



Title	札幌の冬期間に観測された積雪表面からの蒸発量
Author(s)	小島, 賢治; KOJIMA, Kenji
Citation	低温科学. 物理篇. 資料集, 43, 41-49
Issue Date	1985-03-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18739
Type	departmental bulletin paper
File Information	43_p41-49.pdf



札幌の冬期間に観測された積雪表面からの蒸発量*

小島 賢治

(低温科学研究所)

I. 緒 言

冬期間の積雪の蒸発量はどの程度かという質問を水文関係の人から受けることが時々ある。この報告はこれに答えるためにこれまでの直接測定値をまとめたものである。しかし何分冬期間に雪の蒸発量を測定できる機会は稀で、雨や雪が降っている時と地吹雪が多少とも起っている時には測定はほとんど不可能である。そこで、1970–71年冬から1982–83年冬までの間に札幌で測定した結果を残らず集めたが、比較的データが多い昼間の蒸発量でも、1～2月については各月の1/3、3月は2/3をカバーできるに過ぎない。全冬期間の蒸発量または空気中の水蒸気の雪面への凝結量(以後単に凝結量という)の時間変化を知るには気象要素から推定する以外に方法がないし、そのための資料はかなりあるが、推定方法に不確定の部分があって、まだ満足の報告を出せぬままである。とりあえず、この報告では、10年以上前の資料であるが蒸発量推定に使えるように整理できていたものを利用して、厳冬期から融雪期にかけての変化の様子を検討することにした。

II. 測 定 方 法

1. 直接測定

内径14 cm、深さ6 cmの透明アクリル製円筒形容器の中に雪の試料を入れ、これを表面がまわりの雪面と同じレベルになるように雪に埋め、通常1～2時間おきに容器ごと取出して秤量した。試料を埋める穴はあらかじめ丁度容器が収まるようにしておく。雪の試料は自然の粒子構造が保存されたまま容器に収まるよう注意したが、多少表面構造を乱して測定したことの方が多い。秤量後は試料からの雪粒の落ちこぼれ、余計な雪粒の混入付着が一個も無いように注意した。試料を積雪表面層に埋めた状況の写真は筆者の古い報告¹⁾に掲載してある。秤の最小読取値は1981年までは0.1 g、1982年からは0.01 gで、秤量は野外の仮設小観測室内で行った。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2700号

夜大雪が予想される時以外は試料を夜中放置しておいた。翌朝初回に秤量する時は、容器の外側に付着した雪粒だけ除去して1回、次に容器の底面についた霜を拭い去って再び秤量した。底につく霜の量は多い時で $0.08 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ である。

測定場所は低温科学研究所の裏の観測露場で、南北100 m 東西60 mを平らに整地した草原であるが、さらにその北400 m、西200 mには木も建物もない北大農場が開けている。

2. 気象要素観測値による推定

雪面からの高さ1 mでの水蒸気圧を e_1 (mb)、雪面温度での飽和水蒸気圧を e_{ss} (mb)、高さ1 mでの風速を u_1 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) とすると、蒸発速度 E は

$$E = \beta_1 u_1 (e_1 - e_{ss}) \dots\dots\dots(1)$$

であらわされるとみなす。 β_1 はとりあえず定数とする。 $E < 0$ なら蒸発、 $E > 0$ なら凝結である。 E を $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ であらわせば、 β_1 の単位は $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mb}$ である。 E を $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で表わし、空気の密度を ρ_a ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)、比湿を q として式(1)の代りに

$$E = c_E \rho_a u_1 (q_1 - q_{ss}) \dots\dots\dots(2)$$

とすれば c_E は無次元バルク係数である。 β_1 または c_E にどんな場合にどのような値を与えるべきか未だ確定できていない。この報告での蒸発量推定値は、蒸発量実測地点の近くで測定した気象要素と $\beta_1 = 1.0 \times 10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mb}$ を用いて式(1)で算出した。 $E/u_1 (e_1 - e_{ss}) = \beta_1$ の値は $0.8 \sim 1.5 \times 10^{-2}$ (単位上記)の間にあることが多く、凝結時には蒸発時より小さい傾向がある。ここでは同じ値を使用した。

水蒸気圧の測定には水が凍る低温下でも使えるよう特別に工夫した通風自記乾湿計 (高さは毎日調節)を用いた。風速は高さ固定 (地上2.5 m) のプロベラ式微風向風速計で測定したが、対数分布を仮定して雪面上1 mの風速に換算して式(1)に入れた (ただし第3表, 1972-73の場合)。

