

森林総合研究所研究報告

Vol.11-No.3 (No.424)

BULLETIN

of the
Forestry and
Forest Products
Research Institute



September 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122ページ)
大径のヒノキ丸太
Large diameter Japanese cypress logs.

目 次

総 説

マツタケ人工栽培技術開発に向けた研究

山中 高史 85

平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震による

土砂災害の概要とその特徴

三森 利昭、多田 泰之、村上 亘、
大丸 裕武、安田 幸生、野口 正二 97

論 文

大径丸太から採材された心去りヒノキ製材品

および無欠点小試験体の強度性能

井道 裕史、長尾 博文、加藤 英雄 121

岩手・宮城内陸地震災害地における2008年の気象と

山地積雪水量分布の特徴

安田 幸生、野口 正二、三森 利昭 135

2008年岩手・宮城内陸地震災害地周辺の先行土湿の季節変動

野口 正二、安田 幸生、多田 泰之、三森 利昭 151

関東平野周辺の窒素飽和状態の針葉樹人工林における

地上部生産と窒素利用様式(英文)

稲垣 善之、稲垣 昌宏、橋本 徹、
小林 政広、伊藤 優子、篠宮 佳樹、
藤井 一至、金子 真司、吉永 秀一郎 161

短 報

強度間伐したヒノキ人工林の表層土壌の物理性

篠宮 佳樹、稲垣 善之、野口 麻穂子、
奥田 史郎、宮本 和樹、伊藤 武治 175

研究資料

鳥類が採食する樹木果実生産量の年変動

一札幌市羊ヶ丘における2000～2009年の記録一

松岡 茂 181

Bulletin of FFPRI, Vol.11. No.3 (No.424) September 2012
CONTENTS

Review article

- Researches for development of the cultivation of ‘*matsutake*’,
a prized mushroom produced by the ectomycorrhizal basidiomycete *Tricholoma matsutake*
YAMANAKA Takashi 85
- Characteristics of sediment disasters by The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008
SAMMORI Toshiaki, TADA Yasuyuki,
DAIMARU Hiromu, MURAKAMI Wataru,
YASUDA Yukio and NOGUCHI Shoji 97

Original article

- Strength properties of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) pithless
lumber and small clear specimens sawn from a large diameter log
IDO Hirofumi, NAGAO Hirofumi and KATO Hideo 121
- Weather conditions and distribution of snow water equivalent around
the mountainous disaster area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake
YASUDA Yukio, NOGUCHI Shoji and SAMMORI Toshiaki 135
- Seasonal variation of antecedent soil moisture in and around the
disaster area of the Iwate-Miyagi Nairiku earthquake in 2008
NOGUCHI Shoji, YASUDA Yukio,
TADA Yasuyuki and SAMMORI Toshiaki 151
- Aboveground production and nitrogen utilization in nitrogen-saturated
coniferous plantation forests on the periphery of the Kanto Plain
INAGAKI Yoshiyuki, INAGAKI Masahiro,
HASHIMOTO Toru, KOBAYASHI Masahiro,
ITOY Yuko, SHINOMIYA Yoshiki, FUJII Kazumichi,
KANEKO Shinji and YOSHINAGA Shuichiro 161

Note

- Physical properties of surface soils at intensive thinnings Hinoki cypress plantations
SHINOMIYA Yoshiki, INAGAKI Yoshiyuki,
NOGUCHI Mahoko, OKUDA Shiro,
MIYAMOTO Kazuki and ITOU Takeharu 175

Research material

- Variation in fruit production of bird-dispersed tree species
- Data recorded between 2000 and 2009 in Sapporo, Hokkaido -
MATSUOKA Shigeru 181

総説 (Review article)

マツタケ人工栽培技術開発に向けた研究

山中 高史^{1)*}

Researches for development of the cultivation of '*matsutake*', a prized mushroom produced by the ectomycorrhizal basidiomycete *Tricholoma matsutake*

Takashi YAMANAKA^{1)*}

Abstract

'*Matsutake*' (*Tricholoma matsutake*) is one of the most economically important edible ectomycorrhizal mushrooms in the world. Fruit bodies of *T. matsutake* develop on shiros which are mycelial aggregations in association with mycorrhizal roots and soil particles in well-drained and nutrient-poor forest soil. In spite of many attempts to cultivate '*matsutake*', none has succeeded. Therefore, commercial demand is met by harvesting fruit bodies that grow in ectomycorrhizal coniferous forests, mainly under *Pinus densiflora* trees. In the early 1940s about 12,000 tons of '*matsutake*' were harvested in Japan, but production has since drastically decreased to less than 100 tons per year. Possible causes are pine wilt disease and modern forestry management practices, which might have damaged the symbiotic association between *T. matsutake* and pine trees. Recently, *T. matsutake* and its allied species were specified by the application of new techniques of molecular biology, which enabled to specify the origins of Asian '*matsukakes*', and to clarify mosaic structures of shiro. Furthermore, researches on the mycorrhizal association between *T. matsutake* and pine trees have been advanced. In this paper I described researches on *T. matsutake*, to prepare the information necessary for improving the production of '*matsutake*' in pine forests and establishing an artificial cultivation system.

Key words : *Tricholoma matsutake*, ectomycorrhiza, edible mushroom, cultivation

要旨

マツタケ (*Tricholoma matsutake*) は、世界で最も高価な食用きのこの一種である。マツタケは、シロという、土壌や菌根に繋がる菌糸塊を土壌中に発達させて、そこからきのこを発生させる。これまで、人工栽培技術の確立に向けた取り組みが多くなされてきたが、成功例は一例もない。そのためマツタケの生産は、アカマツなどマツ科の針葉樹林において自然発生するものを収穫するのみである。マツタケは 1940 年代前半には、12,000 トンの収穫量があったが、近年は、数十トンにまで激減している。その原因としてはマツ材線虫病の発生によるマツ林の減少や、マツ林が十分に管理されずにマツタケとマツとの菌根共生が損なわれてきたことが考えられる。近年、接種試験における菌根やシロ様構造物が作製されるようになり、また宿主範囲の研究や共生形態（樹木への影響）が解明されてきた。また、DNA を用いて菌株の識別が可能となり、原産国が容易に判別でき、シロの遺伝学的構造など解明されてきた。また、マツタケとマツの共生関係に関する知見も得られている。本総説においては、最初に、基礎的なマツタケ研究の成果を紹介して、その後、マツタケ人工栽培に関する様々な取り組みについて紹介する。

キーワード：マツタケ、菌根、子実体、食用菌、きのこ栽培

1. はじめに

マツタケ (*Tricholoma matsutake* (S. Ito & Imai) Sing.) は、秋の味覚として、古くから我が国の食卓を賑わしてきている。マツタケは、アカマツ林などにおいて、シロという、土壌や菌根に繋がる菌糸塊を土壌中に発達させて、そこからきのこ（子実体）を発生させる。そのため、降水量や温度などの影響を受けて豊凶の差が著しいこともあり、安定的な人工栽培技術の確

立が求められている。しかし、これまでに成功例は一つもなく、マツタケは、自然発生するものを収穫するのみである。マツタケは 1940 年代前半には、12,000 トンの収穫量があったが、近年は、数十トンにまで激減しており (Fig. 1)、それに伴って価格も大きく上昇している。その原因の一つとしては、マツ林が十分に管理されなくなり、マツタケとマツとの菌根共生が損なわれたことがあげられる。燃料に薪などを用いてい

原稿受付：平成 22 年 7 月 29 日 Received 29 July 2010 原稿受理：平成 24 年 5 月 2 日 Accepted 2 May 2012

1) 森林総合研究所森林微生物研究領域 Department of Forest Microbiology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* 森林総合研究所森林微生物研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 Department of Forest Microbiology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: yamanaka@ffpri.affrc.go.jp

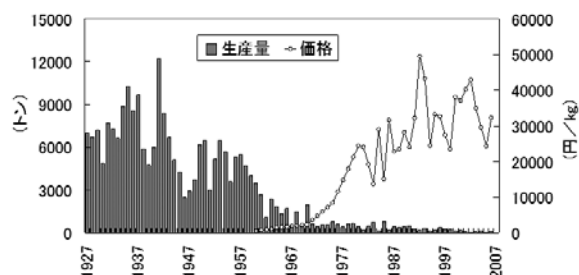


Fig. 1. マツタケ生産量と価格の推移 林野庁データをもとに作図。
Annual production and price of *Tricholoma matsutake*.

た頃は、燃料を得るための落ち葉掻きや雑木伐採などマツ林が利用されていたが、化石燃料への転換によって、マツ林は利用されなくなり、マツの生育に適した環境が維持されなくなった。また、マツ材線虫病の問題も大きい (Iwase 1997)。広島、岡山、兵庫、京都などのマツタケ産地では、マツ材線虫病によりマツ林は壊滅的な被害を受けており、これら地域での生産量は激減している。これら国内の収穫量の減少に伴い、海外からのマツタケの輸入が増加しており、最近では、国内消費量の 94 – 99% が海外からの輸入による。主な輸入元は、2011 年度の輸入量 (1,215Mg) の多い順に、中国 (72%)、カナダ (12%)、アメリカ合衆国 (8.2%)、トルコ (5.3%)、メキシコ (1.4%)、韓国 (0.9%)、ブータン (0.06%)、モロッコ (0.01%) となっている (財務省貿易統計)。

近年、マツタケの分類や生態は分子生物学の新しい手法の導入により進展してきている。一方で、従来の研究により、マツタケの諸特性が明らかにされている。そこで本総説においては、これまでのマツタケ研究の成果について紹介する。

2. 分類・地理

マツタケ (*T. matsutake*) は、ハラタケ目キシメジ科キシメジ属の菌類である。主にアカマツ林内の地上に発生するが、ほかにクロマツ、ハイマツ、ツガ、コメツガ、アカエゾマツ及びエゾマツ林において秋に発生する (今関・本郷 1987)。ときには梅雨の時期に発生する場合もある。また我が国では、マツタケの近縁種としては、マツタケモドキ (*T. robustum* (Alb & Schw.: Fr.) Ricken s. Imazeki)、ニセマツタケ (*T. fulvocastaneum* Hongo) およびバカマツタケ (*T. bakamatsutake* Hongo) がある (Photo 1)。

国外でもマツタケおよびその近縁種が知られている。これらの種は、形態的特徴、発生地地の植生、および遺伝情報に基づいて徐々に整理されつつある。中国や韓国に発生するものは、日本と同種とされているが、中国のコナラ属樹下には *T. zangii* Z. M Cao, Y. J. Yao & Pegler が発生する (Cao et al. 2003)。ヨーロ



Photo 1. A : マツタケ B : バカマツタケ
A : *T. matsutake* B : *T. bakamatsutake*

ッパ、主に地中海沿岸に発生するマツタケ類としては、*T. caligatum* (Viv.) Ricken や *T. anatolicum* H. H. Doğan & Intini が報告されている (Kytövuori 1989, Intini et al. 2003)。北欧やヨーロッパ中部の山岳地帯のヨーロッパアカマツ (*Pinus sylvestris* L.) 林では *T. nauseosum* (Blytt) Kytöv. が、またドイツトウヒ (*Picea abies* (L.) Karst.) 林には *T. dulciolens* Kytöv. が発生する (Kytövuori 1989)。このうち *T. nauseosum* は日本のマツタケと形態的に酷似しており同一種であると報告され (Kytövuori 1989)、また rDNA の ITS 領域の塩基配列の比較によっても同一種であることが報告されている (Bergius and Danell 2000, Matsushita et al. 2005)。北米では、日本のマツタケよりも白みを帯びた *T. magnivelare* (Peck) Redhead がマツタケの近縁種として知られている (Hosford et al. 1997)。

3. 発生環境

マツタケが発生する樹種としては、前述したような主にマツ属の針葉樹である。樹齢としては、30 年生頃から発生しはじめて、50 ~ 60 年生頃に最盛期を迎えると一般に言われている (吉村 2004)。マツタケ発生

に適した土壌については、発生量の多い地域である、広島、岡山、兵庫、京都、長野の土壌をみると、母岩として、花崗岩、粘板岩、砂岩、チャート、礫岩などの酸性土壌が適していると言える。また、岩手では、黒ボク土壌や石灰岩土壌での発生みられる。このほか、発生に関わる気象要因としては、日長、降水、温度（地温）があげられる。日長および降水については、特別マツタケの発生に対して明瞭な影響は報告されていないが（衣川 1964）、土壌中でのシロの発達には、一定の湿度が必要であるため、一定量の降水は必要である。しかし、実験的な灌水によるマツタケ原基形成への影響は認められていない（衣川 1964）。地温との関係は、京都においては、秋に地温が 19℃に下がるとマツタケ原基形成が開始する（衣川 1964）。地域により、その値は異なると思われる（吉村 2004）。

4. 栄養生理

マツタケの菌株は、きのこの傘の組織または開ききっていないひだ片から分離するか、ヒダに形成された胞子（担子胞子）を落下させてそれを培地上で発芽させて得る方法による（Murata et al. 2005）。一方、シロの菌根から菌を分離することも可能である（Yamada et al. 2001a）。これら分離された菌の肉眼的特徴としては、白色からクリーム色をした菌叢を発達させる。また、褐色になる場合もある（浜田 1964, 島菌 1979）。顕微鏡下では、幅 0.5-4.5μm の菌糸で、通常二次菌糸でもクランプコネクションを持たない。末端が球状に肥大し、厚膜化していることもある（浜田 1964, 島菌 1979, 山田・寺崎 1998, Yamada et al. 2001a）。

(1) 胞子発芽

マツタケの担子胞子の発芽には、アカマツ針葉の抽出液において、比較的良好な発芽が見られている（広本 1960, Ohta 1986）。一方、0.005%の（*n*-）酪酸を含む培地での担子胞子発芽が良好であったが、（*n*-）酪酸は、針葉抽出物には含まれていなかった（Ohta 1986）。これに基づいて、太田（2006）は、1 個の胞子に由来する 1 核の菌株（単胞子分離菌株）の獲得を試みたが、多くのものが 2 核の菌糸であり、1 核の菌糸をほとんど得ることができなかった。同様に、玉田・練（2004）は、単胞子分離を試みたが、全ての胞子分離株が 2 核であり、胞子が 2 核性である可能性を指摘している。きのこの品種改良には、単胞子分離によって 1 核の菌糸を得て、それを交配して、様々な 2 核菌糸を得て、栽培に適した菌株を選抜することが必要である。マツタケにおいても、単胞子分離技術の確立は、優良な菌株を得るための技術として重要である。

(2) 菌糸成長

マツタケの栄養生理については、川合らの論文や太

田（Ohta 1990）によってまとめられている。マツタケの栄養生長に適した培地 pH は 5 前後であった（浜田 1964, Ohta 1990）。また、菌糸生長に適した温度は、20～25℃にある（山田・寺崎 1998）。炭素源としては、単糖類の、ブドウ糖、果糖およびマンノース、また二糖類の麦芽糖が有効であり、通常の菌根菌と大きく異なるものではない（川合・阿部 1976）。また、ブドウ糖と果糖を併用すると効果は大きい。窒素源としては、コーンステーパーリカー、乾燥酵母、カザミノ酸やポリペプトンが良い。アミノ酸については単独では 9 種のアミノ酸が良好であった。無機態窒素ではアンモニウム態は有効であったが、硝酸態は利用できない。ビタミン類は、チアミンとニコチン酸の効果が大きく、また併用することでの相乗効果が認められた（川合・寺田 1976）。金属イオンは、鉄（Fe⁺³）とマグネシウムイオン（Mg⁺²）の効果が大きい。また、天然物の中では、アカマツ根のアルカリ性エタノール抽出物、またはアカマツ根より分離された糸状菌の代謝産物に、非添加に比べて、最大で約 2.5 倍のマツタケ菌菌糸成長促進効果が認められた（小川・川合 1976）。界面活性剤である Tween 80 やオリーブ油を、土壌または土壌とバーミキュライトとアカマツ樹皮粉末を混合したところに添加した場合、非添加に比べて最大で 15 倍の成長促進が認められている（Guerin-Laguette et al. 2003）。以上のように、マツタケ菌糸成長に適した栄養条件は徐々に知られてきている。子実体形成には一定量の菌糸体が必要であることから、マツタケ菌の菌糸成長に適した条件の検討は必要である。

(3) 腐朽能力

菌根性であるマツタケは、炭素源は共生関係にある樹木の光合成産物を根を介して獲得するため、リグニンやセルロースなどの植物由来の難溶性高分子有機物を分解する能力は低いとされてきた。しかし、野外土壌中でシロを発達させるには、樹木の光合成産物だけでなく、土壌中の有機物を分解して炭素栄養源を獲得している可能性もあり、マツタケの腐朽能力についての研究も行われている。糖類を含まない培地へマツの樹皮粉末を添加したところ、マツタケの成長量が増加したことが報告され、マツタケが樹皮を栄養源として利用していることが示されている（Vaario et al. 2002）。また、マツタケはセルロースを分解する能力は低いものの、その分解産物であるセロビオースやセロトリオースにある β-1, 4 グリコシド結合を分解する β-グリコシダーゼの能力が高いことが報告されている（Kusuda et al. 2008, Vaario et al. in press）。さらに、マツタケが炭素源としてヘミセルロースを利用できるとともに、フィンランドのヨーロッパアカマツ、ドイツウヒおよびオウシュウシラカンバ混交林内に形成されたシロ中においては、キシロシダーゼ活性が高いことか

ら、マツタケは共生的に養分を獲得して増殖するものの、腐生的に栄養分を獲得することもできることを示唆している (Vaario et al.)。このような腐生能力は、共生相手からの養分供給を受けずに増殖する能力を有することを示すものであり、腐生菌における手法による人工栽培の成否にかかるものとして、今後の研究の進展が期待される。

5. シロ

マツタケは土壤中に菌糸と樹木根の混合体である「シロ」を拡がらせ、そこからキノコを発生させる。小川 (1975) によるとシロとは、マツタケの発生する場所を指すものとして使われてきた言葉であり、多くの場合「白」という言葉が当てられる。それは、そこが土壤中を拡がる菌糸によって白くなっていることによる。このほか、「代」や「城」という言葉が当てられている。シロの位置は、発生するキノコの位置から特定され、それに基づいて、シロの成長速度が通常1年で10～15 cm であると推定されている (小川 1975)。キノコの発生はシロの先端から内側に数10 cm のところに生え、さらにその内側はキノコが発生することはほとんど無く「イヤ地」と呼ばれる。シロは、元々、キノコから落下した担子胞子の発芽による単核菌糸が融合し、複核化した菌糸体が伸長して形成される。そのことから一つのシロは、遺伝的に均一のジェネットであると考えられてきた。しかし、マツタケ菌の個体を識別可能な様々な遺伝子マーカーが用いられ、シロの発達に関わる様々な新知見を得ることが出来ている。シロに発生するマツタケ子実体およびそこから分離した菌糸の遺伝子型を、レトロトランスポゾン遺伝子やマイクロサテライトの多型を調べたところ、多くのシロが2つ以上のジェネットから成立していることがわかった (Murata et al. 2005, Lian et al. 2006)。さらに、シロ内部のマツタケ菌根から得た遺伝子について一遺伝子多型の解析を進めたところ、シロの発達に伴ってマツタケ菌のジェネットの多様度は高まって行くことがわかった (Amend et al. 2009)。このことにより、シロとして成長を開始した複核化の菌糸体においては、担子胞子の発芽による単核菌糸との交配 (ダイモン交配) による遺伝子組換えが繰り返されていることや (Murata et al. 2005) や、複数のシロの融合により1つのシロを形成することが示唆された (小川 1975, Lian et al. 2006)。

国産マツタケの収穫量の減少とともに、諸外国より、多くのマツタケが輸入されているが、中国からは、全輸入量の72%が中国産である。そのため中国産マツタケを安定的に生産し続けるためのマツタケシロの発生様式に関する研究が、中国産マツタケの記載 (Cao et al. 2003) や地域間変異 (Matsushita et al. 2005, Bao et al. 2007, Murata et al. 2008, Xu et al. 2010, Wan et

al. 2012) などに関する研究とともに進められてきている。一遺伝子多型の解析によってマツタケ個体群を比較したところ、個体群間の相違の程度は、個体群間の距離だけでなく、地形による影響も受けていることが明らかになっており、マツタケ個体群の形成には胞子の飛散と定着が重要であることが示された (Amend et al. 2010)。さらに、地マツタケ個体群の変異は地域内でも地域間でも大きいことが報告されている。地域内の変異の大きさは、胞子由来でシロが形成されているとともに、その発達とともに遺伝子組換えを繰り返していることを示唆している。また、地域間の差異の大きさは、担子胞子はそれほど広範囲には飛散していないことを示している。以上のことから、地域のマツタケ個体群を維持するためには、マツタケ子実体を採取する際、全ての子実体を若いうちに採取するのではなく、一部そのままの状態にして担子胞子を飛散させることが、マツタケの子実体発生を維持するのに重要であることを述べている (Xu et al. 2008)。

マツタケが発生する土壌は貧栄養であり、根、菌根、さらにシロには、そこに特異的に存在する物質に応じて様々な微生物が存在しており、マツタケとの関係が注目される。Ohara and Hamada (1967) は、希釈平板法によって、シロ各部の微生物数を調査したところ、マツタケシロのキノコが発生する部位においては、微生物数が他の部位よりも低いことから、マツタケ菌根による抗菌作用があることを明らかにした。この活性の高い菌根 (活性菌根) による抗菌作用は、揮発性物質の効果によるとされ、その成分の特定が進められた (鶴田・川合 1979)。その結果、抽出成分の1つが α -ピネンであることが特定され、抗細菌作用が明らかになっている。しかし、抗真菌作用を有する物質は特定されていない。

一方、土壌中から直接に遺伝子を抽出して、そこから微生物の種を特定する手法によって、シロ部位の微生物群集が調べると、希釈平板法によっては細菌が現れなかったシロ部位であっても *Sphingomonas* 属および *Acidobacterium* 属などの細菌が検出された (Kataoka et al. 2012)。また同様の手法により、シロ及びその上層土壌には、*Piloderma* 属や *Tomentellopsis* 属などの担子菌、*Thermomonosporaceae* 属や *Nocardia* 属の細菌および *Streptomyces* 属の放線菌が特異的に存在していた (Vaario et al. 2011)。これら微生物のシロ環境への適応様式や、マツタケ菌成長への影響については、野外のマツタケシロの発達機構を把握する上でも重要な情報である。

6. 菌根共生

マツタケが菌根性であることは、野外のシロにおいてマツなどの樹木細根での菌根形成を観察すること、または分離したマツタケ菌を樹木に接種して菌根形成

を観察することにより確認する。

菌根形成は、菌糸が細根の表面を覆い（菌套または菌鞘という）、かつ根組織の細胞間隙に菌糸が侵入して細胞を取り囲んで、ハルティッヒ・ネットという構造を形成することを指標とすることが一般的である（Photo 2）。

野外シロにおけるマツタケ菌根の記載については、これまでいくつかの報告がある。Masui (1927) は、アカマツに形成された菌根について、根の外側を覆う菌糸層はあまり発達せず、タンニン顆粒が根の皮層と菌糸層との間に分布すること、菌糸が細胞間隙に侵入していることを報告しているが、ハルティッヒ・ネットの形成には言及していない。さらに、一部の菌糸が細胞壁内部にまで侵入していることを述べている。子実体から菌根へとつながる菌糸は、腐植につながるものがないことから絶対依存的な菌根菌であるとしている。接種試験においても同様な菌糸の侵入様式が観察され、またアカマツ実生の葉も非接種の対照区が緑色であるのに対して、黄化し成長しなくなった。これらの結果から、マツタケは寄生性の強い菌であると指摘した。同様に、小川 (1975) は、アカマツの根に形成される菌根は、根の表面を覆わず、また、ハルティッヒ・ネットを形成せず、菌糸が細胞間隙だけでなく、細胞内にも侵入していたことから、寄生性の強い特徴を有していると述べている。一方、Yamada et al. (1999a) は、マツタケ子実体からつながる菌糸から形成された菌根を記載したところ、根の周囲を覆う菌糸とハルティッヒ・ネットの形成から、マツタケは典型的な

外菌根を形成することを報告している。Yamada et al. (1999a) が指摘しているように、Masui (1927) が接種試験に用いた菌株がマツタケ菌であったのか、また、小川 (1975) においては、菌根の記載は、通常の菌根形成部位である側根だけでなく、主根をも含めており、観察部位が異なっていること、また寄生性を示す根拠である細胞内侵入菌糸がマツタケ菌であるのか他の菌であるのかを確認できないことなどから、詳細な結果の比較は困難である。

マツタケの菌根を形成させる手法は、室内実験で、フラスコや培養瓶などの密閉容器内で育成した無菌の苗にマツタケ菌を接種する方法の他、野外の苗に菌を接種する方法やシロの先端に苗を植える方法がある。衛藤 (1990) は、密閉容器で3箇月または1年育てたアカマツ無菌苗へマツタケ菌を接種したところ、マツタケ菌糸が根の表面を覆い、根の細胞間隙へ侵入したことを報告した。その後、これらを鉢に移植して育てたところ、菌根の消失した苗数が、3箇月育成苗の方が、1年間育成苗よりも多いことから、植物体サイズが菌根の維持に重要であると報告した。また、培地への鉄（クエン酸鉄）の添加により菌糸成長と菌根合成が向上した（衛藤 1999）。さらに、マツタケ培養菌糸を林地へそのまま、または殺菌剤も併せて施与した場合に、菌根化と一部にシロ様菌体の形成を認めている（衛藤 2001）。これらにおける菌根化は、野外のシロにおいて観察される黒色菌根の形成も指標としている（衛藤 1999, 2001）。また、Vaario et al. (2000) は寒天培地上にろ紙を敷いた上に無菌のアカマツ実生苗を置き、そ

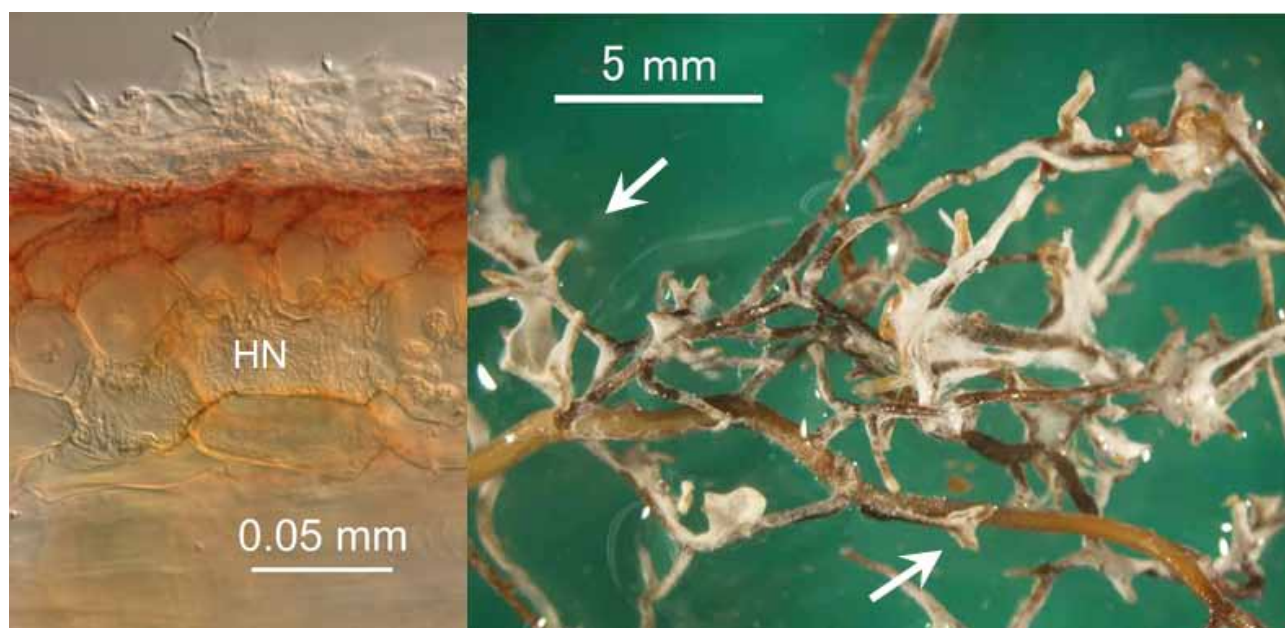


Photo 2. アカマツ実生へマツタケ菌株を接種して形成された外生菌根
右：細根部が白色の菌糸（矢印）に覆われている。左：細胞間隙に菌糸が侵入してハルティッヒ・ネット（HN）を形成している。
Ectomycorrhizae formed by *T. matsutake* on roots of *Pinus densiflora*.

こへマツタケ菌を接種すると、その2週間後にハルティッヒ・ネットが形成されたが、接種後4週間目であっても菌套の形成は認められなかったことを報告している。Yamada et al. (1999b) は、滅菌したパーミキュライトに、発芽1週間目の無菌アカマツ実生を植え、同時にマツタケ菌を接種して育てたところ、その後3箇月目までに、ハルティッヒ・ネットと菌套が形成されていたことを報告している。この論文が初めて、マツタケが典型的な外菌根を形成することを実験的に証明したものである。このとき、菌の感染により、実生の成長は、菌を接種しなかった場合と比べてほぼ同じが、わずかに向上したと述べており、成長が抑制されるなど、マツタケが寄生性を示す結果にはなっていない。マツタケの接種により、アカマツ実生の成長が明瞭に向上したことは、Guerin-Laguet et al. (2004) によって報告されているが、このときもハルティッヒ・ネットの形成は認められたが、明瞭な菌套の形成は記述されていない。その後、滅菌土壌を用いた、マツタケ菌接種による菌根合成試験において、シロ様の菌糸体が形成された (Yamada et al. 2006, 小林ら 2007, 松下 2008)。以上の菌根合成実験では、種子を表面殺菌させたのち発芽させて得た、実生苗を用いた菌根合成であるが、成木を用いたマツタケ菌接種により、根を菌根化させることも可能になっている (Guerin-Laguet et al. 2005)。マツタケのシロ成長を維持するために十分な量の養分が供給するためには、一定サイズ以上の樹体が必要であると考えられ、成木を菌根化させる技術は有効である。また、シロ様の菌糸体が形成された報告 (Yamada et al. 2006, 小林ら 2007) においては、培養にはマツタケの発生地を滅菌して用いていることから、接種による菌根形成には、基物の選択も重要である。

国外からマツタケおよびその近縁種が報告されるにつれて、それらの類縁関係が解明されてきた。それと共に、人工栽培技術に適した種の選抜のために各地から集めた菌株を用いた菌根形成試験が実施されている。Vaario et al. (2009) は、日本産マツタケ菌株とフィンランド産マツタケ菌株を、欧州アカマツおよびドイツトウヒに接種した。フィンランド産マツタケは、両樹種に対して、ハルティッヒ・ネットを形成した。一方、日本産マツタケは欧州アカマツにのみハルティッヒ・ネットを形成した。このときのマツタケ感染による植物体成長への影響は、日本産マツタケは、多くの場合、両樹種の地上高、乾燥重量、窒素および炭素含量に対して抑制的に作用したが、フィンランド産マツタケ菌は、両樹種の窒素含量を低下させ、ドイツトウヒの乾燥重量を低下させたのみである。両菌株は樹木の成長に対しての促進効果は認められなかった。菌株によって共生能力が異なることが明らかになったが、日本産およびフィンランド産もそれぞれ一菌株で

あるため、地域間の差異であると断言できない。また Yamada et al. (2009) は、世界各地のから得たマツタケおよびその近縁種 11 菌株をアカマツに接種して、菌根形成や成長への影響を解析した。その結果、ブナ科広葉樹林で発生するバカマツタケおよびニセマツタケ以外の種は、全てアカマツ実生に明瞭な菌根を形成したが、実生への成長には、マツタケおよびその近縁種間では、明瞭な差は認められなかった。一方、日本産マツタケ菌株を、これまでマツタケが発生する樹種とされているマツ属3種およびトウヒ属2種の樹木に接種したところ、いずれの場合にも菌根が形成された (Yamada and Murata 2001)。また、テーダマツでも、接種試験によってマツタケ菌根の形成が認められている (Photo 3)。以上のように、各地から集めたマツタケ菌については、接種試験においては、マツ属やトウヒ属などのマツ科の樹種であれば菌根形成可能であるが、必ずしも菌根形成によって樹木の生長が促進されるのではないことが示されている。これは、菌と樹木

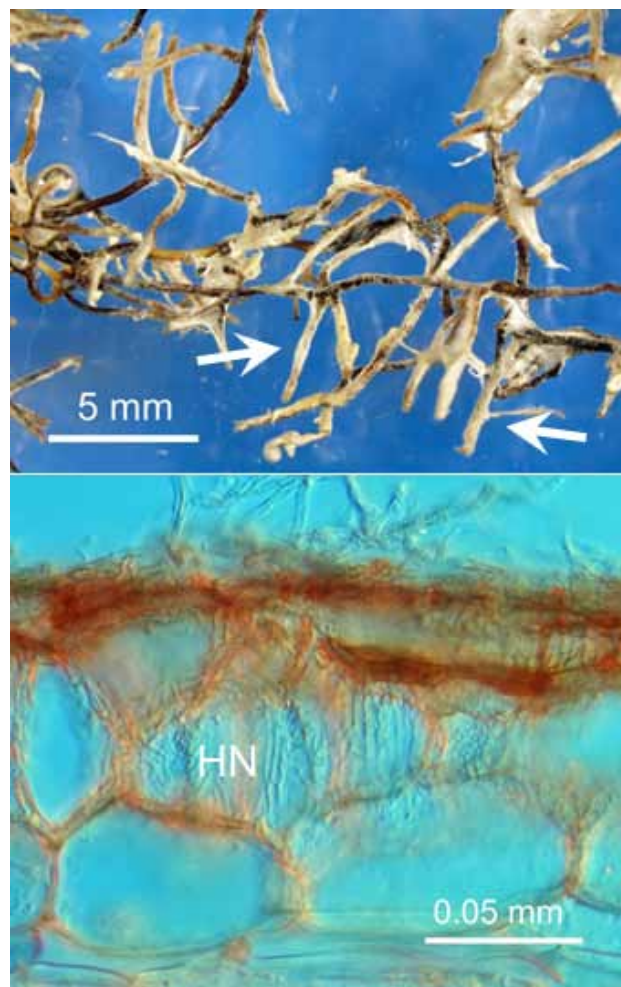


Photo 3. テーダマツ実生へマツタケ菌を接種して形成された外生菌根
上：細根部が白色の菌糸に覆われている (矢印)。
下：細胞間隙に菌糸が侵入してハルティッヒ・ネット (HN) を形成している。
Ectomycorrhizae on *P. taeda* inoculated with *T. matsutake*.

との間の組み合わせによる影響のほか、菌根合成試験で用いた土壌や養水分条件や、接種に用いた菌や実生の生育ステージの影響も考えられる。

7. 人工栽培にむけた取り組み

これまで、マツタケの人工栽培技術として確立されたものはない。菌根菌であるマツタケの人工栽培の想定される形態としては、①野外林地においてマツタケを発生させる方法、②腐生菌であるヒラタケやエノキタケのような菌床栽培において、発生させる方法がある。これらの2点について記述する。

①野外におけるマツタケの人工栽培については、一つには、落ち葉掻きや、小灌木の伐採などの施業によってマツタケの発生しやすい森林環境をつくるものがある。これはマツタケ増産技術となるが、古くは金行幾太郎によって提唱されたもの（徳本孝彦 1964）であり、その効果が現われた事例が紹介されている（マツタケ研究懇話会 1983, 川上・枯木 1989, 吉村 2004, まつたけ増産のてびき（改訂Ⅲ版）編集委員会 2005）。また、岡山県では、シロ先端から外側の土壌表層のA層とA₀層を除去して、そこへ地下30cm以下の土壌を客土したところ、シロの活性が高まったことが報告されている（下川 1980）。

一方、野外において、菌を人工的に接種するか感染木を植栽して、マツタケを発生させる技術については、孢子、菌糸、野外シロを接種源として試みられている。孢子の場合は、成熟したマツタケを林床に設置して、孢子を直接落下させるものや、孢子懸濁液を散布する方法などがある。この場合、孢子発芽促進効果のある酪酸や、孢子発芽阻害物質を除去するために活性炭処理したものなどが試みられている（京都府林業試験場 2004）。菌の接種は、液体培養によって増殖させた菌糸体（成松 2006）を直接に、または滅菌土壌において増殖させた後、接種する。その場合、潜在する土壌微生物を除去するために殺菌剤と併用する方法や（衛藤・谷口 2000）、拮抗する微生物と混ぜて接種する方法が試みられている。また、シロの移植によって、シロの再形成も広島県や京都府において試みられている（京都府林業試験場 2001）。しかしながら、以上の方法においては、肉眼的観察による菌根の形成が認められた事例もあるが、シロの形成には至っていない。

マツタケの感染木を用いた試みについては、苗木を野外シロの外側に植栽して、自然感染させた苗木や、無菌的に発芽させた実生苗に菌を接種して菌根化させた苗を用いる方法が試みられた。広島県においては、マツタケシロの外側に網状ポットに入れたアカマツ苗木を植栽して、その後広がるシロによって感染させた苗木をポットごと、マツタケ未発生林へ植栽したところ、その6年後に、その苗木近くにマツタケの子実体が1個体発生したことを報告している（枯木・川

上 1985）。これが今まで、マツタケが人工的に発生した国内での唯一の事例として知られている。このとき、シロの発達は植栽苗木を起点として、植栽箇所の周囲に生育するアカマツから伸長する根系にも感染していた。しかし、植栽苗木の根系は、ポット外部へはほとんど発達していなかった。また発生した子実体が感染させたマツタケ菌と遺伝的に同一であるかどうかは確認できていない。同様の手法を用いて、感染苗を作成してそれを移植した後子実体芽発生したことが韓国においても報告された（Ka et al. 2010, 2011）。ここでも、発生した子実体が、感染苗に定着していたマツタケ菌由来であるかの検証が必要である。石川県においても、野外シロに感染させたアカマツ苗木を移植した試験が実施された。このとき、移植した苗木の鉢土から外には、シロが広がることはなかった（能勢 1983）。一方、無菌のアカマツ実生苗にマツタケ菌を接種してシロ様構造を有する菌根形成苗（小林ら 2007）が作出され、これを野外林地に植栽したところ、植栽後2年目で、シロ様菌糸の残存は肉眼で確認できたが、シロの拡大は確認できていない（山田・小林 2008）。このように、野外のシロで感染させた場合、また無菌苗にマツタケ菌を接種した場合であっても、野外に植栽したあとシロの発達が確実に認められた事例はない。シロの定着と発達には、共生相手からの養分獲得機構や、土壌中で生息する様々な微生物との関係の解明が必要であり、これら基礎研究の取り組みが必要である。

マツタケ以外の菌根性食用菌についても野外林地での人工栽培技術の実用化に向けた研究が取り組まれてきており、菌根菌感染苗の植栽後、または菌（孢子、菌糸）の施用後に、子実体が発生したことが、シウロおよびホンシメジで報告されている。シウロについては、孢子懸濁液の散布（平佐 1991）や、菌根感染苗を海砂に植栽（玉田 2008）した場合に子実体が発生した。また、ホンシメジについては、培養菌糸体を埋設した後に、子実体が発生した（河合 1999, 水谷 2006）。イタリアやフランスでは、黒トリフ（*Tuber melanosporum*）の発生地に苗木を植えて、自然感染させた苗木を用いた黒トリフの生産が行われている（Wang and Hall 2004）。また、林地に孢子を散布して感染させた苗木を用いたトリフ生産も行われている。

このように野外林地など現場レベルでの発生は成功していないが、実験的に実生苗に菌を接種して菌根化させて育てた場合に子実体が発生したという報告が、国内では、マツタケと同じキシメジ属のキシメジ、ミネシメジおよびシモフリシメジ、またアカハツにおいて報告されている（Yamada et al. 2001b, 2007）。同様に海外では、アンズタケやチチタケ属の一種（*Lactarius deliciosus*）、オオキツネタケおよびワカフサタケ属の一種（*Hebeloma cylindrosporum*）において報告されている（Danell and Camacho 1997, Guerin-

Laguette et al. 2000, Debaud and Gay 1987, Godbout and Fortin 1990)。

一方、②菌床栽培において、腐生的に子実体を形成させることは、生きた樹木根との共生関係が生育に不可欠とされる菌根性のマツタケの場合は非常に困難である。これまで、栄養分を添加した滅菌土壤に、マツタケ菌を培養したとき、子実体原基が形成されたことが報告されているが、その後、通常の子実体に発達していない (小川・浜田 1975, 川合・小川 1976)。しかし、マツタケの他で、菌根性の菌が腐生的に子実体を形成した事例は、ホンシメジ (Ohta 1994)、ワカフサタケ属菌 (Ohta 1998)、オニイグチモドキ (太田 2008) で知られており、そのうちホンシメジにおいては実用化されている。これら菌類の発生生態や栄養生理を比較研究することによって、マツタケの菌床栽培を成功させる道を拓く可能性がある。

8. 最後に

分子生物学的手法の進展、および研究機器の性能の向上に伴い、マツタケ研究はとりわけ、個体や種の判別において研究が進んでいる。それにより世界各地から我が国へ輸入されるマツタケの産地の判別が可能になっている (森林総合研究所 2008)。また、シロは遺伝的にモザイク状をしており、それには担子孢子由来の単核の菌糸の重要性が示唆された (例えば、Murata et al. 2005, Amend et al. 2010)。そのため、人工栽培技術の開発に向けては、感染苗木や培養菌糸を用いるとしても、モザイク現象の再現を考慮して進めることが重要である。そのためには、担子孢子に由来する単核菌糸の獲得と維持が重要である。単核菌糸の獲得と維持は、野外におけるモザイク現象の再現に必要と言うだけでなく、交配に優良菌株の作出に重要である。一方、野外でのシロ誘導試験に際しては、土壤中のマツタケ菌糸を、他種と識別して定量する方法 (山口 2009) を用いることで、様々な取り組みの効果を子実体の出現ではなく、より早い段階で知ることが可能になった。今後の人工栽培化に向けては、シロ発達機構や樹木との菌根共生機構の解明を目的に、菌学だけでなく、植物生理学や土壌学など分野横断的な研究の推進が必要である。

謝辞

信州大学准教授・山田明義博士および森林総合研究所企画部研究評価科長・窪野高德博士、また担当編集員ならびに査読者の方々からは、本稿に対して数多くの有益なご意見を頂き、深く感謝いたします。今回の成果の一部は、森林総合研究所交付金プロジェクト (課題番号: 200813) において得たものである。

引用文献

- Amend, A., Keeley, S. and Garbelotto, M. (2009) Forest age correlates with fine-scale spatial structure of Matsutake mycorrhizas. *Mycol. Res.*, 113, 541-551.
- Amend, A., Garbelotto, M., Fang, Z. and Keeley, S. (2010) Isolation by landscape in populations of a prized edible mushroom *Tricholoma matsutake*. *Conserv. Genet.*, 11, 795-802.
- Bao, D., Koike, A., Yao, F., Yamanaka, K., Aimi, T. and Kitamoto, Y. (2007) Analyses of the genetic diversity of matsutake isolates collected from different ecological environments in Asia. *J Wood Sci.*, 53, 344-350.
- Bergius, N. and Danell, E. (2000) The Swedish matsutake (*Tricholoma naseosum* syn. *T. matsutake*): distribution, abundance and ecology. *Scand. J. For. Res.*, 15, 318-325.
- Cao, Z. -M., Yao, Y. -J. and Pegler, D. N. (2003) *Tricholoma zangii*, a new name for *T. quercicola* M. Zang (Basidiomycetes: Tricholomataceae). *Mycotaxon*, 85, 159-164.
- Danell, E. and Camacho, F. J. (1997) Successful cultivation of the golden chanterelle. *Nature (Lond)*, 385, 303.
- Debaud, J. C. and Gay, G. (1987) *In vitro* fruiting under controlled conditions of the ectomycorrhizal fungus *Hebeloma cylindrosporum* associated with *Pinus pinaster*. *New Phytol.*, 105, 429-435.
- 衛藤慎也 (1990) 菌根合成によるマツタケ菌感染苗の育成. 広島県林試研報, 24, 1-6.
- 衛藤慎也 (1999) 容器内混合培養法によるマツタケ菌根合成苗の育成. 広島県林技セ研報, 31, 21-25.
- 衛藤慎也 (2001) マツタケ種菌の開発と林地接種について. 広島県林技セ研報, 33, 37-39.
- 衛藤慎也・谷口 實 (2000) 殺菌剤を利用したマツタケの林地接種源の開発. 日本応用きのこ学会誌, 8, 197-202.
- Godbout, C. and Fortin, J. A. (1990) Cultural control of basidiome formation in *Laccaria bicolor* with container-grown white pine seedlings. *Mycol. Res.*, 94, 1051-1058.
- Guerin-Laguette, A., Matsushita, N., Lapeyrie, F., Shindo, K. and Suzuki, K. (2005) Successful inoculation of mature pine with *Tricholoma matsutake*. *Mycorrhiza*, 15, 301-305.
- Guerin-Laguette, A., Plassard, C. and Mousain, D. (2000) Effects of experimental conditions on mycorrhizal relationships between *Pinus sylvestris* and *Lactarius deliciosus* and unprecedented fruit-

- body formation of the Saffron milk cap under controlled soilless conditions. *Can. J. Microbiol.*, 46, 790-799.
- Guerin-Laguette, A., Shindo, K., Matsushita, N., Suzuki, K. and Lapeyrie, F. (2004) The mycorrhizal fungus *Tricholoma matsutake* stimulates *Pinus densiflora* seedling growth in vitro. *Mycorrhiza*, 14, 397-400.
- Guerin-Laguette, A., Vaario, L. M., Matsushita, N., Shindo, K., Suzuki, K. and Lapeyrie, F. (2003) Growth stimulation of a Shiro-like, mycorrhiza forming, mycelium of *Tricholoma matsutake* on solid substrates by non-ionic surfactants or vegetable oil. *Micol. Prog.*, 2, 37-44.
- 浜田 稔 (1964) マツタケおよび類縁菌の菌糸純粋培養法, マツタケ研究懇話会編 “マツタケ—研究と増産—”, 中西印刷, 97-100.
- 平佐隆文 (1991) 注目した野外でのショウロ子実体生産事例. 島根林技研報, 42, 37-44.
- 広本一由 (1960) マツタケ菌の純粋分離と培養. 植物学雑誌, 73, 326-333.
- Hosford, D., Pilz, D., Molina, R. and Amaranthus, M. (1997) Ecology and management of the commercially harvested American matsutake mushroom. *Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-412*, USDA Forest Service, Portland, U.S.A., 68 pp.
- 今関六也・本郷次雄 (1987) “原色日本新菌類図鑑 (I)”, 保育社, 77.
- Intini, M., Dogan, H. H. and Riva, A. (2003) *Tricholoma anatolicum* spec. nov.: a new member of the matsutake group. *Micol. e Veget. Medit.*, 18, 135-142.
- Iwase, K. (1997) Cultivation of mycorrhizal mushroom s. *Food Rev. Int.* 13, 431-442.
- Ka, K. -H., Hur, T. -C., Park, H., Kim, H. -S. and Bak, W. -C. (2010) Mycelial growth and fairy-ring formation of *Tricholoma matsutake* from matsutake-infected pine trees. *Kor. J. Mycol.*, 38, 16-20.
- Ka, K. -H., Park, H., Hur, T. -C., Kim, H. -S. and Bak, W.-C. (2011) Researches on the artificial cultivation of *Tricholoma matsutake* in Korea. *Proc. Asian Mycological Congress 2011*. Incheon, Korea.
- 枯木熊人・川上嘉章 (1985) マツタケ菌感染苗によるシロの人工形成. 広島県林試研報, 20, 13-23.
- Kataoka, R., Siddiqui, Z. A., Kikuchi, J., Ando, M., Sriwati R., Nozaki, A. and Futai, K. (2012) Detecting nonculturable bacteria in the active mycorrhizal zone of the pine mushroom *Tricholoma matsutake*. *J. Microbiol.*, 50, 199-206.
- 河合昌孝 (1999) ホンシメジ培養菌糸体の林地埋設による人工感染と子実体の発生. 奈良県林試研報, 29, 1-7.
- 川合正允・阿部重雄 (1976) まつたけの培養に関する研究. 第1報 まつたけの栄養生長におよぼすC源およびN源の影響. 日菌報, 17, 159-167.
- 川合正允・小川 真 (1976) まつたけの培養に関する研究. 第4報 種菌培養の検討と菌床栽培の試み. 日菌報, 17, 499-505.
- 川合正允・寺田 治 (1976) まつたけの培養に関する研究. 第2報 まつたけの栄養生長におよぼすビタミン類, 核酸関連物質, 植物ホルモンの影響. 日菌報, 17, 168-174.
- 川上嘉章・枯木熊人 (1989) マツタケ林環境整備施業の効果—壮齡林における施業効果—. 広島県林試研報, 23, 1-16.
- 衣川堅二郎 (1964) マツタケ発生の要因, マツタケ研究懇話会編 “マツタケ—研究と増産—”, 中西印刷, 127-132.
- 小林久泰・綿引健夫・倉持眞寿美・小野瀬究明・山田明義 (2007) 大型培養容器によるマツタケのシロ様構造を有するマツ菌根苗の生産. 日本きのこ学会誌, 15, 151-155.
- Kusuda, M., Ueda, M., Miyatake, K. and Terashita, T. (2008) Characterization of the carbohydrase productions of an ectomycorrhizal fungus, *Tricholoma matsutake*. *Mycoscience* 49, 291-297.
- 京都府林業試験場 (2001) 平成12年度業務年報.
- 京都府林業試験場 (2004) 平成15年度業務年報.
- Kytövuori, I. (1989) The *Tricholoma caligatum* group in Europe and North Africa. *Karstenia*, 28, 65-77.
- Lian, C., Narimatsu, M., Nara, K. and Hogetsu, T. (2006) *Tricholoma matsutake* in a natural *Pinus densiflora* forest: correspondence between above- and below-ground genets, association with multiple host trees and alteration of existing ectomycorrhizal communities. *New Phytol.*, 171, 825-836.
- Masui, K. (1927) A study of the ectotrophic mycorrhizas of woody plants. *Mem. Coll. Sci. Kyoto Imp. Univ.*, Ser. B 3, 149-279.
- 松下範久 (2008) マツタケの人工シロ形成方法. 森林科学, 53, 37-38.
- Matsushita, N., Kikuchi, K., Sasaki, Y., Guerin-Laguette, A., Lapeyrie, F., Vaario, L. -M., Intini, M. and Suzuki, K. (2005) Genetic relationship of *Tricholoma matsutake* and *T. nauseosum* from the Northern Hemisphere based on analyses of ribosomal DNA spacer regions. *Mycoscience*, 46,

- 90-96.
- マツタケ研究懇話会 (1983) マツタケ山のつくり方, 創文, 163 pp.
- まつたけ増産のてびき (改訂Ⅲ版) 編集委員会 (2005) つくるマツタケへーまつたけ増産のてびき 改訂Ⅲ版ー, 西沢印刷, 92 pp.
- 水谷和人 (2006) ホンシメジ培地の林地埋設後 5 年間の子実体発生状況. 公立林業試験研究機関研究成果選集, 3, 37-38.
- Murata, H., Ohta, A., Yamada, A., Narimatsu, M. and Futamura, N. (2005) Genetic mosaics in the massive persisting rhizosphere colony “shiro” of the ectomycorrhizal basidiomycete *Tricholoma matsutake*. *Mycorrhiza*, 15, 505-512.
- Murata, H., Babasaki, K., Saegusa, T., Takemoto, K., Yamada, A. and Ohta, A. (2008) Traceability of Asian *Matsutake*, specially mushrooms produced by the ectomycorrhizal basidiomycete *Tricholoma matsutake*, on the basis of retroelement-based DNA markers. *Appl. Environment Microbiol.* 74, 2023-2031.
- 成松眞樹 (2006) 菌糸担体を用いた液体培養における培養条件がマツタケ菌糸の増殖に与える影響. 岩手林技セ研報, 14, 31-36.
- 能勢育夫 (1983) マツタケの菌付樹育成と移植後のシロの変化について. 石川林試研報, 13, 11-17.
- 小川 真 (1975) アカマツ林における菌根菌, マツタケの微生物生態学的研究. I. マツタケのシロ. 林試研報, 272, 79-121.
- 小川 眞・浜田 稔 (1975) 純粋培養によるマツタケ子実体原基の形成. 日菌報, 16, 406-415.
- 小川 眞・川合正允 (1976) まつたけの培養に関する研究. 第 3 報 まつたけの栄養生長におよぼす天然生育促進因子の影響. 日菌報, 17, 492-498.
- Ohara, H. and Hamada, M. (1967) Disappearance of bacteria from the zone of active mycorrhizas in *Tricholoma matsutake* (S. Ito et Imai) Singer. *Nature*, 213, 528-529.
- Ohta, A. (1986) Basidiospore germination of *Tricholoma matsutake* (I). Effects of organic acids on swelling and germination of the basidiospores. *Trans. Mycol. Soc. Japan*, 27, 167-173.
- Ohta, A. (1990) A new medium for mycelial growth of mycorrhizal fungi. *Trans. Mycol. Soc. Japan*, 31, 323-334.
- Ohta, A. (1994) Production of fruit-bodies of a mycorrhizal fungus, *Lyophyllum shimeji*, in pure culture. *Mycoscience*, 35, 147-151.
- Ohta, A. (1998) Fruit-body production of two ectomycorrhizal fungi in the genus *Hebeloma* in pure culture. *Mycoscience*, 39, 15-19.
- 太田 明 (2006) マツタケ胞子を播種した寒天培地から分離される菌糸の核数. 滋賀県森林センター業務報告, 38, 29-31.
- 太田 明 (2008) マツタケの胞子の発芽と菌糸の特性. 森林科学, 53, 35-36.
- Ota, Y., Yamanaka, T., Murata, H., Neda, H., Ohta, A., Kawai, M., Konno, M. and Tanaka, C. (2012) Phylogeny of the mycorrhizal gourmet mushrooms “matsutake” based on nucleotide sequences of multiple genes and genetic elements. *Mycologia* 2012 12-068; Preliminary version published online: June 8, 2012, doi:10.3852/12-068
- 島菌平雄 (1979) マツタケ, ニセマツタケおよびバカマツタケの寒天培地におけるコロニー形態の比較. 日菌報, 20, 176-184.
- 下川利之 (1980) マツタケ増殖技術開発に関する研究 (1 報) 客土による活性菌根帯の増殖. 岡山県林試研報, 4, 1-11.
- 森林総合研究所 (2008) “マツタケの DNA 原産国判別法”, <http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/matsutake/index.html>
- 玉田克志 (2008) 菌根合成苗によるショウロ栽培試験. 公立林業試験研究機関研究成果選集, 5, 47-48.
- 玉田克志・練 春蘭 (2004) マツタケ胞子分離により得られた菌糸体の特性. 東北森林科学会誌, 9, 90-93.
- 徳本孝彦 (1964) マツタケ山の改善を語る, マツタケ研究懇話会編 “マツタケー研究と増産ー”, 中西印刷, 7-40.
- 鶴田輝之・川合正允 (1979) まつたけの培養に関する研究, 第 7 報 マツタケのシロから抽出された揮発性成分の抗菌作用. 日菌報, 20, 211-219.
- Vaario, L. M., Guerin-Laguette, A., Gill, W. M., Lapeyrie, F. and Suzuki, K. (2000). Only two weeks are required for *Tricholoma matsutake* to differentiate ectomycorrhizal Hartig net structures in roots of *Pinus densiflora* seedlings cultivated on artificial substrate. *J. For. Res.*, 5, 293-297.
- Vaario, L. M., Guerin-Laguette, A., Matsushita, N., Suzuki, K. and Lapeyrie, F. (2002) Saprobic potential of *Tricholoma matsutake*: growth over pine bark treated with surfactants. *Mycorrhiza*, 12, 1-5.
- Vaario, L. M., Pennanen, T., Sarjala, T., Savonen, E. M. and Heinonsalo, J. (2009) Ectomycorrhization of *Tricholoma matsutake* and two major conifers

- in Finland - an assessment of in vitro mycorrhiza formation. *Mycorrhiza*, 20, 511-518.
- Vaario, L. M., Fritze, H., Spetz, P., Heinonsalo, J., Hanajík, P. and Pennanen, T. (2011) *Tricholoma matsutake* dominates diverse microbial communities in different forest soils. *Appl. Environ. Microbiol.*, 77, 8523-8531.
- Vaario, L. M., Heinonsalo, J., Spetz, P., Pennanen, T., Heinonen, J., Tervahauta, A. and Fritze, H. (2012) The ectomycorrhizal fungus *Tricholoma matsutake* is a facultative saprotroph in vitro. *Mycorrhiza*, 22, 409-418.
- Wan, J., Koike, A., Yamanaka, K., Sotome, K., Morinaga, T., Tanaka, C., Terashima, Y. and Aimi, T. (2012) Genetic diversity of *Tricholoma matsutake* and close allies associated with broad-leaved trees in Asia. *Mushroom Sci. Biotech.*, 19, 167-174.
- Wang, Y. and Hall, I. R. (2004) Edible ectomycorrhizal mushrooms: challenges and achievements. *Can. J. Bot.*, 82, 1063-1073.
- Xu, J., Sha, T., Li, Y. -C., Zhao, Z. -W. and Yang, Z. L. (2008) Recombination and genetic differentiation among natural populations of the ectomycorrhizal mushroom *Tricholoma matsutake* from southwestern China. *Mol. Ecol.*, 17, 1238-1247.
- Xu, J., Cadorin, M., Liang, Y. J. and Yang Z. L. (2010) DNA-based geographic typing of the gourmet mushroom *Tricholoma matsutake* traded in China. *Mycoscience*, 51, 248-251.
- Yamada, A., Kanekawa, S. and Ohmasa, M. (1999a) Ectomycorrhiza formation of *Tricholoma matsutake* on *Pinus densiflora*. *Mycoscience*, 40, 193-198.
- Yamada, A., Maeda, K. and Ohmasa, M. (1999b) Ectomycorrhiza formation of *Tricholoma matsutake* isolates on seedlings of *Pinus densiflora* in vitro. *Mycoscience* 40, 455-463.
- 山田明義・小林久泰 (2008) マツタケ人工栽培の展望. *森林科学*, 53, 41-42.
- Yamada, A., Kobayashi, H., Murata, H., Kalmış, E., Kalyoncu, F. and Fukuda, M. (2009) *In vitro* ectomycorrhizal specificity between the Asian red pine *Pinus densiflora* and *Tricholoma matsutake* and allied species from worldwide Pinaceae and Fagaceae forests. *Mycorrhiza*, 20, 333-339.
- Yamada, A., Kobayashi, H., Ogura, T. and Fukuda, M. (2007) Sustainable fruit-body formation of edible mycorrhizal *Tricholoma* species for 3 years in open pot culture with pine seedling hosts. *Mycoscience*, 48, 104-108.
- Yamada, A., Maeda, K., Kobayashi, H. and Murata, H. (2006) Ectomycorrhizal symbiosis in vitro between *Tricholoma matsutake* and *Pinus densiflora* seedlings that resembles naturally occurring 'shiro'. *Mycorrhiza*, 16, 111-116.
- Yamada, A. and Murata, H. (2001) In vitro mycorrhizal synthesis of *Tricholoma matsutake* with *Pinus* and *Picea*. Abstracts of 3rd international conference on mycorrhizas, Adelaide, Australia.
- Yamada, A., Ogura, T., Degawa, Y. and Ohmasa, M. (2001a) Isolation of *Tricholoma matsutake* and *T. bakamatsutake* cultures from field-collected ectomycorrhizas. *Mycoscience*, 42, 43-50.
- Yamada, A., Ogura, T. and Ohmasa, M. (2001b) Cultivation of mushrooms of edible ectomycorrhizal fungi associated with *Pinus densiflora* by in vitro mycorrhizal synthesis. I. Primordium and basidiocarp formation in open-pot culture. *Mycorrhiza*, 11, 59-66.
- 山田明義・寺崎正孝 (1998) 茨城県産マツタケ培養菌株の性状. *日林論*, 109, 483-484.
- 山口宗義 (2009) マツタケ菌の検出および定量プライマーセット、およびマツタケ菌の検出方法ならびにマツタケ菌の定量方法, 特開 2009-183202 号, 日本国特許庁.
- Yamanaka, T., Maruyama, T., Yamada, A., Miyazaki, Y. and Kikuchi, T. (2012) Ectomycorrhizal formation on regenerated somatic plants of pines after inoculation with *Tricholoma matsutake*. *Mushroom Sci. Biotech.*, 20, 93-97.
- 吉村文彦 (2004) ここまで来た! まつたけ栽培, トロント, 109 pp

総説 (Review article)

平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震による土砂災害の概要とその特徴

三森 利昭^{1)*}、多田 泰之²⁾、村上 亘²⁾、大丸 裕武²⁾、安田 幸生³⁾、野口 正二³⁾

Characteristics of sediment disasters by The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008

Toshiaki SAMMORI¹⁾, Yasuyuki TADA²⁾, Hiromu DAIMARU²⁾
Wataru MURAKAMI²⁾, Yukio YASUDA²⁾ and Shoji NOGUCHI³⁾

Abstract

The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, which occurred at 8:43 JST, 14, May, 2008 inland of Tohoku region, caused a lot of landslides on mountain hill slopes near the epicenter. We analyzed the influences of geology, topography etc. on occurrence of landslides with Geographical Information System (GIS) in this report. We extracted and plotted the landslides with aerial photographs and satellite visible light images of ALOS which are taken after the earthquake. The numbers and area of landslides were 10,751 and 13,576 square kilometers, respectively. We obtain conclusions as follows; 1. Most of landslides occurred on hanging walls within fifteen kilometers from the seismogenic reverse fault; 2. fragile strata of volcanic deposits strongly affected the landslide occurrence; 3. The landslides occurred near the geological boundaries; 4. A cap rock type of landslides, with strata combination of welded tuff in upper and lacustrine deposit in lower, is conspicuous on steep rim slopes of calderas in southern foot of Mt. Kurikoma; 5. A lateral spread is the main cause of large landslides on gentle slopes.

