

3種類のスギ林と裸地における融雪係数の比較

村上 茂樹^{1)†} 竹内 由香里²⁾ 庭野 昭二³⁾

1) 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所九州支所
(〒860-0862 熊本県熊本市中央区黒髪4-11-16)

2) 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所十日町試験地
(〒948-0013 新潟県十日町市川原町614-9)

3) 元国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所十日町試験地
(〒948-0013 新潟県十日町市川原町614-9)

†連絡先著者 (Corresponding Author) E-mail: smura@affrc.go.jp

開空率の異なる3種類のスギ林と裸地で積雪・融雪・気象観測を行った。開空率はスギ林A, B, Cの順に17.8%, 5.2%, 2.4%であった。2005年3月9日における各地点の積雪水量は開空率の減少とともに減少した。2005年4月12日の積雪水量は少ない方から順に、裸地, スギ林C, A, Bとなり、消雪日も早い方からこれと同順となった。21日間の日融雪量の観測から求めた融雪係数 k は大きい方からこれと同順となった。裸地の日平均気温を用いて算出した k は、裸地, スギ林A, B, Cの順に $4.09 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.34 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.13 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.38 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 、各地点の日平均気温を用いた場合はスギ林A, B, Cの順に $2.83 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.70 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.90 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ となった。どちらの k を用いても、裸地とスギ林B, Cの消雪日は1日以内の精度で再現できたが、スギ林Aだけは推定日が実測よりも4~5日遅くなった。スギ林BとCの k の大小関係は開空率のみでは説明できず、枝下高やリター量が関係している可能性がある。

キーワード: 融雪係数, 積雪水量, 開空率, 水源林

I. はじめに

水資源としての河川水の有用性を検討する場合、流量が時間的に安定していること、すなわち流況の安定性が判断指標のひとつとして用いられる。水資源としての積雪においては、融雪が緩やかに進行し、融雪水の河川への流出が長期間に及ぶことが流況の安定につながる。森林は、たとえ落葉した林分であっても日射を遮蔽して風速を減衰させることで融雪の進行を遅らせ、融雪期間を長くする効果があり(融雪遅延効果)、水資源としての積雪の有用性を高めることが知られている(Shimizu *et al.*, 1992; 橋本ら, 1992; 山崎ら, 1994; Suzuki *et al.*, 1999)。森林の開空率が小さくなると融雪遅延効果は大きくなるが、同時に樹冠遮断による降雪の蒸発や冠雪の融雪が大きくなるため林床に貯留される積雪が少なくなり(Storck *et al.*, 2002; Varhola *et al.*, 2010; 村上ら, 2015;

村上, 2016)、河川への総流出量が減少する。従って、融雪遅延効果が適度に大きく、かつ冠雪による水の損失が適度に小さな森林が積雪地域の水源林として適切であると考えられる(村上, 2016)。しかし、具体的にどの程度の開空率を持った森林が適切であるかについては不明な点が多い。

融雪量を推定する方法は微気象データに基づく熱収支法と日平均気温のみを用いるDegree-Day法に大別できる。熱収支法では融雪の熱源としての放射フラックス、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱フラックスなどを定量的に評価することができるばかりでなく、開空率(森林被覆)と融雪の関係を検討する際にも有効である。しかし、熱収支法を広域に適用する場合、微気象データを得ることが難しく、実用上、適用は困難なことが多い。一方、Degree-Day法は日平均気温のみを用いるため、広域

への適用も比較的容易で、積雪地域の水源林管理指針の作成にも活用しやすいと考えられる。

Degree-Day法は式 (1) で表される (山崎, 1994)。

$$SM = k \sum_{\bar{T} - T_R > 0} (T - T_R) \quad (1)$$

ここで SM は積算日融雪量, k は融雪係数 (degree-day factor), T は日平均気温, T_R は融雪限界気温と呼ばれ, 0°C , または融雪が観測され始める日平均気温である -3°C (石井, 1959) とすることが多い。しかし, Degree-Day法では同じ場所においても融雪係数が季節の進行とともに変化し, また緯度や標高にも依存する点が問題となる (新井, 1994)。新井 (1994) は k の値は計算上 $3 \sim 11 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ であるが, 測定値を参照すると $4 \sim 6 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ が妥当としている。朝岡ら (2007) は人工衛星の画像と AMeDAS のデータと組み合わせて日本の融雪係数の分布を算出した。それによると, 融雪係数は積雪域の 90% 以上で $1 \sim 11 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ であったが, 低温の下で日射による融雪が卓越する寡雪寒冷地帯では $12 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 以上になるとしている。寡雪寒冷地帯で融雪係数が大きくなる傾向は, 宮田ら (2012) によっても確認されている。さらに宮田ら (2012) は, 最大積雪深が大きい地域では Degree-Day法による推定値と測定値の相関が高いが, 最大積雪深が小さい地域では推定値と測定値の相関が低い傾向があると指摘している。

