係数は寒地に行く程大となる傾向がある。

4. 降水量と収量との關係は東部地方に於ては氣溫と同様に出土期前後が最も密接な相關關係にあるが、西部地方に於ては降水量と収量との相關係数の最も大きい時期は地方によりまちまちで一律でない。

5. 日照と収量との關係も東部地方では氣溫と同様に出土期前後が最も密接な相關關係にあるが、西部地方では開花結實期が最も密接な相關關係にある。

西部地方の開花結實期の日照と収量とが密接な相關關係にあるのは多日照が開花結實に好影響を與へるば

かりでなく、丁度此の頃は颱風の襲來する時期で、日照の多い事は颱風襲來回数の少い事に相關聯するからである。

× × ×

本研究は文部省自然科學研究獎勵金により調査せる處の一部にして、同省に謝意を表すると共に、本研究に對し御便宜及び御勸勵下さつた臺長岡田先生並びに築地先生に厚く感謝する。尙調査に當り鈴木雄次君にも少なからざる手数を掛け、同君にも感謝する。

昭和 15 年 1 月 10 日脱稿 於中央氣象臺

積雪の力學に關する二、三の基礎性質に就て*

岡 部 龍 信

§1. 總論 積雪の力學に就いては黒田博士の御話⁽¹⁾にもある如く殆んど未知であり、又非常に重要であるに拘らず、それに關する研究が發表されてゐない。殊に積雪の力學は實生活に必要で、その發展の基礎ともなるべき積雪の性質が積雪の密度を除いては餘り研究されてゐない。筆者は幸ひ北海道茅部郡森町の中央氣象臺森町觀測所に於て北海道の冬を僅かではあるが二回程經驗し、積雪に關して二、三の實驗並に觀察をして見た。此等の對照物は積雪の性質の中の極めて一小部分に過ぎないし、且つ實驗も徹底的に行はれなかつた事は残念ではあるが、實驗の中の一部を整理して茲に報告し、大方の御批判を仰ぎたいと思ふ。

§2. 積雪の性質に就て 積雪の單位容量をとつて、其の目方を秤量する時は、即密度を求める時、其の密度に就て色々の値が出て來て決して一定の値ではない。故に種々な種類に分類し、密度を統計したりする調査⁽²⁾もあるが、スキーヤーの使ふ積雪の種類と、學術的のと大分分け方が異つてゐて、之を決定する事は容易な事でない。此の密度の差異は積雪の組織が割合に多く空隙を有するからである。この空隙がどの位あるかは積雪の性質論には極めて重大である。例へば降り

立ての積雪は相當大なる空隙を有してゐるが、次第に上部に積雪されるにつれて、上層よりの壓力で次第に縮少され、空隙が少なくなつてくる。又崩雪^{ナダレ}は主に積雪層の中の空隙の多い所に起り、此の面に沿ふて上層の積雪が滑降するのが多い。

此の空隙の容積と雪の實質部分の容積の比を取つて、空隙の大きいさを表す事にする。即ち

$$\text{空隙比} = (\text{空隙の容積}) \div (\text{雪の實質部分の容積}) \\ = V_0 / V_s \quad (1)$$

の如くして表す。或は空隙の容積を雪の總容量の百分率で表す方法、即ち

$$P = (\text{空隙の容積}) \div (\text{雪の總容量}) \\ = V_0 / V = V_0 / (V_0 + V_s) \quad (2)$$

として、 P を空隙率と呼ぶ事にする。

之等空隙比、空隙率の測定は容易で、雪の密度を測定するのと同じである。即ち或る容器中に雪を受けて積らし、又は積雪をその容器中に切り取つて入れ、その目方を秤る。之を w gr とし、容積を v cm³ とすると

$$w/v = G \quad (3)$$

は「見かけの比重」で、この v の中には空隙があるから眞の比重ではない。今日迄測定され、普通積雪の密

* T. Okabe: Experimental Report on a Few Fundamental Natures referring to the "Dynamics of Deep Snow."

(1) 黒田正夫：積雪の力學，日雪月報，1 (昭 14)，25 頁。

(2) 泉 末雄：積雪の種類と其の密度，天氣と氣候，1 (1934)，263 頁。

度と呼ばれてゐるものはこの「見かけの比重」である。雪の眞の比重は雪片 1 個だけの空氣を含まないもので、之は氷の比重と同程度で大體 0.9 であるから、積雪 1 cm^3 中の雪の實質部分のみの容積は $G/0.9$ である。故に $v\text{ cm}^3$ 中の間隙の容積は

