

土木学会論文報告集  
第311号・1981年7月

【論 文】

## LANDSAT 雪線情報と積算暖度法による流域 最大積雪水量算定に関する研究

ESTIMATION OF BASIN-WIDE SNOW WATER EQUIVALENT  
USING LANDSAT-DERIVED SNOW LINE  
AND DEGREE-DAY METHOD

武田 要\*・高橋 裕\*\*

By Kaname TAKEDA and Yutaka TAKAHASI

### 1. 研究の背景と目的、手順

山地の積雪は重要な水資源である。これは、水収支の中の大きな貯留成分であり、春以降の融雪期に徐々に融け出して、河川や貯水池へ豊富な水量をゆっくりと供給する（ときには急激な融雪により融雪洪水の発生することもあるが）というきわめて良質な水資源である。

本州日本海側各地方の年間降水量は、日本全体の平均年間降水量を大きく上まわり、そして、それらの地方の冬季降水量、すなわち積雪は年間降水量の40%強を占めていることが石原<sup>1)</sup>によって明らかにされている。

積雪の水資源解析は、積雪という水の位置のエネルギーから電力のエネルギーへの変換、かんがい用水、上水道、工業用水等の各種の利水に対する水供給を対象として、それの量的評価を目的として行われる。したがって、河川流域、あるいはダム集水域のある冬の積雪水量最大期における流域全体の積雪水量（積雪を同じ重さの水量に換算した量）の算定が、積雪の水資源解析の主要な部分の一つである。このために、従来、冬の積雪水量最大期にスノー・サーベイが行われてきた。スノー・サーベイとは、流域内の数多くのサンプリング点で、スノーランプ<sup>2)</sup>という測器で積雪水量を測定し、それらを集計して流域積雪水量を求めるという調査である。

スノー・サーベイは、アメリカ合衆国では1900年代初期頃より実施されてきた。アメリカ合衆国におけるスノー・サーベイは、流域内に代表的なスノー・コースを1つ程度設定し、そのコース上の数個のサンプリング点の積雪水量の平均値を求めて、それを流域積雪水量のインデックスとするという方法である。インデックス積雪水量のデータがかなりの年数にわたって蓄積されたころ、インデックス積雪水量と春から夏へかけての河川の

季節総流量との相關図を作成し、以後、毎冬のインデックス積雪水量から季節総流量の予測<sup>3)</sup>が行われている。

日本における最初のスノー・サーベイは、1948年北海道石狩川支流忠別川流域（流域面積256km<sup>2</sup>）で、北海道大学中谷宇吉郎指導のもとに菅谷重二<sup>3)</sup>によって行われた。以後、日本の水力電源開発時代において日本の各積雪地域でスノー・サーベイが活発に展開されるようになった。日本では、スノー・サーベイの歴史が浅かつたため、流域内に数多くのサンプリング点を取り、各サンプリング点の積雪水量を流域全体について積分し、流域積雪水量を算定するという方法をとっている。

しかし、日本におけるスノー・サーベイは1954年をピークとして、以後、実施件数、延調査面積とも図-1に示すように次第に減少し始め、最近では二、三の流域を除いて、スノー・サーベイはほとんど実施されていない。図-1の1954年までは石原<sup>4)</sup>が、それ以降は大沼<sup>5)</sup>が資料を収集し整理したものである。流域積雪水量の水文情報は水管理の面からみて依然として必要な情報であるにもかかわらず、スノー・サーベイが日本において衰退化した原因は、冬山の現地踏査がきわめて危険の多い調査であるため、スノー・サーベイが次第に前時代的な

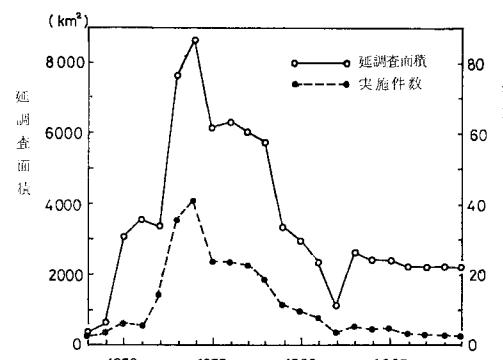


図-1 日本におけるスノー・サーベイの実施件数  
と延調査面積

\* 正会員 科学技術庁資源調査所主任調査官

\*\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

調査方式になってきたためと考えるべきであろう。

1963年北陸豪雪を契機として、航空機による積雪深測定の研究が一時活発化した<sup>6),7)</sup>。これらの研究は現在のリモートセンシングに相当するが積雪深を直接測定対象としたため航空写真の判読誤差が大きい場合があり、スノーラーベイ方式の代替となるには至らなかつた。

1972年アメリカ合衆国は、地球資源探査や環境監視を目的として人工衛星 LANDSAT-1(旧名 ERTS)を打ち上げた。この衛星データのアメリカ合衆国における水文学分野の利用試験研究で、雪線(積雪域と無雪域の境界)の抽出、積雪面積の測定に関する研究が活発に行われた。そして、前記のスノーラーベイのインデックス積雪水量を、LANDSATデータによる積雪面積に置き換える試みが行われ、3月末か4月初めの積雪面積と河川の季節総流量の相関図が、いろいろな河川流域をまとめて作られた<sup>8)~10)</sup>。また LANDSAT は同じ地域を18日おきの周期で観測するので、積雪面積の季節変化と流量の変化との対応も試みられている<sup>11)</sup>。す

なわちアメリカ合衆国においては、従来のスノーラーベイ方式が衛星によるリモートセンシング方式へと大きく移行しつつある。

1975年には LANDSAT-2 が、1978年には LANDSAT-3 が打ち上げられ、1979年1月には日本においても地球衛星観測センターが設置され、国内での LANDSAT データの直接受信が可能となった。また、1980年代には、日本独自の地球観測衛星の打ち上げ計画が進められている。ここにおいて、日本の積雪調査にも、衛星データを中心とした方式が当然導入されるべき時期にいたったといつてよい。しかし、現在まで日本では人工衛星データを利用して、流域あるいは地域全域の積雪水量を算定する研究はほとんど行われていないといつてもよい状況である。

この研究は、以上の背景から LANDSAT データを利用して、ある冬の流域最大積雪水量を算定することを目的として行ったものである。この研究の流域最大積雪水量とは積雪水量最盛期のある特定日における流域全体の積雪水量をさるものとする。

研究の手順は以下に示すとおりである。

- ① 研究対象流域として、奥只見ダムサイトより上流の只見川流域を選ぶ。
- ② 同流域について、1979年3月29日、5月4日、5月22日の LANDSAT-3 のデータを入手する。

