

リモートセンシングを導入した積雪深と融雪洪水流出解析に関する研究

Study on snowfall depth and snowmelt flood runoff analysis
with Randsat data

東京理科大学 理工学部 大 西 外 明

憊大東設計コンサルタント 〇 村 上 龍 一

1. はじめに

多雪地帯においては、融雪流出量は重要な水資源であるため流出量を適確に把握することは、貯水池等の運用の有効利用にとって特に重要となる。そのためには、融雪流出量を広範囲な面から積雪状態、融雪状態を把握する必要がある。従来、融雪を考慮した長期流出解析ではタンクモデル法が最も広く用いられている。

本研究では、研究対象流域として我国でも有数の多雪地帯である奥只見ダム流域を選び、始めに従来の融雪計算の考え方をを用いたタンクモデル法により積雪深・融雪流出量を求めて、その問題点を検討し、本論文で新たに提案する積雪深・融雪計算モデルとの比較検討を行なった。また、広範囲な積雪状態、融雪状態を現地観測することは困難であることから、ランドサットデータにより積雪状態、融雪状態の月別の変化をカラー画像処理解析により求め、現地観測および計算値との比較検討を行なった。以上の検討結果から、本論文は、多雪地帯における積雪深および融雪流出量の計算モデルの提案を行なうことを目的とするものである。

2. 積雪・融雪計算モデルの考え方と従来の融雪計算の考え方

(1) 従来の融雪計算の考え方

気温 $t < 0$ °C では、降雨量 r は全部積雪する。気温 $t \geq 0$ °C では、気温による融雪量 k_1 と降雨量による融雪量 k_2 の両者の和が融雪流出量となる。したがって、式で示せば次のようになる。

$$\begin{aligned} t < 0 \text{ °C} : H &= H_s \times m_s \times 10 + r & H : \text{等価水深 (mm/d)} \\ &= u_s + r & H_s : \text{初めの積雪深 (cm)} \\ q &= 0 & m_s : \text{積雪比重} \\ t \geq 0 \text{ °C} : H &= H_s \times m_s \times 10 - (k_1 + k_2) & r : \text{降雨量 (mm/d)} \\ &= u_s - (k_1 + k_2) & u_s : H_s \times m_s \times 10 \\ q &= (k_1 + k_2) + r & q : \text{流出高 (mm/d)} \end{aligned}$$

ただし、 k_1, k_2 は次のように示される。

$k_1 = t \times 5$: 気温による融雪量であり $t \geq 0$ °C では、気温 1 °C 上がる毎に 5mm ずつ融雪する。

$k_2 = r t / 80$: 降雨量による融雪量であり $t \geq 0$ °C では氷の融解熱が 80 cal/g であることから、 $r t / 80$ mm ずつ融雪する。

次に計算結果の等価水深から積雪深 H_t を求めると次のようになる。

$$H_t = H / (m_s \times 10) \quad H_t : \text{積雪深 (cm/d)}$$

(2) 積雪・融雪計算モデルの考え方

本論文で提案する積雪・融雪計算モデルの名称を積雪・降雪分離型融雪計算モデルと名付け、略して A.F. D 型積雪モデルと呼び、以下この略名で表わすこととする。

積雪には、降雪が自重とともにしだいに締固まって落ちついた状態にある積雪ゾーン H_s (積雪比重 m_s) と降雪してまもない軽く積もっている状態にある降雪ゾーン H_n (降雪比重 m_n) とに分けられる。図-1 は、電源開発庁による奥只見ダム流域の水文観測資料から、観測積雪深、観測降雪深 (1979 年) の経月変化をグラフ化したものである。この図から、積雪深変化と降雪深変化に強い相関関係が認められることに着目して A・F・D 型積雪モデルを作成した。以下に、このモデルの考え方を示す。

気温 $t < 0^{\circ}\text{C}$: $H = (H_s \times m_s + H_n \times m_n) \times 10$
 $= u_s + u_n$