このように融雪係数と地理的条件, 積雪深や気温との関係については研究が進んできたが, これらは基本的に裸地の積雪を対象とした研究であり, 森林における融雪係数の研究はまだ少ない。Kuusisto (1980) はフィンランドにおいて裸地の融雪係数が $3.51 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, 森林では $2.42 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ であり森林被覆が 10% 増加すると融雪係数が $0.16 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 減少するとしている。Whitaker and Sugiyama (2005) は裸地, カラマツ林, スギ林の融雪係数をそれぞれの地点の気温に基づいて算出しており, 2003年3月14日以降から消雪 (裸地4月2日, カラマツ林3月31日, スギ林4月4日) までの期間においてはそれぞれ $3.05 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.10 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.21 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ であったとしている。裸地の気温に基づく場合, これらは $3.05 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $1.58 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $1.68 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ となる (Whitaker and Sugiyama (2005) のデータから著者らが算出した値)。阿部ら (2016) は裸地, 落葉広葉樹林, 及びスギ林

において融雪係数を算出した。それによると3月下旬まではどの地点でも融雪係数は約 $4 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ であったが, 4月に入ると裸地と落葉広葉樹林で急増してそれぞれ $7.8 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $6.5 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ にまで達している。しかし, スギ林では逆に4月に $2.5 \text{ mm }^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ に低下したとしている。森林の融雪係数についてはこれら以外の測定例はほとんどなく, 森林被覆や林分密度などの林分構造との関係については不明な点が多い。

本研究では樹冠遮断による蒸発や冠雪の融雪は扱わず, 林内外の積雪と融雪のみを扱う。具体的には, 裸地とその近傍に位置する3種類のスギ林において積雪・融雪・気象観測を行い, 樹冠の開空率と積雪水量の大小関係, 及び樹冠の開空率と融雪係数の大小関係を検討する。これは今後, 積雪地における水源林管理のあり方を検討するうえでも有益であると考えられる。

II. 方法

1. 観測地とスギ林

新潟県十日町市の森林総合研究所十日町試験地 ($37^\circ 07' 53'' \text{N}$ $138^\circ 46' 00'' \text{E}$, 標高200 m) の裸地 (気象積雪観測露場) とその近傍の3種類のスギ林を対象とした (図-1)。表-1に示したように, スギ林は



図-1 裸地 (図中のO) とスギ林A, B, C (それぞれ図中のA, B, C) の位置関係

Fig. 1 Locations of Opening (marked as "O" in the figure), cedar stands A, B, and C ("A", "B", and "C" in the figure, respectively).

表-1 3種類のスギ林の林況
Table 1 Stand condition of three cedar forests.

林分名 Stand		スギ林A Cedar A	スギ林B Cedar B	スギ林C Cedar C
林齢 Age	years	23	72	≈130
平均樹高 Average tree height	m	13.2	24.8	36.6
平均枝下高 Average height of living branch	m	5.9	6.4	13.4
平均胸高直径 Average diameter at breast height	cm	18	34	45
林分密度 Tree density	trees ha ⁻¹	650	725	800
林分面積 Stand area	ha	0.2	0.9	0.3
開空率 Sky view factor	%	17.8	5.2	2.4
LAI	m ² /m ²	2.1	3.7	4.4
収量比数 Yield index		0.41	0.75	0.95
林分管理状況 Stand management situation		強度間伐による疎林 Sparse stand due to strong thinning	適正密度林 Optimized density	過密林 Dense stand

開空率の大きい順にスギ林A, B, Cと呼ぶことにする。裸地（面積0.1 ha）からスギ林までの距離は最大で530 m、標高差は最大で20 mである。スギ林の開空率と葉面積指数（LAI）はLAI-2000（LI-COR Biosciences, NE, USA）で測定した。表-1の項目のうち、収量比数（Yield index, 安藤, 1968）は林分の生態学的な相対本数密度を表す指数で、1以下の正值を取る。収量比数は地域毎・樹種毎に算出のための係数が求められており、林分密度（tree ha⁻¹）と平均樹高（m）を与えれば算出できる（細田, 2012）。対象としたスギ林の開空率は2.4～17.8%と比較的狭い範囲にあるが、収量比数は0.41～0.95であり、生態学的には疎林から密林までをカバーしていることが分かる。

2. 積雪・融雪観測と気象観測

対象とした期間は2005年の融雪期である。各地点の消雪は、地表面から約5 cmの深さに埋めた地中熱流板のデータと目視（地表面の50%以上が露出したら消雪とする）を組み合わせで判定した。4月1日から各地点の消雪までの間には降雪は観測されなかった。積雪水量（SWE）は各地点で神室式スノーサンプラー（日本雪氷学会, 2010）を用いて測定した。測定は3月9日と4月12日に行った。2005年冬季において裸地の積雪水量が最大となったのは3月18日であり、3月9日はその9日前であった。3月9日の積雪水量の測定は、裸地では3箇所で行った。スギ林内の積雪水量は不均一性が大きいので、これを平

均化して測定する必要がある。そこで各スギ林内では2本の代表木を選び、その2本の代表木を結ぶ直線上の数カ所で積雪水量の測定を行った。3月9日においては、スギ林Aでは代表木間の距離は480 cmで測定箇所は6箇所、スギ林Bでは840 cmの間の8箇所、スギ林Cでは900 cm間の9箇所で行った。4月12日にも裸地では3箇所で行った。ただし、3月9日に測定を行った場所では積雪がすでに乱されている。このため、4月12日には3月9日とは別の（数メートル離れた）自然積雪のままの状態の場所で測定を行った。スギ林内でも3月9日に測定した場所ではすでに積雪が乱されているため、4月12日には3月9日とは別の代表木間で測定した。すなわち、スギ林A（代表木間の距離515 cm）、スギ林B（570 cm）、スギ林C（740 cm）のすべてにおいて5箇所で行った。