③ LANDSAT データから上記各日の流域内雪線を抽出し、地形標高図と重ねる。雪線上に最大積雪水量推定のための推定代表点を数十地点選定する。

④ 雪線上の地点では、その地点の最大積雪水量時の積雪が、雪線が出現した日までに完全に融解し終わることになる。したがってその地点の融雪開始日から雪線出現日までの総融雪量が求まれば、それがすなわちその地点の最大積雪水量である。この総融雪量を積算暖度法(積算暖度法の内容については後章で詳述する)により求める。融雪開始日から雪線出現日までの間に降雪があれば、その分だけ雪線出現日が遅れることになるので、積算暖度法による総融雪量を融雪開始日における最大積雪水量とするならば、その中には当然その間の降雪量が含まれていることになる。したがって、融雪開始日における最大積雪量の推定値は途中降雪の分だけ過大に推定したことになる。しかし、一般に融雪期には降雪量は少なく、途中降雪を無視してもよい場合が多い。

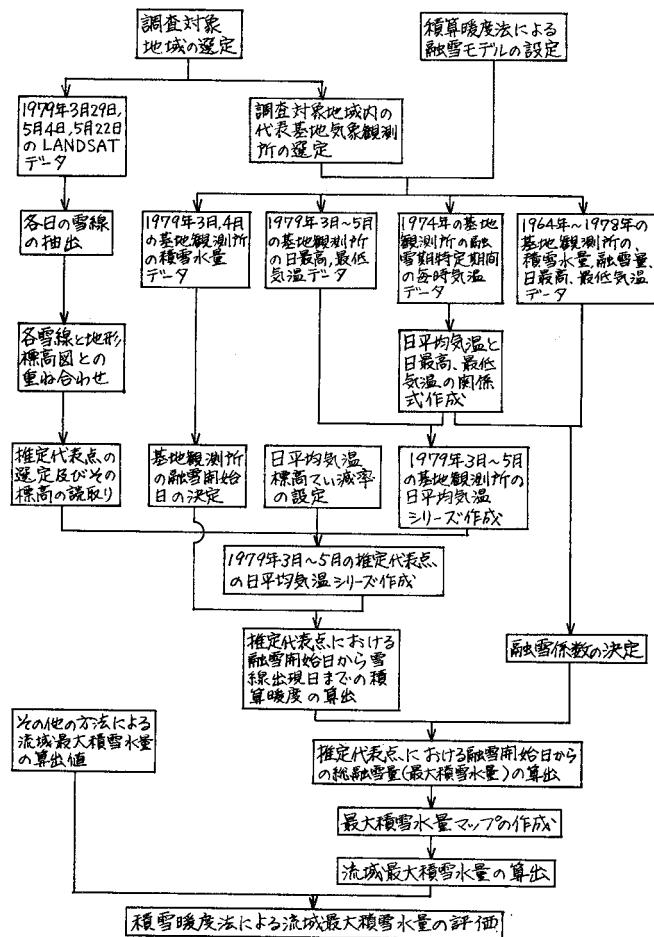


図-2 研究手順のフローチャート



写真-1 積雪域（3測定日）と地勢図の重ね合わせ（1979年3月29日、5月4日、5月22日、只見川流域）

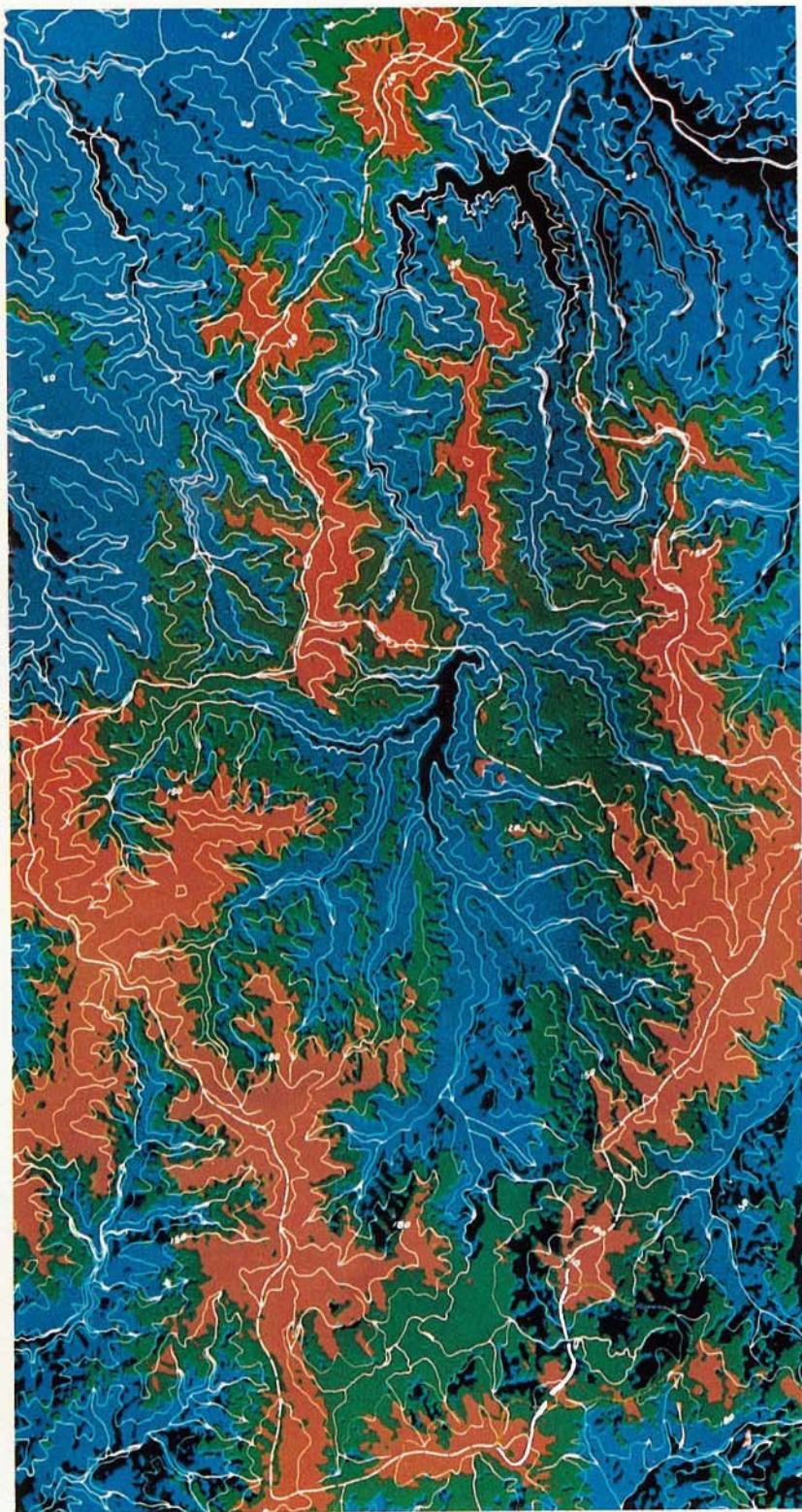


写真-2 各測定日の積雪域と標高線との重ね合わせ画像（只見川流域）

- 途中降雪量が多い場合は、その分だけ最大積雪水量の推定値を補正することが必要である。
- ⑤ 積算暖度法により、雪線上各推定代表点における総融雪量、すなわち最大積雪水量を求め、それらのデータから流域内の最大積雪水量マップを作成する。最大積雪水量マップから総積雪水量、平均積雪水量を算出する。
- ⑥ 前記の総積雪水量、平均積雪水量を他の方法による算定結果と比較して検討評価する。