ただし、 $u_s = H_s \times m_s \times 10$
 $u_n = H_n \times m_n \times 10$
 $q = r$

気温 $t \geq 0^{\circ}\text{C}$: $H = (H_s \times m_s + H_n \times m_n) \times 10 - (k_1 + k_2)$
 $= u_s + u_n - (k_1 + k_2)$
 $q = (k_1 + k_2) + r$

H : 等価水深 (mm/d)
H_s : 初めの積雪深 (cm)
m_s : 積雪比重
q : 流出高 (mm/d)
H_n : 積雪深 (cm/d)
m_n : 降雪比重

次に計算結果の等価水深Hから積雪深Htを求めると次のようになる。

- (a) $u_n - (k_1 + k_2) < 0$ の場合 : u_s が融雪するため
 $Ht = H / (m_s \times 10)$ Ht : 積雪深 (cm/d)
- (b) $u_n - (k_1 + k_2) \geq 0$ の場合 : u_s は変わらず u_n のみ融雪するため H : 等価水深 (mm/d)
 $Ht = u_s / (m_s \times 10) + (H - u_s) / (m_n \times 10)$

ただし、融雪は従来の融雪計算法と同様、上面から融雪が始まり、地表面からの融雪はないと仮定している。

(3) 従来の融雪計算法の考え方とA・F・D型積雪モデルとの相違

- (a)従来の融雪計算法の考え方では、雪の比重を降雪と積雪に分けないで1つで表わしているが、A・F・D型積雪モデルでは、積雪による比重と降雪による比重の2つを用いている。
- (b)従来の考え方では、気温 $t < 0^{\circ}\text{C}$ では降雨は全て雪となって積雪すると考えているが、A・F・D型積雪モデルでは、降雪深のみ積雪して降雨は $t < 0^{\circ}\text{C}$ においても流出すると考えている。その理由としては、用いている気温は日平均気温であり、観測データでみられるように気温 $t < 0^{\circ}\text{C}$ においても降雪と降雨の両方が認められるからである。
- (c)気温 $t \geq 0^{\circ}\text{C}$ では、融雪となる要素は両者の考え方とも同じであり、気温による融雪量と降雨による融雪量の和であると考えている。
- (d)高度別地帯数の考え方は、両者ともほぼ同じ考え方であるが、A・F・D型積雪モデルでは高度別降雪増係数を取入れている。

下記に示す図-2、図-3に従来の融雪計算の考え方とA・F・D型積雪モデルの考え方を示す。

気温 $t < 0^{\circ}\text{C}$ (等価水深mm)	$t \geq 0^{\circ}\text{C}$ (等価水深)	$t < 0^{\circ}\text{C}$ (等価水深)	$t \geq 0^{\circ}\text{C}$ (等価水深mm)
降雨量 r	気温による融雪量 $-(k_1 + k_2)$ 降雨による融雪量	降雪深 $u_n = H_n \times m_n \times 10$	気温による融雪量 $-(k_1 + k_2)$ 降雨による融雪量
積雪深 $u_s = H_s \times m_s \times 10$	積雪深 $u_s = H_s \times m_s \times 10$	積雪深 $u_s = H_s \times m_s \times 10$	降雪深 $u_n = H_n \times m_n \times 10$ 積雪深 $u_s = H_s \times m_s \times 10$

流出高 $q = 0$ (mm/d) $q = (k_1 + k_2) + r$ (mm/d) $q = r$ (mm/d) $q = (k_1 + k_2) + r$ (mm/d)

図-2 従来の融雪計算法による考え方

図-3 A・F・D型積雪モデルによる考え方

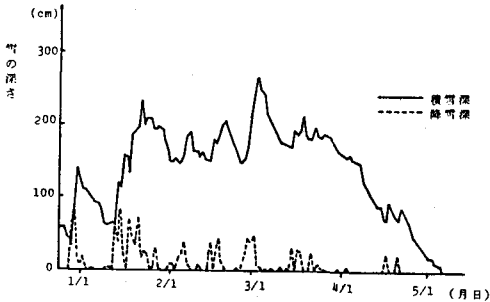


図-1 観測積雪深・降雪深変化図(1979年)

