

豪雪地帯における貯水池の融雪流入予測に関する研究(2)

A study on snowmelt runoff prediction for reservoir operation

八田茂実
Shigemi HATTA

苫小牧工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授

要 旨

本研究では、豪雪地帯の貯水池操作の合理化を目的として、夜間流入量の予測を試みた。具体的には、予測の対象としている17時以降の夜間融雪量が、

- 1) 予測開始時点で既に計算可能な融雪量で構成されていること
- 2) 短期間では積雪域の変動や流域の湿潤状態の変動が小さい

ものと考え、前日の実績資料から推定した流出モデルのパラメータを使って当日の計算融雪量で夜間の融雪流出量を予測するものである。本報告では、融雪流出予測の基本モデルである熱収支法に基づく融雪モデルと損失を考慮した貯留関数法を組み合わせた融雪流出モデルの汎用性を検討した。北海道内の地域的に離れている4つのダム流域に対して、上記の融雪流出モデルを適用したところ、特別なパラメータの設定をすることなく、ダム管理所で観測されている気象資料のみを用いて融雪流出量を再現できることを示した。

《キーワード：融雪；流出予測；貯水池操作》

1. はじめに

融雪期の融雪出水は量的に農業用水などの重要な水資源として期待されるが、それと同時に融雪出水や雪崩等を引き起こす災害要因でもある。

このため、豪雪地帯に位置するダムでは、長期間にわたって水位維持のための貯水池操作が必要となるが、北海道内のダム流域では、融雪流出により生じる流量のピークは19時以降に発生することが多い。これは融雪最盛期の数週間、夜間の貯水池操作が必要であることを意味しており、貯水池の管理者にとっては勤務時間であるため心理的にも大きな負担となっている。

一方、融雪現象の多くは日中の日射や気温の上昇によって生じるため、融雪の最盛期にあっても融雪の大半は18時までには終了している。すなわち、貯水池操作で対象としている夕方から夜間にかけて生じる融雪流出は、17時の時点でほぼ計算可能な融雪量によって生じていると考えられる。このため、短期の融雪流出予測手法の構築においては、出水の原因となる融雪量をいかに精度良く推定できるかということが重要であり、これには従来の融雪流出解析手法を利用することができる。しかしながら、これまでに提案されている融雪量の推定モデルは、試験流域での適合性は当然検証されているものの、その汎用性はあまり検討されておらず、場合によっては地域ごとにパラメータの同定が必要となり、必ずしも実用的ではない。

本研究では、これまでに提案されている熱収支法に基づく融雪モデルを用いて、北海道内のダム流域に適用可能な夜間融雪流出予測手法の開発を目的としている。

本報告では、北海道内の地域的に離れている4つのダム流域に対して、これまでに提案されている融雪流出解析手法を適用し、流出予測の基本モデルとしての汎用性を検討した。

2. 融雪流出モデルの概要

(1) 地点融雪量の算定モデル

融雪量は積雪表面・積雪下面の熱交換によって計算することが可能である¹⁾²⁾³⁾。

前者は放射収支量・顕熱交換量・潜熱交換量・雨による熱量・雪中の伝導熱量の和であり、後者は地中熱流量である。これらの熱量の要因となる熱源（放射・大気の流れによる熱交換・凝結等）を項目別に観測して融雪量を求めるのが熱収支法である。

しかし、北海道のような寒冷地では積雪下面からの熱量は小さく、融雪のほとんどを積雪表面の熱収支から説明できる³⁾。このため、融雪に作用する熱量 Q_M は、積雪表面での放射収支量 Q_R 、顕熱交換量 Q_A 、潜熱交換量 IE を用いて、次式のように表すことができる。

$$Q_M = Q_R + Q_A + IE \quad (1)$$

融雪量は、計算された融雪熱量を氷の融解潜熱 L_m (0.334MJ/kg) で除して求めることができる。

$$M = Q_M / L_m \quad (2)$$

式(1)中の顕熱交換量、潜熱交換量は以下のバルク式によって計算できる。

$$Q_A = c_p \rho C_H U (T_s - T_a) \quad (3)$$

$$IE = l \rho C_E U (q - q_{SAT}) \quad (4)$$

ここで、 c_p は空気 の定圧比熱 ($1.05 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)、 C_H, C_E はバルク係数 ($1.1 \sim 1.3 \times 10^{-3}$)、 U は風速 (m/s)、 T_s, T_a は積雪及び空気 の温度 () である。これら の量はダム管理所で収集されている気象要素を直接利用できる。尚、積雪表面温度は次式のような太田⁴⁾の実験式を採用した。

$$T_s = \min(1.13T_a - 1.67, 0) \quad (5)$$

また、顕熱交換量、潜熱交換量 の式 中 の ρ は空気 の密度 (kg/m^3)、 q は比湿 (kg kg^{-1}) で、添え字 の SAT は飽和時 の値を意味している。これら は測定されている大気圧 p (hPa)、相対湿度 の観測値にそのとき の気温 に対する飽和水蒸気圧 e_{SAT} を乗じて求められる水蒸気圧 e を用いて次式 のように計算できる⁵⁾。