融雪は4月6日～28日のうちの21日間について測定した（裸地では根雪終日の4月27日までの20日間）。測定には雪面低下法（日本雪氷学会, 2010）を用い、日単位の値を算出した。この方法を適用する場合、融雪による1日当たりの雪面低下量、積雪表面密度、積雪表面付近の含水率の測定が必要となり、日融雪量 M は式（2）から算出できる。

$$M = \rho_a(Z_1 - Z_2) + E \quad (2)$$

ここでは ρ_a 積雪の乾き密度、 Z_1 はある日の雪面の高さ、 Z_2 はその翌日の雪面の高さ、 E は雪面からの蒸発量（負の値）、または雪面への凝結量（正の値）

表-2 裸地と各スギ林の積雪水量, 消雪日, 及び融雪係数

Table 2 Snow water equivalent (SWE), date of snow melt-off and degree-day factors for opening and each cedar stand site.

地点 Site	積雪水量 SWE on 9 Mar. mm	積雪水量 SWE on 12 Apr. mm	消雪日 Date of disappearance of snow	融雪係数 ¹⁾ Degree day factor ¹⁾ mm °C ⁻¹ day ⁻¹	融雪係数 Degree day factor ²⁾ mm °C ⁻¹ day ⁻¹
裸地 Opening	1,048	585	28-Apr	4.09	4.09
スギ林A Cedar A	1,016	785	8-May	2.34	2.83
スギ林B Cedar B	944	825	16-May	2.13	2.70
スギ林C Cedar C	838	639	7-May	2.38	2.90

1) 裸地の気温を用いて算出。

Air temperature at the opening was used.

2) 各観測点の気温を用いて算出。

Air temperature at each site was used.

である。Eは通常小さいので(小池ほか, 1985)無視する。ρ_dは積雪の濡れ密度をρ_w、重量含水率をW(%)として式(3)から算出できる。

$$\rho_d = \rho_w(1 - W/100) \quad (3)$$

雪面低下量は、各観測地において2 m間隔で立てた2本の杭の間にテグス糸を張り、テグス糸の高さを基準として測定した。一方の杭から50 cm, 100 cm, 150 cmの3箇所においてテグス糸から雪面までの長さを1日1回物差しで測定してその平均値を雪面低下量とした。各スギ林においては幹の近くでは積雪が少なく、立木と立木の間点では積雪が多い傾向があったので、この点を考慮して平均的な積雪となっている地点を選んで杭を設置した。積雪表面密度は体積100 mlの密度サンプラーで測定した。積雪表面付近の含水率は誘電式含水率計(インスブルック大学製)で測定した。

裸地の気温は地上高2.4 mの百葉箱内に設置された白金測温抵抗体(横川電子機器, E-723-00-00)で1時間毎に測定・記録した。積雪期間中、百葉箱の半径約2 mの範囲は手作業で除雪されている。各スギ林の気温は温湿度ロガー(日置電機, 3641)を用いて1時間毎に測定・記録した。測定期間は4月1日から消雪までとした。温湿度センサーは、融雪が進行しても常に雪面からの高さが120~150 cmとなるように調整した。裸地の風速は超音波式風向風速計(カイジョー WA-200, 地上高10.5 m)、各スギ林内の風速は三杯式風速計(池田計器製作所 WM-30P)を用いて1時間毎に測定した。各スギ林内の風速計は、温湿度センサーと同様に、雪面からの高さが140~170 cmとなるように調整した。式(1)の融雪

限界温度T_Rを0℃として、裸地(露場)の日平均気温を用いた場合と、各観測地点での日平均気温を用いた場合の両方について、融雪係数を算出した。

III. 結果

3月9日の積雪水量は裸地が最大で、各スギ林においては開空率の減少(または収量比数の増加)と伴に減少した(表-2)。これは森林被覆の増加(または収量比数の増加)と伴に樹冠遮断蒸発と冠雪の融雪が増加するためと考えられる。4月12日の積雪水量はスギ林Bが最大で、スギ林A、スギ林C、裸地の順となった。消雪日はこれと逆に、裸地(4月28日)、スギ林C(5月7日)、スギ林A(5月8日)、スギ林B(5月16日)の順となった。4月1日以降の裸地と各スギ林の日平均気温Tを図-2(a)に、各スギ林と裸地の日平均気温の差ΔTを図-2(b)にそれぞれ示す。5月13日の裸地の気温は、機器の不具合のため13時間に渡って欠測となった(図-3(a))。2005年5月の裸地における日平均気温は、十日町アメダスと相関が強かったので(決定係数0.990)、5月13日の裸地の日平均気温は十日町アメダスの値から補間した値を用いた。期間中を通じて裸地の気温がいちばん高い。4月中旬までは各スギ林の差は明瞭ではないが、それ以降はスギ林Bがいちばん低く、Cがいちばん高い傾向を示している。図-3に裸地と各スギ林の毎時気温を示した。期間全体を通じてスギ林Bでは日最高気温がスギ林A、Cよりも低い傾向が見られる。この原因は、図-1のようにスギ林Bの東側が尾根になっていることで、放射環境や標高が高い場所からの空気の移流状況が他のスギ林と

