宝川森林理水試験地における積雪水量の高度分布の長期変化

Long-term changes in altitudinal distribution of snow water equivalent in Takaragawa Forest Watershed Experiment Station

村上茂樹*・山野井克己* (森林総合研究所 十日町試験地)

Shigeki MURAKAMI・Katsumi YAMANOI

Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute

Snow survey was conducted for the years 1939-1967, 1983-1984, and 1996-2000 in Shozawa basin (118 ha, height difference 570 m) of Takaragawa Forest Watershed Experiment Station located in the head water area of Tone River, that is water resources in Tokyo metropolitan area. Full-depth snow density did not depend on an altitude and was expressed as a function of calendar days. As is well known, snow water equivalent SWE has a positive linear relationship with an altitude in a forested area in Japan. The coefficient a , which represents the increment of SWE with an altitude, demonstrated increase trend with time in each winter. For the years 1939-1967 and in 1983 the coefficient a augmented from about 0.5 to 1 mm m^{-1} during 40-120 days since 1 January, while in 1984 and for the years 1996-2000 it increased from some 1.8 to 2.5 mm m^{-1} during 70-120 days. Though we inspected the relationship between the coefficient a and heavy snow versus light snow years, we could not find any relationships between them. Two possible causes for this increase in a were discussed: first, snow melt promotion in the lower part of the watershed due to temperature rise, and secondly, the effects of silvicultural practices in the basin. Neither of them contributed to the increment of a , and it is concluded that the amount of snow fall increase in the upper part of the basin gave rise to the coefficient a .

Key words: Snow survey, Snow water equivalent, Altitudinal distribution, Takaragawa Forest Watershed Experiment Station

群馬県水上町の利根川源流域に位置する宝川森林理水試験地の初沢流域(118ha, 高度差570m)において, 1939~1967年, 1983~1984年, 1996~2000年に積雪調査が行われ, 積雪水量が測定された。全層平均積雪密度は高度に依存せず, 日付の関数として表現できた。森林地帯では積雪水量は高度と正の線形関係にあることが知られている。その増加率を表す係数 a の値は, 一冬間の時間経過とともに増加する傾向を示した。また, 係数 a の値は1939~1967年および1983年には, 1月1日を起日として約40~120日の間に約0.5から約1 m^{-1} へと増加したのに対して, 1984年および1996~2000年には約70~120日の間に約1.8から約2.5 $mm\ m^{-1}$ へと増加した。係数 a の大小と少雪年・多雪年との関連性を検討したが, 両者の間に関係は見出せなかった。係数 a が1984年および1996~2000年に増加した原因として, 第一に気温の変化による流域下流での融雪量の増加, 第二に流域内での森林施業の影響, について検討した。その結果, これらが係数 a の増加の原因であるとは考えにくく, 流域上流での降雪の増加が係数 a の増加をもたらしていると推察された。

キーワード: 積雪調査, 積雪水量, 高度分布, 宝川森林理水試験地

I. はじめに

1. 序 論

降雪の後に融雪が生じるまでの間, 積雪は水資源および物質循環における貯留媒体としての役割を果たす。また, 積雪は融雪による洪水災害をもたらす

こともある。このため, 積雪水量の面的分布の定量化は, 地域スケールから地球規模スケールに至るまで, あらゆるスケールの解析において重要である。しかし, 積雪水量の現場での観測は困難であり, その面的分布の現場観測はさらに困難である。この問題を解消するために, リモートセンシングを用いた

* 森林総合研究所 十日町試験地 〒948-0013 新潟県十日町市辰乙614

Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute, Tatsu-Otsu 614, Tohkamachi, Niigata, 948-0013, Japan

積雪水量の面的観測も試みられているが、この場合も現場における測定値との比較が不可欠である。

ところで、日本国内の山岳地域の積雪水量 SWE (mm) は高度 H (m) とともに直線的に増加することが知られている (例えば, Yamada, 1982; 松山, 1998b)。すなわち,

$$SWE = aH + b \quad (1)$$

a, b は定数で、 a ($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$) は積雪水量の高度に対する増加率をあらわす。日本国内の山岳地域では a の値は約 $1 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ 、すなわち標高が $1,000 \text{ m}$ 増すごとに積雪水量が約 $1,000 \text{ mm}$ 増加するとされている。

小池ら (1985a) は、積雪水量の高度に対する増加率 (1) 式の a 、対象流域の標高帯別面積率、およびリモートセンシングから得られる積雪面積率を用いて、対象流域内の積雪水量を求めている。風間・沢本 (1995) は、既存の a の値と衛星データから抽出した雪線とから、広域の積雪水量の分布を求めている。このように、リモートセンシングを用いて積雪水量を推定する場合、 a が重要なパラメータとなるが、 a の値は対象地域および、時間に依存して変化する。例えば松山 (1998a, 1998b) は係数 a が同じ山岳であっても年によって 2 倍も変わりうることを報告している。しかし、これまで対象地域ごとの a の違いや、ある特定地域における a の長期変化を測定した例はほとんどない。