3. 解析結果と考察

(1) 流出解析結果について

流出解析は、1978年～1981年の4年間について解析を行なった。図-4に示すタンクモデルのパラメータは、1979年の水文資料について試算を繰り返し実測流出量との検証を行なった結果の値である。このパラメータを用いて他の年の流出計算も行なうことにした。従来の融雪計算による考え方の流出計算結果と実測流出量を図-5に示す。なお、この計算では、実測データにより奥只見地域の積雪比重は約0.45を用いた。図-5から明らかなように積雪・融雪期の流出量の計算値は実測流出量に比べて相当低い。同様の傾向が他の年についても認められた。一方、図-6は本論文で提案するA・F・D型積雪モデルによる流出計算結果を示す。ただし、この計算に用いたタンクモデルのパラメータは図-5の場合と同じものである。図-6から言えることは、積雪期では実測値と計算値との差はあまり認められないが、融雪期では計算値が実測値に比べて図-5と同様低い値を示す。同様の傾向は、他の年についても認められた。これらのことから次のことがいえる。

(a) 積雪期における流出量をみると、この期間では気温はほぼ0℃前後の一定状態であり、従来の積雪計算の考え方による降雨量が全て雪に変わるという考え方は、図-5から示されるようにあまり実状を表わしていないと考えられる。

(b) 融雪期においては、図-5、図-6に示されるように計算値が実測値に比べて相当低い値を示している。この理由としては、流出の形態が融雪期と非融雪期では相当異なるものであり、したがって、両者の流出量を1種類のタンクモデルの定数で表現することには無理があるためであると考えられる。そこで、筆者らは、融雪期におけるタンクモデルのパラメータを別途に設定し、融雪期と非融雪期の2種類のタンクモデルによる合成した流出量を用いる必要があると考えた。図-7に従来の融雪計算による合成したタンクモデルの流出量の計算結果を、また図-8にA・F・D型積雪モデルによる合成したタンクモデルの流出量の計算結果を示す。図-7、図-8から示されるように実測流出量と計算流出量にほぼ近い値が得られる。ここで、図-7は積雪

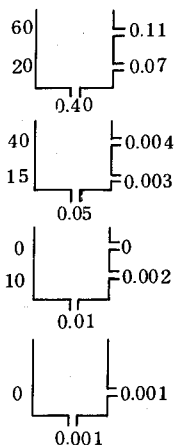


図-4 4段直列型タンクモデル(1979年)
(非融雪期)

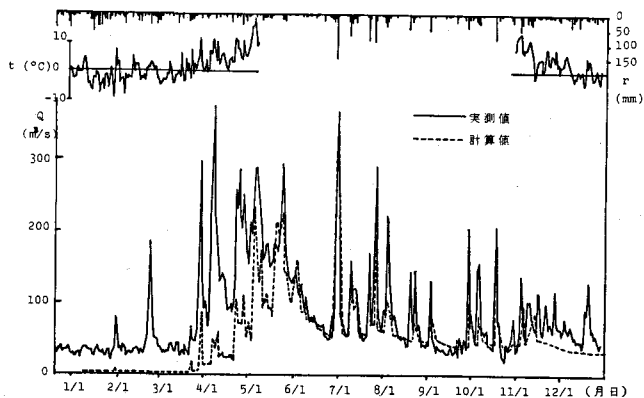


図-5 従来の融雪計算法による流出量(1979年)

