72.

桐谷圭治・湯川淳一 (2010) 地球温暖化と昆虫, 全国農村教育協会, 347pp, 東京.

小泉 力 (1977) 北海道における針葉樹天然林の伐採にともなう穿孔虫の被害, 林試研報, 297, 1-34.

小泉 力 (1990) カラマツヤツバキクイムシ, 林業と薬剤, 111, 1-10.

中山 基・古田公人・高橋郁雄・佐藤義弘・井口和信 (1991) エゾマツ天然林の伐採後の虫害枯損とヤツバキクイムシ成虫の動態, 東大農演習林報, 84, 39-52.

Raffa, K. F., Aukema, B. H., Bentz, B. J., Carrol, A. L. Hicke, J. A., Turner, M. G., and Romme, W. H. (2008) Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: The dynamics of bark beetle eruptions, *BioScience*, 58, 501-517.

Schopf, V. A. (1989) Die Wirkung der Photoperiode auf die Induktion der Imaginaldiapause von *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae), *J. Appl. Entomol.*, 107, 275-288.

鈴木重孝・今田秀樹 (1993) カラマツヤツバキクイムシの発育期間に及ぼす温度の影響, 日林誌, 75, 538-540.

- 上田明良 (2006) 大規模風倒後のヤツバキクイムシ類による生立木被害とその予防法－2004年18号台風とこれまでの台風の比較－, 日林北支論, 54, 156-159.
- 上田明良 (2007) ヤツバキクイムシとカラマツヤツバキクイムシの生態, 森林保護, 306, 14-16.
- Wagner, T. L., Flamm, R. O., Wu, H.-I, Fargo, W. S., and Coulson, R. N. (1987) Temperature-dependent model of life cycle development of *Ips calligraphus* (Coleoptera: Scolytidae), Environ. Entomol., 16, 497-502.
- Wermelinger, B. and Seifert, M. (1998) Analysis of the temperature dependent development of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae), J. Appl. Entomol., 122, 185-191.
- Wermelinger, B. and Seifert, M. (1999) Temperature-dependent reproduction of the spruce bark beetle *Ips typographus*, and analysis of the potential population growth, Ecol. Entomol., 24, 103-110.
- 山口博昭・平佐忠雄・小泉 力・高井正利・井上元則・小杉孝蔵・野淵 輝 (1963) 北海道の風倒地における穿孔虫の発生分散機構 (第3報) 立木被害の発生推移 (1956～1958年), 林試研報, 151, 75-135.
- 吉田成章 (1986) ヤツバキクイムシ, 林業と薬剤, 94, 1-9.

論文 (Original article)

Differential responses to α -pinene of two horntail wasps, *Urocerus antennatus* and *Xeris spectrum* (Hymenoptera: Siricidae)

Takeshi MATSUMOTO^{1)*} and Shigeho SATO¹⁾

Abstract

Horntail wasps carrying the symbiotic fungus *Amylostereum laevigatum* discolor the wood of conifers by infesting it with the fungus at the time of oviposition. Since wood discoloration cannot be distinguished before the wood has been cut, it is a serious economic problem for foresters. It is important to understand the mechanisms involved in oviposition preference by investigating volatile constituents from host plants and behavioral characteristics of the insects. Therefore, we conducted an olfactometer-based bioassay using two species of horntail wasps (*Urocerus antennatus* and *Xeris spectrum*) to examine their response to α -pinene, which is a major component widely distributed in conifers and which attract for female *U. japonicus*. In the present study, α -pinene attracted female *X. spectrum*, but not *U. antennatus*. These results suggest that *U. antennatus* was attracted by other conditions of the host trees that were utilized by *U. japonicus* and *X. spectrum*.

Key words : α -Pinene, attraction, horntail wasps, host selection, olfactometer, volatiles

Introduction

The Japanese horntail (*Urocerus japonicus* Smith) and the Pine horntail (*U. antennatus* Marlatt) are two species of wasps (Hymenoptera: Siricidae) that cause wood discoloration of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) through the transmission of the symbiotic fungus *Amylostereum laevigatum* (Tabata and Abe, 1997, 1999), which infects the wood when female horntail wasps oviposit in the trunk (Okuda, 1989; Fukuda, 1997). It was recently elucidated that the discoloration of *Cr. japonica* and *Ch. obtusa* induced by siricid wasps occurs widely throughout Japan (Okuda, 1985; Sano, 1992; Miyata, 1999). The market price of discolored wood is much lower than normal, inflicting considerable economic damage on foresters (Fukuda, 1997; Tabata and Abe, 1997; Fukuda and Maeto, 2001). Therefore, it is necessary to understand the mechanisms involved in the behavior and habits of horntail wasps, and to prevent these insects from causing damage.

On the other hand, *Xeris spectrum* Linnaeus (Hymenoptera: Siricidae) carries neither symbiotic fungi nor mycangia. *X. spectrum* oviposits in wood in which other horntail wasps have oviposited and introduced the symbiotic fungus, so the life cycle of *X. spectrum* is a kind of social parasitism using the symbiotic fungi of other

horntail wasps (Fukuda, 1997; Fukuda and Hijii, 1997).

Horntail wasps are classified as secondary wood-feeding insects (Knight and Heikkinen, 1980), which can attack and utilize only weakened, stressed or freshly cut trees as their hosts. In general, secondary wood-feeding insects utilize the characteristics and specific secondary volatile constituents emitted from weakened and/or stressed trees, and when trees are cut down (Haack and Slansky, 1987; Hanks, 1999). To elucidate the mechanisms of damage by the pest insects and prevent such damage, it is important to determine the specific volatile constituents emitted from the hosts and investigate the functions of the volatiles. Alpha-Pinene in terpenoid compounds is a major characteristic component widely distributed in conifers, and is used as a kairomone by horntail wasps that utilize conifers as their host plants. Sato and Maeto (2006), using adhesive traps in field tests, reported that α -pinene attract for female adults of *U. japonicus*.

To investigate the volatile constituents from host plants and the behavior of insects, it is important to develop appropriate methods for bioassay (Kennedy, 1977; Ikekawa et al., 1984), because this can reveal the insects' responses induced by volatile constituents and clarify the relationship between the bioactive substances emitted from the hosts and the habitual behaviors of the insects mediated by the

原稿受付：平成 24 年 1 月 19 日 Received 19 January 2012 原稿受理：平成 24 年 4 月 12 日 Accepted 12 April 2012

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

* Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 2-915 Asakura-Nishimachi, Kochi 780-8077, Japan; e-mail: mtakeshi@ffpri.affrc.go.jp

chemical cues. In general, bioassay is conducted using an olfactometer in order to investigate the insects' responses to volatile constituents. This usually involves a dual-choice type olfactometer to measure the insects' sensitivity to volatile constituents (Ikekawa et al., 1984). To estimate the detailed responses to volatile constituents, it is important to set up the equipment according to the behaviors and habits of the insect. In particular, highly accurate equipment is required for the olfactometer bioassay of horntail wasps, because it is difficult to obtain many adult wasps from the host trees.

In our earlier study, we used a dual-choice olfactometer created for horntail wasps and demonstrated that α -pinene attracted *U. japonicus* females (Matsumoto and Sato, 2007). However, it was not known if other horntail wasp species were also attracted to α -pinene in the olfactometer. Thus, in this study, we conducted an olfactometer-based bioassay to investigate the responses of *U. antennatus* and *X. spectrum* to α -pinene, and compared the results with those for *U. japonicus*.

Materials and Methods

Insects. Adult horntail wasps were collected from the logs of trees that were felled in February 2005 in a stand of *Ch. obtusa* in Kami City, Kochi Prefecture. The felled trees were left on the ground of the original stands for about one year to allow horntail wasps to oviposit. The tree logs were then hauled to Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Institute in Kochi City. The logs were cut into lengths of 1 m and placed in outdoor cages. Adult horntail wasps (*U. antennatus* and *X. spectrum*) emerging from the logs were collected daily during the summer of 2006. Unmated females which did not coexist with males in the cages were used for the olfactometer bioassay within one day after they emerged.

Olfactometer attraction method and attractant sample. We used a T-shaped dual-choice olfactometer, which was created for adult *U. japonicus* as shown in Fig. 1 (Matsumoto and Sato, 2007). The olfactometer consists of T-shaped branched tubes (32 mm in diameter), and glass chambers (85 mm in diameter, 130 mm in height) in which to place samples. The T-shaped tubes consisted of a branched part (200 mm in length), a junction part and an introduction part (200 mm in length). The airflow (4 L/min) was regulated by a flow meter with needle valve connected to each branch, was purified by passing through a charcoal tube, and then was humidified by passing through a wash bottle filled with distilled water. The airflow was separated equally at the Y-shaped joint to pass through each chamber in which a sample was placed. During the test, the introduction part was covered with aluminum foil to prevent the entry of light. The tests using the olfactometer were conducted at a temperature of 26 °C, under luminance of ca. 600 lux and relative humidity of the airflow in the olfactometer of ca. 85 %.

A sample of the attractant was placed in the glass chamber and air was flowed for 5 min for conditioning. After the conditioning, an unmated female was gently introduced into the end of the introduction part (Fig. 1). Each test was conducted for 5 min, and finished when the wasp reached the terminal of the branched part (Fig. 1). A wasp that did not make a choice within 5 min was recorded as a non-responder. The procedure was replicated 30 times per female within 150 min by assigning chambers in randomized locations and the number of trials of each female was counted. Both horntail wasps (*U. antennatus* and *X. spectrum*) were assayed using 10 females.

A bottle (40 mm in diameter and 80 mm in height) with six holes (each 1 mm² in area) was used as a volatile dispenser. Two grams of cotton and 1 ml of (-)- α -pinene

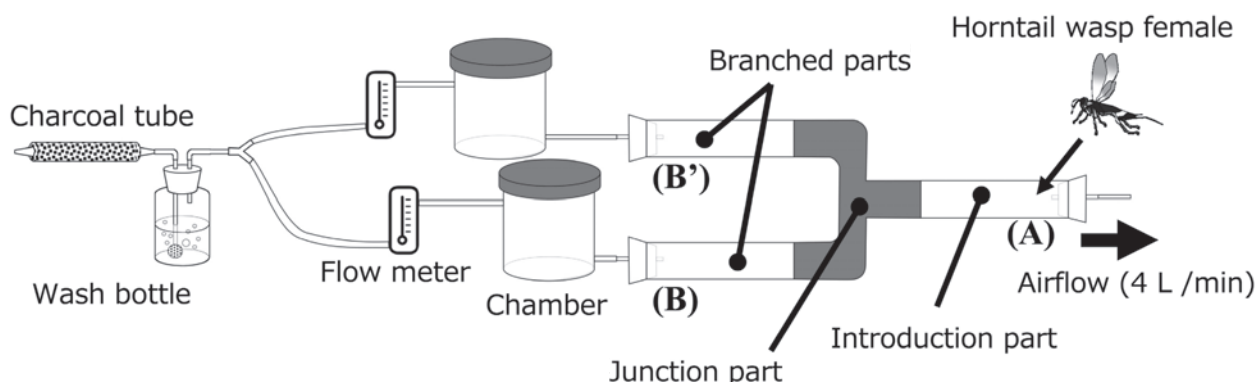


Fig. 1. Schematic diagram of the T-shaped olfactometer used for testing the olfactory responses of horntail wasps. branched parts, junction part and introduction part were all 32 mm in diameter. Horntail wasps could move from the end of the Introduction part (A) to each terminal of the branched part (B) or (B'). This figure was modified from Matsumoto and Sato (2007).

(purity 95 %; Wako Pure Chemical Industries, Ltd.) were inserted in the bottle, which was then placed in one chamber of the olfactometer. As a control, a bottle without α -pinene was placed in the other chamber.

Results and discussion

The attraction responses of the two horntail wasp species are shown in Fig. 2. In this olfactometer-based bioassay for horntail wasps, female *U. antennatus* were not attracted to α -pinene (Fig. 2). The number of trials of female *U. antennatus* to α -pinene was 13.6 ± 3.04 (SD) and that of the control was 16.4 ± 3.0 (Wilcoxon signed-rank test, $df = 9$, $P = 0.10$). This suggests that female *U. antennatus* utilize different volatile components to recognize their host plants. It is also possible that a high concentration of α -pinene in the airflow of the olfactometer prevented attraction to α -pinene, or that female *U. antennatus* prefer different conditions for their host trees. The concentrations of α -pinene in the atmosphere of the plantation of *Cr. japonica* and *Ch. obtusa* were much lower than that in the airflow of the olfactometer (Matsumoto, unpublished data). To estimate the attraction response of *U. antennatus*, it is important to use different concentrations of α -pinene in the olfactometer. In addition, an adhesive trap test should be conducted in the field using α -pinene as an attractant.

Alpha-Pinene significantly attracted female *X. spectrum* (α -pinene, 21.8 ± 2.14 ; control, 8.0 ± 2.02 , Wilcoxon signed-rank test, $df = 9$, $P < 0.001$; Fig.2). Female adult *X. spectrum* have no substantial symbiotic fungi or mycangia in their bodies, and have a characteristic life cycle in which they oviposit on host trees already inoculated with the *Amylostereum* fungi by other horntail wasps (Fukuda, 1997; Fukuda and Hijii, 1997). Thus, the host preference of *X. spectrum* would be strongly dependent on that of other

horntail wasps. Female *X. spectrum* search for and choose a host tree already used for oviposition by another species of horntail wasp; therefore, female *X. spectrum* utilize not only α -pinene but also the characteristic specific secondary volatile constituents emitted from the host tree oviposited by other horntail wasps.

We previously reported that α -pinene attracted female *U. japonicus* under the olfactometer (α -pinene, 23.1 ± 1.52 ; control, 6.9 ± 1.52 , Wilcoxon signed-rank test, $df = 9$, $P < 0.001$; Matsumoto and Sato, 2007). Thus, the response to α -pinene as the component widely distributed in conifers was clarified for three major horntail wasps that utilize *Cr. japonica* and *Ch. obtusa* as a host plant. Since horntail wasps are secondary wood-feeding insects (Knight and Heikkinen, 1980), they would utilize not only the structural constituents like α -pinene but also the characteristic secondary volatile constituents emitted from the host to correctly identify their host plants, which mainly consist of weakened and stressed trees (Haack and Slansky, 1987; Hanks, 1999). Sato et al. (2004) reported the oviposition preference of *U. japonicus* was not related to the diameter of the host tree or the moisture content of the wood, but was strongly related to an unknown factor. It is possible that the unknown factor is the volatile constituents emitted from the trees.

The present experiments using the olfactometer revealed that female *X. spectrum* as secondary wood-feeding insects utilize α -pinene as a secondary volatile constituent emitted from the host tree, but female *U. antennatus* do not. Bioassay using the olfactometer for horntail wasps can reveal the responses of the horntail wasps to other volatile constituents.

Acknowledgements

We thank Dr. M. Tabata of the Forestry and Forest Product Research Institute (FFPRI) and Mr. H. Miyata of the Kochi Prefectural Forest Technology Center. We also thank Mr. T. Hirota and Mr. H. Kadota of Shikoku Research Center, Forestry and Forest Product Research Institute for preparing the samples. We are grateful to Mr. and Mrs. Yamasaki for the use of the research forest. This study was carried out with support from a Grant-in-Aid for Young Scientists (B), (19780127) of the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS).

References

- Fukuda, H. (1997) Resource utilization and reproductive strategy of three woodwasp species (Hymenoptera: Siricidae). Nagoya Univ. Forest Sci., 16: 23-72. (in Japanese)

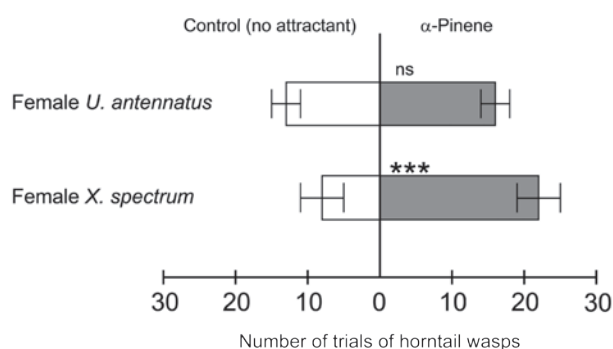


Fig. 2. Olfactory responses of female adults of two horntail wasp species, *U. antennatus* and *X. spectrum*, to α -pinene according to the olfactometer. *** $P < 0.001$; ns, not significant by Wilcoxon signed-rank test, $n = 10$.

