研究・調査

秤型積雪量計による積雪水量の観測（第二報）

井 上 力 太*

1. ま え が き

筆者は、1956年以来北大低温科学研究所の御好意により、秤型積雪量計を同所構内に設置して積雪水量の連続観測を行なって来た。

その結果はすでに報告したとおりで、この方法による積雪量測定値は注意深く行なった。Snow Sampling 値との間に90%以上の一致を見た。従ってこの方法は一応成功したものと考えられる。

しかしながら、その際用いた感量機構はリング状力計の変位を機械的に約62倍拡大し、記録させたもので、比較的小さな感度（記録紙上の1mmのペンの動きは積雪水量にして7.3mmであった。）しか得られず、又記録の増加と減少の間に積雪水量値にして14mmに及ぶ機械的

遊びが原因と思われるドリフトがあり、このため例えば融雪期における水収支の詳細な観測は不可能であった。

そこで筆者は、電気的な変位拡大方法を用いて、秤量感度を前回よりはるかに大きなものとした外、装置の小型化に対する可能性を検討するために、受圧面積を $1/4$ にした小型積雪量計を別に試作し、同じく低温科学研究所の構内に設置して大型のものと並行して観測を行なった。

そこで以下に、これら装置の説明と、これ等を用いて行なった1960～1961年冬期における積雪水量の観測結果を報告する。

2. 秤型積雪量計（大型）**の構造

ほとんどの点は前回の観測に用いた構造と同じであるが、今回は力計の変位検出機構に改変を加えた。すなわ

図—1 差動トランスを用いた変位検出方式（S B—4）

* 札幌管区気象台

** S B—4 と略称する。

ち、前回に用いられた機械的拡大機構では、前節に述べた如く感度が低過ぎ、かつドリフトがあるので、例えば

融雪時期に降雪があっても記録紙の上には何も表われないので、融雪状況などの詳細な観測は不可能であった。そこで今回は力計内部の機構部を取り払い、差動トランスをかわりに取付けて変位検出を行った。図-1は差動トランスを用いた力計の変位検出方式を示したものである。差動トランスは4-coil 型のもので一次二次コイル以外に基準電圧発生用の三次コイルを有している。コアーの変位が $\pm 1 \text{ mm}$ 以内なら変位に対し、二次コイル電圧の変化は直線的であり、かつ三次コイル電圧は一定である。この二次コイル発生電圧を測定入力とし、三次コイル電圧を基準電圧として、スライド抵抗器に加えて自動平衡計測を行なわせる。

表-1

自動車平衡方式として用いた場合の 4-Coil 型
差動トランスの特性

測定範囲	$\pm 1 \text{ mm}$
励磁電圧及び周波数	6.3v. 20mA 50~60c. p. s
感 度	6.5mv/mm/v (50c. p. s)
感度変化の温度係数	$\pm 0.002\%/^{\circ}\text{C}$
零点変化の温度係数	$\pm 0.02\mu/^{\circ}\text{C}$

この差動変圧器の特徴は三次コイルと、二次コイルが同一スプールに極めて近接して捲かれているので温度及び外部磁界の影響を受けにくいことである。自動平衡式の場合の特性は表-1に示すとおりである。

図-1に示した平衡電動機によって 100Ω のスライド抵抗を摺動させ、その抵抗変化を室内で記録させるようにした。室内への隔測距離は約 30m で導線抵抗値は 1.7Ω である。記録器には交叉線輪型の打点式記録抵抗計を用いた。

小型積雪量計*の構造

大型積雪量計 (SB-4) は直径が 4m もあるので設置場所には相当な大面積を必要とする。又設置にあたっては前報告りに述べた如くある程度の土木工事が必要とする。

