

【論文】

多雪山地立山松尾峠のオオシラビソ林における積雪下の地表面温度環境

杉田久志¹・中島春樹¹・石田 仁²

Ground surface temperature environment under snow cover in the subalpine coniferous forest at Matsuo pass, Mt. Tateyama, a heavy snowy mountain in central Japan

Hisashi SUGITA¹, Haruki NAKAJIMA¹, Megumi ISHIDA²

多雪山地の立山松尾峠の亜高山帯針葉樹林において地表面およびマウンド上の温度の観測を16冬季にわたり1時間間隔で行い、積雪下における温度環境の特性を明らかにした。温度の状態をA(気温随伴変動大)、B(氷点下変動小)、C(氷点以上変動小)、D(氷点一定)の4タイプに区分した。積雪日数(B~D出現時間合計)は最短が185日、最長が251日、平均は224日であった。各タイプの平均出現時間はBが5日、Cが12日、Dが208日で、BとCは積雪初期にわずかに出現しただけで、Dが積雪期間のほとんどを占めた。根雪前に氷点下になることが少なく、根雪時の温度が高い場合にBの出現が少なく、Cの出現が多い傾向がみられ、地温が低下する前に根雪になったことがCの出現とBの少なさをもたらしたと考えられる。温度条件Bでは雪腐れ病の蔓延を回避できるが、CおよびDでは回避できないと考えられ、Bがほとんど出現しないことは非常に長い積雪期間を通して針葉樹の実生が菌害のリスクにさらされることを意味している。このことは、立山の亜高山帯林においてオオシラビソが圧倒的に優勢な樹種構成が成立したことの一要因である可能性がある。

キーワード：菌害・凍結・根雪・マウンド・雪腐れ病

1. はじめに

積雪環境は植生の成立を規定する重要な要因である(石塚1978;梶本ら編2002)。日本列島は、日本海に流入する対馬暖流がアジア大陸から吹く冬季季節風に水蒸気を供給するため、世界的にみても有数の多雪地域である。とくに日本海側の山地では水分を含んだ風がぶつかって上昇し、大量の降雪がもたらされる。一方、太平洋側の山では水分を落として比較的乾いた風が吹き抜けるため降雪は少なく、日本海側から太平洋側へ移るにつれて積雪量が減少する傾向がみられる。この積雪環境傾度に対応した植生のちがいが(植生背腹性)は日本の自然景観を語るうえで重要な特徴である。植生背腹性がとくに顕著なのは亜高山帯であり、針葉樹林の構成

種のうちシラビソ、コメツガ、トウヒは多雪山地より少雪山地の方が優勢であるが、オオシラビソは対照的に積雪の増加につれて優占度を増し、多雪山地ではオオシラビソのみが優占する(今西1937;杉田2002)。

積雪の影響は保護効果、機械的雪害、生理的雪害など多様である(酒井1977)が、多雪地における稚樹定着や森林更新を阻害するものとしては生理的雪害が重要であり、とくに積雪下で蔓延する菌害が深く関与していると考えられている。積雪下で低温、多湿、暗黒の環境が半年近くも続くなかで、越冬中の植物、とくに実生、稚樹、幼齢木は生理的に衰弱し、病原菌に感染する危険性が高くなる。通常の病原菌は低温条件で活動が不活発になるが、積雪下でも活性が高く植物を発病・死

¹ 富山県農林水産総合技術センター森林研究所 〒930-1362 富山県中新川郡立山町吉峰3 (Forest Research Institute, Toyama Prefectural Agricultural, Forestry & Fisheries Research Center, 3, Yoshimine, Tateyama Town, Toyama 930-1362, Japan)

² 岐阜大学応用生物科学部フィールド科学教育研究センター 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1 (Gifu Field Science Center, Faculty of Applied Biological Sciences, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu, Gifu 501-1193, Japan)

亡させるものは雪腐れ病菌とよばれる。雪腐れ病菌が天然林における稚樹定着の成否を左右し(程 1989; 程・五十嵐 1990), 樹種の耐病性や菌害回避様式のちがいが天然分布に関与していることが指摘されている(佐保・高橋 1974)。積雪環境傾度に対応した亜高山帯植生背腹性の成立についても, 少雪山地ではコメツガ稚樹が地表で多数みられる(Sugita and Nagaïke 2005)のに対し, 中程度～多雪山地では根張り, 倒木, マウンド上に限られ, 地表ではほとんど定着していないこと(Sugita and Tani 2001)から, 多雪山地におけるコメツガの劣勢が決定的になるステージは発芽後数年以内の更新初期段階である可能性が指摘され, 雪腐れ病菌による更新阻害の関与が大きいものと考えられる(杉田 2002)。雪腐れ病菌の活性は温度に規定されており, 積雪下の 0°C 一定の場合には雪腐れ病が蔓延する(程 1989)が, 土壌凍結したところでは雪腐れ病が少ないことが指摘されている(遠藤・林 1973)。そのため, 種子・実生の生活の場である地表面の温度条件は菌害の発生や実生定着の成否を左右する重要な環境要因であり, とくに凍結しているか否かは重要である。

積雪は高い断熱効果をもち, 地表面温度に大きな影響を及ぼす。積雪に覆われた際には変動の大きい外気の影響が緩和されて地表面温度の変動が小さくなる。積雪が少ない間は気温が氷点下で推移すると地表面温度も氷点下の値を示すが, 積雪深がある程度増えると地表面温度は 0°C に近づき(小島 1972), さらに積雪温度が融解点に達すると, 地表面温度は積雪の融解潜熱のため 0°C 一定に保たれる。地表面温度の観測による自然環境の検討は, 永久凍土の成立要因という観点から高山帯でよく行われている(東野ら 1998; 福井 2002; 石川ら 2002; 青山 2011)が, 森林において樹木の生育環境という観点から議論した事例は少ない。石田(2006)は富山県内のさまざまな標高・植生タイプにおいて地表面温度を観測し, 森林植生を規定する要因として積雪期間を解析している。しかしながら, 積雪期間における地表面の温度条件そのものを解析し, 雪腐れ病の発現環境という視点から検討したものはなく, 菌害を回避できる温度環境がどの程度出現するのかが明らかにされていない。

本研究は, 世界的に見ても最も多雪な地域の

ひとつである立山の亜高山帯針葉樹林における 16 冬季にわたる地表面温度の長期観測結果に基づき, 積雪日数の年変動, 積雪下における温度環境特性を明らかにし, 亜高山帯性針葉樹の菌害回避の観点から多雪山地における積雪環境の特質について議論する。

2. 調査地および方法

2.1 調査地

調査地は富山県立山町, 立山の松尾峠である。一帯は立山火山(弥陀ヶ原火山)が噴出した堆積物とそれが形成した地形が広がる(原山ら 2000)。約 10 万年前に称名滝火砕流が噴出して弥陀ヶ原台地を形成し, その後(9~4 万年前の間)に松尾峠溶岩が流れて松尾峠付近の台地をつくり, さらにその後には火山体が崩壊・侵食されて立山カルデラが形成された。調査地はカルデラ壁縁部の松尾峠展望台から 200m 北側の松尾峠溶岩の台地上に位置し, 標高は 1980m, 傾斜 15°程度の西向き緩斜面である。現地での気象観測結果によると, 年平均気温 3.0°C, 最寒月(1 月)平均気温 -10.1°C, 最暖月(8 月)平均気温 15.8°C, 平均年最深積雪深 457cm(2004~2019), 最大値 580cm(2006 年), 最小値 300cm(2016 年)で(中島 2020), 世界有数の多雪山地といえる。

