

「ダムにおける積雪包蔵水量推定 ガイドライン（案）」について

(独)土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム ○西原 照雅
(独)土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム 矢部 浩規

ダム管理の現場では、水資源管理や融雪流出の規模を把握するため、毎年、流域の積雪包蔵水量を推定している。しかし、ダムにおける積雪包蔵水量を推定する方法及び推定値を評価する方法をとりまとめた技術資料は、これまで作成されてこなかった。こうした状況を踏まえ、(独)土木研究所寒地土木研究所では、これまでの知見をとりまとめたガイドラインを作成し、平成24年4月に公表した。本稿では、ガイドラインの内容について解説する。

キーワード：積雪包蔵水量、推定値の評価、ダム、森林

1. はじめに

積雪寒冷地の多目的ダムでは、冬季にダム流域に蓄積された積雪が、春先の融雪に伴い流出する水を貯留し、夏季にかけての水需要をまかなっている。このため、ダム管理の現場では、毎年3月頃の積雪包蔵水量が最大となる時期に積雪調査を行い、流域の積雪包蔵水量を推定している。

現在、ダム流域の積雪包蔵水量は、複数の標高において積雪調査を実施し、標高別に求めた積雪相当水量から標高と積雪相当水量の関係式を作成し、この関係式を用いて推定する方法が一般的である。しかし、これまで積雪包蔵水量を推定する方法をとりまとめた技術資料が作成されてこなかったため、ダムごとに方法が異なり、経験式を採用しているケースもある。また、推定した積雪包蔵水量の精度は、ほとんど検証されていない。

こうした状況を踏まえ、(独)土木研究所寒地土木研究所では、積雪寒冷地のダムにおける積雪包蔵水量の推定が適切になされ、その精度を簡易に検証できるよう、標準的な手法をガイドラインにとりまとめた。ガイドラインは、寒地土木研究所のHPより誰でも入手可能である。

(<http://www.ceri.go.jp/contents/center/center07.html>)

本稿では、ガイドラインの内容について解説する。

2. ガイドラインの適用範囲

山間部の森林内における積雪に関しては多数の報告があり、森林内の積雪深及び積雪相当水量は標高の増加とともに線形に増加することが明らかになっている^{1),2),3)}。一方で、森林外（例えば、森林限界を超え、主

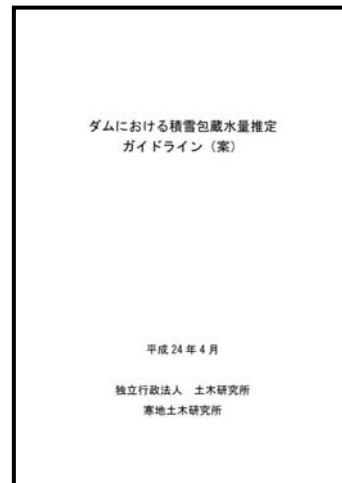


図-1 ガイドラインの構成

1. 総則

目的、適用範囲、本ガイドラインの構成

2. 積雪調査

3. 積雪包蔵水量の推定
標高別の積雪相当水量の整理、標高と積雪相当水量の関係式の作成、ダム流域の積雪包蔵水量の推定

4. 水収支による推定値の精度の検証

5. 参考

たる植生が草地やササ等の標高帯)では、この関係が成り立たない^{1),3)}。しかし、国内では、森林外の積雪深や積雪相当水量に関する研究例が少なく、森林外の広い範囲を対象として、積雪相当水量の分布を求める標準的な方法は確立されていない。このことから、本ガイドラインは、土地利用の大部分が森林であるダムを対象とする。なお、流域面積に占める森林外の割合が多いダムであっても、森林が大部分を占める範囲に対しては、本ガイドラインを適用可能である。

3. 山間部の森林内における積雪の特徴

本ガイドラインに示した積雪包蔵水量を求める方法は、前述した標高と積雪相当水量の線形の関係を利用している。はじめに、山間部の森林内における積雪の特徴について述べる。