III. 測定結果

水文学上の目的に要求されるのは1日またはそれ以上の期間内の雪の蒸発量であろう。第1表は24時間またはそれ以上にわたる蒸発凝結収支量を日数で除して1日あたりの量を求めた結果である。10年以上にわたる測定値を集めてもこれしかない。雨や雪が降る時は測定できないことと、蒸発量がはっきり把握されそうな日を選んで測定したきらいがあることなどのため、12~2月の蒸発量については最大値の見当をつけるための資料と考えた方がよいかもかもしれない。3月にはデータ数が多いので、表の下端に記した3月分平均は真の平均値とさほどかけ離れていないであろう (第3表参照)。12月と2月とはデータが少なすぎて平均しても意味がない。なお、測定期間が例えば1-17~18, 1100~1100, 1980-81とあるのは1981年1月17日11時~1月18日11時の24時間という意味である。負符号は蒸発量、正符号は凝結量をあらわす。もちろん24時間量は昼間の蒸発量と

第1表 積雪表面での蒸発・凝結1日量の実測値(札幌)

Δt 日で ΔE mm-water の蒸発があった時, $\Delta E/\Delta t$ ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) をもって1日量とした。正は凝結, 負は蒸発をあらわす。順序は測定年に関係なく季節の順に記載した。

No.	測定期間				蒸発量(-) ΔE $\text{mm}=\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	蒸発日量 E_d $=\Delta E/\Delta t$ $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$	天気	備考
	月 日	時刻	年(冬期)	日 数 Δt d				
1	XII-17~18	1400~1600	1979-80	1.10	-0.132	-0.120	①	夜間凝結量は推定値
	18~19	1620~1530		0.97	+0.152	+0.157	●(夜)→①	
2	I-13~14	1310~1325	1981-82	1.01	-0.242	-0.240	①	夜の凝結量 0.11mmこみ 夜の凝結推定 0.08mm
		1514~1545		1.02	-0.187	-0.183		
3	17~18	1100~1100	1980-81	1.00	-0.071	-0.071	①	
		1600~1600		1.00	-0.149	-0.149	◎	
	18~19	1630~1630		1.00	-0.146	-0.146	①	
4	17~19	1200~1400	1982-83	2.08	-0.193	-0.093	①①①	
5	27~28	1800~1800	1979-80	1.00	-0.23	-0.23	◎→①	
6	28~30	1100~1100	1982-83	2.00	-0.483	-0.241	①①①	
7	II-16~17	1144~1410	1972-73	1.10	-0.389	-0.354	①	
		1736~1738		1.00	-0.186	-0.186		
8	19~20	1248~1055	1982-83	0.915	-0.407	-0.445	◎①	
9	II-28~III-4	1130~1330	1978-79	4.08	-2.51	-0.615	①→①	
	III-1~2 3~4	1025~1120		1.04	-0.958	-0.921	①◎①	
		1208~1209		1.00	-0.429	-0.429	①①	
10	III-7~8	1148~1140	1979-80	0.994	-0.241	-0.242	①	
		1800~1800		1.00	-0.107	-0.107		
11	15~17	1411~1349	1972-73	1.99	-0.647	-0.326	①①◎	
12	16~17	1730~1730	1971-72	1.00	-0.456	-0.456	-	
	17~18	1420~1420		1.00	+0.088	+0.088	-①	
13	III-24~25	1245~1357	1982-83	1.05	-0.426	-0.406	①①	
14	III-26~28	1052~1033		1.99	-0.706	-0.382	①①①	
	28~30	1033~1046		2.01	-0.252	-0.125	①	
15	24~25	1525~1708	1970-71	1.07	-0.403	-0.377	①	
16	27~28	1050~0948		0.958	-0.429	-0.448	①	
17	28~30	1119~1110	1978-79	1.99	-0.807	-0.406	①①◎	
2-6	1月分平均					-0.169		
9-17	3月分平均					-0.368		

夜間の凝結量の差引きである場合が大部分である。1979年12月19日のように昼間も凝結が続くこともある(第2表(a))。また、「夜間凝結量は推定値」と断つてあるのは、夜間降雨または降雪があったため気象要素から推定した量を含むことを示す。