$$\rho = 1.293 \frac{273.15}{273.15 + T_a} \left(\frac{p}{1013.25} \right) (1 - 0.378 e/p) \quad (6)$$

$$q_{SAT} = \frac{0.622(e_{SAT}/p)}{1 - 0.378(e_{SAT}/p)} \quad (7)$$

$$e_{SAT} = 6.1078 \times 10^{7.5T_a/(237.3+T_a)} \quad (8)$$

一方、正味放射量は雪面での短波長放射、長波長放射の和として以下のように表すことができる。

$$Q_R = (1 - ref)I + L \downarrow - \epsilon \sigma (T_s + 273.15)^4 \quad (9)$$

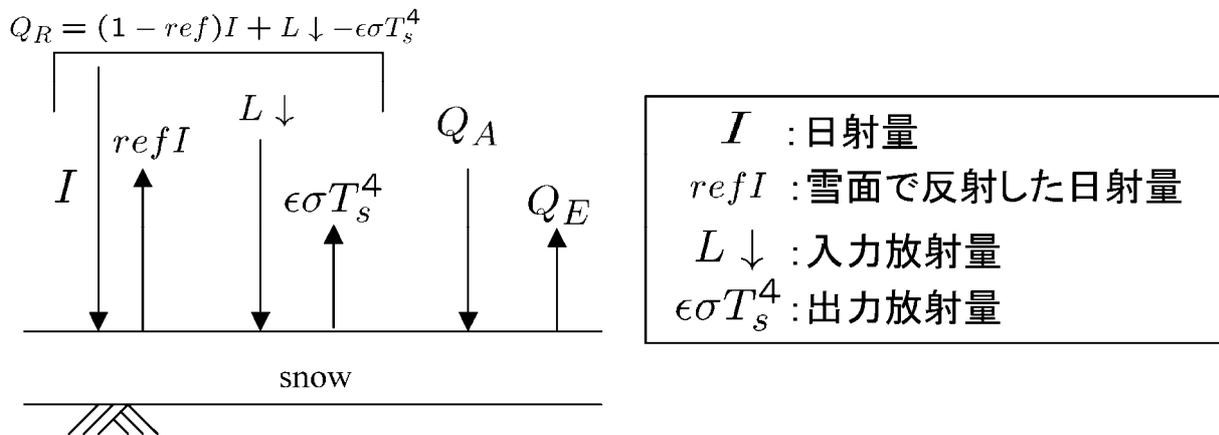


図-1 融雪に関わる熱量

ここで、 ref はアルベド、 I は日射量、 L は下向き の長波長放射、 ϵ は雪面 の射出率 (0.9)、 σ はステファン=ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$) である。ダム管理所では日射量は測定されているが、その他の量については通常観測されていないため、何らかの推定式を当てはめる必要がある。本研究では、下向き の長波長放射量 の推定には太田⁴⁾が提案している次式を用いた。

$$L \downarrow = (1 + 0.2(1 - C_c)) (0.51 + 0.066 \sqrt{e}) \times \sigma (T_a + 273.15)^4 \quad (10)$$

$$C_c = (I/I_0)/F \quad (11)$$

ここで、 e は水蒸気圧 (hPa)、 I_0 は大気外の日射量、 F は見かけの大気透過率で、日照率 (可照時

間に対する日照時間の比) が 1 のときの大気外放射量に対する全天日射量の比で表される。F の値は観測されている日射量と日照時間を用いて日照率と大気外放射量に対する日射量の比 I/I_0 をプロットし、日照率 1 に相当する I/I_0 の値で定義することができる。また、大気外日射量は次式により計算される。

$$I_0 = \frac{I_{00}}{\pi} \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 (H \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin H) \quad (12)$$

$$H = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (13)$$

$$\left(\frac{d_0}{d} \right)^2 = 1.00011 + 0.034221 \cos \eta + 0.00128 \sin \eta + 0.000719 \cos 2\eta + 0.000077 \sin 2\eta \quad (14)$$

$$\eta = (2\pi/365) \times DOY \quad (15)$$

ここで、 I_{00} は太陽定数 (1365 Wm^{-2})、 ϕ は地点緯度、 δ は太陽赤緯、 DOY は 1 月 1 日からの日数、 H は日の出から太陽南中時の時角である。なお、日照率を計算する際に必要となる可照時間はこの H を 2 倍して日の出から日の入りまでの時角とし、地球の自転の速度 ($2\pi/24 \text{ rad/hr}$) から時間に変換することによって求められる。

雪面アルベドの推定には山崎ら⁶⁾の実験式を採用した。山崎らの式は以下のように表される。

$$ref_0 = ref_{max} \quad (16)$$

$$ref_n = (ref_{n-1} - ref_{min}) \exp\left(-\frac{I}{k}\right) + ref_{min} \quad (17)$$

$$ref_{max} = \begin{cases} -0.12T_a + 0.76 & (T_a \geq 0.1^\circ \text{C}) \\ 0.88 & (T_a < 0.1^\circ \text{C}) \end{cases} \quad (18)$$

$$k = \begin{cases} -4.9T_a + 4.5 & (T_a \leq 0.1^\circ \text{C}) \\ 4.0 & (T_a > 0.1^\circ \text{C}) \end{cases} \quad (19)$$