海外においても、積雪深は高度とともに増えることを指摘している研究 (Stähli *et al.*, 2001) もある。しかし、海外では積雪分布モデルに用いられる変数、例えば高度は、積雪分布と非線形の関係を示し、経験則から積雪分布を推定するのは困難であるとの見方がなされている。すなわち、近年、海外においては積雪分布の推定には分布型モデルを用いるのが一般的傾向である。

Cline *et al.* (1998) は融雪開始から消雪 (リモートセンシングにより求める) までの期間と、その期間中に融雪に使われるエネルギーとから、融雪開始時における場所ごと (ピクセル毎) の SWE を計算している。Luce *et al.* (1998) は地形と吹きだまりによる効果が SWE の分布に与える影響をモデル計算を用いて議論し、計算値のメッシュサイズ依存性を検討している。Elder *et al.* (1998)、Blak and Elder (2000) は衛星データまたは空中写真と代表点での現場測定データに基づき、純放射、高度、傾斜、植生タイプをパラメータとして SWE の分布をモデル計

算している。

このように国内外で積雪分布に関する研究のアプローチに違いが見られる。この違いは日本が比較的温暖な積雪域であることと、森林が存在している流域を対象とすることが多いことが関係していると思われる。すなわち、温暖であることは雪粒子間の結合を強くし、さらに森林の存在は風を弱めることから、積雪の削剥・堆積による再分配が起きにくくなる。この結果、海外と比較して高度と SWE との関係が線形で近似しやすくなるものと予想される。

本研究では、これまでの国内での研究の流れを受け継ぎ、流域積雪水量を推定する場合の重要なパラメータである係数 a の長期変化を宝川試験地 (次節参照) において解析することを目的とした。

2. 宝川試験地における積雪調査とその意義

森林総合研究所・宝川森林理水試験地 (以下、宝川試験地という) では 1937 年以来、量水、降水、積雪、気象の観測が行われている。同試験地の本流 ($1,906 \text{ ha}$ 、高度差 $1,145 \text{ m}$)、初沢 (118 ha 、高度差 570 m)、初沢 1 号沢 (6.5 ha 、高度差 250 m) の各流域では過去に森林の伐採や植栽などの施業が行われ、それらが水流出に及ぼす影響が検討されてきた (吉野・菊谷, 1984, 1985; Shimizu *et al.*, 1992, 1994a, 1994b; 志水・吉野, 1996)。これらの研究では流域下端の降水量・積雪量に基づいて議論がなされており、流域内の降水分布については考慮されていない。しかし水収支を検討する際には流域内の降水量や積雪量の分布を考慮する必要がある。

本流と初沢では、これまでに流域内の降雨と積雪の高度分布についていくつかの研究がなされてきたが (東京営林局, 1943, 小池ら, 1985a, Tani 1996)、用いられたデータは 1950 年代以前および 1983 ~ 1984 年のものである。近年の降水量の分布は植生変化または気候変化の影響によって、これらの報告とは異なっている可能性がある。植生の変化に伴う長期間の流域水収支変化を検討するためには、過去の降水・積雪の高度分布と近年のものとの間にパターンの変化が無いかどうかを確認したうえで解析を行う必要がある。

このような背景を踏まえて、本研究では 1996 ~ 2000 年に初沢流域の積雪水量の高度分布を測定した結果と 1939 ~ 1967 年および 1983 ~ 1984 年 (小池ら, 1985a) のデータとを比較検討する。

宝川試験地における係数 a については小池ら

図 - 1 宝川試験地初沢流域と積雪調査地点

量水堰：○，積雪調査地点：■；○：1939～1967年，■：1983～1984年，●：1996～2000年

Fig. 1 Shozawa basin in Takaragawa Forest Watershed and snow measurement points.

Gauging weir: ○, snow measurement point: ■; ○: 1939-1967, ■: 1983-1984, ●: 1996-2000

(1985a), Taní (1996) の研究がある。小池ら(1985a)は、宝川試験地の初沢流域付近における a の値が1983年春に $0.95 \sim 1.04 \text{ mm m}^{-1}$ であったものが、翌1984年春には $1.61 \sim 2.24 \text{ mm m}^{-1}$ に増加したと報告している。Taní (1996) は、1953年3月および1947～1955年の平均の係数 a がそれぞれ 1.202 mm m^{-1} , 1.109 mm m^{-1} となることを示した。一方、松山(1998a)は1997年に新潟県巻機山(宝川試験地から北北西に約14km)で行った積雪調査において係数 a が約 2 mm m^{-1} となり、小池ら(1985a)の1984年の結果と同様に、これまでの報告と比較してかなり大きくなったとしている。本研究は、あくまで宝川試験地に着目したものであるが、両調査地点は近距離に位置するため、係数 a は同様の傾向を示すことが予想される。