- Fukuda, H. and Hijii, N. (1997) Reproductive strategy of a woodwasp with no fungal symbionts, *Xeris spectrum* (Hymenoptera: Siricidae). *Oecologia*, 112: 551-556.
- Fukuda, H. and Maeto, K. (2001) Discoloration injury of *Cryptomeria japonica* (L. f.) D. Don and *Chamaecyparis obtusa* (Sieb. et Zucc.) Endl. caused by woodwasps and the associated fungi: Constructing of control methods against the injury. *J. Jpn. For. Soc.*, 83: 161-168. (in Japanese)
- Haack, R. A. and Slansky, F. Jr. (1987) Nutritional ecology of wood-feeding Coleoptera, Lepidoptera, and Hymenoptera. In Slansky, F. Jr. and Rodriguez, J. G. (eds.) "*Nutritional Ecology of Insects, Mites, Spiders and Related Invertebrates*". John Wiley & Sons, 449-486.
- Hanks, L. M. (1999) Influence of the larval host plant on reproductive strategies of Cerambycid beetle. *Annu. Rev. Entomol.*, 44: 483-505.
- Ikekawa, N., Marumo, S. and Hoshi, M. (1984) Bioassays of Bioactive Substances. Kodansha, Tokyo, 528 pp. (in Japanese; title translated by the authors)
- Kennedy, J. S. (1977) Behaviorally discriminating assays of attractants and repellents. In Shorey, H. H. and McKelvey, J. J. (eds.) "*Chemical Control of Insect Behavior -Theory and Application-*". John Wiley & Sons, 215-229.
- Knight, F. B. and Heikkinen H. J. (1980) Principles of Forest Entomology (5th ed.). McGraw-Hill Book Company, 461 pp.
- Matsumoto, T. and Sato, S. (2007) An olfactometer testing the olfactory response of Japanese horntail *Urocerus japonicus* to volatiles. *J. Jpn. For. Soc.*, 89: 135-137. (in Japanese)
- Miyata, H. (1999) Discoloration damage of wood by the Japanese horntail, *Urocerus japonicus*, in Kochi prefecture. *Ringyo To Yakuzai*, 147: 1-6. (in Japanese)
- Okuda, K. (1985) Discoloration of hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) wood caused by the attack of the Japanese horntail (*Urocerus japonicus*). *Trans. 96th Mtg. Jpn. For. Soc.*, 487-488. (in Japanese)
- Okuda, K. (1989) Bionomics of the Japanese horntail (*Urocerus japonicus*). *Forest Pests*, 38: 140-144. (in Japanese; title translated by the authors)
- Sano, A. (1992) Siricid woodwasps in two species of conifers, *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa*. Mie Prefecture. *Bull. Mie Pref. For Res. Ctr.*, 8: 8-11. (in Japanese)
- Sato, S. and Maeto, K. (2006) Attraction of female Japanese horntail *Urocerus japonicus* (Hymenoptera: Siricidae) to α -pinene. *Appl. Entomol. Zool.*, 41: 317-323.
- Sato, S., Maeto, K., Tabata, M., Miyata, H. and Inada, T. (2004) Factors affecting on the number of emerging adults of the Japanese horntail *Urocerus japonicus* -Causes of variance of the emerged density of the Japanese horntail among the individual host trees which were thinned in summer and left in the plantation of sugi *Cryptomeria japonica*-. *J. Tree Health*, 8: 75-80. (in Japanese)
- Tabata, M. and Abe, Y. (1997) *Amylostereum laevigatum* associated with the Japanese horntail, *Urocerus japonicus*. *Mycoscience*, 38: 421-427.
- Tabata, M. and Abe, Y. (1999) *Amylostereum laevigatum* associated with a horntail, *Urocerus antennatus*. *Mycoscience*, 40: 535-539.

キバチ科 2 種（ヒゲジロキバチ・オナガキバチ）における α ピネンへの誘引反応の違い

松本 剛史^{*1)}、佐藤 重穂¹⁾

要 旨

キバチ類は産卵時に接種するキバチ共生菌によってスギ・ヒノキといった主要な人工林構成樹種に対して材変色被害をもたらし、材質劣化害虫として林業経営に対して大きな被害を与えている。キバチ類の産卵選好性を解明していく上で、揮発性成分に対するキバチ類の誘引反応を調べていくことは重要なことだと考えられる。そこで、針葉樹材の主要な揮発性成分であり、またニホンキバチに誘引活性を持つ α ピネンに対して、キバチ科 2 種（ヒゲジロキバチおよびオナガキバチ）の誘引反応をオルファクトメーターを用いて調べた。誘引試験の結果、オナガキバチの雌成虫は α ピネンに誘引されたが、ヒゲジロキバチ雌成虫は α ピネンに誘引されなかった。ヒゲジロキバチは他種キバチと異なる状態の寄主木に誘引される可能性が示唆された。

キーワード： α ピネン、誘引、キバチ類、宿主選好性、オルファクトメーター、揮発性物質

1) 森林総合研究所四国支所

* 森林総合研究所四国支所 〒 780-8077 高知県高知市朝倉西町 2-915 e-mail: mtakeshi@ffpri.affrc.go.jp

短 報 (Note)

Screening of lignocellulolytic enzyme producers: enzyme system from *Aspergillus tubingensis* for hydrolysis of sugi pulp

Tomoko SHIMOKAWA^{1)*}, Hajime SHIBUYA¹⁾, Mitsuro ISHIHARA,
Muneyoshi YAMAGUCHI¹⁾, Yuko OTA²⁾, Kazuhiro MIYAZAKI³⁾,
Tsutomu IKEDA⁴⁾, Kengo MAGARA⁴⁾ and Masanobu NOJIRI¹⁾

Abstract

Lignocellulolytic enzyme activities from some wood decay fungi were screened for the effective hydrolysis of sugi (*Cryptomeria japonica*) pulp. The cellulolytic fungi were first screened using agar plates containing AZCL-HE-cellulose. In addition to the *Trichoderma* species, *Grammothele fuligo*, *Aspergillus tubingensis*, and *Pycnoporus coccineus* showed greater filter paper-degrading activity under subsequent screening under solid-state fermentation. *A. tubingensis* KRCF 700 produced remarkable amounts of lignocellulolytic enzymes that include endoglucanase, β -glucosidase, mannanase, xylanase, β -xylosidase, and filter paper-degrading activities. Among the tested strains, the highest synergy between cellulase preparation and the crude extract against sugi pulp hydrolysis was achieved when the extract from *A. tubingensis* KRCF 700 was used, followed by *Aspergillus niger* NBRC 31125. The diversity of the lignocellulolytic enzyme system from *A. tubingensis* might lead to the effective synergy with cellulase system from *T. reesei*.

Key words : screening, cellulase, saccharification, solid-state fermentation, *Aspergillus tubingensis*

Introduction

Sugi (*Cryptomeria japonica*) is widespread bioresource that need further promotion for effective use. In our previous research, though sugi wood has higher lignin content and less carbohydrate content compared to eucalyptus wood, both had almost the same hexose content (about 60%). The hexose content of sugi pulp was around 90% after alkaline soda cooking (Ikeda et al., 2007). Alkaline pulping is a widely used pretreatment method to achieve increased enzymatic accessibility (Hendriks • Zeeman, 2009). Since the enzymatic hydrolysis of woody lignocelluloses is gaining increased research attention due to its immense potential for transformation into fermentable sugars, the supply of highly active, inexpensive cellulolytic enzymes is indispensable in developing an economically feasible biotechnical process (Jorgensen et al., 2007; Wyman, 2007).

The well-known cellulolytic fungus *Trichoderma reesei* (*Hypocrea jecorina*) produces a powerful cellulase system mainly composed of cellobiohydrolase (EC 3.2.1.91), endoglucanase (EC 3.2.1.4), and β -glucosidase (EC 3.2.1.21) with synergism (Woodward, 1991; Beguin

• Aubert, 1994; Baldrian • Valaskova, 2008). However, the amount of β -glucosidase in the *Trichoderma* cellulase system is reported to be lower than that needed for the efficient saccharification of lignocelluloses (Holtzapfel et al., 1990; Xiao et al., 2004). Genome sequencing of *H. jecorina* (*T. reesei*) has revealed that it contains less cell wall-degrading enzymes when compared to some fungal genes (Martinez et al., 2008). Since the saccharification process of lignocelluloses is too complicated to overcome the recalcitrance of substrates, using a cocktail of different cellulolytic enzymes might be an effective way for complete biomass saccharification with reduced amounts of enzyme preparation (Buaban et al., 2010; Andri  et al., 2010). The screening of cellulolytic microorganisms existing in nature remains important from the standpoint of industrial development and biodiversity surveys.

In this study, cell wall-degrading enzyme activities from some wood decay fungi were analyzed for the effective hydrolysis of sugi pulp. The cellulolytic microorganisms were first screened and isolated using agar plates containing AZCL-HE-cellulose. The strains gave larger halos on the plates were further screened under solid state fermentation

原稿受付：平成 23 年 10 月 5 日 Received 5 October 2011 原稿受理：平成 24 年 4 月 11 日 Accepted 11 April 2012

1) Department of Applied Microbiology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

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

3) Kyusyu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

4) Department of Applied Microbiology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* Department of Applied Microbiology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; TEL: +81-29-829-8281; FAX: +81-29-873-3797; e-mail: tshimo@ffpri.affrc.go.jp

(SSF) for the ability of enzymatic saccharification of alkaline-treated pulp from sugi

Materials and methods

AZCL-HE-cellulose and reduced 1,4- β -D-mannan were obtained from Megazyme. Carboxymethyl cellulose (CMC) sodium salt (low viscosity type) was obtained from Sigma-Aldrich. Soluble xylan was prepared from birchwood xylan (Fluka, Buchs, Switzerland). Sugi pulp was prepared by soda-anthraquinone cooking followed by oxygen bleaching (Ikeda et al., 2007). To determine the relative sugar composition of the pulp, corresponding neutral monosaccharides in the acid hydrolyzates were analyzed by high-performance anion-exchange chromatography with a pulsed amperometric detector (HPAEC-PAD; Dionex) equipped with a CarboPac PA1 column. The monosaccharides were eluted with 1 mM NaOH containing 0.3 mM acetic acid at 30 °C at a flow rate of 1 ml/min. The relative sugar composition analysis of sugi pulp showed 82% glucose, 7.3% mannose, 9.3% Xylose, 0.9% galactose, and 1.0% arabinose (mol%). The klason lignin content of sugi pulp was 8.18%. The cellulase preparation Accellerase 1500 was provided by Genencore Co., Ltd. (42 FPU/ml; Filter-paper degrading activity (FPase), 55 U/ml; β -glucosidase activity, 480 U/ml).

Soil samples were collected from different locations in Japan for the isolation of cellulolytic microorganisms. The isolated microorganisms were maintained on PDA plates. From the destructive fungi collection in Japanese edible mushroom industry, maintained in the Kyusyu Research Center of FFPRI (KRCF strains), 26 strains were selected for the screening of cellulolytic activity. From the collection of wood decay fungi, maintained in the microbial ecology laboratory in our institute (WD strains), 79 strains obtained from Japanese forests were selected for the screening. Some isolated fungal strains with high cellulase activity were identified by BLAST (28S rDNA-D1/D2) by Techno Suruga Lab. Co., Ltd. (Shizuoka, Japan).

The plate with the AZCL-HE cellulose consisted of 1.0% CMC, 0.1% polypeptone, 0.3% yeast extract, 0.1% KH_2PO_4 , 0.05% $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.1% AZCL-HE-cellulose, and 2.0% Agar. Kanamycin 25 mg/L and chloramphenicol 34 mg/L were added to inhibit bacterial growth. Serial dilutions of each soil sample were prepared with sterilized distilled water, and 0.1 ml of diluted solution was spread on the AZCL-HE-cellulose plate, then incubated at 28°C. The isolated colonies were maintained on the PDA plates. As for maintained strains (NBRC, etc.), a 6-mm diameter mycelial mat of the strains grown on the PDA plate was inoculated on the AZCL-HE-cellulose plate to discern cellulolytic

activity.

The solid medium for SSF was composed of 10% rice bran and 90% wheat bran. The moisture content of the medium was adjusted to 70%, and then 10 g of the moisture-adjusted substrate was autoclaved (121°C, 20 min) in a 100 ml Erlenmeyer flask. A 1-cm² mycelial mat grown on a PDA plate for 2-3 weeks was crushed in 1 ml of sterilized water using a multi-beads shocker (Yasui Kikai, Japan). The crushed solution was inoculated in the flask under sterile conditions. The culture flask was placed in the incubator in the dark, at a temperature of 28°C, and at a humidity of 60% for three days. After incubation, 15 ml of 50 mM sodium citrate buffer (pH 4.8) was added to the flask, and then the medium was homogenized using a handy homogenizer. The supernatant after centrifugation was used as a crude enzyme extract.

FPase activity was determined by measuring the increase of reducing sugars from the hydrolysis of filter paper No. 1 (Whatman 1001-813, 2.6×3.1 cm, about 70 mg) using the 3,5-dinitro-salicylic acid (DNS) method (Miller 1959) with glucose as the standard. The reaction mixture consisting of 40 μ l of enzyme extract, 910 μ l of 50 mM sodium citrate buffer (pH 4.8), 550 μ l of distilled water, and one piece of curled filter paper was incubated in a test tube at 50°C for 1 h under continuous shaking. One unit (U) of enzyme activity was defined as the amount of enzymes required to liberate the equivalent of 1 μ mol of reducing sugar per min. Endoglucanase (CMCase), xylanase, and mannanase activity was assayed using CMC, soluble birchwood xylan, and reduced 1,4- β -D-mannan as substrates, respectively. β -Glucosidase and β -xylosidase activity was assayed by measuring the amounts of *p*-nitrophenol liberated from *p*-nitrophenyl- β -D-glucopyranoside and β -D-xylopyranoside, respectively, as described previously (Shimokawa et al., 2007).

Wet sugi pulp was used to measure saccharification yields. The moisture content of the pulp was 66.72%. The reaction mixture consisted of 25 mg (dry weight) of pulp and 100 μ l of the crude extract for sugi pulp hydrolysis in a 1 ml 50 mM sodium citrate buffer pH 4.8. The mixture was incubated at 50°C for 24 h with continuous shaking, and the reaction was stopped by heating the mixture at 100°C for 5 min. The amounts of liberated reducing sugars were measured using the DNS method with glucose as the standard. The saccharification yield was calculated from the weight of polysaccharides in the substrates. The results were expressed as the means of three experiments. In additional experiments with sugi pulp saccharification, cellulase preparation (Accellerase 1500, 10 FPU/g) was added to the reaction mixtures. Degree of synergies were

evaluated by the determining the ratio of reducing sugar levels produced by the combination of the enzymes (crude enzymes containing Accellerase 1500) to that produced by the separate reactions.

Results and discussion

CMC was used as a carbon source for the AZCL-HE plate because it dissolved readily in water and the solution was transparent, which was helpful for the visual assessment of the halo zones. More than 90 fungal or bacterial strains were isolated from the Japanese soil samples using AZCL-HE plates. All the isolated strains were tested for their ability to produce FPase as an index of cellulolytic enzyme activity under SSF. The species of the 12 strains exhibited greater activity were identified by BLAST. They were assigned to be *Hypocrea* (*Trichoderma*), *Aspergillus*, and *Penicillium* species. These species have been recognized as excellent cellulolytic enzyme producers, and many commercial cellulase preparations are made from *T. reesei* and *A. niger* (Cherry • Fidantsef, 2003).

All the 26 strains picked up from the destructive fungi collection in Japanese edible mushroom industry were tested for their FPase activity under SSF. The 17 of the 26 strains belonged to the *Hypocrea* (*Trichoderma*) species: *T. harzianum* (11 strains), *T. atroviride* (2), *T. cf. stramineum*, *T. pseudokoningii*, *T. longibranchiatum*, and *T. virens*. The rest belonged to *P. brebicompectum*, *P. fellutanum*, *P. cf. paneum*, *P. expansum*, *Spicellum roseum*, *Cladobotryum varium*, *Gliocladium viride*, *A. fumigatus*, and *A. tubingensis*. Among the wood-decaying

fungi (WD), 79 different strains were screened on the AZCL-HE plates. The tested WD strains, selected for their rapid growth and potential for wood deterioration, were: *Abortiporus biennis*, *Antrodia multipapillata*, *Antrodia multipapillata*, *Antrodiella semisupina*, *Bjerkandera adusta*, *Bondarzewia montana*, *Castanoporus* (*Cystidiophorus*) *castaneus*, *Ceriporia viridians*, *Ceriporiopsis aurantitinges*, *Cerrena unicolor*, *Climacocystis borealis*, *Climacodon septentrionalis*, *Coniophora puteana*, *Coriolopsis glabrorigens*, *Cyclomyces fusca*, *Daedalea aurora*, *Daedaleopsis conchiformis*, *Datronia stereoides*, *Dichomitus squalens*, *Diplomitoporus lindbladii*, *Echinochaete ruficeps*, *Echinodontium japonicum*, *Fistulina hepatica*, *Fomes fomentarius*, *Fomitopsis palustris*, *F. rosea*, *F. spraguei*, *Ganoderma lucidum*, *Gloeophyllum odorum*, *Gloeoporus dichrous*, *Gloeostereum incarnatum*, *Grammothele fuligo*, *Grifora frondosa*, *Hapalopilus croceus*, *Hericium erinaceum*, *Hexagonia tenuis*, *Hydnochaete tabacinoides*, *Irpex lacteus*, *Ischnoderma resinsum*, *Junghuhnia nitida*, *Laccocephalum hartmanii*, *Lenzites betulina*, *Melanoporia castanea*, *Meripilus giganteus*, *Merulius tremellosus*, *Microporellus nanus*, *Mycroleptodonoides aitchisonii*, *Nigroporus vinosus*, *Oxyporus cuneatus*, *Paratrachaptum acculatum*, *Perenniporia fraxinea*, *Phaeolus schweirii*, *Phanerochaete chrysorhiza*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Phellinus igniarius*, *Phlebia strigoso-zonata*, *Physisporinus vitreus*, *Piptoporus betulinus*, *Polyporus arcularius*, *Porodiscus pendulus*, *Protomerulius caryae*, *Pulcherricium caeruleum*, *Pycnoporellus fulgens*, *Pycnoporus cinnabarinus*, *P. coccineus*, *Rigidoporus*

Table 1. Lignocellulolytic enzyme activities in the crude extracts from screened and control strains. Mean values $\pm$ SE (n=3) are given.