ここで、 ref_0 、 ref_n は降雪日および降雪日から n 日目のアルベド、 ref_{max} 、 ref_{min} は雪面の最大・最小アルベドで、本研究では $ref_{max}=0.88$ 、 $ref_{min}=0.4$ を採用した。

(2) 流域内の融雪量の推定

地点融雪量モデルは、気象観測がなされている地点の融雪量を求めることが可能である。流域内の融雪量を推定するためには、融雪の発生する積雪域を明らかにするとともに、地形に応じた気象要素の補正が必要となる。本研究では、対象流域をメッシュ分割し、メッシュごとの積雪の有無を判定するとともに、流域の地形特性に応じた気象補正を行ったうえで融雪モデルを適用した。

地形の影響による気象要素の補正は、融雪量算定に大きな影響を与える気温と日射量について行う。気温については対象メッシュの標高から気温減率を用いて補正した。また、日射量については対象流域のメッシュ標高値から作成した各メッシュ点の斜面の勾配、斜面の向き、太陽高度から算出される受光係数と呼ばれる指標を用いて補正を行った⁷⁾。

なお、積雪域の推定については、ダム管理所で観測されている冬季間の雨量が流域に一様にあるも

のとし、各メッシュ点の気温が2度以上で降雨、気温2度未満で降雪として考え、前年11月から融雪開始前まで積算し、総融雪量はその地点の初期積雪水量に達するまでは積雪が存在するものとして計算を行うこととした。

(3) 採用した流出モデル

本研究で採用した流出モデルは、損失を考慮した貯留関数法である。このモデルは、貯留関数法に蒸発散量などの損失量を損失機構として取り入れているものである⁸⁾。したがって、観測雨量と観測流量をそのまま用いることができ、直接流出成分と基底流出成分を分離することが難しい融雪流出を予測するのに適したモデルであると考えられる。なお、モデルの適用に当たっては、パラメータの最適化も含め、北海道河川防災研究センターが発行しているツール⁹⁾¹⁰⁾を用いた。

3. ダム流域への適用

(1) 対象流域

本研究では、北海道内のダム流域への適用を目的としているため、対象流域には当然、道内のダム流域を選定する必要がある。実際の予測ではリアルタイムに気象データを入手できることを条件としているため、融雪流出量算定のための気象データにはダム管理所のものを使うことを想定し、流域面積が比較的小さい100km²程度のダム流域を対象とした。選定した流域は、なるべく地域的にばらつくように漁川ダム・定山溪ダム・鹿の子ダム・札内川ダムの4流域とした。対象流域の位置を図-2に、それぞれの諸元と解析対象期間を表-1に示す。本研究ではダム操作が最も必要となる時期を想定するため解析対象期間としては、それぞれの年の融雪最盛期を選定している。

なお、用いた気象データは気温、湿度、平均風速、日照時間、気圧、時間雨量、時間日射量で、いずれもダム管理所で観測されているものである。



図-2 対象としたダム流域の位置

表-1 対象流域の諸元

流域名	流域面積(km ²)	解析対象期間
漁川ダム	113.3	1999/4/20 ~ 4/30
定山溪ダム	104.0	2000/5/10 ~ 5/20
鹿の子ダム	124.0	2000/4/20 ~ 4/30
札内川ダム	117.7	2001/5/13 ~ 5/23

(2) 流域地形モデルの作成

本研究で採用している融雪モデルでは流域の融雪量分布を考慮するため、流域分割のメッシュサイズが大きい方が計算速度メモリ節約の面から有利となる。しかし、一方でメッシュサイズが大きくなると、融雪量の算定に大きく影響をもたらす地形特性を正しく評価できなくなるという欠点がある、このため本研究では、国土数値情報の50mメッシュ標高を基本として、100m、200m、250mのメッシュサイズのDEMを作成し、各DEMで標高・斜面勾配角・斜面方位角を計算し、50mメッシュのDEMで作成したこれらの地形量との分布を比較し、地形情報が保存される最大のメッシュサイズが計算に最適なメッシュサイズとして採用することとした。図-3～図-6は対象とした4流域の結果を示している。いずれの流域とも100mメッシュまでは50mメッシュで作成したものと大差のないことが分かる。このため、本研究で対象とした流域では100mメッシュを融雪量算定に最適なサイズとして採用した。