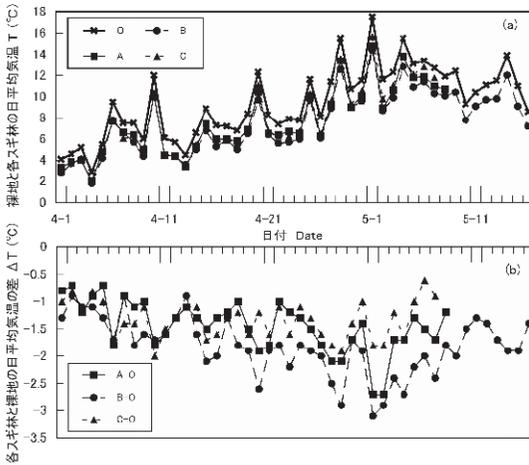


図-2 (a) 裸地（露場）と各スギ林の日平均気温, T . O, A, B, Cはそれぞれ裸地, スギ林A, B, Cの日平均気温を表す。(b) 各スギ林と裸地（露場）の日平均気温の差, ΔT . A-O, B-O, C-Oはそれぞれスギ林A, B, Cと裸地の日平均気温の差を表す。2005年4月1日から各地点の消雪日までの値を示した。ただし、裸地の値はスギ林Bが消雪する5月16日まで示してある

Fig. 2 (a) Daily average air temperatures, T , at the opening and each cedar stand. O, A, B and C respectively represent air temperatures at the opening, and cedar stands A, B, and C. (b) Difference of daily average air temperature between each cedar stand and the opening, ΔT . A-O, B-O and C-O respectively represent the difference in average daily air temperature between cedar stands A, B and C and the opening. Data are from April 1 to the day of snow melt-off for each site, except for the opening where data are for until May 16 when snow disappeared at cedar stand B.

異なること（地形の影響）が関係している可能性がある。

図-4に裸地の積算日平均気温と各地点の積算日融雪量の関係を示した。融雪係数は裸地, スギ林A, B, Cの順に $4.09 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.34 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.13 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.38 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ となった (表-2)。図-5に各地点の積算日平均気温と各地点の積算日融雪量の関係を示した。融雪係数は裸地, スギ林A, B, Cの順に $4.09 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.83 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.70 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.90 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ となり、裸地の気温を用いた値よりも $0.49 \sim 0.57 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 大きくなった。Whitaker and Sugiyama (2005) の研究では、裸地の日平均気温を用いた場合と各林内の値を用いた場合の差は、カラマツ林で $0.52 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 、スギ林で $0.53 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ であり、本研究の値の範囲内に収まっている。

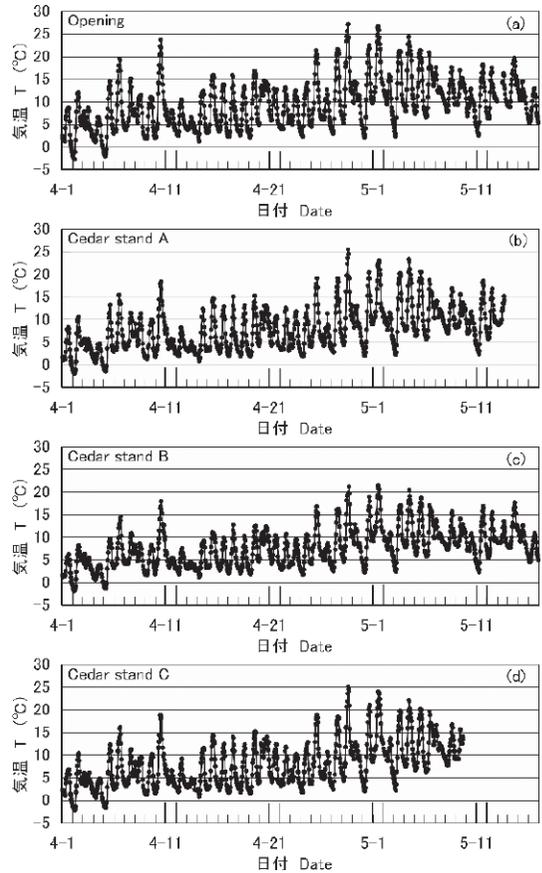


図-3 裸地（露場）と各スギ林における毎時気温。(a) 裸地, (b) スギ林A, (c) スギ林B, (d) スギ林C

Fig. 3 Hourly air temperatures at the opening and each cedar stand: (a) opening, (b) cedar stand A, (c) cedar stand B, and (d) cedar stand C.