そこで今回は、この装置の簡易化及び小型化に対する可能性を検討するために、直径 2m の小型積雪量計を試作した。

図-2はこの小型積雪量計を図示したものである。大型のものと異なる点は、中心部を周辺より低くして融雪水を中央に集めた上、導管で地下室に導いて転倒桁型雨量計で測定出来るようにしたこと、及び全装置を 1 セットにまとめて設置作業を簡単に出来るようにしたことなどである。更に秤量機構としては抵抗線歪計を組み込んだロードセルを用いた。このロードセル中には受圧面と平行及び直角な抵抗線が、それぞれ 2 本ずつ、ブリッジ状に結線して組み込んである。ブリッジの入力電源には 1.5 V の直流電源を用い、不平衡電圧は直流増幅器を介して、full scale 2mV の自動平衡型直流電圧計によって

図-2 小型積雪量計 (SB-2) の構造

* SB-2 と略称する。

図—3 SB—4 及び SB—2 の特性曲線

使用した打点式記録抵抗計の記録紙の目盛を示す。

SB—2 の特性曲線はこの目盛に換算して画いてある。

なお SB—4 では図—1 のスライド抵抗の両端の抵抗比を切替える事により、又 SB—2 では、図—4 における a のスライド抵抗を動かして零点を切替え、記録紙を何重にも使用した。

SB—4 では各切替え毎に感度曲線は幾分異ったものになる。図—3 では例として二つの特性曲線が示してあるが、その他の切替えの場合についても大差はない。

SB—2 の方は全範囲にわたって特性が linear であるが SB—4 の方は図に見る如く、曲線状の特性曲線を持っている。これは主に使用した打点式抵抗記録計の特性によるものである。

SB—4 の記録紙は 1 目盛が 1.5mm である。従って、図—3 から読み取ると記録ペン 1mm のふれは、積雪水量値で、SB—2 の場合には、0.215mm、SB—4 の場合は平均で約 0.42mm に当る。前の機械的拡大方式の場合は記録ペン 1mm のふれは水量値 7.3mm に相当したので、SB—4 では前に比べて約 17.5 倍感度を高めたことになる。又機構部分がないので記録の行き帰りのドリフトは全然なくなった。リング状力計の歪の量に対する拡大

図—4 SB—2 の測定方式

記録させた。

4. SB—4、及び SB—2 の感度

図—3 は SB—4、及び SB—2 の総合感度曲線を示したもので横軸は積雪水量値 (mm) で、縦軸は SB—4 に

大率は前の機構では 62 倍であったが改造により 1100 倍となった。

5. 積雪期前の記録について

1960 年度の観測は 11 月 7 日より開始した。根雪期間に

図—5 無積雪無降水期間におけるS B—4の記録

入ったのは11月27日からである。記録をとり始めた後11月18日迄は全然降水を見なかった。

図—5はこの間のS B—4の記録を示したもので地面蒸発が原因と思われる記録の減少を示した。なお設置当初に中心のリング状力計にかかった荷重は630.6kgであった。

記録の模様は図に明らかとなおり午前9時—12時頃の間に急速な減少を示し、其後幾分回復する様相を呈することが多い。又夜間には比較的一定のことが多い。

土壌よりの蒸発の連続記録をとったものは其の例が見当らないので詳細のことはわからないが、午後における急速な回復から見ると、蒸発現象だけからはこの記録の解釈はつけにくいように思われる。この場合特に同じ場所でも蒸発の観測をしてはいなかったのであるが、試みに札幌管区気象台の9時—9時の蒸発観測値と、この記録から読取った同じ日の9時—9時の記録の減少量を比較して見ると、表—2の如くなる。気象台の露場と低温研究所の観測地は約2km離れており、観測値を比較して見ると気温、日射などは良く一致しているが、風速値は局地的地形の影響で相当異っている。従って蒸発値も異った値をとるのが当然である。けれども表—2に見るよ

うに、双方の order は一致している。これらのことから考えて、この記録の細い日変化は別として、減少全体としては蒸発に起因するものと考えて良いと思う。

表—2 気象台の蒸発量観測値とS B—4の記録減少値

日付	11月	日	8	9	10	11	12	14	15	17
札幌管区気象台 蒸発量観測値 9:00~9:00			0.8	1.3	1.4	2.0	1.0	1.6	1.1	1.0
S B—4 記録減少値 9:00~9:00			1.5	0.9	0.9	1.2	1.2	1.3	0.5	1.8