Key words : 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, sediment disaster, volcanic area, geological boundary, cap rock type of landslide, caldera, geographical information system

要旨

2008 年 6 月 14 日午前 8:43、岩手県内陸南部を震源に発生した 2008 年岩手・宮城内陸地震 (マグニチュード 7.2) は、震源付近の山地斜面に多くの崩壊を生じさせた。この地震により発生した崩壊の特徴を明らかにするため、GIS を用いて地質、地形などの影響を分析した。地震後に撮影された航空写真と ALOS の可視光画像を用いて、10,751 箇所、13,576 km² の崩壊地を目視によって抽出し、GIS 上に記載した。これらの崩壊地と地震、地質、地形、植生との関係を明らかにした。この結果、①崩壊は逆断層である震源断層の上盤側で断層からほぼ 15 km の範囲内で発生している、②火山地帯特有の地質が崩壊の発生と深い関係がある、③地質境界付近に発生する崩壊が多い、④上層が堅固な溶結凝灰岩で下層が軟弱な湖成堆積岩とするキャップロックタイプの崩壊が栗駒山南麓のカルデラ付近で多発している、⑤大規模な崩壊地の発生原因は側方流動 (スプレッド) の可能性が高い、等の結論が得られた。

キーワード: 2008 年岩手・宮城内陸地震、土砂災害、火山地帯、地質境界、キャップロック、カルデラ、GIS

1. はじめに

2008 年 6 月 14 日午前 8:43 に、岩手県南部の内陸部 (北緯 39 度 01.7 分、東経 140 度 52.8 分) を震源とする地震 (マグニチュード 7.2) が発生し、死者 17 名、行方不明 6 名 (内閣府 2011) という大きな被害が生じた (Fig. 1 位置図参照)。この地震による被害は岩手・宮城・秋田・山形・福島の 5 県にまたがっていた。被害の特徴は、建物への被害が少なく、山地での崩壊とそれに伴う土石流による被害が主であった。このうち

土砂による災害では、荒砥沢に発生した大規模な地すべりや、震源から離れた一迫川上流域で規模の大きな崩壊が多数発生するなど、特徴的な現象が数多く見られた。

地震直後の被害実態については、地震・防災に関係する各省庁所管の研究所、災害関連の各学術団体から多くの報告がなされている。この中で、本稿が対象としている土砂災害の報告に限れば、各省庁所管の研究所では 3 研究機関 (うち 2 機関は合同調査を実施) か

原稿受付: 平成 23 年 11 月 28 日 Received 28 November 2011 原稿受理: 平成 24 年 7 月 3 日 Accepted 3 July 2012

1) 森林総合研究所企画部 Research Planning and Coordination Department, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 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)

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

* 森林総合研究所企画部 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 Research Planning and Coordination Department, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: sammori@ffpri.affrc.go.jp

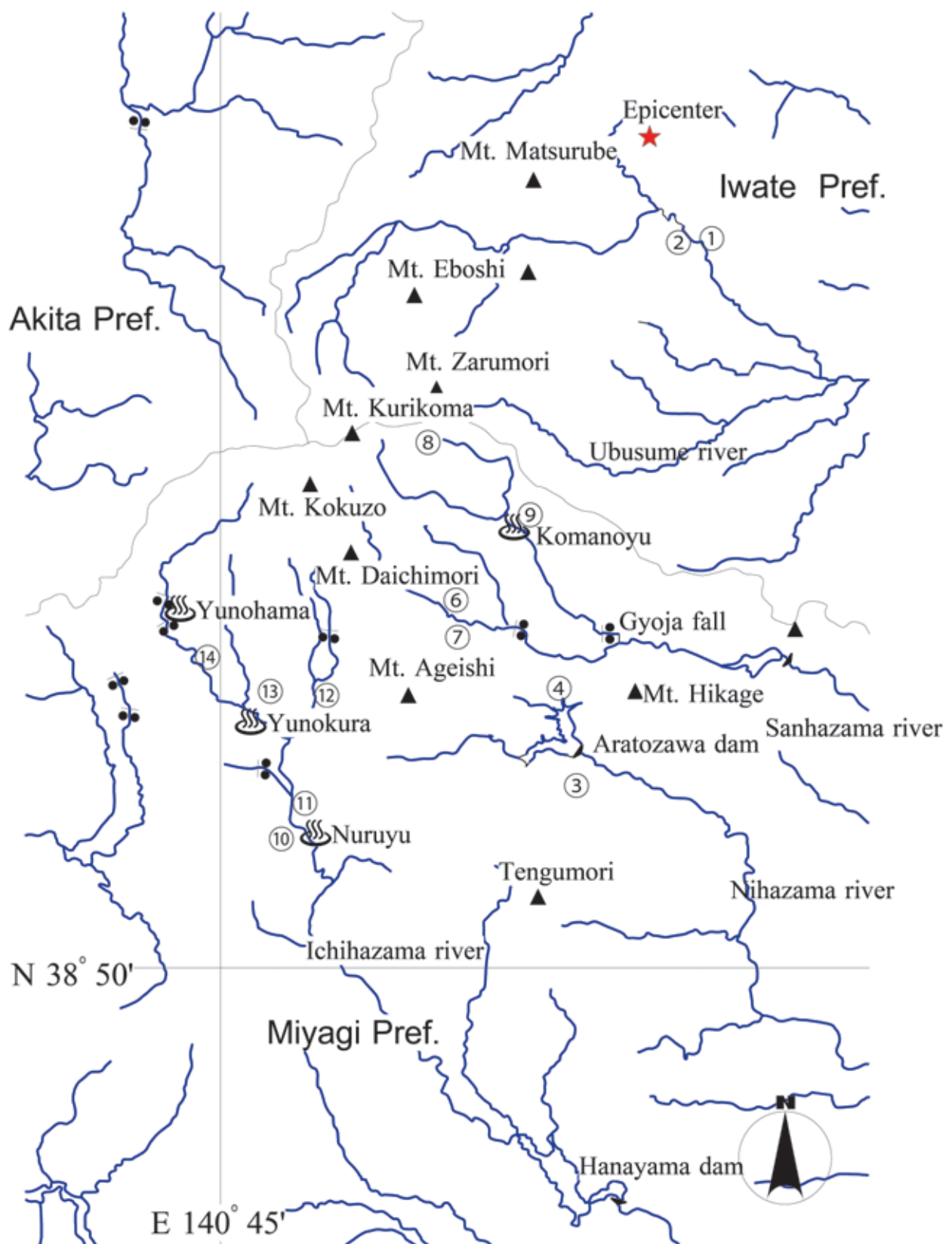


Fig. 1. 位置図。図中の①～⑭は写真の番号に対応する。
Site map. The numbers from 1 to 14 on the map correspond to the numbers of photographs.

ら報告がされている。このうち国土交通省傘下の国土技術政策総合研究所・土木研究所による調査報告(2008)では、国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センターならびに土木研究所土砂管理研究グループにより、災害直後の空中あるいは地上の踏査による土砂災害の実態が報告されている。特に、河道付近の大規模崩壊により生じた土砂ダムの危険度評価を含めた報告がなされている。防災科学技術研究所では、井口ら(2010)により規模の大きな地すべりを対象に空中写真による判読を行って図化し、既報の地すべり地形分布図(防災科学技術センター 1982)との比較や従来の地震による地すべりとの比較を報告している。各学会による現地調査では、砂防学会が独自の調査団(井良沢ら 2008)を派遣したほか、土木学会・地盤工学会・日本地震工学会・日本地すべり学会の4学会は合同緊急調査団を派遣し、緊急報告(例えば、土木学会 2008)を行っている。また、これらの学会等による報告を、地盤工学会調査委員会が総括し、2010年6月に、「平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震災害調査報告書」をまとめている。その内容は、地震動についての報告・解析が主体であるが、土砂災害については、荒砥沢地すべりを主に、流域ごとに崩壊・地すべりの概況について報告している。このほか被災地域近傍の大学の研究者による調査報告(例えば、松垣ら 2009)がなされている。

この一方で、山間部の道路・河道等の被害が甚大であったことから、現地踏査が不可欠な土砂災害調査において現地へのアクセスが長期にわたり制約されたことに加えて、被災地域の住民感情への配慮と、窃盗被害の防止などの保安面を重視する地元自治体の姿勢から、地元住民、市町村、県や国の出先機関以外の人員による被災地域への立ち入りを長期間にわたり厳しく制限した結果、災害直後以降の報告はごく限られている。これは、地震そのものに関する報告の多様さと対照的である。緊急調査以降の報告は、山地における地すべり・崩壊災害の対策工事实施の主体となった東北森林管理局・自治体とその調査事業を担ったコンサルタント(例えば、大野ら 2010, 黒川ら 2010)によるものが主である。これらを除くと、現地調査が不要である衛星を用いた崩壊地抽出に関する報告(石出ら 2010, 翠川ら 2010)等、ごく限られたものとなっている。

森林総合研究所は、東北森林管理局の協力もあって地震直後から継続的な現地調査が可能であったことから、交付金によるプロジェクト研究として採択し、本災害についての調査を2008、2009年の2年間にわたり行ってきた。本稿では、まず、平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震による崩壊・地すべりを主とする土砂災害の概要を述べる。次に、独自に空中写真・衛星画像から崩壊地の図化を行い、これを元に崩壊発生

とその関係要因との関連を明らかにする。

今回の地震は、東北内陸部火山地帯でこれまで危険性が指摘されなかった、断層活動に起因するものである。潜在的な活断層と火山堆積物を主とする地質の組み合わせは、東北地方をはじめ国内に多く存在する。このような地質条件下では、同様の災害が発生する可能性があることから、本災害を集約して分析し、その特徴を記録することは、意義のあることと考える。

なお、本稿では、崩壊、地すべり性崩壊等々の土砂災害について述べるが、これらの土砂災害の英名はlandslideで同一である。今回の土砂災害は、ほとんどが急速な運動を呈しており、崩壊、及び、地すべり性崩壊に分類されるため、本稿では、固有名詞として地すべり・土石流を付している箇所を除き、「崩壊」とする。更に、土壌層下面付近にすべり面のある規模の小さな崩壊を「小規模崩壊」、基岩中にすべり面のある比較的規模の大きな崩壊を「大規模崩壊」とする。

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(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、課題代表者:三森利昭)」によって行った。

2. 本地震災害の概要

1. 震源域周辺における既往の地震災害

東北地方では、日本海溝付近で巨大地震が幾度か発生し、津波や家屋の倒壊により激甚な災害をもたらしている。2011年3月11日に発生した東日本地震はこの端的な例である。これは、太平洋プレートがユーラシアプレートへの沈み込みに伴う海溝型の巨大地震であり、地震の規模やメカニズムが本稿で取り上げる2008年岩手・宮城内陸地震と大きく異なる。このような海溝型巨大地震の他に、東北地方の内陸部においては、これまでもたびたび直下型の地震が発生し、被害を与えている。東北脊梁山地近傍で発生した主な地震をTable 1に集約する。2008年岩手・宮城内陸地震は、このような直下型の地震である。

東北地方の秋田県・岩手県・宮城県にまたがる脊梁山地付近を震源域とし、マグニチュード7.0を超える地震には、1896年8月31日に発生した秋田・岩手県境真昼山付近(北緯39.5度、東経140.7度)を震源とする陸羽地震(マグニチュード7.2)がある。この陸羽地震は、2008年岩手・宮城内陸地震とほぼ同規模の地震である。陸羽地震では、死者209名、負傷者779名、住家全壊5,792戸、半壊3,045戸、一部損壊27,430戸と、今回の地震を遙かに上回る被害を生じている(水田・鏡味 2008, 2009)。陸羽地震については、山地崩壊の箇所数についての調査記録があり、これによれば9,899箇所も発生している(宇佐美 2003)。陸羽地震は19世紀末の災害であることから、これらの調査記録は、当然のこととして、航空写真の実用化以前の調査方法

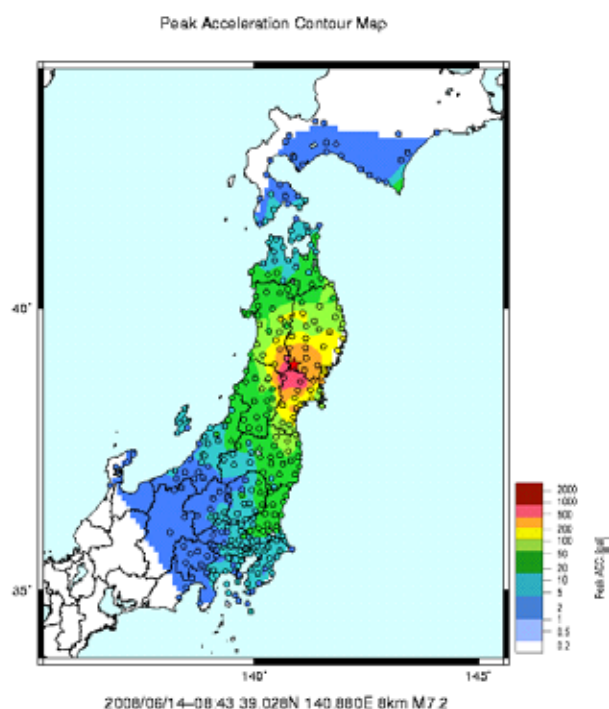


Fig. 2. 2008 岩手・宮城内陸地震における最大加速度分布。独立行政法人防災科学技術研究所強震ネットワーク (K-NET) から転載。
Maximum accelerations of 2008 Iwate Miyagi Inland earthquake. The map is reprinted from Kyoshin Network (K-NET) of National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.

による記録であり、おそらく現地踏査により丹念に調査した結果と思われる。これにより約 1 万カ所近い膨大な数の崩壊が記録されているという事実は、驚くべきことである。明治という時代の技術者の意気込みが表れており、現代においても特筆すべきことと考える。

陸羽地震以外では、1962 年 4 月 30 日宮城県登米郡（現：登米市）迫町付近（北緯 38 度 44.4 分、東経 141 度 8.3 分）を震源とする、宮城県北部地震（マグニチュード 6.5）があり、死者 3 名、倒壊家屋 369 戸の被害を出した。このほか、1996 年 8 月 11 日秋田県内陸南部（北緯 38 度 54.5 分、東経 140 度 38.2 分、深さ 7 km）を震源とする秋田県内陸南部地震（マグニチュード 5.9）の地震が発生し、負傷者 16 名、住家半壊 28 戸、一部損壊 185 戸の被害を出している（宇佐美 2003）。また、2003 年 7 月 26 日には宮城県北部（北緯 38 度 24.1 分、東経 141 度 10.4 分、震源の深さ 12 km）を震源とするマグニチュード 6.5 の地震が発生した。この地震では、前震（マグニチュード 5.6）、余震（マグニチュード 5.5）も同日に発生しており（前震 0:13、余震 16:56）、3 回の地震を合わせて、負傷者 675 名、住家全壊 1,276 戸、半壊 3,809 戸、一部損壊 10,975 戸もの被害を生じている（仙台管区気象台 2003）。秋田県、岩手県、宮城県にかけての脊梁山地付近では、以上の



Photo 1. 市野々原地区地すべりの捷水路の河道掘削面に現れた古い断層。
An old fault observed on the bank of cut-off channel at the foot of Ichinonohara landslide.

ように、たびたび直下型地震に見舞われており、その被害も大きい。

2. 2008 年岩手・宮城内陸地震の概要

気象庁（2008）発表による各市町村の最大震度を Table 2 に、また、防災科学技術研究所（2008）による最大加速度分布を Fig. 2 に、それぞれ示す。これらによれば、岩手、宮城、秋田の三県にまたがる広い地域で、震度 5 強より強い揺れが観測されている。震源の深さは約 8 km、規模はマグニチュード 7.2 の比較的浅い断層タイプの地震で、防災科学技術研究所（2008）による解析では、「西北西－東南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型の震源メカニズム」によるとしている。この地震を発生させた断層は、奥羽山脈の東麓を北北東から南南西に走る未確認の断層とされ、断層の西側がせり上がる逆断層（衝上断層）である。このため上盤側の山間部で揺れと変異が大きく、崩壊の多発をもたらした。この地震をもたらした断層（7 km 一細倉構造帯北部の未記載の活断層（佐藤ら 2008））の地表トレースは不明のままであるが、震源付近には古い断層跡（Photo 1）も見られ、古くからの活動がうかがわれる。

Table 1. 東北脊梁山地近傍で発生した主な地震とその被害
Earthquakes in Tohoku mountain region.

年 / 月 / 日 year/date	地震名 Earthquake	震源位置 Epicenter			地震強度 Magnitude	人的被害 Human loss		家屋被害 Damaged house			山地崩壊 Landslide
		北緯 Latitude	東経 Longitude	地名 Place		死者 Dead	負傷者 Injured	全壊 Complete	半壊 Half	一部 Partial	
1896/8/31	陸羽地震 ¹⁾ Rikuu ¹⁾	39.5°	140.7°	秋田・岩手県境真昼山付近 Mt. Mahiru	7.2	209	779	5,792	3,045	27,430	9,899
1962/4/30	宮城県北部地震 ¹⁾ Miyagi ken hokubu ¹⁾	38° 44.4'	141° 8.3'	宮城県登米市迫町付近 Tome city	6.5	3		369			
1996/8/11	秋田県内陸南部地震 ¹⁾ Akita ken nairiku nanbu ¹⁾	38° 54.5'	140° 38.2'	秋田県湯沢市虎毛山付近 Mt. Torageyama	5.9		16		28	185	
2003/7/26	宮城県北部地震 ²⁾ Miyagi ken hokubu ²⁾	38° 24.1'	141° 10.4'	宮城県東松島市鳴瀬町付近 Matsushima city	6.5		675	1,276	3,809	10,975	
2008/6/14	岩手・宮城内陸地震 ³⁾ Iwate-Miyagi nairiku ³⁾	39° 01.7'	140° 52.8'	岩手県奥州市祭時山付近 Mt. Maturube	7.2	23	426	30	146	2,521	

1): 宇佐美 (2003), 2): 仙台管区気象台 (2003), 3): 内閣府 (2011)

1): Usami (2003), 2): Sendai District Meteorology Observatory (2003), 3): Cabinet office, Government of Japan (2011)

Table 2. 各市町村の最大震度 (震度5強以上)
Maximum seismic intensity (More than 5-plus)

最大震度 Max. intensity	県 Prefecture	市町村 Municipalities
震度6強 6-plus	岩手県 Iwate	奥州市 Oshu
	宮城県 Miyagi	栗原市 Kurihara
震度6弱 6-minus	宮城県 Miyagi	大崎市 Osaki
震度5強 5-plus	岩手県 Iwate	北上市、一関市、金ヶ崎町、平泉町 Kitakami, Ichinoseki, Kanegasaki, Horaizumi
	宮城県 Miyagi	加美町、涌谷町、登米市、美里町、名取市、仙台市、利府町 Kami, Wakuya, Tome, Misato, Natori, Sendai, Rifu
	秋田県 Akita	湯沢市、東成瀬村 Yuzawa, Higashinaruse

気象庁 (2008)

Japan Meteorological Agency (2008)

3. 被害の概要

今回の地震による被害を Table 3 に示す。本災害での死者・行方不明者の合計は 23 名であったが、そのうち、21 名が土砂災害による。山地荒廃については、東北森林管理局 (2008) が Table 4 に示すように流域ごとに集約を行っている。著者らの崩壊地判別は地震前後の航空写真の差に基づいており、微少な裸地もなるべく含めて記録したため、Table 4 とは異なることに留意されたい。Table 4 によれば、磐井川流域、一迫川流域、二迫川流域、三迫川流域で 3 % を超える荒廃面積率であった。特に、産女川上流 (磐井川流域)、一迫川上流域、三迫川本流 (御沢・冷沢・耕英地区) の 3 流域では、5 % を超える荒廃率を示し、被害がこの 3 流域で特に大きかったことを示している。本項では、北から、産女川上流域、二迫川・三迫川流域、一迫川流域に区分し、各区域での土砂災害について記す。

1) 産女川上流域 (磐井川流域)

震源に近い産女川上流 (磐井川流域) では、市野々原地区で大規模な地すべりが発生し、崩土が河道を閉塞したほか (Photo 2)、国道 342 号線に架かる祭時 (まつるべ) 大橋が落橋し同国道が不通となるなどの被害が発生した。この付近には新生代第三紀の細倉層に区分される安山岩・凝灰岩が分布し、宮城県側の一迫川・二迫川・三迫川流域に分布する堆積岩よりも地質年代が古い。航空写真による判読では、栗駒山南部と比べると、崩壊は小規模で数も少ないように判断さ

れた。しかし、付近の現地踏査 (村上ら 2009, 2010) によれば、地盤の移動量が少なく崩壊が途中で停止している箇所、尾根付近や山体に亀裂が見られる斜面も多く見いだされ、崩壊等の被害には至らなかったが、かなりの箇所で山体が地震により破壊されていると考えてよい。本流域では、これらのうち特に被害の大きかった市野々原地区の地すべりを取り上げる。



Photo 2. 市野々原地すべり (朝日航洋 (株) 撮影)。右側の最大のブロックが閉塞を発生させた。
Ichinonohara landslide. The right block of the landslide dam up the river. The photo was taken by Aero Asahi Corporation.

Table 3. 人的・家屋被害の状況
Numbers of casualties and damaged houses.

都道府県 Prefecture	人的被害 (人) Casualties (number)				住家被害 (棟) Damaged houses (number)			
	死者 Fatalities	行方不明 Missing	負傷者 Injured		全壊 Complete	半壊 Half	一部 Partial	火災 Fire
			重傷 Serious	軽傷 Slightly				
岩手県 Iwate	2		9	28	2	4	778	2
宮城県 Miyagi	14	4	54	311	28	141	1,733	1
秋田県 Akita		2	5	16		1	9	1
山形県 Yamagata			1	1			1	
福島県 Hukushima	1		1					
計 Total	17	6	70	356	30	146	2,521	4

内閣府 (2011)
Cabinet office, Government of Japan (2011)

Table 4. 山地荒廃の概要
Devastation in mountainous region.

流域区分 Catchment and landslide classification	流域面積 (ha) Catchment area	山腹荒廃状況 Hillside devastation		溪流荒廃状況 Stream devastation		荒廃現況計 Total devastation	
		崩壊個数 Landslide	崩壊面積 (ha) Landslide Area	面積率 (%) Percentage	荒廃面積 (ha) Devastated Area	面積率 (%) Percentage	面積計 (ha) Total Area
一迫川上流域 (一迫川・伊豆根沢合流点より上流) Upstream of Ichihazama river	6,156	751	288.1	4.7	63.4	1.0	351.5
二迫川上流域 (荒砥沢ダムより上流) Upstream of Nihazama river	1,984	111	59.2	3.0	15.6	0.8	74.8
三迫川上流域 (放森より上流) Upstream of Sanhazama river	2,295	137	71.0	3.1	38.0	1.7	109.0
三迫川本流 (御沢・冷沢・耕英) Main stream of Sanhazama river	1,929	62	67.8	3.5	31.9	1.7	99.7
鹿女川上流 (磐井川) Upstream of Ubusume river	995	36	33.1	3.5	18.7	2.0	51.8
磐井川上流域 (磐井川・鬼越川合流点より上流) Upstream of Iwai stream	5,971	644	177.2	3.0	19.1	0.3	196.3
前川流域 (胆沢川) Mae river	5,512	410	77.9	1.4	10.5	0.2	88.4
尿前沢流域 (胆沢川) Shitomae river	3,274	167	61.4	1.9	10.4	0.3	71.8
流域計 Total of catchments		2,318	835.7	3.0	208.0	0.7	1,043.3
荒砥沢地すべり Aratozawa landslide	—	1	98.0	—	—	—	—
市野々原地すべり Ichinohara Landslide	—	3	13.0	—	—	—	—
総計 Total		2,322	947.7	—	—	—	—

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より転載
Reprinted from 'Tohoku regional forest office (2008) Disaster report of Iwate-Miyagi Nairiku earthquake.'

(1) 市野々原 (地すべり)

震源に近い磐井川流域のうち市野々原地区では、大規模な地すべりが発生し河道を閉塞した (東北森林管理局 2008)。この地すべりによる移動土砂量は 384 万 m^3 に達し、このうち、河道を閉塞した部分の土砂量は 131 万 m^3 に上る。閉塞土砂の後背では、崩落の直後から湛水をはじめ、その後越流・決壊が危惧されたため、国土交通省により河道開削が実施された。本地すべりは河道沿いに並ぶ 3 つのブロックから成る。このうち最も河道上流に位置するブロックが大きく、これが主に河道を閉塞した。市野々原地区と同様に崩落土砂による河道閉塞は、岩手県・宮城県の各流域で発生しており、計 15 箇所の河道閉塞が報告されている (東北森林管理局 2008)。中越地震時においても同様に河道閉塞が多発したことや、2008 年四川省で発生した汶川地震において河道閉塞が生じた例なども含め、過去の地震災害例も考慮すると、山間地での地震においては、崩壊土砂による河道閉塞を必然の現象としてとらえる必要がある。越流あるいは浸透性破壊による土砂ダムの決壊という二次的な災害を防止するため、迅速な対応が必要である。

2) 二迫川・三迫川流域

二迫川流域では、荒砥沢上流の支流であるヒアシクラ沢において大規模な地すべりが発生し荒砥沢のダム湖に一部の土砂が流入するなど、同流域では多くの崩壊・地すべりが発生した。また、同流域の北に位置する三迫川流域においても、耕英地区の冷沢・御沢、下流の行者の滝付近でも大規模な崩壊・地すべりが発生するとともに、同上流ドゾウ沢で土石流が発生して駒の湯温泉を直撃し大きな被害となった。ここでは代表的な土砂災害として、荒砥沢地すべり、耕英地区冷沢の崩壊、ドゾウ沢土石流を取り上げる。

(1) 荒砥沢地すべり

荒砥沢ダム湖の左岸上流部ヒアシクラ沢において、幅:900 m、長さ:1300 m、深さ:120 m、最大移動距離:300 m、面積:98 ha、すべり面傾斜:ほぼ水平 (1 ~ 2 度、冠頭部付近では僅かに逆勾配)、の大規模地すべりが発生した (Photo 3)。滑落崖の高さは 150 m にも及び、広大な荒廃地が出現した。地すべり本体は、対岸の尾根にあたり停止しており、幸いにもダム湖への大規模な突入は起こらなかった。この地すべりは、発生時に目撃者がおり、その話によれば、地震から 20 分ほどかけてゆっくりと、手前から徐々に斜面奥に向かって流動化したという証言が得られている。

荒砥沢地すべりは、本地震で発生した地すべりの中では最も規模が大きく、社会の関心も高いことから、すでに多くの報告例がある。たとえば日本地すべり学会では、2010 年に特集として「大規模地すべりの機構」



Photo 3. 荒砥沢地すべりと荒砥沢ダム。崩土のすべり方向は対岸の尾根に向かっている。これにより、ダム湖への突入・越流という最悪の事態は避けられた。
Aratozawa landslide and Aratozawa dam. A worst situation of debris thrust into the dam lake was avoided, because the landslide debris drifted toward the ridge of opposite bank.

を取り上げ、森屋ら (2010)、大野ら (2010) がそれぞれ荒砥沢地すべりの発生機構について報告を行っている。森屋 (2010) らは、荒砥沢地すべりが数万年前に活動を始めた地すべりの再活動であり、移動機構に関わる地形地質の特徴として、斜面末端部の沢の発達、斜面上部にキャップロック状の火山性堆積物が覆っていること、すべり面が層理の発達する砂岩・シルト質泥岩に相当すること、流れ盤の岩盤地すべりの形状をなしていること、地すべり頭部が尾根状地形に位置していること、の 5 点をあげている。大野ら (2010) は、動的応答解析等による数値計算を行い、300 m の移動量を生じさせるには 100 m 近い間隙水圧が必要であると報告している。また、山崎ら (2012) は冠頭部の重力性クリープが進行していることを報告し、継続的な監視が必要としている。

当地すべり地の堆積構造は、下部に火砕流起源の軽石質凝灰岩を主とする湖成の堆積岩 (小野松沢層) が存在し、上部は溶結凝灰岩 (北川溶結凝灰岩) が厚く堆積する、いわゆるキャップロック構造 (三森ら 2009, 2010b) となっている (Photo 4)。当地すべりは栗駒山南麓カルデラ (大竹 2000) の外輪山付近に位置しており、カルデラの存在が大規模地すべりの要因であるとの指摘 (布原ら 2008) もされている。また、東北森林管理局 (2008) のボーリングに基づく調査結果によれば、当該地すべりのすべり面はほぼ水平であり、すべりはいわゆる重力移動によるものとは考えられず、液状化による側方流動 (三森ら 2009, 2010a, b) あるいはスプレッド (Varnes 1978) 等他の要因を考えなければ、移動を生起させたメカニズムの合理的説明が難しい。地盤工学会 2008 年岩手・宮城内陸地震災



Photo 4. 荒砥沢地すべりの滑落崖。上部の溶結凝灰岩と下部の湖成層との境界がはっきり見える。ボーリングの結果、ほぼ水平なすべり面が湖成層中に形成されていることが判明した。溶結凝灰岩がキャップロックとして強度の小さな湖成堆積物に、地震の間繰り返し上載加重を与えた結果、スプレッドタイプの地すべりを発生させた。Aratozawa landslide cliff. A boundary between Upper welded tuff and lower lacustrine sediment is quite obvious. Horizontal slip plane exist in the lacustrine sediment layer with test borings. The welded tuff with acting as cap rock cyclically had loaded to lacustrine during the earthquake, and led a spread type of landslide.

害調査委員会 (2010) による報告においても、発生メカニズムにおいて粘性土の動的強度特性では説明できないとし、今後キャップロックによる動的载荷の影響解明の重要性を指摘している。

ここで、側方流動とは、たとえば、地震時の埋め立て地で地盤の液化に伴い土砂が側方に流動化するような現象を指し、均質な砂またはシルト層が飽和や過剰間隙水圧の発生により急激な変動を示す現象に対する呼称である。Varnes (1978) は、地すべりの分類において、スプレッドを一つのタイプとして取り上げた。さらに、スプレッドを移動速度により2つに分類している。一つ目は、分離した岩石が明瞭なすべり面を形成することなく広がるタイプであり、速度もきわめて遅いとしている。二つ目は、凝集性の粘性土が液化化あるいは塑性流動するタイプで、速度の速いタイプとしている。このように、側方流動よりスプレッドの方が広い意味を持つ。今回、荒砥沢、耕英地区で発生した現象は、Varnes によるスプレッドの定義のうち後者の特徴と一致している。後者のスプレッドは、現象として側方流動と同一であるとし、以降本稿ではこのようなタイプの崩壊を「側方流動 (スプレッド)」とする。

このような大規模な側方流動 (スプレッド) が地震時に山地においても発生しうることを、今回の荒砥沢の災害を契機に十分考慮する必要があると著者らは考える。ダム湖周囲に側方流動 (スプレッド) が発生した場合、その移動土塊・岩塊がダム湖に突入し、甚大な被害をもたらす可能性がある。なお、本災害における、カルデラ、キャップロック構造の影響、および側



Photo 5. 耕英地区冷沢の荒廃状況 (朝日航洋 (株) 撮影)。上流 (写真下) から下流 (写真上) を撮影している。流域全体が流動化している様子がわかる。特に、写真上部 (下流側) では右岸上部の平坦地が溪流側 (斜面下) に側方に移動し、平坦部には樹木が残っている。Photo 7 はこの付近の地上で撮影している。Devastation of Hiyasawa valley in Koei area. The Photo was taken from the upstream by Aero Asahi Corporation. The whole valley of Hiyasawa fluidized by the earthquake. The spreading toward to the stream emerged at the upper part which is the downstream of Hiyasawa valley. Rotated trees remained on the flat ridge of right bank.

方流動 (スプレッド) については、別項で詳述する。

(2) 耕英地区 (冷沢)

荒砥沢地すべりの北側に位置する耕英地区の中心部を流れる冷沢においても、大規模な崩壊が発生した。冷沢流域の地質は、荒砥沢地すべりと同様に、火砕流起源の軽石質凝灰岩を主とする湖成の堆積岩であり、やはり上部に溶結凝灰岩が堆積するキャップロック構造である。この上部の溶結凝灰岩の厚さは、荒砥沢に比べるとかなり薄い。この地区における崩壊は沢の側方上部の平坦ブロックが横にずれ、溪流の側岸をすべり落ちるような形態となっている (Photo 5)。崩壊は、ほぼ沢全域に及び、大きな面積を占めている。Photo 6 に見られるように、キャップロックである溶結凝灰岩の直下の軽石層をすべり面として側方に移動してお

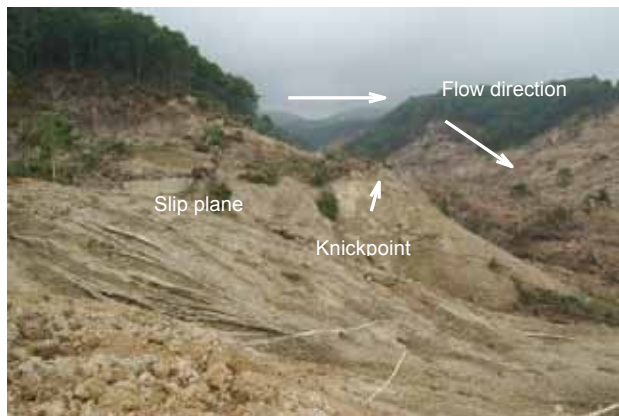


Photo 6. 耕英地区冷沢の荒廃状況。側方流動をうかがわせる崩壊形状が見て取れる。湖成層中に傾斜の変化点があるのわかる。変化点が側方流動のすべり面と思われる。The upstream devastation of Hiyasawa in Koei area. Whole slope along the stream fluidized. A Knickpoint on the slope is obvious in the lacustrine sediment layer. The point coincides with the position of slip plane.



Photo 7. 耕英地区冷沢における斜面上部の荒廃状況。樹木を乗せたまま小ブロックで移動している。樹木は後方に回転している。The devastation on uphill of Hiyasawa in Koei area. Longitudinally layered small blocks with trees moved and slanted backward.



Photo 8. ドゾウ沢土石流。発生点には残雪が見られ、崩壊発生箇所が湿潤であったことがわかる。崩壊は一気に土石流化した様であり、側岸を侵食しながら流下している。Dozouzawa debris flow. The outbreak point covered with snow beds indicates a wet ground condition at the earthquake. A landslide fluidized immediately. The debris flowed downstream at high velocity with eroding the stream bank.



Photo 9. ドゾウ沢土石流により被災した駒の湯温泉（中央）と対岸の地すべり（中央手前）。対岸の地すべりが河道を閉塞したところに、右上からの土石流が旅館（中央の裸地）を直撃した。Komanoyu hot spring inn at the center of the photo was hit directly by the Dozouzawa debris flow shown in Photo 8. The landslide of the opposite bank clogged the stream, before the debris flowed from the right hand side.

り、水平に近い堆積構造を反映し、上部が横方向に移動している様子がわかる。崩壊土砂の移動量はすべり面の傾斜が緩いことを反映して短く、崩壊地冠頭部では、Photo 7 に示すように、地表部の樹木を乗せたままブロック状に沢方向に移動している。荒砥沢地すべりと規模は大きく異なるが、同様に地震時の液化化による側方流動（スプレッド）をうかがわせる形態を示している。後述する試錐孔を用いた試験結果からは、当地区での液化化による側方流動（スプレッド）を大いに支持する。なお、耕英地区下流近傍では、日陰森において中規模の崩壊が発生しており、岡田ら（2012）は、本崩壊において崩土の一部がアースフロー化し流下したことを報告している。

(3) ドゾウ沢（土石流）

東栗駒山山頂付近の東側斜面において発生した崩壊（Photo 8）が土石流化し、ドゾウ沢に沿って約 4 km 流下して、駒の湯温泉を直撃した。駒の湯温泉の関係者からは、地震から 6～9 分で土石流が到達したとの証言が得られており、地震時に発生した崩壊が一気に土石流化したものと思われる。この土石流により 7 名の方が亡くなられた。駒の湯温泉付近は古い地すべり地形を呈しており、これまでの地すべり活動による崩土で、すでに沢は狭窄していた。これに加え、対岸（左岸側）の斜面が地震時に崩壊したことから、流下して来た土石流の進路が妨げられ右岸側にあった駒の湯温泉の旅館・施設を直撃した（Photo 9）。

この土石流を発生させた崩壊の発生箇所付近には雪田が広がっており、地震発生時に崩壊土層はかなり湿潤であったことが推察される。このドゾウ沢で発生した土石流のほかに、高標高における崩壊は笹森の南東斜面等に見られるが、長距離を流下するような土石流となっていない。今回の災害で、崩土が高速で長距離を流動した土石流はドゾウ沢のみである。これは、次の二つの要因によると考えている。

第一に、素因である次に述べる地形・地質的要因である。火山の山頂付近は勾配が急であるため、ひとたび崩壊し崩土が沢に流入した場合、土石流化しやすい特徴がある。しかし、栗駒山頂周辺の溪流源頭部付近の地質は、更新世から完新世にかけての新しい熔岩（産業技術総合研究所地質調査総合センター 2004）で比較的堅固である。このことから、栗駒山頂部付近に源流を持つ沢はあまりみられず、ドゾウ沢以外では、侵食や源頭部崩壊による開析をあまり受けていないという地形的特徴がある。大丸ら（2010）は、ドゾウ沢の源頭部の崩壊が、以前に発生した崩壊地の拡大崩壊であると指摘している。このため、急傾斜の山頂部付近に開析した源頭部を有するドゾウ沢でのみ崩壊が発生したと言える。

第二に、誘因である次に述べる崩壊発生源付近の水文的要因である。野口ら（2010, 2012）は、2008年の消雪が例年より早く、更に、5月20日以降地震当日まで無降雨の期間が継続しており、栗駒山頂周辺の雪田を除くと地震発生時には比較的乾いた土湿状態にあったと報告している。さらに、安田ら（2012）は、災害の発生した地域では、これまでも近隣の地域より降水量が多い特徴を指摘している。特に、栗駒山周辺の観測点において2008年冬期の積雪量が多かったことを報告し、栗駒山頂周辺の1000 m以上の高標高において地震発生時において湿潤であったと結論した。また、大丸ら（2010）は、地震時の発生点付近の雪田で2008年4月以降4000 mmの融雪水量があったと推定し、地震発生時にはかなり土層が湿潤で、豊富な水量が溪流に供給されていた可能性を報告している。これらの報告は、地震発生時において栗駒山の雪田付近では、地震発生前では無降雨期間が長期であったにもかかわらず、融雪により土層がかなり湿潤であった状況が推察される。

以上から、崩壊発生箇所の素因である地質・地形的要因、誘因である水文的要因の二つの要因により、ドゾウ沢のみで崩土が長距離流動したことが理解される。

3) 一迫川流域

震源から比較的離れた花山湖上流の一迫川流域では、温湯温泉付近より上流域で、崩壊・落石が多発し

た。この上流域一帯は、荒砥沢と同じ「栗駒山南麓カルデラ」内にあり、下部の湖成の軽石質凝灰岩（小野松沢層）の上を節理の発達した溶結凝灰岩・安山岩が覆う、キャップロック構造を呈している。温湯温泉から上流に行くに従って沢の下刻が進み、谷底から谷壁上部までの比高が徐々に高くなる。これに合わせて、落石、トッピングからキャップロックすべりへと土砂移動の形態が変化していく。ここでは、温湯温泉付近と、原小屋沢分岐・湯ノ倉温泉上流について取り上げる。

(1) 温湯温泉付近

一迫川流域の比較的下流に位置する温湯温泉付近での被害は、トッピングが主体であった（Photo 10）。トッピングとは、岩盤斜面破壊の一種で、岩柱や岩塊の上部が回転前掲し倒れる現象をいう。温湯温泉付近は、一迫川が栗駒南麓斜面を下刻した溪谷の下流部にあたり、両岸に切り立った崖状の斜面が見られる最下流にあたる。上流部と比較すると、溪流による下刻はあまり発達しておらず、側壁についても溪床からの比高が低い。側壁の上位にある比較的堅い溶結凝灰岩の厚さに比し、下位にある軟質岩の露頭の厚さが上流域より薄い。トッピングによる崩壊は、溶結凝灰岩が節理を境界として崩れ落ちる様な形態である。温湯温泉からすぐ上流の、白糸の滝に向かう歩道の吊り橋付近では、2名の方がトッピングによる崩落により亡くなられた。溪床付近には古い落石を示す巨岩の堆積がみられ、以前から頻繁にトッピングによる崩落が発生していたものと思われる。

現地を踏査したところ、この付近では下部の軟質岩中に崩壊には至らない程度のすべりが発生している箇所もあり、すべり面の傾斜は沢に向かって上向きと、通常のすべりとは異なる（Photo 11）。このほかにも、河床付近で軟質岩に膨らみや脚部の座屈褶曲が観察された。沢部が見かけ上背斜であることや、尾根部付近には特徴的な線状凹地が見出された（大丸ら 2011）。これらは、キャップロックによるバレーパルジング（谷底の隆起による褶曲構造）特有の特徴であり、地震以前より重力による深部変形を受け軟質岩がはらみ出していたものと考えられる（大丸ら 2010）。

(2) 原小屋沢分岐・湯ノ倉温泉上流

原小屋沢分岐・湯ノ倉温泉付近では中・小規模の崩壊が多発した（Photo 12）。湯ノ倉温泉直下では崩壊土砂によって河道が閉塞し、同温泉が水没する被害を生じた（Photo 13）。これよりさらに上流に向かうに従って、徐々に開析台地と溪床との比高が高くなって行く。湯浜峠対岸付近の急斜面では、一迫川流域では最も大規模な崩壊が発生し、河道を閉塞した（Photo 14）。Photo 14によれば、この付近での溶結凝灰岩の堆積厚はかなり厚く、滑落崖上に水平な堆積構造が見て取れ



Photo 10. 湯湯付付近に見られるトップリング（北川溶結凝灰岩中の節理の崩落による崩壊）。
Toppling failures occurred along Ichihazama river, because perpendicular joints are well developed in Kitagawa welded tuff. The photo was taken near Nuruyu hot spring.



Photo 11. 溪岸の軟質岩（小野松沢層）中に見られるすべり面。傾斜角は水平面より上向きである。すべり面は侵食を受けていないことから地震時に生じたと考えられる。
Slip plane at the left bank of Ichihazama river appeared in the Onomatsuzawa stratum of lacustrine sediment. The dip of the plane rises toward to the stream. The movement occurred at the earthquake, because the slip plane is fresh, and not eroded.



Photo 12. 一迫川支流原小屋沢の様子。無数の小規模の崩壊が発生している。
Devastation in the catchment of Harakoya tributary of Ichihazama river. Many landslide occurred along the stream.



Photo 14. 湯浜峠対岸付近に発生した大規模崩壊（一迫川本流）。この崩壊によりやはり河道閉塞が発生した。溶結凝灰岩の層厚は上流の栗駒山に向かうにつれて厚くなっている。
A large landslide occurred at the left bank of Ichihazama river near the Yunohama pass. The landslide debris dammed up the Ichihazama river. The welded tuff becomes thicker in accordance with coming upstream to Mt. Kurikoma.



Photo 13. 湯ノ倉温泉付近の湛水状況。奥に見える崩壊により湛水し、温泉の建物が流出している。
A landslide dam lake at Yunokura hot spring. A hot spring inn was carried away into the dam lake.

る。

浅野 (2010) は、湯ノ倉温泉上流に位置する相野沢分岐地点で、地震時の地盤応答解析を行った結果、従来の地震時の地盤応答解析と同様に、山稜の尾根部付近で応答加速度の高い箇所が見られたとしている。地表に近い上層を、弱溶結と強溶結の二層に区分したモデルを用いた解析結果からは、弱溶結（溶結凝灰岩）と強溶結（溶岩）の境界付近で地震加速度の増幅結果が得られたことを報告している。この報告は、キャップロック崩壊が卓越していた現地の状況と一致する。

4. 崩壊の特徴と地震断層・地質・地形・植生の影響

著者らは、今回の崩壊の特徴と、崩壊発生への地質・地形・植生の影響を明らかにすることを目的として、

航空写真と衛星画像を用いて崩壊地を抽出した。使用した航空写真は、災害直後である 2008 年 6 月 15 日から 16 日にかけて (株) アジア航測が撮影した航空写真、衛星画像は、2008 年 7 月 3 日に ALOS により撮影された可視光画像を用いた。これらの画像を用い、10,751 箇所、13.576 km² の崩壊地を目視によって抽出し、GIS 上に記載した。崩壊発生に影響を与える因子のうち、地質図は産業技術総合研究所 (1986) 作成の「栗駒地熱地域地質図 (10 万分の 1)」、地形図は北海道地図 (株) 作成の「10 m メッシュ標高 DEM データ」、植生図は環境省自然環境局生物多様性センター (2004) による「自然環境保全基礎調査による植生図」を、それぞれ使用して GIS のレイヤーを作成し、解析を行った。以下にその結果を示す。

1) 地震断層と崩壊の位置

Fig. 3 に、東北大学大学院理学研究科 2008 年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ (2008) が提示した、キネマティック GPS データによる地震時断層モデルと崩壊地の重ね合わせを示す。Fig. 3 に示すように、断層はほぼ脊梁山脈と平行している。震源断層の西側は山地が広く分布しており、衝上断層の下盤側である東側が緩傾斜であるのと対照的である。この地域は、鮮新世中期より隆起をはじめ、過去 12 万年の間に 70 m を超える隆起量を示している (小池ら 2005)。この断層線は、ほぼ 50 m 隆起量の等値線と一致しており、第四紀以降の逆断層活動による隆起との関連性を強く示唆する。Fig. 3 によれば、崩壊地は、衝上断層の上盤側である地震断層の西側に大多数が存在し、断層からほぼ 15 km 以内で発生していることが解る。一般に、逆断層による地震の場合、上盤側の地震動は下盤側のそれより卓越する。これを上盤効果と呼ぶ。上盤側が山地で、急斜面が多いという地形的な特徴と併せ、より大きな地震動が上盤側に多数の崩壊を発生させたと言える。

2) 地質・地形の影響

(1) 付近の地質・地形の特徴

今回の被災地域は、東北脊梁中部の栗駒・鬼首火山地域の東端に位置している。被災地域には、主に、栗駒山生起の溶岩、火山灰による堆積層が層状に厚く分布しており、また南部には、巖美、栗駒南麓、花山、鬼首の各カルデラが分布し、周囲には急崖が分布している。

近年では、地質・年代データを元に、後期中新世におけるカルデラ形成期以降の東北脊梁山地の火山が等間隔の分布ではなく、7つのクラスターを作って分布していることが明らかにされた (天野・佐藤 1989, 伊藤ら 1989)。この 7つとは、北から、恐山火山地域、

八甲田・十和田火山地域、仙岩火山地域、栗駒・鬼首火山地域、蔵王・舟形火山地域、磐梯・安達太良火山地域、会津火山地域である。それぞれのクラスターは、数個から数十個の成層火山と 0～数個の大カルデラ火山よりなる。これらのカルデラを充填する堆積物の一般的層序は、下位から、厚い凝灰岩、土石流あるいは岩屑なだれ堆積物、湖成層となっている。

被災地域の中部から南側は、栗駒・鬼首火山地域 (クラスター) にほぼ含まれており、ここに見られる緩詰め凝灰岩、岩屑なだれ堆積物、湖成層は、カルデラ内の堆積物である。湖成層中には植物化石が含まれることもあり、荒砥沢地すべり土塊中には数 cm の腐植の狭層が見られた。以上のように、被災地域には、地質構造により特徴付けられる地形が発達している。

(2) 地質別の崩壊発生状況

地質別の崩壊発生状況を表した Fig. 4 に示すとおり、「北川溶結凝灰岩及び相当層」と「湖成層」での崩壊が 3 % 近くに達し、両地質での崩壊が突出して多い。規模の大きな崩壊が多かった南部の一迫川流域から三迫川流域にかけて、地質と崩壊を重ね合わせた Fig. 5 では、両層をまたぐ境界付近で崩壊が多発している。両層は第三紀から第四紀にかけての堆積層で、特に「湖成層」は固結度が低く、ゆるぎの多い軟弱な地層であり、地震時の強度も低い。今回の災害で特徴的に見られた地質境界での崩壊については、特に詳しく後述する。

栗駒山北部には、やや古い海成層である細倉層が地域一帯に広く分布する。この細倉層の岩質を反映して、航空写真等から判読される崩壊は、南部と比較すると、中規模以下のものが多く、大規模な崩壊は南部に比べてやや少ない。しかし、村上ら (2009) の報告のように、初生すべりの発生や、航空写真から判読できない亀裂の発生も見られており、崩土の移動は少ないがせん断破壊が進行している崩壊もあり、今後注意する必要がある。

(3) 土質試験による側方流動 (スプレッド) の確認

耕英地区御沢で発生した崩壊地の脇での試錐孔を用いた標準貫入試験結果 (東北森林管理局ほか 2010) によれば、溶結凝灰岩直下の軟弱層 (強風化の軽石凝灰岩) で N 値が 10 以下を示す箇所も見られ、相当層の FL 値も 0.21 ~ 0.35 と 1.0 以下と小さな値であった。ここで FL 値とは、液状化に対する抵抗率で、1.0 以下で液状化の可能性が高いと判定される数値 (日本道路協会 2012) であり、0.21 ~ 0.35 の測定値は、液状化を充分起こしうる値である。また、この軟弱層の部位は、上層の亀裂に富んだ溶結凝灰岩と異なり、空隙に乏しいことから透水性が低く、境界面で帯水層を形成しやすい。試錐結果によれば、境界部に空洞が見られたが、これは帯水した地下水により地下侵食が生じた結果であり、豊富な地下水による作用が見て取れ

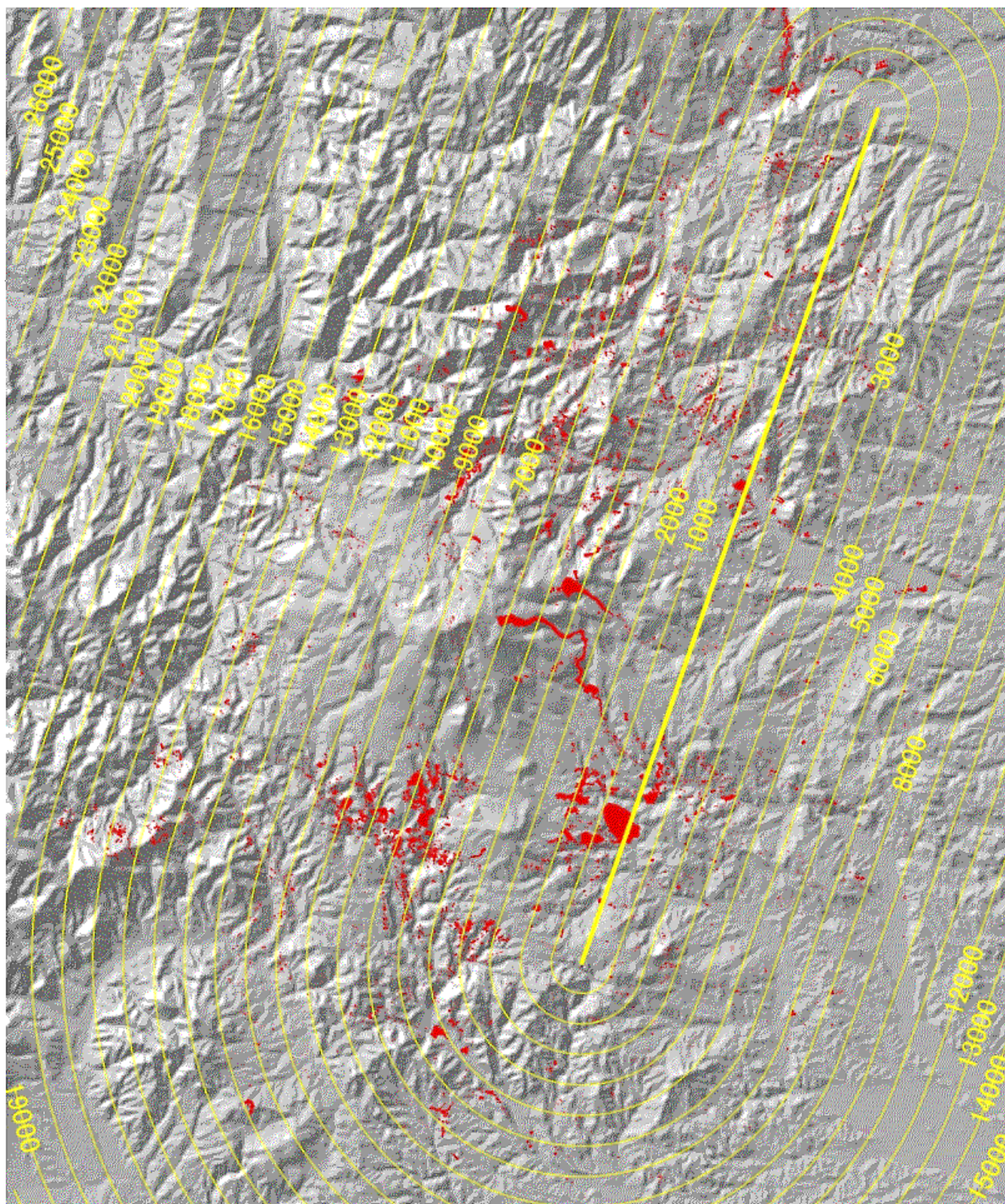


Fig. 3. 地震断層からの距離と崩壊の関係。崩壊の多くは震源断層の上盤側 15 km 以内で発生している。地震断層は東北大学大学院理学研究科 2008 年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ (2008) による。
 Relationship between the distance the from seismogenic fault and landslides. Most of landslides are located on the hanging wall with in 15 km from the seismogenic reverse fault. The seismogenic fault is reported by the research group of Tohoku University (2008).

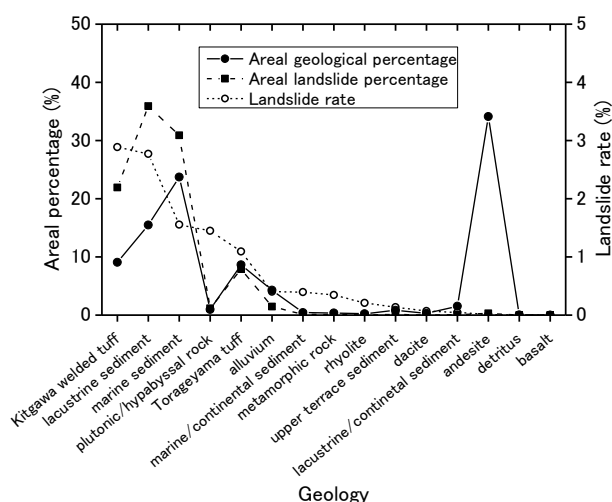


Fig. 4. 地質別の崩壊発生状況。
Areal landslide percentage and rate of each geological rock type.

る。融雪期以降も含水率の高い状態が続くことが考えられ、地震時においても高い含水率が示唆される。上層の堅固な溶結凝灰岩は、下層と比較すると密度も高いことから（三森ら 2009, 東北森林管理局ほか 2010）、地震時において大きな上乗荷重となって動的に作用する。このため、直下の湖成層中の軽石凝灰岩が液状化して強度を失い、溪流の下刻侵食により溪流側が解放された場所では側圧が無いことにより側方流動（スプレッド）を発生させたと考えられる。この結果、北川溶結凝灰岩と湖成層の地質的組み合わせの分布する地域である二迫川・三迫川流域（耕英地区）に多数の崩壊を発生させ、高い崩壊発生率をもたらした可能性が高い。

我が国の山地におけるスプレッドに関する報告は、加藤ら（1999）による三田盆地における神戸層群の報告が最初である。その後、大八木（2003）による既存の地すべり地形の再検討によって、塔のへつりカルデラ、新潟県田麦付近における地すべり等、複数の事例が見いだされている。地震時の液状化による側方流動（スプレッド）については、沖積層、あるいは、埋め立て地など、砂質の水平堆積構造の場所で発生することが、これまでの地震災害において数多く報告されている。地震時の側方流動が、わが国で初めて認識されたのは、1964 年新潟地震による信濃川や新潟空港の被害であった（例えば、Hamada et al., 1986）。その後、1983 年日本海中部地震（例えば、渡辺ら 1984）、1995 年兵庫県南部地震（例えば、堀越ら 1996）、2004 年新潟県中越地震（例えば、国土交通省 2008）等でも地震時の液状化による側方流動について数多くの報告がなされている。また、平成 23 年（2011 年）年東北地

方太平洋沖地震（東日本大震災）では、沖積平野を中心に広範な地域に側方流動による被害が生じている。

今回被災した箇所の土の粒経は比較的均一で、砂質からシルト質の粒径に属するものが多く、密度が小さく緩詰め層がほぼ水平に堆積する構造である。これまでに報告のあった側方流動の発生箇所との類似性を指摘することができ、地震時の液状化発生を大いに裏付ける。カルデラ内の充填堆積物は、一般に、緩詰めと比較的粒径が大きいことから、先述した東北脊梁山地のカルデラ・クラスター分布域では、今回の災害と同様に、地震時には側方流動（スプレッド）による大規模な地すべりが発生する可能性を考慮しておく必要がある。

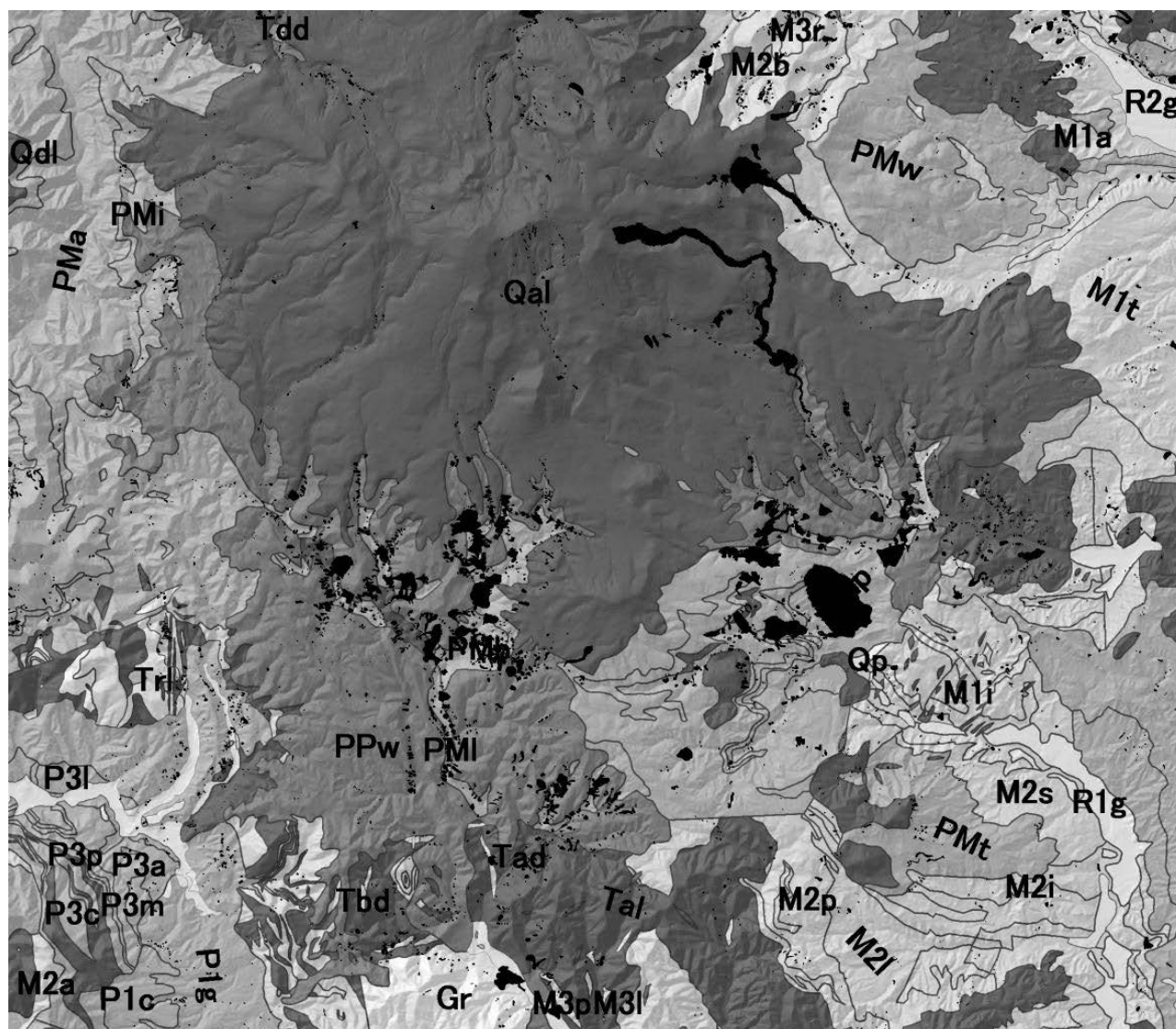
(4) 地形・傾斜の影響

傾斜区分別の崩壊発生状況を Fig. 6 に示す。被災地域全体では、10 ～ 20 度の傾斜にピークを持つ傾斜分布を示し、比較的なだらかな地形である。これに対し、今回発生した崩壊での傾斜別分布は、25 ～ 35 度での頻度が最も高く、被災地域全体の傾斜分布より急勾配に寄った分布を示している。また、傾斜角が 50 度を超えると崩壊の発生率は急激に上昇し、面積は極限られるが、60 度を超える斜面では半数以上に崩壊が見られる結果が得られた。平坦な火山堆積物を河川が下刻した今回の被災地域では、このような急傾斜地は河道両側の谷壁にほとんどが位置しており、崩壊地の傾斜分布結果は、谷壁での崩壊が多発した現状を反映している（Fig. 7）。さらに、本被災地域では、最上層部に節理の発達した比較的密度の高い溶岩や、溶結凝灰岩が分布し、その下層に密度の小さな軽石凝灰岩や湖成層が分布する堆積構造（キャップロック構造）を示す箇所が、栗駒山南部一帯に広く見られる。このようなキャップロック構造は、斜面上部に大きな上乗荷重をもたらすことから、崩壊を発生させる大きな要因となる。谷壁にこのようなキャップロック構造を認める箇所でも崩壊が多いこともこれを裏付ける。

内陸の山間部で発生する地震では、急勾配斜面で崩壊が多数発生することがこれまで多くの地震災害でも数多く報告されており（例えば、高橋ら 1986）、今回の岩手・宮城内陸地震による崩壊も同様の傾向を示している。傾斜別の崩壊占有率は、20 度未満の斜面でも比較的高い値を示しているが、これは荒砥沢地すべり・耕英地区における大規模崩壊を反映したためである。また、崩壊発生率は 50 度を超える斜面で急増しており、一迫川流域の北川溶結凝灰岩分布域で特徴的に見られるキャップロックやトップリングによる小規模から中規模の崩壊を反映した結果となった。

(5) キャップロックの影響

キャップロックによる崩壊の場合、崩壊・地形・地質の各 GIS レイヤーの重ね合わせによって特徴的な様



Legend

symbol	geology
PPw	Kitgawa welded tuff
PM, P1, P3	lacustrine sediment
M1, M2, M3	marine sediment
D0, Qd, Qp, Sp, Gr	plutonic/hypabyssal rock
PMw	Torageyama tuff
Qal, Ta	andesite
R1g	alluvium

symbol	geology
PEg, Pet	marine/continental sediment
GM, S	metamorphic rock
R2g	upper terrace deposit
Trl, Trd	rhyolite
PLc, PLp	lacustrine/continental sediment
Tbl, Tbd	basalt
●	landslide

Fig. 5. 一迫川・二迫川・三迫川流域の崩壊と地質の関係。地質境界、特に北川溶結凝灰岩（硬質）と湖成層（軟質）の境界付近に位置する崩壊が多い。地質図は産業技術総合研究所による栗駒地熱地域地質図を用いた。
Relationships between landslides and geology in Ichihazama river, Nihazama river, Sanhazama river basins. There are a lot of landslides near the geological boundaries, especially, the boundary of Kitagawa welded tuff and lacustrine sediment. We use the Geological map of Kurikoma geothermal area by The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

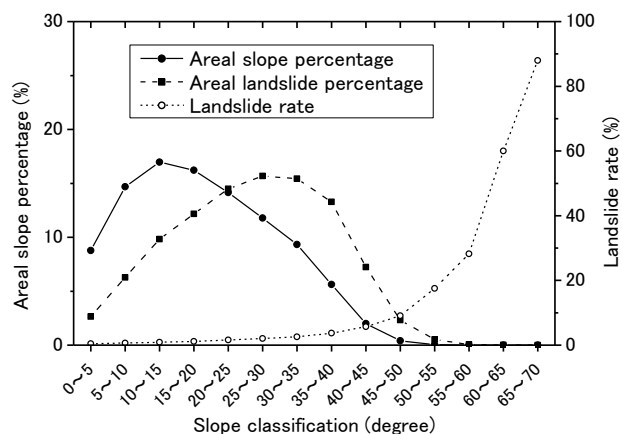


Fig. 6. 傾斜区分別の占有率と崩壊発生率。
Relationship among slope classification, areal percentage of slope and landslide, and landslide rate.

