

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
Estimation of Basin-wide Snow Water Equivalents
Using Landsat-derived Snow Covered Area

東京大学工学部 正 員 高 橋 裕
科 学 技 術 庁 正 員 武 田 要
科 学 技 術 庁 森 蘭 繁 光
東京大学大学院 学生員 ○小 池 俊 雄

1. はじめに

積雪は有益な水資源にもかかわらず、広域的な積雪量の把握が困難なために、水文学的な研究は遅れている。従来の積雪水量の推定には人力によるスノーサーベイや航空写真測量¹⁾が用いられてきた。しかし、前者は調査の危険性からその件数は減少し²⁾、後者は判読誤差に加え、経費の面から広域調査への適用には問題がある。近年、流域の内外から流域積雪水量を代表する降水量観測点を抽出し、その冬期降水量データと春期融雪流出高との相関分析から積雪水量を推定する方法³⁾や、これにヘリコプター等による現地調査や地形解析を加えて流域積雪水量の代表性の高い冬期降水量観測候補地点を選定する研究⁴⁾が行われている。一方、欧米では米国を中心として、1960年のTIROS-1の打ち上げ以来、NOAA、GOES等の衛星による積雪の観測が始まり、1972年のLANDSAT-1の打ち上げを契機に、リモートセンシング技術による積雪領域の研究が進歩した⁵⁾。我国でも、1979年1月から地球観測センターにおいてLANDSATデータの受信が開始され、データの直接入手が可能となり、武田・高橋によるLANDSAT雪線情報と積算暖度法により流域最大積雪水量を求める研究²⁾等が行われた。本研究では、LANDSATのMSSデータから抽出される流域積雪面積率と水文情報から得られる積雪水量との関係を導き、積雪水量のリアルタイムな推定を目的としている。

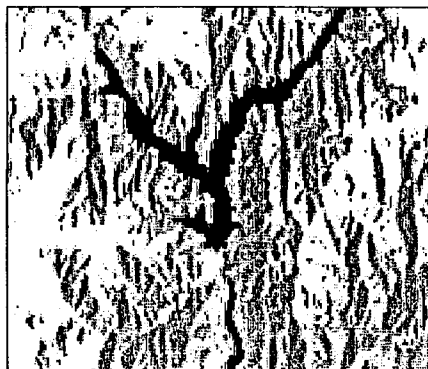
2. 解析の方法

本研究では、流域積雪水量推定のために次の方法を用いた。

- (1) LANDSATのMSSデータから流域積雪面積率を算定する。
- (2) 各流域の水文データから水収支式を用いて流域積雪水量を算定する。
- (3) 流域の積雪面積率と積雪水量との関係を表わす式を定める。
- (4) (1)、(2)の結果と(3)の関係式を用いて最小自乗法により、積雪水量の推定式を定める。

YAGISAWA DAM 1979.5.4 B6

LINE= 2352, 2472 PIXEL= 1423, 1603
MAX=45 MIN= 15 FULL= 11



YAGISAWA DAM 1979.5.4 B6

LINE= 2387, 2457 PIXEL= 1473, 1553
MAX=40 MIN= 15 FULL= 12



図1(左) 図2(右)バンド6を用いたG. C. P. の出力例 (Versatec 静電プリンタ使用)

この結果、融雪期にLANDSATデータが収集できれば、(4)の推定式を用い、リアルタイムな積雪水量の推定が可能となる。

2.1 LANDSATデータによる流域積雪面積率の算定

LANDSATのMSSデータを用い、デジタル解析により流域面積率を算定する。比較的狭い地域を対象としているためまず流域を囲む3つのGrand Control Point(以後G.C.Pとする)の地図・画像座標を求め、アフィン変換を行い、ニアレストネイバー法を用いてメッシュ化された地図上の流域へ再配列する⁶⁾。LANDSATのMSSは $0.5 \sim 1.1 \mu m$ の波長域を4つのバンドに分けて地表の状態を測定しており、バンド6, 7を用いると識別しやすいダム湖等の水面の境界部や河川の合流点をG.C.P.とした。図1, 2はバンド6を用いたG.C.P.の出力の一例で、図2は画像座標読み取りのため図1を拡大したものである。画像出力には科学技術庁資源調査所のDICOM ED-47や東京大学大型計算機センターのVersatec 静電プリンタを使用した。積雪域の識別について、欧米ではバンド5が最適であるとされており、⁷⁾⁸⁾ また武田によれば我国においてもバンド5が適していることが示されている²⁾。そこで本研究でもバンド5を用い、積雪域の代表として日かげの積雪域を、無雪域の代表として森林地域を抽出して、両域のCCT計数値をヒストグラム化した後、それぞれの平均値の中間値を50%の積雪域を含む領域と判断し、これを境界値として、再配列されたデータを積雪域、無雪域に分類した。この結果を用いて、流域積雪面積率を算定し、各シーンを合成して積雪分布図を作成した。図3に解析のフローを示す。