	Activity (U/ml)						
	FPase		CMCase	β -Glucosidase	Mannanase	Xylanase	β -Xylosidase
	3 days	6 days	3days				
<i>Aspergillus tubingensis</i> KRCF 700	0.80 $\pm$ 0.08	0.96 $\pm$ 0.07	1.06 $\pm$ 0.24	1.60 $\pm$ 0.45	4.81 $\pm$ 0.50	5.85 $\pm$ 0.52	3.06 $\pm$ 0.35
<i>Grammothele fuligo</i> WD 844	1.31 $\pm$ 0.28	0.20 $\pm$ 0.03	0.68 $\pm$ 0.07	0.07 $\pm$ 0.03	1.34 $\pm$ 0.84	0.87 $\pm$ 0.46	0
<i>Perenniporia fraxinea</i> WD 1518	0.42 $\pm$ 0.19	0.71 $\pm$ 0.03	1.42 $\pm$ 0.12	0.62 $\pm$ 0.15	0.70 $\pm$ 0.21	5.58 $\pm$ 0.18	0.11 $\pm$ 0.05
<i>Phanerochaete chrysosporium</i> WD 1416	0.67 $\pm$ 0.10	0.86 $\pm$ 0.10	1.24 $\pm$ 0.17	0.76 $\pm$ 0.16	1.15 $\pm$ 0.36	3.89 $\pm$ 1.05 $\pm$	0.14 $\pm$ 0.02
<i>Pycnoporus coccineus</i> WD 2263	0.93 $\pm$ 0.08	0.27 $\pm$ 0.05	0.95 $\pm$ 0.27	0.79 $\pm$ 0.16	1.18 $\pm$ 0.36	1.64 $\pm$ 0.37	0.01 $\pm$ 0.05
<i>Trichoderma harzianum</i> KRCF 131	0.49 $\pm$ 0.08	0.35 $\pm$ 0.09	1.48 $\pm$ 0.19	0.88 $\pm$ 0.45	2.87 $\pm$ 0.35	5.76 $\pm$ 0.84	0.50 $\pm$ 0.06
<i>Trichoderma</i> sp. Oga-16	1.12 $\pm$ 0.13	1.19 $\pm$ 0.17	1.34 $\pm$ 0.40	1.11 $\pm$ 0.28	2.86 $\pm$ 0.42	7.00 $\pm$ 0.40	0.29 $\pm$ 0.11
<i>Trichoderma</i> sp. Sh-3	0.90 $\pm$ 0.09	0.89 $\pm$ 0.13	1.43 $\pm$ 0.13	0.80 $\pm$ 0.20	2.80 $\pm$ 0.35	5.72 $\pm$ 0.12	0.65 $\pm$ 0.18
<i>Trichoderma</i> sp. Sh-8	0.98 $\pm$ 0.08	0.90 $\pm$ 0.19	1.47 $\pm$ 0.25	1.04 $\pm$ 0.39	2.52 $\pm$ 0.11	5.29 $\pm$ 0.11	0.72 $\pm$ 0.20
<i>Trichoderma</i> sp. Sh-23	0.54 $\pm$ 0.13	0.01 $\pm$ 0.02	0.70 $\pm$ 0.27	0.11 $\pm$ 0.03	1.02 $\pm$ 0.29	3.00 $\pm$ 0.75	0.12 $\pm$ 0.04
<i>Trichoderma reesei</i> NBRC 31329	1.34 $\pm$ 0.15	0.62 $\pm$ 0.13	1.03 $\pm$ 0.03	0.21 $\pm$ 0.12	1.27 $\pm$ 0.22	6.06 $\pm$ 0.50	0.51 $\pm$ 0.14
<i>Aspergillus niger</i> NBRC 31125	0.68 $\pm$ 0.07	0.76 $\pm$ 0.11	0.77 $\pm$ 0.21	2.85 $\pm$ 0.71	2.66 $\pm$ 0.75	5.23 $\pm$ 0.35	1.47 $\pm$ 0.39

cinereus, *Skeletocutis nivea*, *Spongipellis delectans*, *Steccherinum ochraceum*, *Stereum hirsutum*, *Theleporus calcicolor*, *Tinctoporellus epimiltinus*, *Trametes conchifer*, *T. elegans*, *T. versicolor*, *Trechispora mollusca*, *Trichaptum bifforme*, *Tyromyces chioneus*, *Wolfiporia cocos*, and *Xylobolus annosus*. After three days of cultivation at 28°C, 23 strains did not produce visible halos on the plates. Most of the strains did not show good growth on the plates at 28°C, suggesting mismatched growth temperature or a lack of CMC utilization ability as a carbon source. Fifteen strains that showed large halos with vigorous growth on the plates were further screened under SSF. The first-screened WD strains belonged to *A. biennis*, *B. adusta*, *C. aurantitinges*, *G. fuligo*, *I. lacteus*, *M. tremellosus*, *M. nanus*, *P. fraxinea*, *P. chrysosporium*, *T. epimiltinus*, *T. conchifer*, and *T. mollusca*. There are few reports about cellulase production by *C. aurantitinges*, *G. fuligo*, *T. epimiltinus*, *T. conchifer*, *T. mollusca*, and *M. nanus*.

Among the approximately 200 isolated strains, 10 strains that showed higher FPase activity under SSF were selected for further research (Table 1). The strains named Oga-16, Sh-3, Sh-8, and Sh-23 were screened from soil samples. The amounts of FPase activity after three and six days of cultivation were shown with *T. reesei* NBRC 31329 and *A. niger* NBRC 31125 (Hong et al., 2001) as control strains. *T. reesei* showed the highest FPase activity and *G. fuligo* WD 844 was comparable with that of *T. reesei* NBRC 31329 after three days of cultivation. However, the FPase activity from *G. fuligo* decreased more rapidly during the three to six days. The FPase activity from *P. coccineus* also decreased during the three to six days of cultivation. *A. tubingensis* KRCF 700 showed higher FPase activity than that of *A. niger* NBRC 31125. Although many lignocellulolytic enzymes, including CMCase (Seo et al., 2003) have been reported from *A. tubingensis*, very few studies have reported their filter paper-degrading activity. When KRCF 700 was cultured in a liquid medium containing 0.5% α -cellulose as a carbon source, no remarkable FPase activity was detected though the control strain *T. reesei* NBRC 31329 showed apparent FPase activity during two weeks of cultivation (data not shown). Endoglucanase (CMCase), β -glucosidase, and hemicellulase activities from the selected strains are also summarized in Table 1. Two *Aspergillus* species (NBRC 31125 and KRCF 700) exhibited high β -glucosidase, β -xylosidase, mannanase, and xylanase activity. In particular, KRCF 700 was an excellent mannanase and β -xylosidase producer. Since *G. fuligo*, *P. flaxinea*, and *P. coccineus* are not well-characterized cellulolytic fungi, this study offers considerable information about their cellulolytic enzymes.

Among the tested strains listed in Table 1, both KRCF 700 and NBRC 31125 showed the highest saccharification yields of 12.2%, followed by NBRC 31329 (11.0%), when sugi pulp was hydrolyzed with only the crude extracts (Fig. 1). Hydrolysis of the sugi pulp with commercial cellulase preparation Accellerase 1500 (10 FPU/g) alone resulted in a saccharification yield of 36.5%. The highest synergy between cellulase preparation and the crude extracts on the pulp hydrolyses was achieved when the extract from KRCF 700 were used (degree of synergy was 1.21), followed by NBRC 31125 (degree of synergy was 1.10). The crude extract from *T. reesei* NBRC 31329 could not show the apparent synergy effect with cellulase preparation from *T. reesei* (degree of synergy was 0.98). The enzymatic reaction with Accellerase 1500 and the crude extract from KRCF 700 resulted in a saccharification yield of 58.7% on the hydrolysis of sugi pulp. A number of studies revealed that the enzyme system of *Aspergillus* sp. is excellent for an enzyme cocktail for the efficient cooperative hydrolysis of lignocellulosic biomass, in most cases to offset a shortage of β -glucosidase (Tengborg et al., 2001; Xiao et al., 2004).

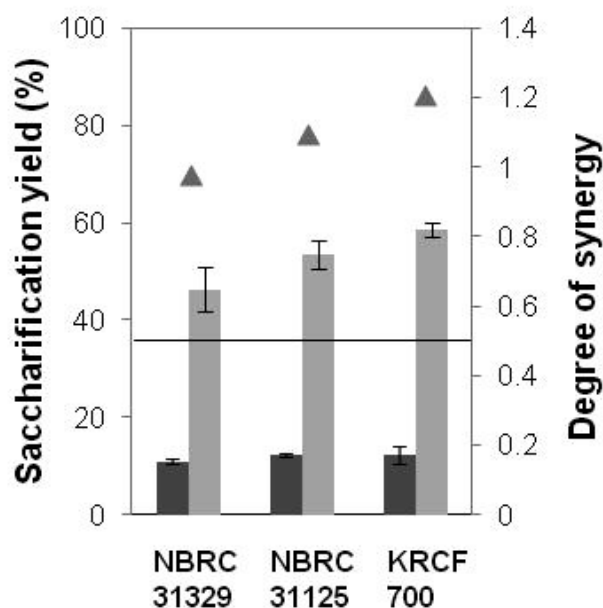


Fig. 1. Hydrolyses of sugi pulp by crude extracts and cocktail enzymes. Saccharification yields of sugi pulp hydrolyzed with the crude extracts alone (black bar) and that hydrolyzed with the cocktail enzymes consisting of crude enzymes and cellulase preparation (gray bar) are shown. Line in the figure represents saccharification yield gained by cellulase preparation alone. Degree of synergies (▲) were evaluated by determining the ratio of reducing sugar level produced by the combination of the enzymes to that produced by separate enzymes.

However, the amount of β -glucosidase activity was the highest in the extract from NBRC 31125 in this study. When compared with NBRC 31125, KRCF 700 produced much higher levels of the lignocellulolytic enzymes: FPase, CMCase, mannanase, xylanase, and β -xylosidase. The diversity of the lignocellulose-degrading enzyme system from KRCF 700 might lead to the most effective synergy with cellulase preparation. In addition, Decker et al. (2001) have reported the multiplicity of β -glucosidase from *A. tubingensis* with respect to substrate specificity, glucose inhibition, and acid tolerance, which broaden out a variety of substrates by taking advantage of the synergistic action of the distinct enzymes. Moreover, an on-site-produced crude enzyme from KRCF 700 in this study showed considerable amounts of FPase activity, and to our knowledge this is the first report to show FPase activity from *A. tubingensis*. These findings reinforce the superiority of the enzyme system from *A. tubingensis*. The strain KRCF 700 was a good producer of helpful lignocellulolytic enzymes under SSF and may be used for possible biotechnological applications.

Acknowledgments

This research was supported by a grant from the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan, entitled "Development of biomass conversion technologies as a way of vitalizing areas." Part of this work was supported by the Program for Supporting Activities for Female Researchers funded by the Special Coordination Fund for Promoting Science and Technology of Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan. We are grateful to Dr. M. Tsunoda, Dr. K. Kawakami, and Dr. S. Kanetani in our institute for their support.

References

- Andrić, P., Meyer, A. S., Jensen, P. A. and Dam-Johansen, K. (2010) Reactor design for minimizing product inhibition during enzymatic lignocelluloses hydrolysis: I. Significance and mechanism of cellobiose and glucose inhibition on cellulolytic enzymes, *Biotechnol. Adv.*, 28, 308-324.
- Baldrian, P. and Valaskova, V. (2008) Degradation of cellulose by basidiomycetous fungi, *Fems Microbiol. Rev.*, 32, 501-521.
- Beguín, P. and Aubert, J. P. (1994) The biological degradation of cellulose, *Fems Microbiol. Rev.*, 13, 25-58.
- Buaban, B., Inoue, H., Yano, S., Tanapongpipat, S., Ruanglek, V., Champreda, V., Pichyangkura, R., Rengpipat, S. and Eurwilaichitr, L. (2010) Bioethanol production from ball milled bagasse using an on-site produced fungal enzyme cocktail and xylose-fermenting *Pichia stipitis*, *J. Biosci. Bioeng.*, 110, 18-25.
- Cherry, J. R. and Fidantsef, A. L. (2003) Directed evolution of industrial enzymes: an update, *Current Opinion Biotechnol.*, 14, 438-443.
- Decker, C. H., Visser, J. and Schreier, P. (2001) β -Glucosidase multiplicity from *Aspergillus tubingensis* CBS 643.92: purification and characterization of four β -glucosidases and their differentiation with respect to substrate specificity, glucose inhibition and acid tolerance, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 55, 157-163.
- Hendriks, A. and Zeeman, G. (2009) Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass, *Bioresour. Technol.*, 100, 10-18.
- Holtzapfel, M., Cognata, M., Shu, Y. and Hendrickson, C. (1990) Inhibition of *Trichoderma reesei* cellulase by sugars and solvents, *Biotechnol. Bioeng.* 36, 275-287.
- Hong, J., Tamaki, H., Akiba, S., Yamamoto, K. and Kumagai, H. (2001) Cloning of a gene encoding a highly stable endo-beta-1,4-glucanase from *Aspergillus niger* and its expression in yeast, *J. Biosci. Bioeng.*, 92, 434-441.
- Ikedo, T., Sugimoto, T., Nojiri, M., Magara, K. and Hosoya, S. (2007) Alkali pre-treatment for the bioethanol fuel production from woody biomasses-Part 1: soda cooking conditions as an alkali pre-treatment, *Japan TAPPI*, 61, 62-71.
- Jorgensen, H., Kristensen, J. B. and Felby, C. (2007) Enzymatic conversion of lignocellulose into fermentable sugars: challenges and opportunities, *Biofuels Bioprod. Biorefining*, 1, 119-134.
- Martinez, D., Berka, R. M., Henrissat, B., Saloheimo, M., Arvas, M., Baker, S. E., Chapman, J., Chertkov, O., Coutinho, P. M., Cullen, D., Danchin, E. G. J., Grigoriev, I. V., Harris, P., Jackson, M., Kubicek, C. P., Han, C. S., Ho, I., Larrondo, L. F., de Leon, A. L., Magnuson, J. K., Merino, S., Misra, M., Nelson, B., Putnam, N., Robbertse, B., Salamov, A. A., Schmoll, M., Terry, A., Thayer, N., Westerholm-P. A., Schoch, C. L., Yao, J., Barbote, R., Nelson, M. A., Detter, C., Bruce, D., Kuske, C. R., Xie, G., Richardson, P., Rokhsar, D. S., Lucas, S. M., Rubin, E. M., Dunn-C., N., Ward, M. and Brettin, T. S. (2008) Genome sequencing and analysis of the biomass-degrading

- fungus *Trichoderma reesei* (syn. *Hypocrea jecorina*), Nat. Biotechnol. 26, 553-560.
- Miller, G. L. (1959) Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. Anal. Chem. 31, 426-428.
- Seo, W. S., Hong, J. Y., Choi, H. S., Kim, J. W. and Kim, Y. M. (2003) Isolation and characterization of a novel *Aspergillus tubingensis* with a hydrolyzing activity of cellulose-pectin complex, Kor. J. Microbiol. Biotechnol. 31, 124-128.
- Shimokawa, T., Nakamura, M., Nagasawa, N., Tamada, M. and Ishihara, M. (2007) Effect of gamma-ray irradiation on enzymatic hydrolysis of spent corncob substrates from edible mushroom enokitake (*Flammulina velutipes*) cultivation, Bull. Forestry Forest Prod. Res. Inst., 6, 27-34.
- Tengborg, C., Galbe, M. and Zacchi, G. (2001) Influence of enzyme loading and physical parameters on the enzymatic hydrolysis of steam-pretreated softwood, Biotechnol. Progress, 17, 110-117.
- Wyman, C. E. (2007) What is (and is not) vital to advancing cellulosic ethanol, Trends Biotechnol., 25, 153-157.
- Woodward, J. (1991) Synergism in cellulase systems, Bioresour. Technol., 36, 67-75.
- Xiao, Z. Z., Zhang, X., Gregg, D. J. and Saddler, J. N. (2004) Effects of sugar inhibition on cellulases and beta-glucosidase during enzymatic hydrolysis of softwood substrates, Appl. Biochem. Biotech., 113, 1115-1126.

