

航空写真による融雪ならびに流出の解析

ANALYSIS OF SNOW MELT AND RUNOFF ON AERIAL PHOTOGRAPHS

丸 安 隆 和*・内 田 正 人**・田 浦 秀 春***

By Takakazu Maruyasu, Masato Uchida and Hideharu Taura

1. 緒 言

河川の流域内に積った雪が、どのような要因に支配されて、どのように融け、どのような経路を通り、どれくらいの時間をかけて流出するかは、洪水対策、水資源として雪を考える場合、きわめて重要な問題である。

しかし、広域にわたる山岳地帯の雪を個々の地点について、長期にわたってデータをとり、その特殊性を考慮して解析することは、きわめて困難なことであった。事実 1930 年ごろから、融雪、流出を取扱った論文も見受けられるが、これらはすべて流域を全体として取扱っている。

この研究は、黒部川流域を対象として、航空写真測量の技術を用いて、これらの問題を解決する新しい方式を提案しようとしたもので、従来不可能であった各種のデータの収集と、それらの相関性を探究し、融雪、流出機構の研究に資したいと考えた。

なおこの論文は、先に行なった積雪分布、積雪量の研究と一連の関連をもって行なわれたものである。

解析はつぎの順序にしたがって行なわれた。

(1) 基本式の誘導

1. 雪のない時の航空写真を用いて、流域内に数多くの標本点を取り、それぞれについて地形要因を測定する。

2. 最大積雪時および融雪時期における航空写真を用いて、最大積雪深と、その時点における残雪量を測定する。

3. それらのすべての点について、実測された観測所の気象データを基礎にし、地形要因を用いて、それぞれの地点の気象要因を推定する。

4. 1, 2, 3 の結果から、日々の気象データを用いて、日々の融雪を推定する式を決定する。

(2) 各地点の融雪量の算定、流出の解析

1. 流域を一定間隔の方眼でおおい、各交点について地形的要因を測定し、(4)の式を使って日々の融雪量を推定する。

2. 各方眼点における、最大傾斜の方向とその大きさを求めて、これを Vector で表わす。このように地形を Vector で表わしたものを、Vector Terrain Model と名づける。

3. この Vector Terrain Model をもとにして、各方眼点について、融水の移動方向とその時間を求めて、Vector で表わし、Vector 図を作る。

4. この Vector 図を使って、融水の流出の経路と、その到達時間を求める。

このような Vector 表現の方法は、電子計算機によって解析することを可能にするために、考えたもので、これによって地形が数量化され、一連の作業を自動化し、非常に多くのデータを能率的に処理することができるようになった。なおこのような解析の結果から、あらかじめめられた点を望見し、それらの地点の融雪状況から、全流域内に残っている雪の全量を推定する方法をも提案した。

なお、この研究には、関西電力(株)、国際航業(株)から絶大な支援と資料の提供をいただいた。ここに厚く謝意を表す。

2. 融雪量の推定方法

融雪量を推定するための基礎的な研究は、いままでも多くの人々によって行なわれてきた。しかし広い河川の流域内の数多くの地点について、日々の気象条件と融雪量を測定することは、実際にはほとんど不可能に近い。したがって実際にできることは、ある範囲内の気象条件

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

** 正会員 関西電力(株)建設部長

*** 正会員 理修 国際航業(株)電算センター所長 東京大学生産技術研究所研究嘱託

の平均値と、融雪量の平均値についての関係を求めることぐらいであった。

しかしこれに対して航空写真測量は、非常に有効な科学的な手段を提供した。先に積雪量の推定を行なうためにあたって¹⁾、航空写真から流域内各地点の風向、風速、降水量を推定する方法を提案したが、融雪量を考える場合にも、これと同じ手法を導入することにより、より合理的な解析ができるであろうと考え、つぎのような手順で展開していった。

(1) 要因の選定ならびに式の誘導

融雪のための熱エネルギーの供給源としては、つぎのものが考えられる²⁾。

- 1. 太陽からの輻射熱
- 2. 空中の水蒸気が凝結する際に放出する熱
- 3. 空中からの熱の伝導
- 4. 降雨によって供給される熱
- 5. 地熱の伝導

これら個々の要因については、熱力学的に解明されているものが多い。しかし自然の状況のもとでは、単にこれらの諸要因の影響を加え合わせただけで、融雪量を算定することは無理である。それはこれらの諸要素が複雑にからみ合っているからである。

しかし別の見方をするとこれらの熱供給源は、気温、風速、降雨量、水蒸気圧の4個の気象要素となる。その中で最も融雪に影響の大きいのは、気温と風速で³⁾あって、降雨量については、この時点では降雨の温度が非常に低いから、融雪におよぼす影響が小さいと考えられるので、これを無視し、この2個の要因だけを組み合わせ、融雪量をつぎの式で表わした。

$M_i = a_1 T_i + a_2 V_i T_i \dots\dots\dots(1)$

ただし、M：融雪量 (m)

V：風速 (m/sec)

T：気温 (°C)

i：流域内の任意の地点番号 i

この式の第2項は、大気中からの対流による熱の移動を、第1項は、太陽からの輻射熱、その他温度だけで表わすことのできる熱の供給源をあらわしている。

(2) 融雪量の測定

航空写真測量によって、任意の地点の融雪量を測定するには、時期をかえて撮影した2組の写真を使って、雪面の高さを測定し、その差を求めればよい。この場合航空写真の縮尺は、撮影飛行の安全などを考慮すると 1/15 000 くらいが手頃である。

またその時の測定誤差は、撮影高度の約 1/5 000(±45 cm)¹⁾ と考えてよからう。

ただし航空写真測量によって求められるものは、積雪深の変化量であるから、積雪水量の変化に換算する必要がある場合には、別に水当量を求めておかなければならない。この研究では、水当量を刈安峠の観測所で測定された積雪水量と、同時点にヘリコプターによって観測された積雪深との比で表わした。

(3) 各種要因の推定法

a) 気温の推定

図-1 は、いろいろの緯度における年平均気温の、鉛直分布をしめしている⁶⁾。

これによると下層では、平均 0.5~0.6°C/100 m の変化を示しているから気温の減率を 0.5°C/100 m と仮定すると、任意の点 i における気温 T_i は、つぎの式で表わすことができる。

