

積雪面積情報の利用による流域積雪水量推定に関する研究
Estimation of Basin-Wide SnowWater Equivalent Using Snow Covered Area

東京大学工学部 正員 高橋 裕
農林水産省林業試験場 吉野 昭一
東京大学大学院 学生員 ○小池 俊雄

1. はじめに

融雪現象の水文学的アプローチにおいて最も推定が困難であった水文量は流域積雪水量であるが、近年のリモートセンシング技術の発達に伴い、我国でも融雪期における積雪水量のリアルタイムな推定の可能性が示されている。¹⁾²⁾ 欧米ではすでに、LANDSATデータから得られる積雪面積情報を組み入れた融雪流出モデルが提案されるなど、³⁾⁴⁾ 積雪分野におけるリモートセンシングの応用は盛んであるが、この背景には、航空機等による積雪面積の減少のパターンの観測やそれに伴う流出に関する研究が、⁵⁾⁶⁾ 水資源管理を目的として従来から行われてきたという経緯がある。本研究では、人工衛星の増加に伴い、将来、質・観測頻度等の点で向上が見込まれる積雪面積情報の利用のための基礎研究として、多雪域の山地小流域において、融雪期に積雪面積の変化の観測を実施して、水文観測から得られる積雪水量との関係を比較した。また、水収支式を用いて積雪水量を算定する際に必要な地下水貯留量の推定のために、河川表流水の電気伝導度を用いて融雪流出時における地下水流出成分の分離を試みたので合わせて報告する。

2. 対象流域の概要

本研究で対象とした流域は、農林水産省林業試験場宝川試験地の初沢・本流試験流域の2流域でその概要を図1に示す。高度分布は、初沢流域で800～1350 m、本流流域で800～1950 mで、図2,3に標高に対する累加面積率($A_c(h)$:流域内最低標高からhまでの面積率の和)を示す。表層地質は花崗岩類・第3紀層(御坂層)で、所々に第4紀層の段丘と押出が見られる。⁷⁾ 植生は主にブナ林で、ヒバ・ナラが混着していたが、伐採が進み、跡地にはスギ・カラマツが植林されている。⁸⁾ なお、樹林限界は1500m付近にある。⁷⁾ 水文観測点ならびに、積雪面積の観測地点、スノーコース(1982年4月17～18日)を図1に示す。

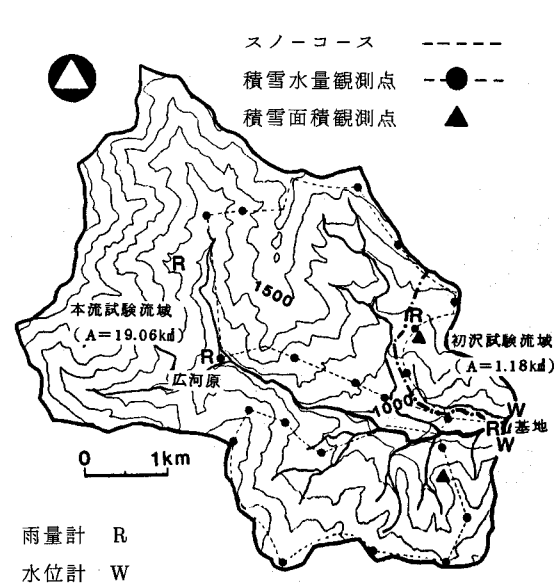


図1 対象流域の概要

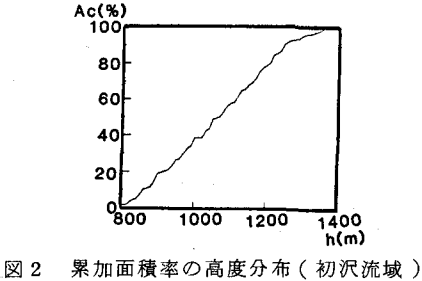


図2 累加面積率の高度分布(初沢流域)

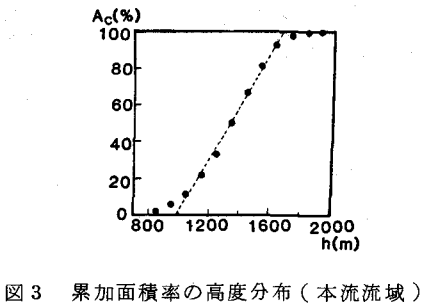


図3 累加面積率の高度分布(本流流域)