$$v-v'=v-Gv/0.9=v(1-G/0.9) \quad (4)$$

である。(1) 式から

$$e=(1-G/0.9)/(G/0.9), \quad (5)$$

$$P=\frac{v(1-G/0.9)}{v}=1-\frac{G}{0.9} \quad (6)$$

で、 G 即ち密度を測定すれば良い事になる。 G は各方面で測定されてゐる密度で、早くより泉末雄技師の有益な報告⁽¹⁾がある。同氏は密度を積雪の種類別にして測定してゐる。その他同氏以外に各方面で測定してゐる。勿論高田、奥羽、北海道、樺太等で降る雪や積雪は性質が異なるから、積雪の密度も種々な値となつて現はれてゐる。⁽²⁾密度と深さの關係は高信保氏⁽³⁾に依れば Z を積雪表面よりの深さ (cm) とすれば

$$G=0.1410+0.0470 \times Z$$

である。この式では途中雪層の状態が明示されてゐないが、不連続層がないとした一つの實驗式である。これに依り e, P を計算すれば、積雪表面よりの深さが大になるにつれて間隙の壓縮する有様は第 1 圖の如くなり、その計算は

第 1 圖

第 1 表に示す。

これを見ると大體指數函数的に変化してゐる。

1 cm^3 の積雪中にある間隙は表層では 0.81 cm^3 もあり、殆んど間隙のみの觀あり、次第に深くなるにつれ間隙

は少くなり、 50 cm も深くなると間隙は 0.59 cm^3 となり、大分間隙はなくなり、殆んど雪の實質部分の容積

第 1 表

$Z(\text{cm})$	10	20	30	40	50
G	0.178	0.245	0.285	0.333	0.369
$\phi^*(\text{cm}^3)$	0.81	0.73	0.68	0.63	0.59
e	4.06	2.67	2.15	1.44	1.71

(1 cm^3 中の間隙の容積)

と間隙の容積が同じ割合になつてゐる。

斯の如く深さに依つて間隙が變化してゐるのであるが、此の間隙はどの位の雪が上に積つたらどの程度に縮少するか等の實際の積雪に就いての研究は本報告の次にする。

尙此の報告で分る通り雪の密度を測定せる際は必ずその状態や氣象状態と共に測定せる積雪の深さをも明示せざる限り意味を持たぬ事になる。

§3. 雪の粘着力及内部摩擦角に就いて 雪の粘着力や摩擦角等に就いて測定された例は餘り無いので、僅かしか材料が得られなかつたが測定して見た。一般に平均剪斷強 f と粘着力 c 、内部摩擦角 θ との間には n を上下壓力強⁽⁴⁾とすれば

$$f=n \tan \theta+c \quad (9)$$

なるクーロンの式がある。C.G.S. 單位で c は g/cm^2 で示される。積雪の場合このクーロンの式が成立つや否やは問題であるが、大體土性論から見て成立するものと假定する。直接 f を與へて實驗的に θ, n, c を求めるべきであるが、測定器がない爲、(9) 式は明かにする事(即ち直線になるや否やを明かにする)は出来ないが、積雪面の安定法面の形より推論して θ, c を求めよう。即ち無風の時自然のまゝに降雪を放置して積雪させ、その法面の安定を求め、最後の落付きの模様から(第 2 圖)理論的に此等を求めた。今無風の時に或る幅の平板を水平に置き、これに靜かに落ちる雪を受け之を積もらした。勿論斯くの如き好條件は一多に何回もない。偶然條件に合ふ時が 2 回程あり、その法面を測定した。即ち第 2, 3 圖の通りで、其の時の状態は第 2 表の通りである。兩者共幅は異なるが長さは 3 m

(1) 泉 末雄：降雪の種類と其の密度、天氣と氣候。1 (1934), 166；雪の調査、氣象雜纂。5 第 2 冊, 6 第 1 冊；積雪の種類、岡田臺長在職 30 年記念論文集。(2) 樺太廳氣象觀測所 氣象談話會報 1, No. 3. 赤井清康：樺太に於ける積雪の溫度及び密度の一例、岡田臺長在職 30 年記念論文集。泉 末雄：雪質と雪害、天氣と氣候。3 (1936), 546. 中央氣象臺札幌支臺：北海道氣象月報等。(3) 北海道氣象月報。第 308, 319 號。

(4) 或は垂直壓力。

第 2 表

	観測場所	観測時	気温	風	積雪の密度	板の幅
第 1 圖	北海道—森町	昭 13 年 2 月 17 日 22 時	95°.2	静 穩	0.137	10.5 cm
第 2 圖	北海道—森町	昭 13 年 2 月 17 日 21 時	96.0	静 穩	0.136	12.0 cm

位ある板で、積雪上 10 cm の所に置いた。圖は實物大で共にこの板に積つた雪の板の長さの垂直な鉛直切斷面を示す。この切斷面に就いて調べて見よう。二次元の場合を取り、板の上の積雪の板の長さの方向の相互の