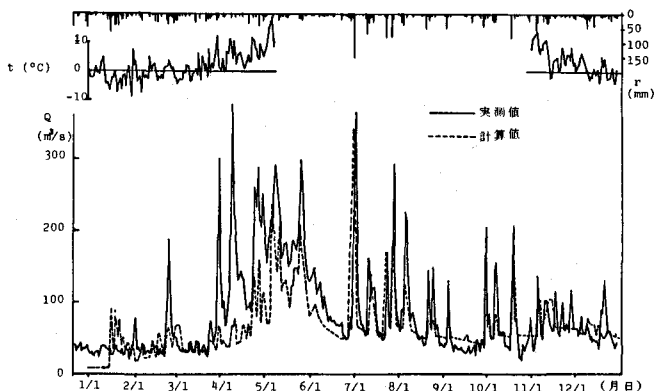


図-6 A・F・D型積雪モデルによる流出量(1979年)

期・融雪期と非融雪期の三者の合成流出量であり、図-8は融雪期と非融雪期の合成流出量である。

(2) 積雪深の経時変化について

図-9は積雪比重を0.2, 0.3, 0.45として、従来の積雪深計算経時変化を計算した結果である。この図からわかるように、積雪比重を0.45としたとき積雪深の観測値とほぼよい合致する結果が得られる。また、この値は現地実測データから得られる0.45と一致している。次に、図-10に本論文で提案するA・F・D型積雪モデルによる計算結果を示す。その際、積雪比重としては現地観測地の平均比重0.45を用いることとし、また降雪比重を0.01, 0.05, 0.10と変化させて計算を行なった結果、実測積雪深に近い0.05を降雪比重として用いることにした。図-9と図-10を比べてみると、図-9は計算値が実測積雪深に対し丸味をおびた緩やかな変化をしており、一方、図-10の方は、積雪深変化が計算値と実測値にかなり近い値を得ている。この理由としては、従来の積雪計算法ではみられない降雪比重の考え方を取入れていることによるものと考えられる。

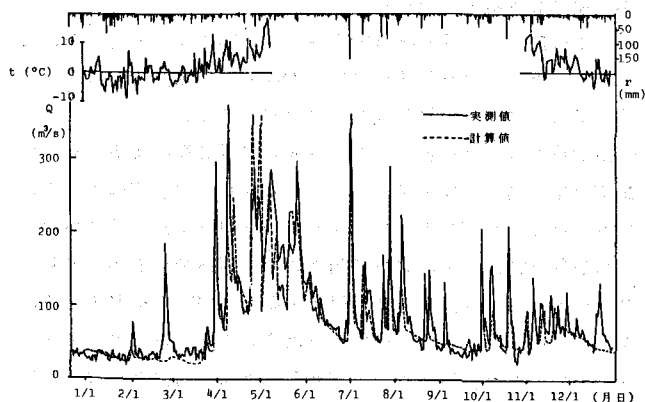


図-7 従来の融雪計算法による合成流出量(1979年)

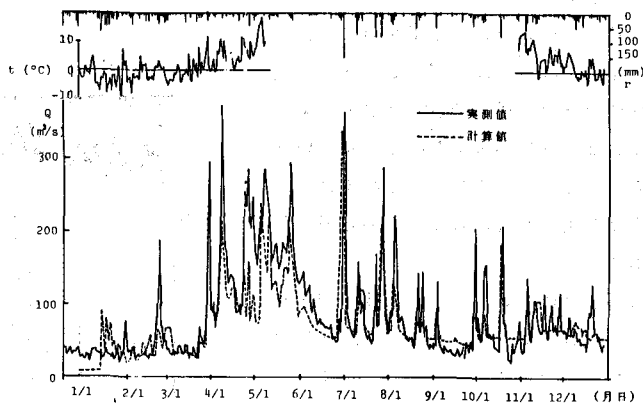


図-8 A・F・D型積雪モデルによる合成流出量(1979年)