第2表は主に昼間の1時間当り蒸発量(稀に凝結量)の測定値を12月から3月末まで季節を追って年別に示したものである。さきの第1表はこの中から昼夜にわたる部分を抜き出して積算したものである。最大蒸発速度は3月上旬までは $0.06\sim 0.07\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ($=\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)であるが、3月中旬には $0.12\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ もあらわれ、3月下旬は $0.08\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ である。表中()に入れた値は夜をさむ17時間前後の平均値である。連続した測定日の間が空欄になっている場合は大抵夜間に雪か雨が降った時である。

第3表は蒸発量の多い日を選ぶことをせずに1~3月の時期的変化と各月平均を求めるため、1973年1月8日から3月末日まで、3日以上間をあげないようにとった日々の凝結日量(+), 蒸発

第2表 積雪の蒸発・凝結1時間量の測定値(札幌)

正は凝結, 負は蒸発を表わす。夕方から翌日初回秤量時までの平均蒸発速度は()内に入れた。時刻は30分刻みとし, 例えば1230は12: で表わした。表中-2.5とある場合は蒸発速度が $2.5\times 10^{-2}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ($=\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)という意味である。

2-(a)

年 月日	1972		1979		1982	
	<i>t</i>	<i>E</i>	<i>t</i>	<i>E</i>	<i>t</i>	<i>E</i>
		$\times 10^{-2}$		$\times 10^{-2}$		$\times 10^{-2}$
XII-17			14	-5.3		
			15	-3.3		
			16			
18			10:	-4.1		
			12	-1.5		
			14	-2.4		
			16:			
19			11	2.0		
			12:	2.4		
			14	0.8		
			15:			
28	11					
	14	-4.5				
	16	-4.3				
	17:	-3.3				
29					12:	-1.5
					13:	-0.4
					14:	-0.1
					16	

2-(b)

年		1980		1981		1982		1983		年		1973		1979		1980		1982	
月日		t	E	t	E	t	E	t	E	月日	t	E	t	E	t	E	t	E	
		$\times 10^{-2}$		$\times 10^{-2}$		$\times 10^{-2}$		$\times 10^{-2}$			$\times 10^{-2}$		$\times 10^{-2}$		$\times 10^{-2}$				
I-11						12:	- 3.5			II- 5					13	- 1.5			
						13:	- 1.9								15	0.0			
						15:									17				
13						13	- 4.4			10					12	- 4.0			
						15									14	- 2.0			
14						11	- 3.2								16				
						13:	- 2.8			11					13:	- 2.7			
						16									15:	- 0.7			
16				12		13	- 2.3	12	- 1.3						17				
				14	- 0.7	15		13		16	12	- 6.5							
17				11	- 1.7			12	- 5.7		14	- 5.4							
				13	- 1.3			13	- 4.6		16	- 4.5							
				14	- 1.3			14	- 1.2		17:								
				15	0.1			16			11	- 3.4							
				16	1.2					17	14	- 1.9							
				10:				(0.23)			17:								
18				11	- 3.6			10	- 1.7		14	- 2.6					13	- 5.0	
				13	- 3.3			12:	- 1.0		18						15	- 2.1	
				14	- 2.6			15									17:	(-1.4)	
				15	- 1.8												11		
				16	- 0.2						20		14	- 4.6					
				16									16	- 3.3					
				10				(0.32)					17:						
19				12	- 2.5			10:	- 2.9				11:	- 1.0					
				13	- 2.8			12	- 3.4		21		12	- 1.5					
				15	- 3.0			14					14						
				16:	- 0.5								11:	- 6.7					
													13:	- 5.9					
25								13	- 3.8		28		15	- 3.4					
								14	- 0.9				17	- 1.3					
								15:					10:	- 6.8					
28	11:	- 5.2						11	- 2.3	III- 1			12:	- 5.8					
	12:	- 6.4						12	- 2.5				16	- 3.0					
	15	- 5.7						13	- 2.7				18:	(0.0)					
	16	- 2.3						14	- 1.3				12	- 5.9					
	18:							17	(-1.0)	2			15:	- 2.8					
29								16:	- 5.6	3			18	(-0.9)					
								17					10:						

第3表 1973年1～3月の積雪の蒸発、凝結、収支等の1日量推定値（札幌）

大気中の水蒸気圧、雪面温度での飽和水蒸気圧、風速等の毎正時間平均値を用いて各1時間量を算出し、0～24時の総量を求めた。収支日量は凝結・蒸発各日量の代数和。推定誤差は推定値のおよそ±30%以内。日射量は1972年気象庁検定の定数による。蒸発時間とは $e_1 < e_{ss}$ であった時間。