調査は 1998 年に設置された 50m×100m の固定プロット(松尾峠調査区)のなかで行った。プロットの中上部はオオシラビソを主としてダケカンバが混交する亜高山帯針葉樹林となっている。低木層にはミネカエデ, ナナカマド, ハウチワカエデなどがあり, 高さ 2m 程度のチシマザサが密生する。林冠の高さは 10~12m, オオシラビソ林冠木の直径のモードは 30~35cm, 最大直径はオオシラビソが 59cm, ダケカンバが 64cm である(小島編 2002; 石田・中島 2008)。

2.2 調査方法

2003 年秋に, 松尾峠調査区上部のオオシラビソ林内で樹木の根元周り, 岩や倒木, マウンドの周辺, 林冠ギャップを避けて, 平坦な林床の地表面に測定地点をランダムに 4 か所(a~d 地点)設置した。当初の測定地点の間隔が 3.3~6.2m と近かったので, 2005/06 からは c, d 地点を廃止して新たに e, f 地点を設置して, 間隔は 6.2~15.0m となった。さらに, 2005/06 からは地表からの高さ 0.7m のマウンド上 1 か所(地表面の測定地点までの距離の範囲は 10.0~27.9m, 最寄り a 地点)でも測定を行った。気温を観測するために, オオシラビソ(胸高直径 45cm)

の高さ 2m で分岐した枝の基部でも測定を行った（直射日光を避ける処置や通風をせず、厳冬季に積雪に埋まるので、正確な気温は測定できていないが、本報告では気温とよぶ）。気温測定地点から地表面、マウンド上の測定地点までの距離は 2.8～16.4m、最寄りには a 地点である。温度の測定・記録は、株式会社ティアンドディ製の防水型温度データロガー TR-51A あるいは TR-51i（計測範囲 -40～80°C、測定精度±0.5°C、分解能 0.1°C）を地表面、マウンド上に置き（埋設しない）、1 時間インターバルで行った。一部の測定はログ電子社製 B-5 あるいはオンセット社製ティドビッド v2 を用いた。原則として計器の設置は 9 月末までに、回収は 6 月下旬～7 月中旬頃に行った。解析には 2003/04～2018/19 の 16 冬季の 10 月 11 日から 7 月 10 日までの観測データを用いた。なお、2004/05 は計器の設置が遅くなって積雪初日、根雪初日を観測できず、またトラブルにより多くの測点で欠測となったため、根雪初日は別途観測していた地温のデータから推定し、積雪日数や温度条件の解析から除外した。また 2005/06、2012/13、2014/15、2018/19 でも機器のトラブルによる欠測のため地表面の測点数が 3 に減り、2006/07 にはマウンド上の測定が欠測となった。

2.3 解析方法

(1) 温度データの補正

消雪前に地表面温度が一定になっている状態は氷（固相）と水（液相）の相平衡にあり、温度の真の値は正確に 0°C となる。しかし、消雪前の一定の温度の測定値は、必ずしも 0°C ではなく、-0.2～0.2°C の範囲内で観測ごとに異なっていた。0°C からズレた観測データについては、その差分を系統誤差とみなし、測定値を補正した。

(2) 地表面・マウンド上の温度条件の類型化

温度の値と変動に基づき、地表面やマウンド上の温度の状態を以下の 4 タイプに類型化した。

A : 気温随伴変動大

激しく変動する気温に随伴するように日周期をもって変化する。日中の高温時と夜間の低温時には両者の温度の値に差がみられるが、増減の傾向は同調しており、経時変化のグラフ上ではかなりの部分が重なって見える。このタイプは積雪がない状態を示していると推察される。

B : 氷点下変動小

地表面温度が気温低下に伴って氷点下に低下

した後に気温とは大きく異なる動きをとるようになる。同時に変動が小さくなり、ゆるやかに 0°C に近づいていく。積雪下の状態を示すと推察される。

C : 氷点以上変動小

気温とは異なる動きをとって温度の変動が非常に小さくなり、積雪下となったと推察されるが、氷点下に下がることはなくプラスの値を示し続ける。

D : 氷点一定

温度がほぼ 0°C でまったく値が変わらない状態（ゼロ・カーテン）が長く続く。

1 時間インターバルの測定ごとに、この 4 つの温度条件タイプのいずれに相当するかを判定した。まず、その前後における気温との随伴関係や変動の程度を勘案してタイプ A とそれ以外を判別した。タイプ B～D については、補正後にも±0.5°C 以内の誤差をもっていることを想定し、-0.5～0.5°C の範囲で同じ値が連続している場合（24 時間以上を目安）を D と判定し、その一定値より低い温度で緩やかに推移するものを B、高い温度で緩やかに推移するものを C と判定した。同じ値が連続していても、-0.6°C 以下であれば B、0.6°C 以上であれば C と判定した。

(3) 各タイプの出現時間、積雪日数等の算定

A が無積雪、B～D が積雪下であるとみなし、B～D のいずれかが出現している期間を積雪期間（途中で積雪が消失した期間を含まない）、初めて出現した日を積雪初日、A をはさんで区切られたいくつかの積雪期間のうち最も長く連続しているものを根雪期間、それが始まった時/日を根雪時/根雪初日、最終的に C、D のどちらかから A に移行した時/日を消雪時/消雪日とよぶ。B～D に判定された測定の頻度をそれぞれの出現時間として集計し、24 で割って日単位で求めた。積雪日数は B、C、D の出現時間の合計、根雪日数は根雪時から消雪時までの期間の長さとして求めた。

地表面の測定地点（a、b、e、f）による出現時間のちがいを検討するため、4 地点で欠測が生じなかった 10 冬季のデータを用い、Friedman 検定を行った。地点間の多重比較は、Wilcoxon の符号付順位和検定をすべての測点の組み合わせについて行い、p 値の補正は Holm 法を用いた。

(4) 各タイプの出現時間と諸要因との関係

調査林分において観測された年最深積雪深のデータ（中島 2020）を用いて積雪日数との関係を検討した。この観測では、立枯木の上部に滑車を固定してワイヤーを地表まで垂らし、径 2.5mm のアルミ線を高さ 20cm 間隔でワイヤーの両側に長さ