リグノセルロース分解酵素生産菌のスクリーニング： *Aspergillus tubingensis* の生産する酵素によるスギパルプの分解

下川 知子^{1)*}、澁谷 源¹⁾、石原 光朗、山口 宗義¹⁾、太田 祐子²⁾、
宮崎 和弘³⁾、池田 努⁴⁾、真柄 謙吾⁴⁾、野尻 昌信¹⁾

要 旨

数種の木材劣化菌について、スギパルプを効率的に分解することを目的としてリグノセルロース分解酵素活性のスクリーニングを行った。1 次スクリーニングは、AZCL-HE-セルロースを使用した平板培地で行った。引き続き固体培地においてスクリーニングを行うことでトリコデルマ種、アイアナタケ、アスペルギルス種、ヒイロタケに高い紙分解活性を確認した。*Aspergillus tubingensis* KRCF 700 株は、エンドグルカナーゼ、 β -グルコシダーゼ、マンナーゼ、キシラナーゼ、 β -キシロシダーゼ及びろ紙分解活性の高生産株であった。試験した菌株のうち、市販のトリコデルマ由来セルラーゼ製剤と併用した場合に相乗効果を示すことで最も効率的なスギパルプ分解作用を示したのは *A. tubingensis* KRCF 700 株であり、次が *Aspergillus niger* NBRC 31125 株であった。*A. tubingensis* は多様なリグノセルロース分解酵素を生産しており、その多様性がトリコデルマ由来の酵素製剤との効率的な相乗作用につながったと考えられる。

キーワード：スクリーニング、セルラーゼ、固体培養、アスペルギルス・ツビゲンシス

1) 森林総合研究所きのこ・微生物研究領域

2) 森林総合研究所森林微生物研究領域

3) 森林総合研究所九州支所

4) 森林総合研究所バイオマス化学研究領域

* 森林総合研究所きのこ・微生物研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 e-mail: tshimo@ffpri.affrc.go.jp

短 報 (Note)

菌床栽培エノキタケの害虫イシハラナミキノコバエ *Mycetophila ishiharai* Sasakawa (双翅目キノコバエ科)

末吉 昌宏^{1)*}、村上 康明²⁾

Mycetophila ishiharai Sasakawa (Diptera: Mycetophilidae), new pest of *Flammulina velutipes* cultivated on artificial medium

Masahiro SUEYOSHI^{1)*} and Yasuaki MURAKAMI²⁾

Abstract

A new insect pest of *Flammulina velutipes* of artificial medium, *Mycetophila ishiharai* Sasakawa, 1994 (Diptera, Mycetophilidae), is recorded from Oita Prefecture, Japan. It is distinguished from *M. ruficollis* (Meigen, 1818) and *M. dististylata* Sasakawa, 1964, known as pests of *F. velutipes*, as follows: posterior end of subapical dark marking of wing not reaching to vein M_2 , or interrupted at cell m_1 as indistinct marking; apical margin of wing entirely hyaline, without dark markings; mid tibia with 2 ventral setae. The larvae of this species infested the cultivated *F. velutipes* in the Oita Prefecture. We suggested necessity of developing a control method of this mycetophilid species at the cultivating house of *F. velutipes* and a possibility of utilization of chemical components of *Arisaema serratum* (Araceae) which the adults of this pest species visit female flower, as a cue lure.

Key words : Araceae, *Arisaema*, fungi, *Mycetophila dististylata*, Mycetophilinae, Tricholomataceae

はじめに

エノキタケ *Flammulina velutipes* (Curt. Fr.) Sing. は国内で約 13 万 t あまりが生産される (林野庁, 2010)、主要な食用きのこのひとつである。1967 年以降その生産量は増加しており、2009 年の段階で国内のきのこ年間生産量の約 22% を占める (林野庁, 2010)、重要な特用林産物である。エノキタケの主要な生産地は長野県と新潟県で、この 2 県で全生産量の 76% 以上を占める。その他、北海道から沖縄までの 21 道県で全国的に広く生産が行われている (林野庁, 2010)。エノキタケの栽培方法には菌床栽培と原木栽培がある (山本, 2001) が、現在ではほとんどが菌床栽培である。

菌床栽培エノキタケの害虫としてトビモンナミキノコバエ *Mycetophila dististylata* Sasakawa, 1964、ツクリタケクロバネキノコバエ *Lycoriella ingenua* (Dufour, 1839) (= *Lycoriella mali* (Fitch, 1856)) が知られている (中村, 1986; 岡部, 2006; 村上・山下, 2008, 2009; 村上, 2009)。トビモンナミキノコバエが野生のエノキタケに寄生することも知られている (村上, 2009)。また、栽培されたものか野生の子実体か不明であるが、エノキタケにナカモンナミキノコバエ *M. ruficollis* (Meigen,

1818) と *Cordyla fusca* (Meigen, 1804) が寄生する (笹川, 2002; Sasakawa & Ishizaki, 2003)。これらナミキノコバエ属 *Mycetophila* の 2 種は他の 2 種の寄生者 (ツクリタケクロバネキノコバエ, *C. fusca*) より体が大きく、体色が明るい。そのため、ナミキノコバエ属とその他 2 種の間の区別は肉眼でも容易である。

ナミキノコバエ属の種には、外見が非常に酷似し、同定の難しい種が含まれている。例えば、従来ナカモンナミキノコバエとして同定されてきた標本の♂交尾器の形態に微細な変異が見つかり、それに基づいて従来のナカモンナミキノコバエは複数の種に分類された (Laštovka 1972; 笹川, 2002)。また、ナミキノコバエ属の種間の区別には顕微鏡を要し、微細な差異を観察する必要があるため、本属の種はしばしば混同される。エノキタケへの寄生が知られているトビモンナミキノコバエの上記記録では形態の記述が簡素である。そのため、その記録を再検討する必要があると考えた。2006 年に大分県で採取された野生エノキタケと 2007 年に大分県で生産された菌床栽培エノキタケに被害を与えたナミキノコバエ属の標本を再検討した結果、いずれもこれまでエノキタケ害虫として記録されていなかったイシハラナミキノコバ

原稿受付: 平成 23 年 10 月 24 日 Received 24 October 2011 原稿受理: 平成 24 年 1 月 30 日 Accepted 30 January 2012

1) 森林総合研究所九州支所 Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 大分県農林水産研究指導センター林業研究部きのこグループ Mushroom Group, Oita Prefectural Research and Guidance Center for Agriculture, Forestry and Fishery

* 森林総合研究所九州支所森林動物研究グループ 〒860-0862 熊本市黒髪 4-11-16 Forest Zoology Group, Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 4-11-16 Kurokami, Kumamoto 860-0862, Japan; e-mail: msuey@ffpri.affrc.go.jp

エ *Mycetophila ishiharai* Sasakawa, 1994 と同定されたので報告する。

害虫の特徴

イシハラナミキノコバエ (新称) *Mycetophila ishiharai* Sasakawa, 1994

分布: 日本 [本州 (Sasakawa, 1994)、九州 (新記録)]

供試標本: エノキタケ (野生子実体): 3 ♂ 1 ♀, 豊後大野市三重町本城, 18.i.2006 採取, 7.ii.2006 羽化; 5 ♂ 6 ♀, 大分市仁田原, 28.i.2006 採取, 7.iii.2006 羽化. エノキタケ (菌床栽培子実体): 187 ♂ 195 ♀, 日田市, 25.iv.2007 採取, 8.v.2007 羽化; 252 ♂ 242 ♀, 日田市, 11.v.2007 採取, 18-28.v.2007 羽化. エノキタケ栽培施設 (芽出し室前): 2 ♀, 日田市, 25.iv.2007 採集. これらは液浸標本として森林総合研究所九州支所 (熊本市) に保管されている。

成虫の形態と他種からの区別点

成虫 (Fig. 1a) の体長 (頭頂から腹部末端まで) の平

均は ♂ 3.8 mm (n = 7; 3.7-4.0 mm)、♀ 4.4 mm (n = 15; 3.8-4.8 mm) であり、前翅長 (前翅前縁基部から前翅先端まで) の平均は ♂ 3.4 mm (n = 7; 3.3-3.4 mm)、♀ 3.8 mm (n = 15; 3.4-4.2 mm) であった。頭部は暗褐色であり、触覚は淡褐色であった。胸部は暗褐色地に、肩瘤は淡褐色であった (Fig. 1a)。脚は、全体に淡褐色で、各基節先端と腿節先端は暗褐色であった。腹部第1-5節は広く暗褐色で、各節の側縁は淡褐色であった。前翅 (Fig. 1b) は煤がかった透明で、中央と亜端部に明瞭な暗色斑紋があった。雄の交尾器 (Fig. 1c) の生殖端節 dististylus の腹方突起は先端に太い剛毛を6本備え、背方突起はL字型で、先端に顕著な剛毛を生じていた。幼虫 (Fig. 2a) の体長は5-7 mm であった。

本種はエノキタケの害虫として既に知られるトビモンナミキノコバエから、主に以下の形態的特徴 (前翅の斑紋と♂交尾器) によって区別される: 前翅亜端部の暗色斑紋は第2中脈 M_2 に達しないか、達する場合は第1中室 m_1 で不明瞭になったり、途切れたりする; 前翅端部

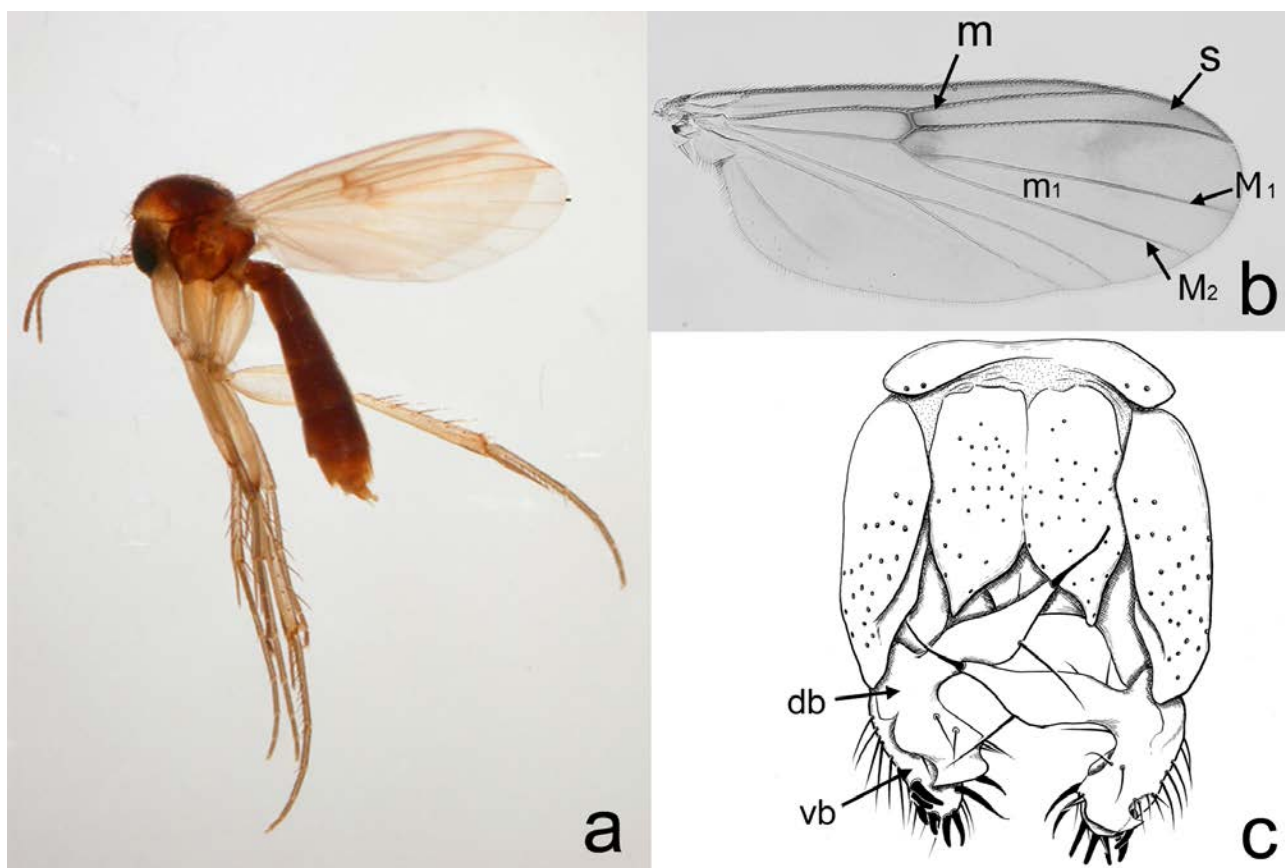


図 1. イシハラナミキノコバエ *Mycetophila ishiharai* Sasakawa の成虫外部形態. a, ♀成虫左側面. b, 右前翅背面 (M_1 , M_2 , 第1, 2中脈; m, 中央部斑紋; m_1 , 第1中室; s, 亜端部斑紋). c, ♂交尾器背面 (db: 背方突起, vb: 腹方突起). 交尾器に生えている剛毛は生殖端節以外ではソケット (剛毛が生える孔) のみを図示した。生殖端節は左右で同形であるが、角度によって見え方が異なることに注意。

Fig. 1. Gross morphological features of *Mycetophila ishiharai* Sasakawa. a, adult female in left lateral view; b, right wing in dorsal view (M_1 , M_2 , first and second medial veins; m, medial dark marking; m_1 , first medial cell; s, subapical dark marking); c, male genitalia in dorsal view (db, dorsal branch of dististylus; vb, ventral branch of dististylus). All setae on the basistylus and cerci are abbreviated and only sockets are shown. The left and right dististyli are same in shape but are shown in different angle.

は透明で、淡い暗色部を持たない；生殖端節の背方突起はL字型で、先端に顕著な剛毛をもつ。また、ナカモンナミキノコバエから、中脚の脛節腹面に2本の剛毛を持つこと、および前翅垂端部に暗色斑紋を持つことで区別される。

被害状況

2005年6月に、大分県内の栽培施設から得たビン栽培エノキタケに被害を確認した。幼虫はエノキタケの柄の内部を食害し、蛹化のため繭をエノキタケの柄の外側や傘の内部 (Fig. 2b, c) に形成していた。2007年5月に大分県内の市場に出荷された、パック包装のエノキタケから幼虫が這い出し、異物混入となって被害が顕在化した。同年5月23日にこのパックの提供を受け、これらも上記と同じ被害であることを確認した。

これらの被害事例を受けて、防除方法を検討するため、

羽化試験を2006-2008年に農林水産研究指導センターきのこグループにおいて実施した。生産現場で生育不良により廃棄された培養ビンをフィルター付きのポリ袋に入れ、摂氏15度条件の恒温器 (サンヨー製 MIR-252) で保管したところ、エノキタケが腐敗したあとの培地表面が繭で覆われるほどになり (Fig. 2d)、多数の成虫の羽化を見た。摂氏6度前後の低温に保った生育室では、ほとんどの個体の発育は幼虫で止まり、蛹が形成されることは稀であった。

考察

長野県で菌床栽培のエノキタケに被害を出したキノコバエはトビモンナミキノコバエと同定され、報告された (山本・小出, 2002)。このキノコバエによるエノキタケでの発生様態は次のように報告された：幼虫が子実体から得られた；摂氏15度の恒温条件で6日目に羽化

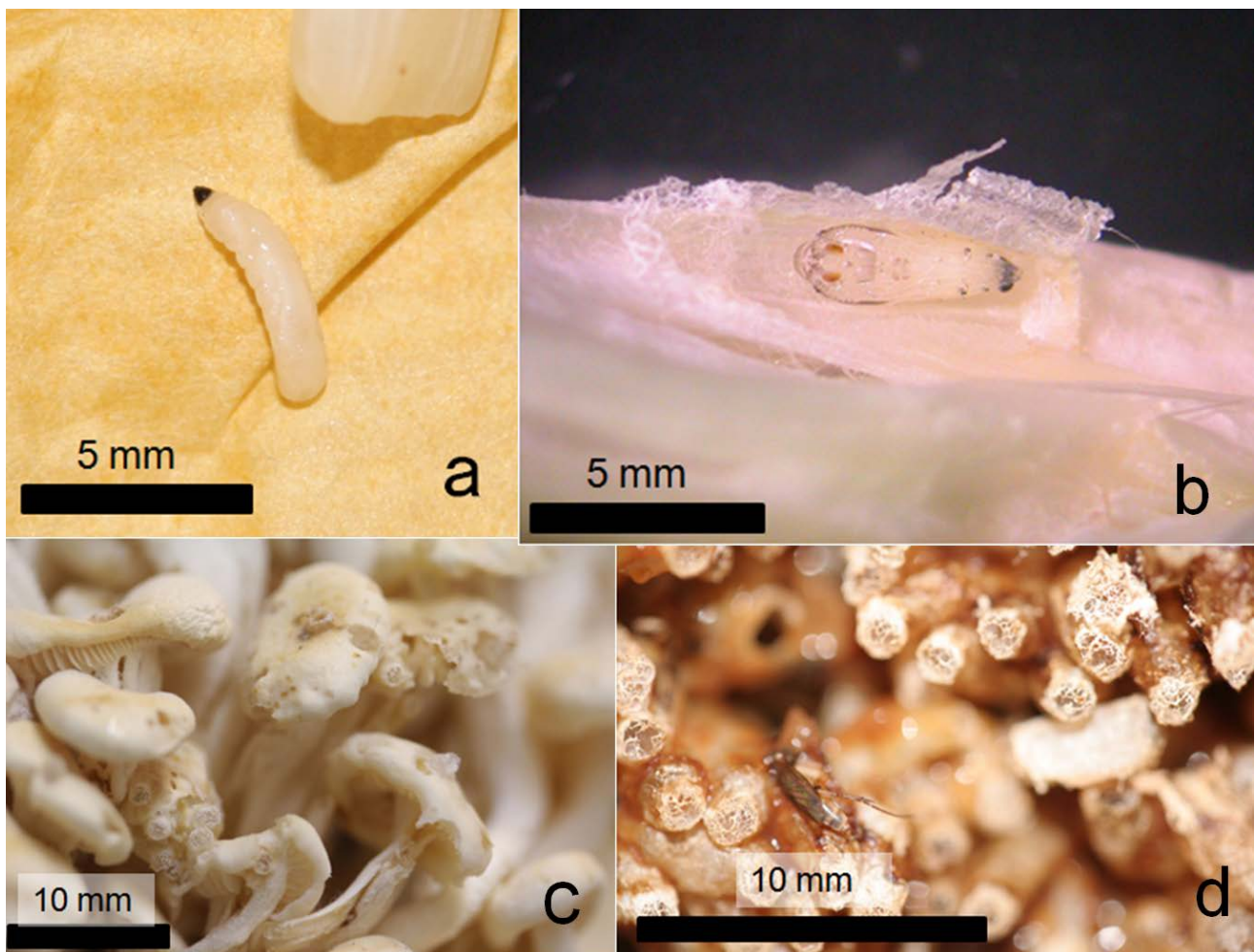


図2. イシハラナミキノコバエ *Mycetophila ishiharai* Sasakawa の幼虫と被害様態. a, 幼虫. b, 蛹. c, 食害を受けたエノキタケ. d, 培地表面を覆い尽くした繭 (円筒状の構造物). 写真 (c, d) は摂氏15度の恒温条件で生育したエノキタケとその培養ビンで見られた被害である。栽培現場の通常の生育管理 (摂氏6度恒温条件) では写真 (c, d) のような被害にはならない。

Fig. 2. Immature stages of *Mycetophila ishiharai* Sasakawa and infested fruiting body of *Flammulina velutipes*. a, larvae. b, pupae. c, fruiting body infested by *M. ishiharai*. d, cocoons on artificial medium. The culture bottle with fruiting body was kept in an incubator (San-yo Co., MIR-252) conditioned to keep the degree of 15 °C. It caused heavy infestations by cocoons (c, d). Little number of cocoons is usually found in the condition kept the degree of 6 °C.