本研究では宝川試験地における係数 a の値の36年

間の変化を検討することによって、その変動傾向を明らかにし、その原因について植生変化、気候変化の両面から考察する。

II. 方 法

1. 試験地と積雪調査地点

宝川試験地(気象観測露場)は群馬県水上町の利根川源流域(東経139°02′, 北緯36°51′, 高度816m)に位置する。図-1に本研究で対象とした初沢流域と積雪調査地点とを示す。

初沢流域は1937年の流量観測開始当初、ブナを主とする温帯北部の天然林で占められていた(農林省林業試験場, 1961)。その後、1948～1951年に50%択伐、1961～1963年に皆伐が行われた。1964～1966年にはスギとカラマツが植栽されたが、その面積は流域全体の1/2以下にすぎず、流域の上流は植栽さ

れずに放置されたまま今日に至っている（吉野・菊谷，1985）。

積雪調査地点は，1939～1967年には6地点，1983～1984年には7地点（小池ら，1985a），1996～2000年には6地点がそれぞれ設定された。測定は必ずしも毎回すべての地点で行われてはいない。融雪の末期には流域下流で消雪しているため，最少で2点のみの場合も含まれている。

1996～2000年の積雪調査地点と1939～1967年のものとの比較では816m，1,165m，1,350mの3地点が共通であり，1996～2000年と1983～1984年（小池ら，1985a）との比較では816m，1,165m，1,290mの3地点が共通である。このように，流域の下端，中腹部，上流部で積雪調査地点が重複していることから，これら3期間のスノーコースの違いによる測定値の差はほとんどないと考えられる。測定はいずれの場合も平坦な疎林で行われた。

2. 調査方法

1939～1967年の調査では，積雪深は無積雪期にあらかじめ立木に取り付けておいた標尺（1調査地点について数本）の読みとり値の平均とした。また，1953～1967年の調査については積雪深の測定に加えて測定地点のうちのいくつかでスノーサンプラー（円筒形，断面積20cm²）による積雪水量と全層平均密度の測定が行われた。

1983～1984年の調査（小池ら，1985a）では，積雪深はスノーコースに沿って各測点で測深棒による10回の測定を行った平均値，密度は代表数地点で断面観測から得た全層平均密度であり，積雪水量はこれらのデータから求められている。

1996～2000年の調査では，積雪深は測深棒を用いて各測定地点で10回測定し，その平均値とした。ただし，1996年3月の調査では積雪が深く高度1,290m以上では持参した測深棒が短すぎて地面に届かなかったため，竖穴を掘ってから測深した。これらの地点では1～2回のみ測定した積雪深をその地点の値とした。また，代表地点（816m，1,165mの一方または両方）でスノーサンプラー（円筒形，断面積20cm²）を用いて積雪水量と全層平均密度とを測定した。ただし，1996年にはこれら以外の地点でも密度が測定された（Ⅲ章参照）。

Ⅲ章で述べるように全層平均密度は観測日が決まれば場所によらずほぼ一定となるため，積雪深のみを測定した地点では同じ日に他の地点で測定された

全層平均密度（複数ある場合はその平均値）を用いて積雪水量を算出した。1939～1952年の調査では密度の測定が行われていないため，Tani（1996）が示した式を用いて推定した。

すなわち，Tani（1996）は1953～1958年の全層平均密度データを解析して初沢流域と本流流域の両方を含む宝川試験地の全層平均密度（gcm⁻³）が日付の関数として表現できることを示した。

$$= 0.00263T + 0.193 \quad (2)$$

ここで T は1月1日から数えた日数である。

Ⅲ. 結 果

1. 積雪密度の高度・時間依存性

表-1に1996年の全層平均密度と高度との関係を示した。3月13日の1,165m地点では4.89mの積雪深であったが，雪が堅くてスノーサンプラーがわずしか刺さらなかった。このため竖穴を掘って全層平均密度の測定を試みたが，2.80mまでしか掘れず，それ以深は2.10～2.80mの値と同じであると仮定して全層密度を推定した。

1996年の観測では，ある特定の調査日の密度は高度にあまり依存せず，ほぼ一定となった（表-1）。3月13日の2地点の差は6%，4月18日の3地点の

表-1 1996年の全層平均密度

* 積雪深は4.89mだったが，スノーサンプラーは地面まで達しなかった。2.80m以深の密度は2.10～2.80mの平均密度と同じであると仮定した。

Table 1 Full-depth mean density in 1996

* Snow depth was 4.89 m but snow sampler did not reach to the bottom. Density deeper than 2.80 m was assumed to be the same with the average density for 2.10-2.80 m.