IV. 考察

1. 開空率と融雪係数の関係

Kuusisto (1980) は森林被覆率（開空率）と融雪係数の間に負の相関（正の相関）があるとしている（ただし、相関係数は-0.51と小さい）。本研究では裸地の融雪係数が最大で、次いでスギ林A, C, Bの順となった。森林被覆率は小さいものから順にスギ林A, B, Cであり、3つのスギ林を比較すると森林被覆率と融雪係数の間に相関関係は見られない (表-1, 2)。3つのスギ林の中ではスギ林Aの融雪係数が最大となったが、これは開空率が大いいために顕熱フラックス、または潜熱フラックスと比較して放射フラックスによる融雪が大ききことによる（村上ら、

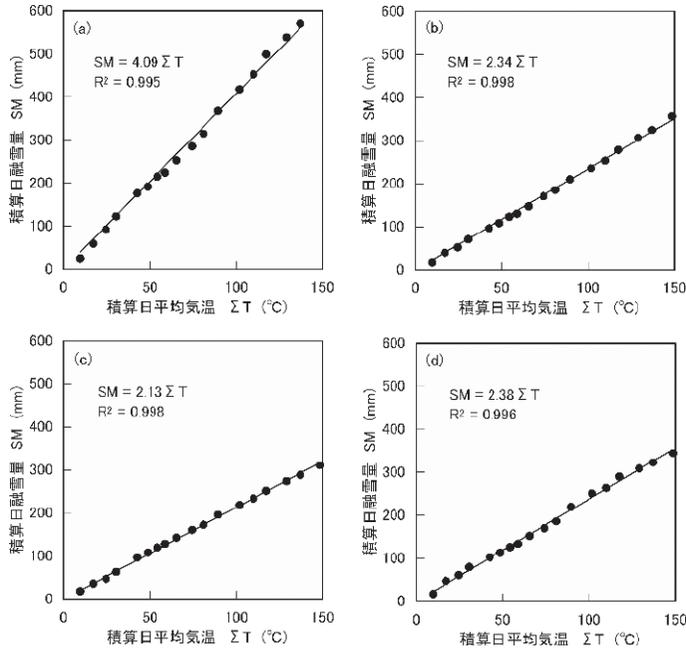


図-4 裸地（露場）における日平均気温の積算値 ΣT と日融雪量の積算値 SM . (a) 裸地, (b) スギ林A, (c) スギ林B, (d) スギ林C

Fig. 4 Accumulated daily average air temperature at the opening ΣT and accumulated daily snowmelt at each site SM : (a) opening, (b) cedar stand A, (c) cedar stand B, and (d) cedar stand C.

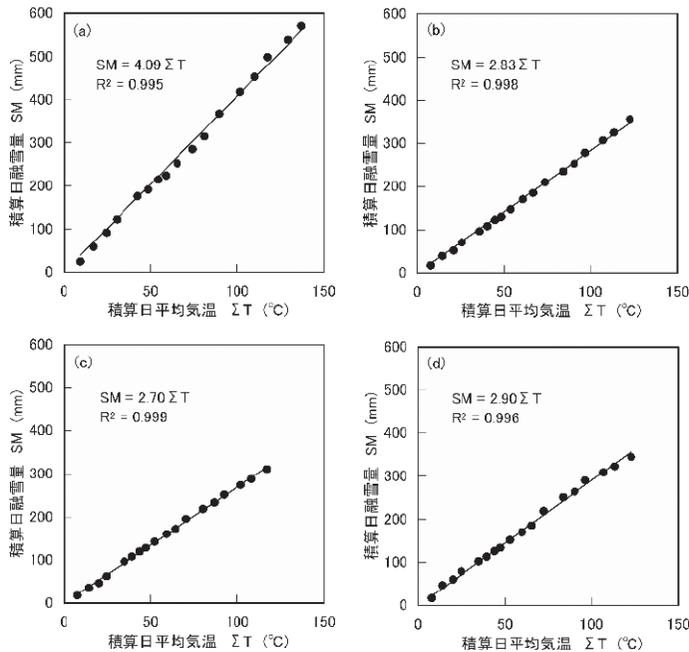


図-5 各観測地点における日平均気温の積算値 ΣT と日融雪量の積算値 SM . (a) 裸地, (b) スギ林A, (c) スギ林B, (d) スギ林C

Fig. 5 Accumulated daily average air temperature at each site ΣT and accumulated daily snowmelt at each site SM : (a) opening, (b) cedar stand A, (c) cedar stand B, and (d) cedar stand C.

2016). スギ林BとCで, Kuusisto (1980) の結果と異なって, 森林被覆・融雪係数の関係が逆転した原因としてスギ林Cの枝下高が13.4 mとスギ林Bの6.4 mよりもかなり高いことが考えられる(表-1). しかし, 4月1日から5月7日までのスギ林B, Cの平均風速はそれぞれ 0.46 m s^{-1} , 0.57 m s^{-1} であり, 大きくは異ならない. このため, スギ林Cの枝下高が高いことで同林内の風速がスギ林Bよりも大きくなり, 顕熱フラックスと潜熱フラックスによる融雪が大きくなったかどうかは, 風速データのみからは判断できない.

上記以外でスギ林Bの融雪係数がスギ林Cよりも小さくなった原因として考えられるのは, リター(落葉落枝)量の違いである. 各林分でのリターの定量的な調査は行っていないが, 目視による観察と写真の記録では, 特に融雪末期においてスギ林C(林齢約130年)のリターがスギ林B(林齢72年)よりも多い傾向を示していた. リターの多いスギ林Cでは, リターが放射の吸収効率を高め, 融雪を促進している可能性が考えられる. 市川ら(2006)は13~93年生の6つのスギ林において, リター量が幼齢林から壮齢林までは増加し, 壮齢林から老齢林に向かうにつれて減少する傾向があることを示した. 本研究で対象としたスギ林B(72年生)とC(約130年生)はいずれも老齢林であるが, リター量はスギ林Bよりも高齢のスギ林Cで多くなっている. 市川ら(2006)においても本研究においても, 老齢林のデー

タはそれぞれ2点ずつしかないため, スギ老齢林においてリター量が林齢に依存するかどうかは不明である. リターの量が林分のどのようなパラメータに依存するかについては今後検討する必要がある.