$T_i = T_0 - 0.5(H_i - H_0)/100 \dots\dots\dots(2)$

ただし、 T_0 ：基準となる観測所における気温 (°C)

H_i, H_0 ：それぞれ i 点、基準となる観測所の 標高 (m)

b) 風速の推定

各地点における風速の分布を推定する方法は、さきに行なった積雪量推定の研究¹⁾と同じに考えた。

すなわち風の流線に沿って地形を波長 1 000 m, 2 000 m, 4 000 m の3個の波に分析し、Pockel の法則を使って、融雪期間における平均的な風速 V を、これらの波の振幅 h_1, h_2, h_3 の一次結合によって表わした。

$V = c_0 + c_1 h_1 + c_2 h_2 + c_3 h_3$

ただし、 c_0, \dots, c_3 は係数

各地点における日々の風速を求めるには、風速の観測所が流域に1個所しか設けられていないから、あらかじめ求めた各地点における平均風速の割合で、日々の風速

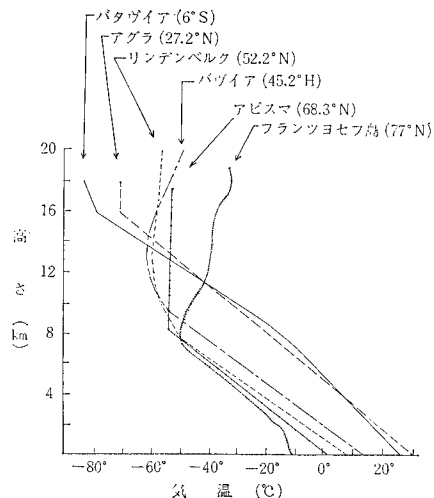


図-1 気温と高度との関係

が変化するものと考えて、観測された風速から、各地点の風速を推定した。そして任意の点 i における j 日の風速 V_{ij} をつぎの式で表わした。

$$\bar{V}_{ij} = V_{0j} \frac{\bar{V}_i}{\bar{V}_0} \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 V_{0j} : 観測所における j 日の風速
 \bar{V}_i, \bar{V}_0 : おのおの i 点, 観測所における平均風速

c) 降雨量の推定

さきへのべたように、降雨量は融雪には大きな影響がないので、融雪の場合には考えなかったが、流出を解析する際には、降雨量も同時に考える必要がある。

降雨には、地形性降雨と非地形性降雨の二つがある。地形性降雨は、水蒸気を含んだ気流が山岳地帯に流入するとき、地面傾斜の影響をうけて上昇気流を生じ、この上昇気流が冷却されて、中の水分が雨となって地上に落下するものである。したがって上昇速度を ω 、凝結率を F^* 、大気不安定度を示すパラメーターを A とすると、地形性降雨量 R' は $F^*A\omega$ であらわされる。また上昇速度 ω は、斜面の傾斜 ∇H と風速 V のスカラー積で表わされ、斜面の傾斜 ∇H はつぎのように考えられる。

流域を間隔 d の方眼でおおい、各交点の標高を H とすると、

$$H = (H - \bar{H}) + (\bar{H} - \bar{\bar{H}}) + (\bar{\bar{H}} - \bar{\bar{\bar{H}}}) + \bar{\bar{\bar{H}}}$$

ただし、 \bar{H} : 間隔 d だけ離れた周囲の 4 格子点における H の平均値

$\bar{\bar{H}}$: 同様に間隔 $2d$ の \bar{H} の平均値

$\bar{\bar{\bar{H}}}$: 同様に間隔 $4d$ の \bar{H} の平均値

が成立するから、これから ∇H はつぎのように表わされる。

$$\nabla H = \nabla(H - \bar{H}) + \nabla(\bar{H} - \bar{\bar{H}}) + \nabla(\bar{\bar{H}} - \bar{\bar{\bar{H}}}) + \nabla \bar{\bar{\bar{H}}}$$

これらを総合すると、地形性降雨 R' は結局つぎのように書きかえられる。

$$R' = F^* \cdot A \cdot \omega = F^* \cdot A \cdot V \cdot \nabla H \\ = a \cdot \nabla(H - \bar{H}) + b \cdot \nabla(\bar{H} - \bar{\bar{H}}) \\ + c \cdot \nabla(\bar{\bar{H}} - \bar{\bar{\bar{H}}}) + d \cdot \nabla \bar{\bar{\bar{H}}} \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 $a = F^* \cdot A \cdot V \cdot a'$ 、 $b = F^* \cdot A \cdot V \cdot b'$ 、 a' 、 b' は係数 c 、 d についても同様

非地形降雨は、前線、低気圧、台風等大気自体の擾乱によって生ずる雨である。ここでは前線、低気圧によって、降る雨のように広範囲にわたって連続している雨に限定した。したがって降雨域のごく一部分を考えると、降雨量の分布は平面で近似することができよう。

そうすると任意の点 (x, y) における非地形性降雨量 R'' は、次式で与えられる。

$$R'' = b_0 + b_1 x + b_2 y \dots\dots\dots(4')$$

ただし、 b_0, b_1, b_2 は係数

また、式(4)、(4')から任意の点における降雨量 R は、つぎのように表わされる。

$$R = R' + R'' \dots\dots\dots(4'')$$

つぎに任意の点 i における日々の降雨量は、風速の場合と同じように考えて、観測所のデータをもとにして、つぎの式で表わした。

$$R_{ij} = R_{0j} \frac{\bar{R}_i}{\bar{R}_0} \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 R_{ij}, R_{0j} : おのおの i 点, 観測所における j 日の雨量

$\bar{R}_i; \bar{R}_0$: i 点, 観測所における平均雨量

3. 融雪流出の解析

融雪の大部分は上部表面でおこるから、それが河川の流量となってあらわれるのは、それから1両日後になる。

この時間の遅れがどのくらいであるかは、融水が積雪内でどのような経路をとり、どのように浸透していくかによって左右される。これが流出解析には重要な要点となるが、現在のところこの問題についての研究成果は、ほとんど見当らなかった。