3. 積雪面積の変化

融雪期に流域の大半を見渡し、アプローチが容易な積雪面積の観測点を流域内に2カ所設定して、3月下旬から5月下旬にかけて、初沢・本流流域の積雪面積の変化の観測を行った。積雪面積率(A_s)は、積雪分布の程度を0, 25, 50, 75, 100%の5段階に区分して、その分布範囲を現地で $1/25000$ の地形図に書きこみ、プラニメータで各分布帯の面積を計測して算定した。図4に各流域における観測例を示し、表1には積雪面積率の算定値を示す。初沢流域では、融雪の進行とともにまず下流左岸の急勾配地域で消雪が進み、以後はほぼ標高に添って無雪域が拡大する。ただし、流域上流端の急勾配地には融雪早期に無雪域が現われ、最終的には上流の平坦部に積雪域が残る。本流流域では、流域上流の広河原を中心とする一帯で消雪が遅れ、流域上流端の分水嶺付近における無雪域の出現は早い、無雪域はほぼ標高に添って拡大する。図5は、同年5月15日のLANDSAT MSSデータのデジタル解析¹⁾によって得られた積雪分布図であるが、目視による同日の積雪分布の観測結果によく一致しており、両者の整合性が示されている。

表1 積雪面積率(%)の変化

	3/23	4/18	4/24	5/2	5/10	5/15	5/26
初沢	100	66	56	30	20	4	0
本流	100	100	99	92	77	58	38

4. 地下水流出成分の分離

積雪面積情報に対する積雪水量(S_s)は、水収支式

$$S_s = \Sigma Q + \Sigma E - \Sigma P - S_{G1} + S_{G2} \quad (1)$$

ここに、 ΣQ , ΣE , ΣP : 積雪面積観測日から融雪終了日までの流出高、蒸発散量、降水量の総和

S_{G1} : 積雪面積観測日における地下水貯留量, S_{G2} : 融雪終了日における地下水貯留量

から算出され、その中で、蒸発散量および地下水貯留量の算定にはそれぞれ、

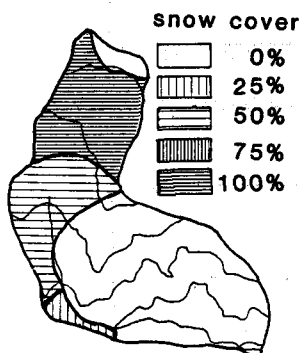
$$\Sigma E = E_p \cdot A_n \cdot d \quad (2)$$

$$S_G = \sqrt{Q_0 / A_u} \quad (3)$$

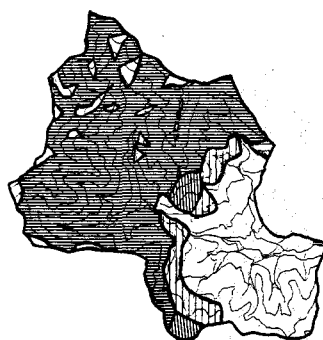
ここに、 E_p : ハーモン式による日蒸発散能, A_n : 平均無積雪面積率, d : 日数

Q_0 : 地下水流出の初期流出高, A_u : 分数減水定数⁹⁾

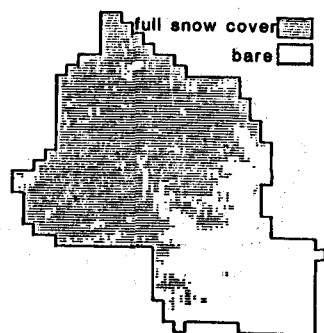
が用いられる。¹⁾ここで、流量が1日のうちで時間変動する融雪期においては、(3)式中の Q_0 の推定が困難であるため、流出成分の分離が必要となる。日野・長谷部¹⁰⁾は、日融雪入力を白色雑音とみなし、融雪期の流量時系列の自己回帰係数から流出分離日数を決定し、数値フィルタを用いて、地下水・表面流出成分の分離を行っている。また、小林¹¹⁾は、小試験流域の融雪期の河川水・湧水の水温観測より、融雪期には地下水帯からの流出が主であるとしている。一方、Nakamura¹²⁾は降雨流出における電気伝導度の観測から流出成分



初沢流域 5月2日 ($A_s = 30\%$)



本流流域 5月15日 ($A_s = 58\%$)



本流流域 5月15日 ($A_s = 60\%$)

図4 積雪面積の観測例

図5 積雪分布図 (LANDSAT)