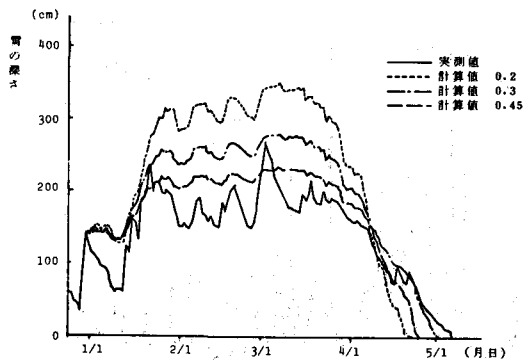


図-9 従来の積雪計算による積雪深変化図
(1979年)

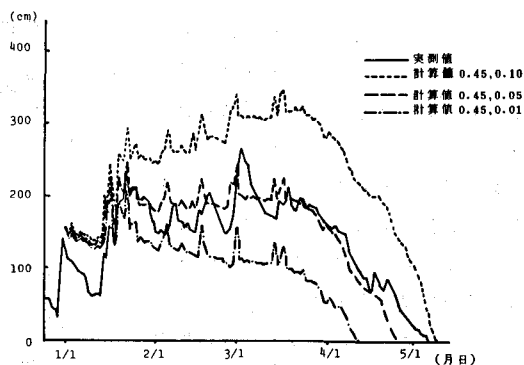


図-10 A・F・D型積雪モデルによる積雪深変化図
(1979年)

(3) 高度別積雪深の月別変化について

流域を高度別にダム地点（標高約800m）、標高1,000m、標高1,300m、標高1,600m、流域範囲（標高約1,900m）の4地帯に分割を行ない、現地観測値（流域にある22地点の観測積雪深）と標高別計算値（従来の積雪計算による計算結果とA・F・D型積雪モデルによる計算結果）の一覧表を表-1（1979年2月20日）、表-2（1979年3月19日）に示し、そして標高別等高線図と現地観測地点分布図を図-11に示す。表-1、表-2から示されるように現地観測積雪深と従来の積雪計算値およびA・F・D型積雪モデルによる計算値を比較すると従来の積雪計算値は観測値と比べて全体的に高い値を示す傾向がみられる。一方、本論文で提案する方法によると現地観測値とはほぼ近い傾向を示すことがわかる。

(4) ランドサットデータによる面的な月別融雪状態について

ランドサットデータによる面的な月別融雪状態変化図を図-12（1979年3月29日）、図-13（1979年5月4日）、図-14（1979年5月22日）に示す。またランドサットデータによる融雪状態と従来の融雪計算法およびA・F・D型積雪モデルによる3者の比較一覧表を表-3に

示す。図-13では、3月下旬の積雪状態を示し、流域全体がまだ積雪状態にある。図-14は5月初旬の積雪状態を示しており、ランドサットデータからみると標高1,000mではほとんど雪がない状態であるが、この標高における融雪深は、従来の計算値によれば約90cm、またA・F・D型積雪モデルによれば約40cm

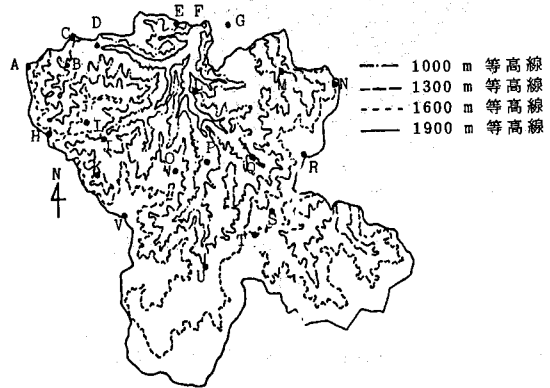


図-11 積雪深現地観測地点分布図・等高線図

観測地点	積雪深	計算値1	計算値2
A	2.8	3.30	2.88
B	2.0	2.48	2.08
C	2.8	3.30	2.88
D	1.8	2.48	2.08
E	2.6	2.80	2.40
F	2.15	2.48	2.08
G	2.5	—	—
H	2.98	3.30	2.88
I	2.5	3.02	2.57
J	2.5	2.48	2.08
K	3.0	2.80	2.40
L	1.8	2.48	2.08
M	2.2	2.48	2.08
N	2.60	3.30	2.88
O	2.60	2.80	2.40
P	1.5	2.48	2.08
Q	1.8	2.48	2.08
R	3.10	3.30	2.88
S	2.5	3.02	2.57
T	2.4	3.02	2.57
U	2.2	2.80	2.40
V	2.83	3.30	2.88