以上の手順をやや詳細にフロー・チャートで示すと図-2 のようになる。

## 2. 研究対象流域

研究対象流域としては、奥只見ダムの集水域である只見川上流域（流域面積 425.4 km<sup>2</sup>）を選定した。本地域は日本海から約 55 km、太平洋から約 105 km の距離にあり、流域は北に開いた形になっている。このため、冬季降水量の大部分が季節風によってもたらされる。この地域はまことに地形急峻で、燧岳（標高 2,346 m）を最高とし、2,000 m 以上の山岳がかなりの数をかぞえる。奥只見ダム貯水池へは尾瀬原を水源とする只見川本流、大津岐川、恋の岐川、北の又川が流入する日本有数の多雪域であり、複雑急峻な地形と相まって、積雪分布も極めて複雑である。

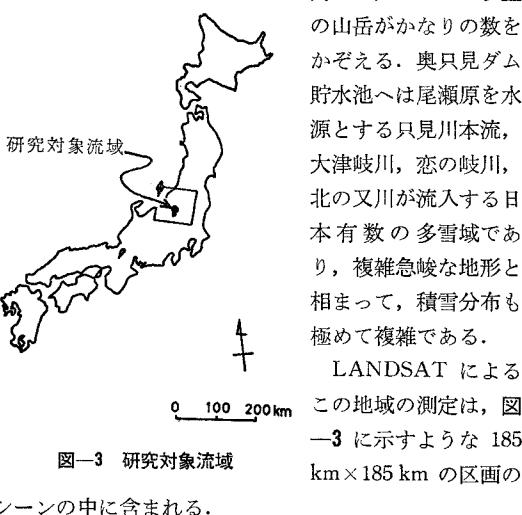


図-3 研究対象流域

シーンの中に含まれる。

## 3. LANDSAT データによる雪線の抽出

地球観測センターにおいて収集された只見川流域（図-3）の LANDSAT データ（1979 年 3 月 29 日、5 月 4 日、5 月 22 日）を用いて以下の手順により雪線を抽出した。

- ① ここで用いる LANDSAT データは衛星に搭載された MSS (Multispectral Scanner) によって収集されたものである。このデータには衛星の姿勢、高度、速度の変化や地球の自転によるスキーのひ

ずみなど幾何的ひずみが含まれている。したがって抽出した積雪領域を正確に地勢図上にプロットするためには、これらのひずみを精密に補正したデータが必要となる。ここでは、リモートセンシング技術センターにおいて地上基準点を用いて精密補正を行い以下の解析に用いる画像データを作成した。

② LANDSAT データには 0.5~1.1 μm の波長帯をバンド 4 (0.5~0.6 μm), バンド 5 (0.6~0.7 μm), バンド 6 (0.7~0.8 μm), バンド 7 (0.8~1.1 μm) に分けて映像が記録されている。このうち積雪領域の抽出には、バンド 4, バンド 5 が有効であるとされている<sup>8)</sup>。ここでも各バンドの計数値を算出して検討した結果、4, 5 バンドの有効性が明らかになったので今回は 5 バンドを積雪領域抽出の最適バンドとして選定した。

- ③ 選定されたバンド 5 のデータ (CCT : Computer Compatible Tape) を用いて、無雪域と積雪域を分離し、積雪域だけを抽出するには、両域の測定計数値の境界値を設定することが必要である。この際、雪線付近のまだら状になっている残雪域を除外する危険を避けるために、Ødegaard が NOAA 衛星 VHRR データから上記の境界値を設定した手法を用いる。すなわち、無雪領域と積雪領域のそれぞれのトレーニングエリアにおいて CCT 計数値の度数分布を求め、それらの平均値の中間値を境界値とするという方法である。この手法により境界値を各測定日について定め、濃度スライスにより各測定日の積雪域を抽出した。抽出した各測定日の積雪域を画像出力装置 (DICOMED-D 47) によりフィルム上に出力して画像化した。

- ④ 20 万の 1 の地勢図からそのポジフィルムを作成し上記 ③ の出力画像と重ね合わせ 3 月 29 日、5 月 4 日、5 月 22 日の雪線の時系列変化を示す積雪分布図を作成した（写真-1）。この写真で、濃紺色と青色の境は 3 月 29 日の雪線、青色と緑色の境は 5 月 4 日の雪線、緑色と茶色の境は 5 月 22 日の雪線である。季節の進行とともに、雪線が山側に後退していく様模様が明瞭にみられる。写真-2 は、地形の標高線を 300 m おきに 900 m (対象地域の観測所の標高が 782 m であるので標高線を 900 m からとした)、1,200 m, 1,500 m, 1,800 m, というように抽出して示したものである。次章の解析は、写真-2 をもとにして行った。

表-1 は、LANDSAT の各測定日における 300 m おきの標高区分別の積雪面積を示したもので、図-4 はそれを図示したものである。標高による積雪面積の減小率、すなわち融雪速度の違いが明瞭にみられる。

表-1 標高区分ごとの積雪面積

標高	(m)	各区分の総面積 (km <sup>2</sup> )	各区区分ごとの積雪面積(月/日)		
			3/29 (km <sup>2</sup> )	5/4 (km <sup>2</sup> )	5/22 (km <sup>2</sup> )
標高区分	- 900	50.1	39.9 (79.6)	7.5 (15.0)	0.2 (0.4)
	900-1 200	118.0	116.2 (98.5)	49.2 (41.7)	6.0 (5.1)
	1 200-1 500	127.2	122.3 (96.2)	96.8 (76.1)	28.7 (22.5)
	1 500-1 800	99.1	91.8 (92.6)	85.9 (86.7)	52.3 (52.8)
	1 800--	31.0	27.8 (89.2)	26.7 (85.5)	22.0 (70.6)
計		425.4	398.0 (93.6)	266.1 (62.6)	109.2 (25.7)