の分離を行っている。筆者らは、流量の時間変動に合わせて河川水の電気伝導度が変化することに注目し、融雪期における河川水の電気伝導と水温の連続観測結果を用いて流出成分の分離を試みた。

混合方程式

$$\begin{cases} C_s Q_s + C_g Q_g = C Q \\ Q_s + Q_g = Q \end{cases} \tag{4}$$

ここに、 C_s ：表面・中間流出の電気伝導度、 Q_s ：表面・中間流出成分

C_g ：地下水流出の電気伝導度、 Q_g ：地下水流出成分

C ：河川水の電気伝導度、 Q ：河川流量

を連続する観測 $i \sim j$ 間で連立させ、この間で

$$C_{si} = C_{sj} = C_s \text{ (一定)} \tag{5}$$

$$C_{gi} = C_{gj} = C_g \text{ (一定)} \tag{6}$$

$$Q_{gi} = Q_{gj} = Q_g \text{ (一定)} \tag{7}$$

を仮定すると、

$$\begin{cases} C_s Q_{sk} + C_g Q_{gk} = C_k Q_k \\ Q_{sk} + Q_{gk} = Q_k \end{cases} \quad (k = i, j) \tag{8}$$

となり、連立方程式(8)より

$$Q_g = \frac{(C_j - C_i) Q_i Q_j}{(C_g - C_i) Q_i - (C_g - C_j) Q_j}$$

が求められ、地下水流出成分が分離される。図6に、初沢流域における無雪期無降雨日の河川水の電気伝導度から得られた(流量)×(電気伝導度)と流量の関係を示すが、この関係が原点を通る直線で近似できることから、 C_g は流量にかかわらず一定と定めた。一方、本流流域では無雪期に十分な C_g の観測ができなかったために、初沢流域と同じ値を用いた。また、融雪期の電気伝導度の観測時に採水を行い、これに含まれる金属イオンの定量分析¹³⁾の結果を図7に示すが、カルシウムイオンが電気伝導度の変化に追随していることが示されている。図8,9はそれぞれ初沢・本流流域の流出成分の分離の結果を示しており、初沢では流量の変化とともに地下水流出成分も変化し、本流では地下水流出成分がほぼ一定であることが示されている。

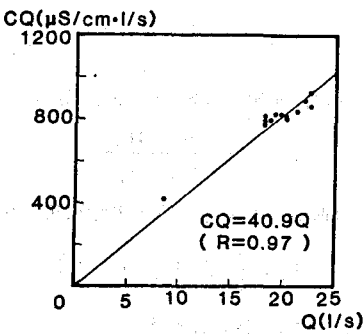


図6 (流量)×(電気伝導度)と流量の関係(初沢)

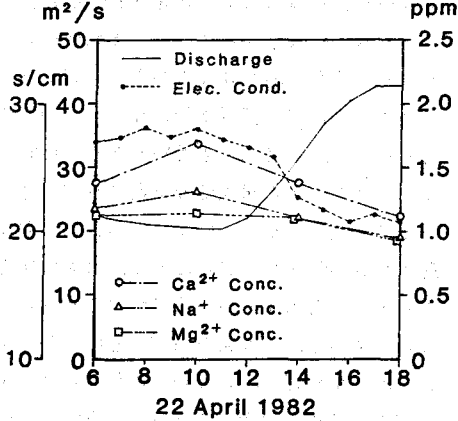


図7 金属イオンの定量分析(初沢)
(I.C.P.発光分析)

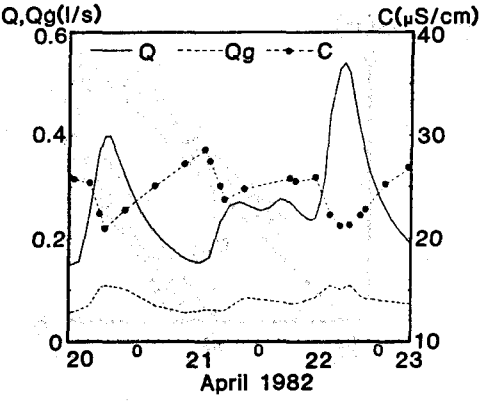


図8 流出成分の分離の結果(初沢)

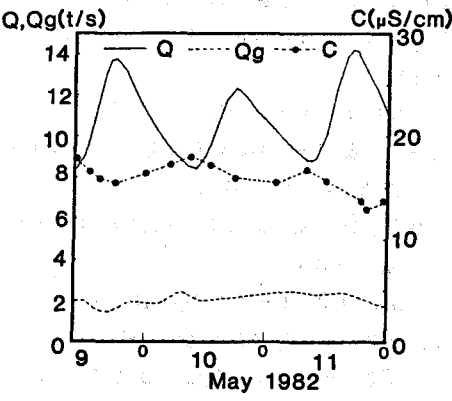


図9 流出成分の分離の結果(本流)