2.2 流域積雪水量の算定

LANDSATデータ収集日における流域積雪水量(S_s)は融雪終了日までの水収支式(1)の総和をとって算定した。

$$P = Q + E + \Delta S_G + \Delta S_s + \Delta M_s \quad (1)$$

ただし、P:降水量, Q:流出高, E:蒸発散量, ΔS_G :地下水貯留量の変化, ΔS_s :積雪水量の変化

ΔM_s :不飽和帯水分量の変化

ここで、積雪水量の変化の総和と地下水貯留量の変化の総和については

$$-\sum \Delta S_s = S_s \quad (2)$$

$$-\sum \Delta S_G = S_{G2} - S_{G1} \quad (3)$$

ただし、 S_{G1} :画像収集日の地下水貯留量, S_{G2} :融雪終了日の地下水貯留量

また、不飽和帯水分量の変化の総和に関しては、

$$\sum \Delta M_s = 0 \quad (4)$$

と仮定した。したがって、LANDSATデータ収集日における流域積雪水量(S_s)は

$$S_s = \sum Q + \sum E - \sum P - S_{G1} + S_{G2} \quad (5)$$

から得られる。式(5)において、蒸発散量の算定には、

(i) 積雪域からの蒸発散は無視し、無雪域のみ考慮する⁹⁾

(ii) 最高気温と最低気温の平均値を日平均気温とする。

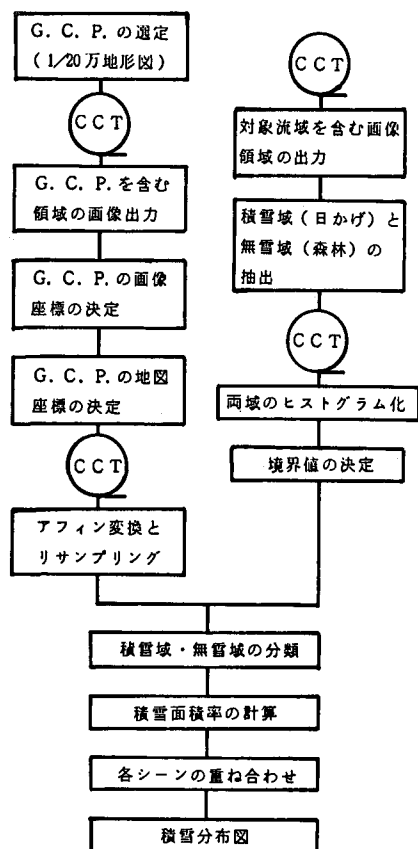


図3 デジタル解析のフロー

の仮定をおいて、ハーモン式(6)を用いて算定した。

$$E_P = 0.14 D_0^2 P_t \quad (6)$$

ただし、 E_P ：日平均蒸発散能 (mm/day) D_0 ：日照時間 (12 hr/day)

P_t ：日平均気温に対する飽和絶対湿度 (g m/m³)

気温については、各メッシュの平均標高データと積雪分布データから、無雪域の平均標高を求め、0.6℃/100mの高度補正を行った。 ΣE は、 E_P と、画像データ収集日間の平均無雪面積率、日数との積として求めた。地下水貯留量 S_{G1} 、 S_{G2} については、不圧減水曲線から求めた。高橋・安藤・伊藤は、流出試験地、流量年表、多目的ダム管理年報の流量データより、無降雨期間の減水部を抽出して、被圧、不圧減水曲線の適合性を検討し、初期流出高の変化に対して、減水定数が一定となる不圧減水曲線の適合性がよいとしている¹⁰⁾。図4は今回の対象流域における不圧減水定数 (A_U) と初期流出高 (Q_0) との関係を表わす一例である。不圧減水曲線は式(7)で表わされ

$$Q = Q_0 / (1 + A_U \times \sqrt{Q_0} T)^2 \quad (7)$$

ただし、 T ：日数

(7)式を積分すると

$$S_G = \int_0^\infty Q dt = \sqrt{Q_0} / A_U \quad (8)$$

となり、地下水貯留量 S_G が求まる。融雪期の流量は1日の中で時間変動するために、各日の最低流量を日換算して、初期流出高として用いた。また、ダムにおける時間流量データは観測誤差により不規則な変動を示すので、あらかじめ移動平均して用いた。

