

LANDSATデータを用いた流域積雪水量算定モデルの総合化に関する研究

Synthesizing the Model for Estimation of Basin-wide Snow Water Equivalent Using LANDSAT Data

東京大学工学部 正 員 高橋 裕
 東京大学工学部 正 員 小池俊雄
 東京大学大学院 学生員 ○田原 功

1. はじめに

雪は量的にも、その流出時間特性からも重要な水資源であるにもかかわらず、その水文学的研究は遅れている。小池・高橋・安藤によれば、年降水量と年流出量の関係において、降雪地域では年流出量が年降水量を上回るという不合理な結果が得られ、降雪量が過少に評価されている事が示されている。¹⁾これには、標高の高い所に存在する気象観測施設が少ないことも原因の一つである。例えば、アメダスの位置をその標高で分類して、それぞれの割合を示すと、0m～250mは65%、251m～500mは15%、501m～750mは9%、751m～1000mは6%、1001m～は6%であり、また、全国154ヶ所の気象庁普通気象観測所のうち、標高1000m以上の所にあるものは4ヶ所と、標高の高い所に存在するものが少なく、多雪域の積雪資料が少ないことを示している。従って、雪を水資源として有効に利用するためには、まず第一に、融雪流出の初期値である積雪水量を知る必要がある。一方、1979年から宇宙開発事業団の地球観測センターにおいてLANDSATデータの直接受信が行われており、昨今のリモートセンシング技術の発達から、積雪域の面的な情報の入手が容易になってきた。武田・高橋は積雪域の雪線情報による流域最大積雪水量算定に関する研究を行った。²⁾さらに、小池・高橋・吉野は積雪面積情報によって流域積雪水量を算定するモデルを作成した。³⁾これによって、リアルタイムな積雪水量の推定が可能となった。しかし、この研究におけるモデルの適用例は数流域にとどまっており、積雪水量の高度分布特性を未知量として取り扱っているために既存のデータが無ければ、その係数を決定する事ができない。

LANDSATデータの直接受信開始より7～8年経て、データの蓄積ができたため、モデルを多くの流域へ適用し、さらにその結果を統計的に処理することによってモデルの総合化が可能となってきた。モデルを任意の流域に対して適用するためにも、このような統計的処理が必要である。そこで本研究では、小池・高橋・吉野による積雪面積情報を用いた流域積雪水量の推定モデルを融雪期において北海道から北陸の複数の多目的ダム流域に対して適用してその汎用性を示し、そのモデルに含まれる積雪水量の高度分布特性を統計的に分析することによって総合化し、任意の流域において流域積雪面積情報が得られた場合の流域積雪水量の推定の可能性を示す。