( ) 内の数字は、流域全面積に対する%

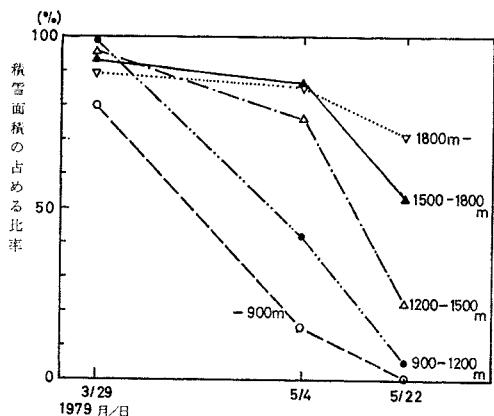


図-4 標高区分ごとの積雪面積の経時変化

#### 4. LANDSAT データの雪線情報を基にした流域最大積雪水量の算定

前章において、LANDSAT データから各測定日における只見川上流域の雪線が得られた。雪線上の各地点では、融雪開始日から雪線出現日までに、その地点の積雪が全部融け去ったことになる。したがって、逆に何らかの方法で雪線上の地点における融雪開始日から雪線出現日までの総融雪量を求めることができれば、その総融雪量をもってその地点のその冬の最大積雪水量を見なすことができる。1. の研究の手順④で述べたように、融雪開始日から雪線出現日までの間に降雪があれば、その量が最大積雪水量からみて無視できる量であるかどうかを検討することが必要である。

この冬は融雪期の降雪量は、奥只見気象観測所のデータを見ると、3月下旬以降ほとんど降雪はなかったが、4月13日に23cm、4月21日に20cmの降雪量が観測されている。新雪の密度を0.15とすれば、この2つの降雪を合わせて $6\text{ g/cm}^2$  ( $60\text{ kg/m}^2$ ) であり、この冬の

最大積雪水量の推定値と比較して、無視して差し支えない量と考える。

以下には、以上の考えに基づいて雪線上の各地点の最大積雪水量を求め、それらの値から流域最大積雪水量を算定した手順と結果を記述する。このような試みは、以前に松田<sup>13)</sup>が小規模の単純な積雪斜面について行ったことがあるが、かなりの広さの地勢の複雑な河川流域に適用したということ、および LANDSAT データによる雪線を用いたということにおいては、今回の研究が最初のものである。

### (1) 積算暖度法による融雪モデルの設定

融雪量を直接測定することなしに、間接的に気象要素から算出するには、基本的には積雪の熱収支計算を行うことが正攻法であるが、気象要素データが十分でない野外、特に広い地域の長い期間の融雪を取り扱う場合、従来、積算暖度法（ディグリーディ法ともいう）とよばれる融雪モデルが実用式として用いられてきた<sup>14)~16)</sup>。

積算暖度法による融雪式は次式で表わされる。

卷之二

$M$ : ある期間の融雪量 (g/cm<sup>2</sup>) (10 kg/m<sup>2</sup>)

$\bar{T}_e$ : 有効日平均気温 (日平均気温のうちの 0°C 以上の日平均気温 (°C))

$\sum \bar{T}_e : M$  と同じ期間の有効日平均気温の積算値  
(°C·day)

$K$ : 融雪係数 ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot {}^\circ\text{C} \cdot \text{day}$ ) ( $10 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot {}^\circ\text{C} \cdot \text{day}$ )

上式から、日平均気温 ( $\bar{T}$ ) と融雪係数 ( $K$ ) がわかれれば融雪量を算出することができる。

融雪係数を決定するために、研究対象流域内の奥只見ダムサイト付近に位置する奥只見気象観測所（標高 782m）の気温データ、および積雪水量測定データを用いることとする。

奥只見気象観測所では、通常、気温については最高・最低気温しか観測されていない。しかし、幸いにして

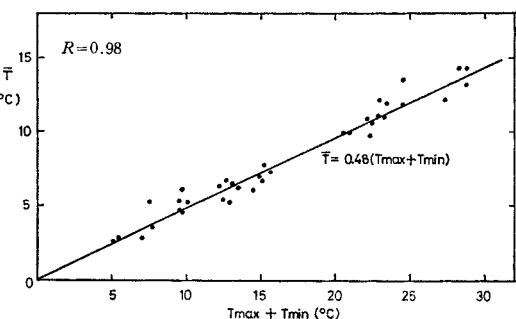


図-5 日平均気温 ( $T$ ) と日最高気温 ( $T_{max}$ ), 日最低気温 ( $T_{min}$ ) の関係  
( $R$ : 相関係数)

1974年4月8日～30日と5月12日～24日には、顕著な融雪流出に対応して、気温の毎時測定が行われた。このときのデータをもとにし、日平均気温( $\bar{T}$ )と最高気温( $T_{\max}$ )、最低気温( $T_{\min}$ )の関係を調べると、図-5に示すように、 $\bar{T}$ と  $T_{\max} + T_{\min}$  の間に明らかな線形関係が認められ、式で表わすと次のようになる。

したがって、式(2)を用いて奥只見気象観測所の毎日の最高・最低気温から、その日の日平均気温が求められることになる。

さて、奥只見気象観測所では 1964 年以降 3 月～5 月の特定日に、スノーランプで積雪水量を測定している。同じ年のある期間の前後に積雪水量の測定が行われていれば、その期間の積雪水量の減少量が同期間の融雪量 ( $M$ ) となる。また、同期間の毎日の最高・最低気温から式 (2) により日平均気温 ( $\bar{T}$ ) を求め、有効日平均気温 ( $\bar{T}_e$ ) を抽出して積算すれば、有効日平均気温の積算値 ( $\sum \bar{T}_e$ ) が求められる。 $M$  とそれに対応する  $\sum \bar{T}_e$  が得られれば、式 (1) により融雪係数 ( $K$ ) を算出することができる。このようにして 1964 年～1978 年の測定

表-2 融雪係数  $K$  の算出

期 間 (年月日)	日数	$M(\text{g}/\text{cm}^2)$ ( $10 \text{ kg}/\text{m}^2$ )	$\Sigma T_e$ ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ )	$K$
1964. 3.30~4.21	22	67.8	162.6	0.42
1965. 4. 8~5. 4	26	46.9	99.4	0.47
1965. 5. 5~5.17	12	60.9	108.6	0.56
1966. 3.30~5. 4	34	59.3	170.2	0.35
1966. 5. 5~5.12	7	45.6	77.7	0.59
1967. 3.31~4.20	20	37.5	106.8	0.35
1969. 4. 1~4.13	12	23.5	41.1	0.57
1974. 4. 4~4.22	18	44.4	95.3	0.47
1975. 4.11~5. 2	20	77.6	131.5	0.59
1975. 5. 3~5. 9	6	36.5	56.9	0.64
1976. 4. 9~4.22	13	39.5	82.5	0.48
1977. 4. 7~4.27	20	75.8	137.3	0.55
1978. 4.19~4.26	7	18.6	39.4	0.47