相が見て取れる (Fig. 5 参照)。すなわち、多くの崩壊が、地形図上では下刻した沢の側壁急斜面上に位置し、地質図上では上層下層の地質境界線の付近に位置するという特徴である。この特徴は、この地域の堆積構造に由来する、と著者らは考えている。この地域では、溶結凝灰岩と湖成層の層序が水平に近い結果、溶結凝灰岩と湖成層の境界は必然として沢沿いの急斜面となることが多いことが理由である。

この GIS 上での特徴は、今回のようなキャップロック構造を持つ地質条件下で、強い地震が発生するような場合を想定して崩壊の危険箇所を推定する際に、有効な特徴であると考えられる。今後、このような硬質岩と軟質岩の境界付近の急斜面で、規模の大きな崩壊が発生しやすいかどうかを検証する試みを、他の地域で行うことが必要である。地質構造と堆積構造における不

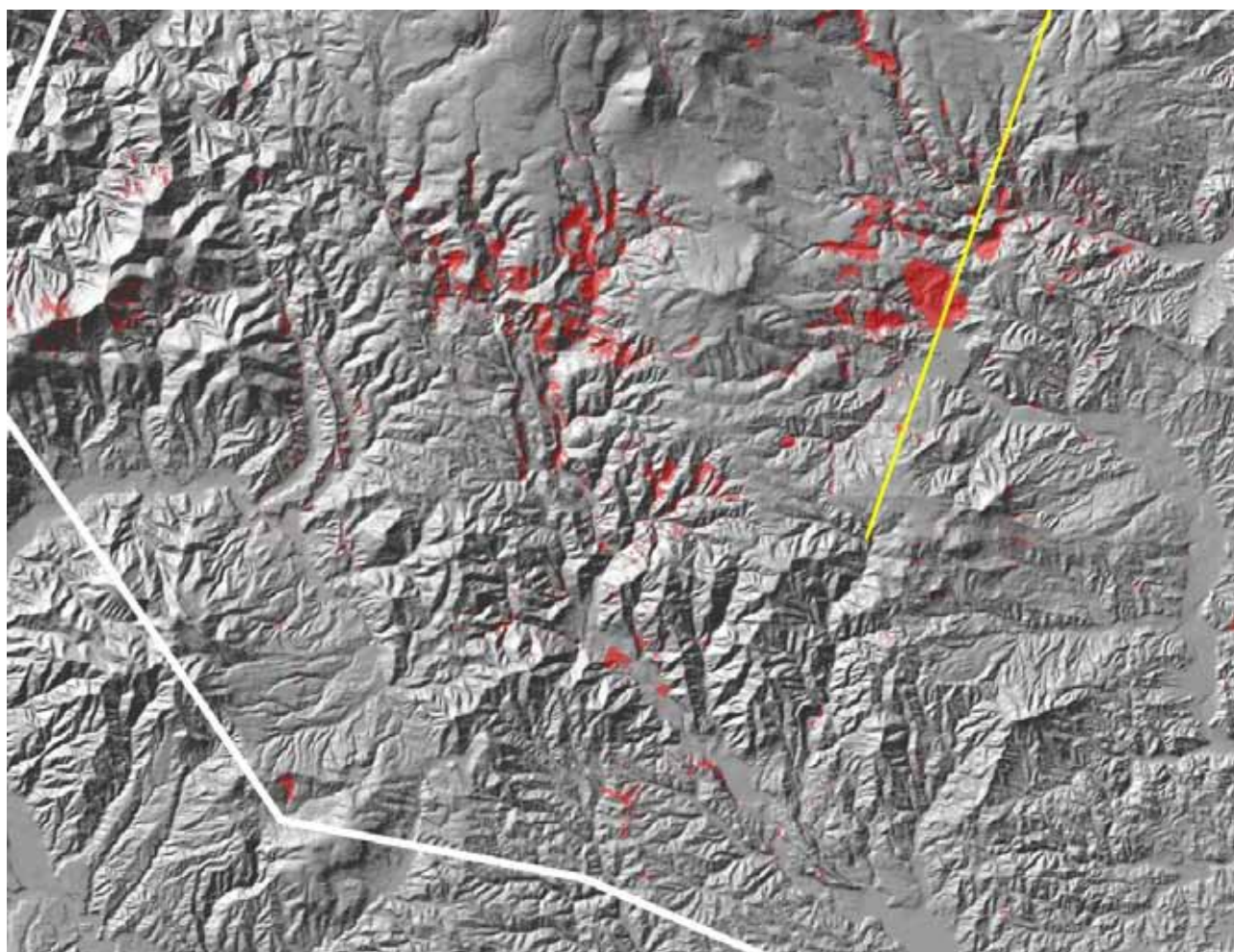


Fig. 7. 栗駒山南部斜面の地形と崩壊。赤い部分が崩壊を示す。
Topographic features and landslides at the southern slope of Mt. Kurikoma.

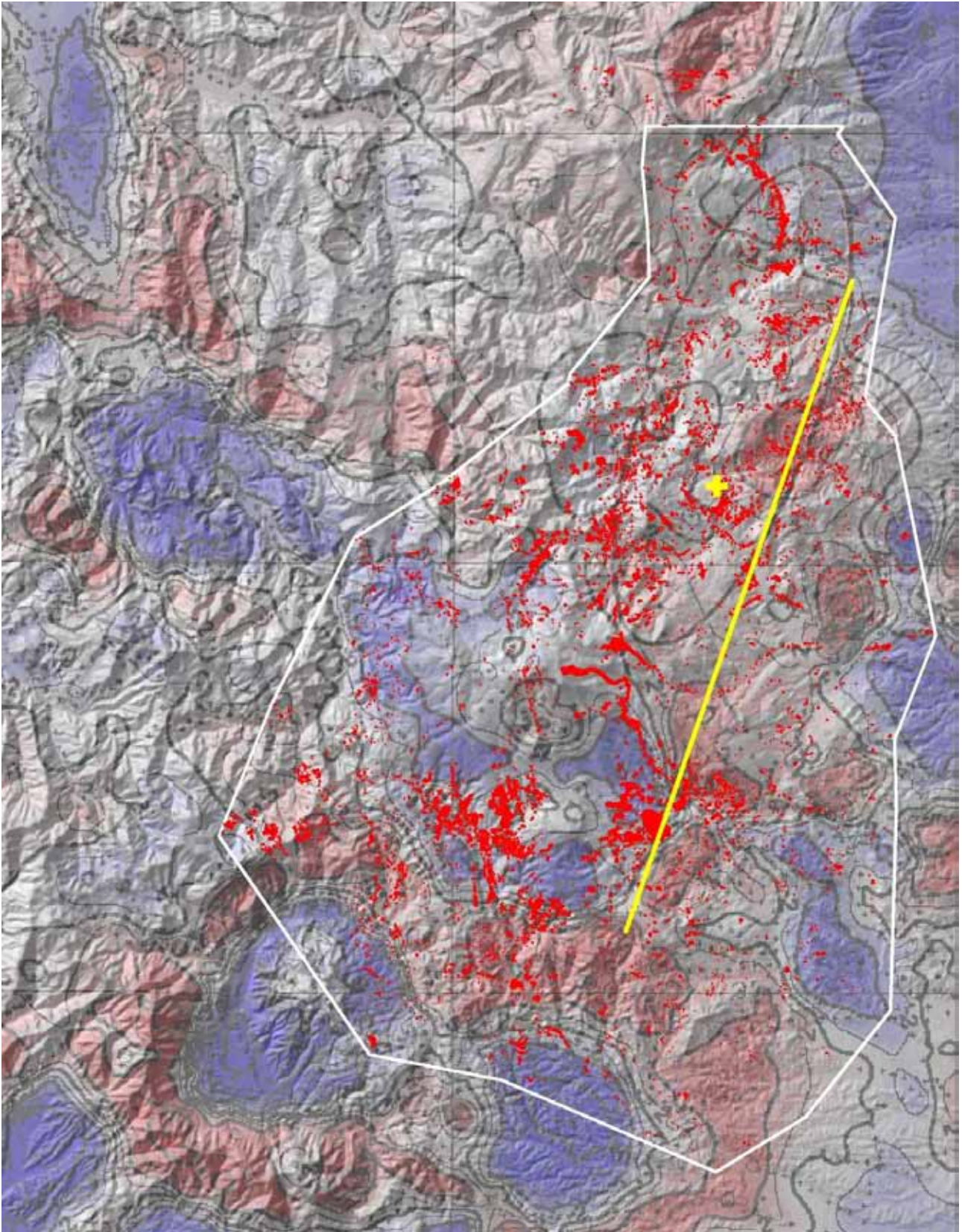


Fig. 8. ブーゲー異常と崩壊の関係。ブーゲー異常図は、
http://staff.aist.go.jp/k.nawa/geophysmap-rg/grav/iwate-miyagi_gravres_L.gifを使用。
Relationship between Bouguer anomaly and landslides. The map of Bouguer anomaly is reprinted from
http://staff.aist.go.jp/k.nawa/geophysmap-rg/grav/iwate-miyagi_gravres_L.gif

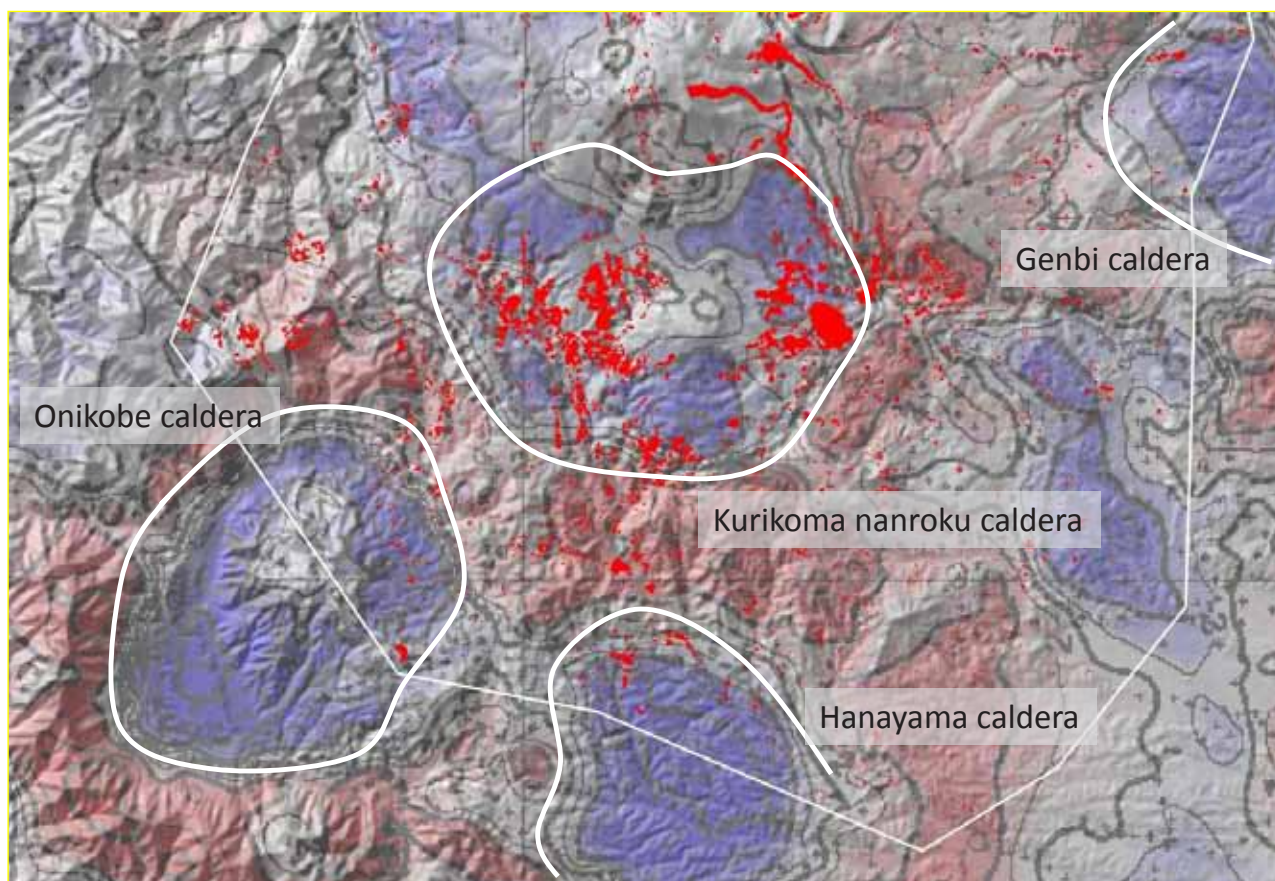


Fig. 9. 栗駒山南部におけるブーゲー異常とカルデラ 1, 2)、崩壊との関係。図中、鬼海、栗駒南麓、厳美、花山の各カルデラを表記した。カルデラ壁の周辺に崩壊が分布している。1): 天野・佐藤 (1989), 2): 伊藤ら (1989)
Relationship of bouguer anomaly, calderas 1, 2), and landslides in the southern slope of Mt. Kurikoma. Calderas of Onikobe, Kurikoma nanroku, Genbi, and Hanayama were confirmed. Landslides were observed on peripheries of calderas.
1) Amano, K. and Sato, H (1989), 2) Ito, T. et al. (1989)

連続性は、雨水や地下水の浸透にも大きな影響を与えること、キャップロックによる崩壊は地震ばかりでなく豪雨でも発生すること、キャップロックを原因とする崩壊は大規模になりやすいこと等から、このようなGISを通じての特徴把握が、未だ不明な部分の多い、豪雨による大規模崩壊の発生予測にも役立つ可能性が高い。

(6) カルデラ地形の影響

当該地域には、前述のように、厳美、栗駒南麓、花山、鬼首の各カルデラが分布している。Fig. 8 に解析対象地区全体重力（ブーゲー異常）図（産業技術総合研究所地球物理情報リサーチグループ 2009）と崩壊との重ね合わせを示す。また、Fig. 9 に栗駒山南部の拡大図を示す。Fig. 8, 9 中の青色は重力値の小さな箇所を示し陥没帯に相当する。一方、ピンク色は重力値の大きな部分を示し、外輪山に相当する。Fig. 9 の曲線は既報のカルデラ（天野・佐藤 1989, 伊藤ら 1989）を示す。

Fig. 9 からは、崩壊がカルデラ周囲の外輪山の谷壁や、中央部の円頂丘斜面に集中しているのがわかり、

カルデラが崩壊の発生に大きな影響を与えていることが理解される。カルデラは陥没形成の際に大きな応力を受けていることから、外輪山を含む周囲は大きな変形や破壊を受けている可能性が高く、これに伴い強度的にも脆弱化していることが考えられる。

Fig. 8 から判断すると、被害地域周辺にはこのほかに未記載のカルデラ構造も存在すると考えられ、精細な調査が求められる。前述のように、東北脊梁山地には複数のカルデラ・クラスターが存在しており、今回と同様の内陸性の地震が発生した場合、カルデラ付近に大きな土砂災害をもたらす可能性が高い。今後、同様な地質構造を有する火山地帯において、地震時の地盤災害を予測する場合には、このようなカルデラとカルデラ内の堆積構造の把握等、地質要素の把握が重要な鍵となろう。

(7) 地質境界と崩壊発生位置

Fig. 10 に被災地域の地質と崩壊との重ね合わせを示す。Fig. 10 によれば、全域で地質の境界付近で崩壊の発生数が多いことがわかる。特に、栗駒山の北東部で

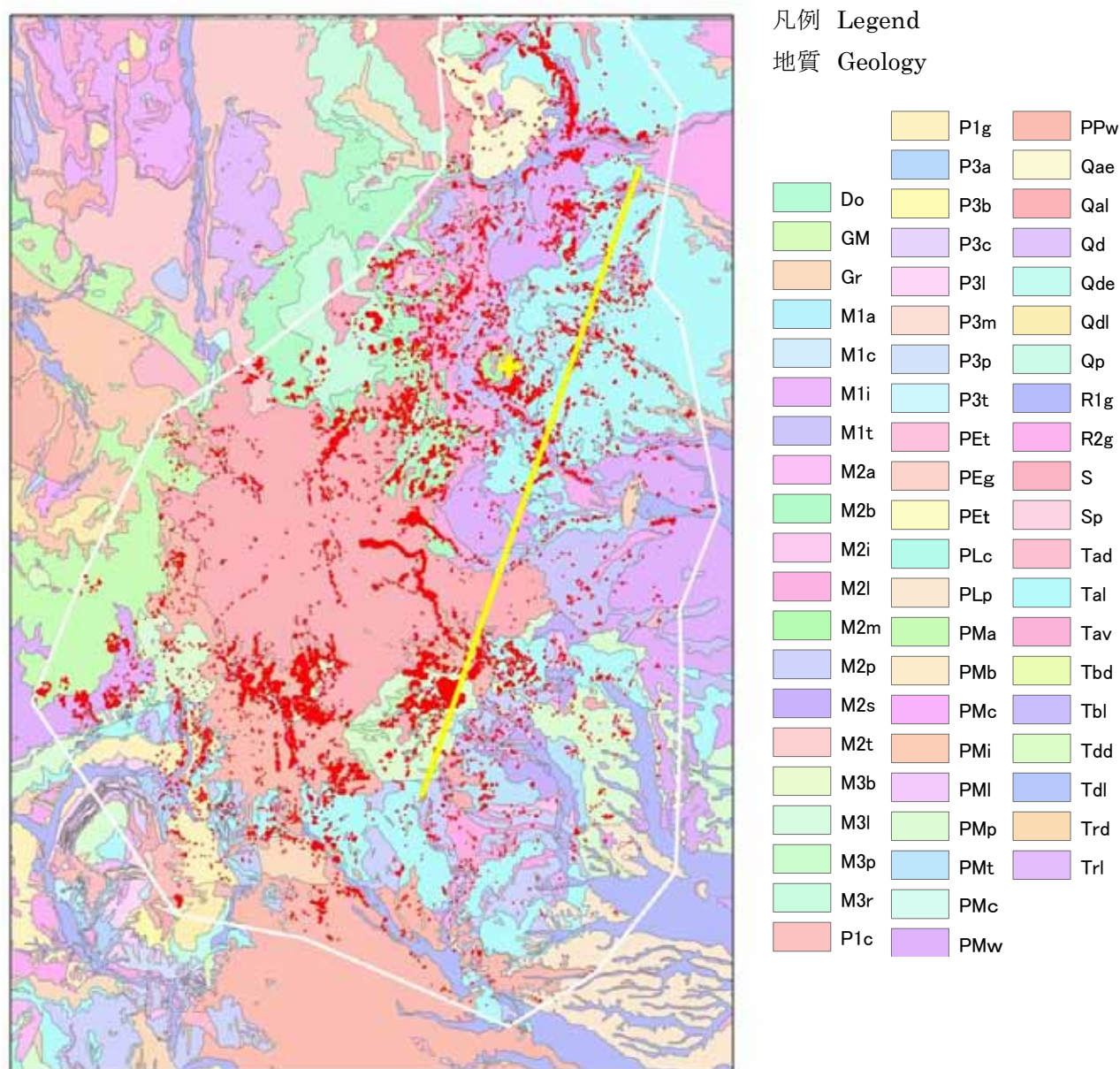


Fig. 10. 崩壊と地質区分との関係を示す位置図。凡例に示す記号による分類は、Fig. 5 のものと同様である。図中の黄色の十字は震源、黄色の直線は東北大学による震源断層モデル、白線は解析範囲をそれぞれ示す。
Map of landslide location and geological classification. Geological classifications are same as Fig. 5. A yellow cross is the epicenter, yellow line is the seismogenic fault model by Tohoku university, a white polygon is the analyzed area.

は、虎毛山凝灰岩と海成層との境界部、南西部では栗駒溶岩外縁部と北川溶結凝灰岩の境界部付近に、それぞれ崩壊が多発している。

Fig. 11 に、地質境界から崩壊発生位置までの距離と、崩壊発生率との関係を示す。崩壊発生位置は崩壊の重心とした。Fig. 11 によれば、地質境界から数百メートル内での崩壊発生率が高いことがわかる。また、地質境界からの距離と崩壊の出現度数とその累積比率を示した Fig. 12 によれば、地質境界から 600 m の範囲に、崩壊のほぼ 90 % が含まれている。

本被災地域のようななだらかな堆積構造を持つ地質

では、カルデラ壁面や、河道谷壁等の縦方向の侵食・変形作用により形成された斜面上に、地質・地層の境界が出現しやすい。したがって、今回の地震により発生した崩壊地が、カルデラやキャップロック構造を示す谷壁に多いことから、崩壊地内あるいはその近傍に地質境界が出現することが多くなる。すなわち、火山地帯特有の層状の堆積構造を持つなだらかな山腹における、カルデラ陥没による急崖形成とカルデラ内部の軟弱層の堆積、河川による山腹の下刻による急崖の形成、これらの地質・地形要因に加えて、軟弱層の上部に新しい堅固な溶岩が堆積しているというキャップロック

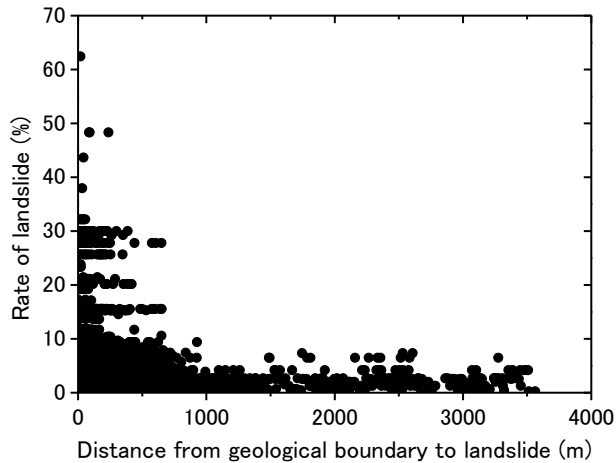


Fig. 11. 地質境界から崩壊発生位置までの距離と崩壊発生率。
Relationship between distance from geological boundary and rate of landslide.

構造の存在、などの複合的な要因が、今回の地震災害で地質境界に崩壊が多発するという現象をもたらしたといえる。

今回の地震災害のデータからは、25度を超える傾斜地で、地質層序によりキャップロックとなっている箇所、すなわち、上層が堅固で下層が軟弱な堆積構造が地表に出現している地質境界の周辺数百mの範囲で、カルデラ谷壁、河道の下刻による谷壁等の条件を満たす斜面での崩壊が卓越していたことが判明した。したがって、このような箇所を地質図・地形図を用いて抽出すれば、崩壊が想定される危険斜面の抽出が可能である。このような抽出操作はGISの最も得意とする作業であり、今回得られた成果に基づくこの手法は、今回の被災地域と同様の地質構造である、カルデラ火山地帯でのハザードマップを作成する際にも有効と考える。

3) 植生の影響

豪雨による表層崩壊への植生影響についての議論と同様に、地震時の土壌層下面をすべり面とする小規模崩壊について植生がどのように影響するかは、防災対策の観点からも重要な事項であろう。ここで言う植生が影響を与える小規模崩壊は、豪雨時の崩壊と同様に、表層崩壊に分類されるような深さのものであり、大規模崩壊は基岩中にすべり面が存在するため根系の影響は及ばない。従って、植生影響を議論する際には、崩壊の規模により区分して、特に規模の小さなものを取り上げて議論すべきである。しかし、今回行った崩壊の把握は空中写真に基づくものであり、崩壊深のデータをとることが出来ないことや、植生影響の大まかな把握を目的としたため、下記の統計値は全ての崩壊か

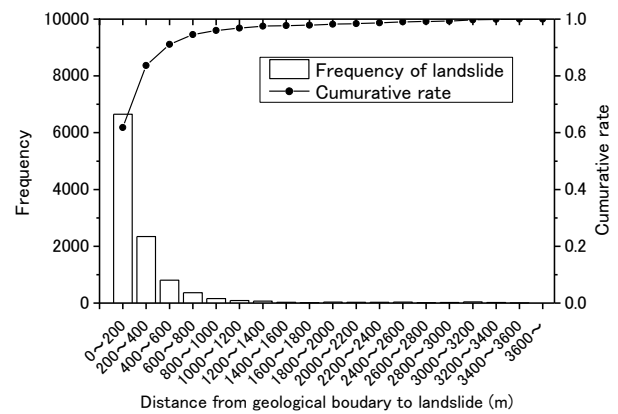


Fig. 12. 地質境界からの距離と崩壊の出現度数とその累積比率。
Relationship between distance from geological boundary to landslide and frequency of landslide occurrence.

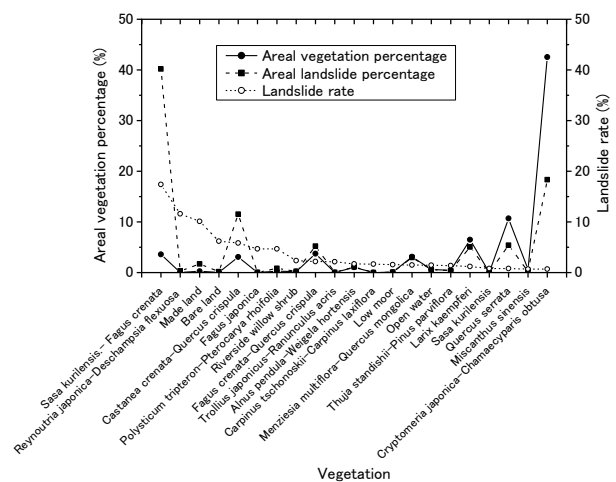


Fig. 13. 植生区分別の崩壊発生状況。
Relationship between vegetation type and landslide.

ら求めている。

Fig. 13に植生区分ごとの崩壊発生状況を示す。植生区分のうち、スギ・ヒノキ植林 (*Cryptomeria japonica* - *Chamaecyparis obtusa*) が最も占有率高く崩壊面積の多くを占めているが、崩壊発生率は低い。同様にカラマツ植林 (*Larix laempferi*) などの人工林や、コナラ・ブナ (*Fagus crenata* - *Quercus crispula*) などの天然林の崩壊発生率は低く、成林している場合には地震時の崩壊についても発生率は低い。これに対し、チシマザサ群団 (*Sasa kurilensis* - *Fagus crenata*)、イタドリ・コメススキ群落 (*Reynoutria japonica* - *Deschampsia flexuosa*)・造成地 (Made land)・自然裸地 (Bare land) などの天然林や無植生や草本主体の植生では崩壊発生率が高い。しかし、これにより森林が地震による崩壊の防止

に有効であると結論することは早計である。

今回、一迫川流域で、主に、トップリングによる崩壊が溪岸側壁の急傾斜地で発生していることを前項で述べたが、このような急傾斜の斜面は造林対象になることはもとよりなく、通常は植生の遷移が容易に進行せず、無植生や草本主体の植生のままのことも多い。このことから、木本の成立しえないような急斜面が今回数多く崩れたと考えるのが妥当であろう。さらに、今回は比較的標高の高い山間地での崩壊も多く、必然的にこのような場所では植生も元々貧弱であることも影響していると考えられる。地震時に発生する小規模崩壊への植生の影響を議論するには、植生以外の傾斜・標高等もふまえた詳細な分析が必要であり、今回の解析からは「成林している箇所の崩壊発生率は比較的小さい」と述べるにとどめる。

3. おわりに

本稿では、2008年岩手・宮城内陸地震で発生した崩壊・地すべりを主とする土砂災害の特徴について報告した。本災害では、火山地帯での堆積構造と地形が崩壊の発生に大きな影響を与えていることを明らかにした。特に、次の2点の重要性を指摘した。まず、軟質な湖成堆積物の上に硬質な溶結凝灰岩が堆積する構造が大規模かつ多数のキャップロックタイプの崩壊を発生させたこと、次に、キャップロック構造による大きな上載加重が下層の軟質の湖成堆積物に動的に載荷したことにより地震時に液化化して側方流動が生じた可能性が高いこと、の2点である。今回の災害で得られたこれらの特徴は、東北の脊梁山地に分布する他のカルデラ・クラスターとも共通するものであり、今後類似の地震が発生した場合に、同様な災害が起こりうることを示している。また、今回のように、広域で多数の崩壊が発生するような地震を原因とする土砂災害について解析する際には、GISの利用が非常に有効であることも加えておきたい。

現地調査に際しては、東北森林管理局治山課、同岩手南部森林管理署、同宮城北部森林管理署、同宮城山地災害復旧対策室に多大なご協力をいただいた。

最後に、この災害で亡くなられた方々のご冥福を、心からお祈りします。

引用文献

天野一男・佐藤比呂志 (1989) 東北本州弧中部地域の新生代テクトニクス, 地質学論集, 32, 81-96.
浅野志穂 (2010) 岩手・宮城内陸地震災害における山地斜面の振動特性に及ぼす地層構造の影響, 「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」交付金プロジェクト推進会議資料.

防災科学技術センター (1982) 地すべり地形分布図第1集「新庄・坂田」, 防災科学技術資料, 69.

防災科学技術研究所 (2008) "強震ネットワーク K - NET", <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/quake/>.

大丸裕武・村上 亘・多田泰之・三森利昭 (2010) 岩手宮城内陸地震による一迫川上流部の崩壊発生とバレーバルジング, 2010 地形学連合春季大会講演要旨, 61.

大丸裕武・村上 亘・多田泰之・岡本 隆・三森利昭・江坂文寿 (2011) 2008 年岩手・宮城内陸地震による一迫川上流域の崩壊発生環境, 日本地すべり学会誌, 48(3), 23-36.

大丸裕武・村上 亘・小川泰浩・江坂文寿 (2010) 2008 年 6 月の岩手・宮城内陸地震によって土蔵沢源頭部で発生した崩壊, 「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」交付金プロジェクト推進会議資料.

土木学会 (2008) 2008 (平成 20 年) 岩手・宮城内陸地震による被害速報, 土木学会誌, 93(8), 42-45.

Hamada M., Yasuda, S., Isoyama R, Emoto, K. (1986) Study on liquefaction induced permanent ground displacements. Association for the Development of Earthquake Prediction in Japan, 1, 1-87.

桧垣大助・佐藤 剛 (2009) 平成 20 年岩手・宮城内陸地震における斜面変動の特徴, 東北地域災害科学研究所, 45, 59-63.

堀越研一・大津宏康・木村 亮・岡二三生 (1996) 1995 兵庫県南部地震によって損傷した杭の調査, 土と基礎, 地盤工学会, 44 (11), 27-29.

井口 隆・大八木規夫・内山庄一郎・清水文健 (2010) 2008 年岩手・宮城内陸地震で起きた地すべり災害の地形地質的背景, 防災科学技術研究所主要災害調査, 43, 1-10.

井良沢道也・牛山素行・川邊 洋・藤田正治・里深好文・檜垣大助・内田太郎・池田暁彦 (2008) 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震により発生した土砂災害について, 砂防学会誌, 61 (3), 37-46.

石出貴大・山崎文雄 (2010) ALOS/AVNIR-2 画像を用いた 2008 年岩手・宮城内陸地震における斜面崩壊の検出, 日本地震工学会論文集, 10 (3), 12-24.

伊藤谷生・歌田 実・奥山俊一 (1989) 東北脊梁地域に分布する中新世～鮮新世のカルデラ群について, 地質学論集, 32, 409-429.

地盤工学会 2008 年岩手・宮城内陸地震災害調査委員会 (2010) 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震災害調査報告書, 158 pp.

環境省自然環境局生物多様性センター (2004) "第 6 回・第 7 回自然環境保全基礎調査による植生図",

- 生物多様性情報システム, <http://www.vegetation.jp/>.
- 加藤靖郎・三好正夫・東 一樹 (1999) 第三系大山系神戸層群の lateral spreads, 第 38 回地すべり学会研究発表会講演集, 431-434.
- 気象庁 (2008) 災害時地震速報 (2008.7.31), 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震, 93 pp.
- 小池一之・田村俊和・鎮西清高・宮城豊彦編 (2005) 日本の地形 3 東北, 東京大学出版会, 355 pp.
- 国土交通省 (2008) 平成 19 年 (2007 年) 新潟県中越沖地震における液状化に関する被害調査報告, 31 pp.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所・独立行政法人建築研究所 (2008) 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震被害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料第 486 号・土木研究所資料第 4120 号・建築研究所資料第 115 号, 239 pp.
- 黒川 将・岩田英也・柴崎達也・大野亮一・小澤幸彦・寺村 保 (2010) 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震で発生した増沢地区の地すべりと地すべりダムの調査結果, 日本地すべり学会誌, 47 (6), 33-40.
- 翠川三郎・三浦弘之 (2010) 高分解能 SAR 画像による 2008 年岩手・宮城内陸地震での 斜面災害地域の抽出, 日本地震工学会論文集, 10 (3), 25-32.
- 水田敏彦・鏡味洋史 (2008) 1896.8.31 陸羽地震の岩手県における被害に関する文献調査, 日本建築学会技術報告集, 28, 665-668.
- 水田敏彦・鏡味洋史 (2009) 1896.8.31 陸羽地震の秋田県における被害分布に関する文献調査, 日本建築学会技術報告集, 30, 597-600.
- 森屋 洋・阿部真郎・荻田 茂・桧垣大助 (2010) 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴って発生した荒砥沢ダム上流の大規模地すべり構造, 日本地すべり学会誌, 47 (2), 1-7.
- 村上 亘・大丸裕武・小川泰浩・黒川 潮・多田泰之・三森利昭・安田正次・齋藤 仁 (2009) 岩手宮城内陸地震において崩壊斜面背後の山地稜線部に形成された亀裂, 日本地理学会春季大会発表要旨集, 217.
- 村上 亘・大丸裕武・江坂文寿 (2010) 地震後に発生した斜面崩壊 (2 次崩壊) の地形・地質的特徴, 「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」交付金プロジェクト推進会議資料.
- 内閣府 (2011) "災害情報: 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震について (第 34 報) (2011.6.23)", <http://www.bousai.go.jp/kinkyu/iwate2/2008-iwate-ca0-034.pdf>.
- iwate-ca0-034.pdf.
- 日本道路協会 (2012) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 318 pp.
- 野口正二・三森利昭・多田泰之・安田幸生 (2010) 2008 年岩手・宮城内陸地震前後における災害地周辺の先行土湿, 砂防学会誌, 63 (1), 39-43.
- 野口正二・安田幸生・多田泰之・三森利昭 (2012) 2008 年岩手・宮城内陸地震災害地周辺の先行土湿の季節変動, 森林総合研究所研究報告, 11 (3), 151-160.
- 布原啓史・吉田武義・山田亮一 (2008) "地理情報システムを用いた地震災害とカルデラ構造との関連の検討", 日本地質学会 HP, <http://www.geosociety.jp/hazard/content0035.html>.
- 大野亮一・山科真一・山崎孝成・小山倫史・江坂文寿・笠井史宏 (2010) 地震時大規模地すべりの発生機構—荒砥沢地すべりを例として—, 日本地すべり学会誌, 47 (2), 8-14.
- 大竹正巳 (2000) 栗駒南部地熱地域, 赤倉カルデラの層序と火砕流噴出・陥没様式, 地質学雑誌, 106 (3), 205-222.
- 大八木規夫 (2003) 日本におけるスプレッドタイプ地すべりの事例, 深田地質研究所年報, 4, 133-153.
- 岡田康彦・黒川 潮・浅野志穂 (2012) 日蔭森で発生した地すべりの流動化機構の土質力学的検討, 森林総合研究所研究報告, 11 (2), 71-75.
- 産業技術総合研究所 (1986) 栗駒地熱地域地質図.
- 産業技術総合研究所地球物理情報リサーチグループ (2009) "2008 年岩手・宮城内陸地震—震源域付近の詳細重力異常図 (Fig. 2 残差重力図 (作成: 駒澤正夫))", 産業技術総合研究所, http://staff.aist.go.jp/k.nawa/geophysmap-rg/grav/iwate-miyagi_gravres_L.gif.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (編) (2004) 日本重力 CD-ROM, 第 2 版, 数値地質図 P-2.
- 三森利昭・大丸裕武・黒川 潮・村上 亘・多田泰之・小川泰浩・岡田康彦・大野泰宏・野口正二・安田幸生・浅野志穂・安田正次 (2009) 岩手・宮城内陸地震で発生した崩壊の特徴, 平成 21 年度砂防学会研究発表会概要集, 14-15.
- 三森利昭・多田泰之・大丸裕武・村上亘・野口正二・安田幸生 (2010a) 岩手・宮城内陸地震で発生した崩壊の特徴 (II), 平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集, 52-53.
- 三森利昭・大丸裕武・黒川潮・岡本 隆・村上 亘・多田泰之・小川泰浩・岡田康彦・野口正二・安田幸生・浅野志穂・大野泰宏 (2010b) シリーズ「近年の土砂災害」: 2008 年岩手・宮城内陸地震によ

- る土砂災害, 水利科学, 54 (3), 105-127.
- 佐藤比呂志・加藤直子・阿部 進 (2008) "2008 年岩手・宮城内陸地震の地質学的背景", 日本地質学会 HP, <http://www.geosociety.jp/hazard/content0031.html>.
- 仙台管区気象台 (2003) 平成 15 年 7 月 26 日の宮城県北部の地震, 災害時自然現象報告, 2003 年第 2 号, 35 pp.
- 高橋 博・大八木規夫・大滝俊夫・安江朝光 (1986) 斜面災害の予知と防災, 白亜書房, 526 pp.
- 東北大学大学院理学研究科 2008 年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ (2008) 平成 20 年度第 178 回地震予知連絡会資料, 17 pp.
- 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, 141 pp.
- 東北森林管理局宮城北部森林管理署・国土防災技術株式会社 (2010) 平成 21 年度迫川地区地質調査業務報告書, 181 pp.
- 宇佐美龍夫 (2003) 最新版日本被害地震総覧 416 - 2001, 東京大学出版会, 605 pp.
- Varnes, D. (1978) Slope Movement - Types and Processes, Landslides Analysis and Control, Editors: Schuster R. and Krizek R., TRB, National Research Council, Washington, 11-33.
- 山崎 努・山科真一・大坪俊介・江坂文寿 (2012) 荒砥沢地すべり冠頭部の重力性クリープとその機構, 地すべり学会誌, 49 (1), 36-42.
- 安田幸生・野口正二・三森利昭 (2012) 岩手・宮城内陸地震災害地における 2008 年の気象と山地積雪水量分布の特徴, 森林総合研究所研究報告, 11 (3), 135-150.
- 渡辺 進・羽竜忠男・沓沢貞雄・鍛冶義和 (1984) 日本海中部地震における液状化現象と地盤特性, 土と基礎, 32 (9), 35-40

論文 (Original article)

大径丸太から採材された心去りヒノキ製材品 および無欠点小試験体の強度性能[†]

井道 裕史^{1)*}、長尾 博文¹⁾、加藤 英雄¹⁾

Strength properties of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) pithless lumber and small clear specimens sawn from a large diameter log[†]

Hirofumi IDO^{1)*}, Hirofumi NAGAO¹⁾ and Hideo KATO¹⁾

Abstract

The purpose of this study was to determine the strength properties of Japanese cypress logs (*Chamaecyparis obtusa*) and pithless lumber sawn from the same. The result of measuring Young's modulus for 433 large diameter logs by using a longitudinal vibration method revealed that these logs did not show high Young's modulus values compared with those of common medium and small diameter logs. Strength tests were conducted on 30 regular square (120 × 120 mm) and 30 square (120 × 180 mm) pithless lumber specimens sawn from large diameter logs, for which a machine grade of E90 or higher under the "Japanese agricultural standards for lumber" is targeted. Following a bending test, the bending strength of lumber used in this study showed relatively smaller values compared with common Japanese cypress lumber having a Young's modulus equivalent to those covered by this study. In terms of compressive strength parallel to the grain, the strength values of both regular square and square lumber were equivalent to those of common Japanese cypress lumber. In terms of shear strength and compressive strength—parallel and perpendicular to the grain, respectively—the strength values of lumber in this study were smaller than those recorded in literature for boxed lumber. However, it was considered to be one of the reasons that density that has large influence on both strengths was lower in this study than in other literature. The strength tests conducted on small clear specimens revealed higher density and strength properties for specimens taken from the pith side of lumber than those of specimens taken from the bark side. However, in terms of comparing specific levels of strength, virtually no differences were found between specimens taken from the bark side and those taken from the pith side.

Key words : Japanese cypress, large diameter log, pithless, strength property

要旨

本研究は、大径ヒノキ丸太およびそれから採材される心去り製材品の強度性能を明らかにすることを目的とした。ヒノキ大径丸太 433 本について縦振動法によるヤング係数を測定した結果、ヤング係数は一般的な中小径木に比べて高くはないことがわかった。これらの丸太のうち、「製材の日本農林規格」の機械等級区分構造用製材の等級が E90 以上のものを得ることを目標に採材した、心去り正角 30 体、心去り平角 30 体について、各強度試験を行った。曲げ試験の結果、ヤング係数が本試験体とほぼ同等である一般的なヒノキ製材品と比べて、本試験体の曲げ強度は若干低いことがわかった。縦圧縮強度は、正角、平角とも一般的なヒノキ製材品とほぼ同等であった。せん断およびめり込み強度は、心持ち材を用いた文献値よりも低かった。ただし、両強度に大きな影響を及ぼす密度が文献値より小さかったことも上記の要因と考えられた。無欠点小試験体の各強度試験の結果、樹皮側から採取した試験体よりも髓側から採取した試験体の方が、密度と各強度が大きかった。ただし、比強度で比較すると、樹皮側の試験体と髓側の試験体との間には各強度ともほぼ差異は認められなかった。

キーワード：ヒノキ、大径丸太、心去り、強度性能

1. はじめに

我が国では、スギと同様、戦後を中心に拡大造林された高齢級のヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* (Sieb. et Zucc.) Endl.) 人工林が次第に増加している (林野庁, 2011)。これらの高齢級の大径材から伐採される木材は、今後構造部材としての利用が期待される。一方、ヒノキ製材品の強度データは森林総研を始めとした研

究機関によって蓄積されてきたが、そのほとんどが中小径丸太から採材された心持ち柱材を中心とした強度試験結果である。そのため、大径丸太およびそれから採材される大断面材を含む心去り材のヤング係数や強度は明らかにされていない。

そこで、本研究は、大径ヒノキ丸太およびそれから採材される心去り製材品の強度性能を明らかにするこ

[†] 本研究結果の一部は、第 60 回日本木材学会大会 (2010 年 3 月、宮崎) において発表した。

原稿受付：平成 23 年 10 月 21 日 Received 21 October 2011 原稿受理：平成 24 年 4 月 20 日 Accepted 20 April 2012

1) 森林総合研究所構造利用研究領域 Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* 森林総合研究所構造利用研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: ido@ffpri.affrc.go.jp

とを目的とした。また、心去り製材品の髓側および樹皮側から無欠点小試験体を採取し、各強度性能および採取位置の違いによる各強度性能の違いについて検討した。

2. 実験

2.1 供試材

高知県および奈良県内の製材所に集積された大径のヒノキ丸太 433 本を対象として、縦振動法によるヤング係数を測定した。なお、高知県内の製材所に集積されたヒノキ丸太は全国広域から集められたものである。奈良県内の製材所に集積されたヒノキ丸太のほとんどは、東吉野村大又の 115 年生あるいは黒滝村楨尾の 120 年生の 3 番玉で、一部 4 番玉を含んでいた。測定したヒノキ丸太の一部を Photo 1 に示す。

これらヒノキ丸太の一部から、縦振動法によるヤング係数の値を元にして、「製材の日本農林規格」(農林水産省, 2007) の機械等級区分構造用製材の等級が E90 (以下 E90 と称する) 以上のものに対応した、心去り正角および心去り平角を採材することを試みた。縦振動法によりヤング係数を測定した丸太のうち、正角用 30 体、平角用 30 体、合計 60 体を選択した。その後、断面寸法が 130mm×130mm (正角) および 130mm×190mm (平角) に製材し、供試材とした。すべての供試材の材長は 4000mm である。製材後の平角試験体を Photo 2 に示す。すべての供試材は吉野銘木製造販売 (株) で製材され、再度縦振動法によるヤング係数を測定した後、森林総合研究所に搬入した。3～4 ヶ月間実験棟内に積み重ね状態で天然乾燥後、断面寸法を 120mm×120mm (正角) および 120mm×180mm (平角) に挽き直した。各試験体の採取方法を Fig. 1 に示す。正角からは、曲げ試験体、縦圧縮試験体、めり込み試験体、いす型せん断試験体を採取した。平角からは、曲げ試験体を採取した。また、平角の曲げ試験後の非破壊部分から縦圧縮試験体を採取した。

2.2 製材品の強度試験

2.2.1 曲げ試験

正角の曲げ試験体の寸法は、幅 120mm×高さ 120mm×長さ 2400mm とした。平角の曲げ試験体の寸法は、幅 120mm×高さ 180mm×長さ 3600mm とした。曲げ試験に先立ち、「製材の日本農林規格」の甲種構造用 II に従って節等の欠点を測定し、目視等級区分を行った。正角についてのみ、縦振動法によるヤング係数の平均値と変動係数が等しくなるような 10 体ずつの 3 グループに仕分け、グループごとに荷重面をそれぞれ木表、木裏、柃目面とした。曲げ試験は ISO 13910 (ISO, 2005) に従い、支点間距離を材せい



Photo 1. 大径のヒノキ丸太
Large diameter Japanese cypress logs



Photo 2. 平角試験体
Test specimens of square lumber

所) を用い、正角の加力には最大容量が 10tf の材料試験機 (ミネベア、TCM-10000) を用いた。試験体の支点間中央部に変位計 (東京測器研究所、CDP-100) を設置し支点間のたわみを測定するとともに、試験体の圧縮面上に変位計 (東京測器研究所、CDP-10) を取り付け付けた袴型治具 (スパン 400mm) で、荷重点間におけるたわみを測定した。平角の曲げ試験の様子を Photo 3 に示す。試験終了後、支点間のたわみから求めた見かけの曲げヤング係数、荷重点間のたわみから求めた真の曲げヤング係数、曲げ比例限度応力、曲げ強度を算出した。破壊部近傍から厚さ約 25mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。なお、曲げ試験体の含水率測定の結果、含水率の平均値が 20% 以上であったため、縦圧縮試験体、めり込み試験体、せん断試験体については恒温恒湿室において再度調湿した後に試験を行った。

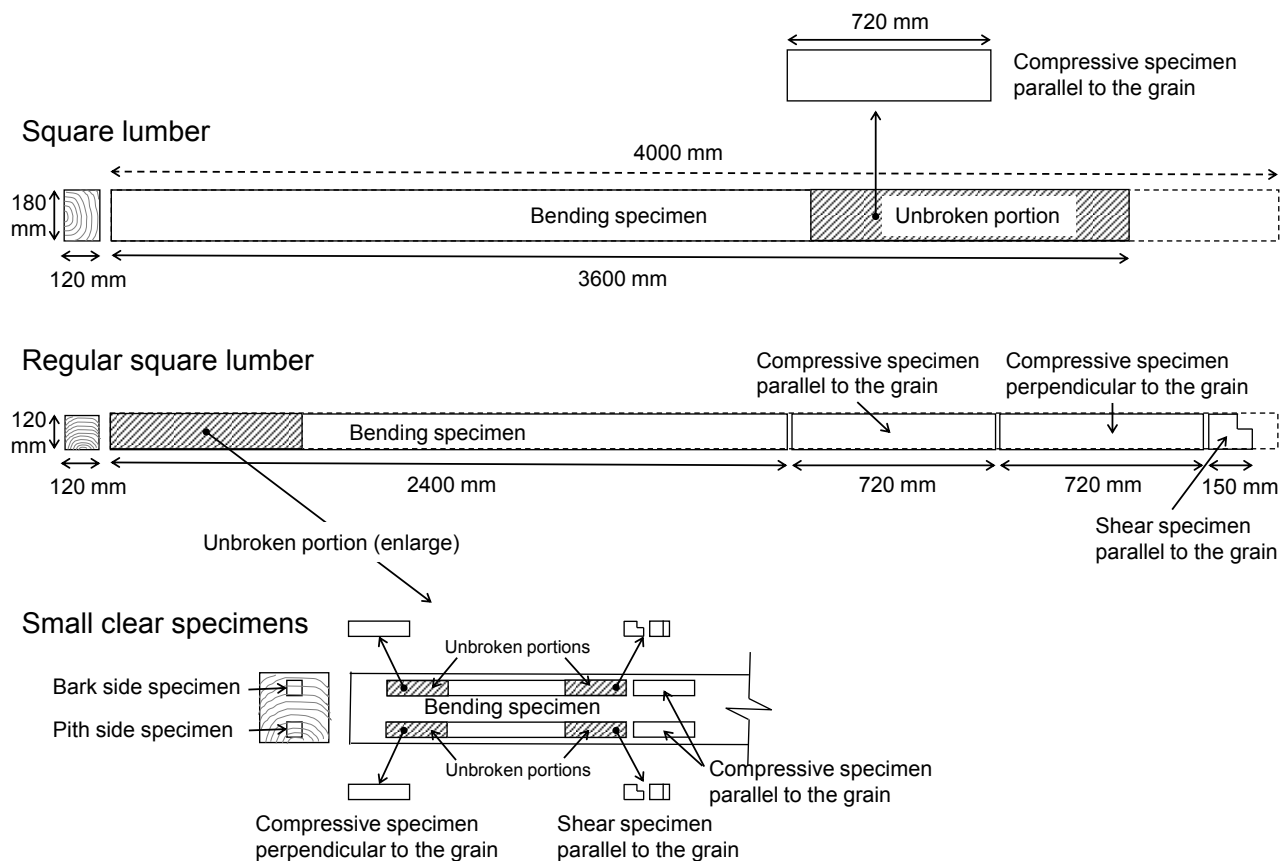


Fig. 1. 各試験体の採取方法
Method of collecting each test specimen



Photo 3. 平角の曲げ試験
Bending test of square lumber

2.2.2 縦圧縮試験

正角の縦圧縮試験体の断面寸法は 120mm×120mm、長さは 720mm とした。平角の縦圧縮試験体の断面寸法は 120mm×180mm、長さは 720mm とした。縦圧縮試験に先立ち、縦振動法によるヤング係数を測定した。縦圧縮試験は「構造用木材の強度試験法」(日本建

築学会, 2003) に従い、材長を短辺の 6 倍とした短柱圧縮 (細長比 ≈ 20) で行った。最大容量が 3000kN の圧縮試験機 (前川試験機製作所、A-300-B4) で、荷重レンジを 1500kN に設定して加力し、最大荷重に達するまでの時間が約 5 分になるように荷重速度を調整した。正角については、試験体の長さ方向における中央部の相対する 2 材面に、標点間距離を 150mm とした変位計 (東京測器研究所、CDP-10) を設置し、両変位の平均値を試験体の変形とした。正角の縦圧縮試験の様子を Photo 4 に示す。試験終了後、正角は縦圧縮ヤング係数、縦圧縮比例限度応力、縦圧縮強度、平角は縦圧縮強度を算出した。破壊部近傍から厚さ約 25mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。

2.2.3 せん断試験

せん断試験は実大いす型せん断試験 (井道ら, 2004a) を採用した。切り欠き部分のない側の試験体長さは 150mm、切り欠き部分の長さは 30mm、せん断面積は 120mm×120mm とした。各試験体のせん断断面は、曲げ試験体の曲げ試験時の中立軸に一致させた。最大容量が 3000kN の圧縮試験機 (前川試験機製作所、



Photo 4. 正角の縦圧縮試験

Compressive test parallel to the grain of regular square lumber

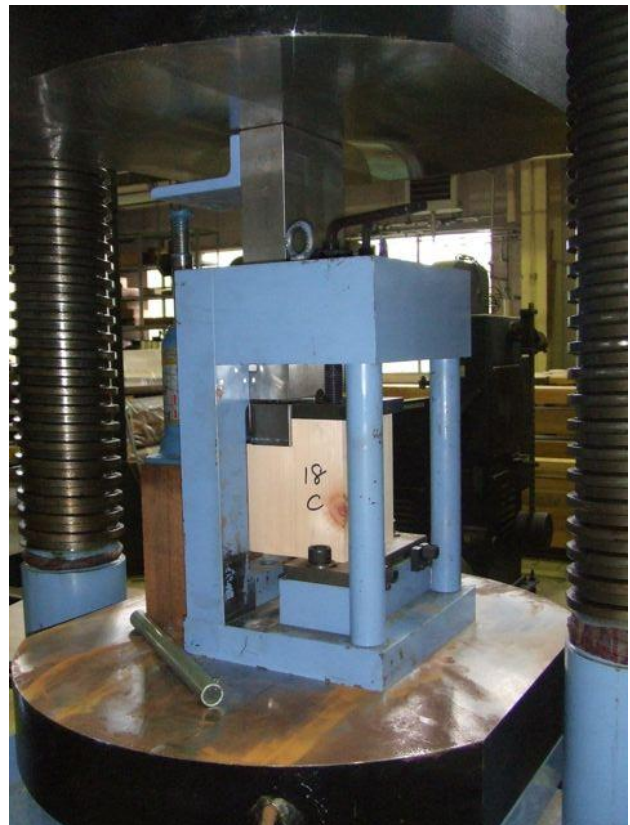


Photo 5. 正角の実大いす型せん断試験

Full-scale block shear test of regular square lumber

A-300-B4) で、荷重レンジを 150kN に設定して加力し、最大荷重に達するまでの時間が約 5 分になるように荷重速度を調整した。せん断試験の様子を Photo 5 に示す。試験終了後、せん断強度を算出した。破壊部近傍から厚さ約 25mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。

2.2.4 めり込み試験

めり込み試験体の断面寸法は 120mm×120mm、長さは 720mm とした。めり込み試験は ISO 13910 (ISO, 2005) に従い、長さが 90mm の鋼製荷重ブロックを試験体中央部の上下に設置する、上下加力方式とした。上部の加力面は、曲げ試験体の曲げ試験時の荷重面に一致させた。最大容量が 3000kN の圧縮試験機 (前川試験機製作所、A-300-B4) で、荷重レンジを 300kN に設定して加力し、めり込み変位量が 20mm に達するまでの時間が約 5 分になるように荷重速度を調整した。試験体の長さ方向の中央部両脇にそれぞれ変位計 (東京測器研究所、CDP-50) を設置し、クロスヘッドの移動量を測定した。両変位計の平均値をめり込み変位量とした。めり込み試験の様子を Photo 6 に示す。試験終了後、めり込み強度、めり込み降伏強

度、めり込み剛性を算出した。破壊部近傍から厚さ約 25mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。

2.3 無欠点小試験体の各強度試験

正角の曲げ試験後の試験体のうち、非破壊部分が存在する試験体から可能な限り曲げおよび縦圧縮の無欠点小試験体を Fig. 1 に従って採取した。試験体は、正角の曲げ試験体 1 体から樹皮側と髄側のそれぞれ 2 体ずつ採取した。各試験体は 2 方桁とした。無欠点小試験体の曲げ試験後、さらにその非破壊部分からせん断面が桁目面および板目面となる 2 種類のせん断無欠点小試験体を採取した。すなわち、樹皮側の試験体と髄側の試験体を含めると、1 体の正角試験体から最大 4 体のせん断無欠点小試験体を採取した。また、曲げ無欠点小試験体の非破壊部分からめり込み試験体も採取した。その際、樹皮側の試験体と髄側の試験体とを、試験体番号順に交互に 2 グループに振り分け、一方を半径方向に加力する試験体とし、他方を接線方向に加力する試験体とした。

各強度試験は、JIS Z 2101 (日本規格協会, 2009) に従った。曲げ試験体の寸法は 25mm (R 方向) × 25mm



Photo 6. 正角のめり込み試験

Compressive test perpendicular to the grain of regular square lumber

(T方向)×400mm(L方向)とした。支点間距離は辺長の14倍とした。加力にはオルセン式材料試験機(森試験機製作所、最大容量:1tf)を用いた。試験体中央下部に変位計(東京測器研究所、CDP-50)を設置して、荷重とスパン中心部のたわみを測定した。縦圧縮試験体の寸法は25mm(R方向)×25mm(T方向)×75mm(L方向)とした。両板目面の中央部分にゲージ長が20mmのひずみゲージ(東京測器研究所、PFL-20-11)を貼付し、荷重とひずみを測定した。せん断試験は、せん断面を板目面および柁目面の2面とし、せん断面の寸法は25mm(RまたはT方向)×25mm(L方向)とした。めり込み試験の加力方向は、半径方向および接線方向の2方向とし、試験体の寸法は25mm(R方向)×25mm(T方向)×75mm(L方向)とした。加圧板の両端に変位計(東京測器研究所、CDP-50)を設置し、荷重と加圧板両端の変位を測定した。縦圧縮試験、せん断試験、めり込み試験の加力には、オルセン式万能試験機(森試験機製作所、最大容量:5tf)を用いた。なお、平均年輪幅は曲げ試験体と縦圧縮試験体で測定し、せん断試験体、めり込み試験体の平均年輪幅は、曲げ試験体と同一の値であると見なした。試験後、全乾法により各試験体の含水率を測定した。

3. 結果と考察

3.1 ヒノキ丸太の縦振動法によるヤング係数および製材品の目視等級区分

丸太433本の非破壊試験結果をTable 1に示す。末口径、材長の平均値(最小値~最大値)はそれぞれ49cm(35cm~82cm)、4.9m(2.1m~11.6m)であった。縦振動法によるヤング係数の平均値は9.14kN/mm²であり、5.29kN/mm²から13.0kN/mm²の範囲にあった。一般のヒノキ製材品の縦振動法によるヤング係数の平均値は11.81kN/mm²(強度性能研究会, 2005)であり、丸太が生材であることを考慮に入れても、ヒノキ大径丸太のヤング係数はそれほど高いものでないことがわかった。

製材した正角および平角に対して、「製材の日本農林規格」の甲種構造用IIの目視等級区分を行った。その結果、全長における等級の割合は、正角では、1級が1本(3.3%)、2級が6本(20.0%)、3級が9本(30%)、格外が14本(46.7%)であった。平角では、1級が4本(13.3%)、2級が7本(23.3%)、3級が11本(36.7%)、格外が8本(26.7%)であった。正角、平角ともほぼ節径比により等級が決定づけられ、繊維傾斜によるものはそれぞれ1体ずつのみであった。

3.2 製材品の強度性能

3.2.1 曲げ強度性能

製材品の曲げ試験の結果をTable 2に示す。正角、平角ともに含水率の平均値が20%を上回っていた。試験後に測定した気乾密度の平均値は、正角が473kg/m³、平角が488kg/m³であった。平均年輪幅を、一般のヒノキ製材品による「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<7>(以下、データ集と称す)(強度性能研究会, 2005)と比較すると、本試験体の平均値2.00mm(正角)、2.15mm(平角)はデータ集の平均値3.3mmの60~65%程度であった。大径化に伴う年輪幅の減少と考えられる。

平均含水率が20%を超えていたため、縦振動法によるヤング係数、見かけの曲げヤング係数、真の曲げヤング係数、曲げ強度をASTM D2915-98 (ASTM International, 1998)に従って含水率15%時の値に補正した。結果をTable 3に示すとともに、含水率補正後の見かけの曲げヤング係数と曲げ強度との関係をFig. 2に示す。見かけのヤング係数がE90の下限值である7.8kN/mm²を下回ったものは平角の1体のみであった。含水率補正後の縦振動法によるヤング係数および見かけの曲げヤング係数をデータ集の値と比較した。ただし、本試験体はE90以上の材料を想定したものであり、データ集は等級区分を行っていない1274体の平均値である。また、データ集の曲げヤング係数の平均値は、ASTM D2915-98に従って含水率15%時の値に補正し、かつ、荷重条件が、本試験と同一

Table 1. 丸太の非破壊試験結果

Results of non-destructive tests for logs					
n = 433	材長	末口直径	元口直径	見かけの密度	縦振動法によるヤング係数
	Length	Diameter of top end	Diameter of bottom end	Apparent density	E_{fr}
	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/m ³)	(kN/mm ²)
Mean	4865	487	566	598	9.14
C.V.(%)	29.2	15.6	16.5	15.5	16.3

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, E_{fr} : Young's modulus by longitudinal vibration method