2. 対象流域の概要と解析データ

図1に解析の概要のフローを示す。本研究で解析の対象とした流域は北海道、東北、上信越、北関東及び北陸の28の多目的ダム流域であり、

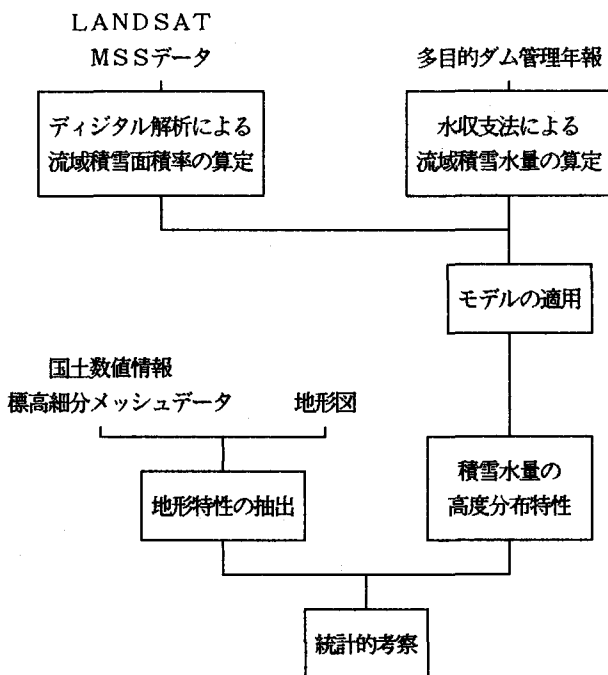


図1 解析の概要のフロー

図2に解析対象流域位置図を示す。また、表1に流域の諸元を示す。

2. 1 LANDSATデータによる流域積雪面積率の算定

流域積雪面積率は、LANDSATのMSSのデータを用いてデジタル解析を行って算定した。まず流域を囲む3ヶ所のGCP (Ground Control Point) の地図及び画像座標を求め、アフィン変換による座標変換を行い、最近隣法 (Nearest Neighbour法) によりメッシュ化された地図上へ再配列する。⁴⁾ GCPとしてはバンド6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用いた。積雪域の判別には、バンド5のデータを用い、積雪域の代表として日陰の積雪域を、無雪域の代表として森林地域を抽出して、両域のCCTカウント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、この値を境界値として再配列されたデータを積雪域と無雪域に分類し、流域積雪面積率 A_s を算定した。²⁾

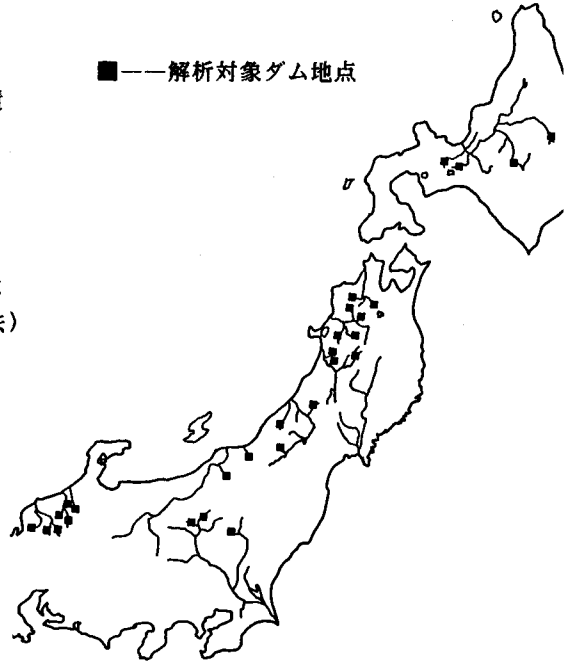


図2 解析対象流域位置図

表1 解析対象流域の諸元

	ダム名	流域面積 A (km ²)	最高標高 H_M (m)	最低標高 H_L (m)		ダム名	流域面積 A (km ²)	最高標高 H_M (m)	最低標高 H_L (m)
北海道	金山ダム	470.0	1920	340	上信越	内の倉ダム	47.5	1424	150
	大雪ダム	291.6	2230	810		笠堀ダム	70.0	1258	190
	豊平峡ダム	134.0	1318	480		矢木沢ダム	167.4	2141	850
	漁川ダム	113.3	1320	170		相俣ダム	110.8	2026	540
東北	沖浦ダム	200.8	1517	190	北関東	川俣ダム	179.4	2368	960
	目屋ダム	171.6	1098	170					
	素波里ダム	100.0	1157	150		翠川ダム	57.8	1644	340
	早口ダム	48.5	1177	290		内川ダム	34.5	1069	230
	萩形ダム	86.7	1179	230	北陸	手取川ダム	247.2	2702	470
	森吉ダム	125.0	1281	330		大日川ダム	83.9	1368	340
	鏝畑ダム	320.3	1614	400		広野ダム	42.3	1288	320
	岩見ダム	73.1	1059	140		笹生川ダム	70.7	1454	530
	旭川ダム	34.4	1170	110		九頭竜ダム	196.9	1450	660
北	高坂ダム	68.2	1146	190					
	木地山ダム	63.0	1609	480					
	荒沢ダム	162.0	1771	240					