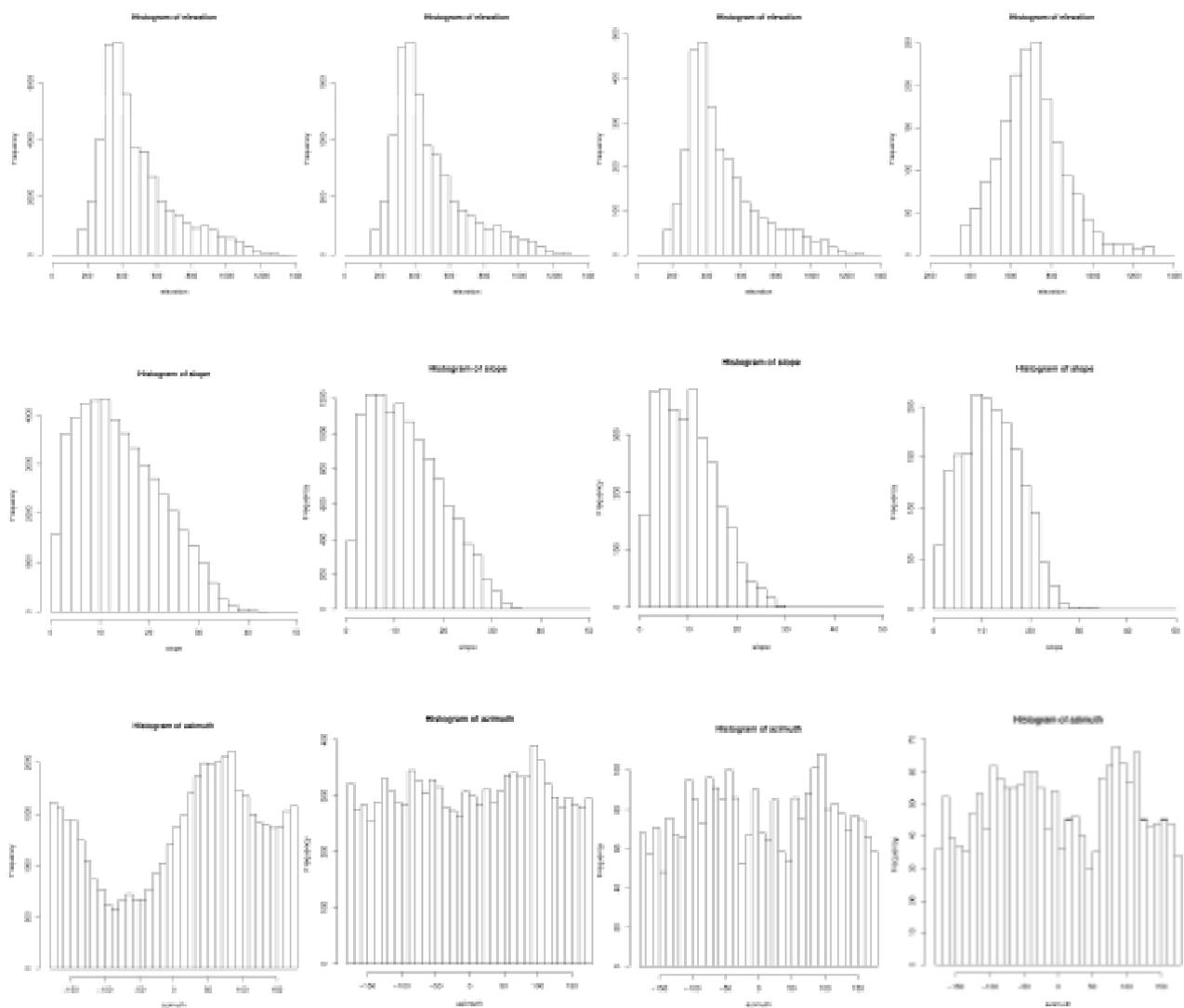


図-3 漁川ダム ヒストグラム

上段は標高：メッシュサイズは左から 50m, 100m, 200m, 250m
 中段は斜面勾配角：メッシュサイズは左から 50m, 100m, 200m, 250m
 下段は斜面方位角：メッシュサイズは左から 50m, 100m, 200m, 250m

