白馬岳高山帯の山火事跡地における地表環境の変化

佐々木明彦^{*+} 荻谷愛彦^{**} 鈴木啓助^{*}Geo-environmental Changes
on a Post-fire Alpine Slope of Mt. Shirouma-dake, Northern Japanese AlpsAkihiko SASAKI^{*+}, Yoshihiko KARIYA^{**} and Keisuke SUZUKI^{*}

[Received 2 March, 2018; Accepted 24 August, 2018]

Abstract

Long-term geo-environmental changes on a post-fire alpine slope of Mt. Shirouma-dake in the northern Japanese Alps are examined. The fire event occurred on May 9, 2009 on an alpine slope of Mt. Shirouma-dake and spread to *Pinus pumila* communities and grasslands. The fire resulted in significant damage to *P. pumila* communities, while that to grassland was minimal. The burning of needles of *P. pumila* communities exposed the forest floor to atmospheric conditions such as rain, wind, and snow. A map of micro-landforms based on geomorphological field observations was prepared. These micro-landforms were observed for a period of seven years after the fire event. The results do not indicate significant changes to the micro-landforms; however, litter from the forest-floor of burned *P. pumila* communities was flushed out to surrounding areas. The average thickness of the litter layer of the forest-floor of burned *P. pumila* communities was 3.5 cm in September 2011, which had decreased to less than 0.5 cm by September 2015. The *P. pumila* communities on the slope were established on angular and sub-angular gravel having an openwork texture covered with a thin soil layer. It is necessary to pay attention to soil erosion following the outflow of litter because the soil layer can be easily eroded. In addition, ground temperatures of burned and unburned *P. pumila* communities were measured from 2009 to determine the influence of fire. Ground temperature sensors were installed in the soil at depths of 1 cm, 10 cm, and 40 cm. Diurnal freeze-thaw cycles occurred at a soil depth of 1 cm on the post-fire slope in October and November from 2011 to 2016. However, these cycles did not occur in 2009 and 2010. In addition, the periods of seasonal frost at depths of 10 cm and 40 cm on the post-fire slope were extended by a period of two weeks in comparison to the unburned *P. pumilla* community. These thermal changes were triggered by a decrease in the thickness of the litter layer in the burned *P. pumila* community.

Key words : fire, Alpine zone, *Pinus pumila*, slope erosion, ground temperature variation, Shirouma-dake

キーワード : 山火事, 高山帯, ハイマツ, 斜面侵食, 地温変化, 白馬岳

* 信州大学理学部

** 専修大学文学部

+ 現所属 : 国土館大学文学部

* Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto, 390-8621, Japan

** School of Letters, Senshu University, Kawasaki, 214-8580, Japan

+ Present address: Faculty of Letters, Kokushikan University, Tokyo, 154-8515, Japan

I. はじめに

2009年5月9日午後1時過ぎに白馬岳の高山帯において人為によると考えられる山火事が発生した。降水量の少ない乾燥した大陸性気候下では、森林火災のおもな原因は落雷であるといわれている（たとえば、高橋, 1986）が、十分な降水量のある日本では自然発火の火災はほとんど起こらないと考えられる（津田, 1995）。自然発火であるか人為による発火であるかにかかわらず、日本国内の高山帯での山火事はたいへん珍しく、火事によって生じる自然へのさまざまな影響を記録することは重要な意義をもつ。たとえば、Takahashi (2012) は白馬岳の山火事後に植物のモニタリング調査を行い、草本植物は急速に回復したが、ハイマツは回復しないことを明らかにし、草本植物が回復できたのは土壤中にある冬芽が山火事で焼けなかったためであるとした。

筆者らは、山火事発生を契機としてどのような地表環境の変化が生じるかを確認するために、山火事の発生直後から植生焼失域とその周囲の斜面において地形や植生などの記載を行ない、ハイマツの林冠がなくなったことやリター層の流出によって地温状況が変化しつつあることを指摘した

（佐々木ほか, 2013）。しかし、その機構を明確には解明できておらず、ひきつづきモニタリングを実施してきた。

山火事発生からの7年間に、山火事を契機とした大規模な地形変化は生じていないが、リター層の流出によって土壌侵食の発生やそれに引き続く斜面構成物の斜面物質移動など、さまざまなことが起こりえるであろう。そこで、ハイマツの焼失域とその周囲の斜面で地形調査を実施し、地表状況の変化を記載し、地表環境の変化の要因について考察した。また、佐々木ほか (2013) にひきつづきハイマツの焼失域と非焼失域で地温観測を実施し、7年間の地温の変化状況を明らかにした。

II. 調査地域の概観

山火事が発生した場所（以下では焼失域とよぶ）は、白馬岳（標高 2932 m）山頂から南へ 750 m ほどの斜面に位置する（図 1）。焼失域の面積は 5900 m² で、標高は 2578 ~ 2664 m、平均傾斜は 32° である（荻谷ほか, 2009）。ここは、姫川水系、松川北股入の、いわゆる白馬大雪溪の谷頭部であり、葱平園谷（小疇ほか, 1974）とよばれる小規模な園谷の左岸の水食谷壁にあたる。焼失域付近は、二畳系の白馬岳層の珪長質凝灰岩

図 1 調査地域. AT は気温観測地点を示す。

Fig. 1 Study area. AT is the site of air temperature measurement.