2. 2 流域積雪水量の算定

LANDSATデータの収集日における流域積雪水量 S_s は、LANDSATデータの収集日から融雪終了日までの水収支式

$$S_s = -\sum P + \sum Q + \sum E \quad \dots\dots (1)$$

S_s : 流域積雪水量 P : 降水量 Q : 流出高 E : 蒸発散量

で示される。⁵⁾

流出高と降水量に関しては、多目的ダム管理年報 (建設省河川局監修) のデータを用いた。

蒸発散量の算定については、積雪域における蒸発散を無視し、^{5), 6)} 無雪域のみを考慮して、Hamon式⁷⁾ によって行った。

3. 流域積雪水量算定モデルと積雪水量の高度分布特性の検証

3. 1 面的情報による流域積雪水量算定モデル

本研究で用いた流域積雪水量算定モデルは、流域積雪水量を流域積雪面積率からリアルタイムに推定できるモデルを用いる。³⁾

流域積雪水量は式(2)で求められる。

$$S_s = \int_{H_L}^{H_H} S(h) A(h) dh \quad \dots\dots (2)$$

S_s : 流域積雪水量 $S(h)$: 流域の平均積雪水量の高度分布 $A(h)$: 流域面積の高度分布

H_L : 流域内最低標高 H_H : 流域内最高標高

積雪水量の高度分布に関しては、利根川上流の林業試験場室川森林理水試験地内の初沢流域と板幽沢流域での積雪調査から、流域の平均積雪水量が直線高度分布であり、

$$S(h) = \begin{cases} a(h - H_0) & (H_0 \leq h \leq H_H) \\ 0 & (H_L \leq h \leq H_0) \end{cases} \quad \dots\dots (3)$$

H_0 : 雪線の平均標高

で与えられ、係数“a”は平均積雪水量の高度分布直線の傾きを表し、流域全体が融雪状態になった時点で最大となり、以後は一定値を示すことが明らかにされている。この“a”をもって積雪水量の高度分布特性を表す。

流域面積の高度分布特性に関しては、標高を無次元化して、以下のような高次関数を用いて表す。

$$A(x) = \begin{cases} k(x/x_m)^p & (0 \leq x \leq x_m) \\ k((1-x)/(1-x_m))^q & (x_m \leq x \leq 1) \end{cases} \quad \dots\dots (4)$$

ただし、

$$1/k = x/(p+1) + (1-x)/(q+1)$$

そして、雪線が x_m にある時の積雪面積率を A_{sm} として、式(4)と合わせて式(2)の積分を実行すれば、

$$S_s = \begin{cases} \frac{ax_m(H_H - H_L)}{p+2} \left(\frac{p+1}{kx_m} \right)^{\frac{1}{p+1}} (1-A_s)^{\frac{p+2}{p+1}} + \delta S_s & (A_{sm} \leq A_s \leq 1) \\ \frac{a(1-x_m)(H_H - H_L)}{q+2} \left(\frac{q+1}{k(1-x_m)} \right)^{\frac{1}{q+1}} A_s^{\frac{q+2}{q+1}} & (0 \leq A_s \leq A_{sm}) \end{cases}$$

ただし、

..... (5)

$$\delta S_s = a(H_H - H_L) \left[x_m - x_m \left(\frac{p+1}{kx_m} (1-A_s) \right)^{\frac{1}{p+1}} + \frac{k(1-x_m)^2}{(q+1)(q+2)} - \frac{kx_m^2}{(p+1)(p+2)} \right]$$

が得られ、流域積雪面積率 A_s から流域積雪水量 S_s の算定ができる。

3. 2 融雪量分布モデルによる積雪水量の高度分布特性の検証

小池・高橋・吉野による融雪量分布モデル⁸⁾ (記号については文献8)を参照)

$$M_{cal} = \frac{0.3321 \left(\frac{\bar{T}_{6-18} + 273}{273} \right)^4 - 33.4 \Delta T_{18-21} \left(\frac{273}{T_{18} + 273} \right)^4 + 3.0}{8} + \frac{2.49 \Sigma (e_{sat} - 6.1) + \frac{P \bar{T}_p}{10}}{8} + 0.102 d h + \dots (6)$$