が見られ、摂氏 5 度では 10 日経っても成虫が羽化しなかった（山本・小出, 2002）。大分県で菌床栽培エノキタケに被害を出したキノコバエに関する試験では、長野県での発生様態と共通する、次のような特徴が明らかにされた：廃棄子実体から羽化が見られたが、廃菌床から羽化しなかった；摂氏 15 度の恒温条件で管理した子実体から羽化が見られた；エノキタケの生育室室温（摂氏 6 度前後）では、ほとんどの個体の発育が幼虫で止まることが明らかにされた（村上・山下, 2008, 2009；村上, 2009）。

トビモンナミキノコバエは四国の剣山で採集された標本に基づいて記載された種であり（Sasakawa, 1964）、それ以後知られている地理的分布は埼玉県（玉木, 1997）と上記 2 地域での報告に限られる。村上・山下（2008, 2009）で報告された標本のうち、羽化試験と捕獲試験で得られた個体を今回同定に供試した結果、これらの外見の形態特徴や体長・翅長はイシハラナミキノコバエの原記載（Sasakawa, 1994）および模式標本（大阪市立自然史博物館蔵：松本・笹川, 2006）とよく一致していた。そのため、これらの標本はイシハラナミキノコバエであり、本種は九州にも分布すると考えた。本種とトビモンナミキノコバエは外見が酷似している。被害が生じた際には、♂成虫の標本を作成し、どちらの種による被害であるかを正確に区別する必要がある。

イシハラナミキノコバエはこれまで、千葉県でのみ知られており（Sasakawa, 1994）、今回大分県で分布が確認された。千葉県ではエノキタケの栽培は行われていないかごく小規模であり、大分県では 2,577 t が生産されている（生産量全国 6 位）（林野庁, 2010）。本種およびトビモンナミキノコバエの自然の地理的分布と上記生産地との関係を明らかにし、これらの種が分布している地域では被害発生を警戒し、防除に努める必要があると考える。防除方法として、侵入遮断、侵入後の粘着紙や電撃殺虫器による捕殺、発生源の除去などが提唱されている（村上, 2009）。大分県での被害では、多数の個体が発生した（村上・山下, 2009）。一度発生すると被害が甚大になる可能性があるため、廃棄ビンや廃棄子実体（きのこ）の処理には注意が必要である。

キノコバエ類がマムシグサ類やチャルメルソウ類の花粉媒介を行っていることが他のいくつかの研究で知られている（Vogel & Martens, 2000; Okuyama et al, 2004; Nishizawa et al, 2005; Barriault et al, 2009）。イシハラナミキノコバエはマムシグサ *Arisaema serratum* の雌花の訪花昆虫として知られている（Sasakawa, 1994）。しかし、マムシグサのある特徴に本種が誘引されているか、あるいは本種はマムシグサの単なる訪問者でしかないか、は未だ不明である。チャルメルソウ類の出す化学成分がキノコバエによる花粉媒介の様式決定に関わっている可能性が指摘されている（岡本ら, 2009）。マムシグサ由来する化学成分がイシハラナミキノコバエを誘引してい

るかを明らかにすることで、それを利用した本種の誘引剤やトラップの開発が栽培地での本種の個体数抑制に寄与する可能性がある。

謝辞

イシハラナミキノコバエの模式標本の検討にご協力いただいた松本吏樹郎氏（大阪市立自然史博物館）に深謝する。

引用文献

- Barriault, I., Barabe, D., Cloutier, L., and Gibernau, M. (2009) Pollination ecology and reproductive success in Jack-in-the-pulpit (*Arisaema triphyllum*) in Quebec (Canada), *Plant Biology*, 12, 161-171.
- Laštovka, P. (1972) Holarctic species of *Mycetophila ruficolilis*-group (Diptera, Mycetophilidae). *Acta ent. bohemoslov.*, 69: 275-294.
- 松本吏樹郎・笹川満廣 (2006) 京都府立大学より大阪市立自然史博物館に移管された笹川満廣博士およびその協力研究者記載の双翅目完模式標本, 大阪市立自然史博物館研究報告, 60, 13-30.
- 松尾忠直 (2010) 日本におけるキノコ類産地の地域的変化, 地球環境研究, 12, 53-67.
- 村上康明・山下和久 (2008) きのこと栽培における害虫類の生態解明と防除技術の開発 (I) —キノコバエ等の防除法—, H19 年業務年報, 43-47.
- 村上康明・山下和久 (2009) きのこと栽培における害虫類の生態解明と防除技術の開発 (II) —キノコバエ等の防除法—, H20 年業務年報, 49-56.
- 村上康明 (2009) 大分県におけるエノキタケのキノコバエ被害について, 第 65 回日本森林学会九州支部大会研究発表プログラム
- 中村公義 (1986) 春から問題にしたい害虫・害菌, 信州のそ菜, 369, 42-45.
- Nishizawa, T., Watano, Y., Kinoshita, E., Kawahara, T., and Ueda, K. (2005) Pollen movement in a natural population of *Arisaema serratum* (Araceae), a plant with a pitfall-trap flower pollination system, *American Journal of Botany*, 92, 1114-1123.
- 岡部貴美子 (2006) 日本における食用きのこの害虫, 森林総研研報, 5, 119-133.
- 岡本朋子・奥山雄大・加藤 真 (2009) チャルメルソウ節の花の匂いがもたらす生殖隔離機構, 日本応用動物昆虫学会第 53 回大会要旨集, 46.
- 林野庁 (2010) “平成 21 年特用林産基礎資料”, 林野庁, <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001067299>.
- Sasakawa, M. (1964) Japanese Mycetophilidae V. Descriptions of three new species, *Akitu*, 12, 1-4.
- Sasakawa, M. (1994) Fungus gnats associated with flowers of the genus *Arisaema* (Araceae) Part 2.

- Keroplatidae and Mycetophilidae (Diptera), Trans. Shikoku Entomol. Soc., 20, 293-306.
- 笹川満廣 (2002) 日本産双翅目ノート 1, 昆虫 (ニューシリーズ), 5, 29-34.
- Sasakawa, M. and Ishizaki, H. (2003) Fungus gnats of the genera *Anatella*, *Allodia* and *Cordyla* in Japan (Diptera: Mycetophilidae), Entomol. Sci., 6, 97-109.
- 玉木長寿 (1997) 双翅目, 碓井徹編 “埼玉県昆虫誌Ⅱ” 埼玉昆虫談話会, 1-405.
- Vogel, S. and Martens, J. (2000) A survey of the function of the lethal kettle traps of *Arisaema* (Araceae), with records of pollinating fungus gnats from Nepal, Bot. J. Linn. Soc., 133, 61-100.
- 山本秀樹 (2001) エノキタケ, 大森清寿・小出博志編 “キノコ栽培全科”, 農山漁村文化協会, 85-96.
- 山本秀樹・小出博志 (2002) 害虫, 長野県他編 “きのこ栽培指標”, 長野県・長野県農業協同組合中央会・全国農業協同組合連合会長野県本部・長野県森林組合連合会, 256-266.

短 報 (Note)

日影森で発生した地すべりの流動化機構の土質力学的検討

岡田 康彦^{1)*}、黒川 潮²⁾、浅野 志穂³⁾

Examining fluidisation mechanisms of Hikagemori landslide by means of soil tests

Yasuhiko OKADA¹⁾, Ushio KUROKAWA²⁾ and Shiho ASANO³⁾

Abstract

The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 triggered a complex debris slide - earth flow on the east slope of Mt Hikagemori, Kurihara city, Miyagi prefecture. In-situ surveys revealed the travelled landslide-mass was mostly unsaturated, but near the sliding surface pore-fluid pressure was built-up with suspension of the fine soil particles. From the undrained cyclic-loading triaxial-compression tests on undisturbed samples, the measured internal friction angle was only about 18 degrees, the measured cohesion was as much as about 60 kPa, and a soil skeletal-collapse could take place in a case. In the flume experiments, the disturbed samples showed less mobility in the mass flows than the one expected from the Hikagemori landslide. However, the fluidisation and long travelling behaviour of the Hikagemori earth flow was likely attributable to the low internal friction angle, high pore-fluid pressure near the sliding surface with suspension of the fine soil particles, and soil skeletal-collapse generation.

Key words : Complex landslide, fluidisation, pore-fluid pressure, soil test

1. はじめに

岩手・宮城内陸地震(平成20年6月14日午前8時43分に発生、岩手県奥州市を震源地とする直下型地震、マグニチュードは7.2、最大震度6強)では、宮城県栗原市、岩手県奥州市を中心に、土石すべり、土石流、落石、岩盤崩落など大小種々のタイプの地すべりが発生した。ここで用いている用語「地すべり」は、英語のLandslideの訳語として使用しており、崩落、前方回転、すべり、側方流動、流れを包含するものである(佐々, 2003)。著者らは、地震発生後6日目の6月20日から現地調査にはいったところ、長距離を運動する流れタイプの地すべりにおいても、水と土石が渾然一体となったいわゆる土石流の他、運動する土砂が水で飽和するまでには至っておらず、不飽和の状態でも運動したアースフローや土石の流れが確認された。本報では、後者の一例である宮城県栗原市日影森東方斜面で発生した複合型の地すべりを対象に、三軸試験ならびに大型の水路を用いた土砂の流下実験を行った結果を報告する。

2. 日影森地すべり

日影森地すべりは、宮城県栗原市の日影森東方斜面(北緯:38度53分、東経:140度52分)で発生した複合型の土石すべりーアースフロー(Photo 1)である。未固結の軽石凝灰岩の上に溶結した凝灰岩がキャップロック状に乗っている斜面で発生しており、土石すべりの滑落崖は幅が約75m、高さが20m程度と大きく(Photo 2)、土塊をあまり乱すことなくスランプ状に運動していた。土石すべりの堆積幅は約120mであった。すべり面は、軽石凝灰岩層で形成されていた。大半の土砂は運動距離にして20m程度で停止したものの、土石すべりの左岸側の一部の土砂が流動化し、谷地形に沿って方向を変えながら約150m以上を流下した。Fig. 1は、アースフロー堆積末端部からアースフロー流走域、そして土石すべりの左岸側(左側方崖から10m程度内側)をコンパス測量により縦断測量した結果を示したものである。最後の直線部分約70mにおいては、その勾配が約10度以下と緩いものであった。アースフロー堆積域の末端では、先端の土砂が約25度の大きな勾配を持って堆積し

原稿受付:平成23年11月30日 Received 30 November 2011 原稿受理:平成24年2月2日 Accepted 2 February 2012

1) 森林総合研究所水土保全研究領域 Department of soil and water conservation, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 森林総合研究所関西支所 Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

3) 森林総合研究所九州支所 Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* 森林総合研究所水土保全研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 Department of soil and water conservation, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: okada10@ffpri.affrc.go.jp

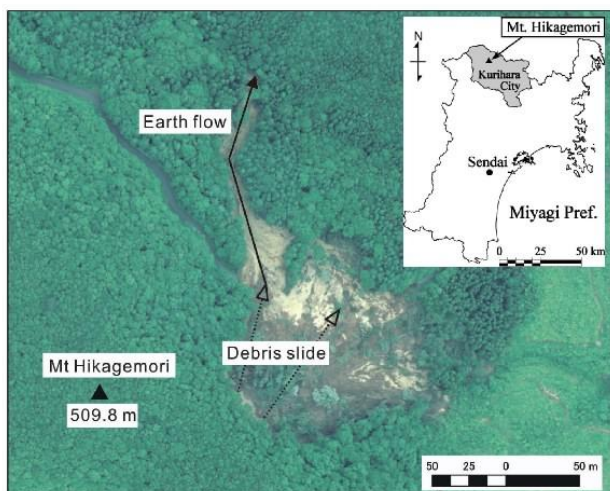


写真1 複合型の日影森土石すべりーアースフローのオルソ画像 (国土地理院ウェブサイト平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震情報集約マップよりダウンロードしたオルソ画像に加筆)



写真2 日影森地すべり . a) 土石すべり源頭部近傍、b) 滑落崖 .

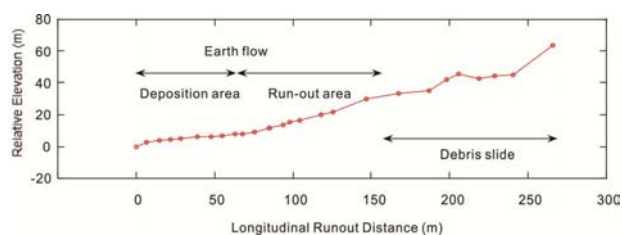


図1 日影森地すべりの縦断図 .

ていた (Photo 3)。また、この末端部のすべり面近傍からは、泥水となって流出しその後沈積したと考えられる細粒土粒子の堆積が認められた。細粒土粒子の堆積層は厚さが 10mm 程度 (Photo 4) で、土砂堆積末端部から約 6m 先方にまで広がっていた。流走域から堆積域において土砂が水で飽和した様子は認められず、それほど飽和度の高くない不飽和の状態で流下してきたと推定される。一方、土砂堆積先端部から滲出した細粒土粒子の堆積層からわかるように、すべり面近傍ではせん断変形に伴い細粒土粒子が間隙水に浮遊し、このことにより間隙流体圧が上昇していたと推定可能である。土砂の運動が停止し圧力の開放が進行するに従って浮遊していた細粒土粒子が滲出し堆積したというわけである。なお、運動土砂の多くは不飽和状態であったと推定されるものの、地震発生6日後の時点で水を多く含む場所も一部露出しており、この部分を足で踏み付け軽い振動を与えると容易に液状化して流体状へと変化することが確認できた (Photo 5)。



写真3 日影森地すべり (アースフロー) の堆積末端の様子 . 測量ポールの奥が不飽和土砂で約 25 度程度の急勾配で停止している . 手前にはすべり面より滲出した細粒土粒子の堆積が認められる .



写真4 日影森地すべり (アースフロー) のすべり面より滲出した細粒土粒子の堆積層 (約 10mm の厚さと認められる) .