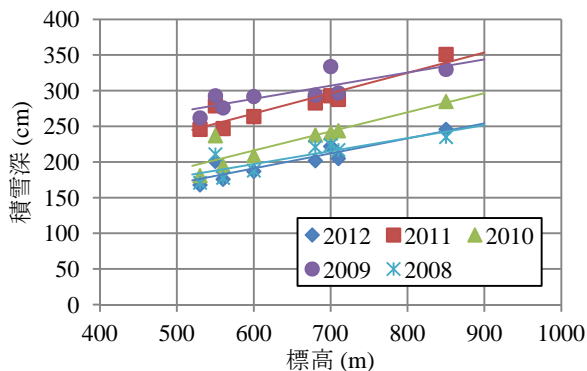


図-2 標高と積雪深の関係 (積雪調査)

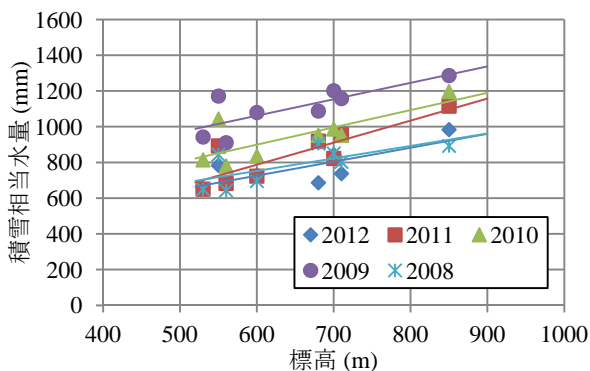


図-3 標高と積雪相当水量の関係 (積雪調査)

図-2 及び図-3 は、定山溪ダムで行われた過去 5 年の積雪調査結果である。図-2 は標高と積雪深の関係、図-3 は標高と積雪相当水量の関係を示している。図中の直線は、各年の標高と積雪深 (積雪相当水量) に対する回帰直線である。図を見ると、既往報告のとおり、積雪深及び積雪相当水量は、標高の増加とともに線形に増加していることがわかる。標高と積雪深に対する回帰直線の相関係数 R^2 を見ると、5 年平均で 0.77、最も小さい年で 0.67 であった。同様に、標高と積雪相当水量に対する回帰直線の相関係数 R^2 は、5 年平均で 0.60、最も小さい年で 0.49 であった。年によって差はあるものの、比較的高い相関の線形性が確認できる。

次に、航空レーザ測量から求めた積雪分布を用いて、標高と積雪深との関係を示す。航空レーザ測量を用いれば、広範囲の三次元空間データを高密度かつ高精度に得ることができる。さらに、空中からの測量のため、標高の高い範囲等の積雪期に立ち入ることが困難である範囲 (言い換えれば、積雪調査を行うことが困難である範囲) の測量も行うことができる。なお、航空レーザ測量から求められる積雪深は、積雪期と無積雪期の 2 回の測量より求めた標高の差である。

図-4 に赤枠で示した範囲 (67km²) で行われた航空レーザ測量結果を用いて、標高と積雪深の関係をプロットしたものが図-5 である⁴⁾。なお、図-4 には環境省が実施した自然環境保全基礎調査の結果を用いて、9 分類した植生を示しているが、対象範囲の植生は、