を用いて、利根川上流の林業試験場宝川森林理水試験地内の初沢流域を対象として、1983年4月3日及び4月9日から融雪終了日迄の各標高帯における平均融雪量を計算した。ここで求められた融雪量はそれぞれの積雪水量と同等である。この結果を図3に示す。この図から4月3日と4月9日の積雪水量の高度分布が直線であり、それぞれの勾配が2.3と2.2であり、変化していないことがわかる。また、図4は流域積雪水量算定モデルを適用した結果である。³⁾ A_sとS_sの観測値から同定した“a” S_s(mm)

の値は2.4であり、融雪量分布モデルから求めた値とほぼ同じであるから、“a”が流域積雪水量の高度分布を表す値として妥当であることが示された。

3. 3 モデルの適用結果

(5) 式のモデルを図2の各流域で適用して、流域積雪面積率 A_sと流域積雪水量 S_sの観測値から流域積雪水量の高度分布特性を示す係数“a”を同定し、a₀とする。図5(a), (b)は積雪面積情報から流域積雪水量を推定するモデルを東北、上信越、北関東、北陸の広範囲にわたる多目的ダム流域へ適用した結果の例であり、他の流域でも良い適合性を示した。一方、北海道に関しては、豊平峡ダムでは良い適合性を示したが、漁川ダムでは良い適合性を示さなかった。大雪ダムと金山ダムは得られたLANDSATデータのシーン数が少なかったためここでは言及しない。

4. 流域積雪水量の高度分布特性の総合化

モデル中の積雪水量の高度分布係数“a”は未知数であり、また積雪調査から求めるのは一般に困難であるため、A_sとS_sの観測値から同定する必要がある。そこで、比較的容易に得られる地形特性から“a”を推定できれば、過去のデータの蓄積の無い流域等にもモデルを適用することができる。よって、本研究では積雪水量の高度分布係数“a”と流域の地形特性との関係を線形重回帰分析によって表す。地形特性としてはまず、緯度・平均標高・最高標高・最低標高・標高差・平均勾配・流域面積・日本海海岸からの距離・八方位のうち北・北西及び西向き斜面の面積率の和の九つを考えた。これらの流域の地形特性は国土数値情報の標高細分メッシュデータと地形図から抽出した。

東北、上信越・北関東、北陸の各地域に分けて、各地域において積雪水量の高度分布特性と相関の高い地形要因で、線形重回帰分析を行って、以下の結果を得た。

東北、上信越・北関東、北陸の各地域に分けて、各地域において積雪水量の高度分布特性と相関の高い地形要因で、線形重回帰分析を行って、以下の結果を得た。

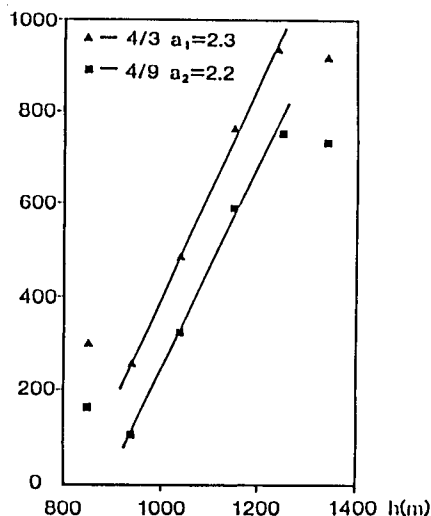


図3 初沢流域の積雪水量高度分布

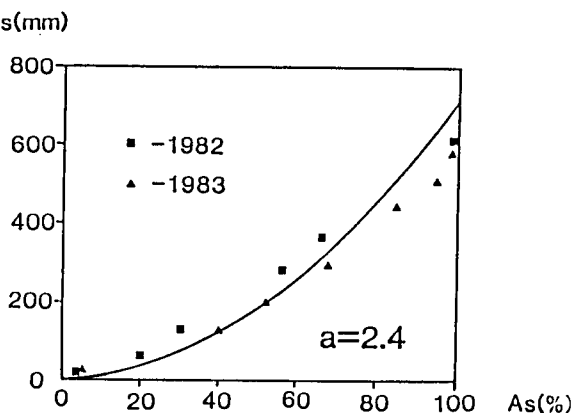
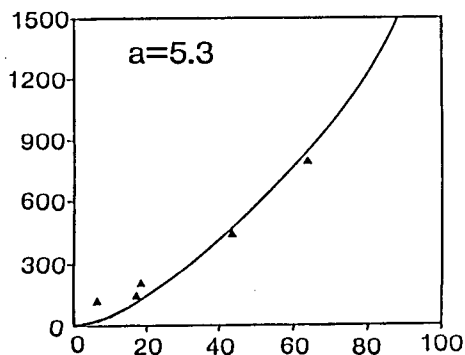