2.3 積雪面積率と積雪水量との関係

積雪面積率と積雪水量との関係式を導くために、次の仮定をおいた。

$$(i) \quad S(h) = ah + b \quad (9)$$

$$(ii) \quad A_c(h) = (h - H_L) / (H_U - H_L) \times 100 \quad (10)$$

ただし、 h ：標高、 H_L ：流域内の最低標高、 H_U ：流域内の最高標高、 $S(h)$ ： h における積雪水量

$A_c(h)$ ：流域内の H_L から h までの面積率、 a 、 b ：定数

図5は宝川森林理水試験地におけるスノーサーベイの結果と標高の関係、図6は同流域における $A_c(h)$ と h の関係を表わしているが、(i)、(ii)の仮定が妥当であることが理解される。式(10)より標高 h における面積率 $A(h)$ は

$$A(h) = 100 / (H_0 + H_L)$$

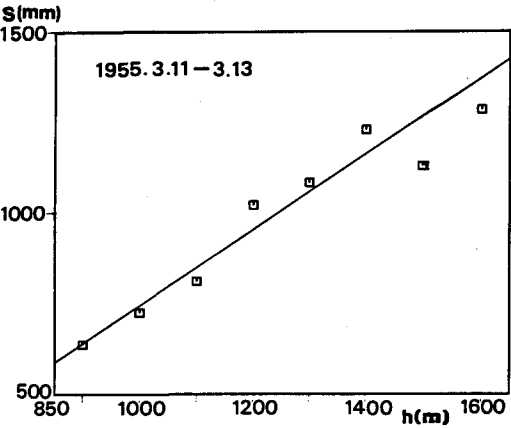


図5 宝川試験地におけるスノーサーベイの結果

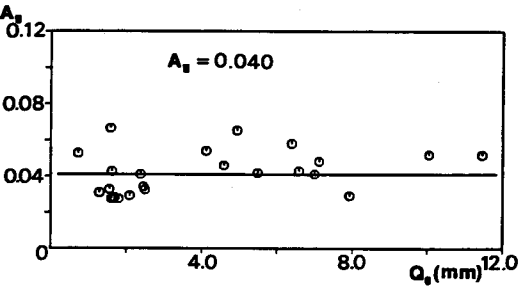


図4 宝川森林理水試験地における A_U と Q_0 の関係

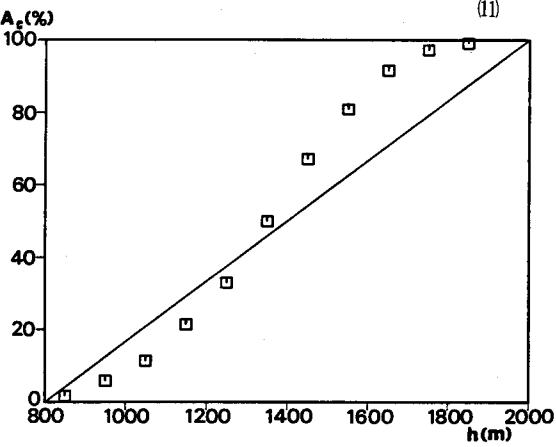


図6 宝川試験地における $A_c(h)$ の特性

雪線が $h = H_0$ にある時、積雪面積率 (A_s)、流域積雪水量 (S_s) は、それぞれ

$$A_s = 100 - A_c(H_0) \tag{12}$$

$$S_s = \int_{H_0}^{H_u} S(h) \times A(h) dh \tag{13}$$

式(9)、(10)、(11)、(12)、(13) 条件 $S_s = 0$ ($A_s = 0$ の時) を代入して、係数を整理して A_s と S_s の関係式を求めると