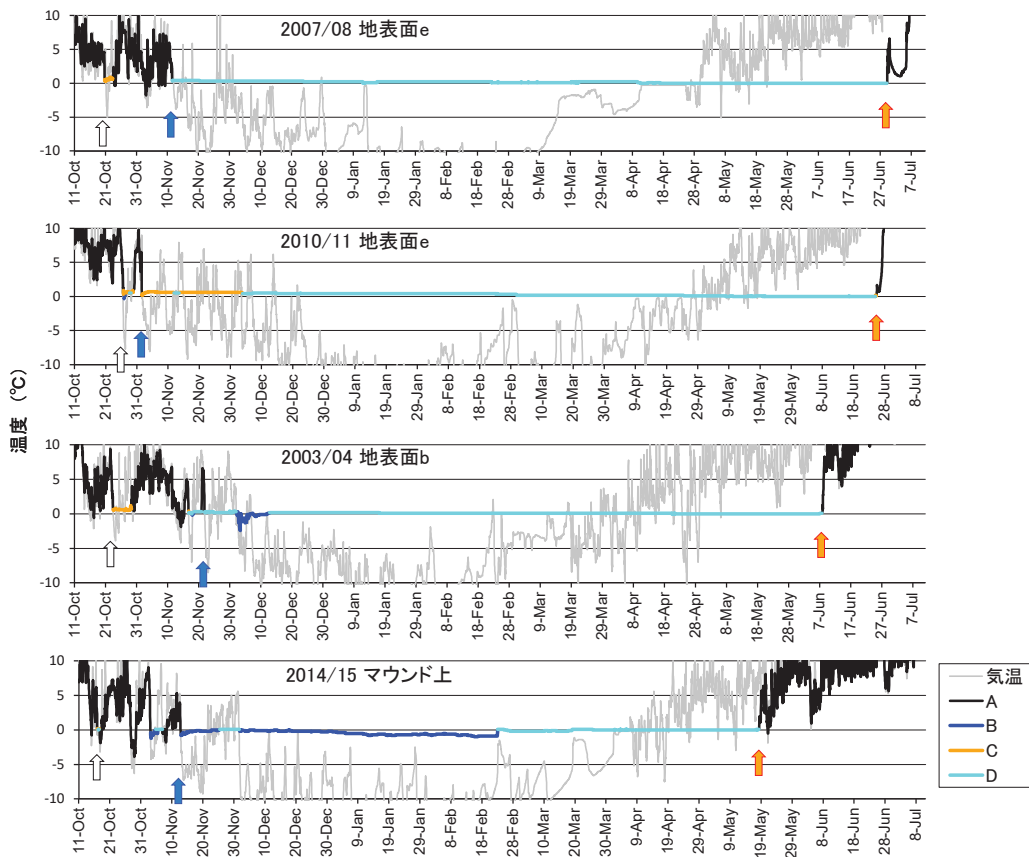


図-1 地表面, マウンド上温度の経時変化の事例
 白矢印: 初積雪, 青矢印: 根雪時, 赤矢印: 消雪時 温度は補正後の値

10cm ずつ水平に伸びるように設置し, 積雪の沈降圧によりアルミ線が下向きに曲がった最大の高さを最深積雪深とした。

B および C の出現時間に影響を及ぼす要因として, 年最深積雪深, 積雪日数, 根雪初日の日付, 根雪時の温度, 根雪前の寒さを検討した。根雪時の温度の指標として, 根雪時直前 24 回の温度測定値の平均値を求め, 気温 (測定年ごと) と地表面あるいはマウンド上の温度 (測定地点ごと, 測定年ごと) について算出した。根雪前の寒さの指標として積算寒度 (°C・日) を算出した。この指標は日平均温度が氷点下となった日の値を積算したものであり, 気温と地表面あるいはマウンド上の温度について 10 月 11 日以降根雪初日前日までの積算値を算出した。

以上の要因間の相関関係について, Spearman の順位相関係数 r_s により解析した。

3. 結 果

3.1 温度の経時変化パターン

温度が特徴的な経時変化パターンを示した地表面 3 例とマウンド上 1 例を図-1 に示す。2007/08

の地表面 e は, D が積雪期間のほとんどを占めた事例である。10 月 20 日の初積雪時には C がみられたが, 11 月 11 日に根雪になるとすぐに同じ温度が何日も続く状態になり, 値は最高で 0.4°C あったが, 測定精度が $\pm 0.5^\circ\text{C}$ であることを考慮し, 氷点で一定になっている D とみなした。この一定状態は 6 月 29 日の消雪まで一貫して続いた。2010/11 の地表面 e は, 積雪期間の前半に C が比較的長くみられた事例である。10 月 26 日の初回の積雪時と 11 月 1 日の根雪後は C が続き, 温度はほぼ一定であったが最高で 0.7°C あり, 0.5°C の誤差を考慮してもプラスの値であったと考えられる。その後ゆるやかに低下し, 12 月 3 日に D に移行し, 6 月 25 日の消雪まで続いた。2003/04 の地表面 b は根雪初期に B が出現した事例である。11 月 21 日の 3 回目の積雪が根雪となり, 最初 D が出現した後 12 月 2 日に B となり, 温度が -2.4°C まで低下したが, 12 月 12 日に D に移行し, 6 月 7 日の消雪まで続いた。一方, 2014/15 のマウンド上は B が非常に長く続いたのが特徴的である。11 月 12 日の根雪直後に B となり, 11 月下旬にひとまず D となったが, 12 月に入って再び B に戻り,