スギ林Bの融雪係数がスギ林Cより小さくなった別の原因として, スギ林Cでは枝下高が高いため, 枝葉が雪面から離れ, 測定された気温よりも樹冠の温度がより高くなり長波放射が大きくなった可能性も考えられる. これらの点を明らかにするためには, 今後, 林内の短波・長波放射収支を含む熱収支とリター量の関係を詳細に検討する必要がある.

前述のように, Kuusisto (1980) は森林被覆率が10%増加すると融雪係数が $0.16 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 減少することを指摘したが, これは森林被覆率10~70%の範囲で適用できるとしている. 本研究で扱う森林被覆率はこの範囲外ではあるが, 図-6に森林被覆率と裸地・スギ林における融雪係数の関係を示した. 融雪係数の計算に裸地の日平均気温を用いた場合は10%の森林被覆の増加に対して融雪係数が $0.19 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ の減少(図-6(a)), 各地点の日平均気温を用いた場合は $0.14 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ の減少となり(図-6(b)), Kuusisto (1980) が示した $0.16 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ に近い値となった. しかし, データ数が少ないため, 森林被覆率と融雪係数の関係を確認するにはさらにデータの蓄積が必要である. なお, 収量比数と融雪係数(裸地の気温を用いた値と各観測地点の気温を用いた値のどちらも)の間にも, 相関は見られな

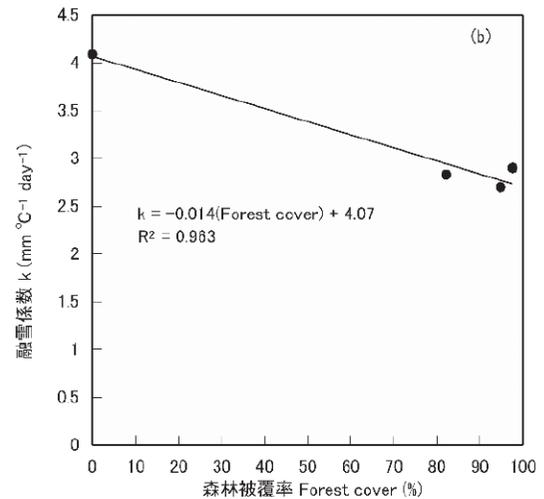
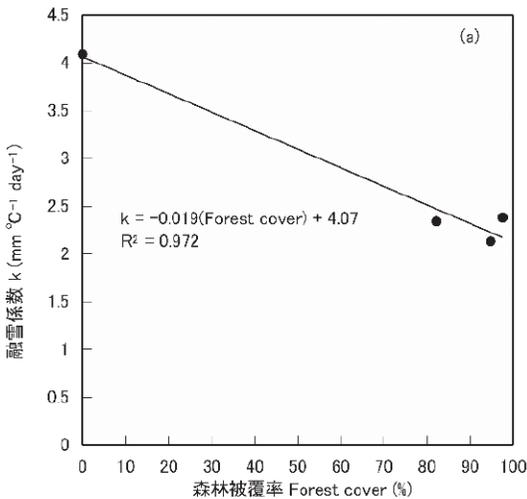


図-6 森林被覆率と融雪係数 k の関係. (a) 裸地(露場)の気温を用いた場合. (b) 各観測地点の気温を用いた場合
Fig. 6 Forest cover and degree day factors, k : (a) air temperature at the opening was used. (b) air temperature at each site was used.

かった。

2. 融雪係数を用いた消雪日の推定

裸地における日平均気温から算出した融雪係数を用いて各地点における4月12日からの融雪を計算すると、露場では4月28日に消雪（測定でも4月28日）、スギ林Aでは5月13日（5月8日）、スギ林Bでは5月17日（5月16日）、スギ林Cでは5月7日（5月7日）の消雪となった。スギ林Aのみで実際の消雪が予測よりも5日間早かったが、それ以外の地点では1日以内の差で消雪の推定日と観測日が一致した。同様に、各地点における日平均気温から算出した融雪係数を用いて各地点の融雪を計算すると、スギ林Aでは5月12日（5月8日）、スギ林Bでは5月17日（5月16日）、スギ林Cでは5月6日（5月7日）の消雪となった。裸地の気温を用いた場合と比べると、スギ林Aでは計算と観測の差が1日分縮まり、スギ林Bでは変わらず、スギ林Cでは1日分開く結果となった。結局、どちらの融雪係数を用いても、消雪日の推定精度はあまり変わらないことになる。