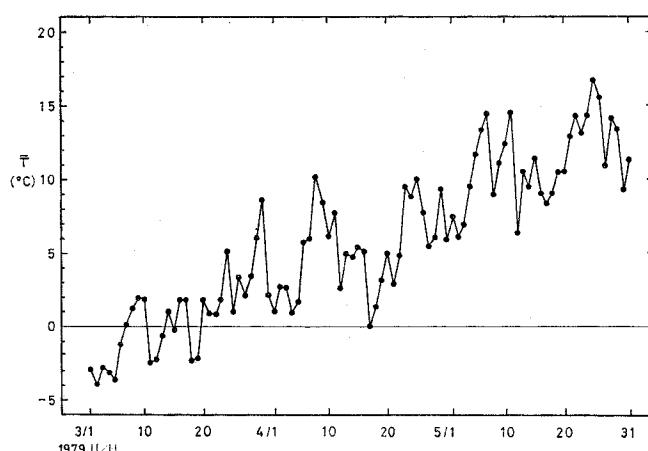


図-6 奥只見気象観測所における日平均気温 ( $\bar{T}$ ) の経時変化

値から融雪係数 ( $K$ ) を算出した結果が 表-2 である。多少の値のばらつきは見られるが、平均して融雪係数 ( $K$ ) の値を次のように決定した。融雪量を 5 月 4 日までと 5 月 5 日から 5 月 22 日までの 2 つの期間に分けて算定するので融雪係数もこれに対応させて求めた。

5月4日以前

$$K = 0.46 \text{ (g/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{day)} \quad (10 \text{ kg/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{day})$$

5月5日以降

$$K = 0.59 \text{ (g/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{day)} \quad (10 \text{ kg/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{day})$$

融雪係数 ( $K$ ) の値が決定できたので、式 (1) の積算暖度法による融雪モデルの以下の解析への適用が可能となつた。

## (2) 1979年冬の流域最大積雪水量の算定

- a) 1979年3月～5月の奥只見気象観測所における  
日平均気温 ( $\bar{T}$ ) のデータ・シリーズ作成

1979年3月～5月の奥只見気象観測所の毎日の最高・最低気温のデータを用い、式(2)により同期間の日平均気温( $\bar{T}$ )のデータ・シリーズを作成した。それを図示したものが、図-6である。日平均気温は季節の進行とともに変動を示しながらもだいに上昇してゆく。そして3月7日頃から有効日平均気温( $\bar{T}_e$ )が現われ始めるが値は小さく、本格的に有効日平均気温( $\bar{T}_e$ )が高くなるのは3月末である。

b) 推定代表点の選定

写真-2 の雪線上に、最大積雪水量を推定するための推定代表点を選定する。推定代表点は、5月4日、5月22日の雪線と900m, 1200m, 1500m, 1800m, 2100mの標高線との交点の中から66地点を選定した。推定代表点の位置と分布は後出の図-7に示すとおりである。推定代表点は雪線と特定標高線との交点であるので、推定代表点の標高は自動的に決まり、特に地形図から読み

取る必要がない。

- c) 1979年3月～5月の推定代表点における日平均気温( $\bar{T}$ )のデータ・シリーズ作成

日平均気温は標高とともに遞減するのが普通である。一般に、融雪流出解析で日平均気温の標高遞減率を  $-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  とすることが多いので<sup>17), 18)</sup>、この解析においてもその値を用いることにし、奥只見気象観測所の日平均気温を基準にする。

すなわち、推定代表点の日平均気温は次式によって求められる。

$$\bar{T}_{(R)} = \bar{T}_{(B)} - 0.6 \frac{h_{(R)} - h_{(B)}}{100}$$

.....(3)

ここに、

$\bar{T}_{(R)}$ : 推定代表点における日平均気温 (°C)

$\bar{T}_{(B)}$ : 奥只見気象観測所における日平均気温 (°C)

$h_{(R)}$ : 推定代表点の標高 (m)

$h_{(B)}$ : 奥只見気象観測所の標高 (m)

1979年3月～5月毎日の奥只見気象観測所における日平均気温を基準とし、式(3)を用いて、同期間の各推定代表点における日平均気温推定値のデータ・シリーズを作成した。

#### d) 融雪開始日の決定

積算暖度を算出するためには、まず融雪開始日を決定することが必要である。奥只見気象観測所では、1979年3月から4月にかけて、積雪水量の測定を行い、表-3のような結果を得ている。この測定結果から、奥只見気象観測所では、融雪開始日が3月28日から4月9日までにあったことが推定できる。図-6の同観測所における日平均気温の時系列変化をみると、3月30日に、日平均気温の大きなピークがみられる。普通、融雪流出はこのような気温の大きなピークを契機として始まるのが常態である。このようなことから奥只見気象観測所における融雪開始を3月30日と決定した。奥只見気象観測所よりも標高の高い地点では、融雪開始日が3月30日よりも遅くなることは確かであろうが、3月30日と実際の融雪開始日の間の積算暖度は当然小さい値のはずで、全推定代表点について融雪開始日を3月30日と設定しても、最大積雪水量の推定にはたいした影響は無いと考える。

#### e) 推定代表点における最大積雪水量の算出

融雪開始日が決定し、各推定代表点における3月～5月の毎日の日平均気温のデータ・シリーズが作成されたので、各推定代表点における融雪開始日から雪線出現日までの積算暖度を算出することができる。それに、4.(1)で決定した融雪係数を乗すれば、各推定代表点における総融雪量、すなわちこの冬の最大積雪水量が算出される。この場合、積雪域内にもいくつかの補助的推定点を設定し、積雪水量が標高に比例して増加するとの考え方

表-3 奥只見気象観測所における積雪水量測定

測定年月日	積雪水量
1979年3月6日	85.8 g/cm <sup>2</sup> (858 kg/m <sup>2</sup> )
3月14日	81.8 " (818 " )
3月22日	81.9 " (819 " )
3月28日	85.6 " (856 " )
4月9日	63.8 " (638 " )