の分布域とされる（中野ほか, 2002）が、焼失域では火山性碎屑岩と砂岩・泥岩・緑色岩・火山岩からなる混在岩がみられる（荻谷ほか, 2009）。焼失域とその周囲の斜面では、それらの岩石からなる岩盤が一部で露出するほか、周氷河性の砂礫斜面もみられる。砂礫斜面にはソリフラクション・ロウプや植被階状土などの微地形が認められる。焼失域では、植被域においてこれらの岩盤や砂礫層を覆って土層が生成しているが、その層厚はおおむね 10 cm 程度であることが露頭での観察で確認された。

松川北股入流域での森林限界高度はおおむね 2300 m であり、それ以高は高山帯の植生景観を示す（土田, 1999）。焼失域付近では、ウルップソウ、ハクサンフウロ、ミヤマキンポウゲなどからなる低茎・高茎草本群落と、イワノガリヤスやタカネノガリヤスなどのイネ科草本群落、ハイマツ群落がみられる。また、焼失域の一部には、クロマメノキやガンコウランなどからなる風衝植物群落も認められる。

山火事は、目撃情報などから登山者による失火と考えられ、ハイマツ群落や草本群落を焼いて、2 時間ほどで鎮火したと推定されている（長野県警察大町警察署調べ）。焼失域は、上述のように、部分的に風衝地となっているとみられることから、積雪は少ないと考えられる。山火事鎮火直後の 2009 年 5 月 9 日に長野県警察大町警察署が撮影した写真（図 2）によれば、焼失域の斜面は積雪に覆われていないが、その周囲の斜面は積雪に覆われていたことが確認できる。山火事は、積雪に覆われていない斜面において、草本の枯れた地上部を中心に火が燃え広がったものと考えられる（高橋, 2009）。

焼失域において、ハイマツは、葉のみならず樹枝までが焼けた部分も多く、樹枝が焼けたハイマツは直ちに枯死した。一方、葉のみが焼け落ちたハイマツでは、葉で作られる栄養が回らなくなり、いずれ全体が枯死すると考えられる（高橋, 2009）。ただし、草本類は、その地上部は焼けたものの地下部が被害を免れたため、山火事の影響をほとんど受けなかった（高橋, 2009）。

図 2 白馬岳高山帯の山火事跡地。2009 年 5 月 9 日に大町警察署によって撮影された写真を使用した。

Fig. 2 Burned slope in the alpine zone of Mt. Shirouma-dake. Air photograph taken by Omachi Police station on May 9, 2009.

III. 調査方法

1) 地表状況の観察

山火事後の 2009 年 9 月に、トータルステーションを用いて測量された座標にもとづいて 2 m 間隔の等高線図が作成され（荻谷ほか, 2009）、それを基図として焼失域およびその周辺の斜面に立ち入り、目視観察を主たる方法として、地形変化や地表の状況が観察・記載され、モニタリング地点が設定された（荻谷, 2011; 池田・鈴木, 2011）。佐々木ほか（2013）は、新たな観察地点を加えて、2012 年秋季まで地表状況の経過を観察した（図 3）。本研究では、以上の調査結果をふまえて、2013～2016 年に地形変化や地表の状況の変化を目視で観察した。これに加えて、焼失域においてリター層の流出が顕著（佐々木ほか, 2013）だったため、その変化を明らかにするために、2011 年から 2016 年までの 9 月および 10 月に、焼失したハイマツ群落（以下では焼失ハイマツ群落とよぶ）の各地点（9, 12, 13, 15, 22, 24）においてリター層の層厚を 1 地点あたり 5 か所で 0.1 cm 単位で計測した。

2) 地温状況の観測

山火事によってハイマツ群落が焼失したことで地温状況に変化が生じることが考えられるという

図3 調査地点の位置図。

Fig. 3 Map of observation sites.

観点から、2009年10月19日に斜面表層の地温観測を開始した（池田・鈴木, 2011）。

山火事による地温状況への影響を考察するために、焼失ハイマツ群落（地点22, 図4）において地温を観測するだけでなく、焼失ハイマツ群落に隣り合う焼失しなかったハイマツ群落（以下では非焼失ハイマツ群落とよぶ；地点23, 図4）においても同様に地温観測を実施した。非焼失ハイマツ群落での地温状況が山火事前の地温状況を示すと考え、非焼失ハイマツ群落での地温状況と比較することによって焼失ハイマツ群落における地温状況を評価できると考えた。これら2つの観測点の距離は水平距離で7mであるが、ごく狭い範囲でも、地表面状態（積雪、斜面方位、傾斜、植生種組成・分布、土壌構造など）の不均一

図4 地温観測を実施した焼失ハイマツ群落（site 22）と非焼失ハイマツ群落（site 23）。位置は図3を参照。2011年7月25日撮影。

Fig. 4 Burned *Pinus pumila* community (site 22) and unburned *P. pumila* community (site 23) were sites of ground temperature measurements. Locations of all sites are shown in Fig. 3. Photograph taken on July 25, 2011.