表-1 積雪深実測値・計算値
(1979年2月20日)

観測地点	積雪深	計算値1	計算値2
A	2.85	4.02	3.25
B	2.2	2.75	2.27
C	3.4	4.02	3.25
D	1.8	2.75	2.27
E	2.87	3.32	2.71
F	2.07	2.75	2.27
G	2.2	—	—
H	2.41	4.02	3.25
I	3.2	3.66	2.89
J	2.5	2.75	2.27
K	2.0	3.32	2.71
L	1.8	2.75	2.27
M	2.5	2.75	2.27
N	3.50	4.02	3.25
O	3.0	3.32	2.71
P	1.4	2.75	2.27
Q	1.8	2.73	2.27
R	3.33	4.02	3.25
S	2.5	3.66	2.89
T	2.4	3.66	2.89
U	2.4	3.32	2.71
V	3.83	4.02	3.25

表-2 積雪深実測値・計算値
(1979年3月19日)

雪状態を示しており、この時期では、ランドサットデータによれば標高1,000m、1,300mでは積雪がみられない。しかし、従来の積雪計算法では標高1,000m地点では雪がないが、標高1,300m地点では約40cm積雪している状態となっており、またA・F・D型積雪モデルによればランドサットデータの解析と同様、標高1,000m、1,300m地点共に雪のない状態がえられる。

以上のように、現地観測およびランドサットデータの両方から照らし合わせてみると、従来の積雪計算の考え方では積雪深の値が観測値に比べて全体的に高い傾向が得られる。ランドサットデータによる積雪状態

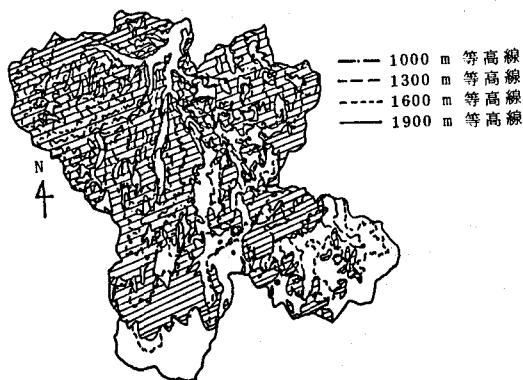


図-13 ランドサットデータによる面的な融雪状態
(1979年3月29日)

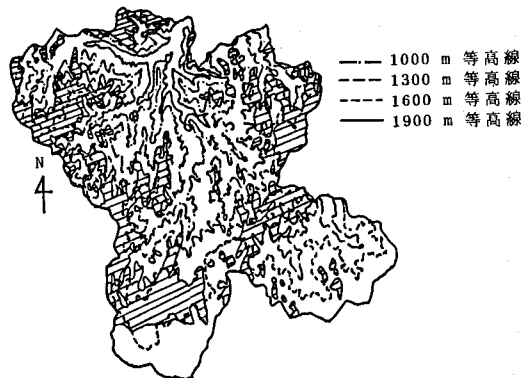


図-14 ランドサットデータによる面的な融雪状態
(1979年5月4日)

が、地形等により同標高地点でも積雪のある地点と積雪のない状態とがみられるが、A・F・D型積雪モデルでは、標高別に一様に積雪するという仮定を用いているため、計算値は実状からはなお異なっているが、従来の積雪計算法と比べると、現地観測データとランドサットデータの両方の双方に近い値が得られており、本論文で提案するA・F・D型積雪モデル法は実用的な見地からみれば、良好な積雪深値を示しているといえる。