しかし最近になって、吉田⁹⁾を中心として、融雪機構の研究が組織的に進められるようになり、積雪内における融水の移動、浸透の状態等が、かなりくわしくわかってきた。

それによると融水の浸透は、大部分水みちにそう流下と、水みちの途中での水平拡散とをくりかえしながら進行する。また傾斜地の積雪では、水みちの途中から、水平に拡散した水がたまり、それが大規模な水みちを作ることもある。このようなことが起こると、傾斜地での浸透時間は、より短縮されるはずである。

いずれにしても積雪内の水の浸透は、地層内における水の浸透と似ているといわれるので、その取扱いは地下水と同様の考え方によることにした。

したがってこの研究では、融水の移動にかんしては、このような基礎的な考え方をもとにして、Vector Terrain Model を利用して、融水の経路とその到達時間を求め、貯水池へ流入するまでの過程を解析した。

(1) 等到達時間図

融雪してから貯水池に到達するまでに要する時間が等しい地点を連ねた線を描いたものを、等到達時間図と呼ぶ。これを求めるにはつぎの方法によった。

a) 積雪内の水の浸透時間

Darcy の法則によると、地下水の速度 (v) と動水勾配 (I) との関係は、つぎの式で表わされる。

$$v = kI \dots\dots\dots(6)$$

ただし、 k は浸透速度

積雪内を移動する融水が、この法則にしたがうものと考えて、この場合の勾配を近似的に地表面の勾配 (θ) に等しいと仮定すると、融水が単位距離を移動する時間 (t) は、つぎの式で表わされる。

$$t = k' / \theta \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 k' は係数

b) 河道流出に要する時間

河道流出の場合における到達時間 (t_g) は、つぎの中間式³⁾を使って計算される。

$$t_g = 0.27 L^{0.7} \dots \dots \dots (8)$$

ただし、 t_g : 到達時間 (時)

L : 河流の長さ (km)

c) 到達時間の算出

式 (7), (8) を組み合わせて、流域内の任意の地点から貯水池に至るまでの到達時間を求める。

d) Vector Terrain Model

この研究では、これらの計算を電子計算機を使って、自動的かつ能率的に行なうために、Vector Terrain Model を導入した。

① Vector Terrain Model の作り方：

イ. 全流域を間隔 D の方眼でおおい、各交点の標高を航空写真測量によって測定する。

ロ. 各方眼ごとに、四周の4点に対し最小自乗法により平面を適合して、最大傾斜とその方向を計算し、Vector で表わす。ただし最大傾斜の方向は、以後の解析を容易にするために、縦横の方眼線に平行な方向、およびその中間方向の計8方向にわけらる。

ハ. 各方眼ごとに、ハ. の Vector を描画する。

② Vector Terrain Model による融水の流出速度と、その経路の求め方：

イ. 各方眼内の融水は、最大傾斜の方向で隣接している方眼に、そのまま平行移動するものと仮定する。式 (7) によってこの時間を計算し、最大傾斜の方向とともに Vector で表わし、Vector 図を作る。

ロ. 任意の方眼から出発して、Vector の方向を逐次たどって、流出の経路を求める。また経路上の Vector の絶対値を合計して、河道までの到達時間を求める。

ハ. 河道部分の到達時間を式 (8) によって計算し、これにイ. の結果を加えて、河川の流出口に至るまでの到達時間を求める。

ニ. この Vector 図上で、同じ到達時間にある点を連ねて、等到達時間図を作る。

ここで問題になるのは、式 (7) の浸透係数 k' の値であるが、これについて研究されたものは、いままで全然見当たらない。また直接測定しようとしても、現時点では不可能に近い。そこでやむを得ずつぎのような簡単な

モデルを考えて、近似的な数値を求めた。

融雪量を気温に比例するものと仮定すると、融雪のピーク時と流量のピーク時とのおくれは、実測のデータから知ることができる。また河道を流れる時間は、式 (8) によって推定することができる。この場合後者の時間は、前者の時間より短いはずである。この時間の差は融水が積雪内を移動するに要した時間と考えた。

そこで河道の端末点におけるその集水域の平均勾配を θ 、平均距離を d として、式 (7) をつぎのように書き換えた。

$$t' = k' d / \theta \dots \dots \dots (9)$$

ただし、単位は t' : 時、 d : km、 θ : tangent の値この浸透係数 k' を、石狩川²⁾、沙流川³⁾、只見川⁴⁾ のデータを使って計算すると 0.5 となった。しかしこの数値は、資料が少なく理論的にもなお検討の余地がある。

(2) 流出解析に必要な他の要素の決定

a) 流出率

文献²⁾によると、流出率は各月によって若干変化するようにであるが、この研究では、融雪の期間中は変化が少ないものと考えて、4月の流出率をそのまま使用した。なお4月の流出率は、融雪量、降雨量の推定値と、流量(基底流量を引いたもの)との比であらわした。

b) 流出配分率

融雪期間中で、ある1日だけ急激に気温が高くなり、しかも降雨のない日が見つかるなら、その時のデータを使って、直接配分率を計算することができる。

しかしこの研究では、そのようなデータは得られなかったから、逆に気温の影響のない単独降雨の場合のデータを使って算出した。それは地表が積雪でおおわれている場合には、降雨も融水と同じように、積雪内を移動するものと考えたからである。

c) 基底流量

4月の基底流量は、3月にくらべて大して差がないものと仮定し、直接流量のデータから読み取った。つぎに b) で求めた流出率を使って、5, 6, 7月の流量を計算し、その値と実測値との差を求めて、おのおの月の基底流量とした。

4. 流量推定法の簡易化について

これまで河川の流域内の各地点の融雪量を求めて、それをもとにして解析を進めてきたが、ここでは輕易に流量を推定し得るように、面積融雪量の概念を導入して、つぎのように簡単にした。

(1) 実験の結果式 (1) の VT の項は T の項に比較して、 M との間の相関係数が小さいから、これを省

略して T だけの項で表わした (表-1 参照)。

$$T_i = bT_i \dots \dots \dots (10)$$

ただし, b は係数

(2) 全流域は一様に平均積雪深と同じ深さの雪でおおわれていて, かつまた同一高度内では融雪が一様に行なわれるものと仮定すると, 各高度別の面積がわかれば, 日々の面積融雪量を計算することができる。