性によって地表付近の地温形成は影響を受ける可能性がある。そこで可能なかぎり山火事の影響のみが地温データの差として反映されるように、標高と斜面方位・傾斜を同一条件にして観測地点を設定した（池田・鈴木, 2011）。観測地点の標高は2597m, 斜面方位は南向き, 斜面傾斜は約35°である。両地点における土層および斜面構成物は、試坑を掘削して記載された（佐々木ほか, 2013）。焼失ハイマツ群落（地点22）では、地表から7cm深までが腐植質壤土層であり、長径1~3cmの角礫を含む（図5）。それ以深は3cm以下の角礫を主体とする砂礫層となっている。また、非焼失ハイマツ群落では、地表から6cm深までが腐植質壤土層であり、それ以深は3cm以下の角礫を主体とする砂礫層となっている。以上のように、両群落における表層部の土層および斜面構成物はほぼ一致する。なお、非焼失ハイマツ群落は、樹高が70cmのハイマツからなり、被度は100%で、林床植生はほとんどない。林床は厚さ4cmほどのリターに覆われている。

地温観測には自記記録式のサーミスタ温度計（T&D社製 TR-52S）を用いた。センサーの分解

図 5 斜面表層物質の柱状図と温度センサー埋設位置。位置は図 3 を参照。

Fig. 5 Columnar sections of surface materials and installation of temperature sensors. Locations of soil pits are shown in Fig. 3.

能は 0.1°C 、精度は $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ であるが、センサーは融点においてキャリブレーションを行っており、融点近傍での精度は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ が保証されるようにした。地温観測は、1 cm 深、10 cm 深、40 cm 深で行った。センサー埋設時に土層や斜面構成物が乱れないようにするために、ドリルを用いて地表から 40 cm 深まで直径 1 cm の孔を開け、それぞれの深度の地温を計測できるように長さ 50 cm の竹串に温度センサーを固定し、その竹串を孔に差し込んで隙間を埋めて固定した（池田・鈴木, 2011）。また、竹串が凍上によって抜けていないことをデータ回収時に確認した。地温は 2009 年 10 月 19 日から 2016 年 10 月 12 日まで、毎正時に記録した。

図 6 焼失ハイマツ群落におけるリター層の厚さの変化。6 地点それぞれにおける平均値を示す。

Fig. 6 Variations of litter layer thickness in burned *P. pumila* communities. Average litter layer thickness was obtained from six sites.

IV. 結 果

1) 地表状況の変化

山火事直後からモニタリング対象となっているノッチ（地点 3）、植被階状土（地点 14）、ソリフラクション・ロウプ（地点 17）などの微地形（佐々木ほか, 2013）は、ノッチの崩落やライザーの崩壊など、地形の外形が壊れるなどの変化は生じていないことが目視で確認された。

一方で、もともとハイマツ群落の林床にあったリター層の流出は山火事で降継続して生じていることが明らかとなった（図 6）。非焼失ハイマツ群落においては、リターはハイマツの落葉からなり、その層厚は 3 ~ 5 cm 程度であった。これに対し、2012 年秋季の時点では、焼失ハイマツ群落におけるリター層の厚さは 2 ~ 4 cm で、非焼失ハイマツ群落におけるリター層の厚さとの差はそれほど顕著ではなかったが、リターそのものの分解は進行していた。2013 年の秋季には、ほとんどの場所でリター層の層厚が著しく減少し、平均層厚は 0.9 cm となった。リターの隙間に土層が露出する地点も認められた。リター層の厚さはその後減少し続け、2016 年秋季にはリター層の平均層厚は 0.3 cm となった。これに関連して、

土層の流出も生じている。たとえば、2013 年 9 月にリター層厚が 0.4 cm となった地点 9 では、一部で土層が流水によって侵食されて、その下位の砂礫層が露出するようになっていた（図 7）。同様の状況は地点 12 や地点 13 でも認められた。これらの地点では、小礫が 3 ~ 4 cm 移動し、大礫の周囲では流水によって最大で 2 cm ほど砂礫層が侵食を受けていた。また、砂礫層を土層が覆う地点 22 においても、2016 年秋季にはリター層が 0.3 cm となり、リターの間隙からみえる土層表面には流水の痕跡が認められるようになった。

2) 地温状況

2009 年 10 月 19 日の観測開始から 2016 年 10 月 12 日までの地温データが得られた。非焼失ハイマツ群落と焼失ハイマツ群落の地温状況を図 8 および図 9 にそれぞれ示す。地温は各深度とも観測期間内の 1 日の最高値と最低値を直線で結んで表現している。つまり直線の長さは気温の日較差を示す。また、図 10 には非焼失ハイマツ群落と焼失ハイマツ群落における地温データのうち、2012 年以降の各冬季における 1 cm 深の 1 時間ごとの地温状況を示す。

観測期間には、データロガーやセンサーの故障などによってデータが取得できなかったデータ欠測期間が存在する。非焼失ハイマツ群落では、いずれの深度でも 2012 年 7 月 24 日から同 8 月 20 日までの期間が欠測となっている。焼失ハイマツ群落では、1 cm 深で 2011 年 6 月 25 日 ~ 同 7 月 11 日、10 cm 深で 2011 年 5 月 31 日 ~ 8 月 31 日、2012 年 10 月 16 日 ~ 2013 年 9 月 9 日、2013 年 9 月 26 日以降、40 cm 深で 2012 年 7 月 24 日 ~ 同 8 月 20 日が欠測となっている。