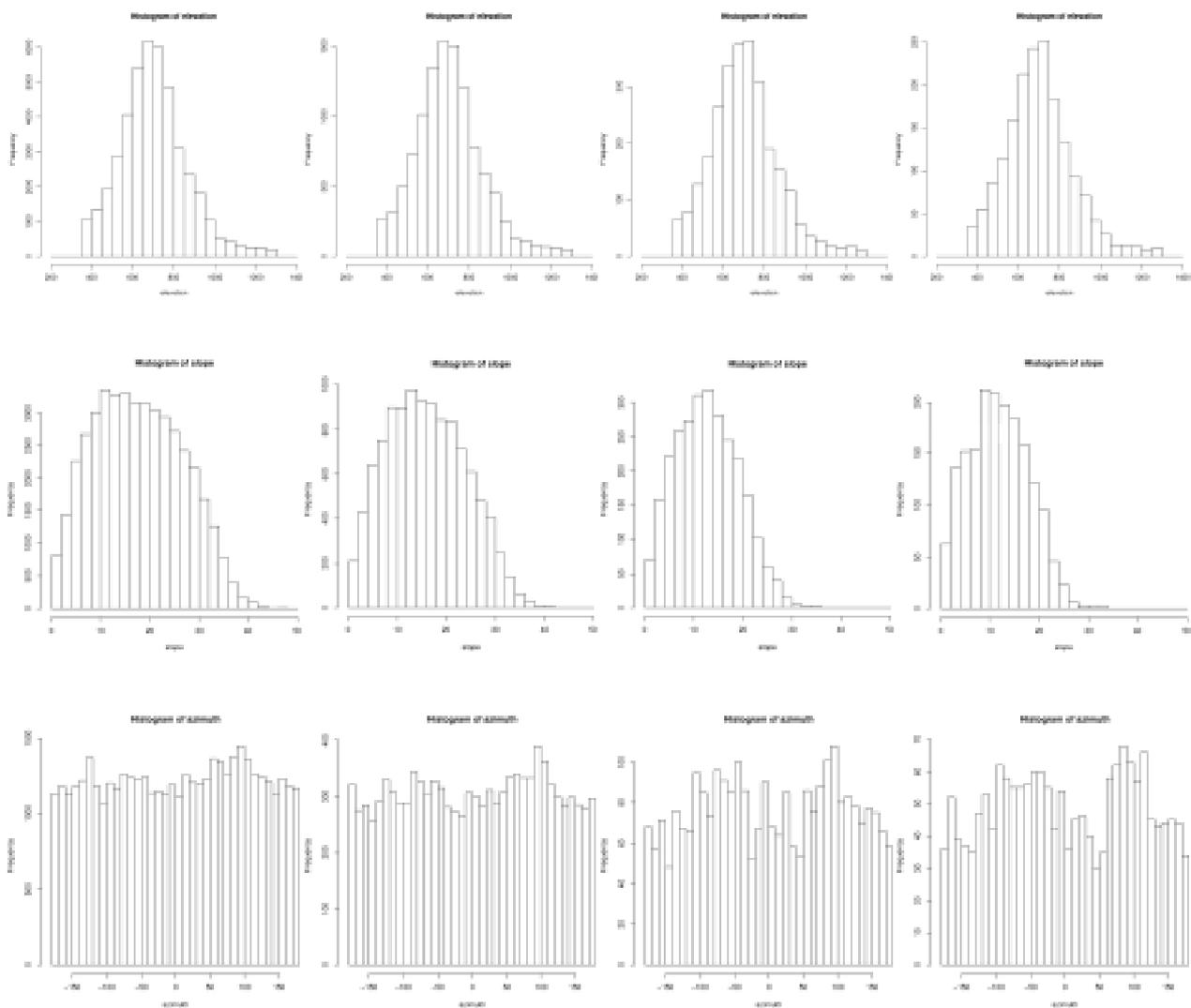


図-4 定山溪ダム ヒストグラム

上段は標高：メッシュサイズは左から 50m , 100m , 200m , 250m
 中段は斜面勾配角：メッシュサイズは左から 50m , 100m , 200m , 250m
 下段は斜面方位角：メッシュサイズは左から 50m , 100m , 200m , 250m