この際平均積雪深は, 流域内に選定された代表点における積雪深の実測データを使って求める¹⁾。

(3) 流出については, 全流域の融水が同時に河川の流出口に集中するものと仮定する。

以上の方法によると, たとえ流域内に1個の観測所しか得られない場合でも, その気温だけのデータから, 河川の流量を推定することができる。

5. 黒四ダム集水域における実施例

黒四ダムの集水域は, 東西約 9 km, 南北約 23 km にわたる長方形の地区で, 標高 1 400~3 000 m の飛驒山脈の一面である。黒部川はその中央を北流して, 北端がダム サイトとなっている。

観測所は, このダム サイトと, 刈安峠, 雲平の 3 カ所に設けられているが, 気象観測の行なわれているのは, ダム サイトだけである。他の 2 カ所は, 積雪水量のみのロボット観測所にすぎない。

この研究では, この集水域に対して, つぎの要項によって航空写真の撮影を行ない, これから融雪過程の測定を行なった。

第1回 1964年

1964年 3月30日撮影 (最大積雪時)

1964年 4月30日撮影 (融雪時)

1964年 5月16日撮影 (融雪時)

カメラ RC 8 ($f=152.19$)

写真縮尺 1/15 000

図化機 オートグラフ (A 7)

第2回 1967年

1967年 3月30日撮影 (最大積雪時)

1967年 5月15日撮影 (融雪時)

カメラ R.M.K. 15/23

写真縮尺 1/15 000

図化機 オートグラフ (A 7)

(1) 融雪量の解析

a) 式の決定

式(1)の係数を決定するために, つぎの順序にしたがって計算した。

① 式の変形: この研究では, 各地点における融雪期

間中の平均的な風速を推定するために, 地形を風の流線に沿って3個の波に分析し, その関係をつぎの式で表わした (前述)。

$$V_i = c_0 + c_1 h_{1i} + c_2 h_{2i} + c_3 h_{3i} \dots \dots \dots (11)$$

ただし, c_0, c_1, \dots, c_3 : 係数

h_1, h_2, h_3 : それぞれ波長 1 000 m, 2 000 m,

4 000 m の地形の波の振幅

i は流域内での任意点

この式を式(1)に代入すると,

$$\begin{aligned} M_i &= a_1 T_i + a_2 (c_0 + c_1 h_{1i} + c_2 h_{2i} + c_3 h_{3i}) T_i \\ &= a_1 T_i + (c_0' + c_1' h_{1i} + c_2' h_{2i} + c_3' h_{3i}) T_i \end{aligned} \dots \dots \dots (12)$$

となる。ただし, T_i は式(2)によって推定する。

② 測点の選定: 全流域に約 130 個の測点を設け, 各点の融雪量ならびに地形的要因を測定した。

③ VT 項の係数の決定: 測点の中で, 同じ標高のものを集めて1グループとし, 全部で 4 グループを作った。そうすると各グループ内では, 式(12)の第1項は定数 ($c_{(j)}$) と考えられるから, 式(12)はつぎのように書きかえられる。

$$\begin{aligned} M_{(1i)} &= c_{(1)} + c_0' T_{(1i)} + c_1' h_{1(1i)} T_{(1i)} \\ &\quad + c_2' h_{2(1i)} T_{(1i)} + c_3' h_{3(1i)} T_{(1i)} \\ M_{(2j)} &= c_{(2)} + c_0' T_{(2j)} + c_1' h_{1(2j)} T_{(2j)} \\ &\quad + c_2' h_{2(2j)} T_{(2j)} + c_3' h_{3(2j)} T_{(2j)} \\ M_{(3l)} &= c_{(3)} + c_0' T_{(3l)} + c_1' h_{1(3l)} T_{(3l)} \\ &\quad + c_2' h_{2(3l)} T_{(3l)} + c_3' h_{3(3l)} T_{(3l)} \\ M_{(4m)} &= c_{(4)} + c_0' T_{(4m)} + c_1' h_{1(4m)} T_{(4m)} \\ &\quad + c_2' h_{2(4m)} T_{(4m)} + c_4' h_{3(4m)} T_{(4m)} \end{aligned} \dots \dots \dots (13)$$

ただし, $(1i), (2j), (3l), (4m)$ は各グループ内の番号を示す。

そこで, この式を最小自乗法を使って解き, 未知数 $c_{(1)}, \dots, c_{(4)}, c_0', \dots, c_3'$ を決定した。

④ T 項の係数の決定:

T 項の係数 a_1 は

$$a_1 T_j = c_j \dots \dots \dots (14)$$

として解いてもよいが²⁾, この実験では式(13)で求めた係数を使って, 式(1)の $a_2 V_i T_i$ の項を逆算し,

$$a_1 T_i = M_i - a_2 V_i T_i \dots \dots \dots (15)$$

とにおいて最小自乗法により a_1 を求めた。

⑥ 式の決定: 以上の計算によって, まず最大積雪時の航空写真の撮影時点から, 融雪時の写真の撮影時点までの積雪深の減少量を表わす式を決定した。つぎにこれら2回の撮影時点間の日数と, 同期間中の降雪量をもとにして, 前式から日々の融雪量を表わす式を導いた。

$$\left. \begin{aligned} M_i &= 1.31 T_i + 0.29 V_i T_i \\ M_i' &= 0.45 T_i + 0.10 V_i T_i \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (16)$$

ただし、単位は $M, M' : \text{cm}, T : ^\circ\text{C}, V : \text{m}$

式(16)の第1式は、同期間中の日々の融雪量を積雪深の減少量で表わす平均的な式、第2式は、日々の融雪量を水当量で表わす式である。第1式から第2式に変換するには、水当量 0.34 を用いた。この値は同期間中の平均的な雪の密度であって、観測データから求めたものである。

なお、これらの式の係数は2回の実験ともに似たような値が得られた。

⑥ 融雪量と要因間の相関関係：つぎに式(16)の各項と、融雪量との関係を見るために、単相関係数を求めた。

表-1によると、 T の相関係数は大きい、 VT の相

表-1 相 関 係 数

VT	0.6145	
M	0.7201	0.3335
	T	VT

関係数は非常に小さい。このことから近似的に、 T 1個の要因だけで融雪量を推定しても、大差ないということができよう。

b) 各観測所における日々の融雪状況

ダム サイトの観測所における日々の気象データをもとにして、式(2),(3),(16)により、各観測所における日々の融雪量を推定した。図-2, 3, 4にその状況を示す。