写真5 日影森地すべり（アースフロー）の流走域下端付近で認められた容易に液状化する土砂の様子。

3. 三軸試験

3-1 試験概要

日影森地すべりの流動化機構を力学的に検討するために、三軸試験を行った。三軸試験は、ゴム膜で囲った円柱状の供試体を水圧により圧密し、その後、鉛直軸方向に荷重を載荷して供試体を破壊させる土質試験である。滑落崖の軽石凝灰岩層を整地し、真鍮のチューブ管を地山に直接押しこむことにより不攪乱の試料を採集した。これらの試料を研究室に持ち帰り、適宜トリミング作業を行うことにより、直径 50mm、高さ 100mm の三軸試験用供試体を作成した。なお、試料の平均粒径は $D_{50}=0.32$ mm、均等係数 $U_c=18.9$ ($D_{10}=0.028$ mm、 $D_{60}=0.53$ mm)、土粒子密度は $\rho_s=2662\text{kg/m}^3$ であった。15kPa の拘束圧の下、水頭差約 0.3m の状態で 3 時間から最大 12 時間かけて水を供試体に循環させた。所定の初期拘束圧で圧密した後、非排水条件下で正弦波 1Hz の荷重を鉛直軸方向に 30 波載荷することとした。供試体が破壊しない場合は、波形の振幅を大きくした上でさらに 30 波載荷させた (Table 1)。軸歪みが 15% を越えたら載荷を停止させた。

3-2 試験結果・考察

Fig. 2 は、試験 TT-A で得られた応力経路を示している。間隙圧係数 B 値 (Skempton, 1954) が 0.35 と小さく供試体の飽和度が低い試験 TT-A では、間隙流体圧の大幅な上昇や急激な強度低下は認められなかった。一方、破壊包絡線が確認でき、内部摩擦角にして約 18 度、粘着力成分が約 60kPa を示した。試験 TT-B では、若干の強度低下が認められたものの、間隙流体圧値については試験 TT-A 同様、大幅な上昇は確認されなかった。供試体の間隙比が一番大きかった試験 TT-C の応力経路を Fig. 3 に示す。動的載荷軸荷重の振幅が小さい場合は試験 TT-A、試験 TT-B 同様間隙流体圧の上昇ならびに強度低下とも認められなかった。しかし、載荷軸荷重の振幅を大きくしていったところ、間隙流体圧が極端に上昇することなくせん断強度が一気に低下した。これは、軸荷重が動的に載荷され供試体が軟化していく過程で土粒子骨格の構造破壊が生じたものと推定される。このことから、間隙比や飽和度、応力条件によっては構造破壊による強度低下が発生する可能性が示唆された。

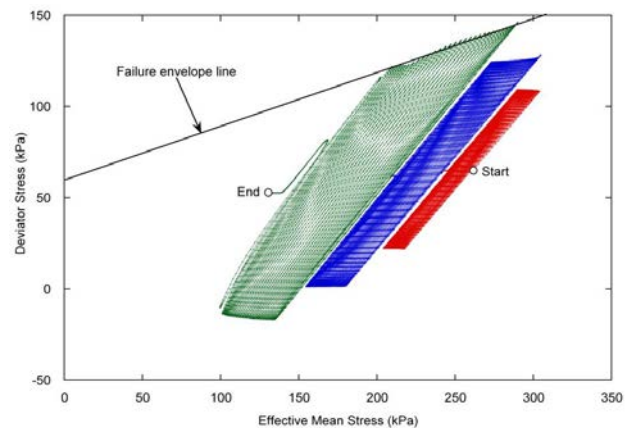


図2 試験 TT-A で得られた有効応力経路図。

表1 動的載荷三軸試験の試験名および条件

	間隙比	B 値	拘束圧, 初期有効平均 1Hz 正弦波形軸荷重の振幅 (N)				
			σ_3 (kPa)	応力, p'_0 (kPa)	(30 サイクル載荷)		
TT-A	2.1	0.35	200	260	196	294	392
TT-B	2.2	0.43	175	214	172	257	343
TT-C	2.5	0.56	100	115	98	147	196 294

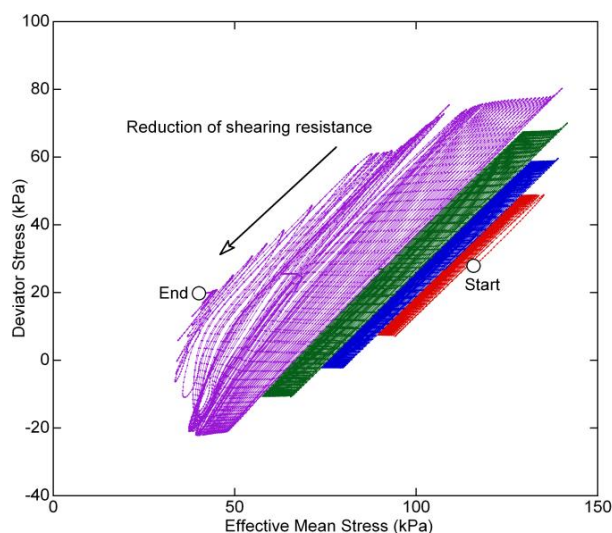


図3 試験 TT-C で得られた有効応力経路図。

4. 大型水路を用いた流下実験

4-1 実験概要

土砂が流下する際の間隙流体圧の上昇や運動距離を検討するために、大型の水路模型 (Fig. 4、岡田・落合, 2007、Okada and Ochiai, 2008) を対象に 0.6m^3 の攪乱サンプルの流下実験を行った。水路は、幅 0.6m 、全長が 9m で、このうち 5m は勾配可変となっている。水路底面には、粗度を与えるために、粒径 0.4mm から 2.0mm の砂を密に吹き付けたシートを貼り付けた。勾配可変部の端部 1m には水密のゲートが設置されており、供試体の下部から水を徐々に注入することにより 0.6m^3 の飽和供試体を作成可能な仕様となっている。水密のゲートは油圧によりコントロールされている。ゲートの上下に設置されたピンを油圧により抜き去ることにより、観音開き方式でゲートは一気に開放され、水を含んだ土砂供試体が傾斜水路を流下する仕組みである。源頭部付近より採取した約 2m^3 の軽石凝灰岩の攪乱試料を対象に、2 回の流下実験を行った (Table 2)。

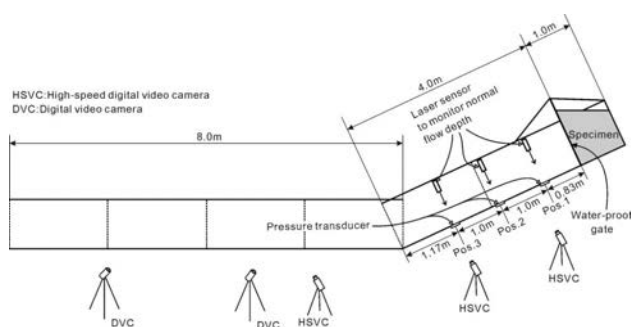


図4 土砂の流下実験に用いた大型模型水路の模式図。

表2 土砂流下実験の実験名および条件

	間隙比	供試体の飽和程度	等価摩擦係数
FE-A	3.1	下方半分程度まで水を浸潤	0.545
FE-B	2.9	全層水を浸潤	0.256

4-2 実験結果・考察

2 章で述べた通り、日影森地すべり (アースフロー) はすべり面近傍では間隙流体圧が上昇したものの、運動土砂の大半は不飽和の状態で流下したと推定される。そこで、 0.6m^3 の供試体の内、下方半分程度が水で飽和するように供試体を作成した (実験 FE-A)。水路の勾配を 30 度に設定して流下させたところ、土砂は 30 度傾斜の水路上で減速し、土砂の主体はゲートから 2.5m 以内で停止した。また傾斜水路の底面で計測した圧力水頭値とその時の流動深の関係を調べても、過剰な圧力の上昇は認められなかった。香川 (1978) によると、模型を用いた実験では、原型に対する模型の比と等しくなるよう実験試料の粘着力を小さくして実験を実施する必要がある。しかし、粘着力を小さくして実験を実施するのは困難であるため、当該実験ではこの点を考慮しなかった。前章の三軸試験結果によると、実験に用いた軽石凝灰岩の粘着力は大きく、上記の影響が強く顕れたことにより長距離運動は発生しなかったものと推定した。なお、計測された等価摩擦係数は 0.545 と大きな結果になった。

続いて、実験 FE-B では、 0.6m^3 の供試体全てに水を循環させた上で、実験 FE-A 同様 30 度水路を流下させた。Fig. 5 は、傾斜水路上のポジション 1 (Fig. 4 参照) で計測した圧力水頭値とその時の流動深の関係を示している。約 27 秒時に、流下土砂が計測ポイントを通りしはじめ約 27.5 秒までの間、圧力水頭値が流動深を上まわる結果が得られた。この間、流下土砂の底面付近では、高い間隙流体圧力が発生していたと考えられる。一方、経過時間が約 30 秒から 36 秒までにおいては、圧

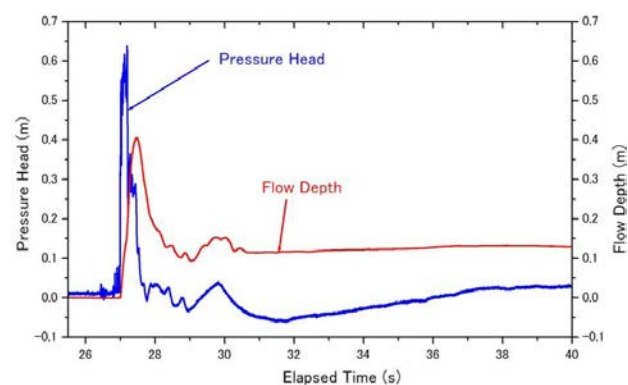


図5 実験 FE-B において計測された圧力水頭と土砂の流動深の関係。

力水頭値は負の値を示している。これは、供試体作成時に水路底面から水を3時間以上かけて徐々に注入したものの、供試体全体として飽和状態とまでは言えない不飽和の状態であったことが主因と考えられる。飽和度の低い部分が残存し流下過程でこの部分に間隙水が引っ張られ、また、傾斜水路上に残留する土砂と流下を続ける土砂があったためその過程で体積膨張による引張応力が生じたと推定される。

一部の土砂は傾斜水路上に堆積したものの、一方で流下した土砂の一部は傾斜変換点をを超えて水平水路上を最大で6.6m運動した。中速デジタルビデオ(60フレーム毎秒)で撮影した画像を確認したところ、飽和度の低いブロック状の土砂が、泥水を底面にして水平水路を滑らかにすべった後に停止していた(Photo 6)。この土砂は、傾斜水路を流下する際は先頭付近に位置しており、水平水路に到達した後、分離しながら運動して停止していた。泥水は、細粒土粒子が浮遊していることを意味し、見かけ上の密度が上昇して水路底面の流体圧上昇に寄与していると考えられる。FE-Bでは、計測された等価摩擦係数は0.256と小さく、水が充分含まれておりすべり面近傍の流体圧が上昇した状態であれば高い流動性を示すことがわかった。

本実験は、国内最大級の水路を用いてはいる。しかし、特にFE-Aの結果では、今回対象とした軽石凝灰岩のような粘着力成分の大きな材料については、実際の斜面で発生している流下土砂の長距離運動を再現することが困難であることが示された。一方、試料に水が充分含まれており、すべりが生じている近傍の間隙流体圧が高い場合(実験FE-B)は、土砂の一部が高い流動性を示し長距離運動する可能性を示す結果が得られた。この結果は、不飽和の土砂を主体とする日影森地すべりの長距離運動を直接的に再現するものではないが、すべり面近傍の飽和土砂で発揮される摩擦係数が低下して長距離運動を引き起こす可能性を示唆するものである。



写真6 実験FE-Bにおいて水平水路上を運動し堆積したブロック状の土砂の様子

5. まとめ

2008年岩手・宮城内陸地震により発生した日影森地すべりは、複合型の土石すべりーアースフローであった。堆積域末端の土砂が約25度の比較的大きな勾配で停止していたこと、すべり面近傍から細粒土粒子が滲出して堆積していたことから、アースフローの大半の土砂は水で飽和していない状態で流下しているものの、すべり面近傍では細粒土粒子の浮遊にともなう間隙流体圧が上昇して強度が低下し、長距離運動を引き起こしたものと推定された。この複合型地すべりの流動化機構を調べるために、不攪乱試料を対象に動的載荷三軸試験を実施した。計測された内部摩擦角は約18度と小さく、また、粘着力成分が60kPa程度と大きいこと、間隙比や応力条件によっては土粒子骨格の構造破壊により強度低下する可能性が示された。土砂の長距離運動を再現することを目的に大型の水路模型を用いて土砂流下実験を実施したところ、水での飽和を試みた供試体では、一部の土砂が長距離運動することが示された。このことは、不飽和土砂が大半の日影森地すべりの長距離運動を実験的に直接再現するものではないものの、すべり面近傍に水が十分に含まれていれば間隙流体圧が上昇して強度低下が起こり、土砂が長距離運動する可能性を示唆するものである。

6. おわりに

本研究は、岩手・宮城内陸地震によって発生した土砂災害の特徴と発生機構に関する研究(森林総合研究所運営費交付金プロジェクト、課題番号:200810)によって実施した。研究を推進するにあたり、森林総合研究所の加藤正樹研究コーディネータ(当時)、落合博貴研究領域長(当時)、村上亘主任研究員、ならびに松浦純生教授(京都大学防災研究所)には種々のご助言・ご協力を頂いた。また、三森利昭チーム長(当時)を筆頭に当該プロジェクト構成メンバーには、数度にわたるディスカッションで有意義な意見を頂戴した。記して謝意を表します。

引用文献

- 香川崇章(1978)土構造物の模型振動実験における相似則,土木学会論文報告集, **275**, 69-77
- 岡田康彦・落合博貴(2007)土砂流下実験における間隙水圧の動的変化と流下土砂の運動特性,日本地すべり学会誌, **43**(5), 283-293
- Okada, Y., Ochiai, H. (2008) Flow characteristics of 2-phase granular mass flows from model flume tests, *Engineering Geology*, **97**, 1-14
- 佐々恭二(2003)砂防学と地すべり研究の学際的发展と国際化,砂防学会誌, **55**(5), 1-3
- Skempton A, W. (1954) The pore pressure coefficients A and B. *Géotechnique*, **4**, 143-147.

研究資料 (Research material)

東栗駒山ドゾウ沢崩壊地周辺の崩壊発生1年後の 崩壊堆積物における侵食と植生回復

小川 泰浩^{1)*}、大丸 裕武¹⁾、村上 亘¹⁾、岡田 康彦¹⁾、杉田 久志²⁾、江坂 文寿³⁾

Erosion and vegetation recovery on the landslide deposit one year after the dozou-sawa deep landslide at Mount Higashikurikoma-yama, northeast Japan

Yasuhiro OGAWA^{1)*}, Hiromu DAIMARU¹⁾, Wataru MURAKAMI¹⁾,
Yasuhiko OKADA¹⁾, Hisashi SUGITA²⁾ and Fumitoshi ESAKA³⁾

Abstract

We describe surface erosion and vegetation recovery on the landslide deposit one year after the dozou-sawa deep landslide at Mount Higashikurikoma-yama, northeast Japan. The landslide in subalpine mountain region was triggered by the Iwate-Miyagi Nairiku earthquake in 2008. Surface erosion at the landslide scarp was more severe than erosion at the landslide deposit. Surface soil hardness of the deposit and the landslide scarp were so low that vegetation could recover. Four types recovering vegetation at the deposit was observed as follows: (1) a seedling, (2) patchy vegetation on soil blocks which separated from the bedrock, (3) snowpatch grassland undisturbed under the remaining snow, (4) vegetation at knick points. The result of vegetation survey and GIS analysis after the landslide seem to indicate that subalpine vegetation is able to escape from landslide disturbance depends on microtopography and remaining snow just before the earthquake.

Key words : the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, subalpine mountain region, landslide, erosion, snowpatch, vegetation recovery

要旨

2008年岩手・宮城内陸地震の際に亜高山帯山地で発生した崩壊地について、発生から1年後に、降雨による侵食状況と被害を受けた植生の回復状況を調査した。その結果、降雨による侵食は崩壊地源頭部の急斜面以外では顕著でなく、堆積土砂は植生が定着しやすい土壌硬度が維持されていた。今回の植生調査によって崩壊地周辺では、当年生の植生、板状体植生、積雪下で温存された雪田植生、地形の遷急点直下に残存した植生が確認された。植生調査やGIS地形解析によって崩壊地では積雪環境に適応した植生の一部が大規模な攪乱から逃れて生き残っていることが明らかになった。

キーワード：岩手宮城内陸地震、亜高山帯山地、崩壊、侵食、雪田、植生回復

1. はじめに

2008年6月14日午前8時43分に岩手県内陸南部の深さ8km地点でマグニチュード7.2の地震が発生した(Yagi et al., 2009)。この地震によって東栗駒山(標高1434m)の東側斜面が大規模に崩壊した(東北森林管理局, 2009)。崩壊土砂はドゾウ沢を約10km流れ下り、駒の湯温泉旅館の宿泊客や従業員を襲い死者・行方不明者を生む土砂災害が発生した(Yagi et al., 2009)。崩壊地の源頭部は栗駒山・柄ヶ森山周辺生態系保護区域(平吹, 2001)であるため、災害後の治山対策会議では植生回復の追跡調査を行い、その回復状況に配慮しながら、今後の緑化について研究する方針で報告書がとりまとめられた(東北森林管理局, 2008)。

しかし、植生回復やその推移に応じた崩壊地の治山対策を検討するためには、攪乱を受けた初期段階における斜面の侵食状況と植生回復状況を基礎資料として記載する必要がある。

そこで本研究では、亜高山帯植生が成立した山地斜面に形成された崩壊地において崩壊発生1年後に現地調査を行い、融雪期に攪乱を受けた斜面の侵食状況と植生回復状況を明らかにした結果を報告する。

そこで本研究では、亜高山帯植生が成立した山地斜面に形成された崩壊地において崩壊発生1年後に現地調査を行い、融雪期に攪乱を受けた斜面の侵食状況と植生回復状況を明らかにした結果を報告する。

原稿受付：平成23年12月20日 Received 20 December 2011 原稿受理：平成24年4月13日 Accepted 13 April 2012

1) 森林総合研究所水土保全研究領域 Department of Soil and Water Conservation, Forestry and Forest Product Research Institute(FFPRI)

2) 森林総合研究所森林植生研究領域 Department of Forest Vegetation, Forestry and Forest Product Research Institute(FFPRI)

3) 元林野庁東北森林管理局(現：内閣府(防災担当)) former office : Tohoku Regional Forest Office, Forestry Agency / current office : Cabinet Office, Government of Japan

* 森林総合研究所水土保全研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 Department of Soil and Water Conservation, Forestry and Forest Product Research Institute(FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: yasuihiro@ffpri.affrc.go.jp

2. 調査地と調査方法

調査地は宮城県三迫川上流域のドゾウ沢崩壊地源頭部と崩壊地对岸の斜面である(図1、図2)。崩壊斜面の植生定着の指標となる地表の侵食状況を把握するため、2009年6月25日に源頭部の軽石凝灰岩の斜面(S1、

標高1340 m)と土石流が乗り上げながら左岸の斜面を通過した土石流堆積物(S2、標高1206-1214 m)に侵食ピン(以下ピンと呼ぶ)を設置した。S1では10本のピンを傾斜40度の軽石凝灰岩の斜面に等高線方向に5本ずつを一辺40-50 cmの格子状に設置し(図2、写真



図1 東栗駒山ドゾウ沢崩壊地の位置 ★:崩壊地, ●:アメダス駒ノ湯
Figure 1. Locations of Mount Higashikurikoma-yama dozou-sawa deep landslide.
★:Landslide, ●: AMeDAS observation point Komanoyu



図2 2008年6月の崩壊地と調査地の位置
Figure 2. Locations of study site and the landslide scar in June 2008.