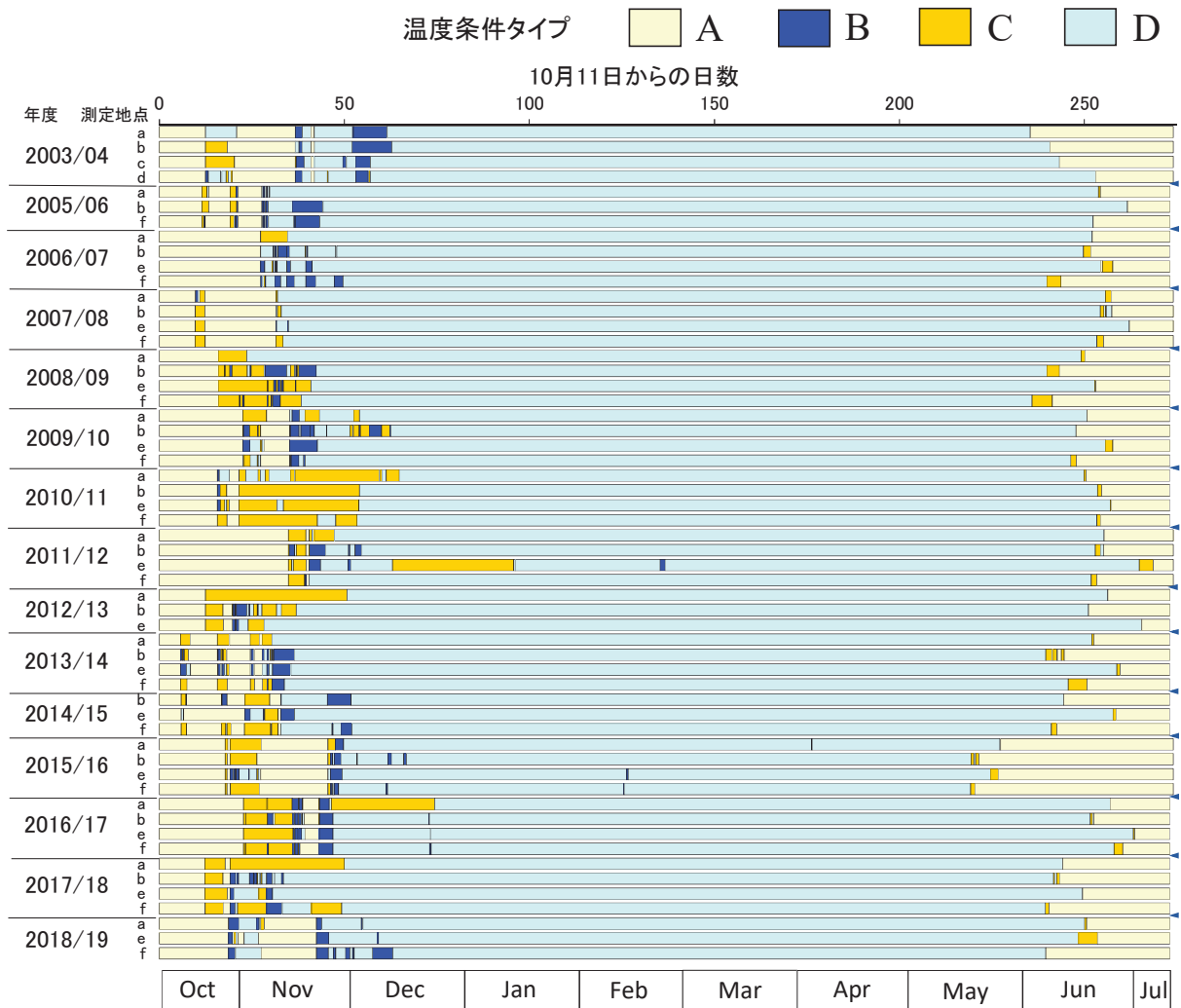


図-2a 地表面における各年度の温度条件タイプの経時変化
2004/05 は欠測

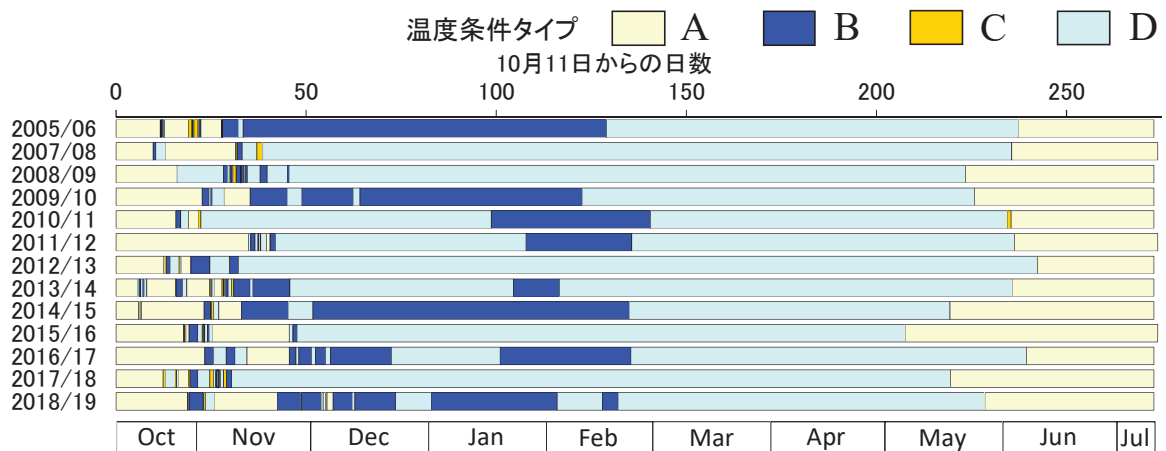


図-2b マウンド上における各年度の温度条件タイプの経時変化
2003/04 と 2004/05 は測定せず、2006/07 は欠測

表-1 各年度の積雪初日, 根雪初日, 消雪日, 根雪日数, 積雪日数

年度	積雪初日	n	地表面				マウンド上			
			根雪初日	消雪日	根雪日数	積雪日数	根雪初日	消雪日	根雪日数	積雪日数
2003/04	10/23	4	11/21	6/2-19	201 ± 7	213 ± 8				
2004/05	欠	1	11/12	6/18	218	欠				
2005/06	10/22	3	11/7	6/20-29	228 ± 5	232 ± 5	11/7	6/5	210	214
2006/07	11/7	4	11/7	6/11-22	223 ± 5	223 ± 5	欠	欠	欠	欠
2007/08	10/20	4	11/11	6/22-29	227 ± 3	229 ± 3	11/11	6/3	205	208
2008/09	10/27	4	10/27	6/9-21	231 ± 6	231 ± 6	10/27	5/22	208	208
2009/10	11/2	4	11/15	6/15-25	216 ± 5	221 ± 5	11/15	5/24	191	196
2010/11	10/26	4	11/1	6/18-25	233 ± 3	236 ± 3	11/1	6/3	214	217
2011/12	11/14	4	11/20	6/20-7/5	218 ± 7	222 ± 7	11/20	6/3	196	201
2012/13	10/23	3	10/23-30	6/19-7/3	240 ± 8	244 ± 7	10/23	6/10	223	228
2013/14	10/16	4	11/7	6/12-27	224 ± 6	231 ± 7	11/7	6/3	208	214
2014/15	10/16	3	11/12	6/10-26	216 ± 9	225 ± 9	11/12	5/18	186	191
2015/16	10/28	4	11/25	5/18-25	178 ± 4	187 ± 4	11/25	5/5	162	169
2016/17	11/2	4	11/23	6/20-7/1	216 ± 5	228 ± 7	11/25	6/7	194	205
2017/18	10/23	4	10/30	6/8-17	225 ± 4	231 ± 4	10/30	5/18	200	204
2018/19	10/29	3	11/22	6/7-21	205 ± 7	214 ± 7	12/7	5/27	171	194
年平均	10/27		11/11	6/17	218 ± 15	224 ± 13	11/11	5/28	197 ± 17	204 ± 15

各年度の値は測点間(n=3~4)の平均値±標準偏差, 年平均の値は全観測期間の平均値と標準偏差を示す

温度も徐々に低下して-1.0°Cに達したが, 2月23日に急激に0.1°Cまで上昇してDに移行した。

地表面における各年度, 各測定地点の温度条件タイプの経時変化パターンを図-2aに示す。Cが積雪初期の10月下旬から12月前半にかけて, Bが根雪直後にみられたが, それ以降はDが卓越した。2003/04, 2005/06~2007/08, 2018/19のように, 根雪後にCがほとんど出現せず, 根雪直後からDが卓越する冬季もみられた。

3.2 積雪日数

各年度の積雪初日, 根雪初日, 消雪日, 根雪日数, 積雪日数を表-1に示す。積雪初日は, 最も早いものが10月16日(2013, 2014), 最も遅いものは11月14日(2011), 観測期間を通しての平均は10月27日であった。根雪初日は, 最早が10月23日(2012, 地点a), 最遅が11月25日(2015), 平均は11月11日であった。消雪日は, 最早が5月18日(2016, 地点f), 最遅が7月5日(2012, 地点e), 平均が6月17日であった。根雪日数は最短が173日(2015/16, 地点f), 最長が246日(2012/13, 地点e), 平均は218日であった。積雪日数は最短が183日(2015/16, 地点f), 最長が251日(2012/13, 地点e), 平均は224日であった。積雪日数は測定地点により有意に異なり(表-2), 地点eが他の3点よりも6~9日長かった。