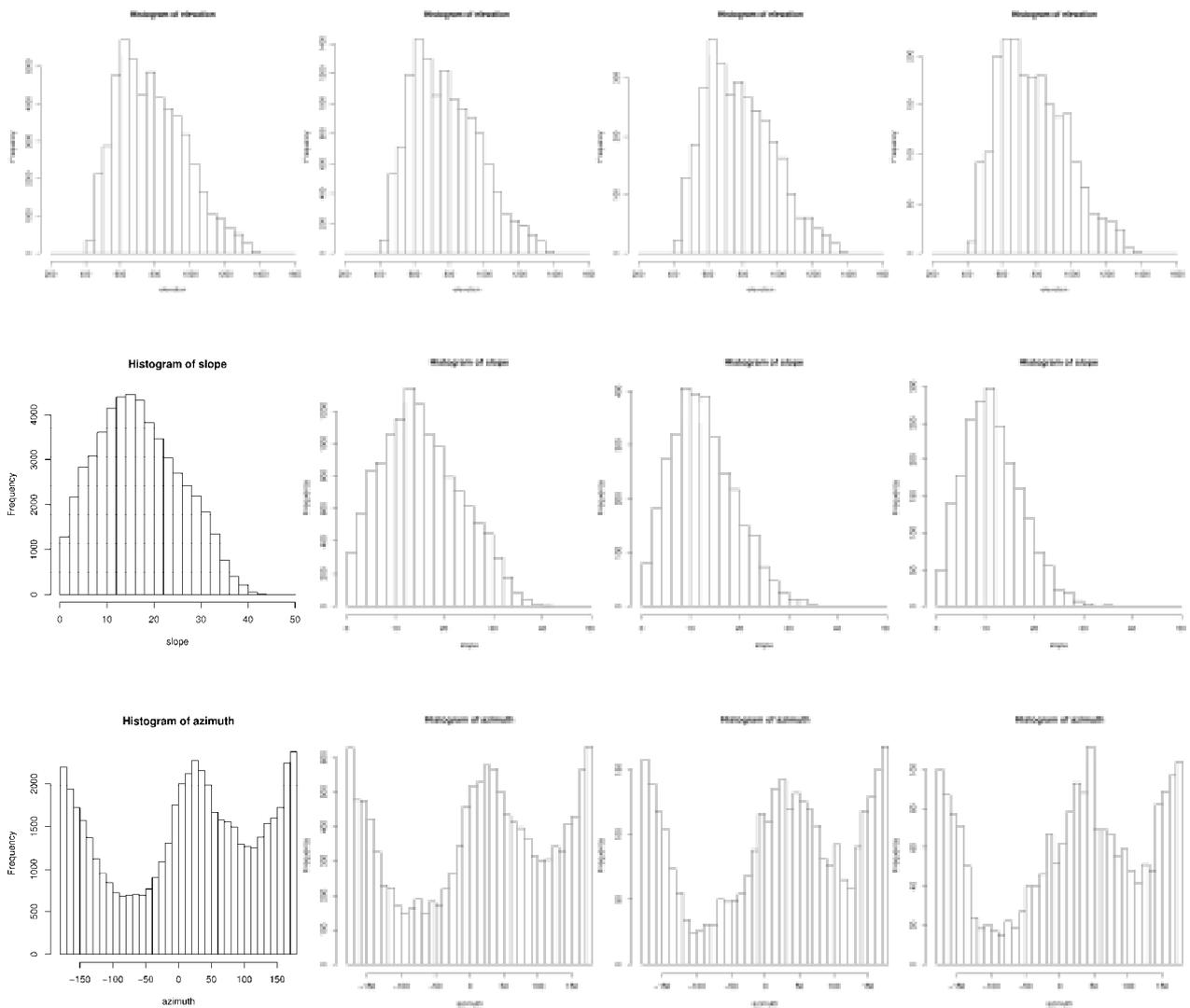


図-5 鹿の子ダム ヒストグラム

上段は標高：メッシュサイズは左から 50m , 100m , 200m , 250m
 中段は斜面勾配角：メッシュサイズは左から 50m , 100m , 200m , 250m
 下段は斜面方位角：メッシュサイズは左から 50m , 100m , 200m , 250m

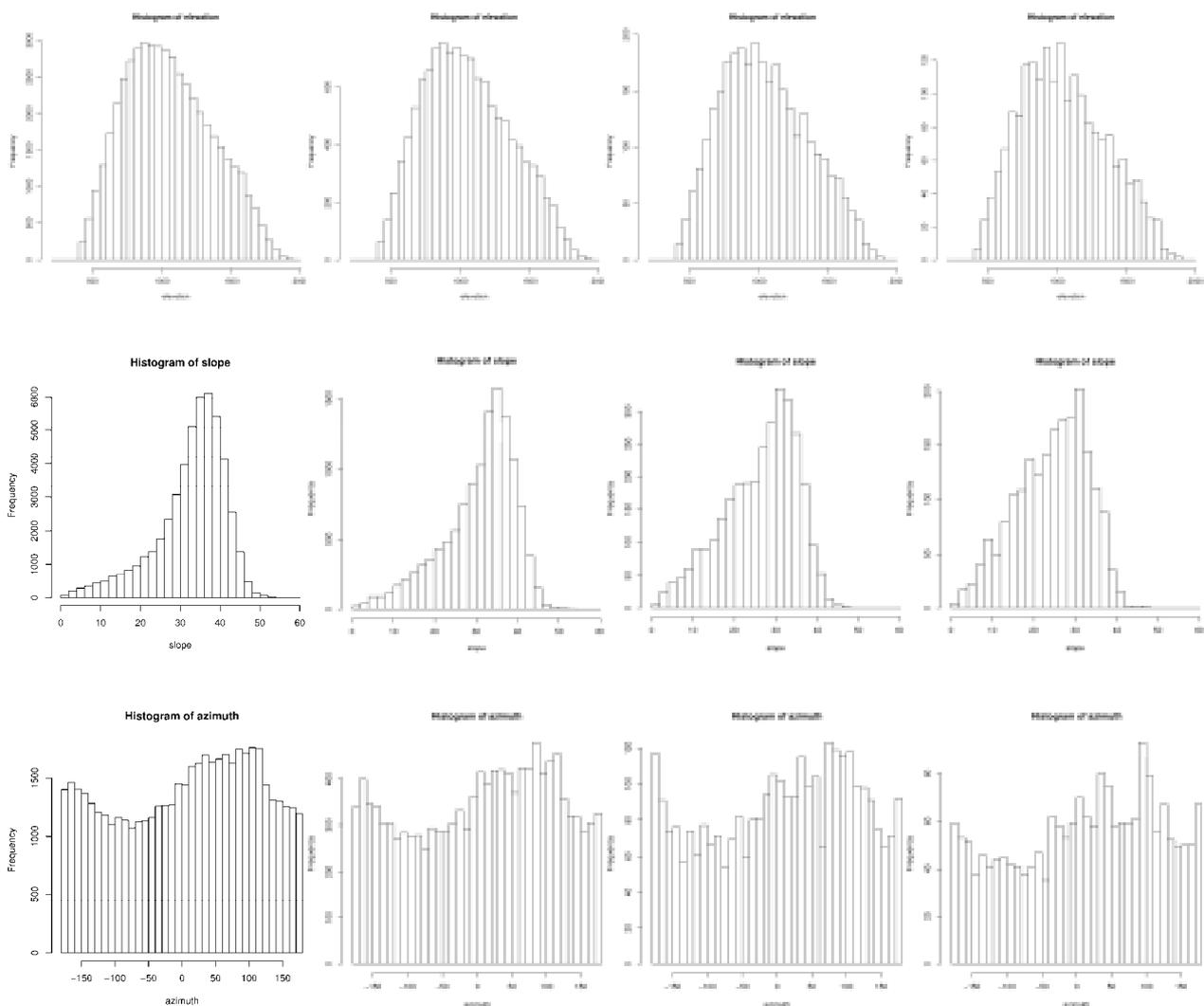


図-6 札内川ダム ヒストグラム

上段は標高：メッシュサイズは左から 50m , 100m , 200m , 250m
 中段は斜面勾配角：メッシュサイズは左から 50m , 100m , 200m , 250m
 下段は斜面方位角：メッシュサイズは左から 50m , 100m , 200m , 250m