Table 2. 製材品の曲げ試験の結果

Results of bending tests for lumber									
		ρ_{test}	MC	ARW	E_{fr}	E_{b-app}	E_{b-true}	σ_{bp}	σ_b
		(kg/m ³)	(%)	(mm)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
正角 (全試験体)									
Regular square lumber	Mean	507	22.8	2.00	10.9	9.59	10.4	30.9	43.8
(All specimens)	C.V.(%)	7.53	7.14	11.3	9.02	8.66	12.2	14.0	13.5
n = 30									
正角 (木裏荷重)									
Regular square lumber	Mean	507	23.4	1.98	10.9	9.65	10.5	30.2	44.7
(Loading on inner surface)	C.V.(%)	7.24	5.42	10.7	8.95	9.33	12.6	15.2	13.9
n = 10									
正角 (木表荷重)									
Regular square lumber	Mean	509	22.7	1.99	10.9	9.61	10.4	32.6	44.8
(Loading on outer surface)	C.V.(%)	8.64	8.21	11.7	8.66	7.09	11.9	12.0	11.8
n = 10									
正角 (柁目面荷重)									
Regular square lumber	Mean	504	22.3	2.02	11.0	9.51	10.4	29.8	41.7
(Loading on radial surface)	C.V.(%)	7.43	7.35	12.7	10.3	10.2	13.4	14.3	15.1
n = 10									
平角 (全試験体)									
Square lumber	Mean	518	27.2	2.15	11.3	9.65	11.2	28.5	38.5
(All specimens)	C.V.(%)	8.04	12.4	12.3	9.50	10.0	14.2	19.4	19.1
n = 30									

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, ρ_{test} : 試験時の密度 Density at testing, MC: 含水率 Moisture content, ARW: 平均年輪幅 Average annual ring width, E_{fr} : 縦振動法のヤング係数 Young's modulus by longitudinal vibration method, E_{b-app} : 見かけの曲げヤング係数 Apparent Young's modulus in static bending, E_{b-true} : 真の曲げヤング係数 True Young's modulus in static bending, σ_{bp} : 曲げ比例限度応力 Bending stress at the proportional limit, σ_b : 曲げ強度 Bending strength

Table 3. ASTM D2915-98 によって含水率 15% 時の値に補正した場合の曲げ強度性能

Results of strength properties of bending for lumber adjusted to 15% moisture content by ASTM D2915-98

		$E_{fr-15\%}$	$E_{b-app-15\%}$	$E_{b-true-15\%}$	$\sigma_{b-15\%}$
		(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)
正角 Regular square lumber	Mean	12.4	10.9	11.8	53.3
n = 30	C.V.(%)	9.20	8.88	12.4	13.4
平角 Square lumber	Mean	12.8	11.0	12.7	47.2
n = 30	C.V.(%)	9.51	9.93	14.3	19.1

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, $E_{fr-15\%}$: 含水率 15% 時の値に補正した縦振動法のヤング係数 Young's modulus by longitudinal vibration method adjusted to 15% moisture content, $E_{b-app-15\%}$: 含水率 15% 時の値に補正した見かけの曲げヤング係数 Apparent Young's modulus in static bending adjusted to 15% moisture content, $E_{b-true-15\%}$: 含水率 15% 時の値に補正した真の曲げヤング係数 True Young's modulus in static bending adjusted to 15% moisture content, $\sigma_{b-15\%}$: 含水率 15% 時の値に補正した曲げ強度 Bending strength adjusted to 15% moisture content

の、スパンを材せいの18倍とした3等分点4点荷重方式による値に補正した(日本建築学会, 2003)ものである。縦振動法によるヤング係数の平均値は、データ集の11.81kN/mm²に対し、正角が12.4 kN/mm²、平角が12.8 kN/mm²であり、いずれもデータ集とほぼ同等か、若干上回った。見かけの曲げヤング係数の平均値は、データ集の11.01kN/mm²に対し、正角が10.9kN/mm²、平角が11.0 kN/mm²であり、いずれもデータ集とほぼ同等の値であった。すなわち、大径丸太から採材した製材品のヤング係数は、E90以上を想定した材料であるという偏りはあるが、一般的なヒノキ製材品と比べてほぼ同等であることがわかった。

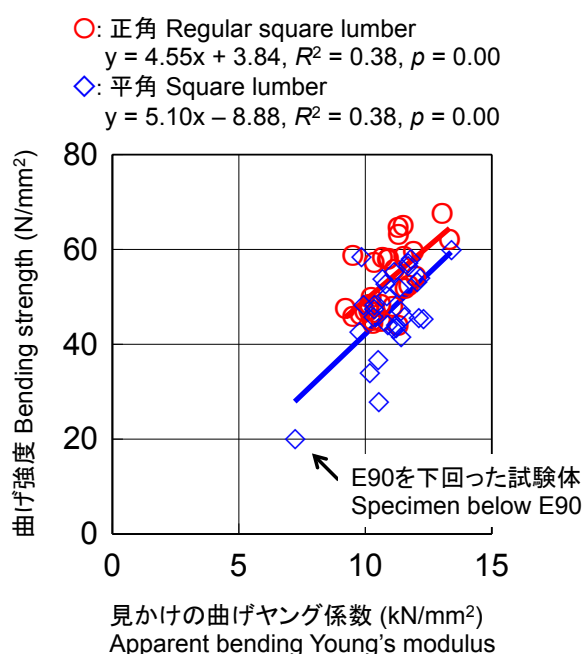


Fig. 2. 製材品の含水率補正後の見かけの曲げヤング係数と曲げ強度との関係

Relation between apparent bending Young's modulus and bending strength of lumber adjusted to 15% moisture content

曲げ強度については、含水率補正後の正角および平角の平均値はそれぞれ53.3N/mm²、47.2N/mm²となり、材せいによる寸法効果が認められた。データ集の曲げ強度の平均値は「構造用木材の強度試験法」に従って材せいを150mmに補正した値である。含水率補正後の本試験体の平均値も同様の方法で補正すると、曲げ強度の平均値は正角、平角でそれぞれ51.0N/mm²、49.1 N/mm²となり、データ集の56.9 N/mm²をいずれも下回った。すなわち、本試験体とデータ集の見かけのヤング係数の平均値はほぼ同等であるとして曲げ強度を比較すると、本試験体は一般的なヒノキ製材品よりも、曲げ強度が若干低いことがわかった。ただし、見かけの曲げヤング係数がE90の基準下限値である7.8kN/mm²を下回った平角1体を除いた試験体について、E90に対応した基準強度30.6N/mm²(建設省, 2000)と比較すると、平角1体を除いたすべての試験体が曲げの基準強度を上回った。また、正角の曲げ強度について荷重方向による明確な差は認められなかった。

3.2.2 縦圧縮強度性能

製材品の縦圧縮試験の結果をTable 4に示す。含水率が20%を上回った試験体が、正角および平角で各1体ずつあったが、それ以外の試験体はすべて含水率が20%以下であった。曲げ強度と同様の方法で、縦圧縮強度を含水率15%時の強度値に補正すると、正角および平角の平均値はともに33.4N/mm²となった。曲げ強度とは異なり縦圧縮強度の寸法効果は認められなかった。データ集の縦圧縮強度の平均値は33.1 N/mm²であるので、本試験体の縦圧縮強度は、一般的なヒノキ製材品とほぼ同等の値を示した。すべての試験体における含水率補正後の縦圧縮強度は、見かけの曲げヤング係数がE90を下回った平角1体も含め、E90に対応した圧縮の基準強度24.6N/mm²を上回った。

含水率補正を行わない状態での、正角の縦圧縮ヤン

Table 4. 製材品の縦圧縮試験の結果

Results of compressive tests parallel to the grain for lumber

		MC (%)	ρ_{test} (kg/m ³)	E_{tr} (kN/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_{cp} (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)
正角 Regular square lumber	Mean	18.7	498	10.9	10.4	15.5	26.5
n = 30	C.V.(%)	5.34	7.53	9.38	17.0	27.5	10.3
平角 Square lumber	Mean	16.9	487	11.5	-	-	29.9
n = 30	C.V.(%)	5.46	8.66	13.8			12.5

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ_{test} : 試験時の密度 Density at testing, E_{tr} : 縦振動法のヤング係数 Young's modulus by longitudinal vibration method, E_c : 縦圧縮ヤング係数 Compressive Young's modulus parallel to the grain, σ_{cp} : 縦圧縮比例限度応力 Compressive stress at the proportional limit, σ_c : 縦圧縮強度 Compressive strength parallel to the grain

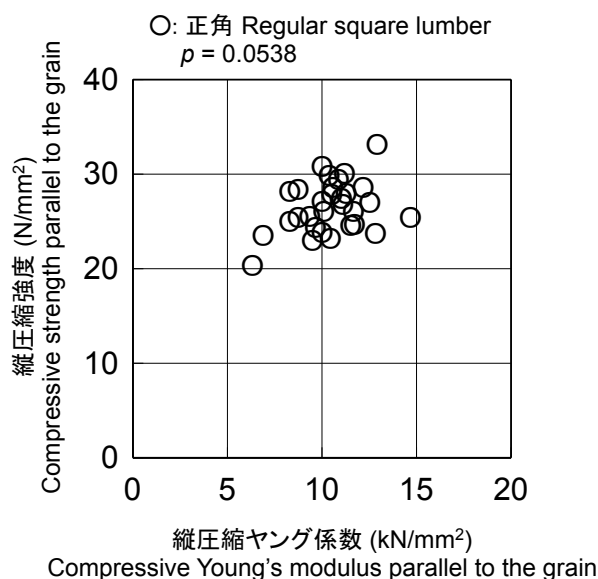


Fig. 3. 正角の縦圧縮ヤング係数と縦圧縮強度との関係
Relation between compressive Young's modulus parallel to the grain and compressive strength parallel to the grain

グ係数と縦圧縮強度との関係を Fig. 3 に示す。一般的には縦圧縮ヤング係数と縦圧縮強度との間には相関関係が認められることが多いが、本試験では、有意水準 95% において、縦圧縮ヤング係数と縦圧縮強度との間には相関関係は認められず、含水率補正を行った場合も同様に相関関係は認められなかった。

試験体数は少ないが、各試験体の分布を正規分布と仮定して、含水率補正を行った曲げおよび縦圧縮強度について信頼水準 75% における 5% 下限値を算出した (ASTM International, 2010)。正角、平角それぞれについて縦圧縮強度の 5% 下限値 / 曲げ強度の 5% 下限値を算出すると、正角では $26.6/39.9=0.67$ 、平角では $26.2/30.4=0.86$ となった。スギ正角材を対象とした同強度の比 0.84 (中井, 1988) に対して、本試験体の正角では若干小さく、平角ではほぼ同等の値であった。

3.2.3 セン断強度性能

製材品のせん断試験の結果を Table 5 に示す。心去り材による本試験の結果を心持ち正角によるヒノキの実大いす型せん断試験の結果 (井道ら, 2006; 山裾ら, 2010, 2011) と比較した。文献のせん断強度の平均値はそれぞれ 8.74N/mm^2 、 6.79N/mm^2 、 6.68N/mm^2 であり、本試験体の平均値 6.14N/mm^2 は、これらを下回った。ただし、せん断強度は密度の影響を大きく受ける (森田ら, 2006)。本試験体の密度の平均値が 491kg/m^3 なのに対して、文献の密度の平均値はそれぞれ 515kg/m^3 、 513kg/m^3 、 529kg/m^3 であり、いずれの文献値の密度も本試験の密度より大きいことが

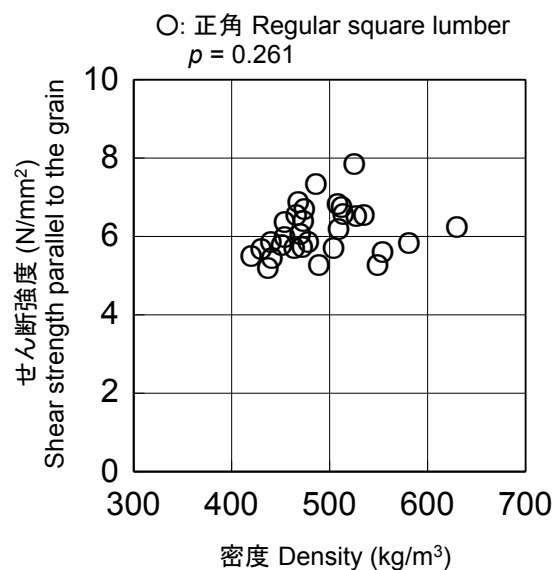


Fig. 4. 正角の密度とせん断強度との関係
Relation between density and shear strength parallel to the grain

せん断強度の違いに影響していると考えられる。正角の密度とせん断強度との関係を Fig. 4 に示す。本試験では、有意水準 95% において相関関係は認められなかったが、密度が約 550kg/m^3 以上の試験体を除くと、密度が大きくなるにつれてせん断強度も大きくなる傾向にあった。

なお、ヒノキのせん断の基準強度は、無等級材 (建設省, 2000)、目視等級区分製材、機械等級区分製材ともに 2.1N/mm^2 であるが、すべての試験体がせん断基準強度を上回った。

3.2.4 めり込み強度性能

製材品のめり込み試験の結果を Table 6 に示す。「製材のめり込みの基準強度」 (国土交通省, 2001) のヒノキの基準強度は 7.8N/mm^2 であるが、この値は本試験と試験方法および特性値の算出方法が異なるため (長尾, 2010)、単純には比較できない。そこで、本試験と同様の試験方法で行った心持ち正角によるヒノキのめり込み試験 (山裾ら, 2010, 2011) の結果を用いてめり込み強度を比較した。本試験のめり込み強度の平均値 9.81N/mm^2 に対して、文献の平均値は 10.18N/mm^2 、 11.81N/mm^2 であり、本試験の平均値は文献値よりも小さかった。ただし、せん断強度と同様、めり込み強度も密度の影響を大きく受ける (藤原ら, 2000; 森田ら, 2003; 井道ら, 2004b, 2010)。本試験の密度が 499kg/m^3 であるのに対して、文献値の密度の平均値はそれぞれ 511kg/m^3 、 517kg/m^3 であり、文献値の密度が大きいこともめり込み強度の大きさに影響してい

Table 5. 製材品のせん断試験の結果
Results of shear tests parallel to the grain for lumber

		MC (%)	ρ (kg/m ³)	τ (N/mm ²)
正角 Regular square lumber	Mean	17.0	491	6.14
n = 30	C.V.(%)	4.09	9.70	10.3

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, τ : せん断強度 Shear strength parallel to the grain

Table 6. 製材品のめり込み試験の結果
Results of compressive tests perpendicular to the grain for lumber

		MC (%)	ρ (kg/m ³)	$f_{c,90}$ (N/mm ²)	$f_{c,90,y}$ (N/mm ²)	$K_{c,90}$ (N/mm ³)
正角 Regular square lumber	Mean	18.5	499	9.81	6.00	4.52
n = 30	C.V.(%)	4.89	8.06	26.5	22.7	22.6

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, $f_{c,90}$: めり込み強度 Compressive strength perpendicular to the grain, $f_{c,90,y}$: めり込み降伏強度 Yield strength perpendicular to the grain, $K_{c,90}$: めり込み剛性 Compression perpendicular to the grain stiffness

ると考えられる。また、「製材のめり込みの基準強度」でヒノキと同じ樹種群のカラマツ (伊東ら, 2005) およびヒバ (鈴木ら, 2006) のめり込み強度の平均値は、それぞれ 9.28N/mm²、11.1N/mm² であり、本試験の平均値 9.81N/mm² はこの範囲にあった。

3.3 無欠点小試験体の強度性能

無欠点小試験体の曲げ・縦圧縮・せん断・めり込み強度試験の結果を、それぞれ Table 7～10 に示す。

見かけの曲げヤング係数および曲げ強度の平均値はそれぞれ 10.7kN/mm²、82.4N/mm² であり、「木材工業ハンドブック」(森林総合研究所, 2004) のヒノキの各平均値 9.0kN/mm²、75N/mm² を上回っていた。樹皮側の試験体と髄側の試験体との各強度値を比較すると、縦振動法によるヤング係数、見かけの曲げヤング係数、曲げ比例限度応力、および曲げ強度は、有意水準 95% において (以下すべて同様)、ともに髄側の試験体の平均値が樹皮側の試験体のそれより大きかった。一般の針葉樹材では、樹幹内半径方向に髄から樹皮側に向かって品質が向上する未成熟材部と品質が安定する成熟材部が存在し、髄付近の材よりも樹皮に近い材の方向が物理的・力学的性質が優れているとされている。しかし、通常の樹種では髄から樹皮側に向かって密度が上昇していく一方、スギ、ヒノキでは、髄付近の密度が高く、外周に向かって低下し、やがて安定する (小田, 2007 など) ことが多い。本試験体においても、樹皮側の試験体と髄側の試験体とでは、密度の平均値はそれぞれ 449kg/m³、506kg/m³ であり、樹

皮側よりも髄側の試験体の密度のほうが有意に大きかった。また、曲げ以外の縦圧縮強度、せん断強度についても同様の傾向がみられた。特に小試験体においては、密度が強度に及ぼす影響は大きく、樹皮側よりも髄側の密度が大きかったことが、樹皮側よりも髄側の各強度が大きかった原因であると考えられる。そこで、各強度値から密度の影響を除去したそれぞれの比強度 (強度 / 密度) を Table 11 に示す。すべての比強度について、樹皮側の試験体と髄側の試験体との間ではほぼ差異は認められず、ほぼ等しい値であった。髄付近の密度が同じように高いスギでは、髄付近に比べて樹皮側の比強度が高いため、例えば、渡辺ら (1964) は未成熟材部と成熟材部との境界を求めるための指標として比縦ヤング係数や比縦圧縮強度を採用し、その境界を明確化している。一方、太田 (1972) は、同様の方法でヒノキの未成熟材部と成熟材部との境界を検討した結果、スギと比べて境界の区分が困難であることを指摘している。本研究の結果はヒノキのこのような特性が影響しているものと推察される。

せん断試験の結果、せん断強度の平均値は、柾目面および板目面せん断でそれぞれ 9.29N/mm²、10.1N/mm² であり、板目面せん断の平均値が柾目面せん断のそれより有意に大きかった。

めり込み試験の結果、辺長の 5% めり込み強度は、半径方向加力および接線方向加力でそれぞれ、10.9N/mm²、9.98N/mm² であり、めり込み比例限度応力ともに半径方向加力と接線方向加力の間に有意差はなかった。めり込み強度性能についても密度との相関が高いことが

知られており、中井ら (1982) は、針葉樹 11 種について、比重と柁目面（接線方向加力）における比例限度応力および 5% めり込み強度についての実験式を示している。

$$\sigma_p = -44.8 + 211 R_u \quad (1)$$

$$\sigma_{5\%} = -91.3 + 415 R_u \quad (2)$$

ここで、 σ_p はめり込み比例限度応力、 $\sigma_{5\%}$ は辺長の 5% めり込み強度、 R_u は比重である。これらの式に本試験の接線方向加力での比重の平均値を代入すると、 $\sigma_p = 54.6 \text{ kgf/cm}^2 \div 5.35 \text{ N/mm}^2$ 、 $\sigma_{5\%} = 104 \text{ kgf/cm}^2 \div 10.2 \text{ N/mm}^2$ となる。これらの値は本試験の平均値、 5.84 N/mm^2 、 9.98 N/mm^2 に非常に近い値であり、本試

験で使用した試験体でもほぼこの実験式に従うことがわかった。

実大試験体と、実大試験体と同一の試験体から採取した無欠点小試験体について、強度比（実大試験体の強度 / 無欠点小試験体の強度）を算出した。なお、1 体の実大材から採取した無欠点小試験体が複数あるものは、各無欠点小試験体強度を平均した。その結果、曲げ、縦圧縮、せん断の強度比はそれぞれ 0.53、0.65、0.64 となった。無等級材（普通構造材）における曲げ、縦圧縮の強度比はそれぞれ 0.45、0.62 である（日本建築学会，2010）ので、本ヒノキの強度比は、無等級材の強度比に比べて、曲げが若干大きく、縦圧縮

Table 7. 無欠点小試験体の曲げ試験の結果
Results of bending tests for small clear specimens

		MC (%)	ρ (kg/m ³)	ARW (mm)	E_{fr} (kN/mm ²)	E_{b-app} (kN/mm ²)	σ_{bp} (N/mm ²)	σ_b (N/mm ²)
全試験体 All specimens n = 49	Mean	11.5	477	2.06	12.0	10.7	43.9	82.4
	C.V.(%)	4.97	11.8	27.5	11.9	11.5	14.3	12.4
樹皮側試験体 Specimens on the bark side n = 25	Mean	11.4	449	1.69	11.3	10.1	41.4	76.7
	C.V.(%)	4.70	9.69	22.6	11.9	11.8	15.7	9.67
髄側試験体 Specimens on the pith side n = 24	Mean	11.5	506	2.44	12.8	11.3	46.5	88.4
	C.V.(%)	5.32	10.7	19.2	8.83	8.21	10.7	10.6

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, ARW: 平均年輪幅 Average annual ring width, E_{fr} : 縦振動法のヤング係数 Young's modulus by longitudinal vibration method, E_{b-app} : 見かけの曲げヤング係数 Apparent Young's modulus in static bending, σ_{bp} : 曲げ比例限度応力 Bending stress at the proportional limit, σ_b : 曲げ強度 Bending strength

Table 8. 無欠点小試験体の縦圧縮試験の結果
Results of compressive tests parallel to the grain for small clear specimens

		MC (%)	ρ (kg/m ³)	ARW (mm)	E_c (kN/mm ²)	σ_{cp} (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)
全試験体 All specimens n = 50	Mean	12.7	468	2.07	12.0	30.0	40.6
	C.V.(%)	1.97	11.3	27.3	13.4	26.1	11.3
樹皮側試験体 Specimens on the bark side n = 25	Mean	12.8	446	1.70	11.2	27.8	38.4
	C.V.(%)	1.85	10.2	22.3	13.0	20.4	8.61
髄側試験体 Specimens on the pith side n = 25	Mean	12.7	490	2.43	12.9	32.2	42.7
	C.V.(%)	2.09	10.4	19.8	9.89	28.3	11.0

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, ARW: 平均年輪幅 Average annual ring width, E_c : 縦圧縮ヤング係数 Compressive Young's modulus parallel to the grain, σ_{cp} : 縦圧縮比例限度応力 Compressive stress parallel to the grain at the proportional limit, σ_c : 縦圧縮強度 Compressive strength parallel to the grain

Table 9. 無欠点小試験体のせん断試験の結果

Results of shear tests parallel to the grain for small clear specimens

			MC (%)	ρ (kg/m ³)	τ (N/mm ²)
柁目面 Radial surface	全試験体	Mean	11.9	462	9.29
	All specimens	C.V.(%)	1.77	11.4	14.7
	n = 49				
	樹皮側試験体	Mean	12.0	438	8.77
	Specimens on the bark side	C.V.(%)	1.59	9.82	12.4
	n = 25				
板目面 Tangential surface	全試験体	Mean	11.9	463	10.1
	All specimens	C.V.(%)	1.87	10.8	15.9
	n = 49				
	樹皮側試験体	Mean	11.9	441	9.35
	Specimens on the bark side	C.V.(%)	1.70	10.2	13.1
	n = 25				
	髓側試験体	Mean	11.8	486	10.8
	Specimens on the pith side	C.V.(%)	2.05	9.42	15.0
	n = 24				

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, τ : せん断強度 Shear strength parallel to the grain

Table 10. 無欠点小試験体のめり込み試験の結果

Results of compressive tests perpendicular to the grain for small clear specimens

			MC (%)	ρ (kg/m ³)	σ_{ep} (N/mm ²)	$\sigma_{c5\%}$ (N/mm ²)
半径方向加力 Loading in the radial direction n = 25		Mean	12.4	464	5.52	10.9
		C.V.(%)	2.02	11.2	28.5	22.3
接線方向加力 Loading in the tangential direction n = 25		Mean	12.4	471	5.84	9.98
		C.V.(%)	2.12	10.2	19.9	19.1

n: 試験体数 Number of specimens, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, σ_{ep} : めり込み比例限度応力 Compressive stress perpendicular to the grain at the proportional limit, $\sigma_{c5\%}$: 辺長の 5% めり込み強度 Compressive strength when compressed to 5% of side length

Table 11. 各強度における樹皮側試験体と髓側試験体との比強度 (強度 / 密度) の比較 (平均値)

Comparison of average specific strength between specimens on the bark and pith sides, respectively, at each strength

	曲げ Bending	縦圧縮 Compression parallel to the grain	せん断 (柁目面) Shear parallel to the grain (Radial surface)	せん断 (板目面) Shear parallel to the grain (Tangential surface)
樹皮側試験体 Specimens on the bark side	0.171	0.0865	0.0200	0.0212
髓側試験体 Specimens on the pith side	0.175	0.0876	0.0202	0.0222

はほぼ同程度であった。ただし、この結果は含水率調整をしていない値であるので、気乾状態で比較した場合は、実大試験体の強度が増加するため強度比も増加すると考えられる。せん断について、無欠点小試験体の採取位置やせん断面積は若干異なるものの、本試験と同じ試験方法で行った各樹種の結果と比較すると、スギ、ベイマツ、ベイツガ、ベイヒバにおける各強度比は 0.85、0.80、0.79、0.64 (井道ら, 2006, 2011) であり、本ヒノキの強度比 0.64 はベイヒバと同程度であった。

4. まとめ

本研究は、今後伐採量が増加すると見込まれる大径ヒノキ丸太、およびそれから採材される心去り製材品の強度性能を明らかにすることを目的とした。また、強度試験後の心去り製材品の非破壊部分から、髄側および樹皮側において無欠点小試験体を採取して各強度試験を行い、各強度性能および試験体の採取位置の違いによる強度性能の違いについて検討した。結果を以下に示す。

ヒノキ大径丸太 433 本について縦振動法によるヤング係数を測定した結果、ヤング係数の平均値は 9.14kN/mm^2 であり、一般的な中小径木に比べて高くはないことがわかった。これらの丸太のうち、「製材の日本農林規格」の機械等級区分構造用製材の等級が E90 以上のものを得ることを目標に採材した、心去り正角 30 体、心去り平角 30 体について、各強度試験を行った。曲げ試験の結果、縦振動法によるヤング係数および見かけの曲げヤング係数の平均値は、一般的なヒノキ製材品とほぼ同等であった。曲げ強度は、ヤング係数が本試験体とほぼ同等である一般的なヒノキ製材品と比べると、若干低かった。縦圧縮試験の結果、縦圧縮強度は、一般的なヒノキ製材品とほぼ同等の値を示した。せん断試験およびめり込み試験の結果、両強度は、心持ち材を用いた文献値よりも低い値を示した。ただし、両強度に大きな影響を及ぼす密度が文献値より小さかったことも上記の要因と考えられた。

基準強度に対しては、曲げ、縦圧縮、せん断ともほぼすべての試験体が当該基準強度を上回った。めり込みの基準強度の算出方法は本試験方法とは異なるが、本試験と同じ方法で行ったヒノキと同じ樹种群であるカラマツおよびヒバに対して、ヒノキの平均値は両樹種の平均値の範囲内にあった。

無欠点小試験体の各強度試験の結果、樹皮側から採取した試験体よりも髄側から採取した試験体の方が、密度、ヤング係数、曲げ強度、縦圧縮強度、せん断強度が大きかった。ただし、比強度で比較すると、樹皮側の試験体と髄側の試験体との間には各強度ともほぼ差異は認められなかった。実大試験体と無欠点小試験

体の強度から強度比を算出した結果、無等級材 (普通構造材) の曲げ、縦圧縮の強度比と比較すると、本試験体の強度比は、曲げが若干大きく、縦圧縮はほぼ同程度であった。

謝辞

本研究は松井建設 (株) との共同研究「大径ヒノキ丸太及び採材された製材品の強度特性の解明」(平成 20 ~ 21 年度) で実施した。また、東長寺 (福岡市博多区) において、2011 年に建立した五重塔に使用された材料の一部を試験体として供した。

引用文献

- ASTM International (1998) "Standard practice for evaluating allowable properties for grades of structural lumber", ASTM D2915-98.
- ASTM International (2010) "Standard practice for sampling and data-analysis for structural wood and wood-based products", ASTM D2915-10.
- 藤原拓哉・長尾博文・東野 正・橋爪丈夫・池田潔彦・山吉栄作・飯島泰男 (2000) 構造用木材のめり込み強度性能, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 50, E3008.
- 井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2004a) 実大いす型せん断治具を用いたスギ製材品のせん断強度の評価, 木材学会誌, 50, 220-227.
- 井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2004b) 試験条件の違いがベイマツ実大材のめり込み性能に及ぼす影響, 森林総合研究所研究報告, 3(4), 349-363.
- 井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2006) 試験方法の違いによる製材品のせん断性能の評価, 木材学会誌, 52, 293-302.
- 井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2010) 超音波伝播法によるめり込み性能の評価, 木材工業, 65, 448-451.
- 井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2011) ベイヒバ無欠点小試験体の強度性能 —曲げ、縦圧縮、せん断、めり込み—, 森林総合研究所研究報告, 10(3), 173-181.
- International organization for standardization (2005) "ISO 13910 Structural timber – Characteristic values of strength-graded timber – Sampling, full-size testing and evaluation", ISO, 22pp.
- 伊東嘉文・吉田孝久・橋爪丈夫 (2005) カラマツの乾燥条件別縦圧縮及びめり込み強度試験, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 55, E70945.
- 建設省 (2000) "木材の基準強度 F_c 、 F_t 、 F_b 及び F_s を定める件", 平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第

- 1452 号 .
- 国土交通省 (2001) “特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件”, 平成 13 年 6 月 12 日国土交通省告示第 1024 号 .
- 強度性能研究会 (2005) “「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集 <7>”, 独立行政法人森林総合研究所構造利用研究領域内強度性能研究会事務局編, 56pp.
- 森田秀樹・藤元嘉安・飯村 豊・荒武志朗 (2003) 宮崎県産低曲げヤング係数スギラミナのめり込み及びせん断性能, 木材工業, 58, 311-317.
- 森田秀樹・藤元嘉安・村瀬安英 (2006) 宮崎県産低曲げヤング係数スギラミナの実大ブロックせん断性能評価, 木材工業, 61, 52-57.
- 農林水産省 (2007) “製材の日本農林規格”, 平成 19 年 8 月 29 日農林水産省告示第 1083 号 .
- 日本建築学会 (2003) “木質構造限界状態設計指針 (案)・同解説”, 日本建築学会編, 丸善, 336-359.
- 日本建築学会 (2010) “木質構造基礎理論”, 日本建築学会編, 丸善, 40-41.
- 日本規格協会 (2009) “JIS Z 2101 木材の試験方法”, 日本規格協会, 66pp.
- 長尾博文 (2010) 製材のせん断及びめり込み基準強度の誘導根拠についての検討, “木造長期優良住宅の総合的検証事業 材料分科会 平成 21 年度 報告書”, 木造長期優良住宅の総合的検証事業 材料分科会, 50-53.
- 中井 孝 (1988) 製材, 木質構造研究会編著 “木質構造建築読本 ティンバーエンジニアリングのすべて”, 井上書院, 122.
- 中井 孝・山井良三郎 (1982) 日本産主要樹種の性質 日本産主要 35 樹種の強度的性質, 林業試験場報告, 319, 13-46.
- 小田一幸 (2007) 生物材料としての特徴, 日本木材学会編 “木質の物理”, 文永堂出版, 9-10.
- 太田貞明 (1972) スギ・ヒノキ樹幹内における未成熟材の力学特性に関する基礎的研究, 九州大学農学部演習林報告, 45, 1-80.
- 林野庁 (2011) “平成 23 年度版 森林・林業白書”, 林野庁編, 全国林業改良普及協会, 10.
- 森林総合研究所 (2004) “木材工業ハンドブック”, 改訂 4 版, 森林総合研究所監修, 丸善, 192-195.
- 鈴木修治・松元 浩 (2006) 能登ヒバのめり込み強度性能, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 56, PE009.
- 渡辺治人・堤 寿一・松本 昴・太田貞明 (1964) 未成熟材に関する研究 (第 2 報) スギ樹幹内の比圧縮強度と比圧縮ヤング率の分布, 木材学会誌, 10, 125-130.
- 山裾伸浩・岸本勇樹 (2010) 紀州材の強度性能に関する研究 和歌山県産スギ・ヒノキのせん断強度及びめり込み強度 (1), 和歌山県林試業報, 67, 21-24.
- 山裾伸浩・岸本勇樹 (2011) 紀州材の強度性能に関する研究 (第 2 報) 和歌山県産スギ・ヒノキのせん断強度及びめり込み強度 (2), 和歌山県林試業報, 68, 33-36.

論文 (Original article)

岩手・宮城内陸地震災害地における 2008 年の気象と山地積雪水量分布の特徴

安田 幸生^{1)*}、野口 正二¹⁾、三森 利昭²⁾

Weather conditions and distribution of snow water equivalent around the mountainous disaster area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake

Yukio YASUDA^{1)*}, Shoji NOGUCHI¹⁾ and Toshiaki SAMMORI²⁾

Abstract

The 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake caused many sediment-related disasters in the mountainous region of Mt. Kurikoma. In this study, we analyze the evolution of weather in the disaster area using meteorological mesh data estimated from Automated Meteorological Data Acquisition System (AMeDAS) weather station data, and describe weather conditions before, during and after the earthquake. Although annual mean air temperature in 2008 was almost the same as the quasi-normal value (the normal for the 10 years from 1998–2007), air temperatures from January to February and from March to April were lower and higher than this value, respectively. Precipitation was extremely low around the day of the earthquake (June 14). The period of low precipitation continued for a month after June 14. There were no heavy rainfall events for a month before the earthquake; however, average total precipitation exceeded 200 mm in this period, higher than the quasi-normal value in the same period. From observational data of Radar/Raingauge-Analyzed Precipitation, the tendency of precipitation distribution in the disaster area was such that the local maximum value was frequently found in that area, and accumulated precipitation was greater than that in the surrounding area. Estimated calculations showed snow water equivalent in winter 2008 was greater than that in 2007, especially at altitudes over 1000 m. Although the higher air temperature from March to April 2008 accelerated snow melt in the area, snow cover remained locally at high altitude until just before the earthquake. Consequently, at the time of the earthquake, soil moisture in that region remained high, owing to snowmelt and rainfall.

Key words : AMeDAS mesh data, distribution of precipitation, distribution of snow water equivalent, Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, radar/raingauge-analyzed precipitation, weather condition

要旨

2008年に発生した岩手・宮城内陸地震では、山岳地域において土砂災害が多く発生した。本研究では、アメダスメッシュ化データを用いて2008年の気象経過についてまとめ、地震発生時およびその前後の気象条件を明らかにした。2008年の年平均気温は準平年値(1998～2007年の10年間平均値)と同等であったが、1月から2月の気温が低く、3月から4月の気温が高い傾向にあった。地震発生日(6月14日)前後はきわめて降水量が少なく、またその状態は地震発生後一ヶ月間続いていた。地震発生前の一ヶ月間に大きな降雨イベントはなかったが、災害地におけるこの期間の積算降水量は平均で200 mmを超えており、この量は同期間の準平年値を上回っていた。解析雨量データによって、地震発生前後における準平年値を超える降雨イベントについて、その降水量分布特性を調べた結果、降水量分布は災害地付近で極大域を持つことが多く、近隣の地域よりも降水量が多くなる傾向が得られた。災害地における冬期積雪水量を推定した結果、2008年の積雪水量は2007年よりも多く、とくに標高1000 m以上の高標高地域において顕著であった。2008年は、3月から4月にかけての高温傾向によって融雪の進行が早まったが、高標高域では地震発生直前まで局所的に積雪が残ったものと思われ、地震発生時、この部分の土湿は融雪と降雨の影響により湿潤状態にあったと考える。

キーワード: アメダスメッシュ化データ、降水量分布、積雪水量分布、岩手・宮城内陸地震、解析雨量、気象経過

原稿受付：平成23年11月28日 Received 28 November 2011 原稿受理：平成24年6月18日 Accepted 18 June 2012

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

2) 森林総合研究所 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, e-mail: yassan@ffpri.affrc.go.jp

1. はじめに

2008年6月14日午前8時43分に発生した岩手・宮城内陸地震によって、震源に近い岩手・宮城・秋田県境の栗駒山周辺地域において人的被害を含む多数の被害が発生した。この地震の被害はおもに、山地での崩壊とそれにとまなう土石流などの土砂災害であった(東北森林管理局, 2009; 三森ら, 2010)。このため、本地震の災害地における崩壊・地すべりの特徴や発生箇所・規模に及ぼす地形および地質の影響が調査され、報告されている(井口ら, 2010; 三森ら, 2010)。また崩壊には至らなかったものの、稜線部において山体に亀裂が生じ、斜面が不安定化している箇所が複数存在していることも確認されている(村上ら, 投稿中)。

これらの崩壊や地すべりの発生の直接要因は地震動であるが、降雨や融雪水による土壌水分量や地下水位の変化も、崩壊時の地盤強度や土砂移動形態などに影響を与える(高谷, 2008)。また地震後について、井良沢ら(2008)は降雨などによる土砂流出の危険性が今後も長期間にわたって継続すると予想している。村上ら(投稿中)は、地震によって不安定化した斜面が、少ない降水量によっても崩壊しやすくなっていることを示している。

野口ら(2010)は震源近傍のアメダスデータ(降水量、積雪深、気温)を用いて災害地周辺における土壌の水分状態(土湿)の推定を試みている。この際、災害地域が積雪地域であることを考慮し、先行降水指数(antecedent precipitation index: API)に融雪水量を組み入れた先行土湿指数(antecedent soil-moisture index: ASI)を提案し、土湿指標とした。地震前後と豪雨時および融雪時の先行土湿を比較した結果、地震前後の土湿が比較的乾燥した状態であったことから、災害の被害をより大きいものにできなかったと考察している。

気象要素である降水(降雨・降雪)量は崩壊・地すべりやその後の土砂移動の誘因となり得るが、これまで本地震の災害地における気象をまとめた報告はない。よって、2008年における災害地周辺の気象経過をまとめ、地震発生年における気象経過(とくに降水量)に注目しつつ岩手・宮城内陸地震を見直してみることに意味があると考えられる。また、地震発生日は6月14日であることから、東北地方の積雪山岳地域では消雪直後あるいは融雪末期に当たると考えられる。冬期の降水は積雪によって地表に貯えられ、融雪期に多量の融雪水として地面に供給される。このため積雪分布とその時間変化は、春から初夏にかけての土壌水分量や地下水位に大きく影響する。冬期における山地積雪水量分布の状態を把握することは、本地震による土砂災害の発生状況を検討する上で重要だと考える。

そこで本報告では、メッシュ化されたアメダスデータを用いて災害地における2008年の気温・降水量・

日照時間の経過を半旬ごとにまとめ、過去10年間の平均値(準平年値)との比較を行った。同時にレーダーアメダス解析雨量(解析雨量)データを用いて、災害地周辺における地震発生日前後の降水量分布の特徴を調べた。また解析雨量に基づいて、2007年冬期と2008年冬期の山地積雪水量分布を推定し、両年の比較を行った。以上のデータ解析より、災害地における2008年の気象経過と山地積雪水量分布から、岩手・宮城内陸地震による土砂災害について考えてみたい。

2. 方法

2.1 アメダスデータのメッシュ化

気象庁地域気象観測システム(Automated Meteorological Data Acquisition System: AMeDAS, アメダス)は約21 km間隔で全国に整備されている(気象庁, 2012)。しかし、岩手・宮城内陸地震の災害地の多くは山岳地域に位置しており、高標高域において稼働中のアメダス観測地点はない(Fig. 1)。また災害地の地形は複雑であるため、点データであるアメダスの観測値が災害地の気象状況をどこまで代表できるのかは不明である。そこで本研究では、清野(1993)によって開発されたアメダスデータのメッシュ化プログラム Ver.5.2(農業環境技術研究所職務作成プログラム P 第4068号-1)によって、災害地周辺のアメダス観測値を三次メッシュ(約1 km × 1 km)に展開したデータを解析に用いた。このアメダスデータメッシュ化プログラムでは「平年差の距離重み付け法」によってデータのメッシュ展開が行われる(清野, 1993)。この方法では、メッシュ気候値2000(気象庁, 2002)を基礎データとして、対象メッシュ周辺にある複数のアメダス観測点の観測値と平年値との差を求め、これを距離の逆数で重み付けすることで対象メッシュのデータ値を推定する。メッシュ化可能な気象要素は、日単位の降水量・気温(平均・最高・最低)・日照時間・日射量である。なお、降水量に関しては、その分布が連続的ではないため、平年差を用いずに距離の重み付けのみによってメッシュ値が決められる(清野, 1993)。本研究では、降水量・平均気温・日照時間のメッシュデータを解析に使用した。

Fig. 1に災害地周辺のアメダス観測点および各メッシュの平均標高を示した。最も高いメッシュ標高は、栗駒山頂を含むメッシュに隣接したメッシュの1481 mである。図中の青線は地震による崩壊・地すべりが多く発生した範囲(森林総合研究所, 2008)に合わせて設定した領域である。以後、本報では、この青線で囲まれた領域(900メッシュ: 約900 km²)を災害地と呼び、この領域の領域平均値を災害地の値とする。また、災害地周辺とはFig. 1の図示領域を指すこととする。この図示領域は岩手・宮城・秋田県の県境をほぼ中心として、宮城・秋田・山形県境付近も含む

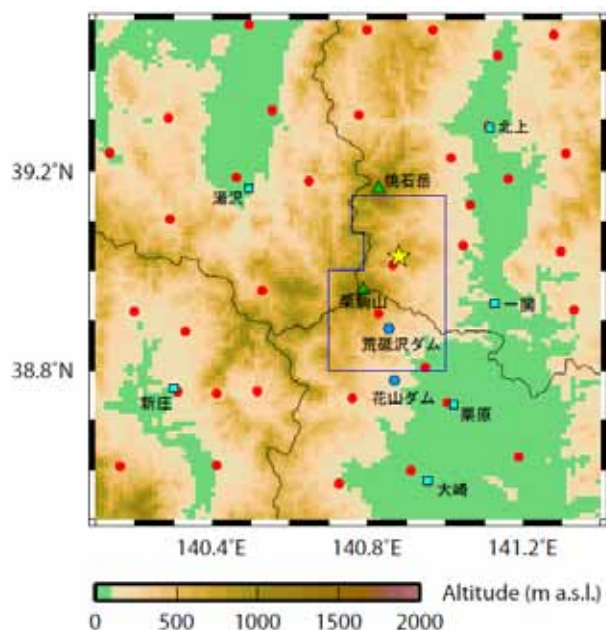


Fig. 1. 2008 年岩手宮城内陸地震の災害地周辺のアメダス観測地点 (●) とメッシュ標高分布。星印は震源、青線は災害地の範囲を表す。
Distribution of AMeDAS stations (●) and mesh altitude around disaster area of 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake. Star is epicenter, and blue line outlines earthquake disaster area.

東経 140.1°E から 141.4°E、北緯 38.5°N から 39.5°N の範囲 (12480 メッシュ: 約 12,480km²) である。なお栗駒山頂は、岩手・宮城・秋田県境のわずかに東側 (140.788°E ; 38.961°N 付近) の岩手・宮城県境に位置している。

2.2 解析雨量

災害地周辺の降水量と積雪量の分布を調べるために、気象庁が提供している解析雨量データを使用した。解析雨量は、国土交通省河川局・道路局と気象庁が全国 20 ヶ所に設置している気象レーダーの測定から得られた降水量推定値を、アメダス観測点での地上降水量によって補正して作成されている (新保, 2001a ; 立平, 2006 ; 気象庁, 2012)。降水量分布のメッシュ区切りは、2006 年より 1km 四方となっており、各メッシュの大きさはアメダスメッシュ化データと一致する。解析雨量データには、30 分毎に 1 時間降水量が収録されている。

解析雨量は、その空間分解能の高さから、降水量分布を把握する上で大変有用である。しかし、解析雨量データの降水量は実際に観測された地上降水量とはかなり異なる値を示すことがあり (気象庁予報部予報課, 1995)、また最近では、冬季の解析雨量は山岳域の降水量 (降雪量) を過小評価しているという問題も指摘されている (山口ら, 2010)。本研究では、降水量分

布や積雪水量分布の推定に解析雨量データを用いているが、そのおもな理由は: アメダス等の気象観測点のない山岳地域の降水量分布を知ることが出来ること、同様の空間・時間分解能を持つデータは他に存在しないという現状では極めて実用的なこと、この解析によって得られる結果は防災上重要だと考えること、である。

2.3 積雪水量の推定

本研究では、積雪水量を次のように推定する (朝岡ら, 2007)。

$$SWE_t = SWE_{t-1} + SF - M \quad (1)$$

ここで SWE は積雪水量 (mm)、 SF は日降雪水量 (mm)、 M は日融雪量 (mm) であり、 t は降雪初日からの日数、 $t-1$ はその前日を表す。このため積雪水量の推定のためには、まず降雪水量と融雪水量を求める必要がある。

降雪水量は、解析雨量のデータを基に、小川・野上 (1994) が提案した冬期の降水形態判別を用いて推定した。この判別法では「降水が 50% の確率で個体降水 (降雪) としてもたらされる際の地上の日平均気温」を判別気温とし、地域毎の判別気温が示されている。本研究では東北地方西部と東北地方東部の判別気温を用いて、各メッシュの日平均気温 (アメダスメッシュ化データ) が判別気温より低い日の降水を「降雪」と判別し、その量を日降雪水量とした。なお小川・野上 (1994) では東北地方の降雪期間を 11 月から 4 月として月毎に判別気温を推定しているが、東北地方の山岳地域では 10 月と 5 月も降雪となる可能性があるため、本研究では 10 月から 5 月を降雪期間として降水形態の判別を行った。このとき、11 月から 4 月の判別気温は月毎の値をそのまま採用し、10 月と 5 月の判別気温については、それぞれ 11 月と 4 月のものを用いた。なお、東北地方西部・東部の各月の判別気温は 1.4 ~ 2.6℃ の範囲であった (小川・野上, 1994)。

日融雪量の推定では、河島ら (2002) が提案した簡易推定法である改良型ディグリー・デー法を用いた。また、野口ら (2010) と同様に地表面と接している積雪層底面での底面融解量あるいは地面融雪量 (太田, 1989; 新井, 1994) を考慮した。融雪量は、本来、積雪層の熱収支によって評価されるべきであるが、このためには大がかりな現地観測を必要とする。一方、ディグリー・デー法は融雪量と気温との間に線形関係があると仮定し、気温データのみで融雪量を推定する経験的な方法である。この方法は、限られた気象データしか得られない場合や広域推定を行う場合に実用的である (朝岡ら, 2007)。

改良型ディグリー・デー法では、気温とディグリー・デー・ファクターの与え方が従来法と異なっており、日融雪量 M (mm day⁻¹) は、次式によって求める。

$$M = \frac{k}{2} (T_{ay} + T_{at}) + a \quad (2)$$

ここで、 k はディグリー・デー・ファクター ($\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$)、 T_{ay} と T_{at} は、日融雪量を推定する日の前日の日平均気温と当日の日平均気温 ($^\circ\text{C}$)、 a は底面融解量 (mm day^{-1}) である。

日融雪量推定では、まず融雪開始日 (式 (2) の右辺第 1 項がゼロを超える日) を決定するために、FD-index (First Discharge Index) を計算する：

$$FD = \sum T_a \quad (3)$$

ここで、 T_a は日平均気温 ($^\circ\text{C}$) である。計算では、①日平均気温がマイナスの場合は $T_a = 0$ として扱う、②3日間連続して日平均気温がマイナスの場合は FD 値を 0 に戻す、という条件を設定する。本研究では、 $FD = 10 \text{ } ^\circ\text{C day}$ を閾値として (河島・和泉, 2008)、 FD が閾値以上になった日を融雪開始日とした。また、ディグリー・デー・ファクター k ($\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$) は次式によって決定した (河島・和泉, 2008)。

$$k = 0.039x + 2.3 \quad (4)$$

ここで、 x は融雪開始日をユリウス日数 (1月1日を1として順次積算) で表したものである。

日融雪量の推定は、メッシュ化されたアメダス気温データを用いて式 (2) によって行われるが、 FD 値が閾値未満の期間は $M = a$ 、つまり融雪は底面融解量のみとした。つまり、

$$\begin{cases} M = \frac{k}{2} (T_{ay} + T_{at}) + a & (FD \geq 10) \\ M = a & (FD < 10) \end{cases} \quad (5)$$

である。新井 (1994) によれば、 k 値は $4 \sim 6 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ が適当である (ただし現実の地形等を考慮することが重要だと指摘)。本研究では、災害地のアメダス地点 (祭時と駒ノ湯) の消雪日と推定消雪日を近づけるために k 値に上限を定め、 $k \leq 5 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ とした。また融雪は1月1日より前の期間でも生じることから、今回は10月から12月の k 値を $k = 4 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ と仮定して計算を行った。この k 値は、新井 (1994) で報告されている本州の標高 1000 m における10月と11月の値 (水平面) を参考したものである。底面融解量については、本研究では $a = 0.5 \text{ mm day}^{-1}$ とし (新井, 1994)、一定値を仮定した。

積雪水量推定は、以上の方法を用いて 1km メッシュ単位で行われた。なお、この方法による積雪水量推定の妥当性については、付録 A において検討する。

2.4 使用データと集計期間

アメダスデータのメッシュ化は 1998 年から 2008 年まで行った。使用データは気象庁が編集したアメダス再統計値 (1998 ~ 2004 年)、アメダス年報 (2005 ~ 2008 年) である。解析雨量データも同じく、気象庁編集の解析雨量年報 (2007 ~ 2008 年) を用いた。いずれのデータも (財) 気象業務支援センターから発行されている。

本報告では、データの集計期間として半月を使用しているが、各期間は気象庁気象観測統計の指針 (気象庁, 2005) にしたがって定めた。半月には暦日半月を用い、各月を1日から5日ごとに区切って第1半月から第6半月とした。ただし、第6半月は26日からその月の末日までとした。

災害地における平均的な気象条件を得るために、各メッシュにおいて半月ごとに、1998 年から 2007 年までの 10 年間平均値を求めた。この平均値を準平年値 (Quasi-normal) とし、準平年値との差を準平年差 (Quasi-anomaly) と呼ぶことにする。

これ以降の解析では、2 種類の降水量データを使用しているため、ここで確認をしておく。3.1 節の気象経過の解析では、長期トレンドの抽出のためアメダスメッシュ化データの降水量を使用した。また 3.2 節以降の解析では、降水量分布や積雪水量分布の詳細を把握するために解析雨量データを使用した。

3 結果と考察

3.1 災害地における 2008 年の気象経過

Fig. 2 にアメダスメッシュ化データから求めた災害地における 2008 年の気象経過を準平年値と合わせて半月ごとに示した。気温と日照時間は半月平均値、降水量は半月積算値であり、データ値はすべて災害地の領域平均値で表されている (降水量の場合は領域平均積算値となる)。2008 年における災害地の年平均気温は 8.7°C で、準平年値 (8.7°C) と同じであった。年降水量は 1672.0 mm で、準平年値 (1996.9 mm) の約 84 % であった。年平均日照時間は 3.7 h で、準平年値 (3.7 h) と同じであった。年間値でみると、2008 年は気温・日照時間とも準平年並であったが、降水量がやや少なめの年だった。

気温

地震発生時 (6 月第 3 半月) の災害地の平均気温は準平年値よりも 0.8°C ほど低かった (Fig. 2a, b)。その後、6 月中はやや低温のまま推移するが、7 月に入ると第 5 半月まで高温傾向であった。8 月以降も高温と低温を繰り返すが、とくに 8 月第 5 半月の気温低下が大きかった。このときの平均気温は 15.0°C で、準平年値よりも 5.6°C も低く、9 月下旬並みの涼しさであった。8

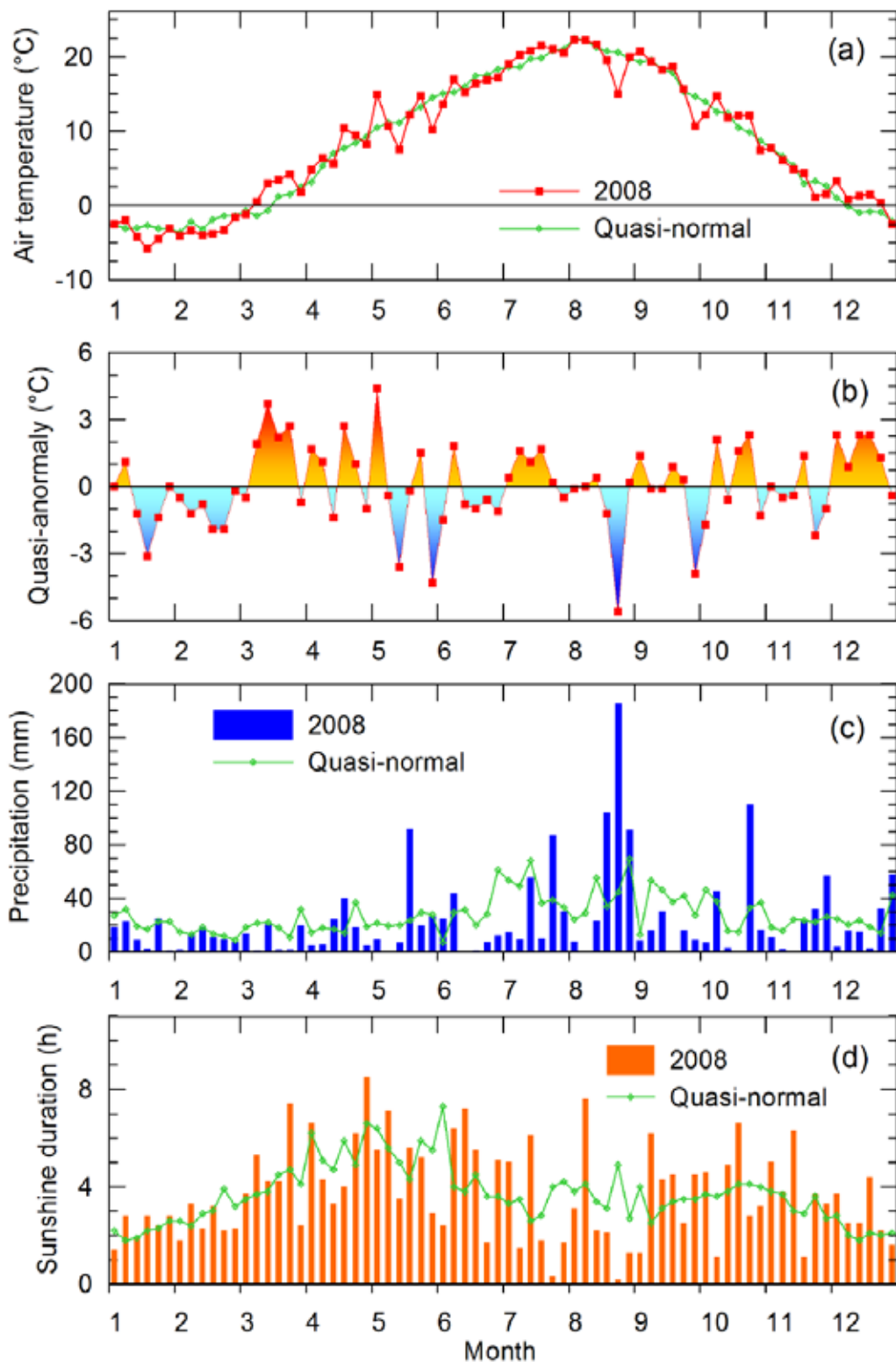


Fig. 2. アメダスメッシュ化データから求めた災害地における 2008 年の気候経過と準平年値
(a) 気温、(b) 気温の準平年差、(c) 降水量、(d) 日照時間 (気温と日照時間は半月平均値、降水量は半月積算値)

Weather conditions obtained from 2008 AMeDAS mesh data, and quasi-normal values in the disaster area: (a) Air temperature, (b) quasi-anomaly of air temperature, (c) precipitation, (d) sunshine duration. Calculated data are pentad-mean values for air temperature and sunshine duration, and pentad-integrated values for precipitation.

月第5半旬は2008年で最も雨が多かった期間であり (Fig. 2c)、災害地にとってこの季節としては冷たい大雨となった。

地震発生前の気温経過で特徴的な点は、1月と2月の低温と、3月と4月の高温が挙げられる。この傾向は、Fig. 2bの準平年差の経過をみると分かりやすい。1月第3半旬から3月第1半旬にかけては低温の状態が継続し、準平年値を上回ることにはなかった。しかしその後、3月第2半旬から5月第1半旬にかけては高温の日が多かったことがわかる。3月から4月は災害地における融雪期と重なる。この時期の気温が高いということから、災害地における融雪が平年よりも促進されたものと考えられる。

降水量

降水量の経過では、災害地では地震発生の直前直後にほとんど雨が降らなかったことがわかる (Fig. 2c)。地震発生は6月14日なので6月第3半旬の後半に当たるが、6月の第3半旬および第4半旬における災害地の積算降水量はそれぞれ0.1と0.7 mmであった。2008年の災害地において、2半旬の積算降水量が1 mm以下だったケースは他になく、きわめて雨の少なかったときに地震が発生したといえる。地震発生後も降水量の少ない状況が続いており、8月第4から第6半旬にかけてまとまった雨が降るまで、準平年値を上回ったのは1回だけであった (7月第5半旬)。とくに、6月第3半旬から7月第2半旬までの一ヶ月間の降水量は少なく、積算降水量は44.1 mmであった。この量は、2008年の6半旬積算降水量では最小であった。

地震発生前の降水量の経過をみると、準平年値よりも冬期の降水量がかなり少なかったことがわかる。1月から3月までの積算降水量は準平年値で344.2 mmであるが、2008年は197.6 mmであった。仙台管区気象台によれば2008年冬の東北地方は少雪であった (仙台管区気象台, 2008)。山岳地域を多く含む災害地においても同様であったかどうかは不明であるが、冬期の降水量が少なかったことから、平年よりも降雪が少なかったと思われる。

地震発生直前の一ヶ月間 (5月第3半旬から6月第2半旬の6半旬) の積算降水量は、200 mmを超えていた (Fig. 2c)。この量は、2008年でみると実は少ない降水量ではない。8月後半のまとまった雨を含む期間を除けば、2008年における6半旬積算降水量としては最大であった (すべてを含むと72個の6半旬積算降水量のうち上から8番目)。準平年値では、7月までは6半旬積算降水量が200 mmを越えることはなく、この時期としては比較的降水量が多かったことがわかる。野口ら (2010) は地震発生前30日間の先行土湿指数の解析から、地震発生日の土壌水分状態は湿潤では

なかったと報告している。これは、一回の降水量がそれほど大きくなかったことや92.0 mmの積算降水量を記録した期間 (5月第4半旬) が地震発生日よりも25日程前だったことに起因している。

日照時間

日照時間の多寡が、土砂災害に直接影響を及ぼすことはないと考えるが、2008年の天候のまとめとして Fig. 2dにその経過を示しておく。まず地震発生前後 (6月第2半旬から第4半旬) は準平年値と比べて多照であったことがわかる。地震後の7月と8月は降水量と連動して準平年値よりも寡照の期間が多かったが、9月以降は反対に多照の期間が多くなった。地震前の経過をみると、3月は準平年よりも多照だった期間が多く、月平均値でも12%ほど日照時間が長かった。4月は変動が大きいが、月平均では準平年並みであった。3月と4月の日照が少なくなかったことは、この時期の高温傾向と合わせて、災害地の融雪促進に適した条件だったといえる。

3.2 災害地における地震発生前後の降水量分布

地震発生前後の降雨イベントについて、災害地における降水量が準平年値を上回るイベントをいくつか取り上げ、災害地周辺の降水量分布を調べた。降水量データには2008年解析雨量年報を用いた。取り上げた降雨イベントは2008年5月第4半旬、6月第1～第2半旬、8月第4～第5半旬の3期間である (Fig. 2c)。なお以下の降水量分布図 (Fig. 3a～3c) では、降水量分布域の極大を判別しやすくするため、データ値のスケールが図ごとに異なっている。

2008年5月第4半旬の降水量分布

Fig. 3aに災害地周辺の2008年5月第4半旬 (5月16～20日) における積算降水量分布図を示す。この降雨イベントは5月20日の降雨が主であった。図示領域全体としては、南北の県境に連なる奥羽脊梁山脈よりも東側 (太平洋側) で降水量が多くなる傾向があった。災害地 (黄線枠内) においては、ほぼ全域で70 mm以上の降水量が観測された。降水量の極大域は災害地とほぼ一致するため、100 mm以上の降水域も多かった。とくに岩手・宮城・秋田県境近辺での降水量が集中して多く、200 mmを超えていた。この県境の宮城県側ではさらに降水量が多く、300 mmを超えるメッシュも確認できた。災害地における最大値は309.8 mmであった。

2008年6月第1～第2半旬の降水量分布

Fig. 3bに2008年6月第1半旬から第2半旬 (6月1～10日) までの積算降水量分布図を示す。この降雨

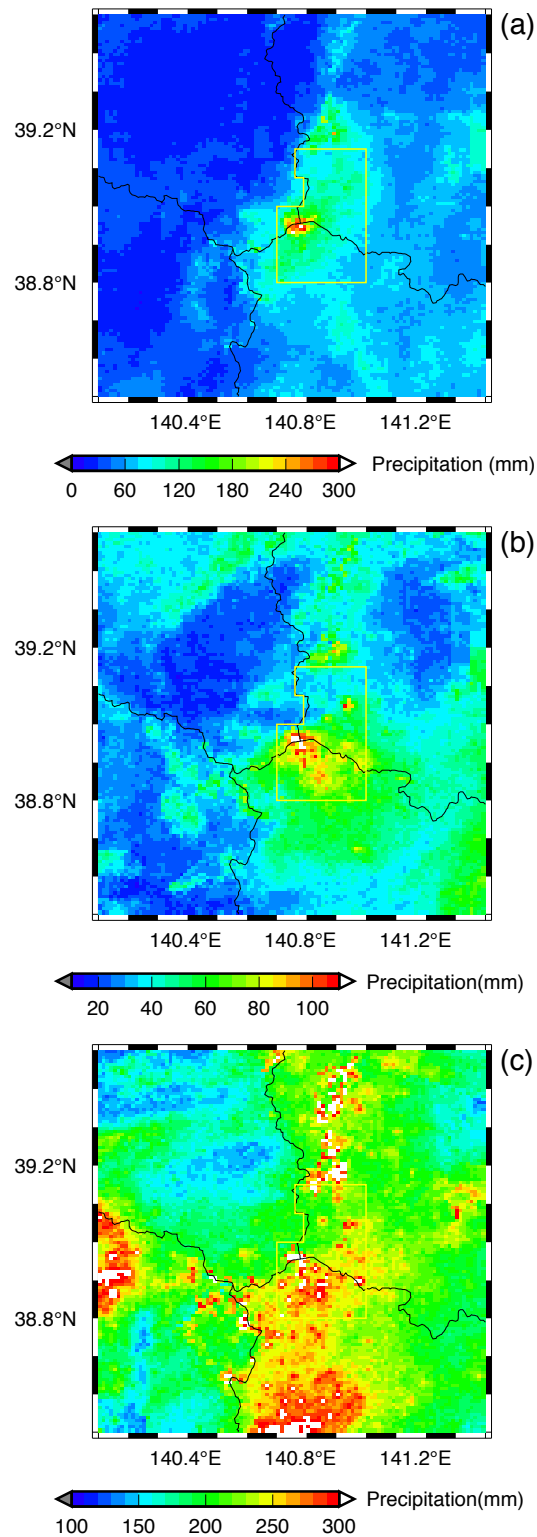


Fig. 3. 解析雨量からもとめた災害地周辺の降水量分布
 (a) 2008年5月第4半旬 (5月16～20日) における積算降水量分布
 (b) 2008年6月第1半旬から第2半旬 (6月1～10日) までの積算降水量分布
 (c) 2008年8月第4半旬から第5半旬 (8月16～25日) までの積算降水量分布
 データ値のスケール: (a) 0～300mm、(b) 10～110mm、(c) 100～300mm.
 黄線枠内は災害地を表す.