摩擦や粘着力を考へない事にする。第 4 圖では第 2 圖等と同様 AEBC は板の長さの垂直な積雪の鉛直切斷面を示す。BD 面は積雪の上面で水平をなしてゐる部分⁽¹⁾AEB 面は側面で、曲線をなしてゐる。この面に雪が降れば、總てこの面に沿ふて滑り落ちて了ふ。即ち第 2, 3 圖は最後の形である。今直線 AB の傾斜を φ , 法高を h , 直線 AD の傾斜を δ とし、まり面 AD は平面と假定すれば⁽²⁾積雪塊 AEBCD に作用する力は自重 W と、AD 面への垂直分力 N によるこの面の摩擦力 $N \tan \theta$ 及びこの面の粘着力 $\kappa = c \overline{AD}$ との 3 力である。この 3 力は釣合ふ故に、

$$N \tan \theta + c \overline{AD} - T = 0 \quad (10)$$

第 4 圖

然るに $N = W \cos \delta$, $T = W \sin \delta$,
 $\overline{AD} = h / \sin \delta$

なる故 (10) 式に代入すると

$$c = \frac{W \sin \delta}{h} (\sin \delta - \cos \delta \tan \theta). \quad (11)$$

然るに $W = \triangle ABD \times w + \text{面積 } AEB \times w$

$$= \frac{wh^2 \sin(\varphi - \delta)}{2 \sin \varphi \sin \delta} + \frac{w}{2} \int_{\varphi}^{\beta} r(\alpha) \frac{h}{\sin \varphi} \sin(\alpha - \varphi) d\alpha,$$

但し w は雪の比重, β は A に於ける $\widehat{AEB}$ への切線, r は $\widehat{AEB}$ の一點 E へ A より引いた動徑である。

$$\text{第 2 項で, } \int_{\varphi}^{\beta} \frac{hr(\alpha)}{\sin \varphi} \sin(\alpha - \varphi) d\alpha = [A]$$

とおくと (11) 式は

$$c = \frac{wh \sin(\varphi - \delta)}{2 \sin \varphi} (\sin \delta - \cos \delta \tan \theta) + \frac{w \sin \delta}{2} \frac{[A]}{h} \times [A] (\sin \delta - \cos \delta \tan \theta) \quad (12)$$

となる。 $\frac{\partial c}{\partial \delta} = 0$ と置けば

$$h[-\tan(\delta - \theta) + \tan(\varphi - \delta)] + [A][\tan \delta + \tan(\delta - \theta)] \frac{\cos \delta \sin \varphi}{\cos(\varphi - \delta)} = 0.$$

之を展開して、

$$h^2[-2\delta + \theta + \varphi] + [A] \times \varphi \times (2\delta - \theta) = 0.$$

$$\delta = \frac{1}{2} \left\{ (\theta + \varphi) - \frac{[A]}{h^2} \theta \varphi \right\} / \left\{ 1 - \frac{[A]}{h^2} \varphi \right\}. \quad (13)$$

第 2 圖から測定して、 $[A] = 3.71 \text{ cm}^2$, $h^2 = 18.5 \text{ cm}^2$, $\varphi \approx 0.96$, $\theta \approx 10^{-1}$ で、 $[A]\theta\varphi/h^2 \approx 10^{-2}$, $[A]\varphi/h^2 \approx 0.19$ を代入すると、(第 3 表参照)

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{\theta + \varphi}{0.81} \quad (14)$$

となる。この値を (12) に代入して

$$c = \frac{w}{2} \left\{ \sin\left(\frac{\theta + \varphi}{1.62}\right) - \cos\left(\frac{\varphi + \theta}{1.62}\right) \tan \theta \right\} \times \left[\frac{h \sin\left(\frac{0.62\varphi - \theta}{1.62}\right)}{\sin \varphi} + \frac{\sin\left(\frac{\varphi - \theta}{1.62}\right)}{h} [A] \right]. \quad (15)$$