Date	13-Mar	18-Apr	31-May
Altitude	Density	Density	Density
(m)	(g cm ⁻³)	(g cm ⁻³)	(g cm ⁻³)
816	0.373	0.518	
880		0.529	
1165	0.397 *	0.560	0.580
1290			0.580
1350			0.580
(A) Average	0.385	0.536	0.580
(B) Eq. (2)	0.385	0.480	0.593
Max - Min (%)	6	8	0
(A) - (B) / (B) (%)	3	12	2

最大値と最小値との差は8%, 5月31日の3地点の差はゼロであった(表-1)。これらの差はIV章で述べる測定誤差の範囲内である。また、小池ら(1985b)は1953年と1984年の調査結果から、宝川試験地の初沢流域付近の積雪密度は観測時期が同じであれば高度に依存せずほぼ一定になることを示した。これらの結果から、初沢流域の密度は観測時期が決まれば高度に依存せず一定であるとして扱う。

2. 積雪水量の長期変化

図-2に積雪水量 SWE と高度 H の関係を1954年と1999年についてそれぞれ例示した。1954年の場合、流域下流では融雪の進行により3月()よりも4月()の方が、 SWE が少なくなっている。流域上流では下流よりも気温が低いために融雪が遅く降雪が多くなる。このために3月よりも4月のほうが SWE が大きくなっている。1999年の場合、流域下流では1954年と同様に、3月()よりも4月()の方が SWE が少なくなっている。流域上流では融雪が遅いために3月と4月の SWE がほとんど同じになっている。流域上流での4月の SWE が3月と比較して大きくなるか小さくなるかは、その年の降水量や気温の推移に依存して決まる。1954年には4月に流域上流で SWE が多くなったが、1999年にはあまり違いが見られなかったのは、両期間の降水量や気温の変化パターンの差によるものと考えられる。

図-2の回帰直線の傾きが(1)式の係数 a となる。

図-2 積雪水量 SWE の高度 H 依存性の測定例。直線、破線は回帰直線。

左右の図で目盛りのスケールが異なることに注意。

Fig. 2 Examples of the dependency of snow water equivalent SWE on an altitude H . Broken and solid lines represent the regression lines. Note that the scales of the two figures are different.

表-2に1939~1967年, 1983~1984年, 1996~2000年の係数 a の経時変化を示した。係数 a は一冬間の時間の経過とともに大きくなる傾向が見られる。しかし例外も見られ、係数 a が一冬の時間経過と共に小さくなる場合がある(1953年4月10日~5月14日, 1955年3月12日~4月28日, 1957年2月6日~3月7日, 1965年と1966年の全データ, 1998年3月13日~4月22日)。これらのうち、1965年, 1966年は皆伐が行われた後で森林が存在しないため、風による雪の堆積・削剥が激しかったことが原因として考えられる。Yamada(1982)は高度が森林限界を超えると、風による積雪の削剥が起きることを指摘しており、皆伐を行うと、これと同様の現象が起きるものと考えられる。

このような雪の堆積・削剥は森林が存在する場合においても起こり得る。1996年~2000年の積雪調査時における目視観察から、定性的ながら、年ごとに異なった地点で通常の年よりも多くの雪が堆積している、あるいは削剥を受けている場合が認められた。このことから、係数 a が一冬の時間経過と共に小さくなる場合があることの原因は、降雪時の風向・風速と地形との関係によって雪の削剥・堆積パターンに差異が生じることであると思われる。

表-2において仮に $a > 1.6$ となる回数を数えると、1939~1967年, 1983年は59回の測定中3回(1949年4月28日, 1965年4月14日, 1967年3月22日), 1984年, 1996~2000年は、16回の測定中15回

表 - 2 積雪水量の高度に対する増加率 a

* 小池ら (1985a)

Table 2 Coefficient a : increment of snow water equivalent with an altitude.

* Koike et al. (1985a)

Date year/month/day	Coefficient a (mm/m)	Date year/month/day	Coefficient a (mm/m)	Date year/month/day	Coefficient a (mm/m)
1939/3/26	1.08	1954/3/3	0.46	1966/3/12	0.69
1940/3/14	0.82	1954/4/1	0.78	1966/3/24	0.69
1941/3/14	0.74	1955/3/12	1.05	1967/2/7	1.11
1942/3/18	0.97	1955/4/28	0.47	1967/3/8	1.38
1943/3/18	1.41	1956/2/23	0.54	1967/3/22	1.76
1944/3/6	0.54	1956/3/24	1.13		
1945/3/26	1.03	1957/1/29	0.34	1983/4/6	0.95 *
1946/3/6	0.65	1957/2/6	1.08	1983/4/22	1.04 *
1947/3/1	0.71	1957/3/7	0.84	1984/3/27	1.61 *
1948/2/17	0.78	1958/2/24	0.15	1984/4/7	2.01 *
1948/4/20	0.78	1958/3/25	1.04	1984/4/17	2.07 *
1949/2/10	0.40	1959/3/12	0.37	1984/5/3	2.16 *
1949/3/12	0.91	1960/3/23	0.81	1984/5/18	2.24 *
1949/4/28	1.70	1961/3/13	0.72		
1950/2/8	0.48	1961/4/5	0.73	1996/3/13	2.18
1950/4/8	1.15	1962/3/7	1.04	1996/4/18	2.62
1951/2/16	0.56	1963/3/28	0.45	1996/5/31	3.34
1951/3/24	0.62	1964/3/10	0.62	1997/3/12	2.04
1952/2/14	0.50	1965/2/9	0.77	1997/4/25	2.12
1952/3/20	0.82	1965/3/4	0.62	1998/3/13	1.71
1952/4/27	1.34	1965/3/11	1.50	1998/4/22	1.42
1953/2/24	0.11	1965/3/24	1.31	1999/3/11	2.10
1953/3/12	0.51	1965/3/25	0.45	1999/4/15	2.74
1953/3/24	0.79	1965/4/14	2.48	2000/3/14	1.92
1953/4/10	1.06	1966/1/26	1.08	2000/4/25	2.08
1953/5/14	0.59	1966/3/1	0.87		