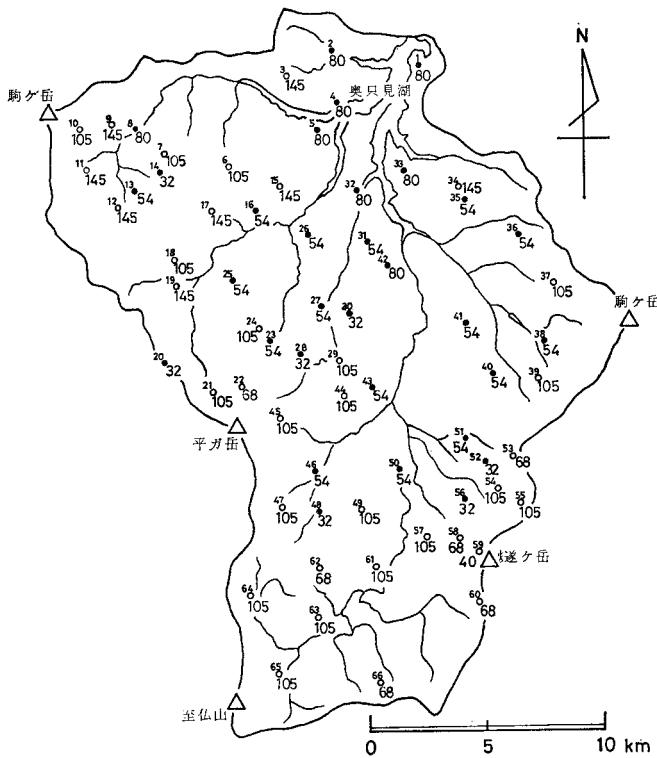


図-7 各推定代表点における最大積雪水量算定値

に基づき<sup>18)</sup>、付近の推定代表点の最大積雪水量と標高の関係から、補助的推定点の最大積雪水量を推定する。このようにして、算出した結果を地図にプロットしたのが図-7である。図-7で小さな数字は推定代表点ナンバー、大きな数字は最大積雪水量である。

#### f) 流域最大積雪水量の算定

図-7にプロットしたデータをもとに最大積雪水

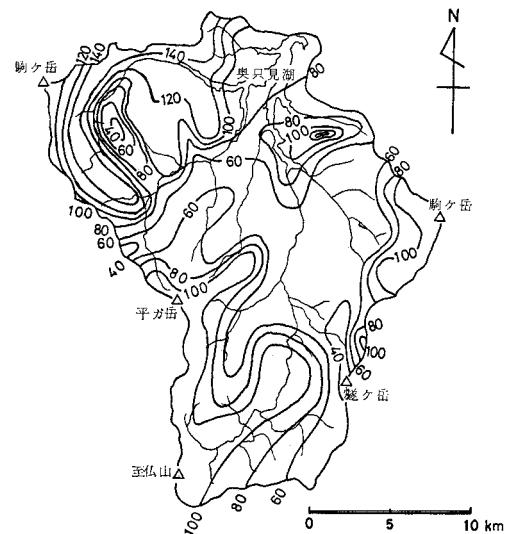


図-8 最大積雪水量算定マップ

表-4 流域最大積雪水量の算定  
(1979年, 只見川上流域)

積 雪 (g/cm <sup>2</sup> )	水 量 (10 kg/m <sup>2</sup> )	面 積 (km <sup>2</sup> )	面積積雪水量 (× 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )
20~40	(200~400 kg/m <sup>2</sup> )	12.6	3.8
40~60	(400~600 " )	113.6	56.8
60~80	(600~800 " )	69.2	48.4
80~100	(800~1 000 " )	90.2	81.2
100~120	(1 000~1 200 " )	87.5	96.3
120~140	(1 200~1 400 " )	32.5	42.3
140~160	(1 400~1 600 " )	19.8	29.7
計		425.4	358.4

(平均積雪水量 = 84 g/cm<sup>2</sup> (840 kg/m<sup>2</sup>))

量の等値線を作成したのが 図一<sup>8</sup> である。

流域の西側山地の積雪水量が東側山地のそれに比べて大きな値を示していることが明瞭にみられる。

図-8 から流域最大積雪水量、平均積雪水量を求める。そのために、図-8 の等値線間の面積を測定し、各等値線間の面積積雪水量を算出し、それらを合計して流域最大積雪水量を求めた。表-4 に示すとおり、流域最大積雪水量は、 $358.4 \times 10^6 \text{ m}^3$  となり、平均積雪水量は  $84 \text{ g/cm}^2$  ( $840 \text{ kg/m}^2$ ) と算定された。

## 5. 積算暖度法による流域最大積雪水量算定結果の評価

研究対象流域において、1979年冬にはスノー・サンベイは実施されなかった。しかし、1980年3月23~29

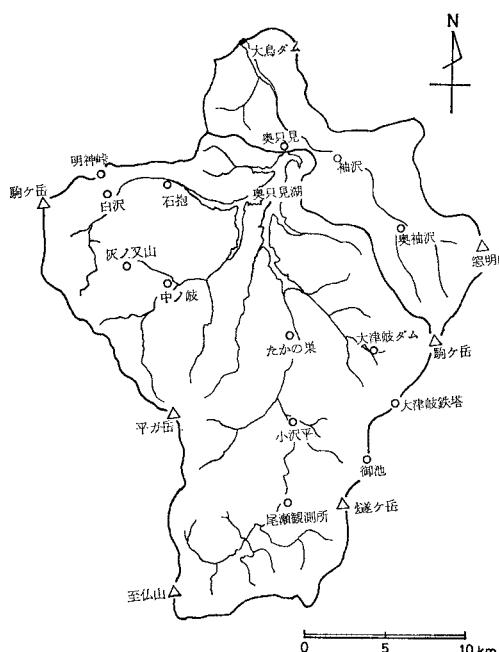


図-9 電源開発(株)のヘリコプターによる  
積雪深測定地点(図中の○印)

日の期間に科学技術庁資源調査所によってスノー・サーベイが実施された。このスノー・サーベイは流域内に 10 スノーコース（丸山ルート、袖沢ルート、荒沢ルート、駒ヶ岳ルート、裏燧ルート、燧ルート、富士見ルート、至仏ルート、景鶴ルート、大津岐ルート）を設定し、同コース上約 190 地点において測定が行われた。この測定値をもとにし、地形因子法という多重回帰分析法（積雪水量を目的変数とし、1 km 格子内の平均地形因子を説明変数とした）を適用して、流域を 1 km の格子で覆い、各 1 km 格子内の積雪水量を推定して、これからこの冬の流域最大積雪水量  $476 \times 10^6 \text{ km}^3$  を算定した。

一方、電源開発（株）は、ヘリコプターで流域内にあらかじめ設置した雪尺による積雪深測定を、1979年3月19日と1980年3月28日に実施した。

以上の2つの測定結果に基づいて、前章の積算暖度法による1979年の流域最大積雪水量の算定結果を評価してみよう。

電源開発（株）のヘリコプター測定地点の分布は、図-9に示すとおりで、両年とも測定地点の雪尺の位置は変わらない。両年 表-5 電源開発（株）のヘリコプターの積雪深測定結果による積雪深測定

表-5 電源開発(株)のヘリコプターによる積雪深測定

測定地点	標高 (m)	積雪深(cm)	
		1979年 3月19日	1980年 3月28日
明神峠	1 198	340	410
石抱沢	760	180	340
白沢	860	220	350
灰ノ又山	1 700	320	390
中ノ岐	1 000	250	310
たかの巣	780	140	250
小沢平	930	140	220
尾瀬観測所	1 420	240	300
御池	1 480	240	300
大津岐鉄塔	1 840	250	350
大津岐ダム	978	200	280
袖沢	668	220	350
東袖沢	953	250	320
奥只見	782	207	294