各年度の年最深積雪深と積雪日数(地点間の平均値)との関係を図-3に示す。年変動の大きい最深積雪深(変動係数0.158)に比べると積雪日数の変動は小さかった(変動係数0.054)。最深積雪深と積雪日数の間には比較的高い相関がみられたが,

表-2 各測定地点の積雪日数と各タイプ出現時間(日)

		測定地点				Friedman検定
		a	b	e	f	
積雪時間	平均	224.5 ^b	221.2 ^b	230.3 ^a	220.9 ^b	$p < 0.0001$
	標準偏差	12.7	14.2	14.7	14.7	
B出現時間	平均	1.0 ^a	6.2 ^a	4.4 ^a	3.2 ^a	$p = 0.009$
	標準偏差	1.7	4.0	3.1	3.0	
C出現時間	平均	17.5	10.6	13.1	13.5	$p = 0.056$
	標準偏差	13.5	9.5	14.4	9.4	
D出現時間	平均	206.0 ^a	204.4 ^a	212.7 ^a	204.1 ^a	$p = 0.033$
	標準偏差	17.1	15.0	18.2	16.0	

欠測のなかった10冬季のデータにより算出
同じ記号の付いたものは有意なちがいが無い ($p > 0.05$)
測定地点間の多重比較はWilcoxonの符号付順位検定(Holmの方法)による

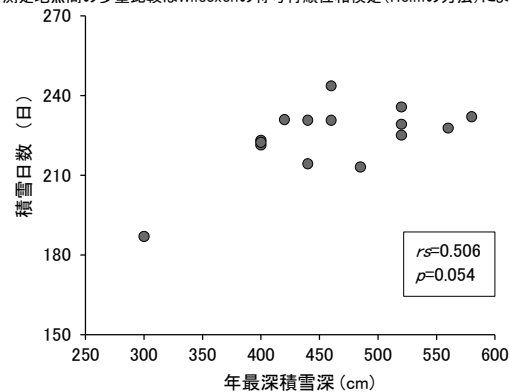


図-3 年最深積雪深と積雪日数との関係
積雪日数: 各年度の測定地点間の平均値, 2004/05は欠測

5%水準では有意でなく, また極端な少雪年を除外して400cm以上に限ると相関は低かった($r_s = 0.391, p = 0.167$)。

3.3 地表面における積雪下の温度環境

各年度の積雪期間におけるB~Dの温度条件タイプ別の出現時間の内訳(地点間の平均値)を図-4に示す。BとCは積雪期間のうちごくわずかにすぎず, Dがほとんどを占め, 観測期間を通した平均ではBが4.5日, Cが11.8日, Dが208.4日

であった。B と C の出現時間は年変動が大きく、変動係数はBが0.55, Cが0.75, Dが0.06であった。B と C の出現時間の間には有意な負の相関がみられた (図-5)。測定地点によるちがいのついては、B と D では全体で有意であると判定されたが、個々の地点間のちがいはどの組み合わせでも有意とは判定されなかった (表-2)。C では全体でも有意なちがいはなかった。

根雪時の気温は根雪初日の遅い冬季ほど低くなる傾向が不明瞭ながらみられ ($r_s=-0.449, p=0.093$)、気温の積算寒度は根雪初日の遅れにもなって低くなる傾向が顕著であった ($r_s=-0.802, p<0.0001$)。各地点における根雪時の地表面温度でも根雪初日が遅いほど低下する傾向が明瞭にみられ (図-6)、地表面温度の積算寒度も根雪初日が遅いほど有意に低下した ($r_s=-0.802, p<0.0001$)。ただし、地表面温度は10月下旬で4°C前後、11月中旬で3°C前後、下旬で2.5°C前後であり、最も低いものでも-0.1°Cで、氷点下に下がることはほとんどなかった (図-6)。

各年度のCの平均出現時間は、最深積雪深、根雪初日の日付、根雪時の気温、気温の積算寒度と有意な相関を示さなかったが、積雪日数とは有意な相関を示した ($r_s=0.575, p=0.027$)。各地点のC出現時間は、根雪初日の日付 ($r_s=-0.248, p=0.066$) や根雪時の地表面温度 ($r_s=0.243, p=0.072$, 図-7) と有意ではないもののある程度の相関を示した。各年度のBの平均出現時間は、最深積雪深、積雪日数、根雪初日の日付 ($r_s=0.452, p=0.091$)、根雪時の気温、気温の積算寒度のいずれとも有意な相関を示さなかった。各地点のB出現時間は、根雪初日の日付 ($r_s=0.315, p=0.018$) や地表面温度の積算寒度 ($r_s=-0.477, p<0.0001$, 図-8) と有意な相関を示した。