(例外 1998年4月22日のみ)である。 a の閾値を1.6から変化させて $a > 1.2$, $a > 2.0$ について同様に数えると, 1939~1967年, 1983年はそれぞれ59回中, 8回, 1回, 1984年, 1996~2000年はそれぞれ16回中, 16回, 12回となる。 a の閾値をいくつに設定するかについての議論はここでは行わないが, 以上の結果から1939~1967年, 1983年と1984年, 1996~2000年との二つの期間に区切ってデータを扱うことが適当と判断した。

1939~1967年および1983年では係数 a が約40~120日の間に約0.5mm m⁻¹から約1mm m⁻¹へと増加しているのに対して, 1984年および1996~2000年では約70~120日の間に約1.8mm m⁻¹から約2.5mm m⁻¹へと増加している。

3. 森林変化の影響

表-2において, 50%択伐(1948~1951年)および皆伐(1961~1963年)の前後で, 係数 a が変化しているかどうかをラベージ検定を用いて検討する。この検定方法は2つのグループの標本に対して, 小サンプルかつ正規分布でなくても分布の位置, ずれ, 散らばり具合を検定できる(例えば石村, 1989)。検定の結果, 50%択伐, 皆伐のいずれの場合もその前後において係数 a の値に変化のないことが確認された(有意水準5%)。

図-3に係数 a を求めた際の高度と積雪水量の相関係数 r , 伐採された森林の材積, および植栽された苗木の本数の時系列を示した。1955年以前と1956年~1967年とで r を比較すると, 後者は前者に比べ

図 - 3 高度 - 積雪水量関係の相関係数 r , 伐採材積, および植栽本数の経年変化。
 r は(1)式の係数 a を求める際の相関係数。

Fig. 3 Time series of the correlation coefficient r for an altitude versus snow water equivalent, volume of cut timber, and the number of planted trees. r is the correlation coefficient for the coefficient a in Eq(1)

て小さい傾向を示している(ラベージ検定で確認済み)。50%択伐の完了時期(1951年)と r が小さくなる時期(1956年頃)との間には数年のずれがあり,これが何に起因しているのか不明である。しかし,皆伐が行われた1961~1963年およびそれ以降も引き続いて r が小さい傾向が見られる。このことから,1956年以降は伐採による風の影響で積雪の削剥・堆積が生じたために(Ⅲ章2節), r が小さくなったものと考えられる。

一方,1996年以降は1955年以前と比較して r は大きな値で安定して推移している(ラベージ検定で確認済み)。これは伐採前の落葉広葉樹に代わって常緑樹であるスギが成長し,林内の風速が低下したために風による降雪・積雪の移動が起きにくくなったためと思われる。

IV. 考 察

1. 積雪密度の時間依存性

Ⅱ章2節の(2)式で表される密度の推定値と1984年(小池ら, 1985b)および1996~2000年の測定値との間に差異があるかどうかを検討してみる。図 - 4 の破線は(2)式から計算した密度, 白丸は1984年の測定

図 - 4 積雪密度の経時変化。日付は1月1日からの日数。○:1984(小池ら 1985b), ●:1996~2000年, ----: (2)式(Tani 1996), —: 1996~2000年のデータに対する回帰式, - - - - -: 1996~2000年のデータに対する95%信頼性区間。

Fig. 4 Changes in snow density with calendar days. The number of days was expressed since 1 January. ○:1984 (Koike *et al.*, 1985b), ●: 1996-2000, ----: Eq(2) (Tani 1996), —: regression line for data for 1996-2000, - - - - -: 95% confidence limits for the 1996 data.