Distributions of precipitation around disaster area: (a) Total precipitation in 4th-pentad in May 2008, (b) 1st – 2nd-pentad in June 2008, (c) 4th – 5th-pentad in August 2008. Scales of calculated data are (a) 0–300mm, (b) 10–110mm, (c) 100–300mm. Area within yellow line is disaster area.

イベントは6月5日から6日にかけての降雨が中心のイベントであり、地震発生直前の降雨イベントである (Fig. 2c)。積算期間が10日間あるが、災害地における積算降水量は5月第4半旬よりも少なかった。災害地周辺での降水量の極大域は、岩手・宮城・秋田県境付近とその南側に現れた。積算降水量60 mmを超える地域はちょうど、大規模な崩壊・地すべり・土石流が生じた、宮城県側耕英地区、荒砥沢ダム、一迫川・二迫川・三迫川上流域、そして岩手県側産女川・磐井川上流地域 (東北森林管理局, 2009) に広がっていた。5月第4半旬の場合と同じく、三県の県境付近とその南側にとくに強い降水量分布があり、100 mmを超えるメッシュも存在した。災害地における最大値は144.0 mmであり、このメッシュでの6月6日の日降水量は94.8 mmであった。

2008年8月第4～第5半旬の降水量分布

Fig. 3cに2008年8月第4半旬から第5半旬 (8月16～25日) までの積算降水量分布図を示す。この期間は2008年で最も大きな降雨イベントを含んでいる (Fig. 2c)。8月第4半旬から第6半旬まで降水量が多いが、第4および第5半旬の準平年差がとくに大きかったため、この2半旬積算値を取り上げた。この降雨イベントは8月19日～21日および24日の降雨が中心であった。災害地周辺では、200 mmを超える降水量の分布域が、奥羽山脈東側および山形県北部に広がっていた。災害地においては、とくに宮城県側で250 mmを超える降水量分布域が現れた。また岩手県側でも、災害地の北部および東部に、局所的に250 mmを超えるような降水量分布域が存在した。岩手・宮城・秋田県境付近および宮城県側災害地と岩手県側災害地北部には降水量が300 mmを越すメッシュもあり、広範囲にわたって大雨をもたらしたイベントであった。災害地での最大積算降水量は419.6 mmで三県県境地点の西側の分布域にて生じていた。なお、災害地の岩手県側北部と東部に現れた局所的な分布域は、大規模な山腹崩壊や地すべりのあった地域 (胆沢川上流域や一関市市野々原地区) 付近に位置している (東北森林管理局, 2009)。

以上、3つの降雨イベントに共通していえることは、災害地付近では降水量の極大域が形成されることが多く、とくに岩手・宮城・秋田県境付近 (栗駒山頂付近) から災害地南部 (宮城県側) における降水量が多いこと、である。もし地震発生直後に準平年値を上回るような降雨イベントが発生していたならば、災害地において周辺地域よりも大きな降水量分布域が生じたかもしれない。地震直後に、河道閉塞や不安定土砂などによる二次災害の危険性が非常に高まっていたなか、準

平年値を超えるような降雨イベントが生じなかったことは、大きな二次災害が発生しなかった要因の一つであると考ええる。

一方、地震発生前一ヶ月間の災害地における降水量は準平年値よりも多く (Fig. 2c)、また降水量分布域が大規模災害地と重なるため (Fig. 3a, b)、これが地震による山地災害の拡大につながった可能性もある。災害地の地層の堆積構造は、軽石質凝灰岩を主とする湖成の堆積岩の上部を溶結凝灰岩が覆うキャップロック構造であることが多い (三森ら, 2010)。高谷 (2008) によれば、上部岩層に節理の発達したキャップロック構造は地下水を溜めやすく、これが地すべりの原因となる。地震発生前の降水量が、山地災害の拡大にどの程度影響を及ぼしたのかは明らかではないが、融雪末期から融雪後にかけての継続した雨が融雪水と合わさって地下水位を上昇させ、地震動による崩壊・地すべりを助長させた可能性もあると考ええる。

3.3 災害地における山地積雪水量分布の特徴

岩手・宮城内陸地震の発生時期は、山岳地域の高標高域における積雪の融雪末期とも重なっているため、地表面への水供給量は雨だけでなく融雪水も考慮する必要がある。本研究では、小川・野上 (1994) の方法による冬期降水の形態判別 (雨雪判別) によって降雪水量を推定し、改良型ディグリー・デー法によって融雪水量の推定を行った (河島ら, 2002; 野口ら, 2010)。災害地周辺とくに山岳地域における2008年の山地積雪水量分布の特徴を調べるために、データ解析では2007年と2008年の積雪水量分布の比較を行った。

3月1日における2007年と2008年の積雪水量分布

Fig. 4aと4bに2007年と2008年の3月1日時点での災害地周辺における積雪水量分布を示した。山岳地域における本格的な融雪期は3月中旬から下旬に始まるので、3月1日は融雪期前の積雪水量分布を表したものである。図より、2008年の積雪水量は2007年よりもかなり多かったことがわかる。災害地における平均積雪水量をみると、2007年は253.2 mm、2008年は440.7 mmであった。2007年の積雪は県境沿いの山岳地域に集中しており、標高の低い地域の積雪水量は少なかった (Fig. 4a)。2008年は奥羽山脈西側 (日本海側) での積雪水量が2007年と比べて明らかに多いことから、大陸からの季節風の影響が2007年よりも大きかったことがわかる (Fig. 4b)。日本海側の積雪の分布域は、奥羽山脈を越えてその東側まで広がっており、このため災害地における2008年の積雪水量は増加した。

2008年には災害地北端よりも北側の地域に最も大きな積雪水量分布域が存在したが、ここには焼石連峰が

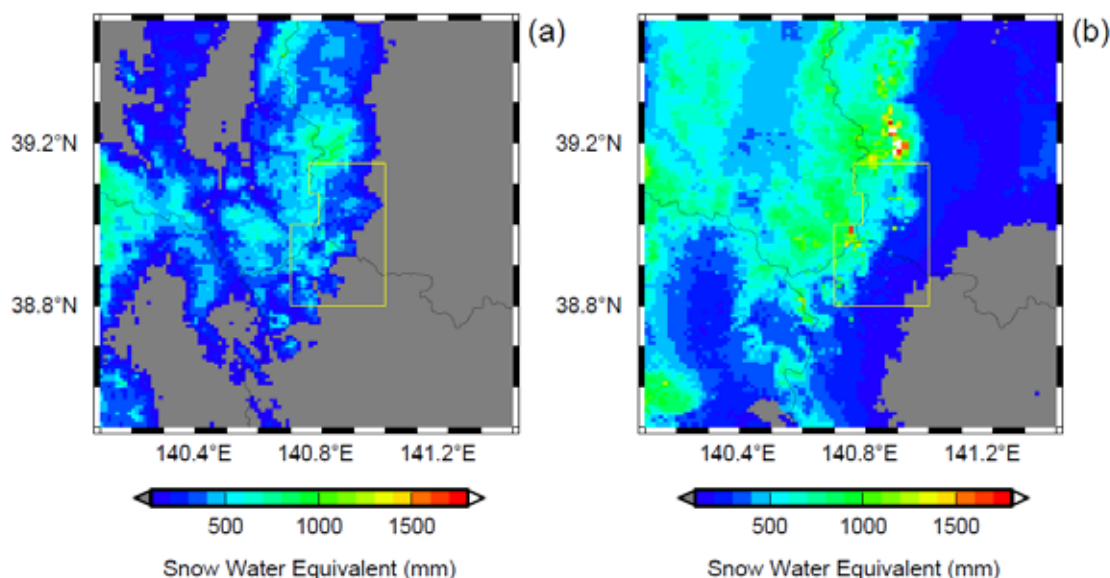


Fig. 4. 3月1日における災害地周辺の積雪水量分布 (a) 2007年、(b) 2008年.
図示データは積雪水量 100mm 以上. 黄線枠内は災害地を表す.
Distributions of snow water equivalent around disaster area on March 1: (a) 2007, (b) 2008. Calculated data are for more than or equal to 100 mm. Area within yellow line is disaster area.

あり、災害地北端部はその南麓にあたる。災害地領域内ではその北端部と岩手・宮城・秋田県境の西側の地域で積雪水量のピークがみられ、1000 mm から 1700 mm の積雪水量を示すメッシュもみられた。2008 年の災害地における積雪水量分布の特徴の一つは、標高とともに積雪水量が増加することが挙げられる (Fig. 5)。メッシュ標高を 500 m 毎に区切ると、区間毎の平均積雪水量は 500 m 未満では 264.6 mm、500 m 以上 1000 m 未満では 607.5 mm、1000 m 以上では 839.5 mm であった。2007 年は、この標高依存性が標高の高い領域で乏しく、それぞれ 97.0 mm、419.4 mm、453.9 mm であった。

4月20日における2007年と2008年の積雪水量分布

Fig. 6a と 6b に 2007 年と 2008 年の 4 月 20 日時点での災害地周辺における積雪水量分布を示した。3 月 1 日から一ヶ月半以上経過し、災害地周辺の融雪がだいぶ進んだ様子を表したものである。積雪水量の分布から、各年ともこの時期になると山岳地域の高標高域に積雪が残ることがわかる。標高の高い地域では融雪が遅れるため、3 月 1 日の時点よりもその後の降雪によって積雪水量が多くなっている地点もあり、2008 年の災害地では岩手・宮城・秋田県境付近で 1400 mm を超えるメッシュも存在した。

積雪水量分布の範囲をみると、2007 年よりも 2008 年の範囲が狭くなっていた。融雪期前の積雪水量は 2008 年のほうが多かったことから、2008 年の融雪が速く進んだことを表している。4 月 20 日時点の災害地

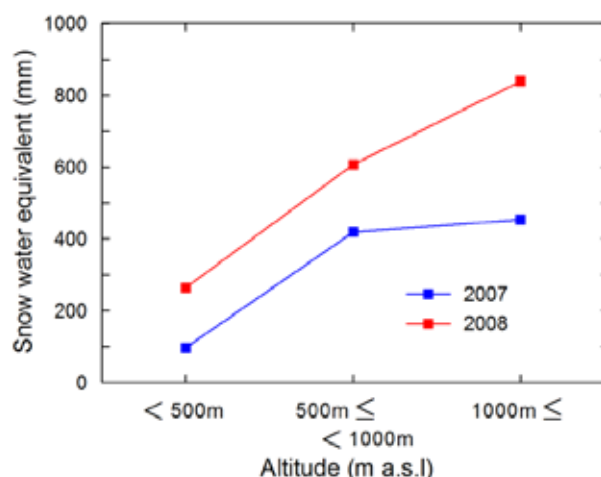


Fig. 5. 推定積雪水量の高度依存性. 図示データは標高 500m 毎の区間平均値.
Dependence of snow water equivalent on altitude in 2007 and 2008. Calculated data are averages within 500 m altitude intervals.

における平均積雪水量は、標高 500 m 以上 1000 m 未満では 2007 年が 234.7 mm、2008 年が 107.0 mm であった。しかし 2008 年の積雪水量が多かったことから、標高 1000 m 以上では 2007 年が 563.0 mm、2008 年が 711.5 mm と 2008 年のほうが約 26% 多かった。

災害地における積雪水量と融雪水量の季節変化

Fig. 7a-d に、災害地における積雪水量と融雪水量の季節変化の様子を半旬毎に示した。図示した期間は

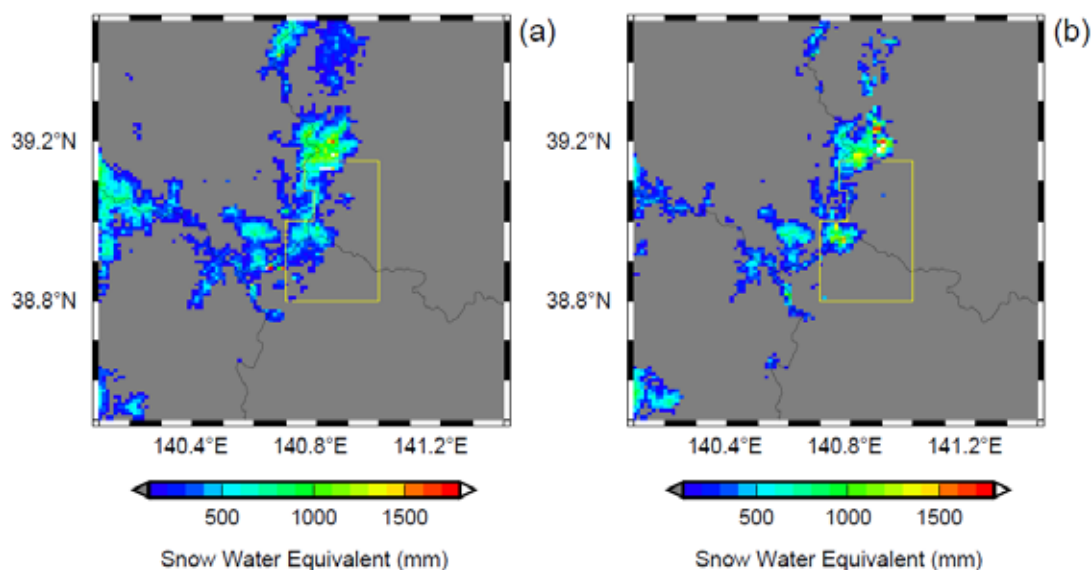


Fig. 6. 4月20日における災害地周辺の積雪水量分布 (a) 2007年、(b) 2008年.
図示データは積雪水量 100mm 以上. 黄線枠内は災害地を表す.
Distributions of snow water equivalent around disaster area on April 20: (a) 2007, (b) 2008. Calculated data are for more than or equal to 100 mm. Area within yellow line is disaster area.

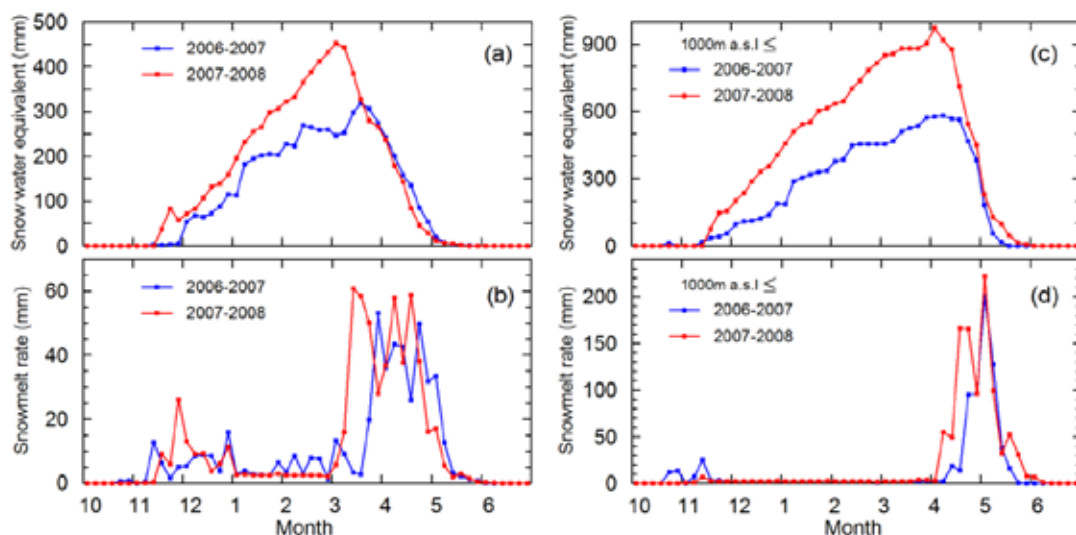


Fig. 7 2006/07 冬期と 2007/08 冬期における災害地の積雪水量と融雪量の季節変化.
(a) と (b) は災害地の平均値、(c) と (d) は災害地における標高 1000 m 以上の標高域での平均値
Seasonal variations of snow water equivalent and snowmelt rate in 2006/07 and 2007/08 winters. (a) and (b) show averages in disaster area; (c) and (d) show averages in a high-altitude (over 1000 m) region in disaster area.

2006 年 10 月～2007 年 6 月と 2007 年 10 月～2008 年 6 月の二冬期で、Fig. 7a と 7 b は領域の平均値、図 7 c と 7 d は標高 1000 m 以上の高標高域の平均値である。

図より、2008 年は 2007 年よりも最大の積雪水量が多く、また本格的な融雪の開始時期が早かったことがわかる。災害地全体としては (Fig. 7a, b)、2008 年は 3 月の第 1 半旬に積雪水量が最大となり、3 月第 3 半旬に融雪水量が急増していた。一方で 2007 年は、積雪水量のピークが 2008 年よりも遅い 3 月第 4 半旬で、融雪水量の急増は 3 月第 6 半旬になってからであった。この傾向は、1000 m 以上の高標高域においても同様だったが、融雪の開始は災害地の平均よりも一ヶ月程度遅かった (Fig. 7c, d)。2008 年 4 月の融雪水量は 2007 年よりも顕著に多く、高標高域においても 2008 年の融雪の進行が早かったことがわかる。

この推定結果では、2008 年の融雪は 3 月から 4 月にかけての高温傾向によって促進された (Fig. 2a, b)。各標高域の融雪開始期と高温期間がちょうど重なったため、標高 1000 m 未満の標高域における 2008 年 3 月の融雪水量は 2007 年 3 月の 2.2 倍、1000 m 以上の高標高域における 2008 年 4 月の融雪水量は 2007 年 4 月の 2.3 倍であったという推定結果を得た。

仙台管区气象台 (2007) によれば、2006/07 年冬期の東北地方の冬は「記録的な高温・少雪」であった。災害地の領域全体としては、とくに 2007 年 1 月から 2 月の降雪量が少なかったこと (2008 年との比較で 65 %) が、2008 年と比べて少雪となった原因と推定できた。また、2006 年 11 月～2007 年 2 月の気温が準平年よりも高く、11 月から 1 月の降水が降雪と判別される割合が低かったことも少雪の一因であった (例えば、災害地の 1 月平均で 2007 年 : 79%、2008 年 : 100%)。しかし 2007 年 3 月から 4 月にかけては一転して準平年値よりも低温となったため Fig. 7 で見られるように融雪が遅れた (2007 年の気象経過図は未掲載)。

2007/08 年冬期の降雪量は前年よりも多かった。とくに 1000 m 以上の高標高域では、2007 年 11 月から 2008 年 2 月までの降雪量は、すべての月で前年を上回っていた。また 2008 年 1 月から 2 月の気温が低く、3 月から 4 月の気温が高かったことから (Fig. 2a, b)、これらが積雪水量の増加と融雪の促進につながった。災害地において、2008 年は栗駒山頂に近い岩手・宮城・秋田県境に付近の消雪が最も遅かったと推定された。計算では、災害地内メッシュのすべての積雪水量がゼロになった日 (消雪日) は 6 月 7 日であり、地震発生の 7 日前に消雪したことになる。

野口ら (2010) は、岩手・宮城内陸地震による土砂災害と災害地域の土壌水分との関連性を調べるために降

雨量と融雪水量を組み合わせた先行土湿指数 (ASI) を提案し、震源地近傍のアメダスデータを使って地震前後の先行土湿を調べた。なお ASI (単位 : mm) は、土壌の湿りの程度を表す指数で、以下の式から求める。

$$ASI_n = \sum_{i=1}^n (M_i + P_i) / i \quad (6)$$

ここで i は対象とする日からさかのぼった日数、 M_i と P_i は対象とする日より i 日前の日融雪量と日降雨量 (mm day^{-1})、 n はさかのぼる日数である。本研究では、野口ら (2010) と同様に $n = 30$ 日として、地震発生日 (2008 年 6 月 14 日) における先行土湿指数 (ASI_{30}) の空間分布の推定を試みた。

まず Fig. 8a に、地震発生前の 30 日間 (5 月 15 日から 6 月 13 日) における降雨量と融雪水量の合計を地表面への水供給量 (浸透水量) として、その分布図を示す (災害地領域を拡大して図示した)。災害地における地震前 30 日間の浸透水量は、ほぼ全域で 150 mm を超えていた。岩手県側南部から宮城県側にかけて 200 mm を越す分布域があるが、これは降水量が集中する領域と重なる (Fig. 3a, b)。2008 年において 5 月 15 日時点で積雪が残っていた箇所は、栗駒山頂近辺と災害地北端に位置する焼石岳南麓のメッシュ標高が 900 m を超える地点に限られた。災害地においては、栗駒山頂付近の三県県境に隣接したメッシュの 30 日間融雪量が最も多く、734.8 mm と推定された。この融雪水量に降雨量を合わせると、30 日間浸透水量は 1485.8 mm となった。その周辺のメッシュでは、とくに宮城県側と宮城・秋田県境付近において 500 mm を越えていることが多く、標高 1000 m 以上の地点を平均すると 499.1 mm となった。

この浸透水量データを用いて計算した 2008 年 6 月 14 日の ASI_{30} の分布を Fig. 8b に示した。災害地の ASI_{30} は高標高域で値が大きくなる傾向にあった。これは Fig. 8a の浸透水量分布に起因している。標高域毎に ASI_{30} 値を平均してみると、500 m 未満では 14.7 mm、500 m 以上 1000 m 未満では 15.1 mm、1000 m 以上の高標高域では 30.3 mm であった (災害地の平均は 15.7 mm)。岩手・宮城・秋田県境付近では ASI_{30} が 50 mm を越えるメッシュも存在しており、とくに消雪日が 6 月上旬と推定された 2 つのメッシュ (消雪日は 6 月 4 日と 7 日) では、それぞれ 86.1 mm と 77.4 mm と局所的に高い値を示した。

野口ら (投稿中) は、祭時アメダスにおける 27 年間の ASI_{30} 値を旬毎に求めており、それによると ASI_{30} の旬平均値が 80 mm、70 mm、50 mm を越える割合は、それぞれ 0.9、2.3、6.7 % (全 972 旬のうち、それぞれ 9 旬、22 旬、65 旬) であった。この結果と比較すると、高い ASI_{30} 値のメッシュ (86.1 mm と 77.4 mm)

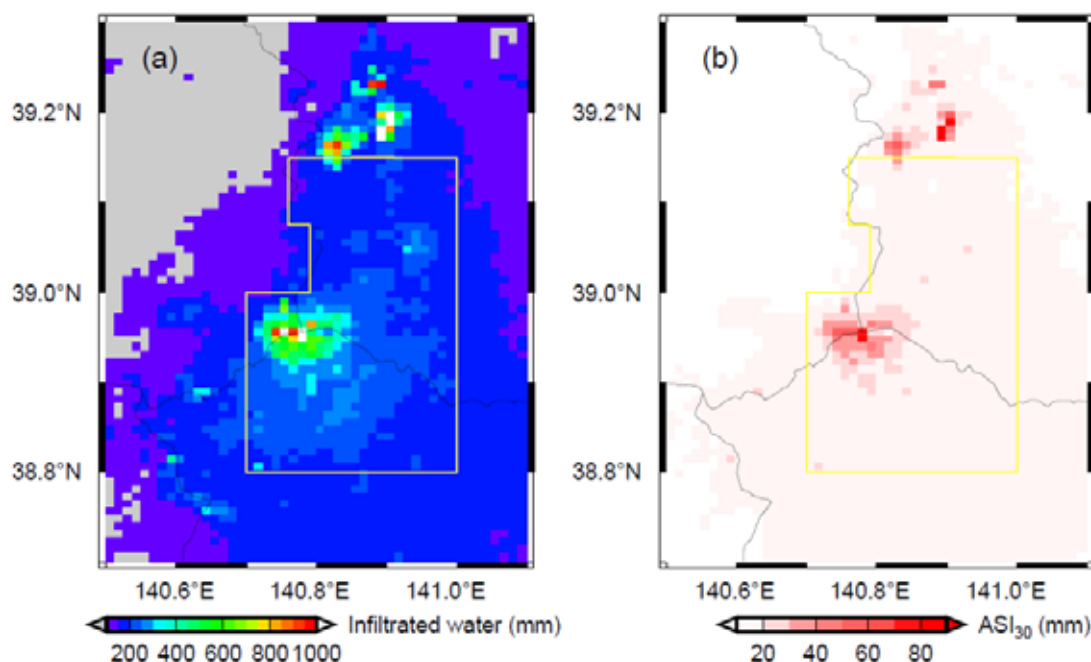


Fig. 8. 2008 年 5 月 15 日から 6 月 13 日における 30 日間浸透水量 (a) と 6 月 14 日における先行土湿指数 (ASI) (b) の分布。
 図示データは浸透水量 100mm 以上、ASI10 mm 以上。黄線枠内は災害地を表す。
 Distributions of 30-day infiltrated water from May 15 to June 13 (a), and antecedent soil-moisture index (ASI₃₀) on June 14 (b), around disaster area. Calculated data are for more than or equal to 100 mm (a), and 10 mm (b). Area within yellow line is disaster area.

では、地震発生時の土湿はかなりの湿潤状態だったといえる。なお、野口ら (2010) の計算では、祭時と駒ノ湯のアメダス地点における 6 月 14 日の ASI₃₀ はそれぞれ 18.0 mm と 20.4 mm であったが、Fig. 8b の祭時と駒ノ湯アメダス地点 (位置は Table A1 に記載) を含むメッシュ値はそれぞれ 20.5 mm と 23.7 mm であり、ほぼ同じ結果を得ている。

本研究の推定では、2008 年は、2007 年よりも、とくに標高 1000 m を越える高標高域での積雪量が多かった (Fig. 4, Fig. 5, Fig. 7a, c)。また、融雪の進行は 2008 年の方が早かったものの、積雪量が多かったことから消雪までには時間を要した (Fig. 7b, d)。このため、災害地の高標高域において三次メッシュレベルでも地震の一週間前まで積雪が存在していたと推定された。山岳域の積雪分布は、強風による雪の移動や地形の影響による雪の堆積などにより大きく変動することが知られていることから、本研究の推定結果は、地震発生時には高標高域において多くの積雪が局所的に存在し、その積雪下の土壌がかなりの湿潤状態にあったことを強く示唆している。実際に地震発生直後 (6 月 15 日) の写真をみると、栗駒山頂付近には部分的に残雪がみられた (大丸ら, 投稿中)。このことから、大丸ら (投稿中) や野口ら (2012) は、当時の残雪下では多量の融雪水が地面に供給されていたと推定している。

岩手・宮城内陸地震における高標高での大規模な崩壊は、東栗駒山の山頂付近のドゾウ沢源頭部 (三迫川上流域) と、県境を境にしてドゾウ沢の岩手県側に位置する産女川上流域の 2 箇所であった (東北森林管理局, 2009; 三森ら, 2010)。このうち、ドゾウ沢では崩壊土砂が土石流化して長距離移動し、人的被害が生じた。これらの崩壊地点は Fig. 8a で示した浸透水量の多かった地域に含まれる。とくにドゾウ沢では、地震前の融雪水と降雨の影響によって被害が拡大したことが考えられる (野口ら, 2012; 大丸ら, 投稿中)。ただし、2008 年は融雪が速く進んだことから、積雪量が多かったわりには、土湿が湿潤状態となっていた領域が高標高域の一部に限られていた (Fig. 8b)。これは、地質的・地形的要因に加えて、土石流の発生箇所を制限した一因だと考える。

4. まとめ

2008 年の気象経過に関して最も特徴的だったのは、地震が極めて降水量の少ないときに起こったことである。6 月第 3 半旬と第 4 半旬には降水量がほとんどなく、その後も準平年と比べてとても少ない期間が継続していた。この時期は、準平年であれば梅雨と重なって、降水量が一年で最も多くなる期間に突入するが、2008 年の災害地では一年で最も降水量が少なくなる期間へ

向かっていた。降水量分布の解析から、災害地では降水量が周辺より多くなりやすいことが示されたため、地震直後は崩壊土砂の流出や土砂ダムの決壊等の危険性が予想以上に高まっていたと思われる。山地での土砂災害が多発した岩手・宮城内陸地震直後に大きな二次災害が発生しなかったのは、迅速な対策工事によるところが大きいのはもちろんだが、この少雨もその一因になったと考える。

山地積雪水量に関しては、2007年との比較のみであるが、2008年冬期の積雪は前年冬よりも多かったと推定された。一方で、2008年3月から4月にかけての高温傾向により2008年の融雪は平年よりも速やかに進行したため、地震発生時に高標高域において土壌が湿潤状態であった箇所は一部に限られていたと推定された。これらのことから、もし準平年通りの気温経過をたどったならば、本研究の推定結果よりも融雪は遅れ、栗駒山頂域を中心とする高標高域の土湿は湿潤となり、土砂災害の発生をさらに促進させた可能性がある。このように、積雪－融雪が関与する現象においては降雪および気温の空間分布が大きく関与するため、時空間分解能の高い水分環境推定は、このような地域における災害発生の評価に重要な役割を果たすと考える。

地震の破壊力は凄まじかった。当然、気象要因だけで被害の大きさを語ることはできないが、土砂災害の

誘因となる気象要因に関しても注意を払っておく必要があると思い、本報をまとめた。

謝辞

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。調査に際しては、林野庁東北森林管理局、同岩手南部森林管理署、同宮城北部森林管理署、同宮城山地災害復旧対策室の協力を頂いた。またアメダスデータのメッシュ化では、農業環境技術研究所の清野 豁博士（現：農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センター）作成の「アメダスデータのメッシュ化プログラム Ver.5.2」（農業環境技術研究所職務作成プログラム P 第 4068 号 -1）を使用した。ここに記して謝意を表します。

付録 A 積雪水量推定の妥当性

本研究で用いた積雪水量の推定法（2.3 節）の妥当性を調べるため、この方法で推定された消雪日と積雪水量について確認していく。ここでは、災害地およびその周辺のアメダスで積雪深観測が行われている地点を 10 ヶ所選定消雪日の検証データとした。また山形県新庄市にある防災科学研究所雪氷防災センター新庄支所

Table A1. 2008 年における各観測地点での消雪日と期間降水量（2007 年 11 月～2008 年 3 月）および対象メッシュの推定消雪日と期間降水量
Dates of snow disappearance in 2008 and seasonal precipitation from November 2007 to March 2008, at observation sites and meshes covering each site.

観測地点 Weather station	県 Prefecture	緯度 Latitude	経度 Longitude	標高 Altitude (m a.s.l.)	消雪日 Date of snow disappearance	期間降水量 Precipitation (mm)	メッシュ消雪日 Estimated Date of snow disappearance	メッシュ期間降水量 Mesh precipitation (mm)
湯田 Yuda	岩手 Iwate	39° 18.6′	140° 46.6′	250	4月10日 April 10	810.5	4月14日 April 14	1170.4
祭時 Matsurube	岩手 Iwate	39° 0.6′	140° 51.9′	350	4月2日 April 2	551.5	4月3日 April 3	879.0
駒ノ湯 Komanoyu	宮城 Miyagi	38° 54.8′	140° 49.7′	525	4月2日 April 2	504.5	4月2日 April 2	721.6
川渡 Kawatabi	宮城 Miyagi	38° 44.6′	140° 45.6′	170	3月13日 March 13	404.0	3月21日 March 21	707.0
湯沢 Yuzawa	秋田 Akita	39° 11.2′	140° 27.8′	74	3月24日 March 24	655.5	4月5日 April 5	1062.4
湯ノ岱 Yunotai	秋田 Akita	38° 57.6′	140° 18.6′	335	4月2日 April 2	738.0	4月11日 April 11	1230.0
金山 Kaneyama	山形 Yamagata	38° 52.7′	140° 19.9′	170	3月29日 March 29	797.0	4月3日 April 3	1027.4
向町 Mukaimachi	山形 Yamagata	38° 45.5′	140° 31.0′	212	3月26日 March 26	683.5	3月26日 March 26	821.2
新庄（防災研） Shinjo(NIED)	山形 Yamagata	38° 47.4′	140° 18.7′	127	3月30日 March 30	909.5	3月20日 March 20	652.4
新庄 Shinjo	山形 Yamagata	38° 45.4′	140° 18.7′	105	3月25日 March 25	815.5	3月25日 March 25	999.6
尾花沢 Obanazawa	山形 Yamagata	38° 36.5′	140° 24.7′	106	3月26日 March 26	648.0	3月22日 March 22	802.0

(以降、防災研)での積雪調査データ(根本ら, 2008)を消雪日および積雪水量の検証データとした。

Table A1 に各観測点の消雪日とその観測点を含むメッシュにおける推定消雪日(メッシュ消雪日)、およびそれぞれの冬期(2007年11～2008年3月)の期間積算降水量を示した。ここでは消雪日を、最大積雪深(防災研では9:00の積雪深)がゼロになる日で、その後に3 cm以上の積雪が生じなかった日とした。消雪日の推定誤差(メッシュ消雪日-消雪日)は-9日から+12日であった。消雪日の推定誤差を平均すると+2.8日、アメダス地点のみに限定すると+4.0日であり、推定消雪日は平均的には3～4日程度遅れる結果となった。

この誤差の大きさは地上降水量とメッシュ降水量の比に関係していた(Fig. A1)。すなわち、推定消雪日が遅れるメッシュでは、観測された期間降水量に対するメッシュ期間降水量の割合が多くなり、推定消雪日が早まるメッシュではその割合が小さくなる傾向がみられた。防災研での降水量以外は全ての地点でメッシュ期間降水量のほうが多かったが、これは、解析雨量はアメダス雨量より統計的には多めになるという特性(北畠・大林, 1991; 気象庁予報部予報課, 1995; 新保, 2001b)を反映したものかもしれない。

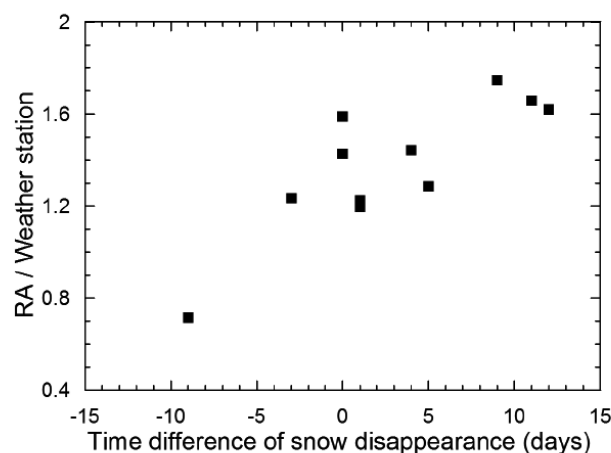


Fig. A1. 2008 年における消雪日の推定誤差と期間積算降水量の観測値に対するメッシュ期間降水量の割合との関係。推定誤差はメッシュの推定消雪日から観測点での消雪日を引いた日数、降水量の積算期間は2007年11月から2008年3月。
Relationship between estimated error of date of snow disappearance (estimated day - observed day) in 2008 and ratio of seasonal Radar/Raingauge-Analyzed Precipitation (RA) to observed seasonal precipitation, from November 2007 to March 2008.

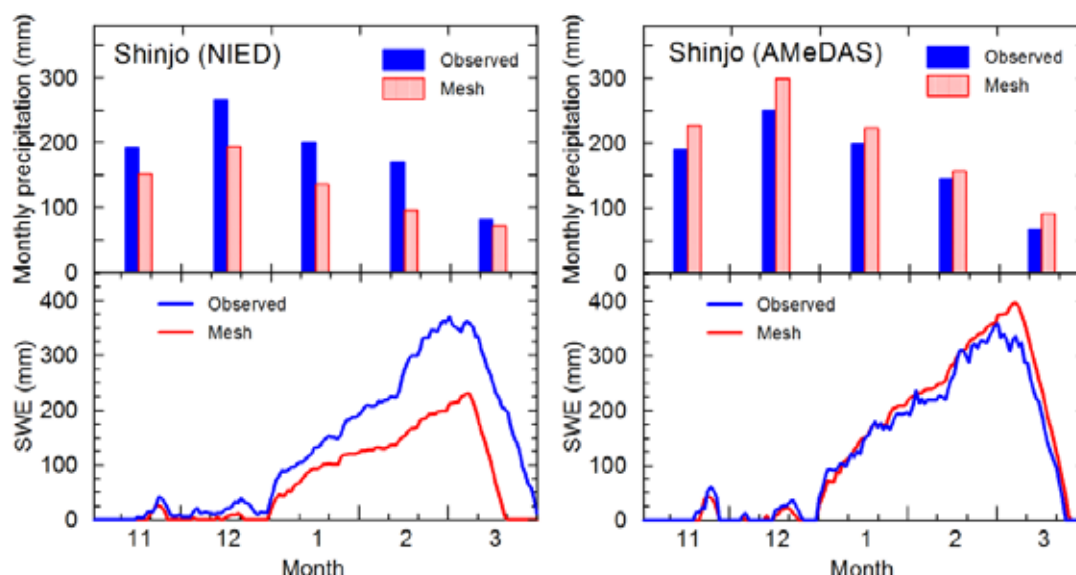


Fig. A2. 月積算降水量と積雪水量の季節変化の観測値とメッシュ値との比較(2007/08年冬期の新庄(防災研)と新庄アメダスの例)
Seasonal variations of monthly precipitation and snow water equivalent at Shinjo (NIED) and Shinjo (AMeDAS) in winter 2007/08, comparing observed and mesh values. NIED is National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan.

新庄の防災研で2007/08年冬期に観測された積雪水量とそのメッシュの推定積雪水量を月積算降水量と合わせてFig. A2に示した。推定積雪水量の時間変化は観測値と同様の变化傾向を示した。しかし、メッシュ降水量の値が全ての月で観測された降水量を下回っていたことから、降雪水量が過小に見積られたと考えられ、推定積雪水量は観測値よりかなり小さくなった。そこで、防災研から約4 km南に位置する新庄アメダスの積雪深データを用いて積雪水量を算出し、メッシュの推定積雪水量と比較してみた(Fig. A2)。ここでは、防災研と新庄アメダスの2007/08年冬期における降水量と積雪深がほぼ同じであったことから(それぞれの9:00における期間最大積雪深は2008年2月17日の113 cmと117 cm)、防災研で調査された積雪全層密度を用いて新庄アメダスの積雪深を積雪水量に換算した。Fig. A2より、メッシュ期間降水量はアメダス降水量よりも17%多かったが、推定積雪水量はアメダスデータから算出された積雪水量をよく再現していることがわかる。

以上のことから、メッシュ降水量が実際の降水量を十分に反映しているならば、本研究の方法により消雪日と積雪水量を概ね推定できると考えた。雨雪量計による地上降水量測定では、風速の影響を受けて降雪の捕捉率が低下するため、降水量を小さく見積もってしまうことが知られている(大野ら, 1998; 横山ら, 2003)。雨雪量計の降雪捕捉率低下による損失分を補正できれば、メッシュ降水量とアメダス地点の降水量との差は小さくなるだろう。また、防災研におけるメッシュ降水量は観測値よりも小さかったが、この傾向は前年の冬期でも同様であった。このメッシュは地形などの影響で、解析雨量が地上観測値より小さくなりやすいのかもしれない。今回は、災害地の高標高地点における観測データが存在しなかったため、この検証作業では不十分かもしれないが、この推定方法を用いて山地積雪水量分布に関する解析を進めることとした。

引用文献

朝岡良浩・小南裕志・竹内由香里・大丸裕武・田中信行(2007) 衛星観測に基づく積雪水量の広域推定と融雪係数の地域特性. 水文・水資源学会誌, 20, 519-529.

新井 正(1994) 融雪量と融雪出水, 前野紀一・福田正己編, “基礎雪氷学講座VI 雪氷水文現象”. 古今書院, 49-85.

大丸裕武・村上 亘・小川泰浩・江坂文寿(投稿中) 2008年6月の岩手・宮城内陸地震によって土蔵沢源頭部で発生した崩壊. 森林総合研究所研究報告.

井口 隆・大八木規夫・内山庄一郎・清水文健(2010) 2008年岩手・宮城内陸地震で起きた地すべり災害の地形地質的背景. 防災科学技術研究所主要災害調査, 43, 1-10.

井良沢道也・牛山素行・川邊 洋・藤田正治・里深好文・檜垣大助・内田太郎・池田暁彦(2008) 平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震により発生した土砂災害について. 砂防学会誌, 61, 37-46.

河島克久・飯倉茂弘・杉山友康・遠藤 徹・藤井俊茂(2002) 鉄道防災に適用可能な日融雪量の簡易推定法. 雪氷, 64, 605-615.

河島克久・和泉 薫(2008) 改良型ディグリー・デー法による日融雪量推定の精度検証. 新潟大学災害復興科学センター年報, 2, 119-124.

気象庁(2002) メッシュ気候値2000. 気象業務支援センター, CD-ROM.

気象庁(2005) “気象観測統計の解説(気象観測統計指針)”, 127 pp, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/kaisetu/index.html>.

気象庁(2010) “解析雨量”, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kurashi/kaiseki.html>, (参照2012-06-17).

気象庁予報部予報課(1995) レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度. 測候時報, 62, 279-339.

北畠尚子・大林正典(1991) レーダー・アメダス合成図と東京都の雨量観測網による観測値との比較. 研究時報, 43, 285-310.

村上 亘・大丸裕武・江坂文寿(投稿中) 2008年岩手・宮城内陸地震後に発生した2次的な斜面崩壊の地形・地質的特徴. 森林総合研究所研究報告.

根本征樹・小杉健二・阿部 修・佐藤 威・望月重人(2008) 新庄における気象と降積雪の観測(2007/08年冬期). 防災科学技術研究所研究資料, 326, 33pp.

野口正二・三森利昭・多田泰之・安田幸生(2010) 2008年岩手・宮城内陸地震前後における災害地周辺の先行土湿. 砂防学会誌, 63, 39-43.

野口正二・安田幸生・多田泰之・三森利昭(2012) 2008年岩手・宮城内陸地震災害地周辺の先行土湿潤の季節変動. 森林総合研究所研究報告, 11(3), 151-160.

小川真由美・野上道男(1994) 冬季の降水量形態の判別と降水量の分離. 水文・水資源学会誌, 7, 3-9.

大野宏之・横山宏太郎・小南靖弘・井上 聡・高見晋一・Wiesinger, T(1998) 北陸地方における降水量計の固体降水捕捉率. 雪氷, 60, 225-231.

太田岳史(1989) 気温および降水量による山地積雪水量の経時変化の推定. 雪氷, 81, 37-48.

三森利昭・大丸裕武・黒川 潮・岡本 隆・村上 亘・

- 多田泰之・岡田康彦・野口正二・安田幸生・浅野志穂・大野泰宏 (2010) シリーズ「近年の土砂災害」—2008 年岩手・宮城内陸地震による土砂災害—, 水利科学, 14, 105-127.
- 清野 豁 (1993) アメダスデータのメッシュ化について, 農業気象, 48, 379-383.
- 仙台管区气象台 (2007) “2007 年冬 (2006 年 12 月～2007 年 2 月) の東北地方の天候”, 11 pp, <http://www.jma-net.go.jp/sendai/yohou/tenkou2007.shtml>.
- 仙台管区气象台 (2008) “2008 年冬 (2007 年 12 月～2008 年 2 月) の東北地方の天候”, 7 pp, <http://www.jma-net.go.jp/sendai/yohou/tenkou2008.shtml>.
- 新保明彦 (2001a) レーダー・アメダス解析雨量 (I). 天気, 48, 579-583.
- 新保明彦 (2001b) レーダー・アメダス解析雨量 (II). 天気, 48, 777-784.
- 森林総合研究所 (2008) “平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震によって発生した山地災害 (第 2 報)”, <http://www.affrc.go.jp/research/dept/04soil-water/rep2/rep2.html>, (参照 2012-06-17).
- 高谷精二 (2008) 技術者に必要な地すべり山くずれの知識, 鹿島出版会, 151pp.
- 立平良三 (2006) 気象レーダーのみかた—インターネット天気情報の利用—, 東京堂出版, 155pp.
- 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, 林野庁東北森林管理局, 30pp.
- 山口 悟・本吉弘岐・中井専人・阿部 修・根本征樹 (2010) 山地観測データを用いた山地冬季解析雨量の精度評価, 日本気象学会大会講演予稿集, 98, 120.
- 横山宏太郎・大野宏之・小南靖弘・井上 聡・川方俊和 (2003) 冬期における降水量計の捕捉特性, 雪氷, 65, 303-316.

論文 (Original article)

2008 年岩手・宮城内陸地震災害地周辺の先行土湿の季節変動

野口正二^{1)*}、安田幸生¹⁾、多田泰之²⁾、三森利昭²⁾

Seasonal variation of antecedent soil moisture in and around the disaster area of the Iwate-Miyagi Nairiku earthquake in 2008

Shoji NOGUCHI^{1)*}, Yukio YASUDA¹⁾, Yasuyuki TADA²⁾ and Toshiaki SAMMORI²⁾

Abstract

The seasonal variation of an antecedent soil moisture index (ASI_{30}) in and around the disaster area of the Iwate-Miyagi Nairiku earthquake in 2008 was investigated using AMeDAS data spanning 27 years. The ASI_{30} values ranged from 0 to 378.3 mm with an average ($\pm$ SD) of 22.5 mm ($\pm$ 22.0) at the Maturube site (320 m asl.). The average ASI_{30} value for the 10 days following the earthquake continued at a low value ($ASI_{30} < 20$ mm) which was rare for this season. The maximum ASI_{30} value each month was more than 100 mm except in February. The frequency of values higher than this was greatest in August. The minimum average ASI_{30} value each month was 6.9 mm and this occurred in February. The highest average ASI_{30} each month was in April (34.9 mm) during snow melt season, followed by September (34.5 mm) and July (31.9 mm). ASI_{30} in the high mountain zone (1,300 m asl.) was estimated from 4.0 to 320.0 mm with an average of 50.0 ± 64.9 mm from November 2007 to October 2008. The results were higher than the ASI_{30} at the Maturube site where values ranged from 3.1 to 136.4 mm with an average of 19.6 ± 18.3 mm. This was because more than 50 mm of rainfall was added to the melting snow water continuously at the 1,300 m point so the ASI_{30} was higher during snow melt season. On July 14th 2008, when the earthquake occurred, the ASI_{30} at the 1,300 m point and at the Maturube site were 245.1 mm and 18.0 mm, respectively. The ASI_{30} after the earthquake did not reach the result recorded at heavy rain and snow years. Therefore, continued monitoring of the antecedent soil moisture in and around the disaster area in the future is necessary.

Key words : Snowy region, antecedent soil moisture index, snow melt, a high mountain zone, heavy rainfall

要旨

2008 年岩手・宮城内陸地震の震源地近傍の 27 年間のアメダスデータから、先行土湿指数 (ASI_{30}) の季節変化を明らかにした。地震直後の旬別の ASI_{30} の平均値は例年より低い値 ($ASI_{30} < 20$ mm) が続いた。 ASI_{30} は 0.0 ~ 378.3 mm (平均値 $\pm$ SD, 以下同様: 22.5 ± 22.0 mm) であった。2 月を除く各月で ASI_{30} の最大値は 100 mm を超え、8 月にその頻度が高かった。月別 ASI_{30} の平均値は、厳冬期の 2 月に最小値 (6.9 mm) を示し、融雪期の 4 月 (34.9 mm)、次いで 9 月 (34.5 mm)、7 月 (31.9 mm) の順で高い値を示した。2007 年 11 月 - 2008 年 10 月における高山地帯 (標高 1,300 m) の ASI_{30} は 4.0 ~ 320.0 mm (50.0 ± 64.9 mm) と推定され、祭時 (標高: 320 m) の ASI_{30} (3.1 ~ 136.4 mm; 19.6 ± 18.3 mm) と比較して高い値を示した。高山地帯では融雪期において、継続的に 50 mm を超える降雨が融雪水に加算され ASI_{30} が高くなっていた。地震が発生した 2008 年 6 月 14 日の高山地帯の ASI_{30} は 245.1 mm で、祭時の ASI_{30} (: 18.0 mm) と比較して非常に湿潤な状態にあったことが明らかになった。地震後の ASI_{30} は過去に記録した多雨・多雪年時に至っておらず、引き続き、土湿環境を注視する必要があると考えられた。

キーワード: 積雪地域、先行土湿指標、融雪、高山地帯、豪雨

原稿受付: 平成 23 年 11 月 28 日 Received 28 November 2011 原稿受理: 平成 24 年 4 月 26 日 Accepted 26 April 2012

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

2) 森林総合研究所 Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* 森林総合研究所東北支所 〒020-0123 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 020-0123, Japan, e-mail: noguchi@ffpri.affrc.go.jp

1. はじめに

2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震によって、荒砥沢ダムでの大規模地すべりをはじめ、耕英地区での山腹崩壊群、積雪が残る東栗駒山頂近くの山腹崩壊とドゾウ沢での土石流、一迫川上流域での大規模な岩盤崩壊・深層崩壊など、震源地周辺の山地で多数の中・小規模の斜面崩壊が発生した（国土交通省国土技術政策研究所ら, 2008; 東北森林管理局, 2008; 三森ら, 2010）。災害直後に撮影された航空写真とALOSの可視光画像を用いて、10,751箇所、13.576 km²の崩壊地が目視によって抽出されている（三森ら, 2010; 2012）。過去の地震災害について見ると、地震によって緩んだ地盤は地震前よりも降雨によって崩壊地が拡大しやすく（富田ら, 1996）、積雪地域では雪崩災害や融雪流出時に河道閉鎖による河川の氾濫が報告されている（河島ら, 2005）。岩手宮城内陸地震で発生した斜面崩壊の中で、崩壊には至らずに山体に亀裂が生じている現場が複数地点で確認されており（村上ら, 投稿中）、今後、過去の地震災害と同様に災害地周辺の土湿環境について注意を払う必要がある。

土壌雨量指数は、土壌中の水分量について Ishihara and Kobatake (1979) が提案した直列3段タンクモデルを用いて推定し、過去10年間のデータと比較して土砂災害警戒情報及び雨量警報・注意報の発表基準に使用されている（岡田, 2007）。岡田（2006）は、この雨量指数を用いて中越地震時の先行降雨について明らかにして、その数値がやや高めだったことを指摘している。一方、積雪地域では、寒候期の降水は個体として一時的に地表に留まり、融雪期に融雪水量として大量に地表にもたらされるため、融雪過程を考慮する必要がある。しかし、岡田（2006）の報告では融雪の影響について検討されていない。野口ら（2010）は、先行降水指数に融雪水量を考慮した先行土湿指数を提案し、2008年岩手・宮城内陸地震の震源地近傍のアメダスデータを用いて豪雨時や多雪年の融雪時の先行土湿について示し、地震前後の先行土湿が比較的乾燥した状態であったことと、その後しばらく乾燥した状態が維持されたことを示した。一方、この先行研究は、地震が発生した前後の年と多雪年や少雪年との先行土湿の比較のみで、先行土湿の中・長期的な年・季節変化について十分に検討されていない。また、使用したアメダス観測所の位置する標高は、宮城県栗駒アメダス観測所の850mが最標高地であり、高山地帯における先行土湿の状態について議論が不足していた。

本研究では上記の課題について着目し、祭時の27年間の長期データに基づき先行土湿の年・季節変化を明らかにするとともに、高山地帯の先行土湿の状態を推定して、岩手・宮城内陸地震による災害地周辺の先行土湿について検討を加えた。

2. 方法

2.1 日融雪量の推定

日融雪量の推定は、改良型ディグリー・デー法（河島・和泉, 2008）に準じた。この方法は融雪開始日の決定に当たり、以下のFD-index (First Discharge Index) を計算する：

$$FD = \sum T_a \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、 T_a は日平均気温（℃）とする。ただし、日平均気温がマイナスの場合は $T_a=0$ として扱い、3日間連続して日平均気温がマイナスの場合はFD値を0に戻す。本研究では、融雪が開始されるFD値を3とした。

日融雪量 M (mm) は、次式によって求めた：

$$M = \frac{k}{2} (T_{ay} + T_{at}) + a \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここで、ディグリー・デー・ファクター k (mm/℃/day)、推定する日の前日の日平均気温 T_{ay} 、日融雪量を推定する当日の日平均気温 T_{at} 、平均日浸透水量 a (mm/day) とした。なお、 a の初期値は太田（1989）による観測値 1.0 (mm/day) とした。

ディグリー・デー・ファクター k (mm/℃/day) は次式から求めた：

$$k = 0.039x + 2.3 \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここで、 x は融雪開始日をユリウス日数の形態で表したものである。

2.2 先行土湿指数 (antecedent soil moisture index: ASI)

過去の日降雨量の重み付き総和で計算される Mosley (1979) が提示している先行降雨指数 (antecedent precipitation index: API) は、直接土壌水分が測定できない場合の土壌水分の指標として幅広い研究分野に採用されており（例えば、Kosugi *et al.*, 2007; Negishi *et al.*, 2007）、次式から求める：

$$API_n = \sum_{i=1}^n P_i / i \quad (4)$$

ここで、 i は対象とする日からさかのぼった日数、 P_i は対象とする日から i 日前の日降水量、 n はさかのぼる日数である。本研究では対象とする地域が積雪地帯のため、寒候期の降水は固体として地表に一時的に留まり、融雪期に地表へと浸透する。そこで、野口ら（2010）が提案する先行土湿指標 (ASI) を求める：

$$ASI_n = \sum_{i=1}^n (M_i + P_i) / i \quad (5)$$

式 (5) の P の値について雪と判断された場合は0とし、雨と判断された降水はその日の内に地表へ浸透すると仮定した。また、積雪期間中に推定した融雪量の

総和は雪と判断された降水量の総和と等しいと仮定して、その差は推定日融雪量に応じて補正した。なお、APIの n の値に関して、Negishi *et al.* (2007) は $n=7$ として出水との関係を解析し、Kosugi *et al.* (2007) は $n=60$ として土壌呼吸との関係に相関があることを示した。どちらの n の値も試行錯誤で決定しており、 n の値については対象とする現象や目的によって異なると考えられる。本研究では季節変化について検討することから、 $n=30$ とした。また、APIもしくはASIは植生による遮断蒸発・蒸発散や季節による蒸発ポテンシャルの大小の影響を受けると考えられるが、ここではそれらの影響を考慮していない。

2.3 雨・雪判断

雨雪の判別気温は、小川・野上(1994)による結果を採用して判断した。小川・野上(1994)は、降水が50%の確率で個体降水(降雪)としてもたらされる際の地上気温を雨雪の判別気温とし、日本を15の地域に区分して地域毎に冬季6カ月間の各月の判別気温を算出している。震源地周辺は東北東部に位置し、その判別気温は $1.4 \sim 2.6^{\circ}\text{C}$ であった。

2.4 積雪期と無積雪期の区分

災害地周辺は積雪地域のため、1年間を11月から翌年4月を積雪期、5月から10月を無積雪期として区分した。

2.5 使用したアメダスデータ

本研究では、災害地周辺で積雪深の観測が長期間実施されている岩手県祭時のアメダスの観測値を中心に使用した。ただし、地震直後に祭時の観測所で電力供給の問題が生じて観測が停止したため、復旧するまでの降水量は臨時の観測所の岩手県厳美での観測値を使用した。また、祭時において気温が未計測のため、岩手県一関における気温データに $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の気温減率を用いて推定し、地震の影響以外で降水量が欠測の場合、近傍の岩手県衣川の値から推定した。高山地帯の降水量と積雪深の推定にあたり、一関、祭時、宮城県栗駒および宮城県栗駒山の観測値を使用した。高山地帯の気温の推定は、宮城県川渡における気温データに $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の気温減率を用いて推定した(気象庁, 2010)。使用したデータの項目と期間についてTable 1に、位置についてTable 1とFig.1に示す。

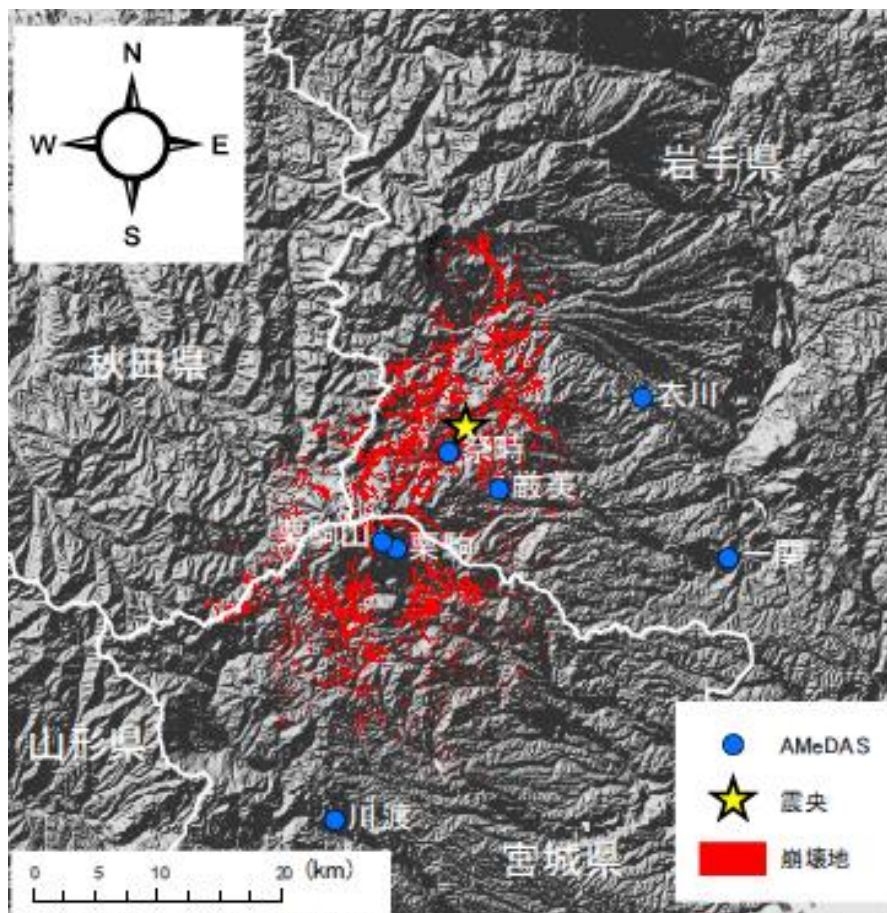


Fig. 1. 2008 年岩手宮城内陸地震における崩壊地 (■) 周辺の地形および使用したアメダス観測地点 (●) ☆は震央を示す 三森ら (2012) を改編
Topographic features and AMeDAS points (●) around the disaster area (■) of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake. The star is the epicenter of the earthquake. Adapted from Sammori *et al.* (submitted).

Table 1. 使用したアメダスデータ
Used AMeDAS data

アメダス観測地点	位置	標高 (m)	期間	使用項目
岩手県祭時	N39° 0' 36" , E 140° 51' 54"	350	1983.11. - 2010.10.	降水量、最深積雪
岩手県一関	N38° 56' 0" , E141° 7' 30"	32	1983.11. - 2010.4.	降水量、気温、最深積雪
岩手県巖美	N38° 59' 0" , E140° 54' 42"	230	2008.6.19-2008.9.2.	降水量
岩手県衣川	N39° 3' 0" , E141° 2' 42"	75	祭時が欠測時	降水量
宮城県栗駒	N38° 56' 24" , E140° 49' 0"	850	1983.11.-1997.4.	最深積雪
宮城県栗駒山	N38° 56' 42" , E140° 48' 12"	1,100	1976.6.-1979.10.	降水量
宮城県川渡	N38° 44' 36" , E140° 45' 36"	170	2007.11.-2008.10.	気温

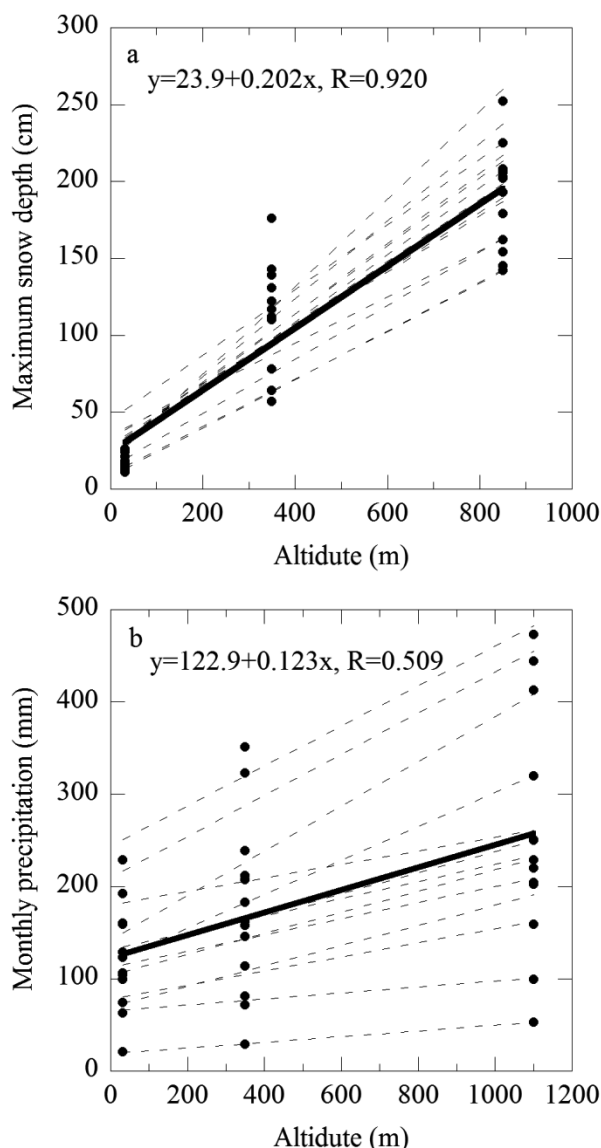


Fig. 2. (a) 一関（標高：32m）、祭時（標高：350m）および栗駒（標高：850m）における標高と最大積雪深の関係、(b) 一関、祭時、栗駒山（標高：1100m）における標高と月別降水量の関係
点線は各年の回帰直線、太線は全期間の回帰直線を示す
(a) Relationship between altitude and maximum snow depth at the Ichinoseki (altitude: 32m), Matsuube (altitude: 350m) and Kurikoma (altitude: 850m) sites, (b) Relationship between altitude and monthly precipitation at the Ichinoseki, Matsuube and Kurikomayama (altitude: 1,100m) sites. The dotted line shows a regression line of each year, and the bold line shows the regression line of all data.