非焼失ハイマツ群落での地温の最高温度は、1 cm で 20.3°C、10 cm 深で 14.2°C、40 cm 深で 12.6°C であった。最低温度は、1 cm で -11.8°C、10 cm 深で -10.1°C、40 cm 深で -7.2°C であった。平均温度は、1 cm で 2.5°C、10 cm 深で 2.7°C、40 cm 深で 2.9°C であった。このように、最高・最低温度の較差が大きいのは地表に近い 1 cm 深で、深度が深いほど温度変化が緩慢であることが明らかとなった。

図 7 焼失ハイマツ群落 (site 9) における地表状況の変化。a) 2012 年 9 月 12 日。b) 2013 年 9 月 10 日。c) 2016 年 9 月 8 日。

Fig. 7 Variation of ground surface materials in the burned *P. pumila* community (site 9). a) September 12, 2012. b) September 10, 2013. c) September 8, 2016.

年間の地温の推移をみると、非焼失ハイマツ群落の 1 cm 深地温では、地温の日較差が大きい期間とそれが小さい期間が存在することがわかる。1 年のサイクルでは、おおむね 5 月末から地温の日較差が大きくなり、それが 11 月まで続く。日

図 8 非焼失ハイマツ群落における地温の変化.

Fig. 8 Variation of ground temperature in the unburned *P. pumila* community.

図 9 焼失ハイマツ群落における地温の変化.

Fig. 9 Variation of ground temperature in the burned *P. pumila* community.

較差の平均値は1.9°C、最小値は0°Cであり、最大値は16.6°Cである。最大値を記録したのは2016年5月23日で、地温の日較差はこの前後

の日だけ突出して大きい値であった。約7年間にわたる全観測期間の2550日中、地温の日較差が0°Cの日は353日で、16.1%を占める。測器

図 10 非焼失および焼失ハイマツ群落における 1 cm 深の地温の変化.

Fig. 10 Variation of ground temperature at 1 cm depth in the unburned and burned *P. pumila* communities.

は誤差が $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ に収まるように校正されたが、誤差を含めて日較差 0.2°C 以下を地温の日較差が生じない日と考えると、それは 779 日あり、全体の 30.6% を占める。

一般に日本の山地では、秋季から冬季のはじめにかけての気温の低下に伴って地表付近は凍結して季節凍土が形成され、翌春の気温上昇によって季節凍土は融解する（たとえば、澤口, 1987; 松岡, 1991）。その際、秋季から冬季のはじめにかけての時期には、土層が日周期の凍結・融解を繰り返

しながら凍結深度が深まっていき、冬季には凍結・融解がほとんど生じなくなる。そして、春季には再び日周期の凍結・融解を繰り返しながら土層が融解する。これらの期間をそれぞれ、凍結進行情、凍結期、融解進行情という（澤口, 1987）。非焼失ハイマツ群落における 1 cm 深では、日周期の凍結・融解は、凍結進行情にまったく発生せず、融解進行情には 2015 年と 2016 年の 5 月にそれぞれ 4 回生じたものの、他の年には生じなかった。10 cm 深と 40 cm 深では、日周期の凍結・融

解は発生せず、年周期の凍結・融解のみが生じた。たとえば、2012年から2013年にかけての凍結進行期、凍結期、および融解進行期の地温状況は、1 cm 深では10月から11月にかけて少しずつ温度を減じながら、11月22日にはじめて凍結し、その後は融解することなく氷点下で推移し、翌年の5月20日に融解した（図10）。10 cm 深では日周期の凍結・融解をすることなく1 cm 深より4日あとの11月26日に凍結し、翌年の5月20日に融解した（図8）。40 cm 深の地温は、2013年1月9日にはじめて凍結し、1 cm 深および10 cm 深より15日遅い6月5日に融解した（図8）。このように、非焼失ハイマツ群落では、日周期の凍結・融解は基本的に発生せず、年周期の凍結・融解が発生しているといえる。また、地表から10 cm 深までは速やかに凍結するが、40 cm 深まで凍結するのは、1 cm 深が凍結してから40日以上かかることが明らかとなった。融解時も同様で、1 cm 深と10 cm 深は同日に融解したが、40 cm 深の凍結はそれらより2週間ほど継続されることもわかった。

一方、焼失ハイマツ群落では、10 cm 深のデータがほとんど取得できていないものの、地温の最高温度は、1 cm で34.2°C、10 cm 深で15.2°C、40 cm 深で13.3°Cであった。最低温度は、1 cm で-17.4°C、10 cm 深で-8.9°C、40 cm 深で-7.5°Cであった。平均温度は、1 cm 深で2.6°C、40 cm 深で3.0°Cであった。このように、最高・最低温度の較差が大きいのは地表に近い1 cm 深で、深度が深いほど温度変化が緩慢である状況は、非焼失ハイマツ群落と同様であるが、最高・最低温度の較差が非焼失ハイマツ群落のそれに比べて顕著に大きいことがあげられる。また、それは年々拡大しているようにみえる。

焼失ハイマツ群落では、2012年から2013年にかけての凍結進行期、凍結期、および融解進行期に、1 cm 深の土層は10月20日にはじめて凍結し、その後すぐに融解した（図10）。1 cm 深では11月4日に再び日周期の凍結・融解が生じた。その後2回の日周期の凍結・融解が生じ、土層は11月13日より凍結期間に入った。この