値(小池ら, 1985b), 黒丸は1996~2000年の測定値, 実線は黒丸に対する回帰直線, 点線は黒丸の回帰直

線に対する95%信頼区間である．破線(2式)は測定値のばらつきの範囲内にある．したがって，1953～1958年の密度(2式)と1984年および1996～2000年との間で一冬間の密度の経時変化に差がないと考えられる．

2. 積雪水量の測定誤差

松山(1998a)は，融雪期の積雪観測に伴う誤差について以下のいずれの場合にも積雪深1mあたり積雪水量60～70mmの誤差を含むとしている．(1)積雪密度のサンプリングを1回で済ますこと，(2)一定の全層平均密度を仮定して積雪深のみを観測すること，(3)積雪観測を1地点で代表させること，(4)積雪の表層密度の観測だけから全層密度を推定すること．本研究では(1)～(4)のすべての場合が含まれており，松山(1998a)が述べている程度の誤差が含まれると思われる．

全層平均密度を仮に 0.5 g cm^{-3} とすると，上記の積雪深1mあたり積雪水量60～70mmという値は，12～14%の誤差に相当する．1996年の測定値のばらつき(表-1の下から2行目)，および(2)式による計算値と測定値との差(表-1の最終行)はこの範囲に収まっており，本研究の測定は松山(1998a)の結果と同程度の精度であると考えられる．

3. 係数 a に関する考察

1) 少雪年・多雪年との関係

風間・沢本(1994)によると，少雪年(多雪年)には係数 a が大きく(小さく)なる．以下では宝川初沢流域においてもこの傾向が見られるかどうかを検討する．

図-5に流域下端の気象観測露場の積雪水量 SWE_0 と係数 a との関係を示した．大きなマークは1984年および1996～2000年，小さなマークは1939～1967年および1983年のデータをそれぞれ示している． SWE_0 と a との間に特に関係は見られず，係数 a と多雪年・少雪年(すなわち SWE_0 の大小)とは関係がなさそうである．

この結果は風間・沢本(1994)の結果と矛盾するが，これは対象とした地域が異なるためと考えられる．従って，少雪・多雪と係数 a の大小との関係は，局所的規模または地域規模で議論すべき問題と思われる．

2) 気温の変動による影響

係数 a が1939～1967年および1983年よりも，1984

図-5 初沢流域下端の積雪水量 SWE_0 と積雪水量の高度に対する増加率 a との関係．大きなマークは1984年，1996～2000年，小さなマークは1939～1967年，1983年をそれぞれ表す．○：2月，△：3月，◇：4月，◇：5月．

Fig. 5 Snow water equivalent at the downstream of Shozawa basin (SWE_0) and coefficient a , which represents an increment of snow water equivalent with an altitude. Larger marks represent the data of 1984 and 1996-2000, smaller marks do the data of 1939-1967 and 1983. ○: February, △: March, ◇: April, ◇: May.

年および1996～2000年において大きくなった原因として，1984年および1996～2000年の気温の上昇による流域下流での融雪促進が考えられる．すなわち，気温が高くなると流域下流では融雪が生じ，上流では低温で雪はまだ堆積状態にあり，その結果 a は大きくなる．表-3に1937～1956年(積雪調査期間は1939～1967年)，1983年，1984年，1996～2000年の11～4月の月平均気温を示した．ただし，11月と12月については前年の値(例えば表-3の1983年12月は1982年12月の値)を示した．1937～1956年は気象露場での値，他の期間は藤原 AMeDAS(宝川試験地・気象露場の東北東3km，高度700m)のデータから高度100mあたり 0.6 の気温減率を仮定して算出した宝川試験地・気象露場の値である．1983年と1984年は単年の値であるため，1937～1956年およ

表 - 3 積雪調査時の月平均気温．気温データは1937～1956年のものであり，積雪調査期間である1939～1967年とは一致していない．*11月と12月については前年のデータが示されている．例えば，1983年11月は1982年11月を意味する．

Table 3 Monthly mean temperature for snow survey periods. Temperature data for 1937-1956 do not correspond to the snow survey period of 1939-1967. *The previous year's data are shown in November and December. e.g. Nov. 1983 means Nov. 1982.

Year	Nov Air Temp. (°C)	Dec Air Temp. (°C)	Jan Air Temp. (°C)	Feb Air Temp. (°C)	Mar Air Temp. (°C)	Apr Air Temp. (°C)
1937-1956	5.1	-1.0	-4.2	-3.9	-0.2	5.4
1983 *	5.8	0.4	-2.9	-4.0	-0.2	8.0
1984 *	3.5	-2.8	-5.6	-6.3	-2.1	5.5
1996-2000 *	4.5	-0.7	-2.9	-3.5	-0.1	5.6

び1996～2000年に比べて大きな変動が含まれている月もある．12～3月の月平均気温は，1983年12月の0.4を除いて，すべての期間で氷点下となっている．

石井(1959)によれば日平均気温が-3℃以上で融雪は本格化するので，表-3より12月と3月には融雪が起きていたと考えられる．村上ら(1999)は宝川試験地初沢流域の融雪期(2～6月)のハイドログラフを1938～42年，1943～47年，1953～57年，1965～69年，1975～79年，1985～89年，1993～97年について5年平均の値で示した．それによると，いずれの期間においても融雪が本格化するのは3月初旬から中旬以降であった．しかも3月中の融雪量は，1993～97年(係数 a が大きな値を示した期間)と1938～42年，1943～47年，1953～57年，1965～69年(係数 a が小さな値を示した期間)とで大きな違いが見られない．