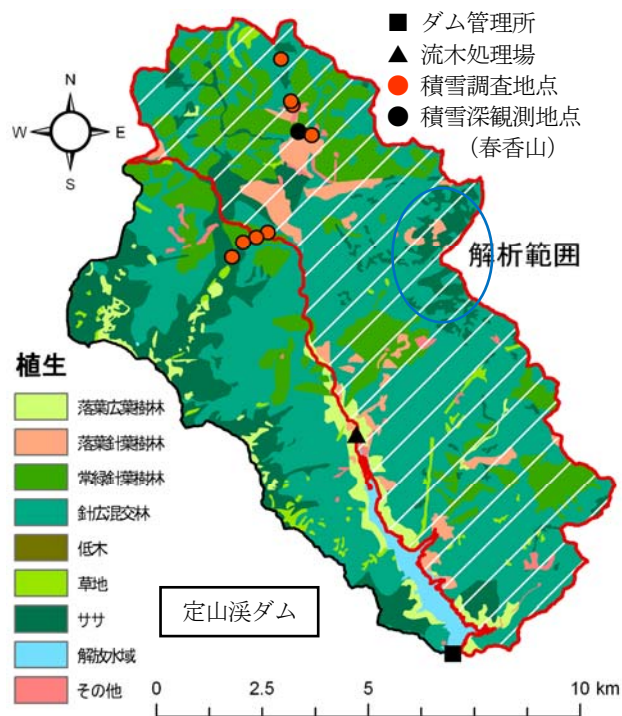


図-4 航空レーザ測量範囲

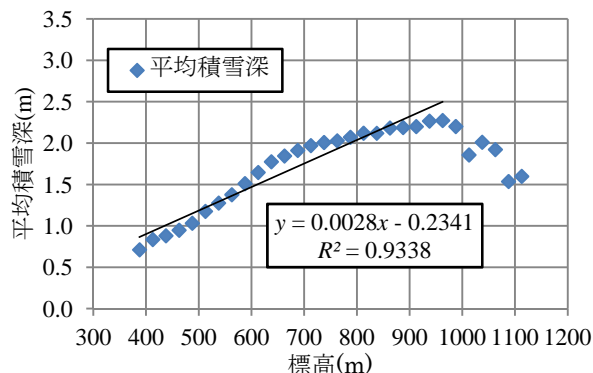


図-5 標高と積雪深の関係 (航空レーザ測量)

86%が森林である。ただし、図-4 の青丸で示した範囲は、標高が高く、他の標高帯と比較して草地やササが多い範囲である。

航空レーザ測量より得られたサンプルの水平解像度は 5m であり、サンプル数は 200 万を超える。したがって、そのままプロットしても標高と積雪深の関係を捉えることは困難である。このため図-5 は、標高を 25m ピッチに区切り、平均積雪深を求め、標高との関係を示している。図を見ると、積雪深がピークに達する標高 975m までは、標高の増加とともに積雪深は高い相関で線形に増加している。前述した積雪調査の結果と比較して、線形な関係を明確に確認できる。なお、標高が 975m を超えると積雪深が減少に転じるが、ここは標高帯の面積に占める森林の割合が 60%以下になり、ササや草地の占める割合が大きい標高帯 (図-4 の青丸の範囲) に対応する。島谷ら³⁾ や笹ら⁵⁾ により、

森林の無い範囲や尾根では、風により積雪が移動しやすく、積雪深が減少することが報告されており、このことが積雪深減少の要因と考える。

4. ガイドラインの構成

ガイドラインの構成は以下の通りである。

- ・ 1章の「総則」には、ガイドラインの目的、適用範囲、構成を示した。
- ・ 2章の「積雪調査」には、積雪調査の方法と時期を示した。
- ・ 3章の「積雪包蔵水量の推定」には、積雪調査の結果を基に、標高と積雪相当水量の関係式を作成し、ダム流域の積雪包蔵水量を推定する方法を示した。
- ・ 4章の「水収支による評価」には、融雪期の水収支を簡易に計算し、推定した積雪包蔵水量の精度を評価する方法を示した。
- ・ 5章の「参考」には、最近研究が進められている、航空レーザ計測を活用した積雪包蔵水量の推定に関する参考文献を示した。

なお、実務への適用を重視し、3章及び4章には計算例を示しているが、水の密度を 1g/cm^3 とし、単位の換算は省略している。

以降、2章から4章の内容を解説する。

5. 積雪調査

国内における積雪調査は、雪氷調査法⁶⁾(日本雪氷学会北海道支部編)及び積雪観測ガイドブック⁷⁾(社団法人日本雪氷学会編)に則り実施されることが一般的であり、ダムにおける積雪調査についても同様である。このため、積雪調査はこれらに則り行うことを基本とする。

なお、継続的に積雪調査を実施しているダムでは、過去に実施した積雪調査の情報が蓄積されている。これらも十分に活用し、効率が良く、安全な調査コースを設定する。

調査項目は、積雪相当水量の算出に必要な積雪深と積雪密度(全層平均)を必須とし、その他の項目は必要に応じて観測する。積雪調査を実施する時期は、積雪包蔵水量が最大となる3月上旬～中旬を基本とする。