ただし、計算の過程で、融雪期間中に新雪があった場合には、水当量を 0.15 とした。

図-3によると、刈安峠では計算上4月5日に相当量の降雪が認められるのに対し、観測データではこれとおぼしきものは4月10日となっていて、5日間のずれがある。しかしこの降雪は、ダム サイトでは4月6日、雲平でも4月6日に現われているから、もし刈安峠における4月10日の観測データを正しいものとすれば、これは局地的な変動にもとづくものと、考えてよからう。

c) 消雪点推移の状況

ダム サイトから立山方向を望見して、数日おきに写真を撮影し、この撮影上で 1/50 000 図と対照でき

ような著明な点(たとえば山の頂上、稜線上の傾斜変換点等)を6カ所選び、各地点ごとに消雪する月日を計算した。その状況は写真-1~7のとおりである。これらの写真について撮影月日、各地点の計算上の消雪月日ならびに写真で判読される残雪の有無を表にすると表-2

表-2 消雪状況一覧表

点 名	1	2	3	4	5	6	備 考
計算上の消雪月日	5月15日	5月14日	6月1日	6月4日	6月10日	6月19日	
写真の有無	○	○	○	○	○	○	航空写真
判読の有無	○	○	○	○	○	○	地上写真
残雪の有無	×	△	○	欠	○	○	航空写真
残雪の有無	×	×	○	○	○	○	地上写真
残雪の有無	×	×	×	×	○	○	〃
残雪の有無	×	×	×	×	△	○	〃
残雪の有無	×	×	×	×	×	×	〃