逆に降雨のある時は記録が増大する。結局雪がなくても記録は絶えず変動をしているので、この点設置当初の荷重をそのまま不変の死荷重とした前報告¹⁾のやり方は、厳密に言えば正確な記録解析法ではなかったことになる。

融雪期に融雪水はまず受圧枚上の覆土中に浸透するが、それだけでは荷重に変化はなく、土中から流出して始めて記録は減少を示す。従って記録の減少速度はそのまま

では積雪外流出速度にはならない。筆者は次節に述べる方法によって、この点を解決することとした。

6. 覆土中からの水の流出について

土地が積雪に覆われていない時の降雨中の記録から、1時間の重量増加量 ΔW (mm 水量相当値) を求め、かつその1時間の降雨量を ΔP mm とする。

この場合、 $\Delta f = \Delta P - \Delta W$ をこの1時間の流出量と定義する。単に定義するとしたのは、この装置では、受圧板上に同量の水量があっても、その量の分布が異なれば中心に置いた感量部にかかる荷重は変化し、従って示度は変化するからである。 Δf をその時の重量 W に対して plot したものが図-6 である。この1時間に重量は ΔW だけ変化したので、この plot も ΔW だけの幅を持つことになる。図に示してある矢印は W の変化方向を示したものである。なお W の零点は未だわかっていないので、さし当り設置当初の点 (SB-4 D の切替え番号 No. 3 記録紙目盛 20-図-3 参照) の点にとっている。

図-5-6 Δf , W 間の関係曲線を引くためには未だ相当な任意性がある。又融雪期には Δf が 5mm/h 程度迄必要であるが観測値は 4mm/h 程度迄しかない。そこで理論的考察を加えることとする。ただしこれは極めて

図-6 流出量 f (1時間降雨量 Δp , 1時間指数増加 ΔW とした場合 $f = \Delta p - \Delta W$ で定義される量) と全重量との関係

取扱の困難な問題であり、厳密な解は不可能である。従って問題を非常に簡単にして平な円板状の領域からの水の流出を考えることにする。すなわち中心からの距離 r 間の領域の水の収支を取扱うわけであるが、この際土壌と $r + \Delta r$ 水分中の重力水の移動のみを考える。又重力水は Darcy の法則に従って圧力水頭差に比例した速度を持つこと、すなわち水頭を ϕ とすれば水の移動速度 (単位時間の流量/断面積) は、 $v = -k \text{ grad } \phi \dots \dots \dots (1)$ で表わされ、かつ k は一定値をとる事を仮定する。

なお全領域を平な円板状のものと考えたことは大きな仮定であって実際には中心部を幾分高くしてある。今受圧板の半径を R とし、又中心部は周辺より h だけ高くなっているものとし、又中心から r の距離における受圧板上の水頭の高さを z とすると、

$$\text{その位置の水頭水位は } \phi = Z + h - \frac{h}{R} r \dots \dots \dots (2)$$

で表わされ、又受圧板の外のビニールをたらし込んである溝迄の領域は $\phi = Z \dots \dots \dots (3)$ で表わされる筈である。

現在の場合をこれを全領域について $\phi = Z$ と仮定したのである。

Z を r と時刻 t の函数と考えると、 r 方向の流速 v は (1) 及び (3) 式から

$$v_r = -k \partial Z / \partial r \dots \dots \dots (4) \text{ である。}$$

従って今一定強度の降雨 p mm/k がある場合の Δt 時間における $r, r + \Delta r$ 間領域の水収支は

$$\begin{aligned} & -2\pi r Z k \partial Z / \partial r \Delta t + 2\pi (r + \Delta r) (Z + \partial Z / \partial r \Delta r) \times \\ & k (\partial Z / \partial r + \partial^2 Z / \partial r^2 \Delta r) \Delta t + 2\pi r \Delta r p \Delta t \\ & = \phi \partial Z / \partial t \Delta t \cdot 2\pi r \Delta r \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