(3) 雨量の補正

冬期間の降水量は雨量計の捕捉率が低く、特に降雪量は過小評価されてしまうことが多い。このため、降雪時には次式の横山ら¹¹⁾が提案している風速を用いた補正式を使用した。

$$P_{cor} = P_{obs} \times (1 + m \cdot U) \quad (20)$$

ここで、 P_{cor} は補正降水量 (mm) , P_{obs} は観測降水量 (mm) , m は測定器及び降水の固体・液体によって決まる係数 , U は風速 (m/s) である。

なお、本研究では雨雪判断には気温を用い、2 以下の場合に降水量を降雪量と考え、式(20)より降水量の補正を行なった。また、 m の値としては 0.213 を採用した。

図-7 は冬季間の流出高と降水量がほぼ一致している鹿の子ダムを除く 3 流域について、1997 年から 2001 年の冬季間の降水量の補正を行なった結果である。尚、補正に必要な観測資料が完全にそろっていないため計算できなかった年のものは含まれていない。補正前では流出量に比べて降水量がかなり小さくなっていったものの、補正後には流出高と一致するようになることが分かる。

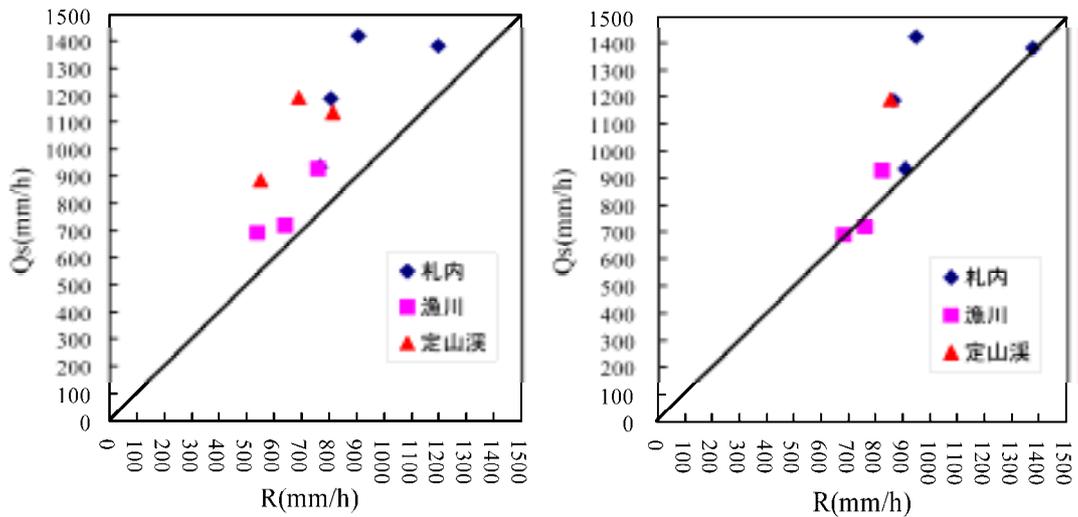


図-7 雨量の補正前と補正後の流出高の関係
 左が補正前、右が補正後である。

(4) 流出量の算定結果

以上の方法により、本研究で対象とした4流域に融雪流出モデルを適用し、融雪流出量を算定した結果、図-8～図-11 のようになった。ここで、図中のハイトグラフに相当する部分は融雪モデルにより計算された流域平均融雪量と観測雨量の和を表している。