凍結開始日は非焼失ハイマツ群落の1 cm 深より9日早かった。そして、2013年5月13日に季節凍土は融解した。この季節凍土の融解日は非焼失ハイマツ群落の1 cm 深の融解日より7日早かった。季節凍土の融解後の1 cm 深では、6月9日までに9回の日周期の凍結・融解が生じた。40 cm 深では土層は2012年12月28日に凍結し、2013年6月16日に融解した（図9）。この凍結開始日は非焼失ハイマツ群落での凍結開始日に比べ12日早く、11日遅い融解であった。40 cm 深における2012/2013冬季の最低温度は、非焼失ハイマツ群落で-4.0°C、焼失ハイマツ群落では-7.5°Cであった。

非焼失ハイマツ群落、焼失ハイマツ群落とも、1 cm 深では2009/2010冬季および2010/2011冬季に日周期の凍結・融解は生じなかったが、焼失ハイマツ群落では2011/2012冬季の凍結進行期に13回の日周期の凍結・融解が発生し、それは融解進行期にも13回生じた（図8、図9）。これ以後も、非焼失ハイマツ群落では、上述の2012/2013冬季には、凍結進行期に4回の日周期の凍結・融解が発生し、融解進行期には10回の日周期の凍結・融解が発生した。2013/2014冬季の凍結進行期には11回、融解進行期に13回、2014/2015冬季には凍結進行期に10回、融解進行期に25回、2015/2016冬季には凍結進行期に16回、融解進行期に10回の凍結・融解がそれぞれ発生した（図10）。

V. 考 察

凍結進行期であっても、非焼失ハイマツ群落では日周期の凍結・融解がほとんど生じないことが明らかとなった。たとえば、本地点より140 m ほど標高の高い離山（図1）での気温は、2012/2013冬季に、2012年10月6日から同28日の期間に日周期の凍結・融解を繰り返し、その後は2013年3月8日まで氷点下で推移した。3月9日から5月23日にかけて9回の日周期の凍結・融解が生じ、5月24日以降に気温はプラスに転じた（図11）。観測点の標高の違いに留意する必要があるが、離山での気温が凍結・融解を示

図 11 離山（標高 2740 m）における気温状況。

Fig. 11 Air temperature at Hanareyama (2740 m a.s.l.).

す期間に非焼失ハイマツ群落でそれが生じないということは、非焼失ハイマツ群落の地温はなんらかの原因で地温変化が抑制されていることになるであろう。たとえば、2010/2011 冬季の凍結進行期の 1 cm 深地温は、10 月 15 日から地温の日較差が 2°C 程度になり、地温が徐々に低下して 11 月 30 日に凍結期間に入った（図 8）。焼失ハイマツ群落においても同様に、10 月 20 日に地温の日較差が 2°C 程度になり、地温が徐々に低下して 12 月 8 日に凍結期間に入った（図 9）。一般に植物群落による地表面の断熱効果を考える場合、群落の被度が大きいほど、また群落高が高いほど日射が妨げられ、地温の変化は抑制されるため、ハイマツ群落内の地温の年較差は数°C 以内であろうと考えられる（高橋, 1995）。この考えにたてば、被度 100% のハイマツ群落の林冠が、外気と日射から林床を保護し、そのために地表付近の地温変動が大きくならないということが考えられるが、2010/2011 冬季の凍結進行期の場合は、葉が焼け落ちた焼失ハイマツ群落の 1 cm 深地温も同様の地温状況を示すため、ハイマツの林冠による地温変動の抑制だけではないと考えられる。ハイマツ群落が成立するには冬季に枯れないように積雪による保護が必要である（たとえば、沖津・伊藤, 1983）ので、ハイマツ群落の立地はもともと相応の厚さの積雪層が形成される場所であるはずである。本地点は一部が風衝地となっており、ハイマツ群落の樹高が 70 cm 程度であることから、最大積雪深は 70 cm を大きくは超えないと考えられる。気温の日変動が積雪層内に影響を及ぼ

す深さは、一般に 15 ~ 20 cm とみられる（中川ほか, 1976; 下川, 1989）ので、凍結進行期に 20 cm 程度の積雪があれば、その断熱性によって地温変化が抑制されることは十分に考えられる。

2011/2012 冬季の凍結進行期には、10 月 26 日から 11 月 25 日までの間に焼失ハイマツ群落の 1 cm 深のみで凍結・融解が 13 回発生した。また、同融解進行期には 5 月 20 日から 6 月 2 日までに焼失ハイマツ群落の 1 cm 深のみで 13 回の凍結・融解が生じた。焼失ハイマツ群落の 1 cm 深における 2012 年夏季の地温は、それ以前の 2 年間より明らかに日較差が大きくなっており、その様子は 10 cm 深でも確認できる。焼失ハイマツ群落においては、冬季の凍結・融解の発生と夏季の地温の昇温の双方が生じたことになる。焼失ハイマツ群落における夏季の地温の日較差の拡大は、夕方から朝にかけての地温の下降と日中の地温の上昇によるもので、夏季の地温の最低温度は年々下降し、最高温度は上昇している。Ueno *et al.* (2015) は、南アルプス井川演習林の森林伐採地と非伐採地での気温や短波・長波放射量の観測を行い、気温は伐採地と非伐採地とで一日中ほとんど差がないものの、日中の伐採地の地表面の温度は非伐採地の地表面温度に比べ顕著に高温となり、一方、夜間の伐採地の地表面の温度は非伐採地の地表面温度に比べ低温になることを示した。これは森林の伐採によって林冠による短波・長波の遮蔽がなくなり、地表に到達する短波量の増加が地表面の温度上昇をもたらし、夜間の下向き長波放射量の減少が放射冷却を促進したことによると考え