○：残雪によっておおわれているもの
 ×：消雪しているもの
 △：いずれとも断定のできないもの

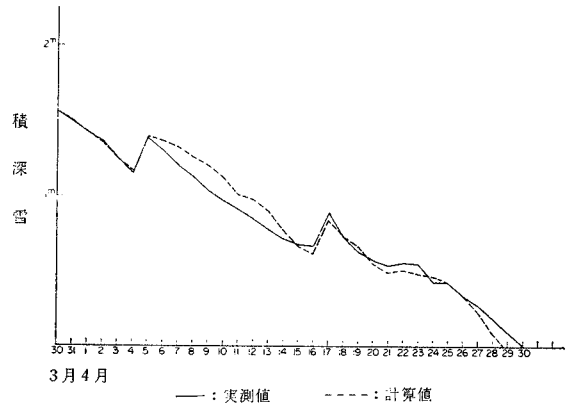


図-2 ダム サイトの観測所における日々の融雪曲線

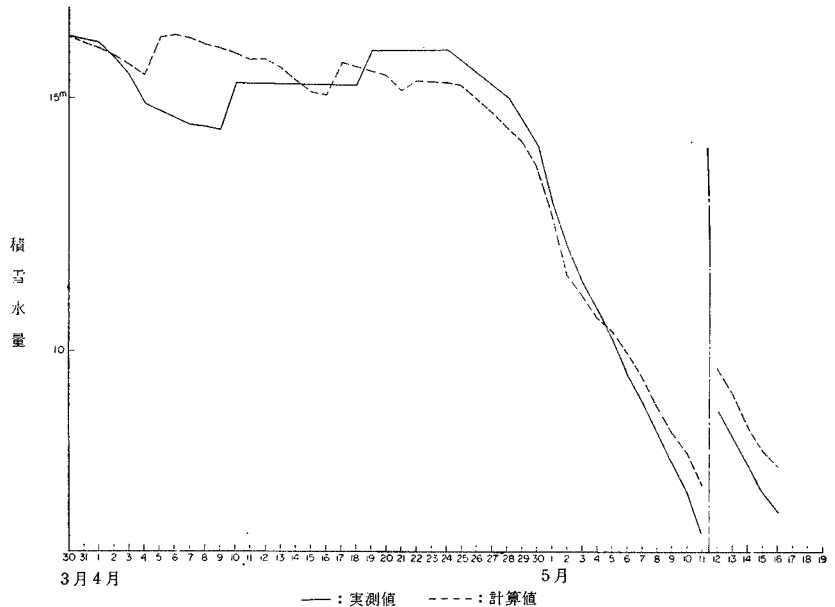


図-3 刈安峠観測所における日々の融雪曲線

写真-1 1967年3月30日撮影のダム
サイト-立山地区の航空写真

写真に記入した日付はその地点における
計算上の消雪月日を示す。

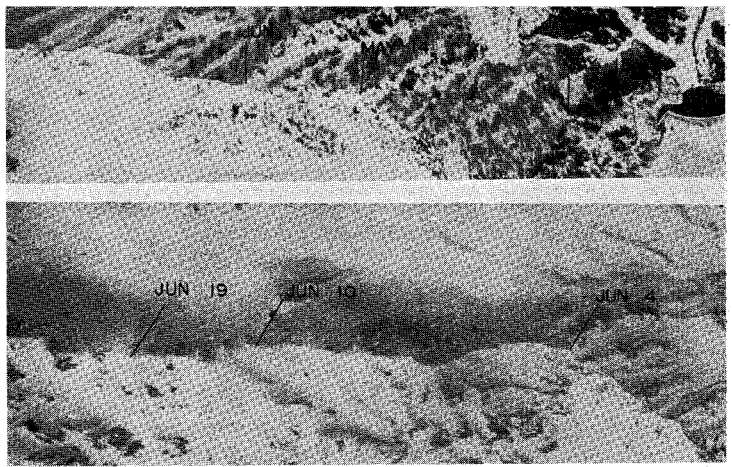


写真-2 ダム サイトから立山方向を望む
1967年4月5日撮影

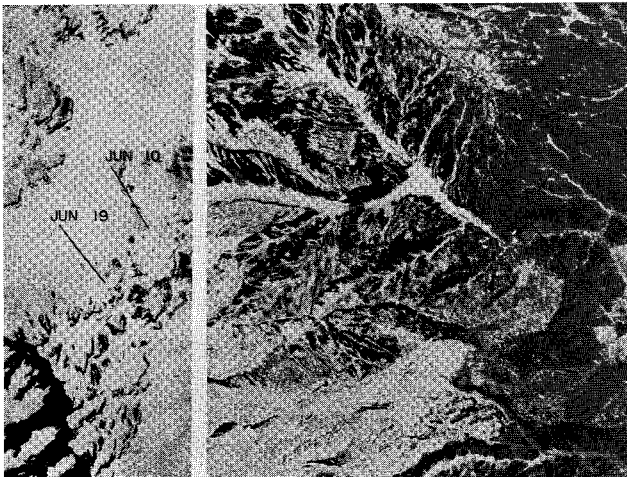
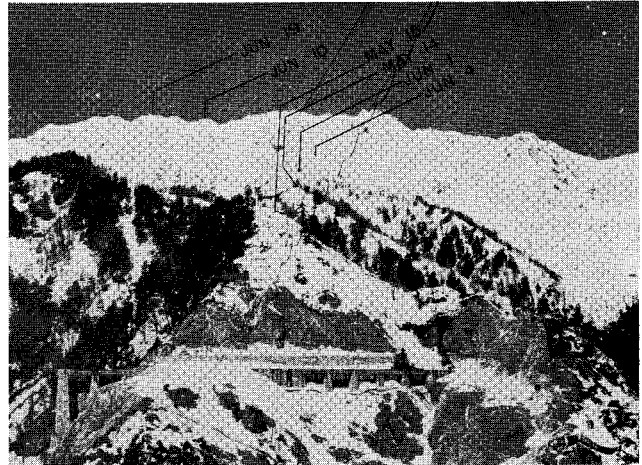


写真-3 1967年5月15日撮影航空写真

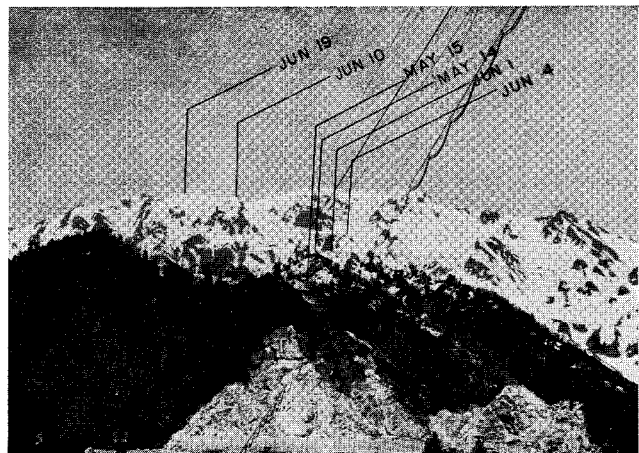


写真-4 1967年5月18日撮影

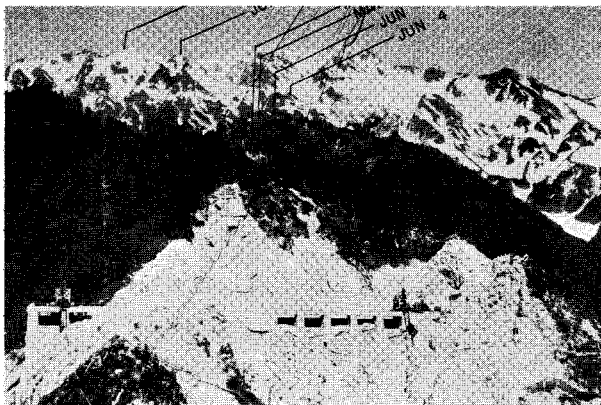


写真-5 1967年6月7日撮影

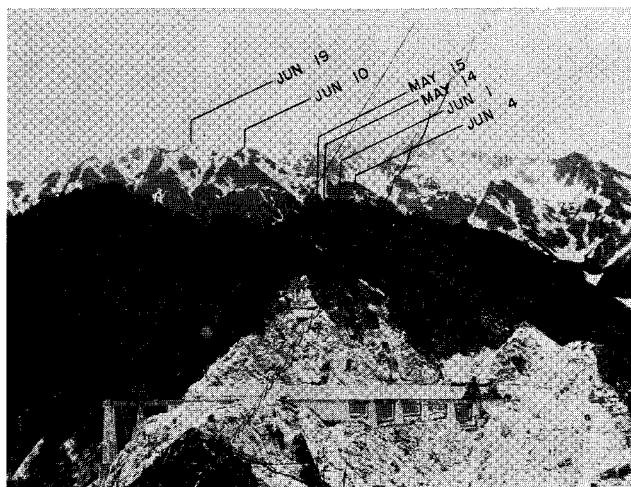


写真-6 1967年6月20日撮影

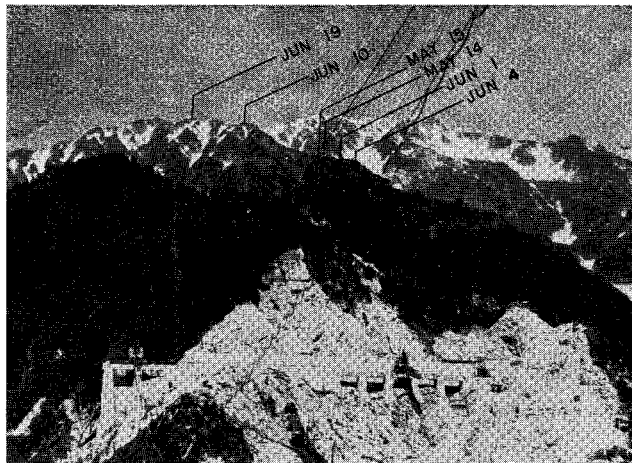


写真-7 1967年7月18日撮影

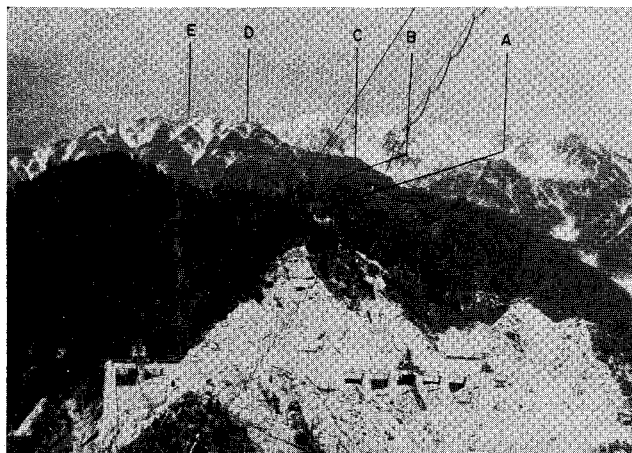


写真-8 各地点の消雪時点から推定した流域内の残雪の量

点名	残雪量の概略値
A	$1\,350 \times 10^5$
B	350×10^5
C	200×10^5
D	100×10^5
E	30×10^5

(単位はトン)