6. 積雪包蔵水量の推定

6.1 標高別の積雪相当水量の整理

以降、ガイドラインに示した計算例を用いて、計算方法を解説する。はじめに、積雪調査で実測した積雪深と積雪密度(全層平均)を基に、調査地点別に式

表-1 調査地点の積雪相当水量の算出

調査コース	調査地点	標高(m)	積雪深(cm) ①	密度(g/cm^3) ②	積雪相当水量(kg/m^2) ①×②
コース1	No.1	530	181	0.45	815
	No.2	560	195	0.40	780
	No.3	600	209	0.40	836
	No.5	700	241	0.41	988
コース2	No.3	550	237	0.44	1,043
	No.5	680	238	0.40	952
	No.6	710	244	0.39	952
	No.9	850	285	0.42	1,197

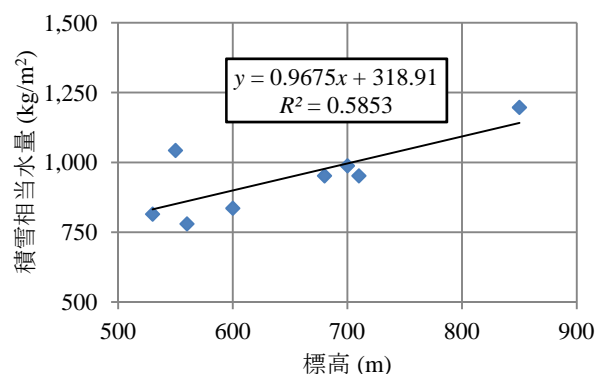


図-6 標高と積雪相当水量の回帰分析

(1)を用いて積雪相当水量を算出する。

$$S_i = \rho_i \times h_i \quad (1)$$

ここで、 S_i : 調査地点*i*の積雪相当水量(kg/m^2)、 h_i : 調査地点*i*の積雪深(m)、 ρ_i : 調査地点*i*の積雪密度(全層平均)(kg/m^3)である。

積雪相当水量は、表-1に示すよう、調査地点の標高と対応させて整理することが望ましい。

6.2 標高と積雪相当水量の関係式の作成

3章で示したとおり、森林内の積雪相当水量は標高の増加とともに線形に増加する。このため、標高と積雪相当水量の関係式には、式(2)に示す線形の関係式を用いることを基本とする。

$$S = a_1 Z + a_2 \quad (2)$$

ここで、 S : 標高別の積雪相当水量(kg/m^2)、 Z : 標高(m)、 $a_1 \sim a_2$: 回帰係数である。なお、図-5に示したように、森林限界以上の標高や尾根付近では、積雪深が減少する傾向がある、式(2)を用いた場合、標高の

増加とともに積雪相当水量が単調に増加する。このため、このような範囲の積雪相当水量を過大評価する可能性があることに留意が必要である。図-6には、表-1の結果について回帰分析を行った結果を示した。この例では、 $a_1 = 0.9675$ 、 $a_2 = 318.91$ となった。

6.3 ダム流域の積雪包蔵水量の推定

事前の準備として、表-3のように、標高区分ごとの面積を算出しておく。例えば、国土地理院がWEBで公開している基盤地図情報の数値標高モデルとGISソフトを用いれば簡単に算出できる。

次に、標高区分における代表標高（通常は平均値を使用）と6.2で作成した回帰式を用いて、標高区分ごとの積雪相当水量を求める。

$$S_j = a_1 Z_j + a_2 \quad (3)$$

ここで、 S_j ：標高区分 j の積雪相当水量(kg/m²)、 Z_j ：標高区分 j の代表標高(m)、 $a_1 \sim a_2$ ：6.2で決定した回帰係数である。

最後に、式(4)のとおり、各標高区分の積雪相当水量 S_j にそれぞれの面積を乗じ、足し合わせるとダム流域の積雪包蔵水量となる。

$$S_w = \sum S_j \times A_j \quad (4)$$

ここで、 S_w ：ダム流域の積雪包蔵水量(m³)、 A_j ：標高区分 j の面積(m²)である。結果を表-3に示しているが、この計算例では、積雪包蔵水量は104,312(×10³m³)と求められた。