られる。本研究の焼失ハイマツ群落では、林冠が焼失したことで、Ueno *et al.* (2015) と同様に、地表での下向き短波の増加と下向き長波の減少が生じ、とくに 1 cm 深における日中の地温の上昇と夜間の地温の下降が顕著になり、地温の日較差が大きくなったと考えられる。このため、焼失ハイマツ群落では、凍結進行期や融解進行期に地表が 20 cm 程度の積雪に覆われない場合に、土層は 1 cm 深において凍結・融解するようになったと考えられる。これに対し、非焼失ハイマツ群落における地温は、積雪の有無によらず、ハイマツ群落の林冠によって地表が保護されることで地温変動が抑制され、地温の日変動が小さく、凍結進行期や融解進行期に日周期の土層の凍結・融解が発生しないのであろう。

林冠を失った焼失ハイマツ群落では、地表に堆積するリター層が直接日射にさらされて乾燥し、またリター層は降水にも直接さらされるようになって、流水によるリターの流出が進んだと考えられる。リター層は焼失ハイマツ群落の各サイトにおいて年々薄くなっており（図 6）、とりわけ 2012 年秋季と 2013 年秋季との間のギャップが大きい。2013 年は 7 月と 8 月には、日雨量が 120 mm を超す集中的な降水が白馬村で生じており（図 12）、集中的な降水がリターの流出に強く影響した可能性が考えられる。ハイマツのリター層による断熱効果は、大雪山や北アルプス常念岳のハイマツ群落においても確認されている（高橋・佐藤, 1996; 高橋・長谷川, 2003）。すなわち、リターの存在は冬季の降温期間には地温低下の抑制に、春季以降の升温期間には地温上昇の抑制にそれぞれ影響を与える。焼失ハイマツ群落では、葉が焼け落ち、新たなリターの供給が起らないため、林床を覆うリター層の層厚は年々薄くなった。リター層の層厚の減少は、夏季における 1 cm 深地温の升温や凍結進行期・融解期における土層の凍結・融解に大きく影響していると考えられる。

地温の日較差の増大は、凍結・融解サイクルの回数や深度を増す方向に今後も働く可能性が高く、消雪後の季節凍土の急激な融解は、ジェリフラクションによる表土の流出にも繋がりがかねない。

図 12 AMeDAS 白馬における 2009-2016 年の日降水量。

Fig. 12 Daily precipitation at AMeDAS Hakuba from 2009 to 2016.

ハイマツ群落はもともと植物の種数が少なく、ハイマツが群落の被度のほとんどを占めるため、他の植物が直ちにハイマツにとって代われる状況にはなかった（Takahashi, 2012）。しかし、一部の焼失ハイマツ群落ではハイマツは回復しないものの、その周囲に分布しているタカネコウボウやミヤマノガリヤスなどのイネ科草本が焼失したハイマツ群落に進入しつつあり、次第に被度を増している（Takahashi, 2012）。このように草本がハイマツに代わって焼失ハイマツ群落に優占するようになれば、地表は地表流から保護され、また土層の凍結・融解の頻度も減少すると考えられる。この場合は焼失ハイマツ群落における土砂流出の可能性は低下すると考えられる。

VI. ま と め

白馬岳の高山帯で発生した山火事によって、ハイマツ群落が焼失した。ハイマツ群落が焼失したにも関わらず、ノッチや植被階状土、ソリフラクション・ロウブなどの微地形の外形は、崩れることなく山火事後の 7 年間維持されたことが明らかとなった。しかし、焼失したハイマツ群落では、山火事の 3 年後に林床の状態に変化が認められるようになった。非焼失ハイマツ群落では、林床を厚さ 3 ~ 4 cm のリター層が覆っていた。それに対し、焼失ハイマツ群落では、2012 年秋季の時点でリター層の層厚は平均 3.3 cm であったが、2013 年夏季には日雨量が 120 mm を超す降水が

2 回生じたこともあってリター層の平均層厚は 1 cm 程度になった。焼失ハイマツ群落の林床の一部では、リター層はほぼ失われ、地表がみえるようになった。また、リターの流出にひきつづき、土壌侵食や砂礫の移動が発生している場所も認められた。

林冠を失った焼失ハイマツ群落では、とくに 1 cm 深において、日中の地温の上昇と夜間の地温の下降が顕著になった。また、土層の日周期の凍結・融解は山火事発生当初の 2009 年や 2010 年には生じていなかったものの、2011 年の凍結進行期には 13 回の日周期の凍結・融解が発生した。これはハイマツ群落の林冠を失ったことを原因とし、地表での下向き短波の増加と下向き長波の減少により地温の日較差が大きくなったために発生するようになったと考えられる。焼失ハイマツ群落の 1 cm 深における地温の日較差は、上述のリター層の減少に伴って拡大していると考えられる。山火事後の当初に比べ、土層の凍結・融解が生じる期間は長く、土層の日周期の凍結・融解の回数は多くなった。加えて、40 cm 深での凍結期間の拡大や地温がより低温になっていることも明らかとなり、土層の凍結・融解の強度が強化される方向にあると考えられる。これが続くと、土壌侵食や斜面構成物質である砂礫の運搬が開始される可能性がある。一方では、焼失ハイマツ群落に周囲のイネ科草本が進入しつつあり、これらが定着し被度を高めれば、土壌侵食や斜面物質移動という観点での山火事の影響は次第になくなっていくと考えられる。