で示され、これら相互の関係は、大体においてよく合っている。

つぎに各地点ごとに、その地点の雪が消失した時点において、なお流域全体に何トンの雪が残っているかを計算した。その関係は 写真-8 に示す。融雪の状況は年によって変化するが、写真-8 はダムサイトから望見してこれらの点の消雪状況を知ることによって輕易にその時点における流域全体の残雪の概要を知る一つの目安になるものと思う。

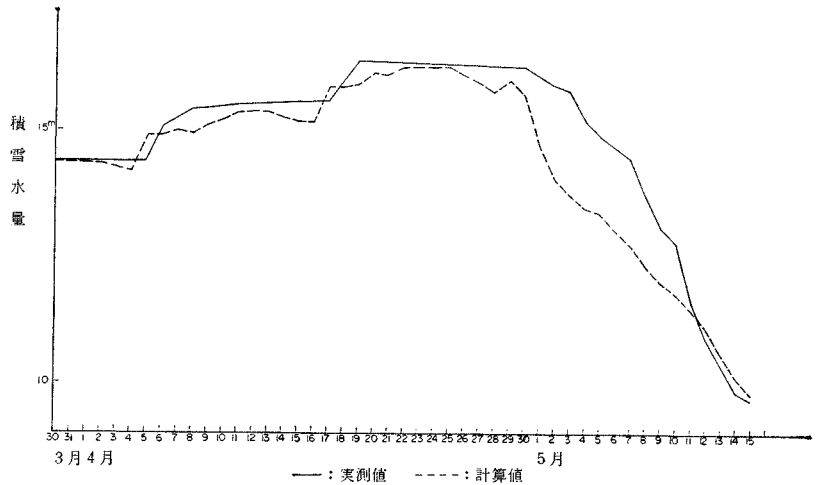


図-4 雲平観測所における日々の融雪曲線

(2) 融雪流出の解析

a) 等到達時間図の作製

式(8), (9)を使って、全流域の等到達時間図を作り、各時間帯に含まれる方眼点の融雪量、降雨量をもとにして、時間帯ごとの流出量を計算した。

図-5 はその等到達時間図であるが、ベクトルはその絶対値を縮尺化しがたかったので単に方向だけに止めた。

b) 流出配分率の決定

過去のデータの中で、気温の影響の少ない単独降雨の例を求めて、これから流量の配分率を計算した。その結果を 表-3 に示す。

表-3 流出配分率

日	第 1 日	第 2 日	第 3 日
配分率	0.7	0.2	0.1

c) 流出率、基底流量の決定

第1回(1964年)の実験の結果、つぎのような流出率、基底流量が得られた。

① 流出率

融水の場合 0.5

降雨の場合 $R < 15 \text{ mm}$ のとき $0.04 R$

$R > 15 \text{ mm}$ のとき
 $0.62 + 0.0015 (R - 15)$

ただし、 R は降雨量 (mm)

② 基底流量

表-4 基底流量表

月	4	5	6	7
基底流量 (m ³ /sec)	5	6	20	25

d) 流量解析

以上の諸元を使って、第2回の実験(1967年)で、ダムの貯水池への日々の流入量を推定し、実測値と比較し

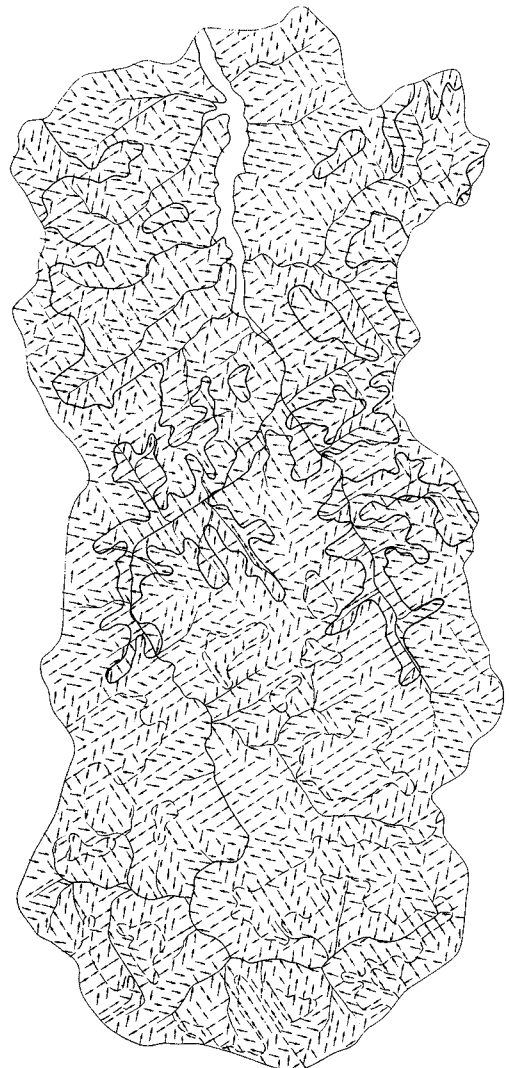


図-5 等到達時間図

た。

その状況を 図-6 に示す。図-6 によると、これら両者の関係は大体においてよく一致しているといえよう。

e) 近似計算

4. の方法により、つぎの近似式が得られた。

融水 $m_i = 6.67 \times (T_{0i} - \Delta T_i) \times \text{面積率}$

降雨 $r_i = 2.12 \times R_{0i} \dots (17)$

ただし、 T_{0i} , R_{0i} はダム サイトにおける i 日の気温 ($^{\circ}\text{C}$),

降雨量 (mm),

m_i , r_i の単位は (m^3/sec)