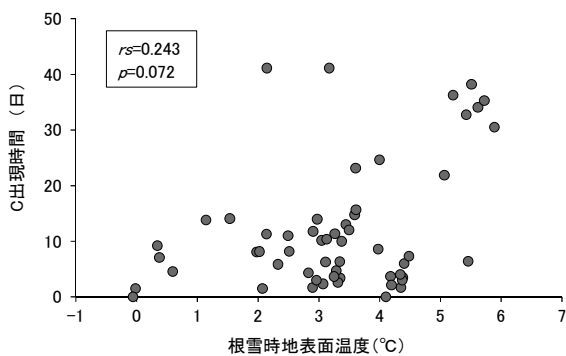


図-7 根雪時地表面温度とC出現時間との関係
根雪時地表面温度：各測定地点における根雪時の直前24時間の平均値

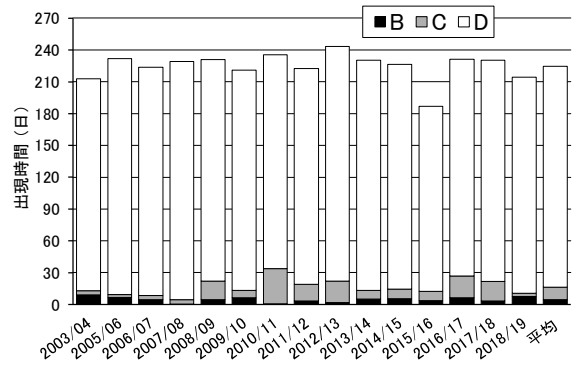


図-4 地表面における温度条件タイプの出現時間
出現時間：各年度の測定地点間の平均値、2004/05は欠測

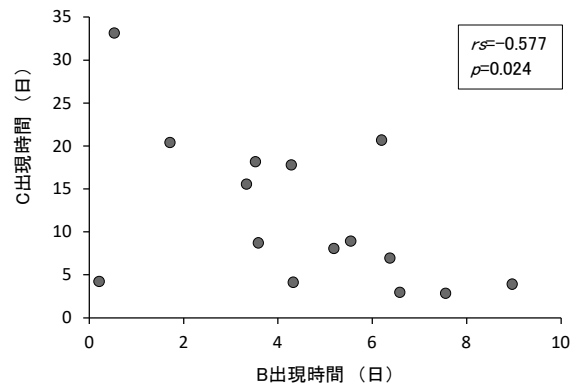


図-5 地表面におけるBとDの出現時間の関係
出現時間：各年度の測定地点間の平均値

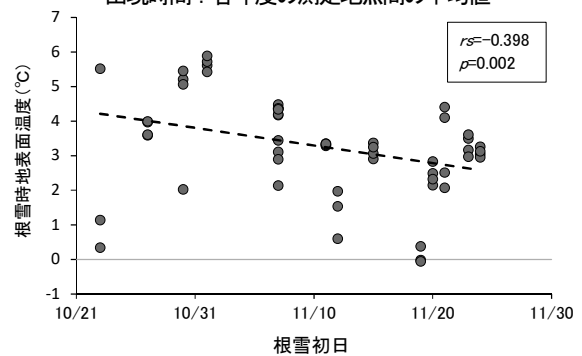


図-6 根雪初日の日付と根雪時地表面温度との関係
根雪時地表面温度：各測定地点における根雪時の直前24時間の平均値

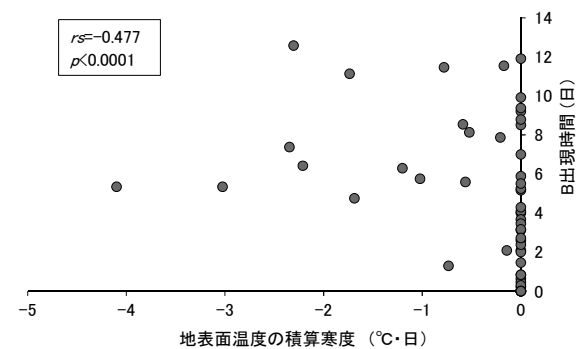


図-8 地表面温度の積算寒度とB出現時間との関係
積算寒度：各測定地点における日平均温度のうち0°C以下のものを10月11日から根雪初日前日まで積算

3.4 マウンド上における積雪下の温度環境

マウンド上における積雪初日は地表面と同じであり、根雪初日もほとんど同じであったが2018/19のように地表面が根雪になった後にマウンド上の雪がなくなって地表面より15日遅れた事例もあった(表-1)。消雪日は最早が5月5日(2016)、最遅が6月10日(2013)、平均5月28日で、地表面より2,3週間早かった。根雪日数、積雪日数の平均はそれぞれ197日,204日で、地表面より3週間程度短かった。温度条件タイプの経時変化を図-2bに、各タイプの出現時間を図-9に示す。Cがほとんど出現せず、代わりにBが地表面に比べて多く出現し、とくに積雪初期に出現してその後Dに移行するが、気温が最も低下する1~2月に再び多く出現する傾向がみられた。3月以降はDが卓越し、消雪まで続いた。観測期間を通した出現時間の平均値はBが42.0日,Cが0.6日,Dが160.8日であった。変動係数はBが0.88,Cは1.07,Dは0.25で、BとCの変動が大きかった。2005/06,2009/10,2014/15,2016/17,2018/19のようにBとDが同程度出現した冬季と、2007/08,2008/09,2012/13,2015/16,2017/18のようにほとんどDのみの冬季がみられた。マウンド上と地表面のB出現時間の間には有意な相関があり($r_s=0.747$, $p=0.005$),同調していた。しかしながらマウンド上のB出現時間は、最深積雪深,積雪日数,根雪初日の日付,根雪時気温,根雪時マウンド上温度,気温の積算寒度,マウンド上温度の積算温度のいずれとも有意な相関を示さなかった。

4. 考 察

4.1 多雪地における積雪下温度環境の特徴

松尾峠における積雪日数は全期間(15冬季)・全地点の平均で224日であり(表-1),7か月半に相当する。最も短いものでも6か月,最長のものでは8か月半に及ぶ。少雪山地の富士山の標高2220mで積雪日数が111~181日,平均136日であると報告されている(梨本ら2016)ののと比べるとかなり長い。森林が成立する場所としては最大級に積雪期間が長い事例であると考えられる。測定地点間で積雪日数に有意な相関がみとめられたこと(表-2)は、林分内で空間的なバラツキがあることを示している。積雪日数の年変動は年最深積雪深に比べると小さく、また最深積雪深との相関があまり明瞭ではなかったこと(図-3)は、積雪日数が積雪深のみで決まるのではなく、融雪時期の気温など他の要因も関係していることを示唆している。

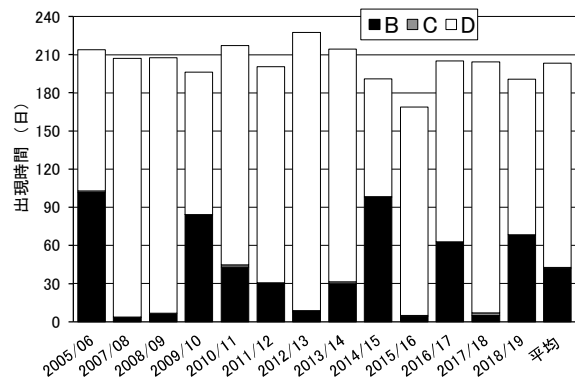


図-9 マウンド上における温度条件タイプの出現時間
出現時間:各年度の測定地点間の平均値。
2003/04と2004/05は測定せず,2006/07は欠測

積雪下の温度条件にはB~Dの3タイプがあり、Bは凍結状態、Cは非凍結状態と考えられる。そしてDは凍結/非凍結の平衡状態、すなわち氷(固相)と水(液相)が共存している相平衡の状態であり、熱の流れがあつたとしても融解潜熱に使われるため温度が0°C一定に保たれていると推察される(French 1976)。Bの出現は雪が強風で吹き払われてあまり積もらない高山の風衝地でみられ、冬季の後半あるいは消雪前の時期にDに移行することが報告されている(澤口1987;福井2002,2004;石川ら2002;石田2006;青山2011)。ここでは薄い積雪が十分な断熱効果を発揮せず、土壌凍結が進行すると考えられる。少雪山地の富士山の亜高山帯でも同様のパターンが報告されている(梨本ら2016)。ある程度の深さの積雪がみられるところでは積雪の断熱効果が発揮され、Bの出現は積雪初期の短い期間に限られて積雪期間の大部分はDに占められる。このような温度条件の経時変化は立山の上ノ小平,美松,鏡石で報告されている(石田2006)。Cが出現する事例は富山県内の標高1400m以下の比較的標高の低いところで報告されている(石田2006)。島田(2019)は立山室堂(2450m)でも積雪初期に地表面温度が0°Cより高い期間が存在することを報告し、地中から積雪への熱流により融雪が起り、積雪下面と地表面の間に隙間が生じていたことを明らかにしている。このことから、Cは積雪に覆われているが、温度計が積雪と接触していない状況を示していると推察される。

松尾峠における積雪下の地表面温度環境は、氷点下に下がるBが根雪初期にわずかにみられるのみで、Dが卓越していること、そして積雪下でプラスの温度を示すCがみられることが特徴的である(図-2a,4)。とくにCの出現は報告事例が少なく、注目される。Cは富山県内の比較的標高の低