7. 水収支による推定値の精度の検証

積雪包蔵水量の推定結果は融雪期の水収支との比較により評価する。水収支は式(5)で表す。

$$WB = Q_i - R + E_{pt} \quad (5)$$

ここで、 WB ：水収支(m³)、 Q_i ：ダム流入量(m³)、 R ：降水量(m³)、 E_{pt} ：可能蒸発散量(m³)である。口澤ら⁸⁾の定山溪ダム流域における研究によると、森林域の実蒸発散量は可能蒸発散量に近い値を示すことが報告されている。このため、融雪期の水収支はダムの流入量から降水量を引いた値に、Hamon法(式(6))で推定した可能蒸発散量を加えた値とすることができる。計算期間は、積雪調査日の翌日から同年の6月30日までを基本とするが、消雪が早いダムでは消雪時期に合わせて計算期間を短縮してよい。式(5)の降水量は流域

表-3 標高区分毎の面積と代表標高の設定

No.	標高区分 (m)	代表標高 (m)	面積 (km ²)
1	300~400	350	2.3
2	400~500	450	6.3
3	500~600	550	15.2
4	600~700	650	28.3
5	700~800	750	28.8
6	800~900	850	12.5
7	900~1000	950	5.9
8	1000~1100	1050	2.2
9	1100~1200	1150	1.4
10	1200~1300	1250	1.1
合計 (= 流域面積)			104

表-4 積雪包蔵水量の計算

No.	代表標高 (m) ①	積雪相当水量 (kg/m ²) ② = $a_1 \times ① + a_2$	面積 (km ²) ③	標高区分毎の積雪包蔵水量 (×10 ³ m ³) ②×③
1	350	658	2.3	1,513
2	450	754	6.3	4,750
3	550	851	15.2	12,935
4	650	948	28.3	26,828
5	750	1045	28.8	30,096
6	850	1141	12.5	14,263
7	950	1238	5.9	7,304
8	1050	1335	2.2	2,937
9	1150	1432	1.4	2,005
10	1250	1528	1.1	1,681
合計 (= ダム流域の積雪包蔵水量)				104,312

平均降水量を用いる。融雪開始の頃は気温が低いいため、降雪となる場合があるが、対象とする期間内の降水量全体に占める割合が少なく、ヒータ付きの雨雪量計で降水量を観測している場合は、観測値をそのまま用いてよい。可能蒸発散量は、ダム管理所の気象観測データより、簡単に求めることができる。

$$E_{pt} = 0.140 D_0^2 q_t \quad (6)$$

ここで、 D_0 ：可照時間（ここでは月平均の1日の日の出から日没までの時間を12時間で除した値）、 q_t ：日平均気温に対する飽和絶対湿度(kg/m³)である。

はじめに、 D_0 を求める方法を述べる。必要な数値はダム管理所の緯度である。太陽赤緯は式(7)で求められる⁹⁾。

表-5 水収支の計算

年月日	流域平均 降水量 (mm)	ダム 流入量 (m ³ /s)	日平均 気温 (°C)	可照 時間 D_0	飽和 相対湿度 e_{st} (hPa)	飽和 絶対湿度 q_t (kg/m ³)	可能 蒸発散量 E_{pt} (mm/day)
2010/03/12	0	0.87	0.2	0.9876	6.20	4.91	0.67
2010/03/13	4	1.33	-2.7	0.9876	5.01	4.01	0.55
2010/03/14	0	0.96	-6.4	0.9876	3.78	3.07	0.42
2010/03/15	1	0.98	-2.9	0.9876	4.93	3.96	0.54
2010/03/16	0	1.91	0.4	0.9876	6.29	4.98	0.68
2010/03/17	0	1.58	-6.2	0.9876	3.84	3.12	0.43
2010/03/18	0	1.29	-4.8	0.9876	4.28	3.45	0.47