5. 積雪面積率と積雪水量との関係

積雪水量の分布を標高の関数として、各標高における平均積雪水量を $S(h)$ とすると、積雪水量 (S_s) は、

$$S_s = \int_{H_L}^{H_H} S(h) \cdot A(h) dh \quad (10)$$

ここに、 $A(h)$: 標高 h における面積率、 H_H : 流域内最高標高、 H_L : 流域内最低標高

と表現される。ここで、

- (i) 雪線は標高に従って移動し、雪線より上については標高 h における平均積雪量 $S(h)$ は雪線の標高 H_0 と h との差に比例する。

$$S(h) = \begin{cases} a(h - H_0) & (h \geq H_0) \\ 0 & (h < H_0) \end{cases} \quad (11)$$

- (ii) 累加面積率 $A_c(h)$ は、 h と H_L との差に比例する。

$$A_c(h) = \frac{h - H_L}{H_H - H_L} \quad (12)$$

の2つの仮定をおくと、積雪水量は10式から

$$S_s = \frac{1}{2} a (H_H - H_L) A_c^2 \quad (13)$$

ここに、 A_s : 積雪面積率

と表現される。²⁾ 図10, 11には、1982年4月17~18日の積雪調査より得られた積雪水量の高度分布が示されており、積雪面積の変化の観測結果と合わせて、対象流域において(i)の仮定が成り立ち、また、図2, 3より(ii)の仮定が成り立つことも示されている。ここで、積雪水量の高度分布11式について考察する。

山田¹⁴⁾は、堆雪期・融雪期を通して積雪水量が直線的な高度分布を保ち、その傾きは融雪期に融雪前線が樹林限界に達した時期に最大となり、その後全山が融雪状態になると融雪速度は高低にかかわらず一定となって、直線の傾きは一定に保たれることを、大雪山旭岳面斜面における観測から示している。この考えに基づき、全流域が融雪状態に入り、融雪速度が一定であると仮定すれば、11式における係数 a は一定となり、13式より積雪水量は積雪面積率の自乗に比例するという結果を得る。一方、融雪分布において気温融雪が支配的な場合を考えると、気温の遞減により高所ほど融雪速度は小さくなる。この関係を図示したのが図12で、雪線が $h = H_L$ ($A_s = 1$) のときの積雪水量の高度分布を

$$S(h) = a_0(h - H_L) \quad (14)$$

融雪が進み、雪線が $h = H_0$ に移動したときの分布を

$$S'(h) = a(h - H_0) \quad (15)$$

この間の融雪量を m_0 ($h = H_0$)、 m_H ($h = H_H$) とすると

$$m_0 = k \sum T \quad (16)$$

$$m_H = k \sum \{ T - \Delta T (H_H - H_0) \} \quad (17)$$

ここに、 $\sum T$: $h = H_0$ における積算暖度 k : 融雪係数

ΔT : 標高による気温の遞減率 ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

と表わされ、また、

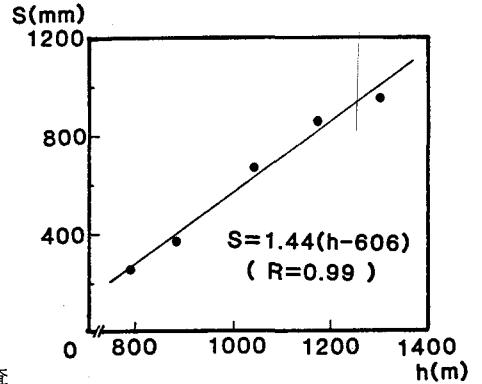


図10 積雪水量の高度分布 (初沢)

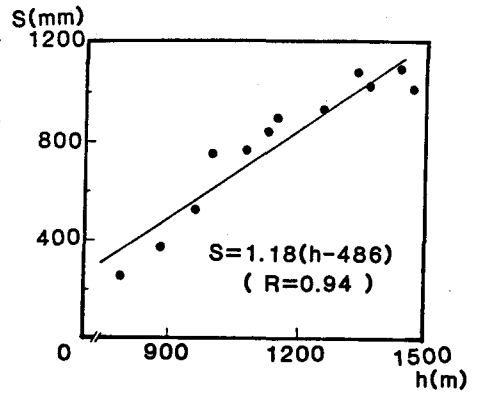


図11 積雪水量の高度分布 (本流)