2.6 高山地帯の降水量・積雪深の推定

高山地帯の降水量と積雪深の推定にあたり、東栗駒山頂近くを想定して推定する標高を1,300 mとした。標高に応じて、降水量や積雪量が増加することが指摘されている（例えば、水津ら, 1978; 山田ら, 1978; 1979）。12年冬期間（1984-1996年）の一関（標高：32m）、祭時（標高：350m）および栗駒（標高：850m）における最大積雪深と標高の関係を見ると、どの年も標高に応じて最大積雪深が増加する直線的な関係があり（Fig.2a）、それぞれの直線の勾配は0.150～0.285（平均±SD: 0.202 ± 0.040 ）であった。そこで、標高1,300m地点の最大積雪深は、祭時の値を基準としてFig.2aの平均値による関係式から推定した。また、積雪深の日変化について見ると、標高が高いほど根雪初日が早く、根雪終日が遅く、根雪期間が長い傾向があった（Fig.3abc）。また、日積雪深の変化は同期していた（Fig.3d）。そこで、標高1,300m地点の根雪初日は祭時のデータと推定した1,300m地点の気温から判断し、根雪終日は祭時の融雪減少傾向と同等と仮定して、最大積雪深を記録した日と最大積雪深の推定値を起点として求めた。降水量に関して、栗駒山（標高：1,100m）で観測されている期間（1976-1979年）に着目して、一関、祭時、栗駒山における月別降水量と標高の関係を見る（Fig.2b）。その結果、どの月も標高に応じて降水量が増加する傾向があり、それぞれの直線の勾配は0.030～0.242（ 0.123 ± 0.071 ）であった。そこで、標高1,300m地点の降水量は、祭時の値を基準としてFig.2bの平均値による関係式から推定した。

3. 結果と考察

3.1 先行土湿指数の年・季節変化

祭時における27年間の ASI_{30} は0.0～378.3mm（平均値±SD、以下同様： 22.5 ± 22.0 mm）であった。年別の ASI_{30} について見ると、平均値、最小値、最大値および変動係数はそれぞれ17.4～30.3mm（ 22.8 ± 3.0 mm）、0.0～4.1mm（ 2.6 ± 1.1 mm）、91.4～378.3mm（ 161.2 ± 61.6 mm）および74～135%（ $93 \pm 15\%$ ）であった。積雪期と無積雪期の ASI_{30} 値はそれぞれ0.8～171.1mm（ 17.5 ± 17.9 mm）および0.0

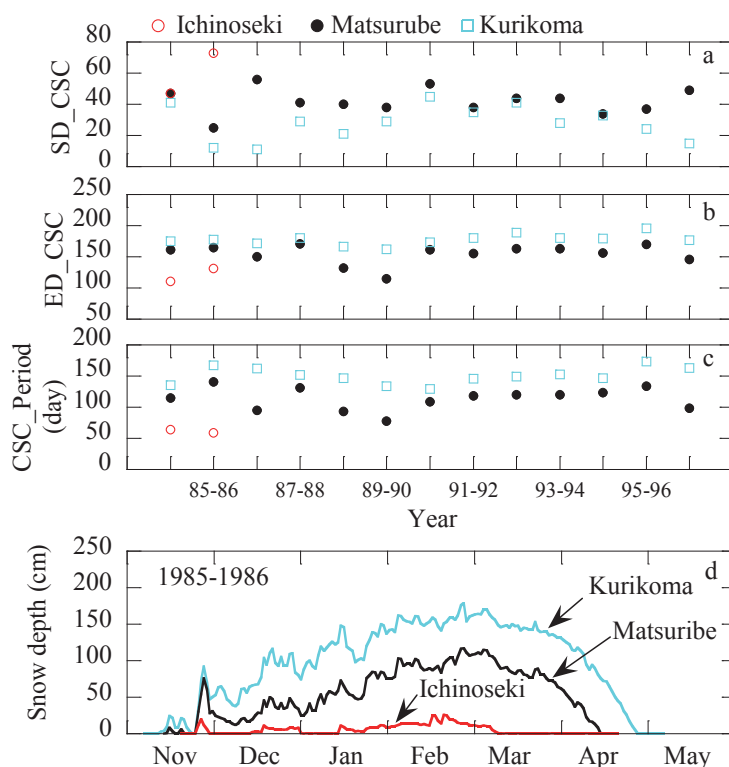


Fig. 3. 栗駒、祭時および一関における 1984-1985 年から 1996-1997 年冬の (a) 根雪初日 (SD_CSC)、(b) 根雪終日 (ED_CSC)、(c) 根雪期間 (CSC_Period) および (d) 1985-1986 年冬の積雪深の変化 (a) Start day of continuous snow cover (SD_CSC), (b) end day of continuous snow cover (ED_CSC), (c) continuous snow cover period (CSC_Period) during the 1984 - 1985 winter to the 1996 - 1997 winter periods and (d) variation of snow depth in the 1985 - 1986 winter period at the Kurikoma, Maturube and Ichinoseki sites.

～ 378.3mm (27.4 ± 24.4 mm) であった。両期間の差について、統計的に有意差が認められた ($p=0.000$)。

Fig.4 に祭時における 27 年間 (1983 年 11 月～2010 年 10 月) の ASI_{30} の旬別変化を示す。 ASI_{30} の旬別変化は年々明瞭ではないが、12 月から翌年 3 月中旬まで 20mm 以下と低く、4 月に増加する傾向を示す。その後、5 月から 6 月中旬まで低い値の頻度が増加し、6 月下旬以降から高い値を示す。地震発生以降の旬別の ASI_{30} は 20mm 未満が 3 旬つづき、最大値は 2008 年 8 月下旬の 63.9mm で、過去に記録された 80mm 以上の高い値は示されていなかった。野口ら (2010) は地震後に災害地周辺の先行土湿が小さかったことが、災害復旧に功を奏したと指摘している。地震発生の年と同様に 6 月中旬から 7 月上旬の ASI_{30} が 20mm 未満であった年は 27 年間で 1984 年と 1985 年の 2 回のみであった (Fig.4)。この結果から地震直後は乾燥状態が例年より継続されたことがより定量的に明らかにされた。

月別 ASI_{30} について Fig.5 に示す。月別 ASI_{30} の平均値は、厳冬の 2 月に最も小さい値 (6.9mm) を示し、最も高い値は 4 月 (34.9mm) で、次いで 9 月 (34.5mm) と 7 月 (31.9mm) の順であった。これは、融雪期で

ある 4 月と梅雨前線が北上する 7 月と秋雨前線による影響がある 8 月と 9 月によって ASI_{30} の値が大きくなるためと考えられる。また、100mm を超える ASI_{30} は、2 月を除く各月で示し、8 月 (26 回) にその頻度が高く、200mm を超える ASI_{30} は、8 月 (3 回)、9 月 (2 回) および 10 月 (1 回) であった。これらの結果から、月別 ASI_{30} に対して、融雪期や梅雨前線よりも秋雨前線による影響が大きいと考えられる。

3.2 積雪期の先行土湿指数

融雪期の 4 月から 5 月にかけて ASI_{30} が高い値を示した 1983-1984 年と 1999-2000 年の積雪期と、低い値を示した 1986-1987 年積雪期 (Fig.4) について、積雪深、気温、降水量および ASI_{30} に着目する (Fig.6)。27 年冬季期 (1983-1984 年～2009-2010 年) の最大積雪深は、57～206cm (131 ± 38 cm) であり、1983-1984 年と 1999-2000 年の最大積雪深は 206cm と 194cm で多雪年に相当し、1986-1987 年冬の最大積雪深は 78cm で少雪年に相当する。冬の 1 月と 2 月の気温は、多雪年の 1984 年と 2000 年は $-9.5 \sim -1.2$ °C (-5.2 ± 2.1 °C) および $-6.4 \sim 4.1$ °C (-1.0 ± 2.3 °C) で、少雪年の 1987 年は $-7.4 \sim 7.8$ °C (-2.3 ± 3.1 °C) で、少

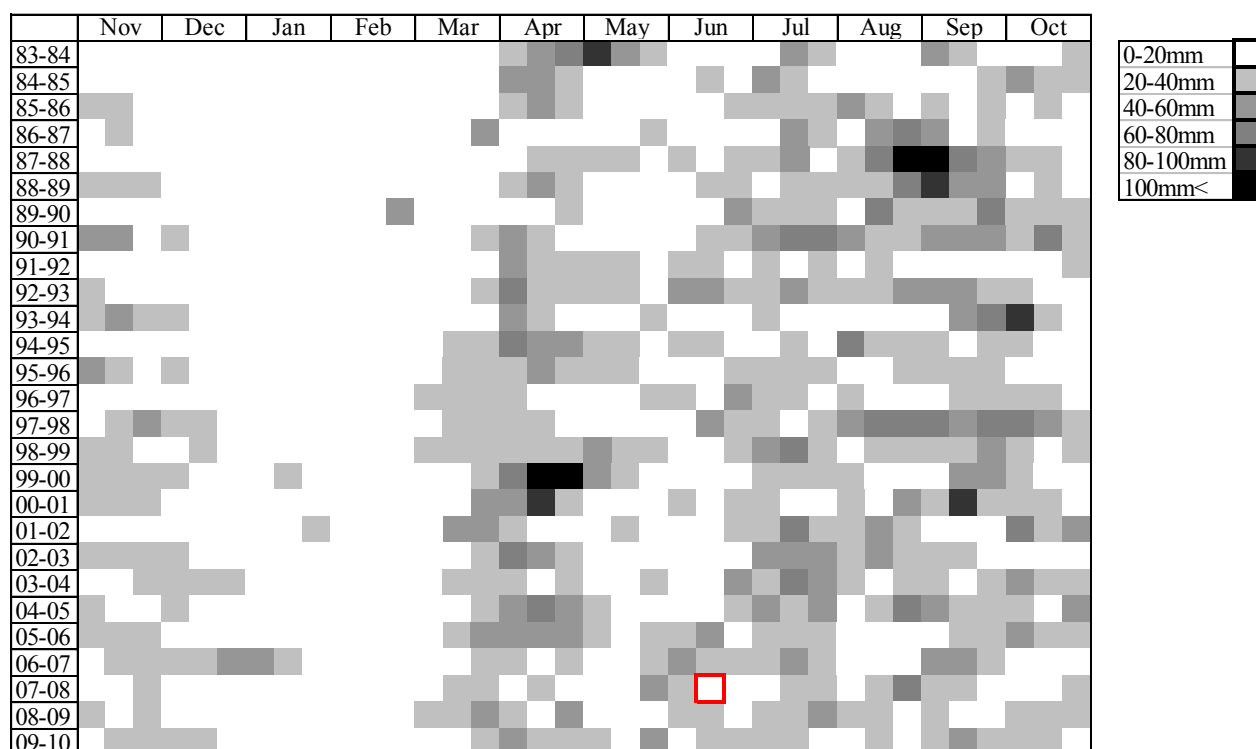


Fig. 4. 祭時における 27 年間 (1983 年 11 月～2009 年 10 月) の ASI_{30} 値の変化

メッシュは各月の旬平均値を示す。

Variation of ASI_{30} during 27 years (November, 1983 to October, 2010) at the Maturube site. Mesh indicates the average for a ten-day period of each month.

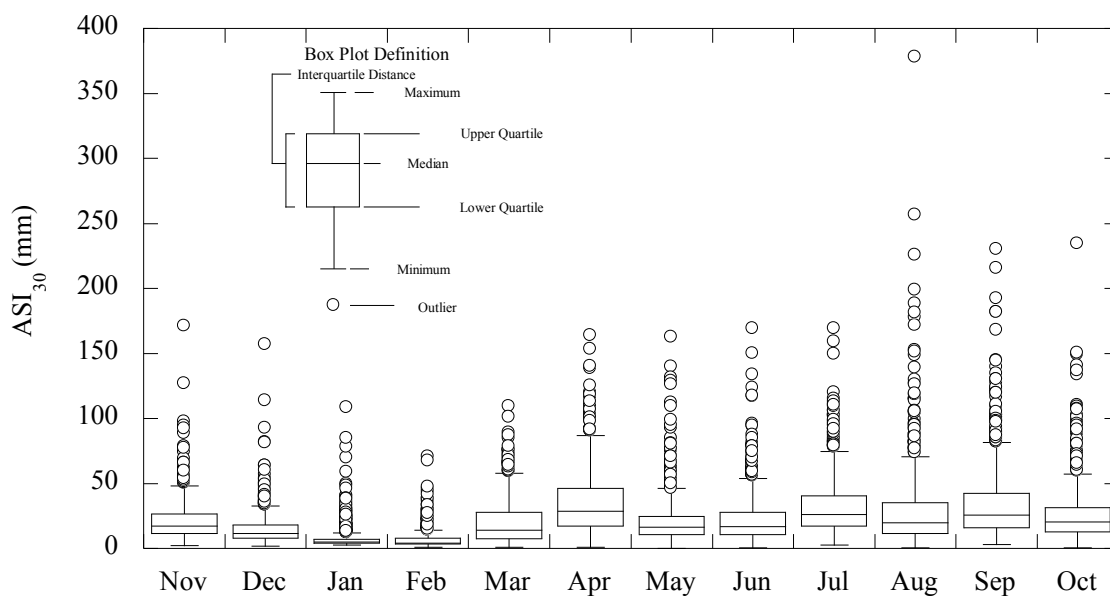


Fig. 5. 祭時における 26 年間の月別先行土湿指数 (ASI_{30})

Monthly antecedent soil moisture index (ASI_{30}) at the Maturube site for 27 years (November, 1983 to October, 2010).

雪年は気温の変動幅が大きいことが特徴である。

1986-1987年冬期は厳冬期の2月にも関わらず降雨と判断された日があり、 ASI_{30} がこの月間において36.8mmまで増加した。3月25日の53mmの降雨後に、 ASI_{30} は最大値の91.8mmを示した。その後、根雪終日(3月30日)以降は減少した。1983-1984年冬

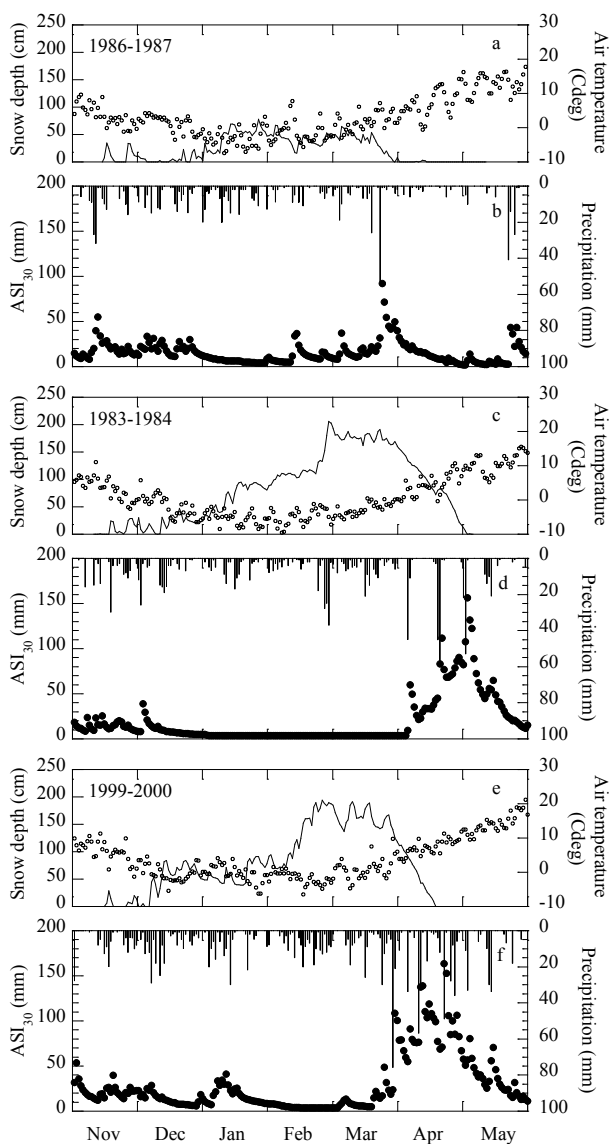


Fig. 6. 積雪期(11月から翌年5月)における(a)1986-1987年の日平均気温と積雪深、(b)1986-1987年の日降水量と ASI_{30} 、(c)1983-1984年の日平均気温と積雪深、(d)1983-1984年の日降水量と ASI_{30} 、(e)1999-2000年の日平均気温と積雪深、(f)1999-2000年の日降水量と ASI_{30} (a) Daily mean air temperature and snow depth in 1986-1987, (b) daily precipitation, and ASI_{30} in 1986-1987, (c) daily mean air temperature and snow depth in 1983-1984, (d) daily precipitation, and ASI_{30} in 1983-1984, (e) daily mean air temperature and snow depth in 1999-2000, and (f) daily precipitation and ASI_{30} in 1999-2000, during snow cover season.

期は、11月18日の根雪初日以降、12月2日の26mmの降雨後に ASI_{30} が39.1mmを示すが、4月4日まで3.5~39.1mm(6.1 ± 5.3 mm)と低い値であった。4月5日の45mmの降雨後に ASI_{30} が60.1mmと増加し、融雪が本格的に開始されてから、5月2日の53mmの降雨後に ASI_{30} は最大値の156.3mmを示した。1999-2000年冬期は、1月4日~10日まで $1.7 \sim 4.1^\circ\text{C}$ ($2.5 \pm 0.8^\circ\text{C}$)と高い気温を示して総降雨量54mmが生じ、 ASI_{30} は41.3mmを示した。融雪後期において ASI_{30} が3月30日(108.8mm)、31日(100.5mm)および4月12日~17日($103.2 \sim 139.1$ mm; 117.3 ± 15.3 mm)と100mmを超えていた。その要因は、経常的な融雪水量のほか、十分な降水量が発生したためであった。また、積雪は4月17日に消雪しているが、直後の4月21日の降雨(105mm)によって ASI_{30} が163.5mmを示した。

野口ら(2010)は融雪期に降雨イベントが伴うときに ASI_{30} の値が高くなり、注意が必要だと指摘している。少雪年において、 ASI_{30} の値が高くなる時期は早く(3月下旬)、短期間である傾向があった。多雪年において、 ASI_{30} の値が高くなる時期は少雪年時より遅く、長期間である傾向があった。一方、その時期は気温の高低によって4月上旬~中旬または4月下旬~5月上旬と異なっていた。地震後において、2008-2009年と2009-2010年の最大積雪深はそれぞれ108cmと143cmであり、過去の多雪年の最大積雪深に至っていない。このことから、引き続いて融雪期の土湿環境について注意が必要と考えられる。

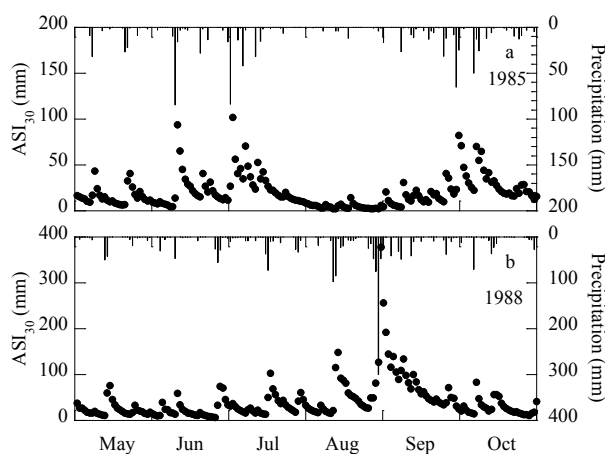


Fig. 7. 無積雪期における(a)1985年の日降水量と ASI_{30} 、(b)1988年の日降水量と ASI_{30} (a) Daily precipitation and ASI_{30} in 1985, (b) daily precipitation and ASI_{30} in 1988, during no snow cover season.

3.3 無積雪期の先行土湿指数

Fig.4 から無積雪期の ASI_{30} について、高い値を示した 1988 年と低い値を示した 1985 年の降水量と ASI_{30} に着目する (Fig.7)。27 年間 (1984 年～2010 年) の無積雪期の降水量は、926～1964mm (1252 ± 274 mm) で、1985 年と 1988 年はそれぞれ少雨年 (926mm) と多雨年 (1905mm) に相当する。1985 年の ASI_{30} は $2.1 \sim 101.9$ mm (20.3 ± 17.4 mm) で、7 月 1 日の降雨 (84mm) 後に ASI_{30} (101.9mm) が 100mm を超えた。8 月は ASI_{30} が 100mm を超える頻度が高く、比較的高い値を示す月 ($0.5 \sim 378.3$ mm; 29.6 ± 31.6 mm) だが (Fig.5)、この年の 8 月の月別降水量は 48mm で、 ASI_{30} は $0.5 \sim 13.8$ mm (3.2 ± 2.6 mm) と厳冬期の 2 月と同様な低い値を示した。1988 年の ASI_{30} は $6.6 \sim 378.3$ mm (41.8 ± 43.1 mm) で、8 月 29 日の降雨 (300mm) 後に ASI_{30} は 378.3mm を示した。この日降水量は、観測史上 (1974 年 4 月以降) で第 1 位の記録で、 ASI_{30} も最大値であった。観測史上の日降水量が第 10 位のデータは 158mm で、158mm 以上の降水量はすべて無積雪期に発生していた。地震後の最大日降水量は 2008 年 10 月 24 日に発生した 131mm で、第 10 位以内に入るような降雨イベントは発生していなかった。また、地震後の ASI_{30} の最大値は、その翌日に示した 136.4mm であった。以上から、融雪期と同様に引き続き土湿環境について注視する必要があると考えられる。

3.4 高山地帯の先行土湿指数

地震が発生した 2008 年 6 月 14 日において、東栗駒山頂近くで山腹崩壊とドゾウ沢で土石流が発生した。この地震で崩土が長距離移動した土石流はドゾウ沢のみである (三森ら, 2010)。東栗駒山頂近くでは積雪が残っていることが確認され、この地帯では融雪が継続していたと考えられる。ここでは、その状況を明らかにするため、標高 1,300 m 地点の先行土湿状態について検討する。

2007-2008 年冬期において、祭時での積雪深の観測によると、積雪初日、根雪初日、積雪終日および根雪終日は 11 月 18 日、12 月 13 日、4 月 2 日および 3 月 26 日であった。また、最大積雪深は、2 月 28 日に 143cm を記録した。祭時で積雪初日以前に降水量があり、標高 1,300m の推定気温から 11 月 2 日に雪と判断された。祭時では積雪は一時的に消雪し、根雪になるのは積雪初日から 25 日後であるが、高山地帯では 11 月 12 日の降水以降、雪と判断される気温以下であったことから (Fig.7a)、根雪開始日は 11 月 12 日と考えられた。Fig.2a から推定された 1,300 m 地点の最大積雪深は 335cm であった。しかし、Fig3 の結果から 1,300m 地点での積雪深が祭時と同様に低下すると仮定すると、消雪日は 5 月 4 日となり実際の東栗駒山頂の状況より早く消雪する結果となった。そこで、消雪日を地震発生の日 (6 月 14 日) の 1 週間後 (6 月 21 日) として推定すると、最大積雪深は 583cm であった (Fig8b)。樹林限

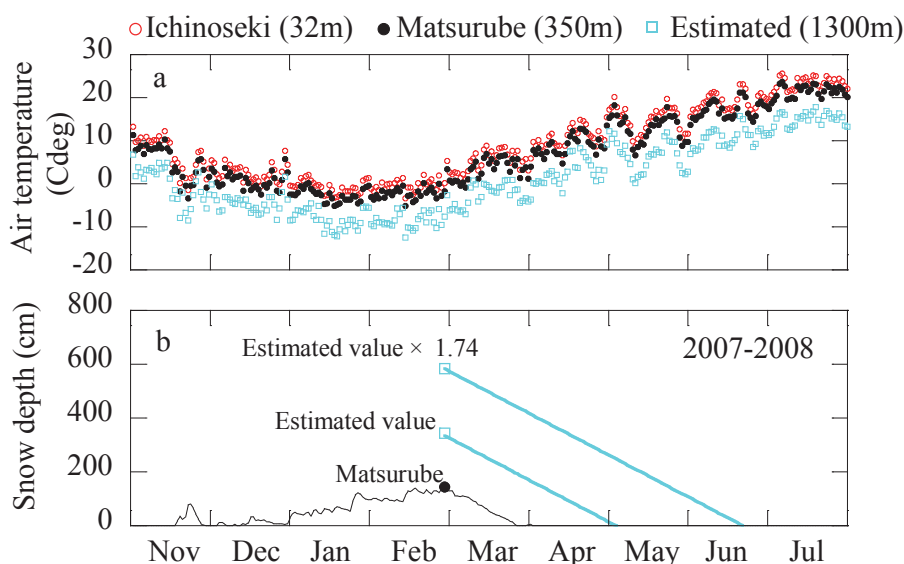


Fig. 8. (a) 一関、祭時、標高 1,300m 地点の気温、(b) 祭時の積雪深の変化、標高 1,300m 地点での融雪期の積雪深の推定値
(a) Air temperature at the Ichinoseki and Maturube sites, and the 1,300m altitude point, (b) snow depth at the Maturube site and the estimated snow depth at the 1,300m altitude point during snow melt season from 2007 November to 2008 July. Circle indicate the maximum snow depth.

界を越えた高山地帯では、地吹雪発生可能の限界風速 7m/s を越える風速が頻度高く生じ、積雪は堆積と剝削を交互に受け空間的に変動が大きくなることが観測されている(山田ら, 1979)。東栗駒周辺は樹林限界を越えた標高に位置し、崩壊斜面は奥羽山地脊梁の風下側にあたり、冬季の季節風によって多量の吹きだまりが形成される条件にあることが指摘されている(大丸ら, 投稿中)そこで、本研究では 2007～2008 年積雪期の高山地帯の ASI を計算するに当たり、最大積雪深を 583cm とした。

地震が発生した日を含む 2007-2008 年の祭時と 1,300m 地点での ASI₃₀ の結果を Fig9 に示す。1,300m 地点で推定された ASI₃₀ は、4.0～320.0mm (49.5±65.1mm) で、祭時での値 (3.1～136.4mm; 19.6±18.3mm) より高い値を示した。地震が発生した日までの土湿状態について詳細に見る。1,300m 地点において、根雪開始日と推定される 11 月 12 日から融雪が本格的に開始されたと推定された 4 月 7 日までの ASI₃₀ は、4.0～55.0mm (6.3±6.9mm) であった。期間中の ASI₃₀ の最大値は 11 月 11 日の降水 (38.9mm) が降雨と判断された翌日の 11 月 12 日であった。融雪が本格的に開始した 4 月 7 日から地震が発生した 6 月 14 日までの ASI₃₀ は、7.8～320.0mm (120.9±80.2mm) で、100mm 以上の高い ASI₃₀ が長時間持続していた。その要因は、継続的に 50mm を超える降雨が推定され (4 月 18 日: 77.8mm、5 月 20 日: 200.0mm、6 月 5 日: 52.6mm、6 月 6 日: 110.5mm)、その降雨が融雪水に加算され ASI₃₀ が高くなっていた。地震が生じた 6 月 14 日の ASI₃₀ は

245.1mm で、祭時における ASI₃₀ (:18.0mm) と比較して非常に湿潤な状態であったと考えられた。以上から、高山地帯では、山麓とは大きく異なる土湿環境を呈すると考えられる。

安田・野口 (2012) は、アメダス観測値を三次メッシュ (約 1km×1km) に展開したデータを用いて、岩手・宮城内陸地震災害地における地震発生時およびその前後の気象の特徴について解析をした。岩手・宮城内陸地震による災害地は広範囲であり、メッシュデータは災害地全体の気象の特徴を明らかにするのに有効な情報である。一方、その解析結果によると融雪は地震発生の 1 週間前に終了しており、地震当日の災害地周辺の高山地帯 (標高 1,000 以上) の API₃₀ は、最大値が 86.1mm、平均値が 30.3mm であった。本研究結果と異なる理由の 1 つは、メッシュデータでは雪田など残雪が残る場所を評価することが困難なためと考えられた。また、山岳地域においてレーダーアメダス解析雨量は、実測データより過小評価されることが指摘されている (井良沢・遠藤, 2010; 山口ら, 2010)。防災科学技術研究所では、地球温暖化の影響評価や水資源の問題に対応するために、標高 1,000 m を超える高山地帯を含む山地積雪ネットワークを構築して積雪の観測を実施している (阿部, 1997; 山口・阿部, 2007)。しかし、震源地周辺を含め東北の内陸は網羅していない。今後、防災の観点からも積雪地域の高山地帯を網羅した気象観測は重要だと考えられる。また、近年、高山地帯を含めた広域の積雪深を把握するために、レーザプロファイラーによる計測が有効である (岡本ら, 2004; Tsuboyama *et al.*, 2008)。高山地帯の積雪深の情報は、積雪地域の災害に対する対応を検討するために有益な情報になる。今後、レーザプロファイラーなどによってデータを得ることも重要だと考えられる。

謝辞

現地調査に際しては、東北森林管理局治山課および関係森林管理署のご協力を頂いた。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・独立行政法人森林総合研究所交付金プロジェクト (課題番号: 200810) によって実施した。

引用文献

- 阿部 修 (1997) 山地積雪観測ネットワーク, 雪氷防災研究発表会講演予稿集, **13**, 31-36.
大丸裕武・村上 亘・小川泰浩・川浪亜紀子 (投稿中) 積雪が 2008 年の岩手・宮城内陸地震によってドゾウ沢源頭部で発生した深層崩壊に与えた影響, 森林総合研究報告.
大丸裕武・安田正次 (2009) 地球温暖化と山地湿原, 地球環境, **14**, 175-182.

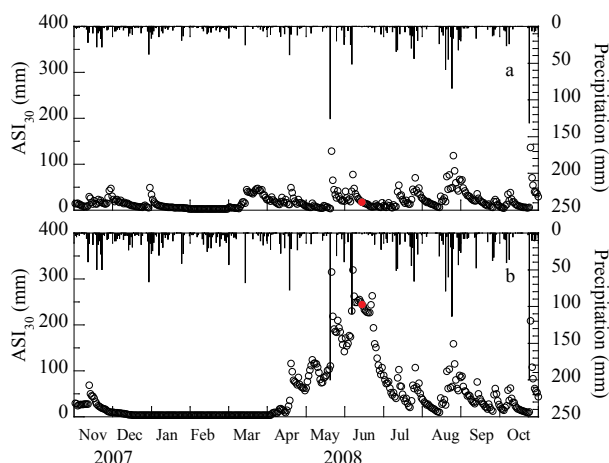


Fig. 9. (a) 2007-2008 年の祭時における日降水量と ASI₃₀, (b) 2007-2008 年の標高 1,300m における日降水量と ASI₃₀ 赤丸印は地震が生じた日
(a) Precipitation and ASI₃₀ at the Maturube in 2007-2008 year, (b) Precipitation and ASI₃₀ at the 1,300 m altitude point in 2007-2008 year.
Red circle symbols indicate the day when the earthquake occurred.

- 井良沢道也・遠藤周作 (2010), 高標高山岳地における土石流発生危険雨量の検討ー岩手山御神坂沢流域を対象としてー, 岩手大学演習林報告, **41**, 205-218.
- Ishihara, Y. and Kobatake, S. (1979) Runoff model for flood forecasting. 京都大学防災研究所報告, **29**, 27-43.
- 河島克久・和泉薫・伊豫部勉 (2005) 中越地震と豪雪がもたらした複合災害、p164-170, 新潟県連続災害の検証と復興への視点ー 2004.7.13 水害と中越地震の総合的検証ー、新潟大学、中越地震新潟大学調査団、災害復興科学センター。
- 気象庁 (2010) “過去の気象データ”, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (参照 2010-08-31)。
- 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所・独立行政法人建設研究所 (2008) 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震被害調査報告、239pp. 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所・独立行政法人建設研究所発行
- Kosugi Y., Mitani, T., Itoh, M., Noguchi, S., Tani, T., Matsuo, N., Takanashi, S., Ohkubo, S. and Abdul Rahim, N. (2007) Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **147**, 35-47.
- Mosley MP. (1982) Subsurface flow velocities through selected forestsoils, South Island, New Zealand. *Journal of Hydrology*, **55**, 65-92.
- 村上 亘・大丸裕武・江坂文寿 (投稿中) 2008 年岩手・宮城内陸地震後に発生した 2 次的な斜面崩壊の地形・地質的特徴, 森林総合研究報告。
- Negishi JN., Noguchi, S., Sidle, RC, Ziegler, AD., Abdul Rahim, N. (2007) Stormflow generation involving pipe flow in a zero-order basin of Peninsular Malaysia. *Hydrological Processes*. **21**, 789-806.
- 野口正二・三森利昭・多田泰之・安田幸生 (2010) 2008 年岩手・宮城内陸地震前後における災害地周辺の先行土湿, 新砂防, **63**, 39-43.
- 小川真由美・野上道男 (1944) 冬季の降水量形態の判別と降水量の分離, 水文水資源学会誌, **7**, 421-427.
- 太田岳史 (1989) 気温および降水量による山地積雪水量の経時変化の推定, 雪氷, **51**, 37-48.
- 岡田憲治 (2007) 土壌雨量指数による土砂災害発生危険度予測の現状, 土と基礎, **55**, 4-6.
- 岡田憲治 (2006), 土壌雨量指数と斜面崩壊, 15-18, 新潟県中越地震の斜面複合災害のモニタリングに関する研究, メカニズム、維持管理、生態系、廃棄物等の総合的斜面工学からの検討, 社団法人土木学会, 地盤工学委員会, 斜面工学研究小委員会, 141pp.
- 岡本 隆・黒川 潮・松浦純生・浅野志穂・松山康治 (2004) 山地の積雪深分布計測における航空レーザスキャナの適用に関する検討, 水文・水資源学会誌, **17**, 529-535.
- 三森利昭・大丸裕武・黒川 潮・岡本 隆・村上 亘・多田泰之・岡田康彦・野口正二・安田幸生・浅野志穂・大野泰宏 (2010) シリーズ「近年の土砂災害」2008 年岩手・宮城内陸地震による土砂災害, 水利科学, **314**, 105-127.
- 三森利昭・多田泰之・村上亘・大丸裕武・安田幸生・野口正二 (2012) 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震による土砂災害の概要とその特徴, 森林総合研究所研究報告, **11(3)**, 97-120.
- 水津重雄・山田知充・若浜五郎 (1978) 手稲山における積雪の堆積と雪質の変化, 低温科学, 物理篇, **37**, 47-54.
- 富田陽子・桜井 亘・中 庸充 (1996) 六甲山系における地震後の降雨による崩壊地の拡大について, 新砂防, **48**, 15-21.
- 東北森林管理極 (2008) 岩手・宮城内陸地震に係る山地災害対策検討会報告書, 東北森林管理局, 141pp.
- Tsuboyama, Y., Shimizu, A., Kubota, T., Abe, T., Kabeya, N., Nobuhiro, T. (2008) Measurement of snow depth distribution in a mountainous watershed using an airborne laser scanner. *Journal of Forest Planning*. **13**, 267-273.
- 山田知充・西村 寛・水津重雄・若浜五郎 (1978) 大雪山旭岳西斜面における積雪の分布と堆積・融雪過程, 低温科学, 物理篇, **37**, 1-12.
- 山田知充・西村 寛・水津重雄・若浜五郎 (1979) 大雪山の積雪量分布, 低温科学, 物理篇, **38**, 63-71.
- 山口 悟・阿部 修 (2007) 平成 18 年豪雪における山地積雪の特徴ー近年の山地積雪の変動の中でー, 雪氷, **69**, 53-59.
- 山口 悟・本吉弘岐・中井専人・阿部 修・根元柁樹 (2010) 山地観測データを用いた山地冬季解析雨量の精度評価, 日本気象学会大会講演予稿集, **98**, 120.
- 安田幸生・野口正二 (2012) 岩手・宮城内陸地震災害地における 2008 年の気象と山地積雪水量分布の特徴, 森林総合研究所研究報告, **11(3)**, 135-150.

論文 (Original article)

Aboveground production and nitrogen utilization in nitrogen-saturated coniferous plantation forests on the periphery of the Kanto Plain

Yoshiyuki INAGAKI^{1)*}, Masahiro INAGAKI²⁾, Toru HASHIMOTO³⁾,
Masahiro KOBAYASHI¹⁾, Yuko ITOH¹⁾, Yoshiki SHINOMIYA¹⁾, Kazumichi FUJII¹⁾,
Shinji KANEKO¹⁾ and Shuichiro YOSHINAGA²⁾

Abstract

The Tsukuba Forest Experimental Watershed on the periphery of the Kanto Plain receives high nitrogen deposition and has high nitrogen loss in stream water, indicating a nitrogen saturated condition. We investigated the soil properties, aboveground production and nitrogen utilization in hinoki cypress and Japanese cedar plantation forests located in the watershed. There was a low accumulation of organic horizon in the both forests, indicating rapid decomposition and nitrogen release from the organic horizon. Nitrogen input by litter fall was similar to the rate of annual soil nitrogen mineralization. Although the aboveground net primary production was relatively high in both forests, the Japanese cedar forest had a higher proportion of pollen cones. In addition, taller trees in the Japanese cedar forest had lower leaf biomass as indicated by the lower ratio of crown depth to tree height. The stem growth of these taller trees was lower than that of smaller trees. These results suggest a symptom of decline for taller trees in the Japanese cedar forest. Previously, the decline of Japanese cedar was mainly observed within the Kanto Plain at lower altitudes but the results of this study suggest the presence of declining Japanese cedar on the periphery of the Kanto Plain. Further study is required on the spatial distribution of declining Japanese cedar forests in order to determine the mechanism.

Key words : Japanese cedar, hinoki cypress, nitrogen saturation, aboveground production, nitrogen utilization

1. Introduction

Recently nitrogen deposition to forest ecosystems is increasing due to human activities. When the supply of ammonium and nitrate exceeds the plant and microbial demand, excess nitrogen may result in higher soil nitrification rate, soil acidification, higher nitrogen loss in stream water and the decline of forest productivity. These conditions are considered to constitute nitrogen saturation and many studies have been carried out in Europe and North America (Aber et al. 1989, Gundersen et al. 2006). In Japan, several studies have reported high nitrogen loss by stream water at forests along the periphery of the Kanto Plain, indicating symptoms of nitrogen saturation (Ohrui et al. 1997, Mitchell et al.1997, Yoh et al.2001, Itoh et al.2004, Fujimaki et al.2009; Mitchell 2011, Yoshinaga et al. 2012).

Because nitrogen often limits the productivity of temperate forest ecosystems (Vitousek and Howarth 1991, LeBauer and Treseder 2008), adding it generally

boosts forest productivity (LeBauer and Treseder 2008). However, if nitrogen is added still further, forest productivity would not rise further due to an imbalance of soil nutrient and soil acidification (Magill et al. 2004, Wallance et al. 2007). The effects of nitrogen deposition on forest systems can vary according to the development stage of the forest and tree species (Magill et al.2004; Bedison and McNeil 2009). Nitrogen deposition may also increase the production of reproductive organs, i.e. seeds and flowers, and the biomass allocation to leaves, stems and reproductive organs (Townsend et al. 2003; Callahan et al. 2008). Pollen cone production of hinoki cypress forests was related with soil C/N ratio (Nakanishi et al. 2008) and nitrogen deposition may promote pollen cone production.

Several studies have reported the decline of Japanese cedar at lower altitudes on the Kanto Plain (Nashimoto and Takahashi 1991, Sakata 1996, Matsumoto et al. 2002), with particularly pronounced

原稿受付：平成 24 年 4 月 17 日 Received 17 April 2012 原稿受理：平成 24 年 7 月 30 日 Accepted 30 July 2012

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

2) Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

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

* Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), Matsunosato 1, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; e-mail: yinagaki@ffpri.affrc.go.jp

decline for larger trees (Nashimoto and Takahashi 1991). The decline of these forests was related to many factors such as water stress (Sakata 1996), acid deposition (Nashimoto and Takahashi 1991), and high bulk density of the surface soil (Ito et al. 2002). When evaluating nitrogen saturation in Japanese cedar forests we must therefore consider the decline of Japanese cedar at lower altitudes.

In this study, we investigated the soil properties, forest productivity and nitrogen utilization in a hinoki cypress and Japanese cedar plantation at Tsukuba Forest Experimental Watershed on the periphery of the Kanto Plain. Kobayashi et al. (2011) showed that the area receives high nitrogen deposition and high nitrogen loss by stream water, indicating a nitrogen saturated condition. We compared nitrogen dynamics in the forests in Tsukuba and other forests in Japan and discussed the possible effects of nitrogen deposition in the area.

2. Material and Method

2.1 Study site

The study site is located at the Tsukuba Forest Experimental Watershed of the Forestry and Forest Products Research Institute, Ibaraki prefecture on the periphery of the Kanto Plain (N36°10', E140°10', 320-390 m in altitude). The mean annual precipitation is about 1400 mm, and the mean annual temperature

is 13.1 °C. A watershed with an area of 3.8 ha was established (Fig. 1). The soil parent material is volcanic ash over biotite gneiss. According to a survey near the study area, soil was classified as Eutric Fulvudand (Soil Survey Staff 2010) and was rich in free oxide of aluminum and iron (Imaya et al. 2007, Imaya A personal communication). According to the Forest Soil Classification (Forest Soil Division 1976), soil on the ridges was classified into dry subtypes of moist brown forest soil (BD(d) type) while that on the slopes was moist brown forest soil (BD type) (Ohnuki and Yoshinaga 1995).

A 20 × 30 m plot was established in the hinoki cypress and Japanese cedar forests for a tree census (Fig. 1) on the north-east and north-west facing slopes, respectively, separated by a valley. The hinoki cypress and Japanese cedar trees were planted in 1968 and 1953 and the stand ages in 2007 were 39 and 54 years, respectively (Table 1). Nitrogen input, as measured by bulk precipitation in 2008, was 7.2 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ while that by through fall in the hinoki cypress and Japanese cedar forests was 22.4 and 11.4 kg N ha⁻¹ yr⁻¹, respectively (Kobayashi et al. 2011). Nitrogen loss by stream water of the same year was 11.3 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ (Kobayashi et al. 2011). Previous studies have reported that nitrogen loss from Japanese cedar forests ranged from 0.6-28.0 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ (Mitchell et al. 1997) and the nitrogen loss of the Tsukuba area was relatively high and comparable to the value in nitrogen saturated forests on the periphery of the Kanto Plain (12.7-16.1 kg N ha⁻¹ yr⁻¹, Mitchell et al. 1997).

2.2 Soil

Soil samples were collected from depths of 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm from a soil profile in the hinoki cypress and Japanese cedar forests. The collected samples were then sieved to pass 2 mm, whereupon the fine soil obtained was analyzed for

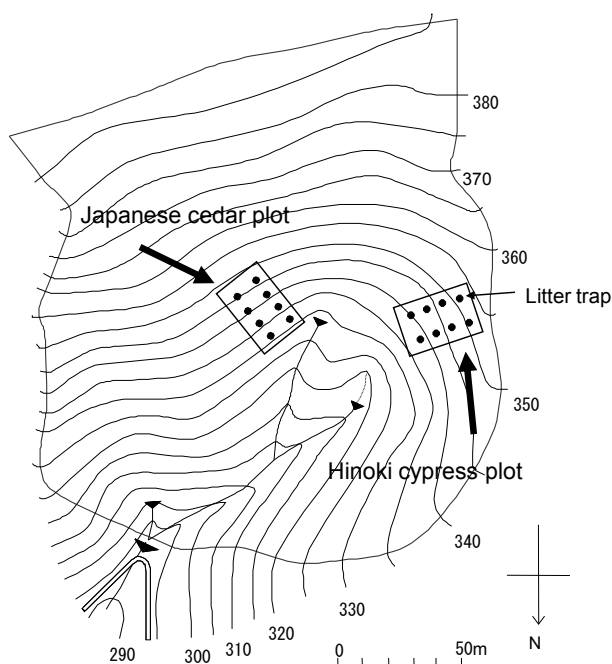


Fig. 1. Location of the study plots

Table 1. Stand characteristics in 2007

		Hinoki cypress	Japanese cedar
Age	(yr)	39	54
Density	(trees ha ⁻¹)	2417	1500
Ry index*		0.91	0.86
DBH	(cm)	18.6	23.3
Height	(m)	15.4	18.8
Stem biomass	(Mg ha ⁻¹)	221.3	213.4

*Relative yield index (Ando 1968)

carbon and nitrogen content by an NC analyzer (NC 22F; Sumika Analytical Center, Osaka). The soil pH was also determined for the soil–water suspension (1:2.5 w/w) using a pH meter (HM30V; DKK-TOA, Tokyo).

Litter in the organic horizon was collected from an area $0.5 \times 0.5\text{m}$ at 6 locations in each plot in April 2008. The collected samples were divided into twigs and other materials, whereupon the dry weight of each of these samples was measured. The samples were ground and measured for nitrogen and carbon concentration by an NC analyzer. The mean residence time of mass, carbon and nitrogen in the organic horizon were calculated as follows, assuming constant input and accumulation at a steady state.

$$\text{Mean residence time (yr)} = \frac{\text{Accumulation (Mg ha}^{-1}\text{)} }{\text{Input by litterfall (Mg ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}\text{)}}$$

2.3 Stem growth

Tree height and diameter at breast height (DBH) was measured for trees exceeding 5 cm in DBH at the end of the growing season from 2007 to 2011. In 2011, the height of the lowest live branch was also measured (Hb). Stem volume was calculated from the tree height and DBH by using the equation for hinoki cypress and Japanese cedar for the area (Forest Agency 1970). Stem biomass was calculated by the stem volume multiplied by the base bulk density from the reported value (hinoki cypress 407 Mg m^{-3} , Japanese cedar 314 Mg m^{-3} , Fujiwara 2004). The annual DBH growth rate and stem growth rate were also calculated and the stem growth of dominant trees was evaluated. Trees were arranged from larger stem volume and the cumulative stem volume was calculated. The larger individuals up to 50% of total stem volume were considered dominant trees. In the hinoki cypress and Japanese cedar plots, 33 and 28% of trees were considered dominant, respectively. The relationship between tree height in 2007 and subsequent stem growth from 2008 to 11 was analyzed, as well as that between tree height in 2007 and the ratio of crown depth to the tree height.

2.4 Litterfall

Eight litter traps with an area of 0.5 m^2 were placed in the hinoki cypress and Japanese cedar plots in September 2007 (Fig. 1). Litterfall was collected at 1-2 month intervals from September 2007 to July 2011. In this study, we defined a leaf-fall year as running from July through to June the following

year, because the leaf fall rate of the hinoki cypress is lowest in July (Inagaki et al. 2010). We did not collect litterfall from July to September in 2007, but we considered the underestimation for annual content relatively small because the amount of litterfall from July to September was low in other years (less than 8% of the annual litterfall). The collected litterfall from 8 traps was combined into a single sample. The samples were then divided into conifer leaves, other leaves, pollen cones, seed cones, conifer branches and others, and their dry weight at $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ was measured. Because conifer leaves and pollen cones are very small and difficult to separate, part of the samples (about 30 g, 5-100% of the total sample) was divided for these organs. The nitrogen and carbon concentration of the sorted samples were measured using an NC analyzer. The nitrogen concentration of conifer leaves was measured for every collection but that for other organs were measured for the combined sample from July to June the following year.

2.5 Biomass and nitrogen allocation

Biomass allocation into leaves, stem, branches and reproductive organs were calculated. The pollen cones in the litterfall do not include pollen and the ratio of the weight of pollen-laden pollen cones to that of those without is 2.5 and 2.0 for the hinoki cypress and Japanese cedar, respectively (Kiyono et al. 2003, Saito and Takeoka, 1983). The production of pollen cones was calculated as the fallen pollen cones multiplied the above ratio. Nitrogen allocation to different organs was also calculated. The nitrogen concentration of stems was also determined for recently fallen trees in the area. The preliminary study in Kochi and Kyoto prefectures (Inagaki et al. unpublished data) suggests that the nitrogen concentration of pollen is similar to fallen pollen cones, i.e. the mean (SD) of the ratio of nitrogen concentration in pollen to that in fallen pollen cones was 1.0 (0.05) for the hinoki cypress ($n=4$) and 1.1 (0.20) for the Japanese cedar ($n=7$). Therefore we considered the nitrogen concentration of pollen was same as that of fallen pollen cones.

The nitrogen use efficiency of conifer leaves (NUE_{leaf}) was calculated as the ratio of mass to the nitrogen content of conifer leaves by the definition of Vitousek (1982). The nitrogen use efficiency of aboveground (NUE_{ag}) was calculated as the ratio of aboveground production to nitrogen utilized for the aboveground biomass production.

3. Results

3.1 Soil properties

The masses in the organic horizon were 8.25 and 14.38 Mg ha⁻¹ in the hinoki cypress and Japanese cedar forests, respectively (Table 2). The carbon contents in the organic horizon were 4.12 and 7.17 Mg ha⁻¹ while the nitrogen contents were 73.1 and 126.2 kg ha⁻¹ in the hinoki cypress and Japanese cedar plots, respectively. C/N ratio in the organic horizon was higher for branch than non-branch material but was similar between hinoki cypress and Japanese cedar forests.

In the hinoki cypress forest, although the soil pH was low in the surface soil (0-10 cm depth), it gradually increased with depth (Fig. 2). In the Japanese cedar forest, conversely, the soil pH was low (4.4) and relatively constant in the soil profile. Soil carbon and nitrogen concentration were higher at the surface soil and gradually decreased with depth. The C/N ratio in the surface soil was about 16 and decreased to 12-13.

3.2 Stem growth

At the end of the growing season in 2007, the hinoki cypress forest had a higher stand density, lower mean DBH and lower mean tree height than the Japanese cedar forest (Table 1). The stem volume of

the two forests was similar. The relative yield indices defined by Ando (1968) were 0.91 and 0.86 in the hinoki cypress and Japanese cedar forests, suggesting that the hinoki cypress forest was very crowded. The mean annual DBH growth rates were 0.26 and 0.24 cm for the hinoki cypress and Japanese cedar forests, showing no difference between them (Table 3). The mean annual stem growth was higher in the hinoki cypress forest (11.4 Mg ha⁻¹ yr⁻¹) than in the Japanese cedar forest (8.6 Mg ha⁻¹ yr⁻¹). The mortality rate was higher but net annual stem production was higher in the hinoki cypress forest than the Japanese cedar forest.

In the Japanese cedar forest, taller trees in 2007 had a lower ratio of crown depth to tree height in 2011; suggesting taller trees have fewer leaves due to the higher lowest live branch (Fig. 3a). The ratio of crown depth to tree height in 2011 in the hinoki cypress forest was greater for taller trees (Fig. 3b), which is the opposite trend to Japanese cedar forests. In the Japanese cedar forest, the annual stem growth of dominant trees for 4 years was lower for taller trees in 2007 (Fig. 3c). Conversely, in the hinoki cypress forest, the annual stem growth of dominant trees was higher for taller trees in 2007 (Fig. 3d).

Table 2. Accumulation and mean residence time (MRT) of organic matter, carbon and nitrogen in the organic horizon

	Hinoki cypress			Japanese cedar		
	Non-branch	branch	total	Non-branch	branch	total
Mass						
Organic horizon (Mg ha ⁻¹) (a)	5.61	2.64	8.25	11.29	3.09	14.38
Litterfall (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹) (b)	5.22	0.73	5.95	6.44	0.48	6.92
MRT (yr) (a/b)	1.07	3.64	1.39	1.75	6.49	2.08
Carbon						
Organic horizon (Mg ha ⁻¹) (a)	2.76	1.36	4.12	5.60	1.57	7.17
Litterfall (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹) (b)	2.78	0.36	3.14	3.38	0.24	3.62
MRT (yr) (a/b)	0.99	3.72	1.31	1.65	6.60	1.98
Nitrogen						
Organic horizon (kg ha ⁻¹) (a)	59.6	13.5	73.1	112.4	13.8	126.2
Litterfall (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) (b)	44.8	3.9	48.7	61.9	1.9	63.7
MRT (yr) (a/b)	1.33	3.42	1.50	1.82	7.44	1.98
C/N ratio						
Organic horizon	46	101	56	50	114	57
Litterfall	62	93	65	55	129	57

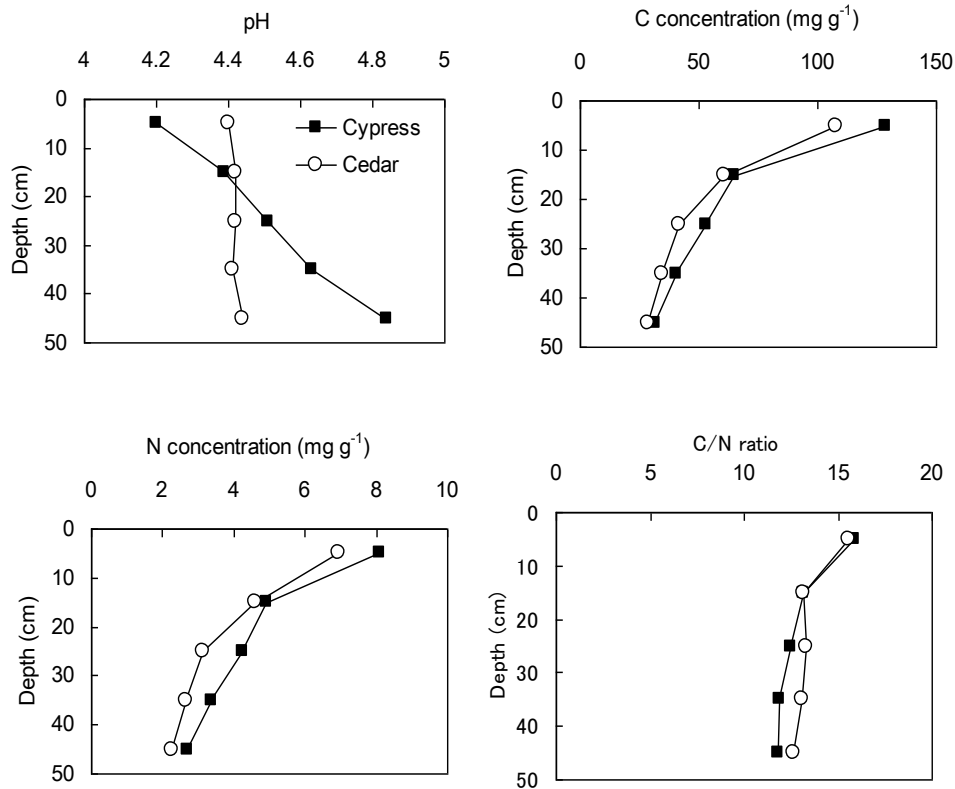


Fig. 2. pH, total C and N concentration in the soil profile

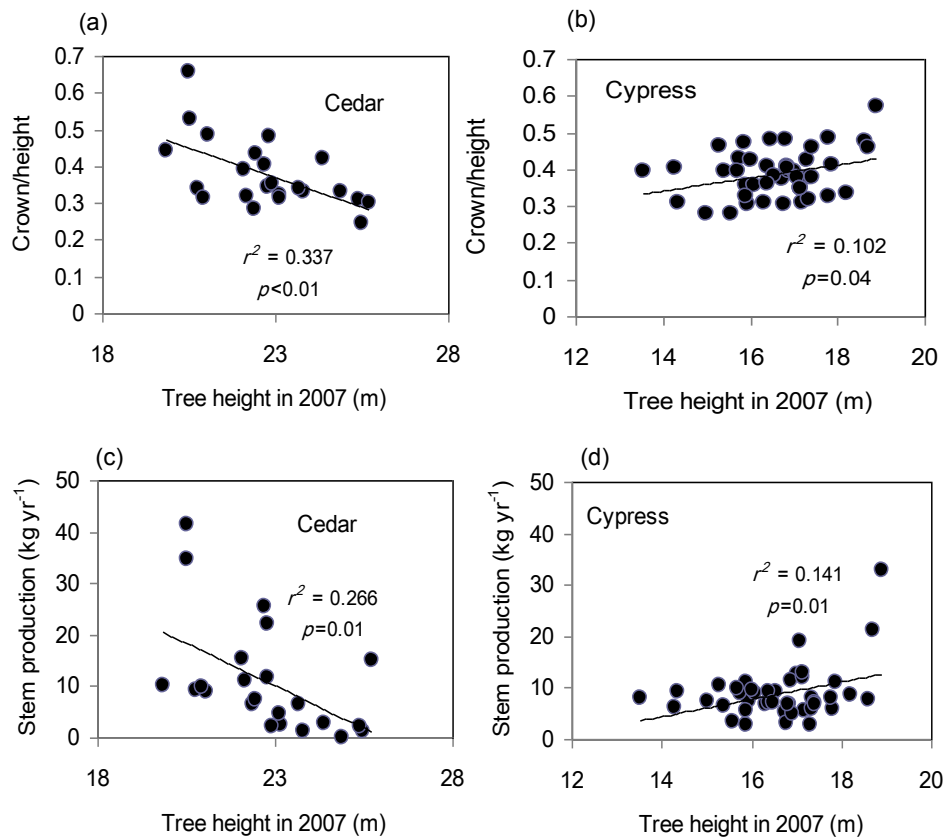


Fig. 3. Relationship between tree height in 2007 and the ratio of crown depth to tree height in 2011 or stem growth from 2007 to 2011

Table 3. Stem growth in hinoki cypress and Japanese cedar plantation

	Density (trees ha ⁻¹)	Diameter growth (cm yr ⁻¹)	Stem increment (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Mortality rate (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Net stem increment (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)
Hinoki cypress					
2008	2417	0.25	9.7	0.0	
2009	2317	0.22	16.0	3.3	
2010	2183	0.17	6.1	4.6	
2011	2167	0.31	13.8	0.6	
Mean		0.24	11.4	2.1	9.3
Japanese cedar					
2008	1500	0.24	6.1	0.0	
2009	1383	0.32	12.4	5.6	
2010	1367	0.22	8.8	0.5	
2011	1367	0.26	7.0	0.0	
Mean		0.26	8.6	1.5	7.1

3.3 Litterfall

The mean annual litter produced in 2007-2011 was 5.95 and 6.92 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ in the hinoki cypress and Japanese cedar forests, respectively (Table 4). The mean production of conifer leaves were 4.75 and 4.38 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ in the hinoki cypress and Japanese cedar forests, respectively. The proportion of conifer leaves to total litterfall was greater in the Japanese cedar forest. Many green conifer leaves fell in 2009-10 for the hinoki cypress forest, and 2007-8 for the Japanese cedar forest. The percentage of green coniferous leaf relative to coniferous leaves was greater in the Japanese cedar (22%) than in the hinoki cypress forest (17%). Many pollen cones also fell in the Japanese cedar forest. In the mast year of 2010-11, 1.7 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ of pollen cones was recorded as falling, which was equivalent to 3.4 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ of pollen cones with pollen.

The mean annual nitrogen inputs by litterfall for 4 years were 48.7 and 63.0 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ in the hinoki cypress and Japanese cedar forests, respectively. The nitrogen concentrations of conifer leaves were 8.51 and 8.05 mg N g⁻¹, and those of total litterfall were 8.23 and 9.24 mg N g⁻¹ for the hinoki cypress and Japanese cedar forests, respectively (Table 5). The inter-annual variation of reproductive organs was considerable and nitrogen concentration of pollen cones high in the Japanese cedar forest. These conditions should lead to a greater variation in the total-litter nitrogen concentration.

When we compare the annual production rate of

conifer leaves with previous studies (Table 6), the value for hinoki cypress in this study was relatively high while that in the Japanese cedar forest was higher than the average. The annual nitrogen input of conifer leaves showed a similar trend. The nitrogen concentration of conifer leaves of the hinoki cypress forest exceeded the average but that in the Japanese cedar forest was similar to the average.

3.4 Mean residence time of the organic horizon

The mean residence times of non-branch material in the organic horizon were 1.07 and 1.75 years and those of branch were 3.64 and 6.49 years in the hinoki cypress and Japanese cedar forests, respectively (Table 2). The mean residence times of total mass in the organic horizon were 1.39 and 2.08 years in the hinoki cypress and Japanese cedar forests, respectively. The mean residence time of carbon and nitrogen content showed a similar trend to that of mass.

3.5 Allocation

The results of biomass allocation were compared with those in the 38-year-old Japanese cedar forests at the Katsura experimental forest with low nitrogen deposition in Ibaraki prefecture (Inagaki et al. 2011) (Table 7). Biomass allocation to leaves was similar between the three forests (27.2-29.7%), although biomass allocation to stems was lower in the Tsukuba Japanese cedar forest (54.7%) than the other two forests (63.3-63.9%) while that to pollen cones was higher in the Tsukuba Japanese cedar forest (10.4%) than the other two forests (0.7-2.6%). Nitrogen allocation to stems was similar between the three forests (13.2-15.7%). In the Tsukuba Japanese cedar forest, nitrogen allocation to pollen cones was higher and that to leaves was lower than the other two forests.

For the hinoki cypress and Japanese cedar forests in Tsukuba, the nitrogen use efficiency of conifer leaves (NUE_{leaf}) was similar between the two forests (119-120). The nitrogen use efficiency of aboveground (NUE_{ag}) in the Japanese cedar forest (227) was lower than that in the hinoki cypress forest (322).