2010/06/24	12	6.28	14.3	1.2691	16.30	12.29	2.77
2010/06/25	0	3.59	19.0	1.2691	21.97	16.30	3.67
2010/06/26	0	2.77	22.3	1.2691	26.92	19.75	4.45
2010/06/27	0	2.47	21.4	1.2691	25.49	18.75	4.23
2010/06/28	0	2.24	23.8	1.2691	29.48	21.51	4.85
2010/06/29	0	2.13	23.1	1.2691	28.26	20.67	4.66
2010/06/30	0	2.04	22.1	1.2691	26.60	19.52	4.40
合計	211	1165.35	—	—	—	—	203.22

	降水量 R ($\times 10^6 \text{m}^3$)	ダム流入量 Q_i ($\times 10^6 \text{m}^3$)	可能蒸発散量 E_{pt} E_{pt} ($\times 10^6 \text{m}^3$)
2010年	21.94	100.69	21.13

×流域面積
(104km²)

×86,400(秒)

×流域面積
(104km²)

$$h = 2 \sin^{-1} A \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \delta &= \sin^{-1}(0.398 \times \sin a_2) \quad (7) \\ a_2 &= 4.871 + \eta + 0.033 \sin \eta \\ \eta &= (2\pi/365)i \end{aligned}$$

ここで、 δ ：太陽赤緯(rad)， i ：通日である。通日は1月1日から数えた日数で、例えば1月1日は1、4月1日は91（うるう年は92）である。次に、日の出から南中までの時角は式(8)で求められる⁹⁾。

$$\sin \frac{1}{2} h = \left\{ \frac{\sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi - \delta + \gamma}{2} \right) \sin \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi - \delta - \gamma}{2} \right)}{\cos \phi \cos \delta} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

ここで、 h ：日の出から南中までの時角(rad)， ϕ ：緯度(rad)， γ ：地平屈折度(=9.89×10⁻³(rad))である。緯度はダム管理所地点の緯度を代入する。なお、式(8)の右辺をAとするとhは、

である。可照時間は、太陽赤緯と日の出から南中までの時角を用いて式(10)で求まる⁹⁾。

$$N_0 = \frac{2h}{0.2618} \quad (10)$$

ここで N_0 ：可照時間(hr)である。 D_0 は毎日の可照時間を一ヶ月間合計し、月の日数と12で除して求まる。目安として、 D_0 は昼と夜の長さがほぼ等しくなる春分の頃に1.0、6月に1.3程度の値となる。

次に、日平均気温に対する飽和絶対湿度は、式(11)及び式(12)を用いて気温より求められる⁹⁾。

$$e_{st} = 6.1078 \times 10^{7.5T_c / (237.3 + T_c)} \quad (11)$$

$$q_t = 0.2167 \times e_{st} / T_K \quad (12)$$

ここで、 e_{st} ：飽和水蒸気圧(hPa)、 T_c ：気温(°C)、 T_K ：気温(K)である。式(11)及び式(12)の T_c 及び T_K にダム管理所で観測している日平均気温を代入すれば良いが、

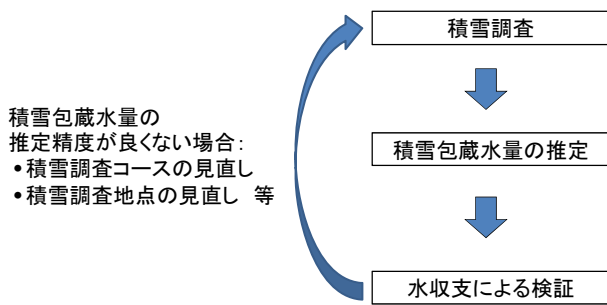


図-7 積雪包蔵水量の推定精度向上のサイクル

式(11)と式(12)の気温は単位が異なることに注意が必要である。気温の単位は、式(13)を用いて換算する。

$$T_K = T_c + 273.15 \quad (13)$$

表-5 に水収支の計算例を示す。この例では、 $WB = 100.69 - 21.94 + 21.13 = 99.88$ ($\times 10^6 \text{m}^3$)と求まった。なお、気温は標高が 100m 高くなるに伴い、平均して 0.65°C 低下する。積雪相当水量を算出する際、表-3 に標高別の面積を求めているため、これを用いて標高の上昇に伴う気温の低下を考慮し、可能蒸発散量の計算精度を高めることも可能である。