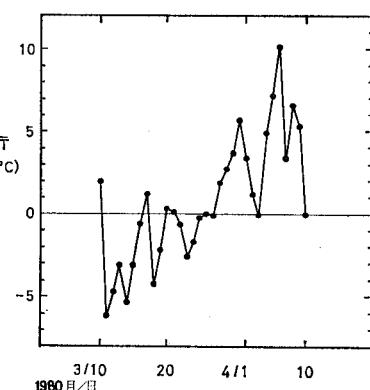


図-10 奥只見気象観測所における日平均気温( $\bar{T}$ )の経時変化

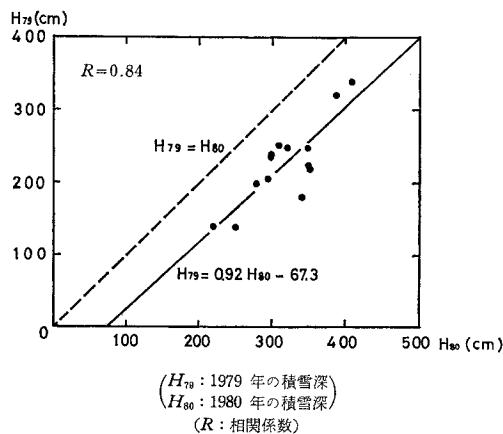


図-11 電源開発(株)のヘリコプターによる  
1979年、1980年の積雪深測定値の比  
較

気温(4.1)と同様にして算出)の時系列変化をみてもわかるように、3月28日は融雪が開始し始めた日であり、これもほぼ最大積雪水量時のものである。したがって、両者の比較は、両者の最大積雪水量時の積雪深の比較ということになる。同一測定地点の積雪深を両年について比較すると図-11になる。1979年の積雪深は、1980年のそれよりもすべての地点において少ない。両者の関係は次式で示される。

$$H_{79} = 0.92 H_{80} - 67.3 \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここに、

$H_{79}$ ：1979年測定の積雪深(cm)

$H_{80}$ ：1980年測定の積雪深(cm)

図-11、式(4)からみて、最大積雪水量時の積雪深は近似的には1979年は1980年より67cmぐらい全般に少なかったとみなしても差し支えないだろう。融雪開始時の積雪全層密度は、実測資料によればほぼ0.45<sup>19)</sup>である。67cmの深さの積雪は積雪水量に換算すると、30.2g/cm<sup>2</sup>(302kg/m<sup>2</sup>)となる。これを流域全体について算定すると、 $127 \times 10^6 \text{ m}^3$ となり、これだけ1979年の流域最大積雪水量が1980年のそれよりも少なかったことになる。この章の冒頭に記述したように、1980年のスノーラーベイの結果の流域最大積雪水量算定値は $476 \times 10^6 \text{ m}^3$ であるので、これから $127 \times 10^6 \text{ m}^3$ を差し引くと、1979年の流域最大積雪水量の算定値は $349 \times 10^6 \text{ m}^3$ となり、積算暖度法による算定値 $358 \times 10^6 \text{ m}^3$ に近い値である。

次に、両年の同一測定地点の積雪深の比( $H_{79}/H_{80}$ )をとって検討してみよう。図-12は、 $H_{79}/H_{80}$ と標高との関係を示した図である。 $H_{79}/H_{80}$ の値は、いずれの測定点においても1より小さく、1979年は1980年より雪の少なかったことを示している。また、標高が低いほど $H_{79}/H_{80}$ の値が小さい傾向が見られる。そこで、標

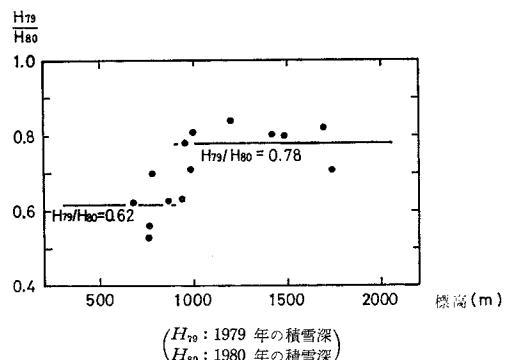


図-12 電源開発(株)のヘリコプターによる  
1979年、1980年の積雪深測定値の比  
と標高との関係

高900m以下と以上とに測定地点を分け、それぞれについて $H_{79}/H_{80}$ の値の平均値をとると、標高900m以下では0.62、900m以上では0.78となった。研究対象流域の総面積は $425.4 \text{ km}^2$ 、標高900m以下の面積は $62.0 \text{ km}^2$ 、標高900m以上の面積は $363.4 \text{ km}^2$ である。1980年のスノーラーベイの結果による流域最大積雪水量は $476 \times 10^6 \text{ m}^3$ であるので、1979年の流域最大積雪水量は、 $360 \times 10^6 \text{ m}^3$ と算定される。

また、石原<sup>19)</sup>の流域最大積雪水量の上限値と流域面積との間の関係式を今回研究対象流域に適用すると、1979年の積雪は、異常な少雪であったことが伺える。

以上を総合すると、表-6のようになる。

表-6の1980年のスノーラーベイによる算定値は、前述したように、地形因子法により処理された算定値であるので、通常のスノーラーベイの測定値だけによる算定値よりは精度の高いものである。この意味で表-6

表-6 流域最大積雪水量の算定結果の比較

流域面積	$425.4 \text{ km}^2$
石原式による流域最大積雪水量上限値	$459 \times 10^6 \text{ m}^3$
1980年スノーラーベイによる流域最大積雪水量	$476 \times 10^6 \text{ m}^3$
1979年積算暖度法による流域最大積雪水量	$358 \times 10^6 \text{ m}^3$
1979年、1980年の積雪深差により換算した1979年の流域最大積雪水量	$349 \times 10^6 \text{ m}^3$
1979年、1980年の積雪深比により換算した1979年の流域最大積雪水量	$360 \times 10^6 \text{ m}^3$

表-7 流入量、流域降水量と最大積雪水量の比較  
(単位 $10^6 \text{ m}^3$ )

箇所	年月	流入量(A)	流域降水量(B)	(A)-(B)	本研究算定最大積雪水量
奥只見ダム	1979		※		
	4	180	95	85	
	5	224	66	158	
$425.4 \text{ km}^2$	6	96	57	39	
	計	500	218	282	$358 \times 10^6 \text{ m}^3$