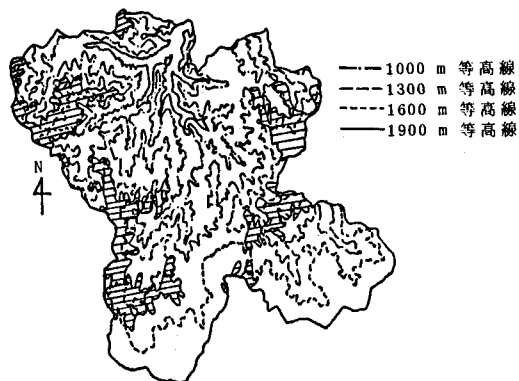


図-15 ランドサットデータによる面的な融雪状態
(1979年5月22日)

標 高 (m)	1979年3月29日			1979年5月4日			1979年5月22日		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1000	積雪有	2.63	2.16	積雪無	0.86	0.42	積雪無	0.0	0.0
1300	"	3.37	2.70	積雪有	2.31	1.57	"	0.43	0.0
1600	"	3.76	2.91	"	3.32	2.26	積雪有	1.80	0.75
1900	"	4.15	3.30	"	4.22	3.00	"	3.07	1.82

表-3 ランドサットデータによる月別融雪状態一覧表

記号説明 A: ランドサットデータによる積雪状態の有無

B: 従来の積雪計算法による計算値(m)

C: A・F・D型積雪モデルによる計算値(m)

4. 結 論

多雪地帯における融雪洪水流出解析, 積雪深変化および高度別積雪深の3者の面からアプローチして、従来の積雪計算法の考え方によるタンクモデル法と本論文で提案した積雪・降雪分離型融雪計算モデルによる

タンクモデル法による比較検討を行なってきた。以上述べた結果についてまとめると次のようである。

(1)多雪地帯における長期流出解析では、年間を通して1種類のタンクモデルのパラメータで流出量を表わすには無理があり、融雪期と非融雪期のそれぞれのタンクモデルのパラメータを決定し、両者のタンクモデルを合成した流出量を用いると実測流出量との適合度が良いことがわかった。

(2)積雪深変化について、従来の積雪計算法の考え方による積雪深の値では、実測積雪深変化に対し相当鈍感な曲線を示すが、A・F・D型積雪モデルによる計算方法であると、実測積雪深に対し鋭い曲線を描くことがわかった。この理由としては、前述で上げたようにA・F・D型積雪モデルでは降雪比重と積雪比重の2つの雪の比重を取入れて降雪深実測資料がモデル内で積雪深変化としてよく表わされているためであると思われる。ここで、さらに降雪比重について比重の日の変化(約10日間周期)を考慮した積雪計算をA・F・D型積雪モデルに組み込めばより実測積雪深の値に近づくものと考えられ、今後検討する必要があるものと考えられる。

(3)高度別積雪深について、現地観測データおよびランドサットデータの両方の面から照らし合わせて積雪深の計算を行なった結果、従来の積雪計算法では、高度別積雪深の値は実測積雪深に対し、全体的に高い傾向を示すことが明らかとなった。一方、A・F・D型積雪モデルによる高度別積雪深の計算値では、現地観測データおよびランドサットデータの積雪状態に近い値が得られることがわかった。

なお、本研究の一部は、昭和57年自然災害特別研究“豪雪地帯における融雪洪水の予測と制御”(研究代表者 日野幹雄)として実施したものである。また、奥只見流域の水文資料は電源開発局により提供を受け、特に同社土木部長代理岡田剛氏に多くの有益なアドバイスをいただいた。さらに、ランドサットデータは宇宙開発事業団より提供を受け、東京理科大学モートセンシング研究所で画像処理解析をした。また、東京理科大学土木工学科学生中村博君、三木原広治君の協力を得た。以上を特記し謝意を表する。

参考文献：奥只見地域，積雪・気象・流量調査資料 電源開発株式会社