3-(a)

年 月 日 (1973)	蒸 発 凝 結	凝 結 日 量	蒸 発 日 量	蒸 発 時 間	1時間平均気温		全 天 日 射 量
	収支日量 E_d $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	$E^{(+)}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	$E^{(-)}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	t_e h	日 最 高 ℃	日 最 低 ℃	日 総 量 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$
I - 8	0.193	0.193	0.000	0	0.5	- 5.0	2.9
9	-0.040	0.033	-0.074	15	1.4	- 4.1	4.6
12	0.064	0.149	-0.085	7	- 2.0	- 6.0	7.4
14	(-0.15)		-0.199	11	- 0.7	- 8.8	7.7
16	-0.011	0.076	-0.087	11	3.1	-11.9	6.9
17	0.075	0.174	-0.099	8	0.7	- 5.8	5.9
18	-0.075	0.092	-0.167	12	- 0.6	- 7.1	4.2
19	0.055	0.122	-0.067	11	- 1.5	- 5.3	7.0
20	-0.042	0.157	-0.199	15	1.9	- 1.1	4.8
21	0.059	0.111	-0.052	8	- 1.1	- 6.2	8.6
23	0.162	0.207	-0.045	4	2.7	- 9.6	7.6
24	0.066	0.080	-0.014	4	4.0	- 3.8	3.0
28	0.137	0.298	-0.161	5	- 3.8	- 9.3	9.2
31	0.149	0.170	-0.021	5	0.6	- 9.5	6.5
14日平均	0.057	0.143	-0.091	8.3	0.4	- 6.7	6.2
II - 3	-0.479	0.049	-0.528	13	- 3.2	- 8.0	4.1
5	-0.093	0.096	-0.189	12	2.9	- 4.3	6.3
6	-0.085	0.045	-0.130	11	3.6	0.0	6.5
7	-0.055	0.058	-0.113	14	0.6	- 6.8	5.7
8	(0.050)	(0.098)	-0.048	8	- 5.4	-10.5	10.5
12	-0.092	0.166	-0.258	10	- 2.7	- 8.0	11.7
13	-0.228	0.121	-0.349	11	- 0.8	- 7.5	9.7
16	-0.498	0.066	-0.564	14	2.4	- 3.7	10.7
17	-0.172	0.034	-0.206	14	4.3	- 9.3	11.2
18	(0.4)	0.594	(-0.2)	(6)	7.2	0.1	3.5
21	-0.336	0.073	-0.409	11	- 3.2	- 7.0	11.1
23	0.188	0.371	-0.183	8	6.4	- 2.9	5.9
26	0.072	0.246	-0.174	6	- 2.0	- 9.7	11.7
27	-0.800	0.055	-0.855	17	1.3	- 6.0	13.7
14日平均	-0.152	0.148	-0.300	11.1	0.8	- 6.0	8.7

3-(b)

年 月 日 (1973)	蒸 発 凝 結	凝 結 日 量	蒸 発 日 量	蒸 発 時 間	1 時 間 平 均 気 温		全 天 日 射 量
	収 支 日 量 E_d $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	$E^{(+)}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	$E^{(-)}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	t_e h	日 最 高 ℃	日 最 低 ℃	日 総 量 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$
III- 2	-0.313	0.227	-0.540	9	- 0.5	- 4.9	13.5
3	0.152	0.161	-0.009	2	- 0.1	- 8.1	10.0
4	-0.073	0.211	-0.284	7	0.3	- 5.9	14.7
9	-0.341	0.144	-0.485	10	2.4	- 4.2	15.2
12	-0.388	0.076	-0.464	15	0.7	- 9.6	17.7
15	-0.209	0.081	-0.290	10	- 2.2	-15.0	18.9
16	-0.301	0.046	-0.347	11	0.0	-15.6	13.9
17	-0.289	0.066	-0.355	11	0.0	-11.4	12.7
18	-0.059	0.080	-0.139	7	1.0	- 4.0	11.3
19	-0.280	0.074	-0.354	17	2.4	- 4.1	16.9
20	-0.343	0.034	-0.377	15	2.0	- 6.7	14.8
21	-0.390	0.075	-0.465	15	1.5	- 6.2	16.7
22	-0.722	0.137	-0.859	10	1.7	- 4.8	14.5
23	-0.283	0.120	-0.403	10	4.0	- 2.8	7.3
24	-0.555	0.159	-0.714	14	3.0	- 5.8	12.7
26	-0.575	0.062	-0.637	11	0.0	- 8.0	20.5
27	-0.104	0.079	-0.183	11	1.2	- 7.5	11.6
28	-0.353	0.058	-0.411	13	3.6	- 5.0	13.3
29	-0.625	0.034	-0.659	17	5.2	- 6.7	16.7
30	-0.050	0.055	-0.105	9	7.1	- 0.5	15.3
31	0.121	0.413	-0.292	12	8.0	- 1.8	10.9
21日平均	-0.285	0.114	-0.398	11.2	2.0	- 6.6	14.3
3月下旬平均	-0.354	0.119	-0.473	12.2	3.5	- 4.9	14.0