い暖温帯と冷温帯の森林で出現することが報告されている(石田 2006)が、亜高山帯でもどれくらい広がりがあがるのか調べる必要がある。

BとCの出現時間には負の相関があり(図-5)、トレードオフ的な関係を示したのは、これらのタイプの出現が温度に対し逆の反応を示すためと考えられる。明瞭ではないものの、根雪時の地表面温度が高いほどCが長く続く傾向がみられたこと(図-7)は、根雪時の高い地温がプラスの値を持続させていると考えられる。その値は0~6°Cもあり(図-6)、断熱性の高い積雪が温度低下を抑制し、そして地表面と積雪底面との間の温度勾配により融雪が起こって隙間が生じ(島田 2019)、積雪と接触することなくプラスの温度が継続したものと考えられる。一方、B出現時間が積算寒度と負の相関を示したこと(図-8)から、その出現には根雪前に冷えることが必要であり、十分に冷える前に根雪になる場合が多かったためにBの出現が少なかったと考えられる。このような現象は、根雪初日が早く、地温が低下する前に深い積雪に覆われる多雪山地の特徴であると考えられる。この点についてはさまざまな積雪環境の山域で同様の測定を行い、比較・解析することが望まれる。

一方、マウンド上で氷点下に下がる状態(B)が長く出現し、多い年には積雪期間のほぼ半分を占めたこと(図-2b, 9)は、雪がほとんど積もらない風衝地における地表面温度の変化パターン(福井 2002, 2004; 石川ら 2002; 青山 2011)と類似している。積雪深が十分大きいにもかかわらず氷点下に低下したのは、マウンドを覆う積雪の温度が低かったからであろう。気温が氷点下の場合には地表面からの高さが増すにつれて積雪層内の温度が低くなる(小島 1972)ため、地表から0.7mも盛り上がっているマウンドは氷点下のかなり低い温度の積雪層に冷却されていたと考えられる。ただしBの出現時間は年変動が大きく、ほとんど出現しない年もあること(図-9)は注目される。この年変動は地表面におけるB出現時間の変動と同調していたが、地表面では相関がみられた積算寒度とは対応しておらず、それがどの要因に応じているのかは明らかにできなかった。このようなマウンド上の年変動が比較的積雪の少ない山域でもみられるのか、比較検討が俟たれる。

本研究で用いた温度計は精度が高くないので、温度条件タイプを厳密に判別するのは難しい。計器の測定精度を根拠にDの閾値を-0.5~0.5°Cに設定したが、実際の誤差がどの程度であったのか不明である。Dと判定したものにCやBが含まれ、

あるいはCと判定したものにDが含まれている可能性は否定できない。それを検討するため、高精度の測器も併用した観測を実施してキャリブレーションを行う必要がある。

4.2 亜高山帯性針葉樹の更新に及ぼす積雪下温度環境の影響

代表的な雪腐れ病菌である *Rhacodium therryanum* の温度活性については、10°Cで高い活性を示し、エゾマツ種子の感染率が30日で100%に達する。温度が低下するにつれて時間を要するようになるが、0°Cでも60日で到達する。ところが、-5°Cの場合はまったく感染しない(程 1989)。現実には積雪があるため地表面温度が-5°Cまで下がることはない(図-1)が、土壤凍結したところで *R. therryanum* によるトドマツ実生の雪腐れ病が少ないことが指摘されており(遠藤・林 1973)、氷点下になって凍結すると菌害防止効果があるようである。以上のことをふまえると、温度条件Bでは雪腐れ病の蔓延を回避できるが、CおよびDでは回避できないと考えられる。Dは雪腐れ病の進展が緩慢ではあるが、長い積雪期間は壊滅的な被害をもたらすのに十分であろう。Cは温度が若干高くまったく凍結していないため、Dよりも進展が速い可能性もある。

松尾峠の地表面温度環境において、積雪期間が7か月半にもわたることに加えて、雪腐れ病の蔓延を回避できるBがほとんどみられず、それを回避できないC、Dがほとんどの期間を占めていたことは、長い積雪期間を通して菌害のリスクにさらされる環境に置かれていることを意味している。その状況では菌害がきわめて重要な更新阻害要因となり、菌害抵抗性の低い樹種にとっては過酷な環境であると考えられる。積雪の断熱作用は、従来は低温から植物を保護するものとして植物にプラスに働く効果と認識されてきた(堀田 1974)が、一方で雪腐れ病害のリスクを高め、個体群存続に致命的な影響を及ぼすマイナス要因でもある。

樹種による雪腐れ病害抵抗性のちがいは多雪山地における樹種の優占度の優劣あるいは分布欠如をもたらしている可能性がある。亜高山帯性針葉樹の抵抗性については、北海道でトウヒ属のエゾマツ、アカエゾマツの抵抗性が低く、モミ属のトドマツの抵抗性が高いことが報告されている(程・五十嵐 1990)。本州産の樹種については明らかにされていないが、中程度の積雪条件の早池峰山の地表面においてコメツガの実生が3年以内

に消滅したのに対し、当年秋まで生き残ったオオシラビソの実生がそれ以降の死亡率低下、とくに最初に迎えた積雪期の死亡率がコメツガより低かったことにより比較的高い実生密度を維持したこと(杉田 2002)は、オオシラビソのほうがコメツガよりも雪腐れ病に抵抗性が高い可能性を示唆するものである。立山の亜高山帯林ではオオシラビソが圧倒的に優勢で純林を形成し、トウヒとコメツガはごくわずかにみられるのみで、シラビソは分布しない(宮脇編 1977; 小島編 2002; 石田・中島 2008)。このような樹種構成の成立には、地表面温度環境が雪腐れ病の蔓延を回避できないものであることが関係している可能性がある。その仮説を検証するには菌害を起こす菌の特定、その菌の活性の温度特性、その菌に対する各樹種の抵抗性などを明らかにする必要があり、その解明は今後の課題である。

一方、マウンド上において雪腐れ病の蔓延を回避できる温度環境(B)が地表面より多く出現したこと(図-9)は、マウンドが雪腐れ病を回避するのに有利な場所であることを示唆している。マウンドや倒木・根張りはどの針葉樹にとっても良好な実生定着場所であり、とくに中程度の積雪条件の山域におけるトウヒ属、ツガ属樹種の定着はその基質に依存していることが報告されている(Sugita and Tani 2001; Narukawa and Yamamoto 2002; Mori et al 2004; 杉田ら 2008)。この現象の原因として、雪腐れ病を回避できることがその一因である可能性がある。地表で雪腐れ病の蔓延を回避できない林分において、それを回避できるマウンドは貴重なセーフサイトであると考えられる。程(1989)は、これらの基質で菌害が少ないのは腐植質が少なく病原菌が少ないためと考えているが、積雪下でも氷点下に下がるという温度環境も菌害防止に貢献している可能性がある。ただし、マウンド上の温度条件タイプの出現割合は年変動が大きく、Bがほとんど出現しない年もみられたこと(図-9)は、マウンド上における雪腐れ病回避が十分なものではないことを示唆している。立山においてマウンド、倒木、根張りが存在するにもかかわらずコメツガの混生割合がきわめて低いのは、このことが関係しているかもしれない。