また，1984年および1996～2000年は，1937～1956年および1983年と比較して特に目立った気温の上昇はないことから(表-3)，流域下流での融雪促進が係数 a を増大させたとは考えにくい．

一方，表-3から1984年は全期間を通じて低温で推移している．このため，1983～1984年の冬には例年ならば流域上流で降雨になるはずの初冬および春先の降水が降雪となり，高標高の地点でより多くの降雪が生じ，その結果係数 a が1982～1983年の冬の約2倍になった可能性がある．しかし，係数 a は雨の場合と雪の場合とで値が異なり(Tani, 1996)，また降雨，降雪の別だけで決まるものでもない．このため，1984年の低温傾向と係数 a との関係は，係数

a を決めているメカニズムが解明されない限り現時点ではこれ以上の考察は困難である．

3) 森林変化による影響

係数 a の変化の原因として森林施業の影響が考えられる．50%択伐，および皆伐の期間の前後では係数 a に大きな変化は見られなかった(Ⅲ章3節)．また，以下のことから係数 a は植栽後の森林成長による影響も受けていないと考えられる．すなわち，植栽から17～19年後の1983年には係数 a は1967年以前と同程度の0.95～1.04であったものが，翌1984年には1.61～2.24となっている(表-2)．この違いは1年を隔てたものであるため，森林成長によるものとは考えにくい．

4) 流域上流での降雪量の増加

このように上記の2つの要因(2)項，3)項)が係数 a の増加に関係している可能性は少なく，係数 a が増加した原因は降雪量が流域上流で増加したことによると推察される．このことは，1939～1967年および1983年と，1984年および1996～2000年とにおいて降雪過程に何らかの変化が生じたことを意味する．1997年には宝川試験地においても，宝川試験地から近距離にある巻機山においても，係数 a が約2 mm m⁻¹となり既知の値(約1 mm m⁻¹)と比較して大きくなった(表-2，松山，1998a)．これは1997年の宝川試験地と巻機山を含む地域の係数 a が約2 mm m⁻¹であったことを示している．

吉野(1986)は山地における海拔高度と雨量との関係が，低気圧，梅雨前線，台風などの降雨をもたらす原因のほか，雲底高度，風速，風向との組み合わせで決まる，としている．もし仮に，山地の降雪

と高度との関係が降雨の場合と同様の要素によって支配されているとすると、総観規模擾乱パターンの経年変化と係数 a との間に何らかの関係が見いだせる可能性がある。この場合、係数 a の増加傾向が宝川試験地・巻機山といった限定的な地域だけではなく、全国的規模で起きていることもありえ、今後解析を進める必要がある。

V. まとめと今後の展開

群馬県水上町の利根川源流域に位置する宝川試験地・初沢流域(118ha, 高度差570m)において、1939～1967年、1983～1984年、1996～2000年に積雪調査が行われ、積雪水量が測定された。積雪密度は高度にあまり依存せず、日付の関数として表現された。積雪水量の高度に対する増加率を表す係数 a の値は、一冬間の時間経過とともに増加する傾向を示した。また、係数 a の値は1939～1967年および1983年では、1月1日を起日として約40～120日の間に約0.5mm m^{-1} から約1mm m^{-1} へと増加したのに対して、1984年および1996～2000年では約70～120日の間に約1.8mm m^{-1} から約2.5mm m^{-1} へと増加した。

係数 a の大小と少雪年、多雪年との関係を検討した結果、両者の間に特に関係は見出せなかった。係数 a が1984年および1996～2000年に増加した原因として、第一に気温の影響、第二に森林変化の影響について検討した。その結果、両者が係数 a の増加に関係している可能性は少なく、流域上流での降雪量の増加が係数 a の増加をもたらしていると推察された。

本研究を始めた動機は宝川試験地での森林の施業・成長と水収支との変化を明らかにすることであった(I章)。今後、積雪水量と流出量との関係を解析して両者が水収支的に妥当であるかどうかを検討し、さらに融雪流出と植生変化との関係を明らかにする予定である。なお、積雪水量と流出量との関係は1958年以前のデータについては村上ら(1997)が予備解析を行っており、妥当な水収支が得られている。

山地の積雪は水資源としての価値を持つばかりではなく、動植物の分布にも影響する。このため、係数 a の増加が今回対象とした地域のみに見られる現象なのか、より広域に起きている現象なのか、今後とも観測データの蓄積を図ることが必要である。