式中面積率は、 i 日に残雪によっておおわれている部分の全流域面積に対する比率を、 ΔT_i は残雪部分の平均気温と、ダム サイトにおける気温との差を示す。

また式 (10) の係数 b の値は、式 (16) から誘導して 1.9 となった。

最後に以上の数値を使って、過去 5 カ年間のダム サイトの気温、降雨量とダムサイト、刈安峠、雲平観測所の積雪深とから、ダムの貯水池への流入量を推定した。これを実測値と比較したところ、各年次とも似たような結果が得られた。図-7, 8 にその一例を示す。

5. 結 言

雪そのものの科学的な研究については、すでに多くの研究者から貴重な報告がなされている。しかし山に積った雪を水資源として眺め、その積雪量、融雪や流出の機構を取扱おうとすると、まだまだ未知の事項が非常に多く、かつその調査測定に非常に困難が伴うため、その全貌を解明することがまことに困難な仕事となる。

この研究は、積雪分布の解析に続いて行なった一連の雪の研究で、その融雪や流出の機構を解明

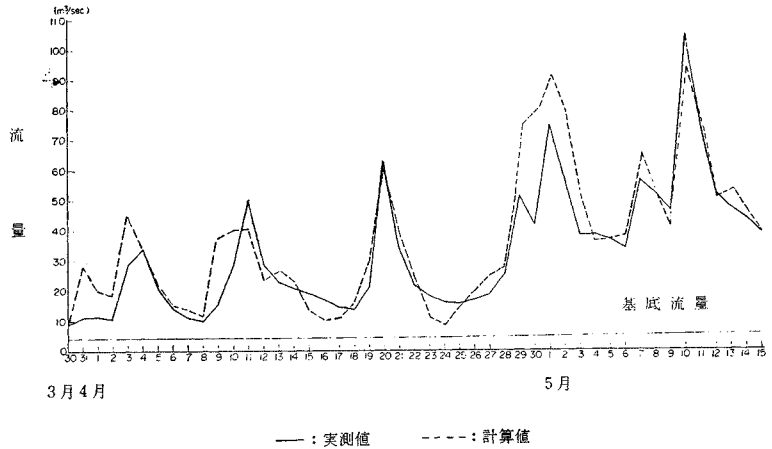


図-6 黒四ダムの貯水池への日流入量曲線 (1967 年)

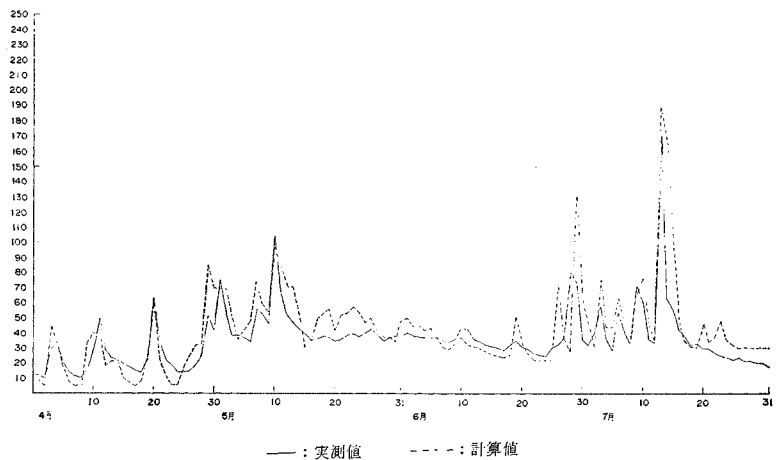


図-7 黒四ダムの貯水池への日流入量曲線 (1967 年)
(簡易法によって計算したもの)

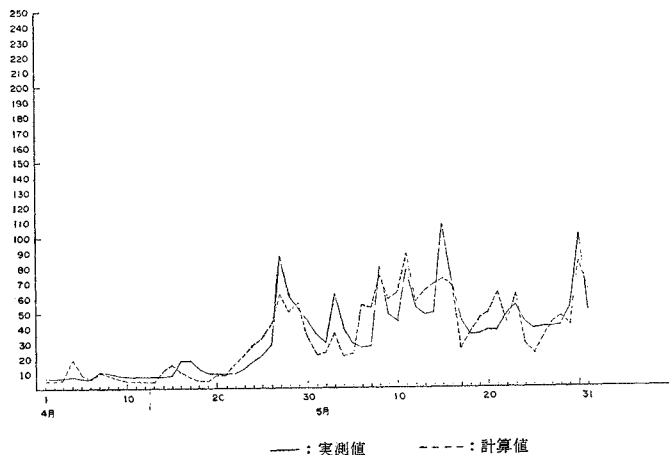


図-8 黒四ダムの貯水池への日流入量曲線 (1966 年)
(簡易法によって計算したもの)

しようとしたものであるが、実際に解析を進めると、その過程に非常に多くの仮定を挿入しなければならなかった。もちろんそれらの仮定は、できるだけ合理的なものであるように努めたし、またその実証も行なった。

しかしいずれにしても、この種の研究がより高度なものに発展するためには、さらに多くの実験と実測データが必要であることはいままでもない。われわれはこのような点について、さらに多くの努力を続けて行くつもりである。ただ航空写真測量の技術をその特徴を十分にいかして活用することは、このような研究分野に対しては、きわめて有効な手段となることを特筆しておきた

い。

参 考 文 献

- 1) 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”，土木学会論文集第 153 号。
- 2) 境 隆雄：“河川の融雪流出に関する研究”，土木学会論文集第 95 号。
- 3) 春日屋伸昌外編：水工学便覧，森北出版。
- 4) 中央気象台外：只見川水系水文気象調査報告，1955。
- 5) 日本学術会議水特別委員会 IHD 小委員会：降水，積雪および地表水に関するシンポジウム，1968。
- 6) 正野重方：気象学総論，地人書館。
- 7) 日本雪氷協会：雪氷の研究 No. 2。

(1968.8.12・受付)