1 ①)、S2 では傾斜 20 度の斜面にある巨礫（一辺数メートル）どうしを結ぶ等高線方向の地表面（長さ 45 m）に約 5 m 間隔で 10 本設置した（図 2、写真 1 ②）。両サイトではピン付近の土壌硬度を山中式土壌硬度計で 10 点測定した。

植物生育期の表面侵食に関与する降雨条件を明らかにするため、2009 年 8 月 25 日に崩壊の影響のなかった巨礫（標高 1284 m）の上に 1 転倒 0.2 mm の雨量計（Davis 社製 Rain Collector II）を設置し、自記記録計（Onset Computer 社製 HOBO Event）を用いた雨量観測を行った（図 2）。崩壊地に侵食ピンを設置した 6 月 25 日から 8 月 25 日の 2 ヶ月間は雨量観測を行っていないため、雨量観測点より南南西に 5.5 km 離れたアメダス観測地点「駒ノ湯」（以後、アメダス駒ノ湯と呼ぶ）の雨量データを本報告での検討に使用した（図 1）。2009 年の観測期間は積雪前の 10 月 22 日に雨量計を撤収したため約 2 ヶ月となった。

植生調査プロットは 2009 年 9 月 18 日に侵食ピンを設置した斜面横断方向のベルトトランセクト（B1、幅 1 m、長さ 45 m、標高 1207-1215 m）と、B1 と斜面方向に交差する斜面縦断方向のベルトトランセクト（B2、幅 1 m、長さ 30 m、標高 1215-1222 m）を設定し（図 2）、同年 10 月 22 日に崩壊土砂堆積斜面に 5 m のコドラートを 2 箇所設定した（図 2 の Q1、Q2）。5 m コドラートは S2 のライントランセクトを行っている場所から 10 m 北東の地点（Q1、標高 1218 m）と Q1 から 250 m 南西の緩傾斜面（Q2、標高 1145 m）に設置した。ベルトトランセクトやコドラートに出現した植物の被度は、Braun-Blanquet の優占被度階級（星野，1999）によって整理した。ベルトトランセクトでは 1 m 単位で被度を求めた。

東栗駒山の崩壊発生直後の地形変化と植生回復状況の対応を検討するため、東北森林管理局が 2008 年 6 月と

同年 9 月に実施した空中写真と航空レーザー測量による地形データを GIS に重ね合わせ、標高差分を用いた崩壊地の地形解析を行った。崩壊地周辺は豪雪地帯で知られ、冬季に奥羽山脈の西側が強い寒風と降雪に見舞われ、稜線を隔てた風背側にも多量の雪が吹き溜まり、栗駒山山頂付近では積雪深が 10m に達することもある（平吹，2001）。崩壊発生当時（6 月）は融雪期であったため、レーザー測量で雪面の地形データを取得した斜面もあり、2 時期の標高差分により土砂の侵食深だけでなく、崩壊発生当時の崩壊地周辺の積雪深も推定できると判断した。調査地の植生は、雪田植生や亜高山帯落葉低木群落であり、雪田植生の生育高が 0.5 ～ 1 m、亜高山帯低木群落の生育高が 1 ～ 5 m であった。残雪による植生の埋没状況を把握するため、標高差分の着色表示の区分は既存の植生生育高を参考に、0.5 ～ 1 m、1 ～ 5 m、5 ～ 10 m とした。

崩壊地では、崩壊土砂の流下に伴う植生の被害とともに、崩壊地对岸の緩斜面に、崩壊土砂に埋没した植生の一部が露出している場所が見られた。崩壊土砂の堆積による地形変化と埋没土壌（旧表土層）から植物が再生する可能性を明らかにするため、長さ 1 m の検土杖で埋没土壌の深さを調べた。埋没土壌の測定位置は、2008 年 9 月の空中写真に見られた植生回復状況を考慮し決定した（図 3）。崩壊斜面では、滑落崖直下のパッチ状植生の周辺と雪田植生が見られた谷部周辺の尾根部（図 3 の測点 0-8）、崩壊地对岸の斜面を測定した（図 3 の測点 100-112）。

3. 結果と考察

3-1. 崩壊斜面の侵食状況

2009 年 6 月 25 日から 10 月 22 日までの S1 と S2 の各ピンの累積変動値（表 1）を示す。図のマイナス表示はピンが侵食されていることを示す。S1 では 4 ヶ月の



写真 1 B1, S1, S2 の地表面、丸破線は侵食ピンの位置 ①：S1, ②：B1, S2
Photo 1. Ground surface at B1, S1 and S2. A broken circle is erosion pins. ①：S1, ②：B1, S2

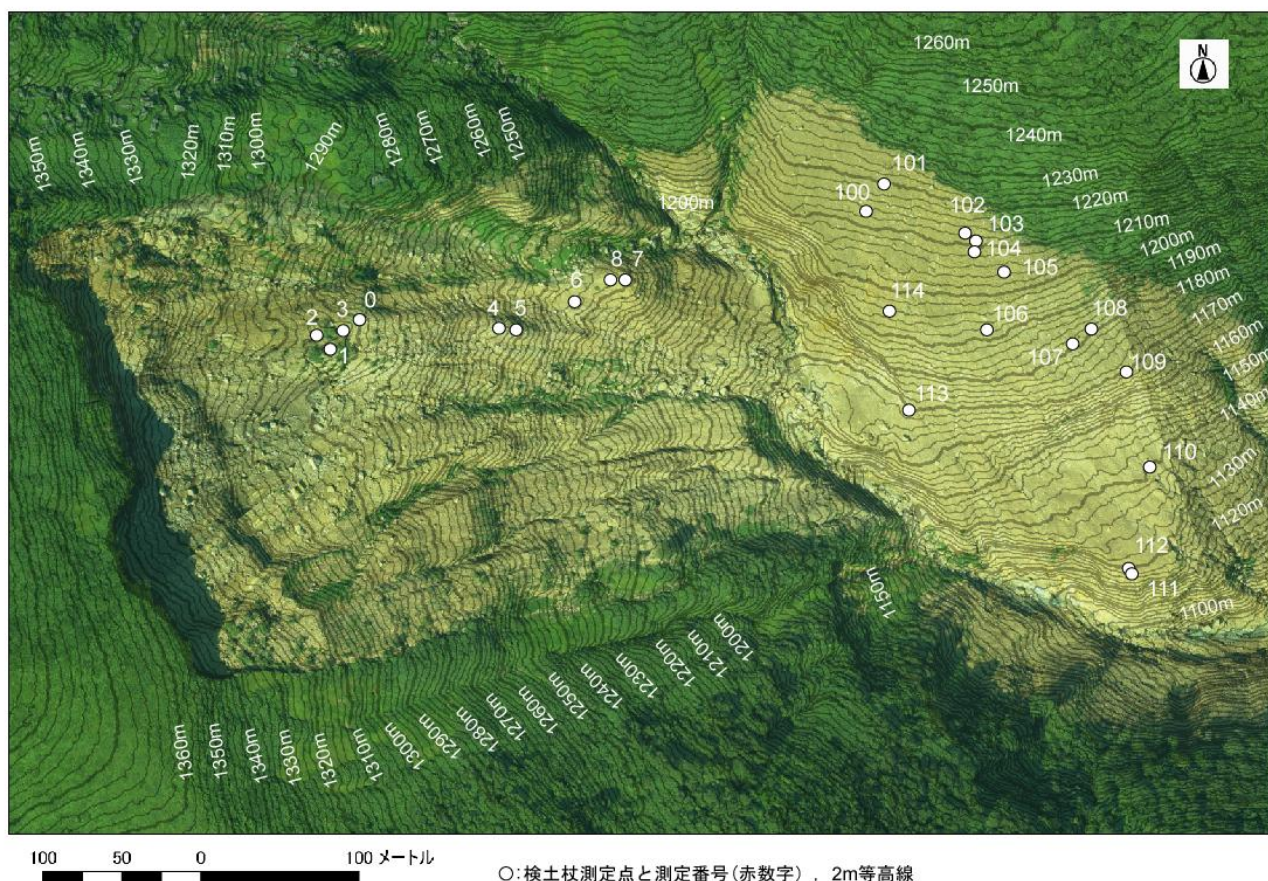


図3 2008年9月の崩壊地の空中写真、地形、検土杖の測定位置

Figure 3. The aerial photograph and topography of the landslide scar in September 2008 and measurement locations with a soil auger.

累積地盤変動量は $-24.2 \sim -6.9$ cm (Pin10を除く9本平均 -14.5 cm) であり、S2の4ヶ月の累積地盤変動量は $-5.4 \sim 0.3$ cm (10本平均 -1.2 cm) となった。崩壊地源頭部のS1では8月25日までは大きな変動はなかったが、その後の2ヶ月間で大きく侵食された。このうちピンの1つ (Pin10) はピンを設置した上部から溶結凝灰岩が崩落した時の折損で、累積変動量が算出不可能となった。これに対し、S2ではピンの1つ (Pin8) 以外は、最大でも2 cm程度の侵食であった。S2のPin8ではリル侵食が発生し、この付近では埋没土壌が露出している場所も見られた (写真2)。S2の侵食はリルを中心として発生しており、Pin8以外のピンでは大きな変動が見られなかった。

図4に崩壊地とアメダス駒ノ湯の1時間雨量観測結果を示す。8月25日から10月22日のドゾウ沢とアメダス駒ノ湯の雨量の変動は、同様の傾向を示していた。観測期間の前半 (6月25日～1回目のピン観測時)の方が後半 (1回目のピン観測時～10月22日) よりも降雨量・降雨強度ともに大きかったにもかかわらず、S1では、観測期間前半に計測した侵食ピンの変動が後半よ



写真2 S2における埋没土壌の露出(2009年9月18日撮影)
Photo 2. Buried soil exposed at S2. Photo taken on 18 September 2009.

りも小さかった (表1)。現地観察によりS1では、急傾斜で日陰になりやすく長期にわたる積雪によって、地表が降雨から保護されていた影響が考えられたが、融雪期のS1における侵食状況は、今後もさらに調査が必要である。完全に消雪したと考えられる観測期間後半の短時

表1 S1, S2 における侵食ピンの累積変動量

Table 1. Cumulative change in erosion pins at S1 and S2.

単位(cm)

S1	Pin 1	Pin 2	Pin 3	Pin 4	Pin 5	Pin 6	Pin 7	Pin 8	Pin 9	Pin 10	備考
2009/6/25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	計測開始
2009/8/25	-2.1	-1.6	-0.2	1.05	1.35	0.9	-0.15	0.6	1.4	NA	NA: 落石で計測不能
2009/10/22	-24.2	-17.9	-9.2	-14.9	-6.85	-12.7	-15.5	-18.5	-11.2	-5.2*	*: 8/25-10/22の値
S2	Pin 1	Pin 2	Pin 3	Pin 4	Pin 5	Pin 6	Pin 7	Pin 8	Pin 9	Pin 10	備考
2009/6/25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	計測開始
2009/9/18	-1.6	-0.9	0.2	-0.6	0.1	-0.5	0.5	-5	-0.4	0.7	
2009/10/22	-0.6	-1.2	-0.4	-1.3	0.3	-1.2	-0.1	-5.4	-2.2	-0.1	

マイナス表示は侵食を意味している。

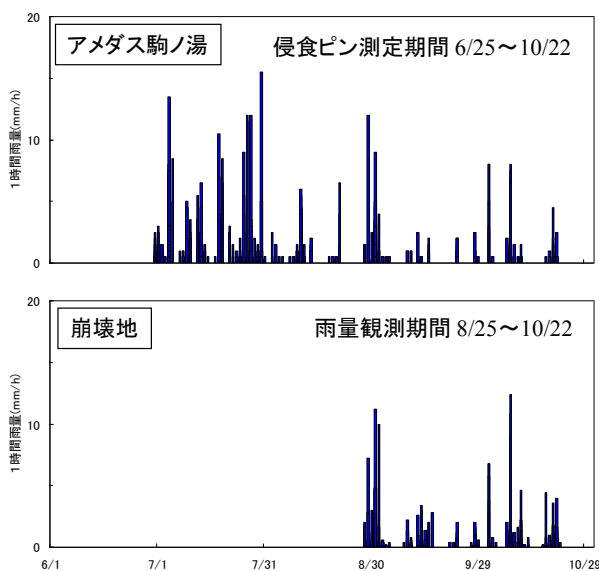
図4 崩壊地とアメダス駒ノ湯における1時間雨量
(2009年6月25日～10月22日)

Figure 4. The 60-minute rainfall intensity at the landslide scar and AMeDAS observation point Komanoyu from June 25, 2009 to October 22, 2009.

間降雨強度が、S1でのピンの変動に影響を与えていると考えられた。観測期間後半には、ドゾウ沢崩壊地の雨量計で10 mm/h以上を記録した連続降雨は2度出現した。これらは、8月30日から9月1日の降雨（連続雨量76 mm）と10月7日から10月9日の台風18号に伴う降雨（連続雨量107.6 mm）であった。これらの降雨で1時間雨量が10 mmを超える雨は3回観測され、最大が12.4 mm/hであった。気象庁は1時間雨量10 mm以上20 mm未満を「やや強い雨」と気象予報用語で定めており、崩壊地源頭部の急傾斜地では、この程度の降雨強度で表面侵食が生じたと推定された。土壌硬度の平均値は、S1で11.7 mm、S2で11.4 mmとなり特に地表が締め固まった状況ではなく、崩壊地の土壌硬度は、地

表に植物が定着しやすい土壌硬度を保持していた。両サイトともに雨滴によって地表にクラストが形成し硬化する現象は見られなかった。

3-2. 崩壊斜面の植生被害と生残状況

崩壊発生直後の2008年6月に崩壊地では植生が見られなかったが、地震発生当時（6月）の崩壊地は、融雪期で植生や残雪が見られた（図2）。

図3に崩壊発生3ヶ月後の空中写真と地形の重ね合わせ図を示した。9月には崩壊地に植生（緑色エリア）が見られ、短期間のうちに回復していることが明らかになった。

航空レーザー測量で取得した2008年6月と同年9月の地形データについてGISソフトウェアを用いて標高の差分を計算した結果、6月より9月に1 m以上標高が低下しているエリア（E1）を確認した（図5）。崩壊直後の崩壊地は、全体的に土砂が露出し、地表が削剥されているように見えたが、E1では積雪の上に土砂が堆積し、地表は削剥されていなかったと考えられる。残雪のある時期の航空レーザー測量で取得した標高データは地表面でなく、積雪表面に被覆した土砂の標高を測定している場所があることが確認できた。E1が崩壊前から積雪に覆われた雪田であったことは、崩壊地のすぐ北側と南側の崩壊が起らなかった雪田（図2）でE1と同様に、同じ時期に1 mから5 m以上の標高差が出現していること（図5）からも裏付けられた。崩壊土砂は斜面や溪流の谷部にあった残雪の上を通過し、E1に成立していた雪田植生群落に大きな被害を及ぼさなかったと考えられる。これに対し崩壊地対岸斜面では、6月と9月の侵食量が0.5 m以下であったため、土砂の下に0.5 m以上の積雪は見られなかったことが明らかとなった（図5）。

さらに崩壊地の標高差分析によって、2008年6月時点の斜面（図2）に崩壊土砂が堆積し、その後の融雪水や降雨によって同年9月までに土砂が洗い流されて植生が露出しているエリア（E2）を確認した（図5）。E2は斜面の遷急点よりも下流側に植生が生残している傾向