$$S_s = C_1 A_s^2 + C_2 A_s \tag{14}$$

となる。本研究では、係数 C_1 、 C_2 は最小自乗法により求めた。

3. 解析資料と対象流域の概要

本研究で用いたLANDSATデータは、116-34の1979年3月29日、5月4日、5月22日の3シーンである。対象流域としては、このシーンに含まれる利根川源流域の、林業試験場宝川森林理水試験地本流域、矢木沢ダム流域、赤谷川相俣ダム流域の近接する3流域を用いた。利根川源流域の積雪は、北西の季節風によって新潟県との分水嶺を越えて群馬県側にこぼれ落ちて根雪となったもので、流域面積及び平均春期融雪高 (Q_s) を図7に示す³⁾。流域のメッシュ化については、地形解析が報告されている宝川試験流域では、¹¹⁾ 50 m × 50 mメッシュを用いて解析を行い、標高の読み取りは、200 m × 200 mメッシュを利用した。他の2流域については、解析及び標高の読み取りをそれぞれ、2" × 2"、10" × 10"メッシュで行った。水文資料の中で、降水量について、宝川本流、矢木沢ダムでは、地点雨量を用いたが、相俣ダム流域では、冬期観測を行っている3つの地点雨量を流域平均して用いた。また不圧減水定数算定のための無降雨期間の流量データについては、宝川試験地では過去20年間の流量データから、他の2流域では観測開始年からの流量データから7月～11月の無降雨期間を抽出した。融雪終了日について、相俣ダム流域では5月末日、他の2流域では6月末日としたが、この日が降雨日で減水部が抽出できないので、融雪終了日を7月9日とした。

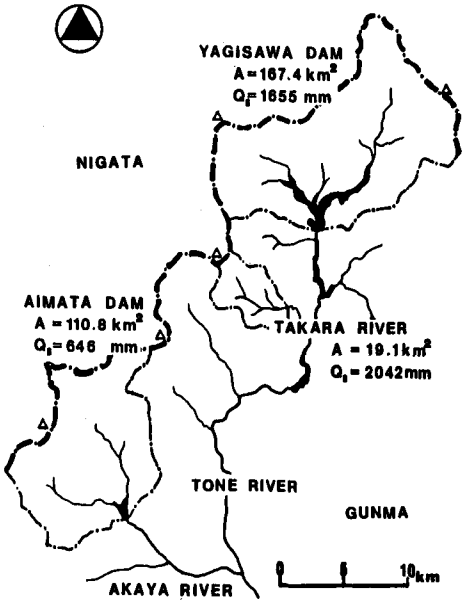


図7 対象流域の概要³⁾

4. 解析の結果

表1に、式(5)の各項の計算値と積雪面積率 (A_s) を示す。また、図8、9、10は、各流域の積雪分布図で積雪面積の変化を示している。図11は3流域の積雪面積率と積雪水量との関係を示したもので、式(11)に最小自乗法を適用して係数 C_1 、 C_2 を求めると、

$$S_s = 0.19 A_s + 4.1 A_s \tag{15}$$

(相関係数 $R = 0.98$)

となり、高い相関を示す。

表1 算定の結果

	宝川本流			矢木沢ダム			相俣ダム		
	3/29	5/4	5/22	3/29	5/4	5/22	3/29	5/4	5/22
ΣQ (mm)	1841	1213	652	1358	883	546	446	223	76
ΣE (mm)	118	113	101	137	122	104	150	66	29
ΣP (mm)	434	336	258	415	318	250	340	223	91
SG_1 (mm)	40	103	110	68	134	143	55	122	127
SG_2 (mm)	44			75			121		
S_s (mm)	1529	932	429	1087	628	332	332	66	9
A_s (%)	96.5	77.9	46.4	91.0	58.3	34.1	40.3	14.9	7.5

5. 結 論

近接流域において、LANDSATのMSSデータから抽出される積雪面積率(A_s)と、水文情報から求まる積雪水量(S_s)との関係は、単年度の解析の結果

$$S_s = C_1 \times A_s^2 + C_2 \times A_s \tag{14}$$

で表わされることが示された。従来の方法と異なり、この方法を用いれば、融雪開始日における積雪水量だけでなく、融雪が進行した時、LANDSATデータが収集できれば、その時点における積雪水量の推定が可能となり、ダム操作上有益な情報を与えると思われる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、貴重な資料の提供と御指導を賜りました森業試験場防災部の中野秀章防災部長、理水第一研究室の各位、宝川森林理水試験地の吉野氏には心から感謝いたします。また、各種資料を提供された建設省利根川上流ダム統合管理所、相俣ダム管理所の各位に深謝いたします。