謝 辞

本研究を進めるにあたりご協力をいただいた富山森林管理署、富山県自然保護課、環境省中部山岳国立公園立山管理官事務所、富山県農林水産総合技術センター森林研究所の各位、積雪環境や観

測データの取扱いについてご教示くださった富山県立山カルデラ砂防博物館の福井幸太郎博士、飯田肇博士、富山大学の島田 互博士、草稿に対し有益なコメントをくださった森林研究・整備機構森林総合研究所東北支所の梶本卓也博士、関西支所の市原 優博士、富山県森林研究所の相浦英春上席専門員に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 青山雅史(2011) 気温・地温観測結果からみた飛騨山脈槍・穂高連峰における山岳永久凍土の分布状況. 地理学評論 84: 44-60
- 程東昇(1989) エゾマツの天然更新を阻害する暗色雪腐病菌による種子の地中腐敗病. 北海道大学農学部演習林研究報告 46:529-575
- 程東昇・五十嵐恒夫(1990) エゾマツ, アカエゾマツ, トドマツ及びカラマツ種子・稚苗の暗色雪腐病菌に対する感受性. 北海道大学農学部演習林研究報告 47:125-136
- 遠藤克昭・林 敬太(1973) トドマツ天然生稚苗の発消長を左右する要因(III) 土壌の凍結と暗色雪腐病菌 *Rhacodium therryanum* THUERM による種子の発芽阻害. 日本林學會誌 55: 277-280
- French HM(1976) The perigracial environment. 309pp Longman, London
- 福井幸太郎(2002) 立山, 内蔵助カールのプロテラスランパートでの永久凍土調査と地表面移動量の観測. 地学雑誌 111: 564-573
- 福井幸太郎(2004) 立山での山岳永久凍土の形成維持機構. 雪氷 66: 187-195
- 原山 智・高橋 浩・中野 俊・荻谷愛彦・駒澤正夫(2000) 立山地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1 地質図幅) 218pp. 地質調査所
- 東野外志男・小川弘司・野上達也(1998) 白山高山帯の室堂平における気温, 地温の通年変化. 雪氷 60: 157-165
- 堀田 満(1974) 植物の分布と分化. 三省堂, 東京
- 今西錦司(1937) 垂直分布帯の別ち方について. 山岳 31: 269-364
- 石田 仁(2006) 富山県の森林帯における年間積雪期間の標高傾度—林床地表面温度からの推定—. 雪氷 68: 489-496
- 石田 仁・中島春樹(2008) 林分構造解析. 小島 覚編「環境変動と立山の自然(II) —立山植生モニタリング第II期調査成果報告書—」, 126-153, 富山県
- 石川 守・岩崎正吾・澤柿教伸・平川一臣・渡辺悌二(2002) 北海道日高山脈パロシリ岳周辺にお

- ける山岳永久凍土環境 — 気温と地表面温度観測からの考察 —. 地学雑誌 111: 574-582
- 石塚和雄 (1978) 多雪山地亜高山帯の植生 (綜合抄録). 「吉岡邦二博士追悼植物生態論集」, 404-428, 仙台
- 梶本卓也・大丸裕武・杉田久志編 (2002) 雪山の生態学 東北の山と森から, 東海大学出版会, 東京
- 小島賢治 (1972) 札幌市の平地積雪の温度: 1963-64 ~ 1968-69 年の積雪断面測定資料より. 低温科学. 物理篇. 資料集 29: 15-20
- 小島 寛編 (2002) 環境変動と立山の自然 — 立山植生モニタリング調査成果報告書一, 148pp, 富山県
- 宮脇 昭編. 1977. 富山県の植生. 289pp, 富山県, 富山
- Mori A, Mizumachi E, Osono T, Doi Y (2004) Substrate-associated seedling recruitment and establishment of major conifer species in an old-growth subalpine forest in central Japan. *For Ecol Manage* 196:287-297
- 中島春樹 (2020) 気象観測. 石田 仁編「環境変動と立山の自然(IV) — 立山植生モニタリング第IV期調査成果報告書一」, 19-26, 富山県
- Narukawa Y, Yamamoto S (2002) Effects of dwarf bamboo (*Sasa* sp.) and forest floor microsites on conifer seedling recruitment in a subalpine forest, Japan. *For Ecol Manage* 163:61-70
- 梨本 真・小林卓也・石井 孝 (2016) 富士山亜高山帯における年最大積雪深の高度分布と積雪期間. 雪氷 78: 127-141
- 佐保春芳・高橋郁雄 (1974) エゾマツとトドマツの天然分布に関与する菌類. 林業技術 388:6-8
- 酒井 昭 (1977) 植物の積雪に対する適応. 低温科学. 生物篇 34: 47-76
- 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. 地理評 60: 795-813
- 島田 互 (2019) 立山室堂平での積雪下部の状態変化 — 温度測定とインターバル撮影 —. 雪氷 81: 151-161
- 杉田久志 (2002) 亜高山帯林の背腹性とその成立機構. 梶本卓也・大丸裕武・杉田久志編「雪山の生態学 東北の山と森から」, 74-88, 東海大学出版会, 東京
- 杉田久志・岩本宏二郎・森澤 猛・齋藤智之・壁谷大介・岡本 透・酒井寿夫 (2008) 御嶽山における密なチマキザサ林床をもつ亜高山帯針葉樹林の構造と動態. 森林総研研報 7: 81-89
- Sugita H, Nagaïke T (2005) Microsites for seedling establishment of subalpine conifers in a forest with moss-type undergrowth on Mt. Fuji, central Honshu, Japan. *Ecological Research* 20: 678-685
- Sugita H, Tani M (2001) Difference in microhabitat-related regeneration patterns between two subalpine conifers, *Tsuga diversifolia* and *Abies mariesii*, on Mt. Hayachine, northern Honshu, Japan. *Ecological Research* 16:423-433

Summary

The ground surface temperature under snow cover was examined in a subalpine coniferous forest on Mt. Tateyama in central Japan, which is interested by heavy snowy climate, in relation to the snow-blight infection of conifer seedlings. The temperature conditions were classified into four categories: type A (drastically fluctuating related to the air temperature), type B (relatively less fluctuating below the freezing point), type C (stable above the freezing point), type D (stable at the freezing point). The occurrence frequency of each of these conditions was hence determined. We found that the mean snow-covered period amounted to 224 days: type B (mean occurrence time = 5 days) and type C (mean occurrence time = 12 days) occurred infrequently only in the earlier part, and type D (mean occurrence time = 208 days) was predominant in the subsequent period. The occurrence time of type C was correlated to the temperature at the beginning of continuous snow cover, while that of type B was negatively correlated to the freezing degree-days. These results suggest that the occurrence of type C and the infrequent occurrence of type B is caused by the early coming of a continuous snow cover before the soil is sufficiently cooled down. Type B conditions might avoid the snow-blight infection of conifer seedlings, while types C and D conditions cannot: a predominance of the two latter types of thermal condition may cause infections and lead to an extreme dominance of *Abies mariesii* in the subalpine coniferous forest on Mt. Tateyama.

Key words: continuous snow cover, freezing, fungal infection, mound, snow-blight disease