謝 辞

本研究は、山火事による自然環境への影響調査を行うために信州大学山岳科学総合研究所（当時）が林野庁中部森林局中信森林管理署より委託を受けた「白馬高山植物等保護管理調査事業」の一部として進められた。調査研究を実施するにあたり中信森林管理署のみなさまにたいへんお世話になった。筑波大学大学院生命環境科学研究科の池田 敦博士（当時、信州大学山岳科学総合研究所）には、山火事跡地における地温観測の端緒を開いていただいた。また、匿名査読者と編集

委員会の有益なコメントによって本稿は大幅に改善された。ここに記して以上の皆様に心より御礼申し上げる。

文 献

- 池田 敦・鈴木啓助（2011）：白馬岳山火事跡地における地温条件の変化。林野庁中部森林管理局中信森林管理署・信州大学山岳科学総合研究所編：白馬高山植物等保護管理調査事業報告書（山火事跡地のモニタリング調査）。51-60。[Ikeda, A. and Suzuki, K. (2011): Variation of thermal conditions of the top soil on post-fired alpine slopes on Mt. Shirouma. in *Reports of Protection and Management of Alpine Plants on Mt. Shirouma—Monitoring Survey of Post-fired Slope—* (Shiromadake Kozan Shokubutsu To Hogo Kanri Chosa Jigyo Hokokusho Yamakaji Atochi No Monitaringu Chosa) edited by Chushin Forestry Office, Chubu Regional Forest Office, Forestry Agency, and Institute of Mountain Science, Shinshu University, 51-60. (in Japanese)*]
- 刈谷愛彦（2011）：白馬岳山火事跡地における地形の現況。林野庁中部森林管理局中信森林管理署・信州大学山岳科学総合研究所編：白馬高山植物等保護管理調査事業報告書（山火事跡地のモニタリング調査）。39-50。[Kariya, Y. (2011): Geo-environmental condition on post-fired alpine slopes on Mt. Shirouma. in *Reports of Protection and Management of Alpine Plants on Mt. Shirouma—Monitoring Survey of Post-fired Slope—* (Shiromadake Kozan Shokubutsu To Hogo Kanri Chosa Jigyo Hokokusho Yamakaji Atochi No Monitaringu Chosa) edited by Chushin Forestry Office, Chubu Regional Forest Office, Forestry Agency, and Institute of Mountain Science, Shinshu University, 39-50. (in Japanese)*]
- 刈谷愛彦・原山 智・池田 敦・鈴木啓助（2009）：白馬岳山火事による地形および地質への影響。林野庁中部森林管理局中信森林管理署・信州大学山岳科学総合研究所編：白馬高山植物等保護管理調査事業報告書。37-54。[Kariya, Y., Harayama, S., Ikeda, A. and Suzuki, K. (2009): Effects of forest fire on geomorphology and geology on Mt. Shirouma. in *Reports of Protection and Management of Alpine Plants on Mt. Shirouma* (Shiromadake Kozan Shokubutsu To Hogo Kanri Chosa Jigyo Hokokusho) edited by Chushin Forestry Office, Chubu Regional Forest Office, Forestry Agency, and Institute of Mountain Science, Shinshu University, 37-54. (in Japanese)*]
- 小嶋 尚・杉原重夫・清水文健・宇都宮陽二郎・岩田修二・岡沢修一（1974）：白馬岳の地形学的研究。駿台史学, **35**, 1-86。[Koaze, T., Sugihara, S., Shimizu, F., Utsunomiya, F., Iwata, S. and Okazawa, S. (1974): Geomorphological studies of Mt. Shirouma and surroundings, Central Japan. *Sundai Historical Review* (Journal of the Historical Association of Meiji University), **35**, 1-86. (in Japanese with English abstract)]
- 松岡憲知（1991）：赤石山脈の高山環境における地温の