最後に、評価基準について述べる。鳥谷部ら¹⁰⁾は、北海道の 8 つのダムについて、積雪包蔵水量の推定結果と水収支を比較した結果、精度の良いダムで 20% 以内の誤差であったことを報告している。このような値を目安に推定結果を評価することが望ましい。なお、積雪包蔵水量の推定精度は毎年変化する。このため、推定精度は少なくとも 5~10 年程度の結果を用いて評価することが必要である。例えば表-4 に示した推定結果は、水収支と比較すると、約 4% の誤差であり、十分な精度を確保していると評価できる。誤差が大きい場合は、積雪調査コース、積雪調査地点等の再検討を行い、図-7 に示したサイクルで、推定精度を向上させることが望ましい。

8. まとめ

本稿では、山間部の森林内における積雪の特徴を示し、この特徴を用いて積雪包蔵水量を推定する方法、水収支を用いて推定精度を評価する方法をとりまとめた、「ダムにおける積雪包蔵水量推定ガイドライン(案)」について解説した。本ガイドラインが積雪寒冷地のダム管理に活用されることを期待する。

近年、航空レーザ測量から得られる高密度の地形データを用いて、様々な地形解析が行われており、航空レーザ測量データから積雪深を求め、積雪深の分布と標高、地形、植生等との関係についての研究が報告されている。(独)土木研究所寒地土木研究所においても、

ダム管理の実務への適用を視野に入れ、航空レーザ測量結果から積雪分布と地形との関係を分析し、ダム流域の積雪包蔵水量を精度良く推定する方法を研究している^{4),11)}。さらに、忠別ダムのように、流域面積の約 4 割が森林限界以上の高山帯(主たる植生が森林ではなく、ササや草地等)のダムもあるため、森林外の積雪分布に関する研究も進めている¹²⁾。今後、このような技術や知見の蓄積にあわせて、本ガイドラインの内容を充実させていく予定である。

謝辞：本ガイドラインを作成するにあたり、国土交通省北海道開発局からデータの提供と現場からの意見を頂いた。また、室蘭工業大学の中津川教授、日本気象協会北海道支社の臼谷氏に専門的見地から助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山田知充, 西村寛, 水津重雄, 若浜五郎: 大雪山旭岳西斜面における積雪の分布と堆積・融雪過程, 低温科学物理篇 37, pp.1-12, 1978.
- 2) 松山洋: 日本の山岳域における積雪水当量の高度分布に関する研究について, 水文・水資源学会誌第11巻2号, pp.164-174, 1998.
- 3) 島村雄一, 泉岳樹, 松山洋: スノーサーベイとリモートセンシングに基づく山地積雪水資源量の推定, 水文・水資源学会誌第18巻4号, pp.411-423, 2005.
- 4) 西原照雅, 中津川誠, 浜本聡: 航空レーザ測量を活用したダム流域の積雪深分布の推定, 河川技術論文集第18巻, pp.465-470, 2012.
- 5) 笹賀一郎, 藤原滉一郎, 佐藤冬樹: 森林の強風地における堆雪効果, 北海道大学農学部演習林研究報告46(4), pp801-828, 1989.
- 6) 日本雪氷学会北海道支部編: 雪氷調査法, 1991.
- 7) 社団法人日本雪氷学会編: 積雪観測ガイドブック, 2010.
- 8) 口澤寿, 中津川誠: 積雪寒冷地流域における水収支と蒸発散量の評価, 土木学会北海道支部年次技術発表会論文集, 第57号(B), pp.422-425, 2001.
- 9) 近藤純正編著: 水環境の気象学, 1994.
- 10) 鳥谷部寿人, 中津川誠: 航空レーザ計測データを活用したダム流域の積雪水量の推定, 土木学会北海道支部年次技術発表会論文集, 第67号, B-40, 2011.
- 11) 西原照雅, 中津川誠, 浜本聡: 航空レーザ測量を活用した森林内の積雪分布とダム流域の積雪包蔵水量の推定, 寒地土木研究所月報, No.714, pp.12-22, 2012.
- 12) 西原照雅, 中津川誠: 航空レーザ測量を活用した森林外の積雪相当水量分布の推定, 土木学会論文集B1(水工学), 2013. (印刷中)