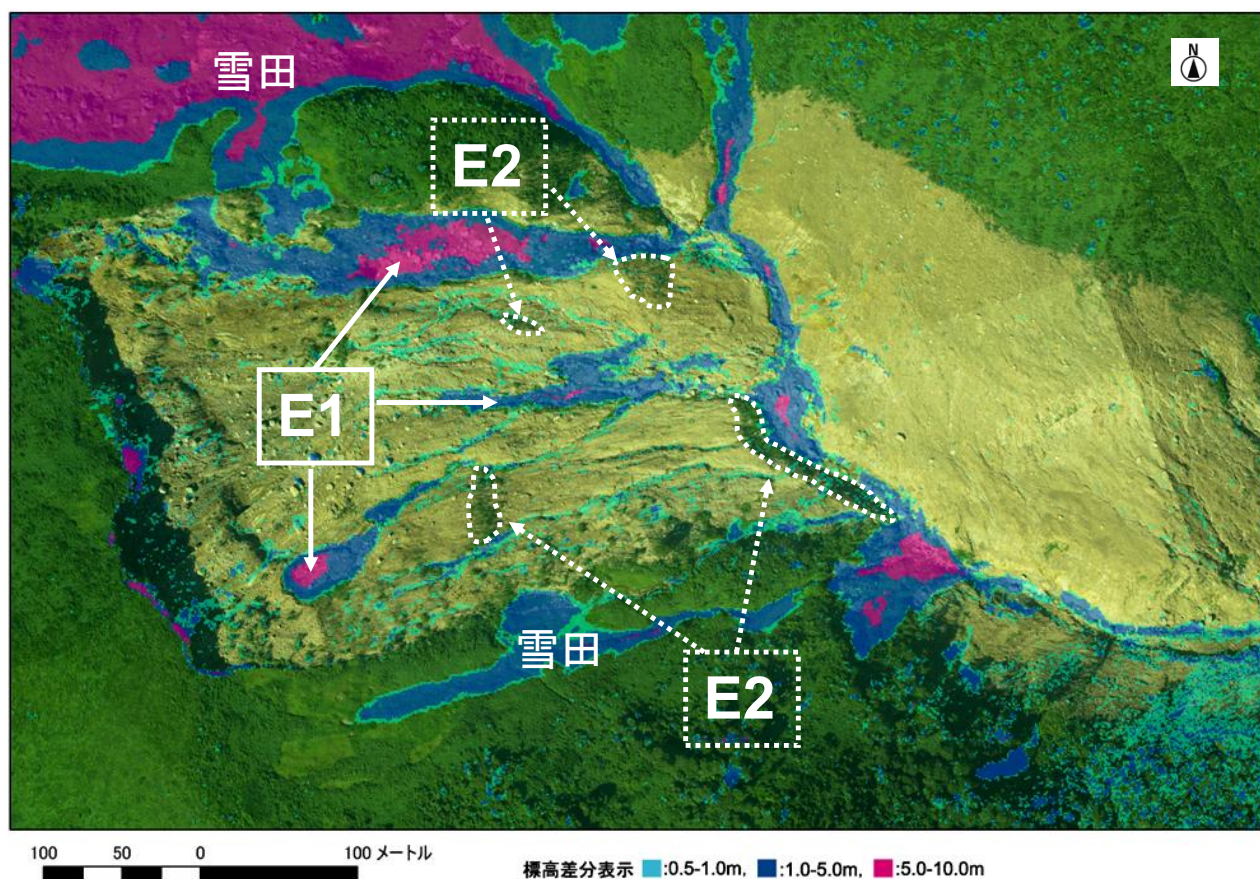


図5 2008年9月の空中写真と2008年6月と同年9月の標高差分結果

Figure 5. The aerial photograph of the landslide scar in September 2008 and differential digital elevation map created from LIDAR data in June 2008 and in September 2008.

があり、これは崩壊土砂の流下に伴う表土の削剥（攪乱）を免れたためであると推定した。E2の植生は主にチシマザサ群落であり、それ以外に残された低木の被害は大きく、枝葉がなく幹の樹皮がはぎ取られ白骨化した状態であった。

3-3. 崩壊斜面の植生回復状況

埋没植生に堆積した土砂の厚さと埋没土壌の深さを崩壊地とその対岸の斜面で計測した結果を表2に、測定位置を図3に示す。

崩壊地の測点（測点0-8）は、2地点を除いて埋没土壌の存在が1mの検土杖で確認できなかった。標高1220mより上流斜面では、今回の崩壊土砂の下層に古い堆積物が見られる地点（測点5, 6）があることから、崩壊土砂の流下時に土壌が削剥されたと推定した。パッチ状に植生が回復していた場所（測点0-3周辺）には、崩壊土砂の上に様々なサイズ（数m～10m）の植生ブロックが見られた。植生ブロックの現地観察と崩壊土砂・埋没土壌の堆積状況により、この滑落崖直下の標高1280m付近に存在するパッチ状の植生ブロックは、崩壊時に根系を含む表層土の一部が流されずに斜面に残された板状体と推定された。板状体の崩壊形態は、こ

れまで小出（1955）や稲垣（1999）によって降雨時に根系を含む表層土が板状に滑り落ちる表層崩壊であると位置づけられていたが、本研究により降雨時だけでなく地震時の深層崩壊でも板状体の形成が認められた。板状体にはミネヤナギ、ミネカエデ、ナナカマド、ヌマガヤ、クロヅル、ショウジョウスゲ、チシマザサなどの植生が見られた。また、標高1220m～1240m付近（測点4-8周辺）には谷部を中心に雪田植生（ヌマガヤ、イワイチヨウ、ショウジョウスゲ）が見られた。

崩壊地对岸の斜面では、標高1210m付近（測点100-104）に土砂が20-40cm堆積し、堆積土砂の下に埋没土壌が存在した。1210m付近よりも標高が低い測点（測点105-114周辺）では、埋没土壌が存在する測点（測点108, 114）と崩壊土砂の下に埋没土壌が欠落し、今回の崩壊堆積物よりも過去の時期不明な堆積物が見られる測点（測点106, 107, 109, 110, 112）が分布していた。標高1190m以下の削剥を受けた崩壊地对岸斜面でも崩壊土砂の流れに直撃を受けなかった凹地形や遷急点では崩壊斜面と同様にチシマザサがわずかに残存していた。崩壊地对岸に見られた板状体のサイズは崩壊斜面と異なり小規模で、その植生はチシマザサが中心で最大でも長辺

表2 検土杖で測定した堆積土砂の厚さと埋没土壌の深さ
Table 2. Thickness of landslide deposit and depth of buried soil measured with a soil auger.

測定番号	堆積土砂の厚さ (cm)	埋没土壌等の地表からの深さ (cm)
0	35	35-60
1	60	60に埋没土壌
2	100以上	不明
3	100以上	不明
4	100以上	不明
5	50	50-70に古い堆積物
6	15	15-60、60に深は古い堆積物
7	70	70に深は水分多く採取不能
8	30	30-40
100	40	40-60
101	31	31-60
102	40	40-60
103	21	21-30
104	20	20
105	80以上	不明
106	25	25に古い堆積物
107	60	60-62に古い堆積物
108	15	15に埋没土壌
109	30	30に古い堆積物
110	30	30に古い堆積物
111	45以上	不明
112	75	75に古い堆積物
113	50	50に埋没土壌
114	40	40に埋没土壌

50 cm 程度であった。また、破碎された状態の低木・チシマザサや埋没土壌の団塊が地表に多数散在し、土砂に埋もれた根株から萌芽した状態のミネザクラがみられた(写真3①)。

次に崩壊地対岸の調査プロットにおける植生調査結果を表3に示す。植生調査プロットの植物は孤立して生育し、植物種数はベルトランセクトがコードラートよりも多かった。チシマザサについては被度(0.04-3.7%)が他の種と比べ高い値であった。スゲ属の一種は定着したばかりの個体で被度は大きくない(0.07-0.35%)が、調査区の出現数は11~22個体となり他の種と比べ個体数が多かった。そのほかの定着していた植物は、ダケカンバ、イタドリ、シロバナトウウチソウであった。これらは種子サイズが小さく、風や水で運ばれやすいので、いち早く崩壊地に定着したと考えられる。チシマザサ以外に定着していた植物は2009年生(当年生)の植物が多く、種の同定が困難であった。B1に見られた不明種は発芽直後の個体であり、表3のQ2の不明種はショウジョウバカマの可能性があったが、個体が小さいために同定を断念した。またB1付近にホオノキの実生が9月の調査で6個体確認されたが、10月の調査では3個体に減少した(写真3②)。ホオノキは冷温帯山地溪畔樹種のひとつであり(金子, 1995)、崩壊前の溪畔域に生育していたホオノキに由来する埋土種子や鳥散布種子による発芽が推定された。

表3 植生調査結果
Table 3. The result of vegetation survey.

ベルトランセクト1 (B1)		
種名	和名	優占度
<i>Sasa kurilensis</i>	チシマザサ	+
<i>Carex</i> sp.	スゲ属の一種	+
<i>Betula ermanii</i>	ダケカンバ	r
<i>Moliniopsis japonica</i> Hayata	ヌマガヤ	r
<i>Acer tschonoskii</i>	ミネカエデ	r
<i>Tripterygium regelii</i>	クロヅル	r
<i>Polygonum cuspidatum</i>	イタドリ	r
<i>Filicopsis</i> sp.	シダ綱の一種	r
<i>Mosses</i> sp.	コケ(蘚類)の一種	r
unknown	不明種	r

ベルトランセクト2 (B2)		
種名	和名	優占度
<i>Sasa kurilensis</i>	チシマザサ	+
<i>Carex</i> sp.	スゲ属の一種	+
<i>Betula ermanii</i>	ダケカンバ	r
<i>Moliniopsis japonica</i> Hayata	ヌマガヤ	r
<i>Acer tschonoskii</i>	ミネカエデ	r
<i>Tripterygium regelii</i>	クロヅル	r
<i>Polygonum cuspidatum</i>	イタドリ	r
<i>Nephrophyllum cristata-galli</i>	イワイチョウ	r
<i>Sanguisorba tenuifolia</i> var. <i>alba</i>	ナガボノシロワレモコウ	r
<i>Poaceae</i> sp.	イネ科の一種	r
<i>Ericaceae</i> sp.	ツツジ科の一種	r
<i>Umbelliferae</i> sp.	セリ科の一種	r
<i>Mosses</i> sp.	コケ(蘚類)の一種	r

コードラート1 (Q1)		
種名	和名	優占度
<i>Sasa kurilensis</i>	チシマザサ	+
<i>Carex</i> sp.	スゲ属の一種	r
<i>Juncus effusus</i> var. <i>decipiens</i>	イグサ	r
<i>Polygonum cuspidatum</i>	イタドリ	r
<i>Sanguisorba tenuifolia</i> var. <i>alba</i>	ナガボノシロワレモコウ	r

コードラート2 (Q2)		
種名	和名	優占度
<i>Sasa kurilensis</i>	チシマザサ	+
<i>Carex</i> sp.	スゲ属の一種	r
<i>Alnus</i> sp.	ハンノキ属の一種	r
unknown	不明	r

まとめ

岩手宮城内陸地震発生1年後の2009年にドゾウ沢崩壊地において植生調査と植生定着に関わる現地調査とGIS地形解析を行った結果、以下の点が明らかになった。

- (1) 2009年の6月から10月の降雨による侵食深は、崩壊地源頭部急斜面で14.5 cm(平均値)、崩壊地対岸の崩壊土砂堆積地では1.2 cm(平均値)であった。崩壊地源頭部では、観測期間後半(8月25日以降)の2ヶ月間の降雨によって大きく侵食した。
- (2) 地表の土壌硬度は、崩壊地源頭部急斜面や崩壊土砂堆積地とともに11 mm程度であった。地表は締め固まっていたため、植生定着への影響は少ないと考えられた。
- (3) 崩壊地では、当年生の植生、板状体植生、崩壊土砂による流出から免れた雪田植生、地形の遷急点直下に残存した植生が見られた。一方、崩壊地対岸の崩壊土砂堆積斜面では、チシマザサの板状体が見られ



写真3 植生の回復状況

①：B2 付近に埋没したミネザクラの萌芽 (2009 年 9 月 18 日撮影)

②：B1 付近のホオノキの実生 (2009 年 10 月 22 日撮影)

Photo 3. Vegetation recovery of the landslide scar.

①：Sprouting shoots of *Cerasus nipponica* near B2. Photo taken on 18 September 2009.

②：Seedlings of *Magnolia obovata* near B1. Photo taken on 22 October 2009.

たが、崩壊斜面の板状体よりもサイズが小さく、破碎された低木・チシマザサや埋没土壌の団塊が地表に散在していた。

謝辞

現地調査やレーザー測量データの利用に際し、林野庁東北森林管理局宮城北部森林管理署ならびに宮城山地災害復旧対策室の関係各位には多大なご協力を頂いた。なお、この研究は独立行政法人森林総合研究所運営費交付金プロジェクト（課題番号：200810）「岩手・宮城内陸地震によって発生した土砂災害の特徴と発生機構に関する研究」に基づいて行われた成果である。

引用文献

- 平吹喜彦 (2001) 栗駒山・栃ヶ森山周辺, 森林科学 31, 41-44.
 星野義延 (1999) 植生調査法, 森林立地調査法, 森林立地調査法編集委員会編, 博友社, 43-46.

稲垣秀輝 (1999) 1998 年台風 4 号による福島県白河地方での表層崩壊の特徴, 応用地質 40(5), 306-315.

金子有子 (1995) 山地溪畔林の攪乱体制と樹木個体群への攪乱の影響, 日本生態学会誌 45, 311-316.

小出博 (1955) 山崩れ (応用地質Ⅱ), 古今書院, pp.205.

東北森林管理局 (2008) 岩手・宮城内陸地震に係る山地災害対策検討会報告書, 141pp.

<http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/koho/saigaijoho/kyoku/kentakai/hokokusho.html>

東北森林管理局 (2009) 山地災害の記録, 平成 20 年岩手・宮城内陸地震, 30pp.

http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/introduction/gaiyou_kyoku/annai/panph/sanchi_kiroku.html

Yagi H., Sato G., Higaki D., Yamamoto M., Yamasaki T. (2009) Distribution and characteristics of landslides induced by the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 in Tohoku district, Northeast Japan, Landslides 6, 335-344.

担 当 者 御 中
To the person concerned

独立行政法人 森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute

森林総合研究所研究報告を送付させていただきますのでお受け取り下さい。
貴刊行物と交換願えれば幸いです。なお、貴研究所の名称、住所などを変更
された場合は、下記まで連絡を御願い致します。

Please, find an enclosed Bulletin of Forestry and Forest Products Research Institute.
We greatly appreciate receiving any relevant publications in exchange.
Let us know when the name of your institution and mailing address are changed.

Officer in charge at publication section
Forestry and Forest Products Research Institute
1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 Japan
Tel : + 81-29-873-3211 Fax : + 81-29-873-0844
e-mail : kanko@ffpri.affrc.go.jp

2012年6月 発行 森林総合研究所研究報告 第11巻2号 (通巻423号)

編 集 人 森林総合研究所研究報告編集委員会

発 行 人 独立行政法人 森林総合研究所
〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地
電話 : 029-873-3211 Fax : 029-873-0844

製 版・印 刷 大成印刷株式会社
〒316-0004 茨城県日立市東多賀町4-11-7
電話 : 0294-36-1837 Fax : 0294-35-2779

©2012 Forestry and Forest Products Research Institute

本誌から転載・複写する場合は、森林総合研究所の許可を得て下さい。

森林総合研究所研究報告

Vol.11-No.2 (No.423)



page33

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
：小野 賢二、平井 敬三

Needle discoloration of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) along the Pacific coastline of Sanriku, Japan, after the Heisei Sanriku Massive Tsunami with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake
by ONO Kenji and HIRAI Keizo

page43

ヤツバキクイムシの発育への温度と日長の影響
：上田 明良、尾崎 研一

Influence of temperature and photoperiod on the development of
Ips typographus japonicus (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae)
by UEDA Akira and OZAKI Kenichi

page51

キバチ科2種(ヒゲジロキバチ・オナガキバチ)における α -ピネンへの誘引反応の違い(英文)
：松本 剛史、佐藤 重穂

Differential responses to α -pinene of two horntail wasps,
Urocerus antennatus and *Xeris spectrum* (Hymenoptera: Siricidae)
by MATSUMOTO Takeshi and SATO Shigehito

page57

リグノセルロース分解酵素生産菌のスクリーニング：
Aspergillus tubingensis の生産する酵素によるスギパルプの分解(英文)
：下川 知子、澁谷 源、石原 光朗、山口 宗義、太田 祐子、
宮崎 和弘、池田 努、真柄 謙吾、野尻 昌信

Screening of lignocellulolytic enzyme producers: enzyme system
from *Aspergillus tubingensis* for hydrolysis of sugi pulp
by SHIMOKAWA Tomoko, SHIBUYA Hajime, ISHIHARA Mitsuro,
YAMAGUCHI Muneyoshi, OTA Yuko, MIYAZAKI Kazuhiro,
IKEDA Tsutomu, MAGARA Kengo and NOJIRI Masanobu

page65

菌床栽培エノキタケの害虫イシハラナミキノコバエ
Mycetophila ishiharai Sasakawa (双翅目キノコバエ科)
：末吉 昌宏、村上 康明

Mycetophila ishiharai Sasakawa (Diptera: Mycetophilidae),
new pest of *Flammulina velutipes* cultivated on artificial medium
by SUEYOSHI Masahiro and MURAKAMI Yasuaki

page71

日影森で発生した地すべりの流動化機構の土質力学的検討
：岡田 康彦、黒川 潮、浅野 志穂

Examining fluidisation mechanisms of Hikagemori landslide by means of soil tests
by SUEYOSHI Masahiro and MURAKAMI Yasuaki

page77

東栗駒山ドゾウ沢崩壊地周辺の崩壊発生1年後の崩壊堆積物における侵食と植生回復
：小川 泰浩、大丸 裕武、村上 亘、岡田 康彦、杉田 久志、江坂 文寿

Erosion and vegetation recovery on the landslide deposit one year after
the dozou-sawa deep landslide at Mount Higashikurikoma-yama, northeast Japan
by OGAWA Yasuhiro, DAIMARU Hiromu, MURAKAMI Wataru,
OKADA Yasuhiko, SUGITA Hisashi and ESAKA Fumitoshi