図-2(a)では4月28日を境に各地点の気温が高くなっている。この気温上昇の傾向は4月に積雪が観測されていない新潟県の高田や柏崎のアメダスの気温データにおいても見られる（図は省略）。このため、各スギ林での気温上昇の主な原因は、同日に裸地で消雪したことによるものではないと考えられる。4月28日以降、この気温上昇に対応してスギ林A～Cで潜熱フラックスの急増が見られ（村上ら、2016）、特にスギ林Aでの増加が顕著である。この原因として、開空度の大きなスギ林Aでは4月27日以前は夜間の放射冷却によって雪面温度が氷点下になっており、これを0℃に上昇させるために多くのエネルギーが費やされていたが、4月28日以降は夜間気温の上昇などでこれが解消されたことが考えられる。詳細は、今後の熱収支・微気象データ解析で明らかにできるかもしれない。これがスギ林Aの推定消雪日が実測よりも4～5日遅くなった原因かもしれない。原因は何であるにせよ、スギ林Aで測定された消雪日を再現するには4月28日を境に融雪係数を増加させる必要がある。そこで、4月12日のスギ林Aの積雪水量785 mmから4月28日におけるスギ林Aの積雪水量の計算値341 mm（裸地の気温に基づく値）を差し引いた444 mmが5月8日にゼロになるように融雪係数を逆算した。融雪係数の算出に裸地の日平均気温を用いた場合、4月28日から5月

8日までの融雪係数は $3.05 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 、スギ林Aの日平均気温を用いた場合、融雪係数は $3.51 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ となった。両者の差は $0.46 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ であり、これよりも早い時期の両者の差（Ⅲ章参照）と近い値となった。

3. 森林における融雪係数の比較

Kuusisto (1980) はフィンランド全土をカバーする12箇所において、林内外の融雪を20年間に渡って調査している。前述のKuusisto (1980) の融雪係数はこれらの時間的・地理的平均値であり、ある特定の時期においては、融雪係数は南の地方ほど大きく北の地方ほど小さい傾向を示し、観測地ごとに見た場合は、いずれの場所でも季節の進行とともに融雪係数が増加する傾向を示した。前述のKuusisto (1980) の融雪係数、 $2.42 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ は季節としては4月10日から20日の間の平均値、位置的にはフィンランド中部の平均値である。フィンランド中部において、4月中旬の森林の融雪係数（平均値）を基準値（100%）とすると、3月初めの森林の融雪係数は約50%であった。この値は5月中旬になると約140%に増加した。裸地においても同様に、4月中旬の値を100%とした場合、3月初めは約30%、5月中旬は約170%となった。北部、南部でも季節に伴って融雪係数が増加する傾向がみられた。北部と南部において、裸地の融雪係数と森林の融雪係数の季節変化を比較すると、裸地では季節の進行に伴う変化幅が大きく、森林では小さかった。これは中部における傾向と共通している。

本研究において4月の裸地の日平均気温から求めたスギ林の融雪係数は $2.13 \sim 2.38 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 、阿部ら (2016) のスギ林における4月の値は $2.5 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ といずれもKuusisto (1980) の値、 $2.42 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ に近い。Whitaker and Sugiyama (2005) では、裸地における日平均気温から算出したカラマツ林とスギ林の融雪係数がそれぞれ $1.58 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 、 $1.68 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ であったが、これらは3月14日から消雪日（カラマツ林で3月31日、スギ林で4月4日）までの値である。これらをKuusisto (1980) の値、 $2.42 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ で除すると、カラマツ林の値は65%、スギ林の値は69%となる。Kuusisto (1980) によると、3月初めの森林の融雪係数は4月中旬の約50%であるから、3月中旬から下旬は4月中旬の約75%であると予測され、Whitaker and Sugiyama (2005) の値はこれに近い。これらの結果から、森林の融雪

係数は裸地に比べて地理的、時間的な変化が小さい傾向があるように見える。しかし、阿部ら（2016）の3月における落葉広葉樹とスギ林の値はいずれも約 $4 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ と大きく、4月にはスギ林で $2.5 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ に低下する現象が見られるなど、これまでのところ阿部ら（2016）だけが例外的な振る舞いを示している。これが実際に例外的なのか、単にデータが少ないことで全体像が明らかになっていないために阿部ら（2016）が例外的に見えるだけなのかを明らかにするには、さらに研究を進める必要がある。

V. 結論

開空率の異なる3種類のスギ林と裸地で積雪・融雪・気象観測を行った。融雪が盛んになる前の3月9日における各地点の積雪水量は、森林被覆の増加（開空率の減少）とともに小さくなった。融雪係数は大きい順に裸地、開空率が最大のスギ林A、開空率が最小のスギ林C、開空率がAとCの中間のスギ林Bとなり、融雪係数の大小関係は開空率のみでは表現できなかった。これは開空率以外にも、スギ林Cの枝下高（樹高）が高いことやスギ林Cのリター量が多いことが関係しているからかもしれない。融雪係数は、裸地の日平均気温を用いた場合よりも各スギ林での日平均気温を用いた場合のほうが $0.49 \sim 0.57 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 大きくなった。いずれの融雪係数を用いても、消雪日の推定精度は同程度であった。本研究と既存の研究から、森林の融雪係数は裸地と比較して季節的、地理的な変動が小さい傾向のあることが示唆された。

引用文献

阿部俊夫・久保田多余子・野口正二 2016. 東北地方の多雪地帯における2013/2014年冬季の落葉広葉樹林、スギ林の降雪遮断特性および融雪特性. 東北森林科学会誌 21: 6-10.
 安藤 貴 1968. 同齢単純林の密度管理に関する生態学的研究. 林業試験場研究報告 210: 1-153.
 新井 正 1994. 融雪と融雪流出. 基礎雪氷講座VI 雪氷水文現象 (前野紀一, 福田正己編), 古今書院; 49-91.
 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.
 橋本 哲・太田岳史・石橋秀弘 1992. 落葉樹林が表層融雪量に与える影響に関する熱収支的検討. 雪氷 54: 131-143
 細田和男 2012. "収量比数Ry計算プログラム", 森林総合研究所,

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/database/yieldindex/index.html>. (参照: 2017/07/28).