謝辞：論文で用いたデータの多くは森林総合研究所

(旧 林業試験場)の諸先輩方の多大なる努力によって蓄積されてきた貴重なものです。特に吉野昭一さん(現在 林業科学技術振興所)は半世紀以上に渡って宝川試験地の維持管理にご尽力してられました。また、森林総合研究所の大谷義一さん、渡辺力さん、伊藤優子さん、久保田多余子さん、北村系子さん、三浦覚さん、志水俊夫さん、坪山良夫さん、野口正二さん、川浪亜紀子さん(現在 林野庁治山課)、元森林総合研究所の細田真由美さんには積雪調査にご同行、ご協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- Black, B., and Elder, K. (2000) Combining binary decision tree and geostatistical methods to estimate snow distribution in a mountain watershed, *Water Resour. Res.*, **36**, pp. 13-26.
- Cline, D., Elder, K., and Bales, R. (1998) : Scale effects in a distributed snow water equivalence and snowmelt model for mountain basins, *Hydrol. Process.*, **12**, pp. 1527-1536.
- Elder, K., Rothenthal, W., and Davis, R. E. (1998) Estimating the spatial distribution of snow water equivalence in a montane watershed, *Hydrol. Process.*, **12**, pp. 1793-1808.
- 石井幸男 (1959) : 融雪の研究, 『積雪基礎調査』, 北海道電力・札幌管区気象台, 84 pp.
- 石村貞夫 (1989) : 統計解析のはなし, 東京図書, pp. 257-276.
- 風間聡・沢本正樹 (1994) : 積雪のある流域における水収支について, 水工学論文集, **38**, pp. 113-118.
- 風間聡・沢本正樹 (1995) : NOAA/AVHRR を用いた積雪深分布および水資源量推定, 水文・水資源学会誌, **8**, pp. 477-483.
- 小池俊雄・高橋裕・吉野昭一 (1985a) : 積雪面積情報による流域積雪水量の推定, 土木学会論文集, **357**, pp. 159-165.
- 小池俊雄・高橋裕・吉野昭一 (1985b) : 融雪量分布のモデル化に関する研究, 土木学会論文集, **363**, pp. 165-174.
- Luce, C. H., Tarboton, D. G., and Cooley, K. R. (1998) : The influence of the spatial distribution of snow on basin-averaged snowmelt, *Hydrol. Process.*, **12**, pp. 1671-1692.

- 松山洋 (1998a): 巻機山における積雪密度・積雪水当量の季節変化と高度分布, 水文・水資源学会誌, **11**, pp. 117-127.
- 松山洋 (1998b): 日本の山岳地域における積雪水当量の高度分布に関する研究について, 水文・水資源学会誌, **11**, pp. 164-174.
- 村上茂樹・坪山良夫・志水俊夫 (1997): 森林流域における融雪流出の研究 () 長期観測に基づく流域積雪水量と融雪流出, 1997年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp. 124.
- 村上茂樹・細田真由美・吉野昭一 (1999): 森林流域における融雪流出の研究 () 森林の施業・成長と流況変化, 1999年度日本雪氷学会 全国大会講演予稿集, pp. 196.
- 農林省林業試験場 (1961): 森林理水試験地観測報告, pp. 119-171.
- Shimizu, T., Kikuya, A., and Tsuboyama Y. (1992): Influence of changes in vegetation upon the runoff characteristics of mountainous drainage basins, Bull. For. & For. Pro. Res. Inst., **363**, pp. 21-39.
- Shimizu, T., Tsuboyama Y., and Hosoda, I. (1994a): Effect of counter-line strip-cutting on stream flow (I) Long-term runoff characteristics during the warm season, J. Jpn. For. Soc., **76**, pp. 393-401.
- Shimizu, T., Tsuboyama Y., and Hosoda, I. (1994b): Effect of counter-line strip-cutting on stream flow (II) Short-term runoff characteristics during the warm season, J. Jpn. For. Soc., **76**, pp. 492-499.
- 志水俊夫・吉野昭一 (1996): 等高線にそった帯状伐採が融雪流出に及ぼす影響, 雪氷, **58**, pp. 3-10.
- Stähli M., Papritz, A., Waldner, P., and Forster, F. (2001): Time-space linear regression analysis of the snow cover in a pre-Alpine semi-forested catchment, Annals of Glaciology, **32**, pp. 125-129.
- Tani, M. (1996): An approach to annual water balance for small mountainous catchments with wide spatial distributions of rainfall and snow water equivalent, J. Hydrol. **183**, pp. 205-225.
- 東京営林局 (1943): 宝川森林治水試験報告, pp. 121-183, 東京営林局.
- Yamada, T. (1982): Studies on accumulation-ablation processes and distribution of snow in mountain regions, Hokkaido, Contr. Inst. Low Temp. Sci., **A31** pp. 1-33.
- 吉野正敏 (1986): 新版 小気候, pp. 148-153, 地人書館.
- 吉野昭一・菊谷昭雄 (1984): 高海拔流域における森林伐採と暖候期の流出量変化 第1報 宝川試験地の本流について [宝川森林治水試験地 第4回報告], 林試研報, **331**, pp. 127-145.
- 吉野昭一・菊谷昭雄 (1985): 高海拔流域における森林伐採と暖候期の流出量変化 第2報 宝川試験地の初沢流域, 初沢2号沢および初沢3号沢流域について [宝川森林治水試験地 第5回報告], 林試研報, **333**, pp. 37-65.
- (受付: 2002年2月8日, 受理: 2002年10月2日)