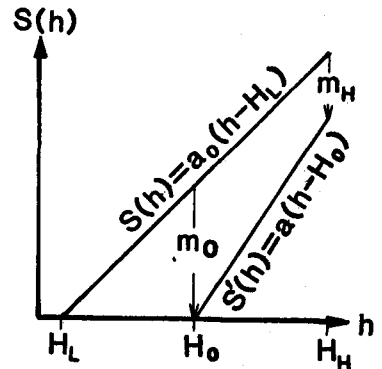


図12 積雪水量の高度分布の変化

$$m_0 = S(H_0) = a_0(H_0 - H_L) \quad (18)$$

$$\therefore m_H = a_0(H_0 - H_L) - k(H_H - H_0)\Sigma\Delta T \quad (19)$$

したがって、融雪後の $h = H_H$ における積雪水量は、(14), (19)式より

$$S'(H_H) = S(H_H) - m_H = (a_0 + k\Sigma\Delta T)(H_H - H_0) \quad (20)$$

$$\therefore a = a_0 + k\Sigma\Delta T \quad (21)$$

よって、(13)式より積雪水量は

$$S_s = \frac{1}{2}(a_0 + k\Sigma\Delta T)(H_H - H_L)A_s^2 \quad (22)$$

と表現される。本研究では、初沢・本流流域において

I. 雪線が $h = H_L$ ($A_s = 1$)にあるときの積雪水量より、逆算して求められた a_0 の値を用い、 $a = a_0$ (一定)とした場合の(13)式の適合性

II. Iで得られた a_0 に気温の逡減による融雪量の減少を考慮した (22) 式の適合性についての検討を行った。

6. 解析結果と考察

表2に、水収支式(1)の各項の計算値、地下水流出成分、積雪面積率を示す。河川水の電気伝導度は、3～6日の継続観測を、3月下旬、4,5月の上・下旬の計5回行ったが、積雪面積の観測日に電気伝導度の観測が行われていない場合には、地下水貯留量の算定値として、前後日の値かあるいはその平均値を用いた。また融雪終了日は晴天日に流量の時間変動がなくなった日と定義し、初沢流域では5月26日、本流流域では7月15日を融雪終了日とした。図13, 14に、対象流域における積雪水量と積雪面積率の観測値と、(13)式、(22)式による計算値を示す。なお、(22)式による計算には、融雪係数 $k = 5.25 \text{ mm}^\circ\text{C day}$ (奥只見における観測の平均¹⁵⁾)、気温逡減率 $\Delta T = 0.006^\circ\text{C}/m$ を用いた。図13より初沢流域においては、気温の逡減を考慮した(22)式の適合性が優れているが、本流流域においては、積雪水量の高度分布直線の傾きを一定とした(13)式の適合性が良いことが図14

表2 算定の結果

	初 沢 流 域						本 流 流 域					
	3/23	4/18	4/24	5/2	5/10	5/15	4/24	5/2	5/10	5/15	5/26	
ΣQ (mm)	904	473	375	210	75	33	1976	1653	1203	746	636	
ΣE (mm)	45	43	41	34	25	16	106	106	104	101	92	
ΣP (mm)	332	128	113	106	38	29	562	552	457	444	404	
Q_0 (mm)	4.86		6.80		2.71		1.07		2.17		1.17	
S_{G1} (mm)	22.3	23.4	23.3	20.0	16.8	15.6	25.6	34.1	36.5	33.4	26.7	
S_{G2} (mm)	12.6						33.1					
S_s (mm)	607	378	292	132	58	18	1527	1205	846	602	330	
A_s (%)	100	66	56	30	20	4	99	92	77	58	38	

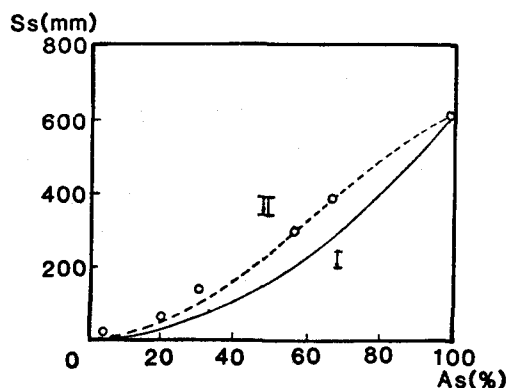


図13 積雪水量と積雪面積率の関係(初沢)