之が θ, c , 傾斜 φ , 法高 h との間の關係式である。

之から傾斜角 φ と法高 h との關係式も容易に求ま

(1) 板の幅が狭いと水平とならない時がある。 (2) 之は勿論上を凸とした曲面が正しい。

る。

(14) 式は $\delta = (\theta + \varphi)/2$ として良いからこの δ の値を (12) 式に入れ、(12) 式を各項に就て展開し 3 次以上を無視すると、

$$2c - c\theta^2 = \frac{wh}{4 \sin \varphi} (\varphi - \theta)^2 + \frac{w}{h} \left[\frac{\varphi^2}{4} + \frac{1}{2} \varphi \theta - \frac{\varphi \theta}{4} \right] \times 1,$$

$$\text{即ち } \left(\frac{wh}{\sin \varphi} + 4c \right) \theta^2 + \left(\frac{[A]w}{h} - \frac{2wh}{\sin \varphi} \right) \varphi \theta + \left(\frac{w[A]}{h} + \frac{wh}{\sin \varphi} \right) \varphi^2 - \delta c = 0.$$

$$\text{今 } \frac{wh}{\sin \varphi} = k, \left(\frac{[A]w}{h} - \frac{2wh}{\sin \varphi} \right) \varphi = m, \left(\frac{w[A]}{h} + \frac{wh}{\sin \varphi} \right) \varphi^2 = n$$

$$\text{と置けば, } (k + 4c)\theta^2 + m\theta + n - \delta c = 0 \quad (17)$$

となる。今求めるものは θ, c である。第 2, 3 圖からは k, m, n が求まる。實際の値は第 3 表に示した。(但

第 3 表

	h	φ	A	w	k	m	n
第 1 圖	4.3	55°	3.71	0.137	+0.719	-1.49	+1.08
第 2 圖	4.5	50	4.88	0.136	+0.806	-1.28	+0.73

し總て C. G. S. 單位) 第 (17) 式は異つた二つの觀測に就いて二つ求められ、(17) 式をその一つとすればその外に

$$(k' + 4c)\theta'^2 + m'\theta' + n' - \delta c = 0 \quad (18)$$

が得られる。但し比重や求めんとするものは二つの觀測に就いて同じであるとする。本實驗では第 3 表の如くで同じであるとして良い。(17), (18) 式より

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \{-(m - m') \\ &\quad \pm \sqrt{(m - m')^2 - 4(k - k')(n - n')}\} / 2(k - k'), \\ C &= \frac{k\theta^2 + m\theta + n}{8 - 4\theta^2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

として、 θ, c が求まる。第 3 表の値を代入して θ の正の値を採つて c の式に入れると

$$\theta = 1.15 = 65.9^\circ, c = 0.116 \text{ g/cm}^2 \quad (20)$$

となる。

この c の値は非常に小さなものであるが、降りたての、一寸見た所柔かい、然もさらさらした乾性軟雪では此の位の値をとるものと思はれるが、實測文獻が手元がないので批判出来ない。又迂り面 AD を平面と

した假定も幾分影響がある。新雪では雪 1 個 1 個の枝が未だ折れずにあり、その枝が各々別個の雪粒を互に連結させて、垂直に積り易くなる等今迄の球面の粒體とは大分異つた枝のある粒體や、長方形、六角柱等種々な形の粒體なので c の現はれる場所は何處であるかは良く分らない。

θ は大體上の場合より類推して、又雪粒の枝のある事等から見て、適當な値と思はれるが、之も批判すべき材料が無い。

要するに本實驗で得られた値は (20) 式の如き値である事を報告して、大方の御批判を得たい。此の値を種々な積雪に就いて求めれば色々な値が出てくる。其等を統計して積雪の分類に役立てるべきで、この c や θ の値からワックスの理論が統計され判然される事と思はれる。

§4. 結 語 以上 §2, §3 に於て著者の行つた實驗の結果を發表したが眞實性は何としても今後の正確な實驗に俟つもので今急にその是非は分らない。

今回得られた結果を略記すれば、

1) 先づ積雪内部の間隙率や間隙比の定義を行ひ、其れに依り間隙を計算した所意外に間隙が多い事が分つた。常識通り間隙は確に下層に向つて少くなり、この例では 50 cm の深さでは同一容積の内、間隙と實質部分が半々の割合であつた。積雪に就いて定期に間隙を測定し、其の不連續面を確めておく事は崩雪豫報に役立つ。

2) 降り立ての積雪に就いて粘着力及内部摩擦角を計算した。實驗によると

$$\text{粘着力} = 0.116 \text{ g/cm}^2, \text{ 内部摩擦角} = 66^\circ$$

なる結果を得た。

此等に就いては尙更に進んで研究開發される事を切望して止まない。

本報告を終るに當り終始御指導御鞭撻を賜つた元函館測候所長高信保技師に衷心より感謝し、御教示を得た同窓の畏兄、東條貞義氏、齋藤博英氏、堀清一氏に謝し、又實驗に御協力して下さつた小林六彌氏、澤村成吉君、泉キエ君に感謝の意を表したい。

支臺長須田博士には御多忙中御閱讀をお願いした、深謝の意を表します。尙堀學兄には代讀して戴き且重要な誤を御教示下さつた。深謝する次第であります。

(昭和 14 年 8 月 中央氣象臺福岡支臺にて)