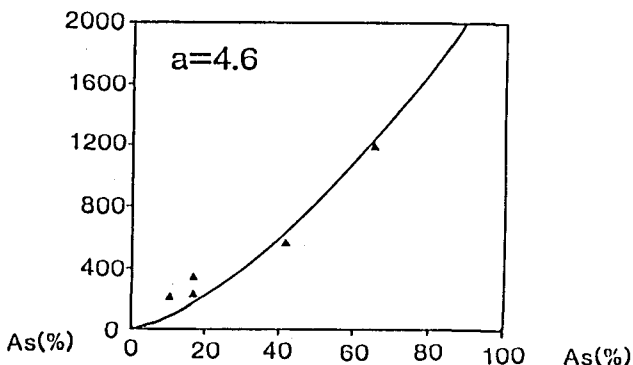
図4 初沢流域
(積雪水量算定モデル適用結果)

Ss(mm)



(a) 本地山ダム

Ss(mm)



(b) 荒沢ダム

図5 モデルの適用例

平均標高と日本海海岸からの距離は相関が高いので、各地域で偏相関係数の高い方を選択した。

①東北

説明変数は日本海海岸からの距離 L (Km)、流域面積 A (Km^2)、北・北西・西向き斜面の斜面率 NW (%)と標高差 ΔH (m)で、回帰式は式(7)のとおりである。

$$a = 1.08 - 7.13 \times 10^{-2} \times L - 1.28 \times 10^{-2} \times A + 2.39 \times 10^{-1} \times NW - 7.82 \times 10^{-4} \times \Delta H \quad \dots\dots (7)$$

相関係数 $r = 0.87$ 相対誤差の絶対値の平均 $e = 0.14$

②上信越・北関東

説明変数は日本海海岸からの距離 L (Km)と標高差 ΔH (m)で、回帰式は式(8)のとおりである。

$$a = 14.68 - 1.39 \times 10^{-2} \times L - 7.66 \times 10^{-3} \times \Delta H \quad \dots\dots (8)$$

相関係数 $r = 0.99$ 相対誤差の絶対値の平均 $e = 0.05$

③北陸

説明変数は流域面積 A (Km^2)、平均標高 H_m (m)と標高差 ΔH (m)で、回帰式は式(9)のとおりである。

$$a = 2.23 + 6.49 \times 10^{-3} \times A + 7.20 \times 10^{-3} \times H_m - 3.81 \times 10^{-3} \times \Delta H \quad \dots\dots (9)$$