市川貴大・高橋輝昌・浅野義人 2006. スギ人工林とヒノキ人工林での林齢による有機物動態の変化の比較. 日本森林学会誌 88: 525-533.
 石井幸男 1959. 雪基礎調査融雪の研究. 北海道電力株式会社・札幌管区气象台; 84.
 小池俊雄・高橋 裕・吉野昭一 1985. 融雪量分布のモデル化に関する研究. 土木学会論文集 363: 165-175.
 Kuusisto, E. 1980. On the Values and Variability of Degree-Day Melting Factor in Finland. *Nordic Hydrology* 11: 235-242.
 宮田俊介・朝岡良浩・風間 聡 2012. 全国のAMeDAS観測点におけるDegree-Day法および融雪係数の検証. 土木学会論文集B1(水工学) 168;I_343-I_348.
 村上茂樹 2016. 積雪と水源林. 山林 1580: 30-37.
 村上茂樹・竹内由香里・庭野昭二 2015. 3つのスギ林と裸地における積雪水量と融雪の違い. 2015年度水文・水資源学会要旨集 :52-53.
 村上茂樹・竹内由香里・庭野昭二 2016. 3種類のスギ林と裸地における融雪の熱収支. 雪氷研究大会 (2016・名古屋) 講演要旨集 :55.
 日本雪氷学会 2010. 積雪観測ガイドブック. 朝倉書店; 136.
 Shimizu, T, Kikuya, A, Tsuboyama, Y. 1992. Influence of Changes in Vegetation upon the Runoff Characteristics of Mountainous Drainage Basins. *Bulletin of Forestry and Forest Products Research Institute* 363: 21-39.
 Storck, P, Lettenmaier, DP, Bolton, SM. 2002. Measurement of snow interception and canopy effects on snow accumulation and melt in a mountainous maritime climate, Oregon, United States. *Water Resources Research* 38: 1223. DOI: 10.1029/2002WR001281.
 Suzuki, K, Ohta, T, Kojima, A, Hashimoto, T. 1999. Variations in snowmelt energy and energy balance characteristics with larch forest density on Mt Iwate, Japan: Observations and energy balance analyses. *Hydrological Processes* 13: 2675-2688. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(19991215)13:17<2675::AID-HYP841>3.0.CO;2-#.
 Varhola, A, Coops, NC, Weiler, M, Moore, RD. 2010. Forest canopy effects on snow accumulation and ablation: An integrative review. *Journal of Hydrology* 392: 219-233. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.08.009.
 Whitaker, AC, Sugiyama, H. 2005. Seasonal snowpack dynamics and runoff in a cool temperate forest: lysimeter experiment in Niigata. *Hydrological Processes* 19: 4179-4200. DOI: 10.1002/hyp.6059.
 山崎 剛 1994. 積雪と大気. 水環境の気象学 (近藤純正編著), 朝倉書店; 240-260.
 山崎 剛・田口文明・近藤純正 1994. 積雪のある森林小流域における熱収支の評価. 天気 44: 70-77.

(受付: 2017年7月31日, 受理: 2018年4月6日)
 この論文への討議・コメントを, 2019年1月末日まで受け付けます。

A Comparison of Degree-day Factors for Snowmelt Between Three Cedar Stands and an Opening

Shigeki MURAKAMI ^{1)†} Yukari TAKEUCHI ²⁾ Shoji NIWANO ³⁾

¹⁾ Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute
(4-11-16 Kurokami, Chuo, Kumamoto, Kumamoto, 860-0862, Japan)

²⁾ Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute
(614-9 Kawahara-cho, Tohkamachi-shi, Niigata 948-0013, Japan)

³⁾ Retired: Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute
(614-9 Kawahara-cho, Tohkamachi-shi, Niigata 948-0013, Japan)

†Corresponding Author E-mail : smura@affrc.go.jp

Snowmelt and meteorological observations were conducted at the opening and three cedar stands with different sky view factors. The sky view factors of cedar stands A, B, and C were, respectively, 17.8%, 5.2%, and 2.4%. Snow water equivalent (SWE) at the stands on 9 March decreased concomitantly with the decreasing sky view factor. SWE at each site on 12 April in order from smallest to largest was the opening, the cedar stands C, A, and B. Melt-off dates were the same order from earliest to latest. The degree-day factors k calculated based on the snowmelt measurements for 21 days were also the same order from largest to smallest. The values of k estimated using the daily average air temperature at the open site for the opening, the cedar stands A, B, and C were, respectively, $4.09 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.34 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.13 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, and $2.38 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, whereas k estimated based on the daily average air temperature measured at each site for stands A, B, and C were, respectively, $2.83 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $2.70 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$, and $2.90 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$. Dates of melt-off at all sites were reproduced using values of k except for cedar stand A, where snow disappeared 4-5 days earlier than the estimation. Sky view factors were insufficient to elucidate the magnitude relation on k between stands B and C. Instead, the living branch height and the amount of litter might contribute to it.

Key words : degree-day factor, sky view factor, snow water equivalent, water conservation forest