4. Discussion

4.1 Soil properties

The mean values of carbon contents in the organic horizon were 5.15 and 5.25 Mg C ha⁻¹ for hinoki cypress and Japanese cedar forests in Japan (Takahashi et al. 2010). Carbon content in this study was slightly

Table 4. Litter mass and litter nitrogen input in the hinoki cypress and Japanese cedar forests

Year	Conifer leaves			Branch	Pollen cones	Seed cones	Other leaves	Others	Total
	Brown	Green	Total						
Litter mass (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)									
Hinoki cypress									
2007-8	3.45	0.65	4.10	0.86	0.02	0.05	0.01	0.15	5.19
2008-9	3.05	0.52	3.57	0.53	0.06	0.21	0.01	0.24	4.62
2009-10	3.40	1.40	4.80	1.02	0.00	0.28	0.04	0.28	6.42
2010-11	5.87	0.63	6.51	0.48	0.13	0.17	0.01	0.24	7.55
Mean	3.95	0.80	4.75	0.73	0.05	0.18	0.02	0.23	5.95
Japanese cedar									
2007-8	3.75	2.01	5.76	0.66	1.01	0.66	0.16	0.24	8.49
2008-9	2.53	0.62	3.15	0.33	0.30	0.48	0.28	0.45	4.99
2009-10	3.63	0.73	4.37	0.41	0.23	0.68	0.31	0.41	6.40
2010-11	3.77	0.49	4.26	0.51	1.70	0.66	0.22	0.44	7.79
Mean	3.42	0.96	4.38	0.48	0.81	0.62	0.24	0.38	6.92
Litter nitrogen input (kg N ha ⁻¹ yr ⁻¹)									
Hinoki cypress									
2007-8	26.8	8.4	35.2	5.0	0.2	0.3	0.1	1.4	42.2
2008-9	24.4	6.9	31.3	3.2	0.5	1.3	0.1	3.1	39.5
2009-10	26.7	16.3	43.1	4.9	0.0	1.9	0.7	3.7	54.3
2010-11	41.7	8.8	50.5	2.6	1.4	1.1	0.2	3.1	58.9
Mean	29.9	10.1	40.0	3.9	0.5	1.2	0.3	2.8	48.7
Japanese cedar									
2007-8	33.7	18.3	52.0	2.6	10.5	5.6	2.7	3.8	77.2
2008-9	17.4	6.3	23.7	1.1	3.1	4.8	5.1	7.6	45.3
2009-10	28.3	7.3	35.6	1.5	2.4	6.8	6.2	7.3	59.7
2010-11	30.6	4.4	35.0	2.2	17.9	6.6	3.9	7.1	72.7
Mean	27.5	9.1	36.6	1.9	8.5	5.9	4.5	6.5	63.7

Table 5. Nitrogen concentration of litterfall (mg N g⁻¹)

Year	Conifer leaves			Branch	Pollen cones	Seed cones	Other leaves	Others	Total
	Brown	Green	Total						
Hinoki cypress									
2007-8	7.77	12.82	8.57	5.79	11.87	6.85	14.97	8.95	8.12
2008-9	7.99	13.32	8.76	5.99	9.00	6.22	12.23	12.67	8.54
2009-10	7.86	11.65	8.96	4.81	13.67	6.93	17.80	13.17	8.45
2010-11	7.10	13.85	7.76	5.45	10.69	6.33	16.98	12.74	7.80
Mean	7.68	12.91	8.51	5.51	11.31	6.58	15.50	11.88	8.23
Japanese cedar									
2007-8	6.86	10.16	7.51	3.32	10.16	9.90	18.43	17.03	9.09
2008-9	7.79	9.90	8.15	3.60	10.42	9.93	20.14	18.01	9.33
2009-10	8.12	8.95	8.21	4.38	10.50	9.98	17.62	16.32	9.33
2010-11	8.03	9.42	8.34	3.89	10.41	9.57	18.49	16.92	9.21
Mean	7.70	9.61	8.05	3.80	10.37	9.85	18.67	17.07	9.24

Table 6. Mass and nitrogen content of litterfall in the hinoki cypress and Japanese cedar forests in previous studies

	Mass (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)		Nitrogen content (kg N ha ⁻¹ yr ⁻¹)		N concentration (mg N g ⁻¹)	
	Conifer leaves	Total litter	Conifer leaves	Total litter	Conifer leaves	Total litter
Hinoki cypress (n=24)						
Mean	2.89	4.32	23.7	35.3	8.1	8.0
Minmum	1.60	2.00	9.9	14.9	5.7	5.9
Maxmum	4.80	6.41	48.0	68.0	10.9	10.6
SD	0.88	1.25	9.2	14.0	1.5	1.5
Japanese cedar (n=14)						
Mean	3.05	4.68	25.4	40.0	8.1	8.6
Minmum	1.04	1.60	7.7	17.4	5.3	6.2
Maxmum	5.90	7.40	58.4	71.5	12.7	11.4
SD	1.45	1.63	15.9	16.3	2.1	1.7

Data is from Fukushima et al (2011), Haibara and Aiba (1982), Ichikawa (2008), Inagaki et al (2004, 2005, 2010), Oura (2010), Toda et al (1991), Tsutsumi et al (1983)

higher in the Japanese cedar forest (7.17 Mg C ha⁻¹) but lower in the hinoki cypress forest (4.12 Mg C ha⁻¹, Table 2). The reported mean residence times of mass in the organic horizon were 1.3-5.1 years for hinoki cypress and 3.0-4.4 years for Japanese cedar forests (Ichikawa et al. 2003). Vogt et al. (1986) summarized the mean residence time of the organic horizon from global forest ecosystems and the mean value for temperate coniferous forests was 4.6 years. Compared with these studies, the mean residence time of this study was short, suggesting rapid decomposition of the organic horizon, as was the mean residence time of nitrogen content in this study. During the decomposition processes, the C/N ratio generally decreases (Takeda 1994) and the mean residence time of nitrogen should exceed that of mass. The short mean residence time of nitrogen in this study suggests that immobilization of nitrogen is limited and nitrogen in the organic horizon should be released as fast as organic matter decomposes.

When compared to the study conducted in the Kanto and Chubu districts of Japan (Imaya et al. 2005), soil pH of the Japanese cedar forest in this study is very low, especially in deeper soil (Fig.2). Previous studies showed that soil pH decreased after application of nitrogen fertilizer (Inoue 1982, Nagakura et al. 2006) thereby suggesting that the addition of nitrogen lowers soil pH in Japanese cedar forests. A relatively large loss of nitrogen in this study

Table 7. Biomass and nitrogen allocation in the hinoki cypress and Japanese cedar forests. Values in parentheses indicate percentage to the total amount.

	parentheses indicate percentage to the total amount.					
	Tsukuba Hinoki cypress (this study)		Tsukuba Japanese cedar (this study)		Katsura Japanese cedar (Inagaki et al 2011)	
Biomass allocation (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)						
Stem	10.2	(63.9)	8.6	(54.7)	8.2	(63.3)
Branch	0.7	(4.5)	0.5	(3.0)	0.4	(3.2)
Leaf	4.7	(29.7)	4.4	(27.9)	3.5	(27.2)
Pollen cones	0.1	(0.7)	1.6	(10.4)	0.3	(2.6)
Seed cones	0.2	(1.1)	0.6	(3.9)	0.5	(3.7)
Total	16.0	(100.0)	15.7	(100.0)	13.0	(100.0)
Nitrogen allocation (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)						
Stem	7.1	(13.2)	11.4	(15.7)		
Branch	3.9	(7.4)	1.9	(2.6)		
Leaf	40.0	(75.0)	36.6	(50.3)		
Pollen cones	1.2	(2.2)	16.9	(23.3)		
Seed cones	1.2	(2.2)	5.9	(8.2)		
Total	53.4	(100.0)	72.7	(100.0)		
NUE _{leaf}	119		120			
NUE _{ag}	322		227			

is noted between Japanese forests (Kobayashi et al. 2011), and high nitrogen deposition in the area would partially explain low soil pH in the Japanese cedar forest. Soil pH is determined by many factors other than nitrogen deposition (van Breemen et al. 1983) and the relative importance of nitrogen deposition should be investigated in the future.

Soil nitrogen mineralization (0-50 cm depth) in the study area was previously determined by the resin core method over two years, from 2008 to 2009 (Inagaki et al. 2012, Table 8). The annual nitrogen mineralization rate of soil was 75.0 and 51.0 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ in the hinoki cypress and Japanese cedar forests, respectively. In the Oyasan area, where nitrogen deposition was high, the annual nitrogen mineralization rate for soil at a depth of 0-20 cm was 51.5 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ (Oyanagi et al. 2004). In the Katsura area, with lower nitrogen deposition, the annual nitrogen mineralization rate was 105.1 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ (Hirai et al. 2007). Takebayashi et al. (2010) showed that nitrogen mineralization was not high in forests with higher nitrogen deposition. These findings suggest that the relationship between nitrogen deposition and soil nitrogen mineralization is unclear.

4.2 Biomass production and nitrogen utilization

Mean stem production in the Japanese cedar forest was lower than that in the hinoki cypress forest (Table 3). Taller trees in the Japanese cedar forest have fewer leaves, as indicated by the lower ratio of crown depth to tree height indicating a symptom of decline (Fig. 3a). In addition, the growth of taller trees in the Japanese cedar forest was lower than smaller trees (Fig. 3c) and is limited due to lower amount of leaves. At the lower altitude of the Kanto Plain, many studies reported the decline of the Japanese cedar (Nashimoto and Takahashi 1991, Sakata 1996, Matsumoto et al. 2002) which was particularly pronounced for larger trees (Nashimoto and Takahashi 1991). Previously, the decline of the Japanese cedar was mainly distributed in lower areas and not observed in mountainous areas on the periphery of the Kanto Plain (Matsumoto et al. 2002). However the result of this study suggest the presence of the declining Japanese cedar and the maximum tree height are limited in the mountain area.

Nagakura et al. (2008) revealed that adding of nitrogen to Japanese cedar trees increases transpiration. Nagakura et al. (2006) also noted a drier soil water condition when nitrogen was added to a Japanese cedar plantation. In contrast, Sase et al. (1998) have shown that lower wax content in leaves affected by an acid aerosol should increase transpiration. These findings suggest that increased transpiration by certain factors should be important but the mechanism of declines in Japanese cedar forests is complex. The mechanism of the decline of taller trees in this study is not clearly known and further study is required in mountainous areas as well as in urban areas.

Although aboveground production was similar between the hinoki cypress and Japanese cedar forests, their allocation differed (Table 7). In the Japanese cedar forest, allocation to reproductive organs was considerable but that to stems was low. When compared with Japanese cedar forests in the Katsura area with low nitrogen deposition (Inagaki et al. 2011) the Japanese cedar forest in Tsukuba also had high allocation to reproductive organs. The mean annual production of pollen cones was $1.6 \text{ Mg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, while that in a mast year was very high ($3.4 \text{ Mg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, Table 7). This value exceeds the reported values in Katsura area ($0.2\text{--}0.5 \text{ Mg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$; Inagaki et al. 2011). As far as the authors know, the largest reported pollen cone production was $4.2 \text{ Mg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ in Okayama prefecture (Hashizume and Suo 1996) and the value

of this study is relatively high. These findings suggest that the Japanese cedar has the potential to produce pollen cones and the Japanese cedar forest in this study has a high production of pollen cones. The production of pollen cones in the hinoki cypress forest was low ($0.1 \text{ Mg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, Table 7). Reported values of the annual production of pollen cones for the hinoki cypress forests ranged from $0.0\text{--}0.3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (Nakanishi et al. 2008) and the production of pollen cones in this study was modest. We concluded that the production of pollen cones was lower in the hinoki cypress than the Japanese cedar and the production was likely to differ due to the species' characteristics.

Nitrogen input by litterfall of this study was relatively large when compared with previous studies (Table 7) and was similar to the rate of annual soil nitrogen mineralization (Table 8). The nitrogen concentrations of conifer leaves in nitrogen saturated forests were 9.3 and 8.9 mg N g^{-1} in the hinoki cypress and Japanese cedar forests in the Oyasan area, and $10.2\text{--}10.6 \text{ mg N g}^{-1}$ in the Tama area (Haibara and Aiba 1982, Toda et al. 1991, Oura 2010). The nitrogen concentration of conifer leaves in this study was lower than that in these forests and close to the mean value for Japanese forests (Table 6). These results suggest that the nitrogen concentration of conifers in the study site is approximately average. However, the nitrogen allocation to reproductive organs was very large in the Japanese cedar forest of this study. The nitrogen concentration of pollen cones was also relatively high and high allocation to pollen cones may lead to lower aboveground nitrogen use efficiency (NUE_{ag}) (Table 7). Based on these findings, we concluded that a larger nitrogen allocation to reproductive organs should lead to lower nitrogen use efficiency in the Japanese cedar forest and that the pattern of nitrogen allocation was an important component to determine nitrogen utilization in forest ecosystems.

Table 8. Annual net soil nitrogen mineralization rate (kg N ha^{-1}) in the two plots over 2 years (data from Inagaki et al 2012)

Soil depth (cm)	Hinoki cypress	Japanese cedar
0-10cm	52.7	31.2
10-20cm	15.0	10.8
20-30cm	4.7	4.8
30-40cm	2.3	2.3
40-50cm	0.2	1.8
0-50 cm total	75.0	51.0

5. Conclusion

The nitrogen cycling in the hinoki cypress and Japanese cedar forests in the Tsukuba Forest Experimental Watershed was summarized as acidified soil, rapid turnover of mass and nitrogen in the organic horizon, and soil nitrogen mineralization at a moderate rate. The aboveground production and nitrogen uptake by trees were relatively large but taller trees in the Japanese cedar forest had fewer leaves and lower growth rate. These results suggest a symptom of decline for taller trees in the Japanese cedar forest. The Japanese cedar was allocated a large biomass and nitrogen to pollen cones. Previously, the decline of the Japanese cedar was mainly observed within the Kanto Plain at lower altitudes but the results of this study suggest the presence of the Japanese cedar in decline on the periphery of the Kanto Plain. Further study on the spatial distribution of Japanese cedar forests is required to understand the mechanism of the decline of the Japanese cedar.

Acknowledgements

This work was supported in part by a research grant "Nitrate nitrogen loss caused by nitrogen saturation at forests surrounding the Tokyo Metropolitan area" from Ministry of the Environment, Japan and by a Grant-in-Aid for Scientific Research (No. 22580167) from Japan Society for the Promotion of Science.

References

- Aber, J.D., Nadelhoffer, K.J., Steudler, P. and Melillo, J.M. (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience*, 39, 378-386
- Ando, T. (1968) Ecological studies on the stand density control in even-aged pure stand. *Bull. Gov. For. Exp. Sta.* 210, 1-153 (in Japanese with English summary)
- Bedison, J.E., and McNeil, B.E. (2009) Is the growth of temperate forest trees enhanced along an ambient nitrogen deposition gradient? *Ecology*, 90, 1736-1742
- Callahan, H.S., del Fierro, K., Patterson, A.E. and Zafar, H. (2008) Impacts of elevated nitrogen inputs on oak reproductive and seed ecology. *Glob. Change Biol.* 14, 285-293
- Forest Soil Division, (1976) Classification of forest soil in Japan (1975). *Bull. Gov. Forest Exp. Sta.* 280, 1-28 (in Japanese with English summary)
- Forestry Agency, (1970) Table of Stem Volume, Eastern Japan. *Nihon Ringyo Chosakai*, Tokyo, 333 pp. (In Japanese)
- Fujimaki, R., Sakai, A. and Kaneko, N. (2009) Ecological risks in anthropogenic disturbance of nitrogen cycles in natural terrestrial ecosystems. *Ecol. Res.*, 24, 955-964
- Fujiwara, T., Yamashita, K. and Kuroda, K. (2004) Basic densities as a parameter for estimating the amount of carbon removal by forests and their variation. *Bull. Forestry Forest Prod. Res. Inst.* 6, 215-226
- Fukushima, K., Tateno, R. and Tokuchi, N. (2011) Soil nitrogen dynamics during stand development after clear-cutting of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations. *J. Forest Res.* 16, 394-404
- Gundersen, P., Schmidt, I.K. and Raulund-Rasmussen K (2006) Leaching of nitrate from temperate forests-effects of air pollution and forest management. *Environ. Rev.* 14, 1-57
- Haibara, K and Aiba, Y. (1982) The nutrient circulation and budget for a small catchment basin of an established Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* S. et Z.) stand. *J. Jpn. Forestry Soc.* 64, 8-14
- Hashizume, H. and Suo, Z. (1996) Annual changes of male flower production in *Cryptomeria japonica* forests and their relationship between male flower production and meteorological elements. *Trans. Kansai Branch. Jpn. Forestry Soc.* 5, 71-72
- Hirai, K., Noguchi, K., Mizoguchi, T., Kaneko, S. and Takahashi, M. (2007) Contribution of subsoil and season for nitrogen mineralization under field condition in forest soil. *Jpn. J. Forest Environ.*, 49, 51-59 (in Japanese with English summary)
- Ichikawa, T., Takahashi, T. and Asano, Y. (2003) Comparison of nutrient dynamics along a slope between artificial Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) forests. *J. Jpn. Forest Soc.*, 85, 222-233 (in Japanese with English summary)
- Ichikawa, T. (2008) Effects on characteristics of soil nutrient dynamics of conversion from deciduous broad-leaved forest to Japanese cypress and Japanese cedar plantations. *J. Field Sci.*, 7, 11-70 (in Japanese with English summary)
- Imaya, A., Ohta, S., Tanaka, N. and Inagaki, Y. (2005) General chemical properties of brown forest soils developed from different parent materials in the submontane zone of the Kanto and Chubu districts, Japan. *Soil Sci. Plant Nutri.*, 51, 873-884

- Imaya, A., Inagaki, Y., Tanaka, N. and Ohta, S. (2007) Free oxides and short-range ordered mineral properties of brown forest soils developed from different parent materials in the submontane zone of the Kanto and Chubu districts, Japan. *Soil Sci Plant Nutri* 53: 621-633
- Inagaki, M., Inagaki, Y., Furusawa, H., Kobayashi, M., Itoh, Y., Yoshinaga, S., Ugawa, S., Kaneko, S. and Miura, S. (2012) Processes of net nitrogen mineralization and annual net inorganic nitrogen production in soils under *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa*. *Kanto Forest Res.*, 63, 101-104
- Inagaki, Y., Miura, S. and Kohzu, A. (2004) Effects of forest type and stand age on litterfall quality and soil N dynamics in Shikoku district, southern Japan. *Forest Ecol. Manag.*, 202, 107-117
- Inagaki, Y., Fukata, H., Kuramoto, S. and Miura, S. (2005) Relationships between phenology of leaf-fall and nitrogen use in Hinoki cypress plantations in Shikoku Island. *Appl. Forest Sci.*, 14, 69-76 (in Japanese with English summary)
- Inagaki, Y., Okuda, S., Sakai, A., Nakanishi, A., Shibata, S. and Fukata, H. (2010) Leaf-litter nitrogen concentration in hinoki cypress forests in relation to the time of leaf-fall under different climatic conditions in Japan. *Ecol. Res.*, 25, 429-438
- Inagaki, Y., Noguchi, K., Kaneko, S., Hashimoto, T. and Miura, S. (2011) Biomass allocation to leaves, stems and reproductive organs in Japanese cedar plantations with different stand densities. *Jpn. J. Forest Environ.*, 53, 23-29 (in Japanese with English summary)
- Inoue, K. (1982) Effects of fertilizer application for 20 years in a Japanese cedar forest. *Shinrin to hibai* 112: 5-9 (in Japanese)* tentative translation by the author
- Itoh, Y., Miura, S., Kato, M. and Yoshinaga, S. (2004) Resional distribution of nitrate concentrations in the stream water of forested watersheds in the Kanto and Chubu districts. *J. Jpn. Forest Soc.*, 86, 275-278 (in Japanese with English summary)
- Ito, E., Yoshinaga, S., Ohnuki, Y., Shichi, K., Matsumoto, Y. and Taoda, H. (2002) Soil factors affecting the decline of *Cryptomeria japonica* forest in Kanto plains, Japan. *Jpn. J. For. Environ.*, 44(2), 37-43 (in Japanese with English summary)
- Kiyono, Y., Okuda, S., Takeuchi, I., Ishida, K., Noda, I., Kondo, H. (2003) Heavy thinning increases male strobili production in Sugi (*Cryptomeria japonica*) plantation. *Jpn. J. Forest Soc.*, 85, 237-240 (in Japanese with English summary)
- Kobayashi, M., Yoshinaga, S., Itoh, Y., Tsuboyama, Y., Tamai, K., Kabeya, N. and Shimizu, T. (2011) Nitrogen leaching from two forested watershed in Ibaraki, Japan. Abstract of Japan Geoscience Union 2011, AHW026-12 (in Japanese)
- LeBauer, D.S. and Treseder, K.K. (2008) Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, 89, 371-379
- Magill, A.H., Aber, J.D., Currie, W.S., Nadelhoffer, K.J., Martin, M.E., McDowell, W.H., Mellilo, J.M. and Steudler, P. (2004) Ecosystem response to 15 years of chronic nitrogen additions at the Harvard Forest LTER, Massachusetts, USA. *Forest Ecol. Manag.*, 196, 7-28
- Matsumoto, Y., Koike, N., Kawarasaki, S., Uemura, A., Harayama, H., Ito, E., Yoshinaga, S., Ohnuki, Y., Shichi, K., Okuda, S., Ishida, A. and Taoda, H. (2002) The condition of tree and forest declines of the Kanto Plain in 1999-2001. *Jpn. J. Forest Environ.* 44, 53-62 (in Japanese with English summary)
- Mitchell, M.J., Iwatsubo, G., Ohnuki, K. and Nakagawa, Y. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forests: an evaluation. *Forest Ecol. Manag.*, 97, 39-51
- Mitchell, M.J. (2011) Nitrate dynamics of forested watersheds: spatial and temporal patterns in North America, Europe and Japan. *J. Forest Res.*, 16, 333-340
- Nagakura, J., Akama, A., Mizoguchi, T., Okabe, H., Shigenaga, H., Yamanaka, T. (2006) Effects of chronic nitrogen application on the growth and nutrient status of a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) stand. *J. Forest Res.*, 11, 299-304
- Nagakura, J., Kaneko, S., Takahashi, M. and Tange, T. (2008) Nitrogen promotes water consumption in seedlings of *Cryptomeria japonica* but not in *Chamaecyparis obtusa*. *Forest Ecol. Manag.*, 255, 2533-2541
- Nakanishi, A., Inagaki, Y., Fukata, H., Shibata, S. and Osawa, N. (2008) Effects of soil properties and high intensity thinning on male flower production in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) forests. *Jpn. J. Forest Environ.*, 50, 167-174 (in Japanese with English summary)
- Nashimoto, M. and Takahashi, K. (1991) Decline of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) trees in the Kanto-Koshin and Kansai-Setouchi districts. *Jpn. J. Forest Environ.*, 32, 70-78 (in Japanese with English summary)

- Ohnuki, Y. and Yoshinaga, S. (1995) Soil distribution and its physical properties affecting water storage and runoff rates in Tsukuba forest experimental watershed. Bull. Forestry Forest Prod. Res. Inst., 369, 189-207 (in Japanese with English summary)
- Ohrui, K. and Mitchell, M.J. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. Ecol. Appl., 7, 391-401
- Oura, N. (2010) Effect of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forested ecosystems and N₂O emission from the forest floor. Bull. Nat. Inst. Agro-Environ. Sci., 27, 1 — 84 (in Japanese with English summary)
- Oyanagi, N., Toda, H., Kuboi, T. and Haibara, K. (2004) Characteristics of carbon and nitrogen dynamics in a small watershed of aged Japanese cedar and cypress stands in the northern Kanto region, Japan. J. Jpn. Forest Soc., 86, 134-143
- Saito, H. and Takeoka, M. (1983) Pollen production in 60-year-old plantations of *Chamaecyparis obtusa*. Jpn. J. Ecol., 33, 365-373 (in Japanese with English summary)
- Sakata, M. (1996) Evaluation of possible causes for the decline of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) based on elemental composition and $\delta^{13}\text{C}$ of needles. Environ. Sci. Tech., 30, 2376-2381
- Sase, H., Takamatsu, Y., Yoshida, Y., Inubushi, K. (1998) Changes in properties of epicuticular wax and the related water loss in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) affected by anthropogenic environmental factors. Can. J. Forest Res., 28, 546-556
- Soil Survey Staff, (2010) Keys to Soil Taxonomy 11th ed., Natural Resources Conservation Service. USDA. Washington DC
- Takahashi, M., Ishizuka, S., Ugawa, S., Sakai, Y., Sakai, H., Ono, K., Hashimoto, S., Matsuura, Y. and Morisada, K. (2010) Carbon stock in litter, deadwood and soil in Japan's forest sector and its comparison with carbon stock in agricultural soils. Soil Sci. Plant Nutri., 56, 19-30
- Takebayashi, Y., Koba, K., Sasaki, Y., Fang, Y.T. and Yoh, M. (2010) The natural abundance of ^{15}N in plant and soil-available N indicates a shift of main plant N resources to NO_3^- from NH_4^+ along the N leaching gradient. Rapid Commun. Mass Spectrom., 24, 1001-1008
- Takeda, H. (1994) Interactions between plant and decomposer populations in forest ecosystems: a mechanism of biodiversity maintenance. Jpn. J. Ecol., 44, 211-222 (in Japanese)
- Toda, H., Haibara, K. and Arai, M. (1991) Nutrient circulation in a small watershed under an established Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) stand. Bull. Exp. Forests, Tokyo Univ. Agri. Tech., 28, 1-22
- Townsend, A.R., Howarth, R.W., Bazzaz, F.A., Booth, M.S., Cleveland, C.C., Collinge, S.K., Dobson, A.P., Epstein, P.R., Holland, E.A., Keeney, D.R., Mallin, M.A., Rogers, C.A., Wayne, P. and Wolfe, A.H. (2003) Human health effects of a changing global nitrogen cycle. Front. Ecol. Environ., 1, 240-246
- Tsutsumi, T., Nishitani, Y. and Kirimura, Y. (1983) On the effects of soil fertility on the rate and the nutrient element concentrations of litterfall in a forest. Jpn. J. Ecol., 33, 313-322
- van Breemen, N., Mulder, J. and Driscoll, C.T. (1983) Acidification and alkalization of soils. Plant Soil, 75, 283-308
- Vitousek, P.M. (1982) Nutrient cycling and nutrient use efficiency. Am. Nat., 119, 553-572
- Vitousek, P.M. and Howarth, R.W. (1991) Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? Biogeochemistry, 13, 87-115
- Vogt, K.A., Grier, C.C., Vogt, D.J. (1986) Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. Adv. Ecol. Res., 15, 303-377
- Wallace, Z.P., Lovett, G.M., Hart, J.E. and Machona, B. (2007) Effects of nitrogen saturation on tree growth and death in a mixed-oak forest. Forest Ecol. Manag., 243, 210-218
- Yoh, M., Konohira, E. and Yagi, K. (2001) Regional distribution of natural stream nitrate in central Japan. Water Air Soil Poll., 130, 655-660
- Yoshinaga, S., Itoh, Y., Aizawa, S. and Tsurita, T. (2012) Variation in nitrate concentrations in streamwater of forested watersheds in the northeastern Kanto Plain as a function of distance from the Tokyo metropolitan area. J Jpn For Soc 94, 84-91 (in Japanese with English summary)

関東平野周辺の窒素飽和状態の針葉樹人工林における 地上部生産と窒素利用様式

稲垣 善之^{1)*}、稲垣 昌宏²⁾、橋本 徹³⁾、小林 政広¹⁾、伊藤 優子¹⁾、
篠宮 佳樹¹⁾、藤井 一至¹⁾、金子 真司¹⁾、吉永 秀一郎²⁾

要 旨

筑波共同試験地は、関東周辺の山間部に位置しており、森林に負荷される窒素量が多く、渓流水からの窒素流亡も大きい窒素飽和状態の森林流域である。この林分のスギ林とヒノキ林において、土壌の性質と地上部生産、器官への乾物生産の分配、窒素の分配を調査した。有機物層の現存量は小さく、有機物は速やかに分解され、窒素を放出した。リターフォールによる窒素供給量は、土壌の窒素無機化速度とほぼ同じであった。ヒノキ林、スギ林では地上部一次生産は高く維持されているものの、スギ林では雄花の分配率が大きく、地上部の窒素利用効率が低下した。スギ林では、樹高の高い個体で樹冠長が小さく葉量が少ない傾向が認められた。樹高の高い個体は低い個体よりも幹成長が小さい傾向が認められた。これらの結果は、スギ林の樹高の高い個体で衰退の兆候が認められることを示す。これまで山間部のスギ林は、関東平野部に比べて衰退の程度が小さいと考えられてきたが、本研究の結果より、衰退の兆候を示す林分が存在することが明らかになった。今後窒素負荷の影響を考慮しながら都市近郊のスギ林の健全性を評価することが重要である。

キーワード：スギ、ヒノキ、窒素飽和、地上部生産、分配

1) 森林総合研究所立地環境研究領域

2) 森林総合研究所九州支所

3) 森林総合研究所北海道支所

* 森林総合研究所立地環境研究領域 〒 305-8687 茨城県つくば市松の里 1 e-mail: yinagaki@affrc.go.jp

短 報 (Note)

強度間伐したヒノキ人工林の表層土壌の物理性

篠宮佳樹^{1)*}、稲垣善之¹⁾、野口麻穂子²⁾、奥田史郎³⁾、宮本和樹²⁾、伊藤武治²⁾

Physical properties of surface soils at intensive thinned Hinoki cypress plantations

Yoshiki SHINOMIYA^{1)*}, Yoshiyuki INAGAKI¹⁾, Mahoko NOGUCHI²⁾,
Shiro OKUDA³⁾, Kazuki MIYAMOTO²⁾ and Takeharu ITOU²⁾

Abstract

The physical properties of the surface soil were investigated by comparing adjacent intensive thinning and control plots in hinoki cypress plantations (OKU and KRK) in Kochi Prefecture, Shikoku Island. The percentages of thinning in OKU and KRK were 64 and 57 %, respectively. Surface soil samples at a depth of 0–4 cm were collected using a 400 mL cylindrical sampler after almost 1 year of intensive thinning. Bulk density, total porosity, coarse and fine porosities were not significantly different between the control and intensive thinning plots in OKU and KRK. This result suggests that the influence of intensive thinning under this condition (the non-commercial thinning without extracting and brown forest soil) to bulk density, total porosity, coarse and fine porosities is not as large as that of clear cutting. This may be because the influence of operation was not so strong and the soil type was different from easily eroded one like black soil originated from volcanic ash. The large porosity (0 ~ -0.4 kPa) was significantly lower and medium porosity (-0.4 ~ -6.2 kPa) and maximum water holding capacity were significantly higher in the intensive thinning than in the control. These results would show that soil water condition in surface soils extends to humid after intensive thinning, which may result in the elevation of available water for the remaining trees and for the water conservation function.

Key words : Hinoki cypress plantation, soil physical property, surface soil, intensive thinning, non-commercial thinning

1. はじめに

近年、木材価格の低迷や林業労働者の不足といった社会経済状況のため、集約的でコスト抑制が可能な森林管理方法として、本数で40%を超える強度間伐が目目されている(深田 2006, 渡辺ら 2008, 相浦ら 2010)。また同時に森林を適切に管理し、水資源や土壌の保全などの多面的機能を発揮することが求められている。そのため、強度間伐が土壌の孔隙組成に及ぼす影響を調査、解析することによって、集約的でコスト抑制可能な人工林施業の水源涵養機能に対する有効性を明らかにする必要がある。

森林土壌は大小様々な大きさの孔隙を含む。そのうち、粗孔隙は水を一時的に貯留する役割の他、その良好な透水性により下層へ水を導く役割も果たし、粗孔隙の増加

は結果的に水源涵養機能を向上させると考えられており、水源涵養機能への影響を推察する1つの指標となっている(有光 1987, 小柏ら 1991, 太田・服部 2002 など)。我が国のヒノキ人工林で皆伐施業が土壌物理性に及ぼす影響について、透水性や粗孔隙の減少、容積重や固相率の増加などが報告されている(上田ら 1965, 小林 1982, 荒木・有光 1984, 小野 2005)。こうした変化は地表流の発生や表土流失を促進している可能性がある。強度間伐では皆伐よりは大きくはないが、通常の間伐よりは土壌に及ぼす影響が大きい可能性もあり、その検証が必要である。強度間伐の影響をヒノキ人工林で検討した事例では、明確な変化が認められなかった場合(古池 1986, 荒木ら 2002)と、透水性の低下傾向(吉田ら 1992)や粗孔隙の減少が認められた場合(篠宮ら 2011)など、結果は

原稿受付:平成24年3月26日 Received 26 March 2012 原稿受理:平成24年7月30日 Accepted 30 July 2012

1) 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)

2) 森林総合研究所四国支所 Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

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

* 森林総合研究所立地環境研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: shinomiya@ffpri.affrc.go.jp

様々であり一定の傾向はみられない。なお、スギ人工林においては間伐の結果、土壌の粗孔隙の増加（小柏ら 1991）、表層土壌における容積重の低下・粗孔隙の増加（諫本 1992）が報告され、間伐による森林土壌の水源涵養機能の向上を示唆する結果が得られている。影響が異なるのは、個々の事例における植生・土壌などの立地条件や伐採・搬出などの施業条件の違いが影響したためと予想され、多様な立地条件や施業条件に対応した調査事例を蓄積する必要がある。例えば、強度間伐に伴い林地に多量の枝条が残される場合がある。ヒノキ人工林の間伐地で対照区・枝条放置区の表層土壌の孔隙組成を比較したところ、違いは認められず枝条の有無による表層土壌の孔隙組成への影響はないことが報告されている（荒木ら 2005）。本報では、褐色森林土が分布するヒノキ人工林において強度間伐を実施した後、強度間伐区（枝条の影響のない場所）・対照区の表層土壌の物理性を比較することで、強度間伐がヒノキ人工林の表層土壌の物理性に及ぼす影響について検討した。

2. 研究方法

調査は奥大野試験地（高知県吾川郡いの町奥南川山国有林、以下「OKU」）、辛川試験地（高知県土佐清水市辛川山国有林、以下「KRK」）の2箇所のヒノキ林で行った（Table 1）。年雨量、年平均気温は OKU で 2948 mm、9.8℃、KRK で 2964mm、14.1℃であった（気象庁 2002）。両試験地とも土壌型は B_D 型（土じょう部 1976）、北～北西向きの傾斜約 35° の斜面中部にあり、

針葉樹人工林の伐採後に再び植林されたものである。OKU は標高約 900m、KRK は 320m に位置し、それぞれ中間温帯域、暖温帯域に属する（Noguchi et al. 2011）。OKU の間伐時における林齢は 31 年生、KRK は 34 年生、地質は OKU が変成岩、KRK が堆積岩であった。両試験地で年平均気温、標高が異なるが、年降水量、土壌型、斜面方位、傾斜、林齢はほぼ同じであった（Miyamoto et al. 印刷中）。

OKU では 40m×40 m の試験区が 12 箇所、KRK では 20m×20 m の試験区が 6 箇所設定されている（Miyamoto et al. 印刷中）。そのうちの上木や下層植生の生育状況がほぼ等しく、概ね平衡斜面と思われる隣りあう試験区を 2 箇所選定し、一方を強度間伐区、他方を無間伐の対照区とした。OKU では、強度間伐区・対照区のいずれにおいても間伐前の下層植生は非常に少なかった（Table 1）。KRK ではいずれの試験区にも若干の下層植生が認められ、そのおもな種はコバノカナワラビ（*Arachniodes sporadosora*）、ミヤマノコギリシダ（*Diplazium mettenianum*）であった。OKU は 2008 年 5 月に、KRK は 2008 年 1 月に、本数で約 60% の強度間伐を実施した（Table 2）。間伐は定性間伐を基本とし、被圧木や形質不良木を中心とする下層間伐と、高い間伐率を確保するため残存木の配置が不均等にならないよう配慮しつつサイズの大きな個体の間伐も実施し、結果的に全層間伐に近い状態となった。伐採木は搬出せず放置した。間伐実施後の 2009 年 6 月（間伐の概ね 15 ヶ月後）に、対照区・強度間伐区で採土円筒（直径 11.3cm、高さ

Table 1. 試験地の概要
Summary of study sites

	奥大野 Okuohno (OKU)	辛川 Karakawa (KRK)
緯度 Latitude	N33° 41′	N32° 50′ 20″
経度 Longitude	E133° 15′	E132° 52′ 21″
標高 Elevation (m)	890	320
年降水量 Annual precipitation (mm)	2948	2964
年平均気温 Annual mean air temprature (°C)	9.8	14.1
傾斜 Slope (°)	35	37
斜面方位 Slope aspect	N10°W	N40°W
土壌型 Soil type	B _D	B _D
土壌母材 Parent material	変成岩 Metamorphic rock	堆積岩 Sedimentary rock
林齢（間伐時） Stand age in thinning	31	34
被度（間伐前）* Vegetation cover before thinnning (%)	対照区 Control 強度間伐区 Intensive thinning	21 45

* 出現したすべての維管束植物種の被度を合計した値

* Vegetation cover summed up for all observed vascular plant species

Table 2. 調査林分における間伐実施概要
Summary of thinning in the study sites

試験区 Plot	立木本数Tree number (本/ha)			幹材積Stem volume (m ³ /ha)		
	間伐前	間伐後	間伐割合	間伐前	間伐後	間伐割合
	Before thinning	After thinning	Percentage of cutting(%)	Before thinning	After thinning	Percentage of cutting(%)
OKU 対照区 Control	2050	-	0	337	-	0
OKU 強度間伐区 Intensive thinning	2125	775	63.5	365	185	49.3
KRK 対照区 Control	1775	-	0	326	-	0
KRK 強度間伐区 Intensive thinning	1700	725	57.4	394	201	49.1

4cm, 容積 400mL) を用いて立木と立木との間の深さ 0 ~ 4cm の土壌を 5 個ずつ採取した。強度間伐区では伐採木の幹・枝の影響の無い場所より採取した。試料は実験室に持ち帰り、河田・小島 (1979) および森林立地調査法編集委員会 (1999) に準拠して容積重、全孔隙率、粗孔隙率、細孔隙率、最大容水量、最小容気量、飽和透水係数などを測定した。孔隙解析は加圧板法により行った。孔隙区分について、有光ら (1995)、諫本 (2002) などを参考に Fig. 1 のように分類した。大孔隙率は河田・小島 (1979) の最小容気量を相当させた。採土円筒を飽水処理する際、吸水が十分でなかった 14 試料 (OKU 対照区 5 個、OKU 強度間伐区 3 個、KRK 対照区 3 個、KRK 強度間伐区 3 個) については常法 (森林立地調査法編集委員会 1999) に準拠して試料表面が湿るまでアルコール (エタノール: 水 = 1 : 1 溶液) を噴霧した。統計解析はソフトウェア (JMP6.0, SAS Institute) を用いて、試験地 (OKU, KRK) と処理 (強度間伐区、対照区) による二元配置の分散分析を行った。

3. 結果及び考察

強度間伐前の 2007 年 7 ~ 9 月に円筒 (容積 100mL, n=5) で採取した表層土壌の容積重 (平均値 ± 標準偏差) は OKU の強度間伐区、対照区で $0.49 \pm 0.16 \text{ Mg m}^{-3}$ 、 $0.45 \pm 0.03 \text{ Mg m}^{-3}$ 、KRK では $0.65 \pm 0.04 \text{ Mg m}^{-3}$ 、 $0.67 \pm 0.12 \text{ Mg m}^{-3}$ で、それぞれの試験地で間伐前の容積重に特に違いはみられなかった (稲垣, 未発表)。本調査の結果、OKU は KRK より容積重が軽く、全孔隙率、粗孔隙率、小孔隙率は高かった。最大容水量は OKU、KRK ともに対照区より強度間伐区で約 10%、中孔隙率は 5 ~ 7% 高かった。大孔隙率は対照区より強度間伐区で概ね 8% 小さかった (Table 3)。分散分析の結果、細孔隙率と飽和透水係数 (対数値) には有意差がなかったが、容積重、全孔隙率、粗孔隙率、小孔隙率に試験地 OKU と KRK による有意差が、最大容水量、大孔隙率、中孔隙率に強度間伐の有無による有意差が認められた (Table 4)。

孔隙区分	粗孔隙			細孔隙	
	大孔隙	中孔隙	小孔隙		
マトリック ポテンシャル	-∞	0.6	1.8	2.7	+∞ (pF値)
	0	-4	-63	-501	-∞ (cmH ₂ O)
	0	-0.4	-6.2	-49.1	-∞ (kPa)

Fig. 1. 孔隙率の分類
Classification of porosity

今回のヒノキ人工林の強度間伐によって表層土壌の容積重、全孔隙率、粗孔隙率、細孔隙率は変化しなかった。ヒノキ人工林の皆伐 (小林 1982, 荒木・有光 1984, 小野 2005) や一部の強度間伐 (篠宮ら 2011) で、表層土壌の容積重の低下、粗孔隙の減少と細孔隙の増加という変化が認められている。OKU、KRK でも同程度の強度間伐を実施しながら変化が表れなかった要因として、第一に施業に伴う地表攪乱が小さかったことが挙げられる。ヒノキ人工林の強度間伐で変化がみられた事例 (篠宮ら 2011) では、間伐木は架線により集材・搬出されているのに対し、OKU、KRK では伐り捨て間伐であった。歩行による踏圧、伐倒木の圧密などの影響が局部的には考えられるが、搬出作業がないので地表が広い範囲で顕著に攪乱された可能性は小さい。そのため、地表の攪乱は限定的であったと考えられる。第二に土壌型の違いが挙げられる。ヒノキ人工林の強度間伐で変化がみられた事例 (篠宮ら 2011) の土壌型は黒色土であったのに対し、OKU、KRK ともに褐色森林土であった。黒色土は膨軟で容積重が軽いため、施業や雨滴による攪乱などの影響を受けやすいと考えられる。ヒノキ人工林を対象に本数間伐率 40% を超える強度間伐が表層土壌の土壌物理性に及ぼす影響を検討した既往の報告 (古池 1986; 荒木ら 2002; 篠宮ら 2011) でも、明確かつ一定の変化が認められていない事例が大部分であること、我が国の森林土壌の約 70% を褐色森林土が占めること (Morisada et al. 2004) から、ヒノキ人工林の強度間伐に

Table 3. 土壤物理性の分析結果
Soil physical properties of each study site

		OKU		KRK	
		対照区 Control	強度間伐区 Intensive thinning	対照区 Control	強度間伐区 Intensive thinning
容積重	Bulk density (Mg m^{-3})	0.38 (0.10)	0.35 (0.06)	0.75 (0.05)	0.67 (0.07)
全孔隙率	Total porosity (%)	80.8 (4.0)	82.5 (1.7)	69.2 (1.6)	72.0 (3.3)
粗孔隙率	Coarse porosity (%)	53.5 (3.2)	53.2 (6.2)	41.6 (2.9)	42.3 (5.1)
細孔隙率	Fine porosity (%)	27.3 (4.9)	29.3 (4.6)	27.6 (2.6)	29.7 (4.3)
最大容水量	Maximum water holding capacity (%)	47.5 (10.7)	56.5 (4.8)	41.3 (8.7)	52.2 (2.7)
大孔隙率(最小容気量)	Large porosity (Air minimum) (%)	33.3 (10.4)	26.1 (6.4)	27.8 (8.2)	19.9 (3.4)
中孔隙率	Medium porosity (%)	13.6 (7.1)	18.5 (3.1)	8.7 (4.9)	16.4 (7.0)
小孔隙率	Small porosity (%)	6.6 (1.6)	8.6 (1.5)	5.1 (2.1)	6.1 (1.9)
飽和透水係数	Saturated hydraulic conductivity (m s^{-1}) ¹⁾	2.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.1×10^{-4}
採取時含水率	Volumetric water content of fresh soil (%)	23.8 (5.0)	32.1 (6.8)	27.0 (4.9)	30.7 (7.1)
レキ率	Volumetric gravel content (%)	2.9 (1.2)	2.8 (1.0)	9.5 (2.3)	8.4 (2.8)

¹⁾ 幾何平均 geometric mean

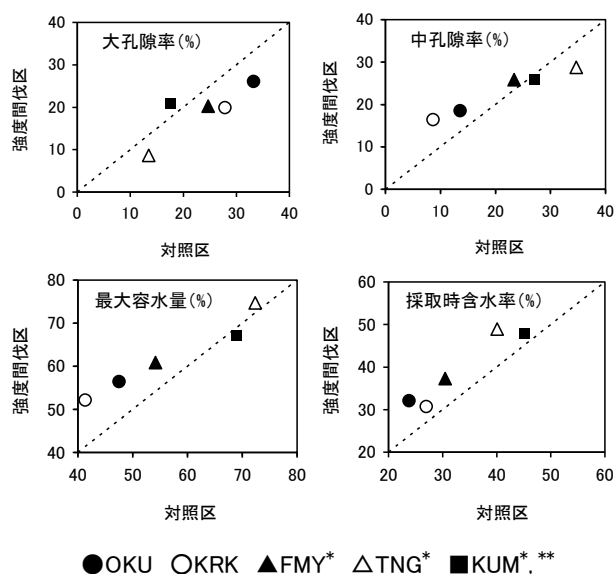
²⁾ ()内の数値は標準偏差 The numbers in parentheses represent the standard deviation

Table 4. 分散分析の結果
The result of two-way analysis of variance

		F 値 F-value	p 値 p-value
容積重 Bulk density (Mg m^{-3})	処理 Operation	3.1	0.10
	試験地 Site	105.0	0.0001>
	交互作用 Interaction	0.6	0.45
全孔隙率 Total porosity (%)	処理 Operation	3.3	0.09
	試験地 Site	76.3	0.0001>
	交互作用 Interaction	0.2	0.66
粗孔隙率 Coarse porosity (%)	処理 Operation	0.0	0.90
	試験地 Site	31.5	0.0001>
	交互作用 Interaction	0.1	0.81
細孔隙率 Fine porosity (%)	処理 Operation	1.2	0.30
	試験地 Site	0.0	0.86
	交互作用 Interaction	0.0	0.97
最大容水量 Maximum water holding capacity (%)	処理 Operation	8.8	0.01>
	試験地 Site	2.5	0.13
	交互作用 Interaction	0.1	0.78
大孔隙率 Large porosity (%)	処理 Operation	5.0	0.05>
	試験地 Site	2.9	0.11
	交互作用 Interaction	0.0	0.91
中孔隙率 Medium porosity (%)	処理 Operation	6.0	0.05>
	試験地 Site	1.9	0.17
	交互作用 Interaction	0.3	0.60
小孔隙率 Small porosity (%)	処理 Operation	3.5	0.08
	試験地 Site	6.4	0.05>
	交互作用 Interaction	0.4	0.53
飽和透水係数(対数値) Logarithm of saturated hydraulic conductivity	処理 Operation	0.9	0.37
	試験地 Site	1.4	0.25
	交互作用 Interaction	1.6	0.23
採取時含水率 Volumetric water content of fresh soil (%)	処理 Operation	4.8	0.05>
	試験地 Site	0.1	0.75
	交互作用 Interaction	0.7	0.41

より表層土壌の物理性に变化が生じる可能性は大きくないといえる。变化が生じる可能性があるのは、集材・搬出時の地表攪乱の度合いが強い場合、攪乱に対する抵抗性が小さい土壌である場合などが考えられ、強度間伐における集材搬出方法の選択は重要である。

本報とほぼ同じ試験設定・測定手法で得られた結果(篠宮ら 2011)を加え、四国地方の5つのヒノキ人工林の強度間伐区・対照区で表層土壌の大孔隙率、中孔隙率、最大容水量を比較した(Fig. 2)。その結果、対照区より強度間伐区で大孔隙率が小さい傾向、中孔隙率及び最大容水量が大きい傾向がOKU、KRK、FMYの3箇所に共通してみられた(Fig. 2)。これらより、ヒノキ人工林の強度間伐で表層土壌の大孔隙率が減少、中孔隙率・最大容水量が増加する場合があることが示唆された。OKU、KRK、FMYの3箇所の共通点から、大孔隙率等の一連の変化は褐色森林土に成立するヒノキ人工林で地表の攪乱が小さい強度間伐施業を行った場合に起こりやすいと考えられる。それらの変化が起きた要因として、強度間伐を実施した際、封入空気の影響や孔隙サイズが大きいために水で満たされない孔隙(森林土壌研究会, 1982)が歩行による踏圧、伐倒木の圧密、林冠からの集中滴下による目詰まりなどで物理的に変化したことが考えられる。ただし、それらの物理的な変化は面的というより局所的であると想像されることから、孔隙自体は変化せず吸水性が改善したという可能性も考えられる。OKU、KRKでアルコール噴霧をした試料数は強度間伐区より対照区で多く、特にOKUの対照区は5試料全てで噴霧したことから、強度間伐区より対照区で撥水性が発現しやすい傾向がみられた。対照区の試料の一部では、アルコール処理をしても撥水性を除去しきれず吸水できなかった孔隙が存在していた可能性が考えられる。なお、TNGの大孔隙率はOKU、KRK、FMYと同様に対照区より強度間伐区で小さいが、これは主に搬出作業による地表攪乱の影響と考えられている(篠宮ら 2011)。大孔隙率の減少、中孔隙率・最大容水量の増加から、表層土壌はより湿潤な水分環境を示しやすくなったと推察される。実際に採取時含水率は対照区より強度間伐区で4~8%ほど有意に高かった(Table 3, Table 4)。この傾向は四国地方の他のヒノキ人工林における強度間伐区・対照区の表層土壌でも観察されている(Fig. 2)。こうした変化に着目し、気候変動で寡雨になった場合の森林の適応策の1つとして間伐が注目されている。寡雨で土壌水分が低下した場合、土壌水分を上昇させ乾燥害を防ぐのに間伐を利用することが検討されている(Wallentin and Nilsson 2011)。また、一般に高含水率のほうが透水係数は大きいので、地表に達した雨水が土層へ浸透しやすくなると推察される。このことは地表流の発生を抑制し、土層マトリクスへ雨水を導き、それがゆっくり流出することで水源涵養機能に資する可能性がある。



* 篠宮ら (2011)

** KUMのみ(本数)間伐率は33%、他は48~64%

Fig. 2. 四国地方の5ヒノキ人工林における強度間伐区・対照区の表層土壌の物理性の比較
Comparisons of physical properties of surface soils between intensive thinning and control plots in five Hinoki cypress plantations in Shikoku district

る。間伐に伴い立木本数が減少すると林分あたりの蒸発散量が減少する結果、流出水量が増えることが予想されているが(太田・服部 2002, 小松 2010)、ヒノキ人工林ではこうした変化(表層土壌の吸水性の改善)も関与している可能性を指摘できた。

以上より、ヒノキ人工林における強度間伐は、皆伐時に変化がみられた容積重、粗孔隙、細孔隙といった土壌の物理性に関して影響を及ぼすことなく、水源涵養や残存木の成長に対して有効な水分を増やす可能性が示唆された。今後、伐出作業を伴う強度間伐の事例など、さまざまな強度間伐施業についてそれらがヒノキ人工林の土壌に及ぼす影響の実態を明らかにしていくことが必要である。

謝辞

本研究の実施にあたり、四国森林技術センター及び四万十森林管理署および土佐清水市森林組合の皆様にご多大なご協力をいただいた。森林総合研究所大貫靖浩氏、小林政広氏には原稿に有益なご助言とご教示をいただいた。以上の方々に深く感謝の意を表します。本研究は森林総合研究所運営費交付金プロジェクト「管理水準低下人工林の機能向上のための強度間伐施業技術の開発」によって実施された。

引用文献

- 相浦英春・大宮 徹 (2010) スギ林の強度間伐が林内の光環境と下層植生に与える影響. 富山県農林水産総合技術センター森林研究所研究報告, **2**, 1-9.
- 荒木 誠・有光一登 (1984) 皆伐施業による表層土壌の物理性の変化 (I) —ヒノキ林皆伐跡地における湿式団粒分析の一例—. 日林論, **95**, 195-198.
- 荒木 誠・加藤正樹・宮川 清・小林繁男・有光一登 (2002) ヒノキ林における皆伐と間伐が表層土壌水分状態に及ぼす影響. 森林立地, **44**(2), 1-8.
- 荒木 誠・加藤正樹・小林繁男・有光一登 (2005) ヒノキ林の間伐による枝条放置が土壌の水分動態に与える影響. 森林立地, **47**(1), 47-55.
- 有光一登 (1987) 森林土壌の保水のしくみ. 創文, 199pp.
- 有光一登・荒木 誠・宮川 清・小林繁男・加藤正樹 (1995) 宝川理水試験地における土壌孔隙量をもとにした保水容量の推定—初沢小試験流域1号沢および2号沢の比較—. 森林立地, **37**(2), 49-58.
- 土じょう部 (1976) 林野土壌の分類 1975. 林業試験場研究報告, **280**, 1-28.
- 深田英久 (2006) 人工林の低コスト育林施業の体系化と環境機能への影響調査. 高知県立森林技術センター研究報告, **31**, 24-91.
- 古池末之 (1986) 保育作業が立地要因の変動に及ぼす影響 (I) —ヒノキ人工林の枝打ち、間伐による土壌、植生の変化と表層土壌の流去および地表流去水の動態—. 兵庫県立林業試験場研究報告, **30**, 41-52.
- 諫本信義 (1992) 森林の水源涵養機能に関する研究 (第1報) —スギ林における間伐6年後の土壌理化学性の変化. 日林九支論集, **45**, 157-158.
- 諫本信義 (2002) 土壌孔隙組成を用いた森林の保水容量の推定とその要因解析. 森林立地, **44** (2), 31-36.
- 河田 弘・小島俊郎 (1979) 環境測定法IV—森林土壌—. 共立出版, 190pp.
- 気象庁 (2002) メッシュ気候値 2000CD-ROM. 気象業務支援センター, 東京.
- 小林繁男 (1982) 森林の皆伐に伴う土壌の変化. ペドロジスト, **26**(2), 150-163.
- 小松 光 (2010) 森林と水資源. 水利科学, **314**, 1-29.
- Miyamoto, K., Okuda, S., Inagaki, Y., Noguchi, M. and Itou, T. (in press) Within- and between-site variations in leaf longevity in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) plantations in southwestern Japan. J. For. Res., DOI 10.1007/s10310-012-0346-1.
- Morisada, K., Ono, K. and Kanomata, H. (2004) Organic carbon stock in forest soils in Japan. Geoderma, **119**, 21-32.
- Noguchi, M., Okuda, S., Miyamoto, K., Itou, T. and Inagaki, Y. (2011) Composition, size structure and local variation of naturally regenerated broad-leaved tree species in hinoki cypress plantations: a case study in Shikoku, southwestern Japan. Forestry, **84**, 493-504.
- 小柏一久・近藤次雄・真下育久 (1991) 数量化I類の手法を用いた森林土壌の粗孔隙量の要因解析 (II) スギ林における表層土壌の粗孔隙量と林分密度. 日林誌, **73**, 396-400.
- 太田猛彦・服部重昭 (監修) (2002) 地球環境時代の水と森 どうまもり・はぐくめばいいのか. 日本林業調査会, 222pp.
- 小野 裕 (2005) ヒノキ林皆伐後の土壌の物理性変化. 日林誌, **87**, 36-44.
- 篠宮佳樹・稲垣善之・深田英久・豊田信行 (2011) 四国地方のヒノキ人工林における間伐が表層土壌の物理性に及ぼす影響. 森林応用研究, **20**, 19-25.
- 森林土壌研究会 (1982) 森林土壌の調べ方とその性質. 林野弘済会, 328pp.
- 森林立地調査法編集委員会 (1999) 森林立地調査法. 博友社, 284pp.
- 上田晋之助・堤 利夫・柴田信男 (1965) 吉野林業地帯における地力の維持と増進に関する研究—皆伐直後における表層土壌の流亡と、その理化学的性質の変化について—. 京都大学農学部演習林報告, **37**, 102-124.
- 渡辺直史・深田英久・塚本次郎 (2008) ヒノキ強度間伐林分の残存木樹幹表面における樹脂流出と間伐強度および立地要因との関係. 森林立地, **50**, 117-123.
- Wallentin, C. and Nilsson, U. (2011) Initial effect of thinning on stand gross stem-volume production in a 33-year-old Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand in southern Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research, **26**, 21-35.
- 吉田桂子・岩川雄幸・平井敬三 (1992) 間伐が表層土壌の物理性に及ぼす影響—スギ林とヒノキ林の場合—. 平成3年度森林総合研究所四国支所年報, 11-12.

研究資料 (Research material)

鳥類が採食する樹木果実生産量の年変動 －札幌市羊ヶ丘における 2000～2009 年の記録－

松岡 茂^{1)*}

Variation in fruit production of bird-dispersed tree species - Data recorded between 2000 and 2009 in Sapporo, Hokkaido -

Shigeru MATSUOKA^{1)*}

Abstract

Individual variations in fruit production of 6 bird-dispersed tree species (*Sorbus alnifolia*, *Sorbus commixta*, *Kalopanax pictus*, *Acanthopanax sciadophylloides*, *Magnolia obovata*, and *Actinidia arguta*) were recorded for 10 years in a broad-leaved forest in Sapporo, Hokkaido, northern Japan. Individual locations of the fruit-bearing trees of 4 of the 6 specified species were also determined to assess the distribution patterns of the fruiting trees in the forest. Annual fluctuations in fruit production were observed among the tree species. A large number of trees bearing fruits and a large yield of fruit crops in a year constituted a “good” fruit year. The fruit-bearing trees were almost randomly distributed, except for 1 species (*A. sciadophylloides*) that was strongly aggregated.