相関係数 $r = 0.91$ 相対誤差の絶対値の平均 $e = 0.10$

図6 (a)、(b)、(c)に各回帰式による計算値を a' として、 a_s との関係を示す。

5. 結論と今後の課題

①小池・高橋・吉野による積雪面積情報から流域積雪水量を推定するモデルの汎用性が確認された。

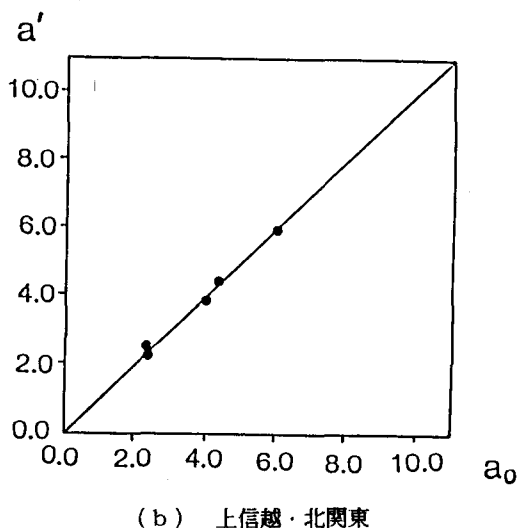
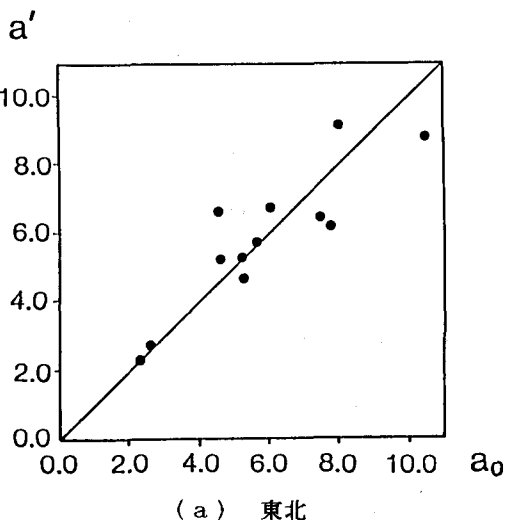
②線形重回帰分析によって得られた回帰式(7)、(8)、(9)から、積雪水量の高度分布特性と地形要因との関係が示された。

③高度分布係数“ a ”を推定することにより、積雪面積情報から流域積雪水量を推定するモデルの各地域内の任意の流域への適用の可能性が示された。

今後の課題としては、本研究においては積雪水量の高度分布特性の推定に線形重回帰分析を用いたが、物理的意味を持ったモデルを作成する必要がある。

謝 辞

本研究で用いたLANDSATデータの一部は宇宙開発事業団地球観測センターより提供を受けその他は、財団法人鹿島学術振興財団研究助成金及び昭和61年度文部省科学研究費一般研究C「ランドサットデータを用いた積雪・融雪解析による積雪分布の地域性に関する研究」(代表高橋裕)により購入いたしました。また、地形データについては、国土整備事業の一環として建設省国土地理院において作成された標高に関する国土数値情報を用いました。さらに、多目的ダムの資料の収集については建設省河川局開発課の荒井元専門官及び各位に御協力を賜りました。ここに記して甚大なる感謝の意を表します。



参考文献

- 1) 小池俊雄・高橋裕・安藤義久：河川上流における水資源賦存特性，土木学会第35回年次学術講演会講演概要集，pp. 167-168, 1980.
- 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算定に関する研究，土木学会論文報告集，第311号，PP. 81-92, 1981.
- 3) 小池俊雄・高橋裕・吉野昭一：積雪面積情報による流域積雪水量の推定，土木学会論文集，第357号，PP. 159-165, 1985.
- 4) JARD, RESTEC, TRIC：リモートセンシングデータのデジタル解析，リモートセンシング基礎講座，1977.
- 5) 金子良：農業水文学，共立出版，1973.
- 6) 本山秀明・小林大二・小島賢治：融雪期における小流域の水収支Ⅱ，低温科学，物理篇，vol. 42, p. 123-133, 1983.
- 7) 土木学会編：水理公式集，pp. 145, 1985.
- 8) 小池俊雄・高橋裕・吉野昭一：融雪量分布のモデル化に関する研究，土木学会論文集，第363号，PP. 165-174, 1985.

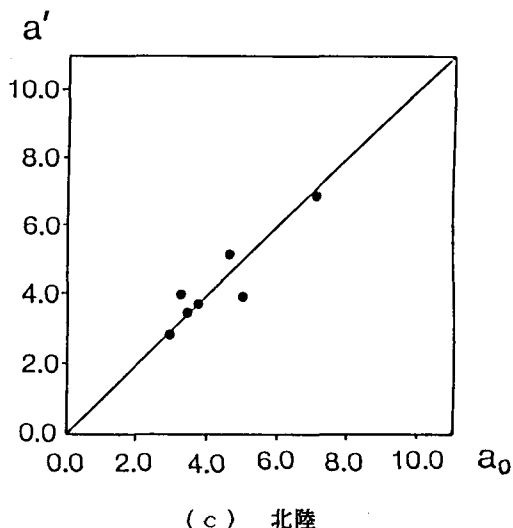


図6 同定値と計算値の関係