図によると、各流域共に融雪最盛期の流出量をよく再現できている。しかし、特に融雪期間中に大きな降雨があった場合については、実測流量と計算流量が大きく異なっている。

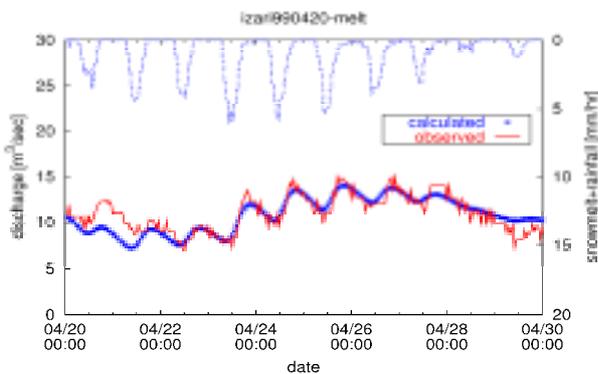


図-8 融雪流出量の算定（澁川ダム 1999年）

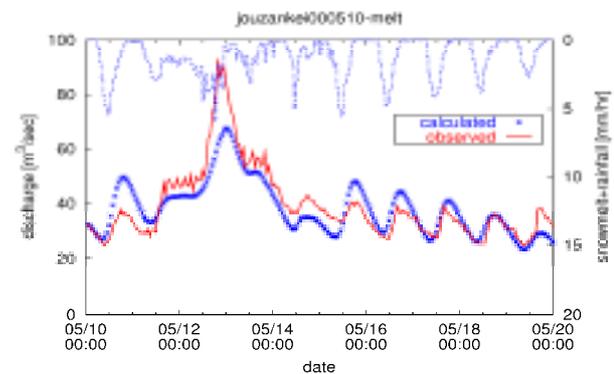


図-9 融雪流出量の算定（定山溪ダム 2000年）

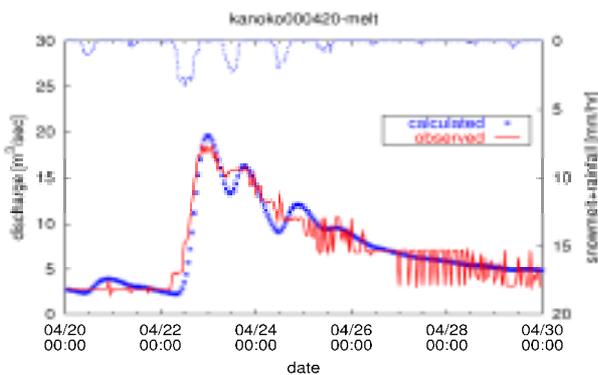


図-10 融雪流出量の算定（鹿の子ダム 2000年）

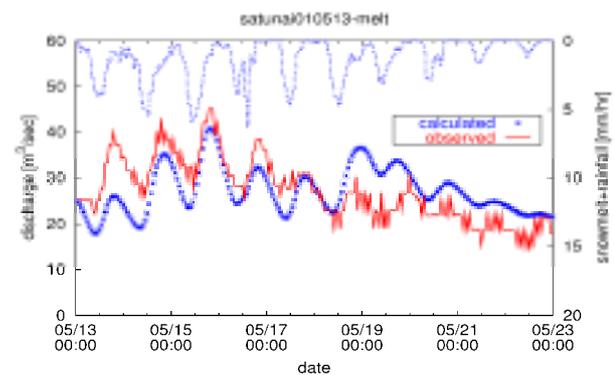


図-11 融雪流出量の算定（札内川ダム 2001年）

4 . おわりに

本研究では、融雪最盛期の流入量予測の基本モデルとなる融雪流出モデルについて、その汎用性を検討した。北海道内の流域面積 100km² 程度のダム流域に適用したところ、冬季間の降雪量補正を行うことによって、ダム管理所で得られている気象データのみを利用して、融雪最盛期の流出量を再現できることを確認した。しかしながら、特に融雪期間中に大きな降雨があった場合については、実測流量と計算流量が大きく異なることを確認している。今後は、今回対象とした4つの流域以外の流域に対してもその汎用性を検討するとともに、夜間流出量の予測を行い予測精度の向上を図る必要がある。また、計算に用いるプログラムを整備・公開を進める予定である。

謝辞

本研究は財団法人北海道河川防災研究センター平成 18 年度研究助成「豪雪地帯における貯水池の融雪流入予測に関する研究」(研究代表者：八田茂実)の援助を受けました。

本研究の遂行にあたり、北海道開発局からは水文資料及び融雪観測関連資料の提供を受けました。本校専攻科滝本慎二君にはデータ整理に際して多くの協力を頂きました。また、北海道河川防災研究センター前研究所長星清氏からは研究の機会を頂くとともに、貴重なご助言を賜りました。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中村睦男：雪氷調査法, pp.142-151,北海道大学図書刊行会, 1991.
- 2) 山崎剛・田口文明・近藤純正：積雪のある森林小流域における熱収支の評価, 水文・水資源学会誌, 44, pp.71-77, 1994
- 3) 八田茂実・西村哲治・藤田睦博：豊平川支流部における融雪観測とその解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 48, pp.479-482, 1992
- 4) 太田岳史：森林内外における積雪面上の純放射量の推定と表層融雪量, 水文・水資源学会学会誌, 5(4), pp.19-26, 1992.
- 5) 近藤純正：水環境の気象学, 朝倉書店, 1987.
- 6) 山崎剛・田口文明・近藤純正：積雪のある森林小流域における熱収支の評価, 天気, Vol.41, No.2, pp.71-77, 1994.
- 7) 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, 357, pp.159-165, 1985.
- 8) 北海道河川防災研究センター研究所：一般化貯留関数法による流域流出解析・河道洪水追跡実用計算法, 2001.
- 9) 北海道開発土木研究所河川研究室・北海道河川防災研究センター研究所：対話式洪水流出計算マニュアル, 2005.
- 10) 国土交通省北海道開発局建設部河川計画課・北海道河川防災研究センター研究所：単一流域を対象とした貯留関数法の精度比較, 2002.
- 11) 横山宏太郎・小南靖弘・川方俊和・大野宏之・井上聡：冬季降水量に対する捕捉損失補正方式の検討, 2003 年度日本雪氷学会講演予稿集, 52, 2004 .