※ 奥只見気象観測所における降水量より求めた。

の比較評価の結果は、雪線情報と積算暖度法による最大積雪水量の算定の妥当性を示すものと考える。

表-6 の 1980 年のスノー・サーベイによる算定値は、前述したように、地形因子法により処理された算定値であるので、通常のスノー・サーベイの測定値だけによる算定値よりは精度の高いものである。この意味で表-6 の比較評価の結果は、雪線情報と積算暖度法による最大積雪水量の算定の妥当性を示すものと考える。

4月、5月、6月の奥只見ダムへの流入量と流域降水量の差を求めて本研究算定の最大積雪水量と比較すると、表-7 が得られる。これによると、その差は最大積雪水量の約 80% にあたる。この時期では、流入量から流域降水量を差し引いた量は、ほぼ融雪流出量とみなしてよいと考えられる。この間における蒸発、地下水としての蓄積等を考慮すると、上記の結果は本研究算定値の妥当性を示すものと考えられる。

## 6. 結　　び

この研究は、雪線情報と積算暖度法という融雪量算定モデルを結合することにより、融雪量から逆に積雪水量を算定するものである。雪線の出現は、その線上ではすでに積雪が融け去ったことを示すものである。この意味では雪線情報から積雪水量を求める方法は、リアルタイムでの日々の融雪流出解析と結びにくい点は確かに指摘されよう。しかし、この研究で提案した方法によれば、流域、地域最大積雪水量の毎冬の時系列データの蓄積が可能となる。したがって、過去の最大積雪水量の時系列データを利用して、ある年の雪線出現日以降の総流出量の予測に使用することは可能である。

最大積雪水量の時系列データの蓄積は従来のスノー・サーベイによっても、また、スノー・サーベイ測定値に地形因子法を適用する方法などでも可能であろうが、そのためには、多大の労力と費用が必要である。これに対し、ここで提案した方法は、LANDSAT 雪線情報の入手が気象条件によって左右されるという問題点はあるにせよ、比較的容易に、短時間の間に、極めて広範囲にわたり、流域、地域最大積雪水量を算定することができるところに大きな特色がある。流域、あるいは地域全域における毎冬の最大積雪水量の時系列データが整備されることは、積雪の水資源開発、あるいは管理計画に大きく寄与するということにおいてその有効利用が考えられる。

また、LANDSAT は可視光領域、近赤外領域を対象としているため雪線測定の確率は大きいとはいえない。しかし、現在、開発が進められているマイクロ波による積雪測定の研究開発により、衛星による積雪情報の質と

量は、今後拡大していくことは確かであろう。可視光領域、赤外領域、マイクロ波域のそれぞれの特徴を活用することにより、宇宙空間からのリモートセンシングが、近い将来、実用的規模で、多くの有効な積雪情報を提供することは大いに期待できる。

この意味で、この研究は積雪水文学の分野に対する宇宙からのリモートセンシングの現時点における実用的利用方法を提案し、今後の方向を示唆したものである。

**謝　　辞：**本研究を進めるにあたり丸安隆和博士（東京理科大学）、中村英夫博士（東京大学工学部）、石原健二博士（自然環境科学研究所）、樋口敬二博士（名古屋大学水圈科学研究所）から、ご助言をいただいた。画像解析の面では源田秀三郎博士（千葉大学天然色工学研究施設）、竹内章司博士（リモートセンシング技術センター）のご協力を得た。電源開発（株）営業部平岡需給課長はじめ関東支社、小出電力所の方々からご協力と貴重な資料をいただいた。地球観測センターからは LANDSAT データの提供を受けた。また論文の作成にあたり自然環境科学研究所の松田益義、水津重雄の両君、資源調査所の矢嶋祐次君はじめ調査グループの諸君から熱心な協力を得た。ここに記して深甚なる謝意を表します。

## 参　考　文　献

- 1) 石原健二：日本の平均年降水量は何ミリか？、環境情報科学、Vol. 1, No. 1, pp. 15~20, 1972.
- 2) Stanley S. Butler : Engineering Hydrology, Prentice-Hall, Inc. Press, p. 34, 1957.
- 3) 菅谷重二：大雪山積雪水量及び流出調査、経済安定本部資源委員会・北海道庁土木部報告書, 1949.
- 4) 石原健二：日本における雪量調査、電力気象連絡会彙報、第2輯、Vol. 6, No. 2, pp. 69~84, 1956.
- 5) 大沼匡之：国立防災科学技術センター雪害実験研究所第1回雪害研究発表会資料、1976.
- 6) 高崎正義・瀬戸玲子・松山泰子・坂本千代子：積雪分布の測量に関する研究、防災科学技術総合報告、第2号、pp. 5~33, 1965.
- 7) 丸安隆和・内田正人・田浦秀春：航空写真による積雪分布および積雪量の解析方法に関する研究、土木学会論文集、No. 153, pp. 41~54, 1968.
- 8) Barnes, J.C. and C.J. Bowley : Handbook for techniques for satellite snow mapping, First Report, NASA-21803, pp. 1~95, 1974.
- 9) Barnes, J.C., C.J. Bowley and D.A. Simmes : Mapping snow extent in the Salt-Verde watershed and the southern Sierra Nevada using ERTS imagery, Proceeding of the Third ERT-1 Symposium, NASA SP-351, Vol. 1, pp. 977~993, 1974.
- 10) Salmonson, V.V. and N.H. Macleod : Nimbus hydrological observations over the watersheds of the Niger and Indus Rivers, 4th Annual Proceedings, Earth Resources Review, Vol. 1, pp. 1~5 to 5~11, 1972.
- 11) Rango, A., V.V. Salmonson and J.L. Foster : Seasonal streamflow estimation employing satellite snowcover observations, NASA-TM-X-70840, pp. 1~34, 1975.
- 12) Ødegaard, H.A. : Application of satellite data for

- snow-mapping in Norway, Satellite Hydrology, pp. 39~49, 1979.
- 13) 松田益義：気候変動にともなう大雪山での氷河の形成について、雪氷, Vol. 37, No. 1, pp. 1~12, 1975.
- 14) 石井幸男：融雪の研究、北海道電力株式会社・札幌管区気象台報告書, pp. 1~84, 1959.
- 15) 石原健二：水文気象の話(XIV), 融雪, 水温の研究 Vol. 12, No. 2, pp. 1520~1525, 1968.
- 16) 井上雅之・松田益義：大雪山雪壁雪渓における質量収支の研究, 雪氷, Vol. 35, No. 4, pp. 180~191, 1973.
- 17) 桶口敬二：荒川流域の融雪水量及び流出量調査, 水資源調査所調査報告第9号, pp. 16~32, 1956.
- 18) 桶口敬二：自然災害と水, 「その引き金となる水」, 名古屋大学水圈科学研究所, pp. 17~29, 1980.
- 19) 電源開発株式会社：奥只見地域, 積雪, 気象, 流量資料, pp. 399~402, 1980.

(1980.6.14・受付)

---