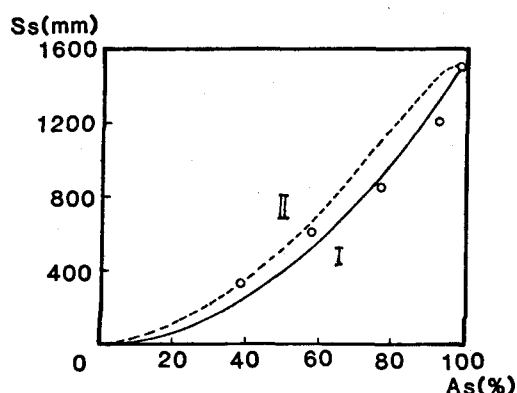


図14 積雪水量と積雪面積率の関係(本流)

によって示されている。両流域で関係式の適合性が異なるのは、初沢流域の雪線の出現時期が3月下旬であり、この時期から4月中旬にかけては流域全体がまだ融雪状態になく、積雪水量の高度分布直線の傾きは増大期にあるため(2)式の適合性がよく、一方、本流流域の雪線の出現は4月下旬で、この時期には流域全体が融雪状態にあるために、積雪水量の高度分布直線の傾きが一定となり、(3)式の適合性が良いと考察される。

7. 結 論

- (i) 山地小流域における河川水の電気伝導度の観測により、融雪流出の流出成分の分離が可能である。
- (ii) 積雪面積率と積雪水量の関係は、融雪速度が流域全体で一定であると考えた場合の

$$S_s = \frac{1}{2} a (H_H - H_L) A_s^2$$

と、気温の通減により高所ほど融雪速度が小さくなることを考慮した場合の

$$S_s = \frac{1}{2} (a_0 + k \sum \Delta T) (H_H - H_L) A_s^2$$

で表現され、流域の融雪状態により適合性が異なる。

謝辞 本研究を進めるにあたり、貴重な参考資料の提供と御指導を賜りました林業試験場中野前防災部長、法政大学西谷教授、また数多くの助言を頂いた東京大学中村助教授、虫明助教授、安藤助手に深く感謝いたします。また、金属イオンの定量分析に関しては、東京大学工学部の合志研究室、理学部の不破研究室の各位に御指導と御協力を頂きました。さらに、土木研究所水文研究室、気象庁業務課、自然環境科学研究所から種々の観測機器を借用し、観測にあたっては東京大学大学院の金尾、桑原、山田氏らの協力を得ました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 高橋他：LANDSAT積雪面積情報の利用による流域積雪水量推定に関する研究，第26回水講，pp171-178，1982.
- 2) 高橋他： 同上（第2報） 第37回水講，pp697-698，1982.
- 3) Martinec et al：Discharge Forecasts in Mountain Basins Based on Satellite Snow Cover Mapping, NASA Conference Publication 2116, pp.223-238, 1980.
- 4) Hannaford et al：Application of Satellite Imagery to Hydrologic modeling Snowmelt Runoff in Southern Sierra Nevada, NASA Conference Publication, 2116, pp.201-222, 1980.
- 5) United States Department of Commerce：Snow Hydrology (reprint)
- 6) Garstka et al：Factors Affecting Snowmelt and Streamflow, 1957.
- 7) 東京営林局：宝川森林治水試験地報告，pp.33-39，1941.
- 8) 永見他：森林伐採にともなう暖候期間の流出量変化，宝川森林治水試験地第3回報告，pp61-64，1964.
- 9) 安藤他：渇水時の河川流出量の予測手法，第2回水資源シンポジウム前刷集，pp.491-496，1982.
- 10) 日野他：融雪時期の流出解析，第26回水講，pp.177-181，1982.
- 11) 小林：河川水温からみた流出成分の分離，日本雪氷学会秋季大会予稿集，pp. 262，1982.
- 12) Nakamura：Runoff Analysis by Electrical Conductance of Water, Journal of Hydrology 14, pp.197-212, 1971.
- 13) 原口他：I C P 発光分析，化学の領域第36巻第2号，pp.59-68，1982.
- 14) 山田他：大雪山斜面における積雪の分布と堆雪・融雪過程 低温科学物理篇第37輯，pp.1-10，1978.
- 15) 武田：LANDSAT雪線情報と積算暖度法による流域，地域最大積雪水量算定に関する研究，東京大学博士論文，1980.