で表わされる。この式の左辺の ϕ は土壌の非毛管孔隙量 ((non-capillary porosity) である。

(5) 式を整理して

$$(\partial Z / \partial r + Z / r) \partial Z + Z \frac{\partial Z^2}{\partial r^2} + p / k = \phi / k \partial Z / \partial t \dots \dots (6)$$

を得る。

$$\text{今 } \chi = Z \partial Z / \partial r + r p / 2k \text{ とおくと (5) 式は}$$

$$\chi / r + \partial \chi / \partial r = \phi / k \partial Z / \partial t \dots \dots \dots (7)$$

となるが定常状態を仮定すると

$\chi / r + \partial \chi / \partial r = 0$ となり、従って $\chi = C_0 / r$ を得るが、受圧板上は無泉であるから $C_0 = 0$ で、従って

$$Z \partial Z / \partial r + p r / 2k = 0 \dots \dots \dots (8) \text{ で}$$

$$Z^2 + p r^2 / 2k = C \dots \dots \dots (9) \text{ を得る。}$$

受圧板上のビニール、シートは周辺より 1 m ($R/2$ に相当する) だけ離れた排水のよい溝の中にたらし込んである。従って $r = R/2 = 3R/2$ の地点では $\partial Z / \partial r = -\infty$ 又は $Z = 0$ と見てよい。従って (9) 式の常数 C は

$$C=9pR^2/8k \dots\dots\dots (10) \text{ となり,}$$

従って $Z = \{(1-4r^2/9R^2) \times 9pR^2/8k\}^{1/2} \dots\dots (11)$
となる。

次にこの場合に力計にかかる水量の全荷重は次式で表わされる。

$$\int_0^R 2\pi r Z \phi (R-r) / R dr = 2\pi \phi / R (9pR / \delta k)^{1/2}$$

$$\int_0^R r (R-r) (1-4r^2/9R^2)^{1/2} dr$$

$$= 0.327\pi \phi R^3 (p/2k)^{1/2} \dots\dots\dots (12)$$

又この荷重は次式で表わされる W で読み取っている。

$$\int_0^R 2\pi r W (R-r) / R dr = \pi R^2 W / 3 \dots\dots\dots (13)$$

従って (12), (13) の両式を用い、又定常状態では $p=f$ であることを考慮して、流出量 f は

$$f = \frac{2k}{(0.327)^2 \times 9\phi^2 R^2} W^2$$

$R=2000\text{mm}$ を入れると

$$f = 5.2 \times 10^{-7} k W^2 / \phi^2 \dots\dots\dots (14)$$

を得る。

W の零点は図-6 では仮の点に取ってあるので、現

在迄行なった仮定が成立するものとすれば f と W の間に

$$f = a(W-b)^2 \dots\dots\dots (15)$$

なる関係式が成立する筈である。図-6 の曲線は $a=0.3$, $b=6.2$ として (15) 式を画いたものである。なお $a=0.3$ という値を (14) 式に入れて k/ϕ^2 の値を求めると、 $k/\phi^2=5.8 \times 10^5 \text{mm/h}$ を得る。

図-6 を詳細に見ると、 f は W^2 以上の高次の量に比例しているように思われるが観測精度の関係もあり、これ以上の検討は困難である。

最後に k/ϕ^2 の値であるが、 k の値は ϕ の外に水分と毛管張力の関係曲線にも依存しているといわれている。

今例として(2), (3)の土に関する値を例示すると下記のとおりである²⁾。

土の型	ϕ	$k(\text{mm/h})$	$k/\phi^2(\text{mm/h})$
Genesee 微砂壤土	0.147	1.23×10^4	5.8×10^5
Cecil 粘土	0.120	1.062×10^4	7.4×10^5
Iredell 砂質壤土	0.092	0.216×10^4	2.5×10^5