- 通年観測. 地形, **12**, 41-49. [Matsuoka, N. (1991): A whole year ground temperature measurement in an alpine environment of Akaishi Range, Japan. *Transactions Japanese Geomorphological Union*, **12**, 41-49. (in Japanese with English abstract)]
- 中川正之・川田邦夫・岡部俊夫・清水 弘・秋田谷英次 (1976): 立山の積雪の性質の研究. 雪氷, **38**, 157-164. [Nakagawa, M., Kawada, K., Okabe, T., Shimizu, H. and Akitaya, H. (1976): Physical properties of the snow cover on Mt. Tateyama in central Honshu, Japan. *Seppyo*, **38**, 157-164. (in Japanese with English abstract)]
- 中野 俊・竹内 誠・吉川敏之・長森英明・菊谷愛彦・奥村晃史・田口雄作 (2002): 白馬岳地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). 産総研地質調査総合センター, 105p. [Nakano, S., Takeuchi, M., Yoshikawa, T., Nagamori, H., Kariya, Y., Okumura, K. and Taguchi, Y. (2002): *Geology of the Shirouma-dake District. Quadrangle Series, 1:50,000*. Geological Survey of Japan, AIST, 105p. (in Japanese with English abstract)]
- 沖津 進・伊藤浩司 (1983): ハイマツ群落の動生態学的研究. 北海道大学大学院環境科学研究科紀要, **6**, 151-184. [Okitsu, S. and Ito, K. (1983): Dynamic ecology of the *Pinus pumila* community of Mts. Taishetsu, Hokkaido, Japan. *Journal of the Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University*, **6**, 151-184. (in Japanese with English abstract)]
- 佐々木明彦・菊谷愛彦・池田 敦・鈴木啓助 (2013): 白馬岳高山帯の山火事跡地における地表環境のモニタリング. 山岳文化学会論集, **10**, 57-64. [Sasaki, A., Kariya, Y., Ikeda, A. and Suzuki, K. (2013): Geo-environmental monitoring on post-fire alpine slopes of Mount Shirouma-dake, northern Japanese Alps. *Journal of Mountain Culture Research*, **10**, 57-64. (in Japanese)]
- 澤口晋一 (1987): 北上山地山稜部の荒廃裸地における凍結・融解による斜面物質移動. 地理学評論, **60A**, 795-813. [Sawaguchi, S. (1987): Slow mass-movement processes caused by freezing and thawing on a bare ground as a result of human impact at the Kitakami Mountains in northeast Japan. *Geographical Review of Japan*, **60A**, 795-813. (in Japanese with English abstract)]
- 下川和夫 (1989): 多摩川上流山地の積雪と融雪に関する研究. 札幌大学女子短期大学部, 86p. [Shimokawa, K. (1989): *Study on Snow Cover and Snow Melt in the Tama Mountains (Tamagawa Joryu Sanchi No Sekisetsu To Yusetsu Ni Kansuru Kenkyu)*. Sapporo University Women's Junior College, 86p. (in Japanese)*]
- 高橋啓二 (1986): 森林と火災のかかわり. 遺伝, **40**, 20-26. [Takahashi, K. (1986): Relationship between forests and fire. *Iden*, **40**, 22-26. (in Japanese)]
- 高橋耕一 (2009): 白馬岳の山火事跡地における植生回復. 林野庁中部森林管理局中信森林管理署・信州大学山岳科学総合研究所編: 白馬高山植物等保護管理調査事業報告書. 7-35. [Takahashi, K. (2009): Restorations of alpine vegetation in post-fired slopes on Mt. Shirouma. in *Reports of Protection and Management of Alpine Plants on Mt. Shirouma (Shirouma Kozan Shokubatsu To Hogo Kanri Chosa Jigyo Hokokusho)* edited by Chushin Forestry Office, Chubu Regional Forest Office, Forestry Agency, and Institute of Mountain Science, Shinshu University, 7-35. (in Japanese)*]
- Takahashi, K. (2012): Damage of alpine vegetation by the 2009 fire on Mt. Shirouma, central Japan: Comparison between herbaceous vegetation and *Pinus pumila* scrub. *Landscape Ecological Engineering*, **8**, 123-128.
- 高橋伸幸 (1995): 大雪山中央部高山帯における秋季の地温分布とその支配要因. 地理学評論, **68A**, 27-42. [Takahashi, N. (1995): Distribution of the autumn ground temperature and its controlling factors in the alpine zone of the central Daisetsuzan Mountains. *Geographical Review of Japan*, **68A**, 27-42. (in Japanese with English abstract)]
- 高橋伸幸・長谷川裕彦 (2003): 気温観測結果から推定される北アルプス南部常念乗越の森林限界高度と周氷河環境. 地理学評論, **76**, 161-171. [Takahashi, N. and Hasegawa, H. (2003): Forest line altitude and periglacial environment on the Jounen-nokkoshi pass, the northern Japanese Alps, estimated from air temperature observation data. *Geographical Review of Japan*, **76**, 161-171. (in Japanese with English abstract)]
- 高橋伸幸・佐藤 謙 (1996): 大雪山のハイマツ群落内における夏季の地温環境. 地理学評論, **69A**, 693-705. [Takahashi, N. and Sato, K. (1996): Summer ground temperature conditions in the *Pinus pumila* community in the alpine zone of the Daisetsuzan mountains. *Geographical Review of Japan*, **69A**, 693-705. (in Japanese with English abstract)]
- 土田勝義 (1999): 北アルプス白馬岳における高山植生の復元. 日本生態学会誌, **49**, 321-328. [Tsuchida, K. (1999): Restoration of alpine vegetation in Mt. Shirouma, the Northern Japanese Alps. *Japanese Journal of Ecology*, **49**, 321-328. (in Japanese)]
- 津田 智 (1995): 火の生態学: 植物群落の再生を中心として. 日本生態学会誌, **45**, 145-159. [Tsuda, S. (1995): Fire ecology review: Process of vegetation recovery after fire. *Japanese Journal of Ecology*, **45**, 145-159. (in Japanese with English abstract)]
- Ueno, K., Kurobe, K., Imaizumi, F. and Nishii, R. (2015): Effects of deforestation and weather on diurnal frost heave processes on the steep mountain slopes in south central Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, **40**, 2013-2025.

* Title etc. translated by A.S.