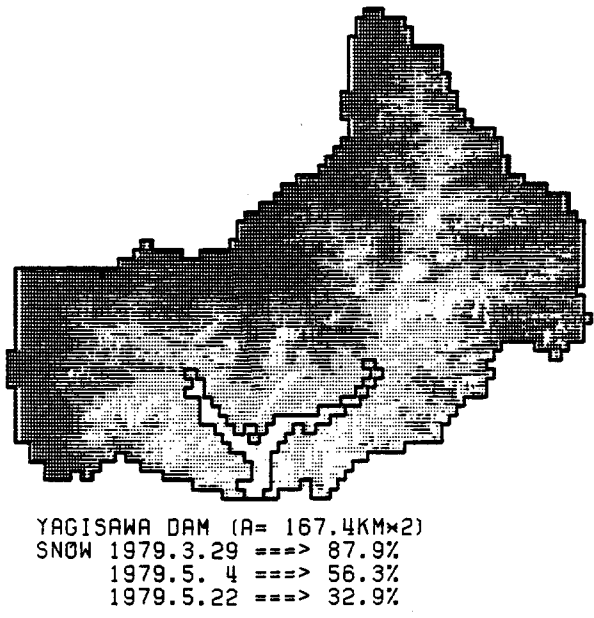
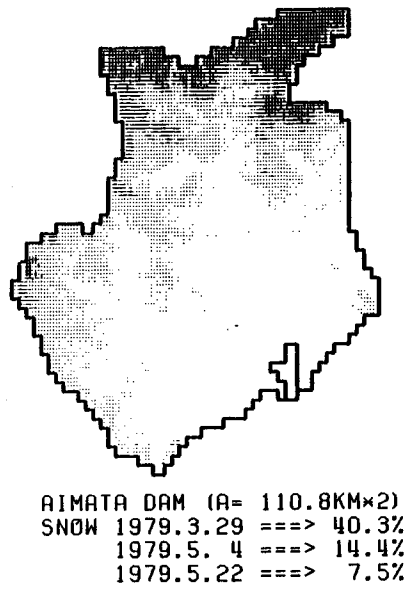
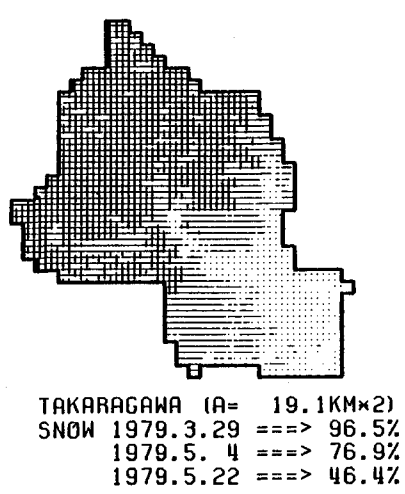
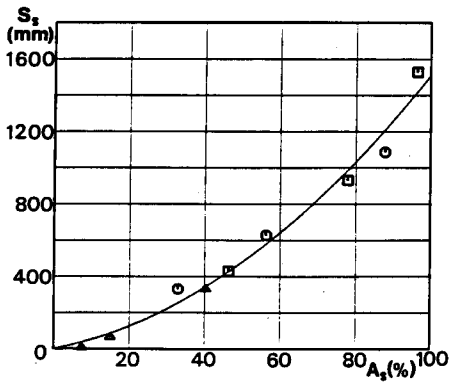


図8 (左上) 宝川試験地流域の積雪分布図
図9 (左下) 矢木沢ダム流域の積雪分布図
図10 (右上) 相俣ダム流域の積雪分布図
図11 (右下) 積雪面積と積雪水量の関係



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, PP. 41 - 54, 1968.
- 2) 武田要, 高橋裕: Landsat 雪線情報と積算暖度法による流域最大積雪水量に関する研究, 土木学会論文報告集, №311, PP. 81 - 92, 1981.
- 3) 竹内俊雄: 利根川本川上流域に於ける融雪の長期予想について, 防衛大学校理工学研究報告 第15巻 第2号, PP. 89 - 106, 1977.
- 4) 電源開発株式会社 関東支社: 奥只見地区の冬期積雪分布特性と流域総積雪水量の算定について, 土木学会関東支部講演会「北陸豪雪と土木技術」資料, 1981.
- 5) Barnes, J.C. and C.J. Bowley : NASA Conference Publication 2116, Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, PP. 1 - 19, 1979.
- 6) JARS, RESTEC, TRIC : リモートセンシングデータのディジタル解析
リモートセンシング基礎講座, 1977.
- 7) Barnes, J.C., and C.J. Bowley : Handbook of techniques for satellite snow mapping, Final Report, NASA - 21803, PP. 1 - 95, 1974.
- 8) degaard NASA Conference Publication 2116, Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, PP. 93 - 106, 1979.
- 9) 金子良: 農業水文学, 共立出版, PP. 154 - 159, 1973.
- 10) 高橋裕・安藤義久・伊藤孝: 山地河川の地下水流出の減水特性に関する研究, 土木学会論文報集投稿中
- 11) 東京営林局: 宝川森林治水試験報告, 1941.