Key words : fruit-eating bird, fruit-bearing tree, masting, distribution pattern

要旨

札幌市豊平区羊ヶ丘で、鳥類が果実を採食する 6 樹種 (アズキナシ, コシアブラ, ハリギリ, ホオノキ, サルナシ, ナナカマド) について、2000 年から 2009 年までの 10 年間、果実生産量の調査を行った。調査は、個体ごとに、毎年の結実程度を記録し、さらにアズキナシ, コシアブラ, ハリギリ, ホオノキの 4 種については、調査区内での位置を記録し、結実木の分布様式を解析した。果実生産量の年変動が、それぞれの種で認められた。結実木の割合が高く、結実程度の良い個体が多い年が、豊作年であった。結実木の分布様式は、コシアブラが集中分布を示したのに対し、他はランダム分布傾向であることが多かった。

キーワード：果実食鳥類、結実木、豊凶、分布型

1. はじめに

樹木種子の生産量は年により大きく変動することが知られていて (滝谷ら 1998 など)、森林更新 (小山ら 2000, Shibata et al. 2002) や樹木成長 (澤田ら 2008) などと密接な関係があると考えられることから森林研究者の主要な研究対象の一つとなってきた。また、樹木の果実は哺乳類の食料にもなっていて (小池・正木 2008)、その生産量の年変動は動物の行動や、さらに捕食、競争関係などを通じて生態系にも大きな影響を与えている (Ostfeld and Keesing 2000)。くわえて、哺乳類の中でもとくに人間生活と関係の深い動物の食物となる樹木果実 (たとえば、ツキノワグマの餌となっているブナ堅果) の生産量の変動については、野生獣の研究者 (Oka et al. 2004 など) のみならず、行政部局 (たとえば、東北森林管理局 2011) も注目している。

いっぽう、さまざまな鳥類も、多様な樹木の果実を採食する (清棲 1978, 叶内 2006)。温帯域では秋から冬にかけて多くの樹種で結実がみられるが、おもに昆虫食と考えられているキツツキ類でも、この時期には頻繁に樹木果実を採食する (Matsuoka 1985, 1986)。樹木果実は、鳥類にとっても重要な食物資源となっていて、彼らの生活に与える影響も大きい。果実生産量の変動は、果実食鳥類の移動 (Svårdson 1957, Bock and Lepthien 1976, Koenig and Johannes 2001) や営巣開始の決定 (Nethersole-Thompson 1975, 松岡 1993)、鳥類による農作物への加害の現れ方 (山口 2005) などとの関連が大きい。鳥類研究者の関心事の一つでもある。

著者は、日本の北方域での、果実食鳥類 (とくに、ヒヨドリ) の数の季節変動と樹木果実の生産量との関係を明らかにする目的で調査を行ってきたが、ここでは、鳥

原稿受付：平成 23 年 11 月 18 日 Received 18 November 2011 原稿受理：平成 24 年 5 月 1 日 Accepted 1 May 2012

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

* 森林総合研究所企画部 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 Research Planning and Coordination Department, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: shmatsu@affrc.go.jp

類による果実採食が確認されている6種の樹木個体の果実生産量および結実木の分布様式について10年間にわたって継続観察を行った結果を報告する。

2. 調査地および方法

果実生産量の調査は、2000年から2009年まで、札幌市豊平区羊ヶ丘に所在する森林総合研究所北海道支所実験林および農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター構内の森林で行った。

この調査地では、ヒヨドリ (*Hypsipetes amaurotis*)、ツグミ類 (*Turdus* spp.)、レンジャク類 (*Bombycilla* spp.) など28種の鳥類が、21種の樹木果実を採食したのを観察している。果実採食が観察された樹種の中で、結実個体のサンプル数を多くとれる樹種6種 (アズキナシ *Sorbus alnifolia*, コシアブラ *Acanthopanax sciadophylloides*, ハリギリ *Kalopanax pictus*, ホオノキ *Magnolia obovata*, サルナシ *Actinidia arguta*, ナナカマド *Sorbus commixta*) を調査対象とした (植物の学名は、高畑ら2000に従った)。

果実生産量の評価方法：果実生産量の調査方法は、シードトラップ (水永ら1998) や双眼鏡 (正木・阿部2008) による直接カウント法や、種子数のカウントと種子重から豊凶程度を推定する方法 (水井1991) などがあるが、ホオノキの集合袋果を除いては直接的にかつ簡便に数を算定することが困難と考えられたので、ここでは、下記の方法で果実生産量 (結実程度) を評価した。

1) アズキナシ、コシアブラ、ハリギリ、ホオノキの4種については、落葉広葉樹林内 (標高130–140 m) に13個の方形区 (50 x 50 m) を南北に十字架状に配置し (3.25 ha)、毎年11月上旬に結実木を探し、個体ごとに結実程度を調査した。方形区は、広葉樹林内の広範囲な部分をサンプリングすることと、調査労力との兼ね合いで十字架状の配置とした。結実程度は、コシアブラ、ハリギリについては、各個体の枝全体に占める花序の付き具合と、各花序での実の付き具合を目視によって判断し、全く実が付いていない状態 (0) から、樹冠部のおよそ30%以下の着果 (1)、30–70%程度の着果 (2)、それ以上の着果 (3) までの4段階に区分した。アズキナシは、目視により各個体の枝全体に占める実の付き具合を判断し、上と同様に全く実が付いていない状態から、およそ30%以下の着果 (1)、30–70%程度の着果 (2)、それ以上の多量着果 (3) までの4段階に区分した。また、ホオノキは、個体のサイズにかかわらず、各個体の集合袋果の数により評価した。結実程度は、集合袋果の数をもとに、0 (集合袋果数0)、1 (同1–5)、2 (同5–10)、3 (同11以上) の4段階に区分した。

方形区内で最初に結実を確認したときに、その個体の胸高直径 (周囲長から計算) と樹高 (レーザー距離計と目測の併用) を計測し、方形区の1つの角からの距離と角度 (コンパスとレーザー距離計を使用) から、方形区

内での位置を計算した。

2) サルナシは、方形区でのサンプル数が少なかったため、調査地内の落葉広葉樹林の広い範囲 (標高100–230 m) から26個体 (2000年は21個体) を選び、マークを施して、毎年9月下旬に個体ごとに結実程度を観察した。結実程度は、アズキナシと同様に目視により各個体の枝全体をみて、全く実が付いていない状態 (0) から、少量 (1)、中量 (2)、多量 (3) 生産までの4段階に区分した。

3) ナナカマドも方形区ではサンプル数が少なかったため、実験林林道沿い (標高140–160 m) に植樹された15個体を選び、毎年11月中旬に観察した。結実程度は、アズキナシと同様に目視により全く実が付いていない状態 (0) から、多量 (3) 生産までの4段階区分とした。合わせて、毎年各個体を撮影し、年度ごとの結実程度の比較を行い、年度間での評価結果をそろえるようにした。

結実木割合は、(その年の結実樹木数/調査期間中の全結実樹木数 x 100) により、また結実程度の出現率は、(各結実程度に区分される結実樹木数/その年の結実樹木数 x 100) により求めた。

分布様式の解析：林内における結実木の分散状態は、果実を採食する動物の行動への影響が大きいと考えられるので、結実木の分布様式を求めた。方形区内の樹木の分布様式の解析には、最近接距離法 (Clark and Evans 1954) をもとに、調査地の周囲長を考慮した修正最近接距離法 (Sinclair 1985) を適用した。この方法は、野外での各個体と隣接個体との最近接距離の平均値を求め ($\bar{y}$)、これと個体が調査地内に同じ密度でランダムに分布する場合のそれぞれの個体と隣接個体との最近接距離の理論的平均値 ($E(\bar{y})$) を比較して、分布様式を調べる方法である。 $R = \bar{y} / E(\bar{y})$ とした場合、ランダム分布の場合は R は1に近い値を示し、集中分布傾向では0に近づき、均一分布では最大2.1591に近づき、空間的ランダム性からの逸脱の統計学的有意性が検定できる。有意でない場合は、必ずしも空間的ランダム性を保証するものではないが、この報告ではランダム傾向にあると記述する。

3. 結果と考察

方形区で調査を行った4種については、調査期間中に結実が観察できた個体のサイズ (胸高直径、樹高)、各年の結実程度 (0–3) を Tables 1–4 に、方形区内の全結実樹木の位置を Fig. 1 に示した。表中の個体番号は、Fig. 1 に示したそれぞれの種の個体番号と対応する。枯死、幹折れあるいは倒木の発生のため、調査期間中にデータの収集を打ち切っている場合がある。倒木や幹折れの発生が2004年にとくに多いが、これは9月に北海道西岸部を通過した台風18号 (Typhoon Songda) に起因するものである (Matsuoka 2006)。また、4種の年ご

との結実個体の結実程度 (1-3) と位置を Figs. 2-5 に示した。サルナシとナナカマドの結実程度の年変動は、Tables 5, 6 に示した。また、6 種について、年ごとの結実程度の出現率を Fig. 6 に示した。Fig. 7 に、方形区内で計測した 4 樹種の胸高直径と樹高の分布を示した。

方形区内で調査した 4 樹種の結実木については、年度ごとおよび全期間の結実木について分布様式の解析を行い Table 7 に示した。

以下、調査した 6 種についてそれぞれの特徴を記しておく。

1) アズキナシ

個体の結実状況は、Table 1 の個体番号 1 (以下、No. 1) のように、2000 年に結実した後まったく結実しなかった個体や、No. 4 のように、2000、2005 年だけ結実した個体もあるが、多くの個体は、結実してから 2-3 年後には再び結実した。

結実木割合が 60% 以上の年は、2000、2003、2005、2007、2009 年であったが、いっぽうで全く結実が見られない年 (2006) があるなど、結実木割合の年変動は大きかった (Table 1)。結実木割合の大きな年変動は、個体間に結実同調性があることを示唆している。2001 年から 2002 年まで 2 年間結実個体が少なかったのを除くと、2003 年以降は隔年に結実木割合が高かった (Figs. 2, 6)。結実木割合が高い年は、結実程度の高い個体が多かったが、結実木割合が少ない年は、結実したとしてもほとんどが結実程度 1 にとどまっていた。結実木割合の年変動と個体の結実程度の変動があるために、果実生産量の年変動は大きかった。

結実個体の分布様式は、年ごとに見ても、また 10 年間の総結実樹木でみても、ランダム分布からの逸脱はみられなかった (Table 7)。結実木の胸高直径、樹高の中央値はそれぞれ 24.8 cm、16.3 m であった。それぞれの測定値の範囲は、他の種に比べて狭かった (Fig. 7)。

2) コシアブラ

多くの個体は、結実 2-3 年後に再び結実したが、No. 16 のように 4 年間結実しなかった個体もあった (Table 2)。結実木割合はすべての年で 60% 以上であったが、63 から 97% までの変動があった (Table 2)。結実木割合が 90% を超えるような高い年 (2004、2007 年) は、結実程度が 2 や 3 の個体が多い傾向が認められた (Figs. 3, 6)。逆に、結実程度が 1 の個体が多くみられた 2002、2005、2008 年に注目すると、2 年間比較的生産量が多かった後の 1 年は生産量が少ないという傾向をもつようにもみえるが、さらに長期間のデータ蓄積が必要であろう。毎年の結実木割合は、他種と比較して高いものの、結実程度に年変動があるため、果実生産量には比較的大きな年変動が認められた。

結実個体の分布様式は、すべての年で、また総結実樹木でみても、集中分布を示していた (Table 7)。結実木

のサイズも 4 種の中では、胸高直径、樹高共に、中央値 (それぞれ、21.5 cm、14.5 m) が小さかった。また、最小値も最も小さな値を示し、より小さな木での結実がみられた (Fig. 7)。

3) ハリギリ

多くの個体は、結実してから 2-3 年後に再び結実したが、4 年後に結実する個体もあった (Table 3)。結実木割合が 60% 以上の年は、2000、2003、2004、2006、2008 年であったが、いっぽうで全く結実が見られない年 (2009 年) や結実木割合が 10% 以下の年 (2001、2005 年) があるなど、結実木割合の年変動は大きかった (Table 3)。結実木割合の変化の周期性を示すような傾向は、とくに認められなかった。結実木割合が 80% を越えるような高い年は、結実程度の高い個体が多かったが、結実木割合が少ない年は、結実程度 1 にとどまっているものが多かった。結実木割合の年変動と個体の結実程度の変動があるために、果実生産量の年変動は大きいと推定された。

結実個体の分布様式は、年度では 2003 年に集中分布傾向を示したが、その他の年および総結実樹木でみた場合、ランダム分布傾向を示した (Table 7)。結実木のサイズは、4 種の中では、胸高直径、樹高共に、中央値 (それぞれ 41.7 cm、18.5 m) が大きかった。また、それぞれの最小値、最大値も最も大きな値を示した (Fig. 7)。

4) ホオノキ

1 回結実した後数年間結実が見られない個体 (たとえば、No. 1) から、毎年結実する個体 (たとえば、No. 15) があり、個体間の結実状況の違いが顕著であった (Table 4)。結実木割合が 60% 以上の年は、2007、2009 年の 2 年のみであった (Table 4)。今回の結実木割合の計算にあたっては、調査期間に結実が見られた個体はすべて、調査開始後の分母 (結実可能樹木数) としてカウントされるため、もし調査期間後半に初めて結実した個体が存在すると、調査初期の結実木割合は低く算定される。しかし、この点を考慮しても、ホオノキの結実木割合は、他の樹種に比べて低いといえる。周期的な結実状況を示唆する傾向はとくに認められなかった。

結実個体の分布様式は、年度ごとに見ても、また総結実樹木数でみても、ランダム分布傾向であった (Table 7)。結実木の胸高直径、樹高の中央値は、それぞれ 27.1 cm、16.8 m であった。中央値では、胸高直径、樹高ともハリギリに次ぐ大きさであったが、最も小さな結実個体は、コシアブラに近い値であった (Fig. 7)。

5) サルナシ

多くの個体が毎年のように結実し、また結実しなかった個体が特定の年に集中することはなかった。その結果、すべての年で比較的高い結実木割合を示し、すべての年で 80% を超えた (Table 5)。各結実程度の出現割合は年度によって異なっており (Fig. 6)、果実生産量の年

変動が認められたが、他の樹種に比較して、果実生産量の年変動は少ないと言える。また、周期的な結実状況を示唆する傾向はとくに認められなかった。

6) ナナカマド

多くの個体が毎年のように結実したが、サルナシとは異なり、結実しない個体が特定の年(2001、2009年)に集中した。この2年間を除き、結実木割合は80%を超え、調査した全個体が結実した年が5年あった(Table 6)。ナナカマドの結実では、周期的な結実状況を示唆する傾向はとくに認められなかった。結実木割合が高い場合でも、2006、2007年のように、結実程度の高い個体の出現率が低い年もあった。この点は、結実木割合が高い年には結実程度の高い個体が多く出現する他の樹種とは異なっていた。

ナナカマドの結実程度をチェックするために撮影した写真の例を示した(Photo 1)。同じ年度内あるいは年度間での豊凶程度の比較を写真で行うことにより、評価基準をそろえることが可能であった。画像や印刷物を参照しながら目視結果を評価することにより、より精度の高い評価が可能になるものと考えられた。

樹木の果実生産量の大きな年変動は、至近要因として気象などの環境条件や送粉に関する条件などが関与するものの、樹木側が繁殖戦略を進化させた結果とも考えられている(Kelly 1994, Kelly and Sork 2002)。果実生産量の年変動は、果肉食動物に果実散布を依存する種よりも種子の破壊採食を行う動物に種子散布を依存する種で、また動物に花粉媒介を依存する種よりは風によって花粉媒介が行われる種で、大きいことが知られている(Kelly and Sork 2002)。今回調査した6樹種のなかで、アズキナシ、コシアブラ、ハリギリ、ナナカマドの4種の果実は、これらを採食するほとんどの鳥が丸飲みする。ホオノキについては、小型キツツキであるコゲラは仮種皮をつついて採食するが、種子を破壊することはない。また、ヒヨドリやアカゲラより大きなキツツキ類は仮種皮がついたまま丸飲みし、キツツキ類では種子をペリットとして吐出する(Matsuoka 1986)。サルナシでは、ツグミが小さい果実を丸飲みすることがあるが、多くの鳥は果肉をつついて採食する。鳥類の排泄物に含まれる種子の状態から見て、サルナシの種子は破壊されることなく果肉とともに摂食される。今回調査した6種は、果肉食動物に種子散布を依存する樹種と考えられる。また、送粉形態についても、6種は、動物媒介であり(ホオノキについては、日本樹木誌編集委員会 2009、その他5種については、弘前大学、石田清氏、私信)、Kelly and Sork (2002)に従えば、これら6種の果実生産量の年変動は相対的に少ないと予想される。しかし、6種の間での果実生産量は、必ずしも果実生産量の年変動が小さい種ばかりではないため、Kelly and Sork (2002)が挙

げた主要因(種子散布方法および送粉形態)以外にも関与する要因があることをうかがわせる。今回個体の果実生産量の変動を追跡した結果、個体群レベルでの豊凶は、結実木割合と結実程度の出現割合およびこの2つの要因の個体間での同調が関係していることが示唆された。また、樹種間での豊凶は同調しているようにはみえず、森林という単位で見た場合の豊凶は、優先種のそれに強く依存するものと考えられた。温帯林で同属および異なる科の樹木の間で種子生産量の変動に同調性が見られるという Shibata et al. (2002)の分析結果と今回の結果は明らかに異なったが、その理由は不明である。

森林内における樹木の分布様式についての多くの研究は、集中分布あるいはランダム分布傾向にあることを示していて、均一分布になることは稀であることを示している(Payandeh 1974, Armesto et al. 1986)。しかし、分布様式は、樹種や木の生育段階、森林の歴史などによる変動があることが知られている(Payandeh 1974, Armesto et al. 1986, Szwagrzyk and Czerwczak 1993)。今回の解析結果は、コシアブラの結実木については全年の、ハリギリでは2003年の分布様式が集中分布であったのを除けば、他の樹種、年度の結実木はランダム分布傾向であることを示した。著者の知る限りでは、結実木の分布様式についての報告はないが、樹木の分布様式と類似していることが明らかになった。鳥類にとって重要な資源である結実木の分布は、鳥の採食行動や資源をめぐる社会行動、あるいは冬季間の生残率や渡り行動などにも影響し、いっぽうで、樹木側から見ると、結実木上での鳥の滞在時間(Pratt and Stiles 1983)やその後の移動様式が種子散布の範囲や成否、そして森林内での樹木の分布様式にもかかわってくると考えられる。結実木の分布と、鳥の行動、種子散布などにかかわる研究は、日本での研究が少なく、今後の成果が待たれる。

謝辞

送粉形態についてご教示いただいた弘前大学農学生命科学部生物学科、石田清氏に、また本文を校閲いただいた森林総合研究所群落動態研究室、阿部真氏に感謝する。また、匿名の査読者および担当編集委員の堀野眞一氏からは有益な助言をいただいた。

Table 1. アズキナシ *Sorbus alnifolia* の結実程度の変異
Variation in fruit production of *Sorbus alnifolia*

個体番号 individual tree number	胸高直径 diameter at breast height (cm)	樹高 height (m)	結実程度 * fruit production										備考 notes
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
1	15.9	13.0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	28.0	16.6	3	0	0	2	0	3	0	2	0	2	
3	16.9	11.8	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
4	17.5	12.4	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
5	26.1	17.2	2	0	0	1	0	2	0	1	0	1	
6	24.8	16.3	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	
7	24.8	16.3	3	0	0	3	1	3	0	2	0	3	
8	32.5	17.4	3	0	0	3	0	3	0	1	0	3	
9	17.8	11.5	3	0	0	3	0	3	0	2	1	2	
10	19.7	13.0	3	0	0	2	0	3	0	1	0	3	
11	24.5	13.7	0	0	0	3	0	3	0	1	0	3	
12	34.4	17.0	3	0	1	3	1	3	0	1	0	3	
13	30.9	17.2	3	0	1	3	2	3	0	2	1	3	
14	24.8	15.5	0	0	0	2	0	2	0	0	0	1	
15	16.9	12.0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	-	枯死 dead ('09)
16	28.6	19.3	3	1	1	2	0	3	0	2	0	1	
17	32.1	19.6	3	0	0	1	0	2	0	1	0	1	
18	29.0	20.8	2	0	0	1	0	2	0	0	0	1	
19	24.8	13.4	1	0	0	1	1	2	0	1	1	1	
20	33.1	16.8	1	0	0	2	1	3	0	1	0	2	
樹木数 No.trees (N)			20	20	20	20	20	20	20	20	20	19	
結実本数 No.trees bore fruits (A)			18	1	3	16	6	19	0	13	3	15	
結実木割合 A / N * 100			90.0	5.0	15.0	80.0	30.0	95.0	0.0	65.0	15.0	78.9	

*: 0: 結実なし . 1: 少量結実 . 2: 中量結実 . 3: 多量結実 .

*: 0: no fruits produced. 1: low fruit production. 2: moderate fruit production. 3: high fruit production.

Table 2. コシアブラ *Acanthopanax sciadophylloides* の結実程度の変異
Variation in fruit production of *Acanthopanax sciadophylloides*

個体番号 individual tree number	胸高直径 diameter at breast height (cm)	樹高 height (m)	結実程度 * fruit production										備考 notes
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
1	28.3	16.7	2	1	0	1	1	1	2	1	1	1	
2	25.5	15.5	1	1	0	1	-	-	-	-	-	-	幹折れ stem broken ('04)
3	28.3	16.2	1	2	0	0	1	1	1	2	2	1	
4	30.2	14.2	1	1	1	1	2	0	1	1	1	1	
5	23.6	14.3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
6	24.2	15.0	3	1	1	1	-	-	-	-	-	-	倒 fallen ('04)
7	18.8	15.0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	-	枯死 dead ('09)
8	21.3	12.9	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	
9	22.6	16.0	2	1	1	1	1	1	1	1	-	-	枯死 dead ('08)
10	20.7	15.4	2	1	1	1	-	-	-	-	-	-	倒 fallen ('04)
11	25.1	17.7	1	1	1	2	3	1	1	2	1	1	
12	38.8	18.0	1	1	1	2	3	0	1	3	1	1	
13	15.0	10.6	0	0	1	2	1	1	1	3	1	1	
14	23.6	10.0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	
15	15.6	11.6	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	
16	17.5	12.1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	
17	24.8	15.5	3	1	1	3	3	1	2	3	1	2	
18	22.3	15.6	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1	
19	15.6	14.0	3	1	1	3	3	1	1	3	1	2	
20	15.9	13.5	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	
21	19.1	13.6	1	1	1	3	2	1	1	2	1	1	
22	16.9	12.5	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	
23	25.8	15.7	3	2	1	2	3	1	3	2	1	2	
24	25.5	15.9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
25	21.0	15.7	3	2	1	2	2	1	1	2	1	1	
26	20.7	15.2	3	1	0	1	2	1	1	2	1	1	
27	16.9	13.5	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	
28	21.6	15.0	2	2	2	1	2	1	2	3	1	1	
29	21.3	14.6	2	2	0	1	3	0	0	0	0	1	
30	13.7	10.0	3	2	1	3	3	1	1	3	1	3	
31	11.5	11.0	2	1	0	1	1	0	0	2	1	0	
32	16.2	12.7	3	2	1	3	-	-	-	-	-	-	倒 fallen ('04)
33	24.5	12.8	3	3	1	2	3	2	3	3	2	3	
34	11.8	7.5	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	
35	21.6	12.1	3	2	2	3	1	3	1	1	0	0	
36	22.6	16.0	3	1	1	1	1	3	1	3	1	1	
樹木数 No.trees (N)			36	36	36	36	32	32	32	32	31	30	
結実本数 No.trees bore fruits (A)			29	31	23	31	29	20	24	31	24	25	
結実木割合 A / N * 100			80.6	86.1	63.9	86.1	90.6	62.5	75.0	96.9	77.4	83.3	

*: 0: 結実なし, 1: 少量結実, 2: 中量結実, 3: 多量結実.

*: 0: no fruits produced. 1: low fruit production. 2: moderate fruit production. 3: high fruit production.

Table 3. ハリギリ *Kalopanax pictus* の結実程度の変異
Variation in fruit production of *Kalopanax pictus*

個体番号 individual tree number	胸高直径 diameter at breast height (cm)	樹高 height (m)	結実程度 * fruit production										備考 notes
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
1	41.7	20.3	3	0	0	1	1	0	1	0	1	0	
2	45.8	18.3	3	0	0	1	1	0	1	1	1	0	一部幹折れ stem partly broken ('04)
3	44.6	19.5	3	0	1	1	3	0	3	1	1	0	
4	28.6	19.0	3	0	1	1	1	0	1	1	1	0	
5	30.6	16.0	2	0	1	1	1	0	0	-	-	-	枯死 dead ('07)
6	45.8	17.8	3	0	0	0	1	0	1	0	1	0	
7	42.0	17.6	3	0	0	1	1	0	1	0	1	0	
8	33.4	15.0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	
9	51.6	19.5	0	0	1	3	0	0	1	1	1	0	
10	27.4	11.0	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	幹折れ stem broken ('01)
11	29.0	14.9	3	0	0	1	1	1	0	1	1	0	
12	49.3	19.5	3	0	1	1	2	0	1	2	1	0	
13	29.0	18.0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	
14	40.4	17.6	3	0	0	1	1	0	0	1	1	0	
15	43.0	18.5	3	0	1	1	3	0	1	1	3	0	
16	32.5	18.3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
17	32.8	17.8	3	0	0	1	1	0	1	0	2	0	
18	33.1	18.3	3	0	0	0	1	0	1	0	2	0	
19	51.9	19.5	3	0	1	1	3	0	1	1	2	0	
20	61.8	19.6	3	1	1	1	3	0	1	0	3	0	
21	29.0	20.1	0	0	0	1	1	0	0	0	3	0	
22	68.8	21.5	0	0	0	1	3	0	0	1	3	0	
23	50.6	19.4	3	0	0	1	3	1	1	3	2	0	
24	53.8	21.3	3	1	0	1	3	0	1	0	3	0	
25	45.8	21.2	2	0	1	0	3	0	1	0	1	0	
26	17.2	11.0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	
27	40.1	17.3	3	0	0	0	0	0	0	0	-	-	枯死 dead ('08)
28	34.7	19.2	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	
29	47.1	21.9	3	0	1	1	0	0	2	1	1	0	
樹木数 No.trees (N)			29	28	28	28	28	28	28	27	26	26	
結実本数 No.trees bore fruits (A)			24	2	12	20	23	2	18	15	24	0	
結実木割合 A / N * 100			82.8	7.1	42.9	71.4	82.1	7.1	64.3	55.6	92.3	0.0	

*: 0: 結実なし . 1: 少量結実 . 2: 中量結実 . 3: 多量結実 .

*: 0: no fruits produced. 1: low fruit production. 2: moderate fruit production. 3: high fruit production.

Table 4. ホオノキ *Magnolia obovata* の結実程度の変異
Variation in fruit production of *Magnolia obovata*

個体番号 individual tree number	胸高直径 diameter at breast height (cm)	樹高 height (m)	結実程度 * fruit production										備考 notes
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
1	27.1	17.7	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	
2	32.8	18.9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
3	34.7	18.6	1	0	1	1	0	2	1	2	1	2	
4	35.7	17.7	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	
5	35.3	18.1	2	1	1	3	0	2	1	2	1	2	
6	25.8	17.4	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	
7	32.5	18.0	0	0	0	1	1	0	0	3	1	1	
8	30.2	13.5	1	1	1	2	0	1	0	1	1	0	
9	28.0	16.8	1	0	1	1	0	1	1	1	1	2	
10	25.8	15.3	2	0	1	1	1	0	1	3	1	2	
11	34.1	17.4	3	2	2	2	0	1	1	2	1	1	
12	22.6	16.3	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	
13	28.6	13.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
14	47.4	17.7	0	0	3	1	1	1	1	2	1	2	
15	37.2	19.4	1	2	3	2	2	3	2	3	2	3	
16	23.2	16.1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	
17	18.1	15.7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
18	30.2	15.7	2	0	1	1	0	1	0	1	1	1	
19	26.7	14.4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
20	18.5	11.5	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	
21	18.8	11.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
22	31.8	18.0	1	0	1	1	1	1	1	2	1	1	
23	32.5	20.0	2	1	3	2	2	3	3	3	1	2	
24	19.1	17.1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	
25	19.1	13.5	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
26	15.0	11.3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
27	26.1	12.5	0	0	1	0	-	-	-	-	-	-	枯死 dead ('04)
28	26.4	18.7	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	
29	34.4	18.5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
30	29.6	21.0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	
31	26.1	11.7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
32	21.3	12.0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	
33	12.7	9.1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
樹木数 No.trees (N)			33	33	33	33	32	32	32	32	32	32	
結実本数 No.trees bore fruits (A)			15	10	18	18	7	14	12	22	17	21	
結実木割合 A / N * 100			45.5	30.3	54.5	54.5	21.9	43.8	37.5	68.8	53.1	65.6	

*: 0: 結実なし . 1: 少量結実 . 2: 中量結実 . 3: 多量結実 .

*: 0: no fruits produced. 1: low fruit production. 2: moderate fruit production. 3: high fruit production.

Table 5. サルナシ *Actinidia arguta* の結実程度の変異
Variation in fruit production of *Actinidia arguta*

個体番号 individual tree number	結実程度 * fruit production										備考 notes
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
1	3	2	0	1	0	0	1	0	0	0	一部幹折れ stem partly broken ('04)
2	3	1	3	1	0	0	1	1	1	1	
3	3	2	2	2	3	2	3	1	3	1	
4	3	3	3	2	2	1	2	1	1	1	
5	3	1	2	2	1	1	2	1	2	1	
6	1	0	1	2	1	1	2	3	2	2	
7	2	2	2	2	3	1	2	3	1	1	
8	3	0	3	0	2	1	3	1	1	2	
9	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	
10	3	0	1	1	1	0	1	0	0	0	
11	2	3	2	1	2	2	2	1	2	1	
12	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	
13	3	1	3	3	3	2	3	1	3	2	
14	2	1	2	2	3	1	2	3	2	1	
15	3	0	1	1	2	1	2	2	2	-	枯死 dead ('09)
16	2	2	2	2	3	1	1	2	2	1	
17	3	1	2	1	2	1	3	2	2	2	枯死 dead ('07)
18	3	1	2	1	1	2	2	-	-	-	
19	2	3	2	2	3	3	2	2	1	1	
20	1	3	1	3	2	1	3	2	2	2	
21	2	1	3	1	1	0	2	0	1	1	
22	-	1	2	2	1	0	1	1	2	1	
23	-	3	2	2	2	1	2	1	1	1	
24	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
25	-	1	2	2	1	1	1	2	1	1	
26	-	2	2	1	1	1	1	1	1	1	
樹木数 No.trees (N)	21	26	26	26	26	26	26	25	25	24	
結実本数 No.trees bore fruits (A)	21	21	24	25	24	21	26	22	22	22	
結実木割合 A / N * 100	100	80.8	92.3	96.2	92.3	80.8	100	88.0	88.0	91.7	

*: 0: 結実なし . 1: 少量結実 . 2: 中量結実 . 3: 多量結実 .

*: 0: no fruits produced. 1: low fruit production. 2: moderate fruit production. 3: high fruit production.

Table 6. ナナカマド *Sorbus commixta* の結実程度の変異
Variation in fruit production of *Sorbus commixta*

個体番号 individual tree number	結実程度 * fruit production										備考 notes
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
1	3	0	1	1	1	0	1	1	2	1	
2	3	0	1	2	2	1	1	1	2	0	
3	3	0	0	1	3	1	1	0	1	1	
4	3	0	0	1	3	1	1	1	2	1	
5	3	0	1	2	2	0	1	1	3	0	
6	3	0	2	3	1	2	1	2	2	1	
7	2	0	1	3	1	1	1	1	2	0	
8	3	0	1	3	2	1	1	1	2	0	
9	3	0	1	3	2	1	2	1	-	-	枯死 dead ('08)
10	3	0	1	3	2	1	2	1	3	0	
11	3	0	1	2	1	1	1	1	1	0	
12	3	0	1	3	2	1	1	1	3	1	
13	3	0	1	3	3	2	1	1	3	0	
14	3	0	1	3	2	1	2	2	3	1	
15	3	0	1	3	2	0	2	2	2	0	
樹木数 No.trees (N)	15	15	15	15	15	15	15	15	14	14	
結実本数 No.trees bore fruits (A)	15	0	13	15	15	12	15	14	14	6	
結実木割合 A / N * 100	100	0.0	86.7	100	100	80.0	100	93.3	100	42.9	

*: 0: 結実なし, 1: 少量結実, 2: 中量結実, 3: 多量結実.

*: 0: no fruits produced. 1: low fruit production. 2: moderate fruit production. 3: high fruit production.

Table 7. 結実した樹の分布様式¹⁾
Spatial distribution of fruit-bearing trees

年 year	アズキナシ <i>Sorbus alnifolia</i>			コシアブラ <i>Acanthopanax sciadophylloides</i>			ハリギリ <i>Kalopanax pictus</i>			ホオノキ <i>Magnolia obovata</i>		
	N	R	Significance	N	R	Significance	N	R	Significance	N	R	Significance
2000	18	1.06	ns	29	0.41	**	24	1.03	ns	15	1.21	ns
2001	1	-	-	31	0.42	**	2	-	-	10	1.06	ns
2002	3	-	-	23	0.52	**	12	1.21	ns	18	0.84	ns
2003	16	1.12	ns	31	0.62	**	20	0.73	*	18	0.78	ns
2004	6	-	-	29	0.58	**	23	0.95	ns	7	-	-
2005	19	1.04	ns	20	0.53	**	2	-	-	14	0.83	ns
2006	0	-	-	24	0.45	**	18	0.98	ns	12	0.79	ns
2007	13	0.73	ns	31	0.61	**	15	0.78	ns	22	1.15	ns
2008	3	-	-	24	0.57	**	24	0.94	ns	17	0.93	ns
2009	15	0.72	ns	25	0.55	**	0	-	-	21	0.90	ns
all years	20	1.03	ns	36	0.61	**	29	1.03	ns	33	0.81	ns

1) 分布解析は、最近接距離法 (Clark & Evans 1954, Sinclair 1985) を用いた。Analyses were done by the nearest neighbor distance method.

N: 結実した樹木数 (N>=10 の年に分布解析を行った)。Number of fruit-bearing trees (analyses were done for the years that the sample sizes are more than 10).

R: ランダム分布の場合は R = 1、R > 1 は均一分布傾向、R < 1 は集中分布傾向を表す。R = 1: random distribution, R < 1: trend in degree of aggregation, R > 1: trend in degree of dispersion.

Significance: *, ** は、5 %、1 % 有意差をそれぞれ示している。*, **: 5 per cent and 1 per cent level of significance, respectively.

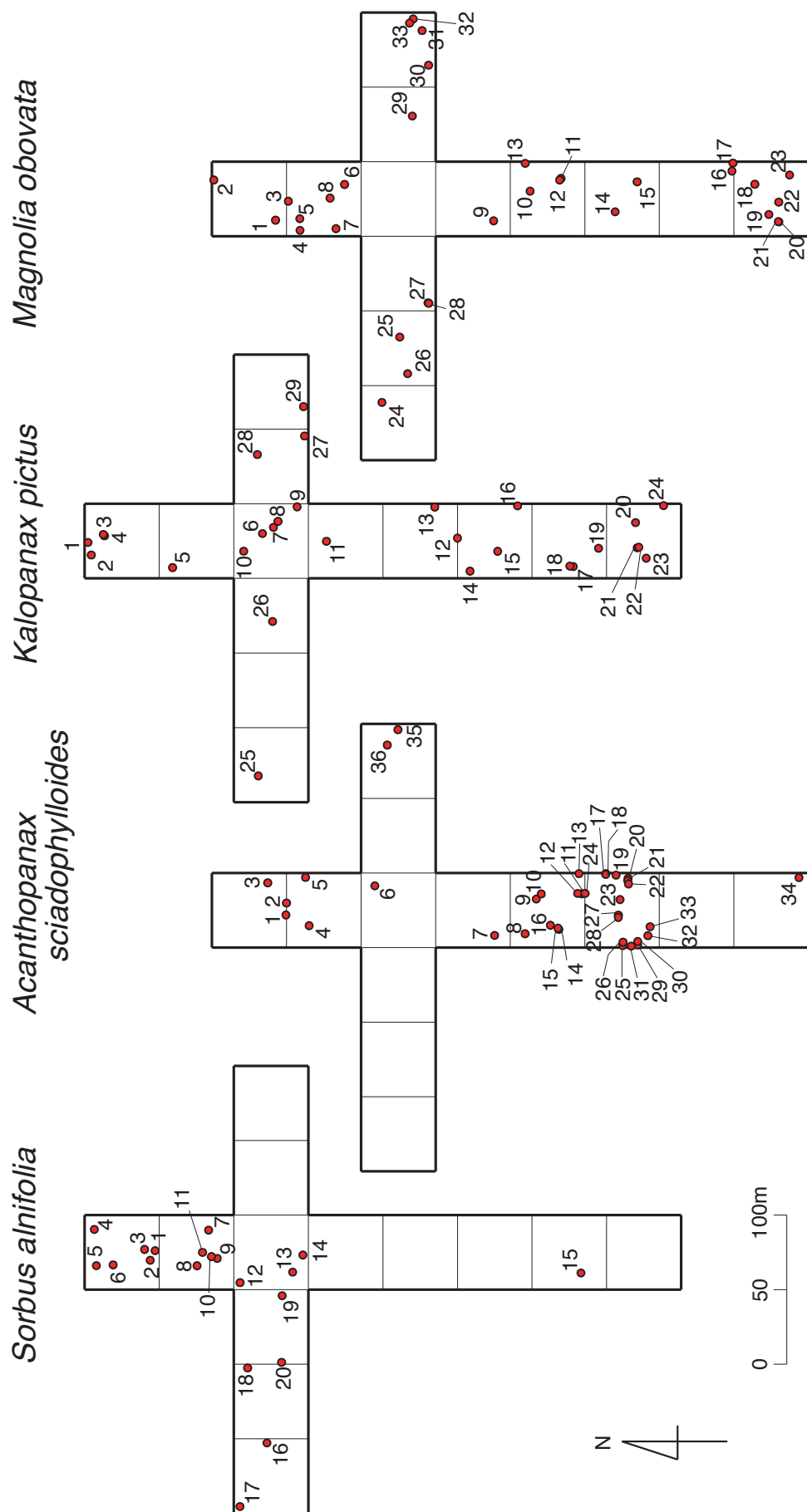


Fig. 1. 方形区内における調査期間中の全結実樹木の位置。番号は、Tables 1-4 の個体番号にそれぞれ対応。
Locations of fruit-bearing trees in quadrates, between the years 2000 and 2009. The numbers of individuals corresponding to the individual tree numbers for each species in Tables 1-4.

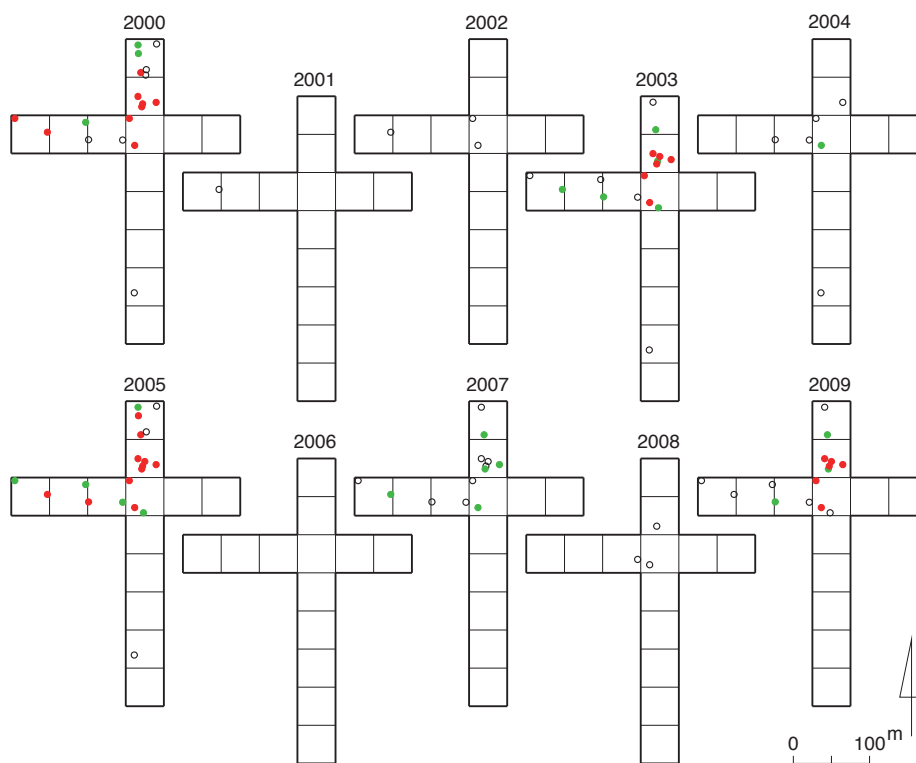


Fig. 2. アズキナシの年度ごとの結実木の位置図。結実程度 1 (黒丸)、2 (緑塗りつぶし)、3 (赤塗りつぶし) のみ表示。

Locations of *Sorbus alnifolia* trees that bore fruits in each year. Black circle: low fruit production; green dot: moderate fruit production; red dot: high fruit production.

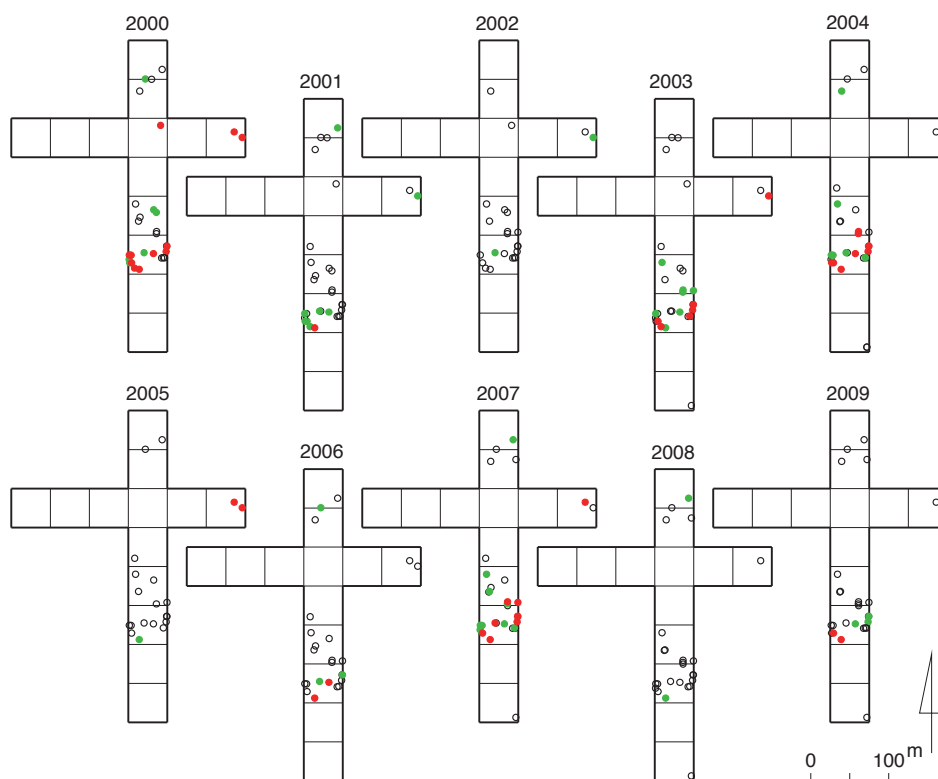


Fig. 3. コシアブラの年度ごとの結実木の位置図。結実程度 1 (黒丸)、2 (緑塗りつぶし)、3 (赤塗りつぶし) のみ表示。

Locations of *Acanthopanax sciadophylloides* trees that bore fruits in each year. Black circle: low fruit production; green dot: moderate fruit production; red dot: high fruit production.

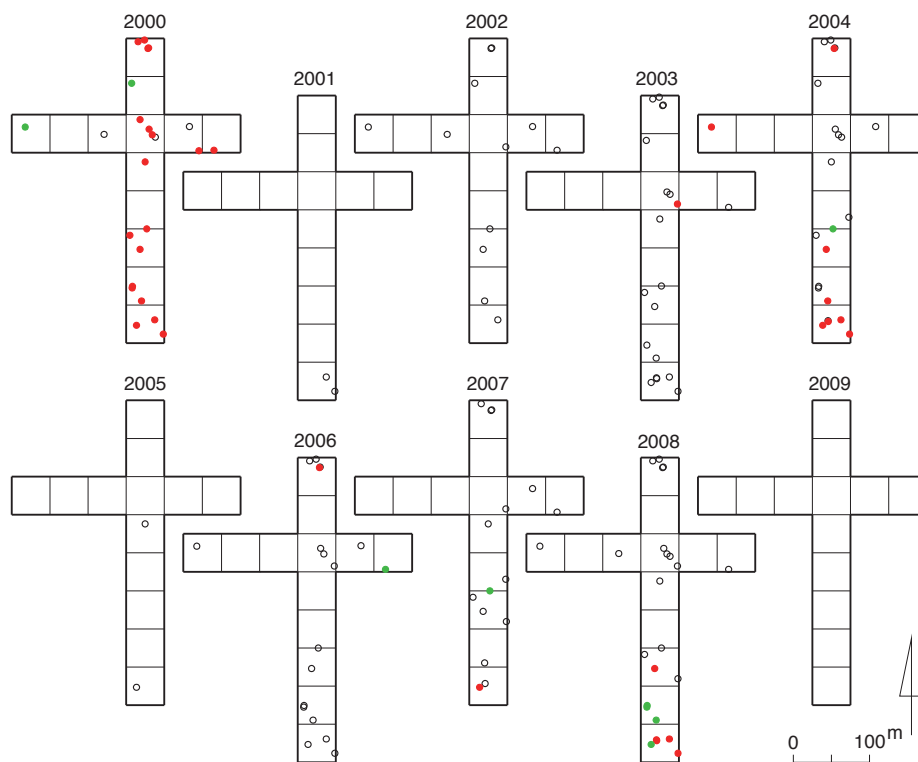


Fig. 4. ハリギリの年度ごとの結実木の位置図。結実程度 1 (黒丸)、2 (緑塗りつぶし)、3 (赤塗りつぶし) のみ表示。

Locations of *Kalopanax pictus* trees that bore fruits in each year. Black circle: low fruit production; green dot: moderate fruit production; red dot: high fruit production.

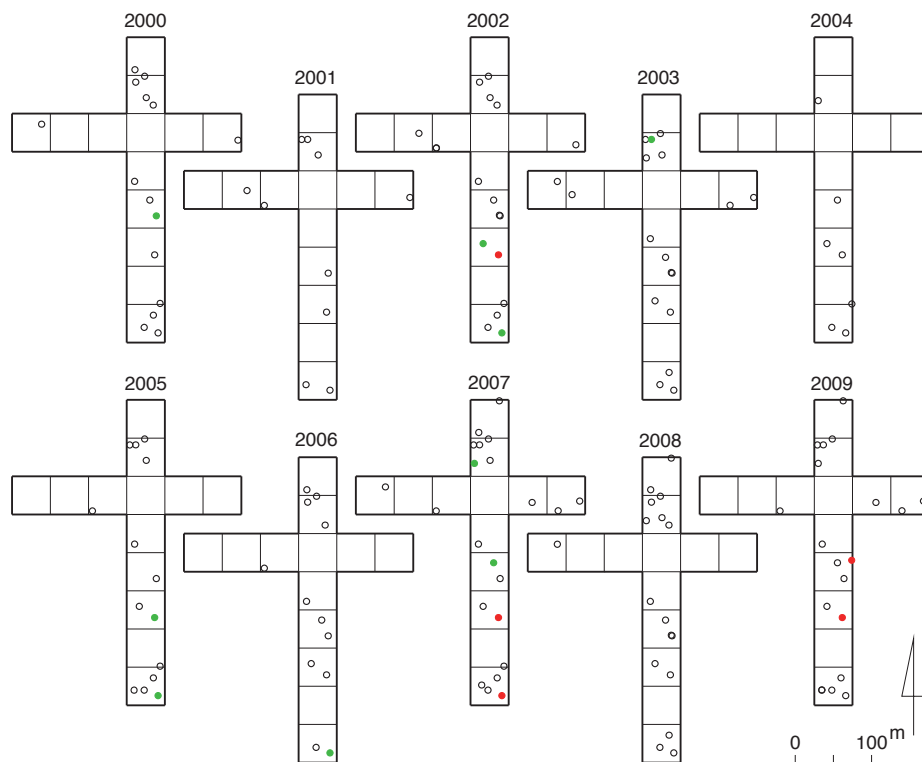


Fig. 5. ホオノキの年度ごとの結実木の位置図。結実程度 1 (黒丸)、2 (緑塗りつぶし)、3 (赤塗りつぶし) のみ表示。

Locations of *Magnolia obovata* trees that bore fruits in each year. Black circle: low fruit production; green dot: moderate fruit production; red dot: high fruit production.

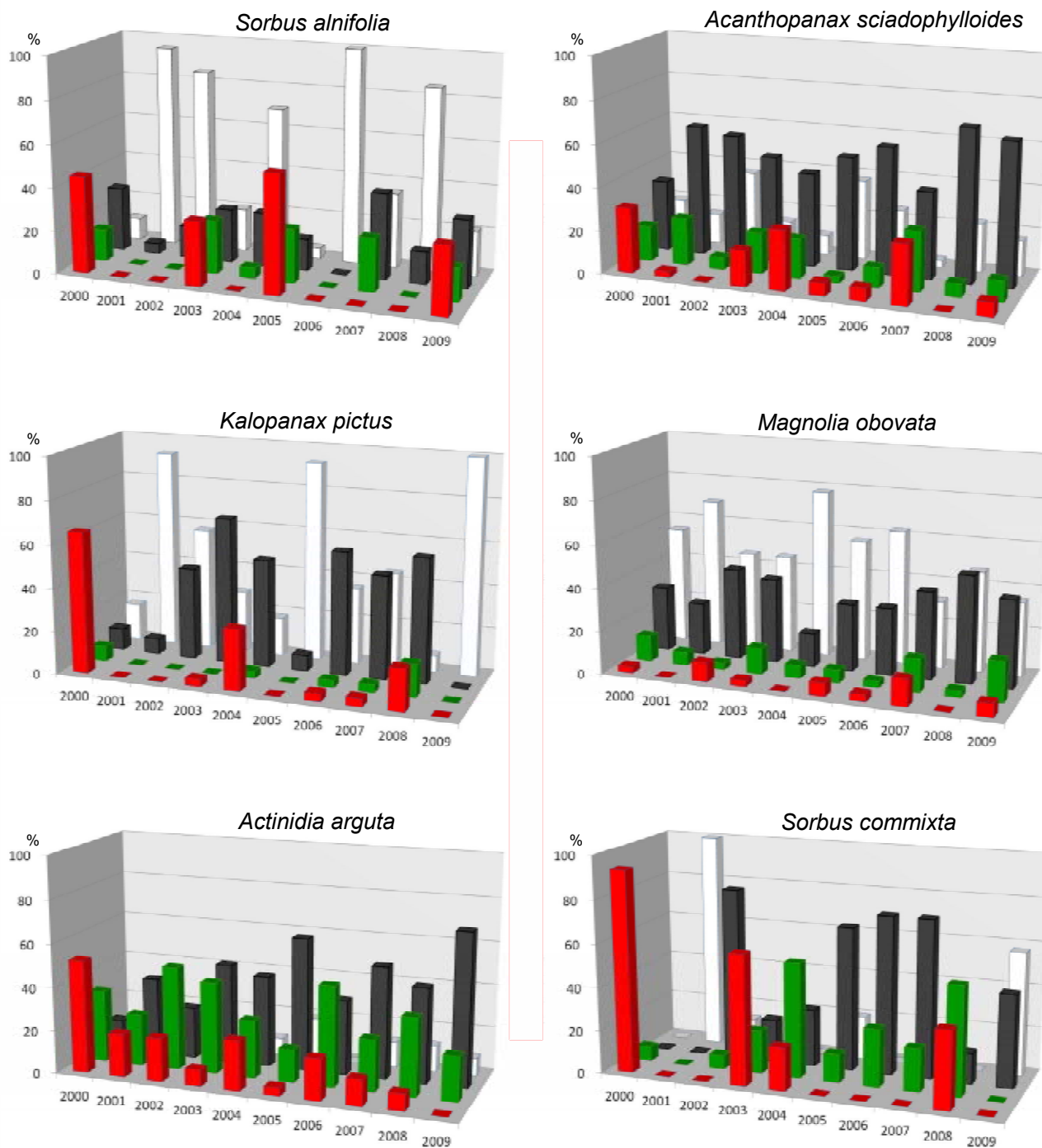


Fig. 6. 結実程度の分布の年変動. 棒の色は、結実程度を示す (白: 結実なし. 黒: 少量結実. 緑: 中量結実. 赤: 多量結実).
Annual variations in the level of fruit production. White: no fruits produced; black: low fruit production; green: moderate fruit production; red: high fruit production.

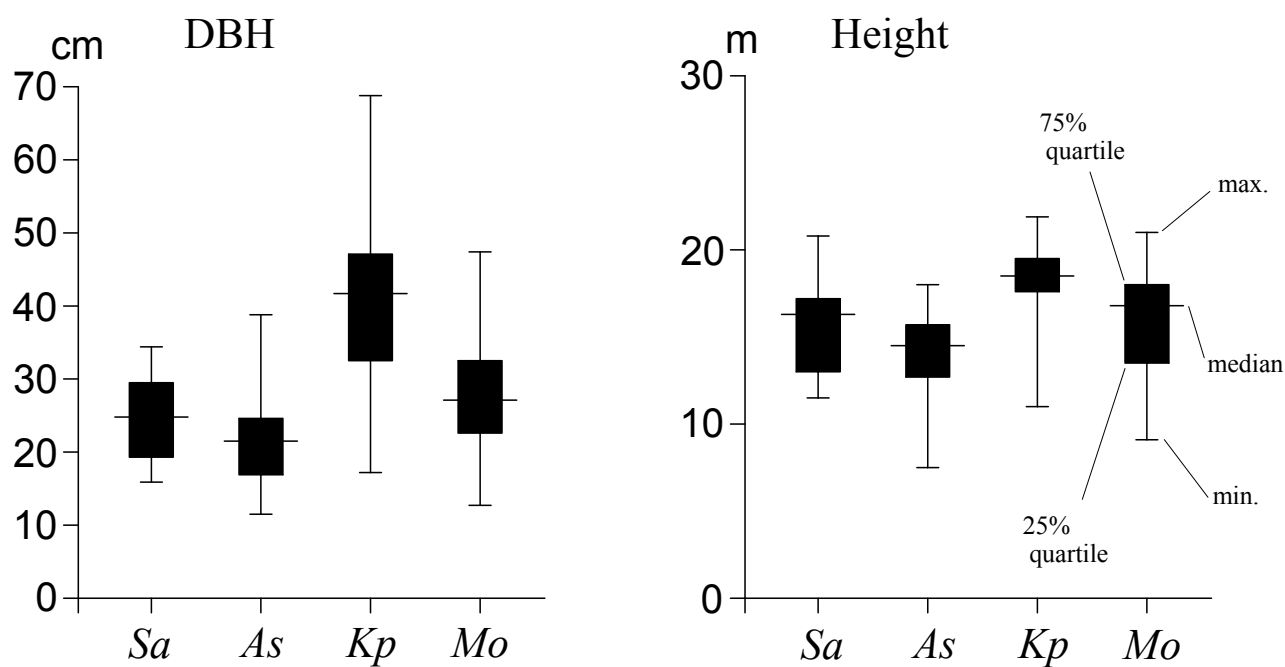


Fig. 7. 結実木の胸高直径と樹高の分布. Sa: アズキナシ、As: コシアブラ、Kp: ハリギリ、Mo: ホオノキ。
Distributions of the diameters at breast height and tree heights of the fruit-bearing trees. Sa: *Sorbus alnifolia*, As: *Acanthopanax sciadophylloides*, Kp: *Kalopanax pictus*, Mo: *Magnolia obovata*.

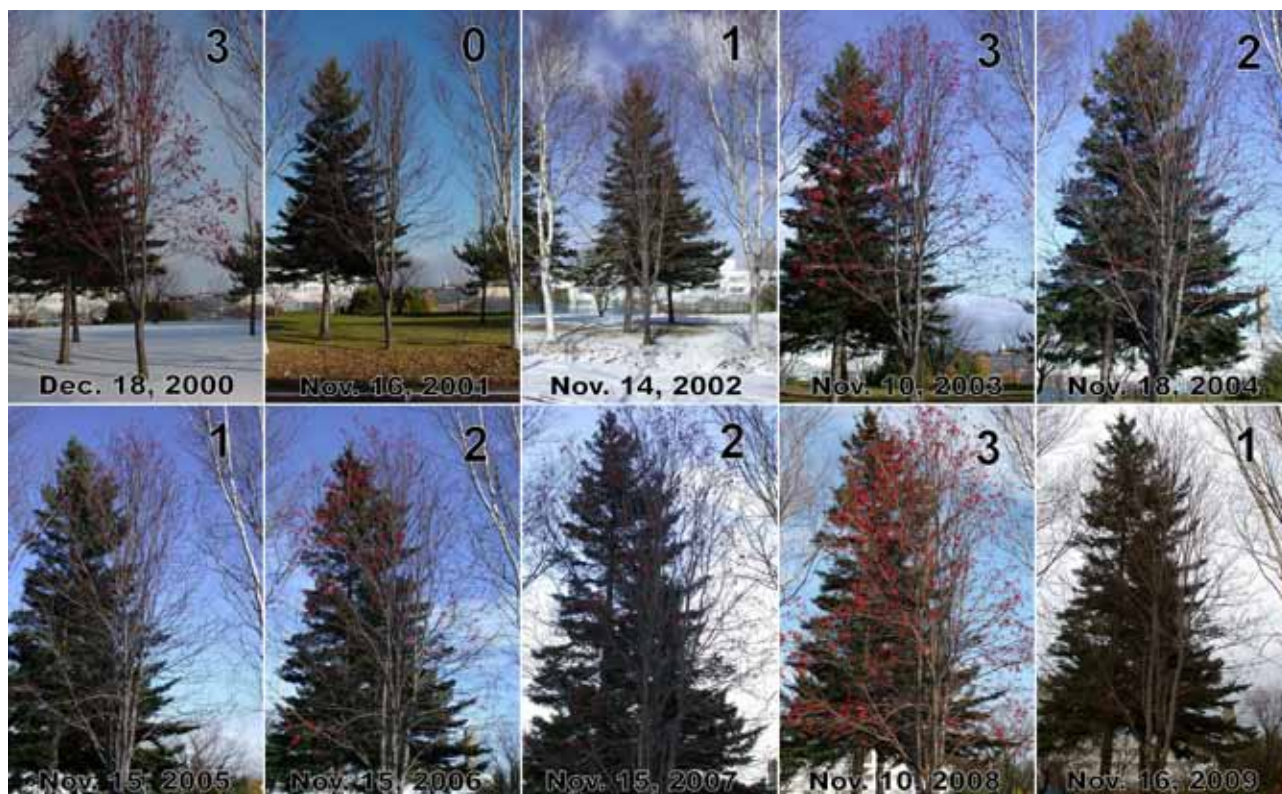


Photo 1. ナナカマドの結実程度の年変動例 (Table 6、個体番号 14)。右上の数字は、その年の結実程度を示す (0: 結実なし、1: 少量結実、2: 中量結実、3: 多量結実)。

A case of annual variation in the level of fruit production of *Sorbus commixta* (individual number 14 in Table 6). Numbers on the upper right corner indicate the level of fruit production for the year. 0: no fruits produced; 1: low fruit production; 2: moderate fruit production; 3: high fruit production.

引用文献

- Armesto, J. J., Mitchell, J. D. & Villagran C. (1986) A Comparison of Spatial Patterns of Trees in Some Tropical and Temperate Forests, *BioTropica*, **18**, 1-11.
- Bock, C. E. and Lepthien, L. W. (1976) Synchronous eruptions of boreal seed-eating birds, *American Naturalist*, **110**, 559-571.
- Clark, P. J. and Evans, F. C. (1954) Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations, *Ecology*, **35**, 445-453.
- 叶内拓哉 (2006) 野鳥と木の実ハンドブック, 文一総合出版, 80pp.
- Kelly, D. (1994) The evolutionary ecology of mast seeding, *Trends in Ecology & Evolution*, **9**, 465-470.
- Kelly, D. and Sork, V. L. (2002) Mast Seeding in perennial plants: why, how, where? *Annual Review of Ecology and Systematics*, **33**, 427-447.
- 清棲幸保 (1978) 日本鳥類大図鑑 増補新訂版 I, 講談社, 652pp.
- Koenig, W. D. and Johannes, M. H. (2001) Seed-crop size and eruptions of North American boreal seed-eating birds, *Journal of Animal Ecology*, **70**, 609-620.
- 小池伸介・正木 隆 (2008) 本州以南の食肉目 3 種による木本果実利用の文献調査, *日本森林学会誌*, **90**, 26-35.
- 小山浩正・八坂通泰・寺澤和彦 (2000) かき起こしのタイミングがブナ天然更新の成否に与える影響—豊凶予測手法の導入の有効性—, *日本林学会誌*, **82**, 39-43.
- 正木 隆・阿部 真 (2008) 双眼鏡を用いたミズナラの結実状況の評価, *日本森林学会誌*, **90**, 241-246.
- Matsuoka, S. (1985) Studies on the food habits of four sympatric species of woodpeckers. I, *Tori*, **33**, 103-111.
- Matsuoka, S. (1986) Pellet regurgitation by great spotted *Dendrocopos major* and white-backed woodpeckers *D. leucotos*, *Japanese Journal of Ornithology*, **35**, 75-76.
- 松岡 茂 (1993) 針葉樹一筋の繁殖戦略—イスカ類—, *週刊朝日百科 動物たちの地球*, No. **112**, 108-110.
- Matsuoka, S. (2006) Wind damage to nest trees of great spotted woodpeckers *Dendrocopos major* by a tropical cyclone, *Ornithological Science*, **5**, 217-220.
- 水井憲雄 (1991) 種子重—種子数関係を用いた落葉広葉樹の種子の結実豊凶区分, *日林誌*, **73**, 258-263.
- 水永博己・石井 弘・辻野 聡・原口曜江・川畑佳子 (1998) 霧島モミ・ツガ林における種子生産量と稚樹密度の年変動, *鹿児島大学農学部演習林研究報告*, **26**, 23-31.
- Nethersole-Thompson, D. (1975) Pine Crossbills, T & AD Poyser, 256pp.
- 日本樹木誌編集委員会 (編) (2009) 日本樹木誌 1, 日本林業調査会, 762pp.
- Oka, T., Miura, S., Masaki, T., Suzuki, W., Osumi, K., & Saitoh, S. (2004) Relationship between changes in beechnut production and Asiatic black bears in northern Japan, *Journal of Wildlife Management*, **68**, 979-986.
- Ostfeld, R. S. and Keesing, F. (2000) Pulsed resources and community dynamics of consumers in terrestrial ecosystems, *Trends in Ecology & Evolution*, **15**, 232-237.
- Pratt, T. K. and Stiles, E. W., 1983, How long fruit-eating birds stay in the plants where they feed: implications for seed dispersal, *American Naturalist*, **122**, 797-805.
- Payandeh, B. (1974) Spatial pattern of trees in the major forest types of Northern Ontario, *Canadian Journal of Forest Research*, **4**, 8-14.
- 澤田晴雄・梶 幹男・大村和也・五十嵐勇治 (2008) ブナ類 2 種 (*Fagus crenata* Blume and *Fagus japonica* Maxim.) の豊凶現象が樹体の成長に与える影響, *日本森林学会誌*, **90**, 129-136.
- Shibata, M., Tanaka, H., Iida, S., Abe, S., Masaki, T., Niiyama, K., & Nakashizuka, T. (2002) Synchronized annual seed production by 16 principal tree species in a temperate deciduous forest, Japan, *Ecology*, **83**, 1727-1742.
- Sinclair, D. F. (1985) On tests of spatial randomness using mean nearest neighbor distance, *Ecology*, **66**, 1084-1085.
- Svårdson, G. (1957) The "invasion" type of bird migration, *British Birds*, **50**, 314-343.
- Szwagrzyk, J. and Czerwczak M. (1993) Spatial patterns of trees in natural forests of east-central Europe, *Journal of Vegetation Science*, **4**, 469-467.
- 高畑 滋・小川恭男・三枝俊哉・高橋 俊 (2000) 羊ヶ丘植物誌 — 1999 年補足 —, 北海道農業試験場研究資料, No. **59**, 1-59.
- 滝谷美香・水井憲雄・寺澤和彦・梅木 清 (1998) 落葉広葉樹 35 種の結実豊凶に関する資料, 北海道林業試験場報告, No. **35**, 31-41.
- 東北森林管理局 (2011) 平成 23 年度のブナの開花状況と結実予測について, <http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/koho/press/pdf/bunakaika23.pdf>, (参照 2011-11-16).
- 山口恭弘 (2005) 渡りと木の実の豊凶から考えるヒヨドリの鳥害対策, *農林水産技術研究ジャーナル*, **28**, 35-39.

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9月 発行 森林総合研究所研究報告 第11巻3号 (通巻424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。



page85

マツタケ人工栽培技術開発に向けた研究
:山中 高史

Researches for development of the cultivation of 'matsutake',
a prized mushroom produced by the ectomycorrhizal basidiomycete *Tricholoma matsutake*
by YAMANAKA Takashi

page97

平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震による土砂災害の概要とその特徴
:三森 利昭、多田 泰之、村上 亘、大丸 裕武、安田 幸生、野口 正二

Characteristics of sediment disasters by The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008
by SAMMORI Toshiaki, TADA Yasuyuki, DAIMARU Hiromu,
MURAKAMI Wataru, YASUDA Yukio and NOGUCHI Shoji

page121

大径丸太から採材された心去リヒノキ製材品および無欠点小試験体の強度性能
:井道 裕史、長尾 博文、加藤 英雄

Strength properties of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) pithless
lumber and small clear specimens sawn from a large diameter log
by IDO Hirofumi, NAGAO Hirofumi and KATO Hideo

page135

岩手・宮城内陸地震災害地における2008年の気象と山地積雪水量分布の特徴
:安田 幸生、野口 正二、三森 利昭

Weather conditions and distribution of snow water equivalent around
the mountainous disaster area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake
by YASUDA Yukio, NOGUCHI Shoji and SAMMORI Toshiaki

page151

2008年岩手・宮城内陸地震災害地周辺の先行土湿の季節変動
:野口 正二、安田 幸生、多田 泰之、三森 利昭

Seasonal variation of antecedent soil moisture in and around the
disaster area of the Iwate-Miyagi Nairiku earthquake in 2008
by NOGUCHI Shoji, YASUDA Yukio, TADA Yasuyuki and SAMMORI Toshiaki

page161

関東平野周辺の窒素飽和状態の針葉樹人工林における地上部生産と窒素利用様式(英文)
:稲垣 善之、稲垣 昌宏、橋本 徹、小林 政広、伊藤 優子、
篠宮 佳樹、藤井 一至、金子 真司、吉永 秀一郎

Aboveground production and nitrogen utilization in nitrogen-saturated
coniferous plantation forests on the periphery of the Kanto Plain
by INAGAKI Yoshiyuki, INAGAKI Masahiro, HASHIMOTO Toru,
KOBAYASHI Masahiro, ITOH Yuko, SHINOMIYA Yoshiki,
FUJII Kazumichi, KANEKO Shinji and YOSHINAGA Shuichiro

page175

強度間伐したヒノキ人工林の表層土壌の物理性
:篠宮 佳樹、稲垣 善之、野口 麻穂子、奥田 史郎、宮本 和樹、伊藤 武治

Physical properties of surface soils at intensive thinned Hinoki cypress plantations
by SHINOMIYA Yoshiki, INAGAKI Yoshiyuki, NOGUCHI Mahoko,
OKUDA Shiro, MIYAMOTO Kazuki and ITOU Takeharu

page181

鳥類が採食する樹木果実生産量の年変動 ―札幌市羊ヶ丘における2000～2009年の記録―
:松岡 茂

Variation in fruit production of bird-dispersed tree species
- Data recorded between 2000 and 2009 in Sapporo, Hokkaido -
by MATSUOKA Shigeru