日量(-), およびそれらの代数和としての収支日量を気象要素から推定した結果である。表の右側に気温と日射量とを付記したが, それらは直接蒸発量には関与しない。ただ, 平均として1月から3月へと日射量が増すとともに蒸発量も増す。1月中の14日間の平均では凝結の方が蒸発を上廻った。2月になると蒸発日量の平均は1月の3倍の $0.3 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ となったが, 蒸発凝結収支 E_d の平均は $0.15 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ の蒸発であった。3月の E_d の平均はさらに増えて $0.29 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ の蒸発となり, 3月下旬だけの平均は最も大きく, $0.35 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ の蒸発と推定された。凝結日量の平均は1月から3月にかけてさほど変化しない。

IV. ま と め

1日当りの積雪の蒸発量は2月中旬までは $0.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下であり、1か月の平均では1月から3月へと次第に増加するが、2月までは $0.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下である。3月の平均でも $0.3 \sim 0.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ である。凝結量との差引き1日当り蒸発量の最大は、測定値では $0.92 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、1973年冬の推定値では $0.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ であった。凝結が卓越する機会は12～1月に多いが、1日の収支量で最大 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 凝結の程度である。冬期間でも稀に高温で雨が降る日には1日の収支が $0.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ の凝結と云うこともないわけではない。

一方、札幌での降雪水量の平年値は12～2月の3か月で307 mm、降水日数45日であるから、1降水日当り $6.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、総日数90日で割ると $3.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ である。したがって、この期間の雪の蒸発による積雪水量損失は平年降水量の6%以下(1月については0～4.5%)ということになる。3月の平年降水量は78 mm(13日)、 $6.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ または31日平均で $2.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ であるから、蒸発対降水の割合は増し、12～16%となる。しかし3月後半は札幌の融雪期である。蒸発質量は融雪水量に比べると非常に僅かであることは云うまでもない。例えば、1983年3月下旬の平均蒸発速度 $0.28 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ は平均融雪速度 $17.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ の1.7%であった。この割合は4月に入ると更に減少する(1983年は4月1日に積雪が消えた)。

ちなみに、1973年4月9～10日(雪が消えたあとの)土からの蒸発量は $4.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、同じ露場の5月30日から6日間の草地からの蒸発散量は20 mm(平均 $3.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)であった(1972)。

札幌より雪どけが1か月遅れる母子里でも4月後半に雪の蒸発の測定を行った。1968年²⁾、1970～73年³⁻⁵⁾の測定結果(73年は潜熱量)は報告済みであるが1983年と1984年の結果は別に報告する予定である。

蒸発量の大部分は筆者自身が測定したものであるが、関連の気象要素の観測には低温科学研究所融雪科学部門のスタッフならびに大学院学生諸氏の協力を得た。

文 献

- 1) 小島賢治 1967 積雪の蒸発の融雪に及ぼす影響についての一実験, 低温科学, 物理篇, 25, 119-126.
- 2) 小島賢治・小林大二・小林俊一・成瀬廉二・石川信敬 1970 母子里における融雪・気象観測資料(1968), 低温科学, 物理篇, 28, 資料集, 1-23.
- 3) 小島賢治・小林大二・小林俊一・油川英明・石川信敬 1970 母子里の小流域における融雪, 流出および熱収支の研究I, 低温科学, 物理篇, 28, 175-190.
- 4) 小島賢治・小林大二・油川英明・成瀬廉二・石本敬志・石川信敬・高橋修平 1971 母子里の小流域における融雪, 流出, および熱収支の研究II, 低温科学, 物理篇, 29, 159-176.
- 5) 小島賢治・小林大二・油川英明・石本敬志・高村修平・藤井俊茂 1973 母子里の小流域における融雪, 流出, および熱収支の研究III, 低温科学, 物理篇, 31, 159-177.