以上のとおりでこの値は上述の計算結果と非常に良く合致している。従って上の結論は大体実際の状態を表わしているものと見て良いと考える。

図-7 積雪深変化図

図—8 積雪水量値と降雪量積算値

7. 積雪水量図及び積雪深図

図—7は1960～1961年冬期間の試験地における積雪深で図—8は同じ期間の SB—4、及び SB—2 の記録から毎日9時の読取値を plot した図である。又図—8の点線は降雪量積算値を plot したものである。雪尺、SB—2、SB—4、雪量計等の設置場所は図—9に示すとおりで各地点とも幾分積雪の模様も異っており、直接の比較は出来ない。しかしながら SB—2、SB—4 の両者間の差は、後述の如く実際の状況と良く一致していた。両者共月末日頃に積雪量の最大値が出ているが、札幌ではこれと同じ頃に積雪量の最大値が表われることが多い。

1月下旬から SB—2 の記録は SB—4 を上回ってくるが、実際にもこの頃より次第に SB—2 の設置点附近の方が積雪量が多くなってきた。SB—2 は設置は積雪の始まる前であったが記録を取り始めたのは12月17日からでそれ以前のことは不明なので、この日の記録を SB—4 と合わせた。従って前節に述べた方法で SB—4 のように零点を定めることが出来なかった。

図—10は SB—2 と SB—4 の差の一冬の変化を示した図であるが、1月20日から2月12日の頃に約20数耗

SB—2の方が増している。この期間の気象条件、特に風向風速について調べて見たが他の期間と著しく異っているようなことはなかった。強いて云えばこの期間は他の時期に比べ一般に低温であった。しかしながら前述の如く実際にも SB—2 の設置点の方が積雪が多くなっているところから、これは明らかに地吹雪又は流雪による drift によるものと考えられる。

Sampling 値は図—8に×印で plot してあり、これと記録との対比は前にも報告したので省略するが90%以上の一致は前回同様見られた。Sampling の地点は SB—4 と積雪深の同じ場所を選ぶように努めた。これ以上の一致は Sampling 値の精度、地域差を考えれば困難であると考えられる。

8. む す び

第二報においては感量機構の改良と、小型化に対する可能性検討のための直径2mの試作品 SB—2 についてその構造を述べ、更に前回不十分であった覆土中からの水の流出を考察して、零点の決定法を定めた。

なお1960～1961年冬期間において得られた積雪水量図を示したがこれを見ると一見装置の小型化は何の問題も

図—9 測定装置配置図 A 雪量計 B 3 杯風速計 C 雪尺 D 温度計 E 日射計 F 地下室 (融雪水測定) G 百葉箱

図—10 SB-4とSB-2の示度の差の変化図

ないようである。過渡特性等に関する詳細の結果は次の報告において述べる。又特に融雪期には記録に特有の日変化が現われるがこの点についても次の報告に述べる予定である。

文 献

- 1) 井上力太, 1958: 秤型積雪水量計による積雪水量の観測, 雪氷, Vol. 20, No. 6.
- 2) ベーバー, 土壤物理学 1948 野口, 福田訳, 朝倉書店. p. 246.

—Abstract—

On Measuring Water Equivalent of Snow Cover by Means of Snow Balance (Second Report)

Rikita Inouye

The author has made an improvement in the original snow balance of which he described in the first report. The magnifying mechanism was removed; the movement of the ring balance was made to be transmitted directly to a differential transformer and recorded electrically. The improvement has heightened the sensitivity 17.5 times, preventing any drift to appear.

He has also made another trial in the possibility of making the snow balance smaller. The new midget model SB-2 two meters in diameter, and has a loadcell with strain gauges set in it. Simultaneous observations have been made on SB-2 as well as the original SB-4 to ascertain the accuracy of the apparatus.

Due to evaporation or precipitation, the quantity of water contained in the soil on the pressure dial will change almost unceasingly, thus causing readings to change even with no snow cover. The author treats this problem, and has led the method to fix the zero point for the apparatus.

So far as the last one-winter continuous observation on the models SB-4 and SB-2 is concerned, no serious fault has not been found with the latter, but further discussion on this point will be made in the third report.