



Title	雪洞の変形について II
Author(s)	大浦, 浩文; OURA, Hirobumi
Citation	低温科学. 物理篇, 18, 47-58
Issue Date	1959-11-20
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17956">https://hdl.handle.net/2115/17956</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	18_p47-58.pdf



## 雪洞の変形について II\*

大浦浩文

(低温科学研究所 気象学部門)

(昭和34年7月受理)

### I. まえがき

この測定は前の報告<sup>1)</sup>と同様、北海道雨竜郡にある北海道大学雨竜演習林母子里看守所のテニスコートで行つたものである。

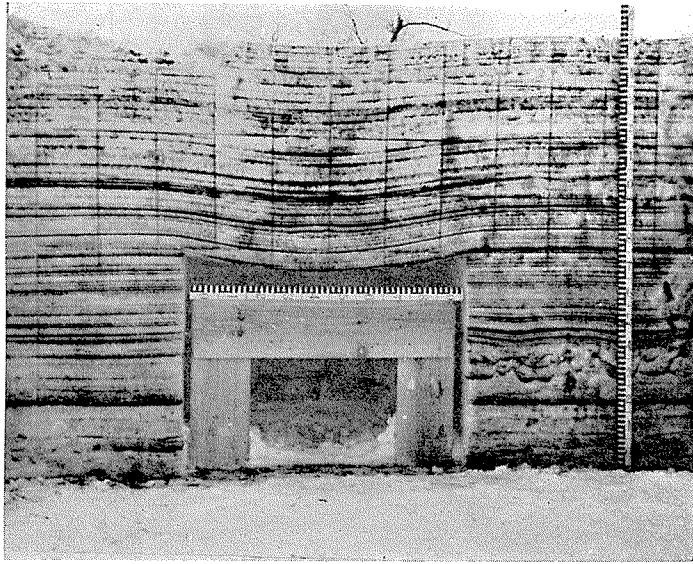
積雪中に水平な、奥行の長い雪洞を掘つた。雪洞の奥行に垂直な断面の切口は矩形で、矩形の底辺即ち雪洞の下面は地面になつていた。積雪層のうち、雪洞の天井よりも高い部分は、雪洞の屋根になつていたので屋根層、天井の高さよりも低い部分は、雪洞の壁になつていたので壁層と呼ぶことにする。雪洞上の屋根層は自重のためにたるみ、雪洞近くの壁層は雪洞ができた為に余分の荷重を受けて縮む。積雪層の密度及び粘性率は全層一様でなく、上層程小さく下層程大きい。若し、積雪層の密度、粘性率がともに全層に亘つて一様であれば、屋根層のたるみを密度及び粘性率の関数として表わすことは容易であるけれども、さもなければ、たるみを理論的に算出することは困難である。前の報告では、屋根層の密度、粘性率が均一である場合のたるみの式を導き、式に含まれている粘性率に、実測された粘性率のうちのどの値を代表値として代入すれば、たるみの実測値と合うかを調べた。又この理論式のある項については、その物理学的の意味のものを実測された粘性率であらわし、即ち、粘性率が高さの関数である場合に拡張して用い、よい結果が得られた。今度の報告でも屋根層のたるみについては同様の手段を使つた。しかし、このような修正法では、屋根層の中の歪或い応力の分布を理論的に求めることはできない。それで理論的には密度、粘性率が均一な場合の応力分布を求め、これと密度の分布の経日変化の測定値から得られた応力分布とを比較した。

### II. 観測結果

雪洞は1959年3月1日に掘り、矩形に整え、それから3月4日までの3日間にどれだけ変形したかを調べた。積雪深は3月1日には1 m 54 cm、4日には1 m 58 cmで、その間に積つた雪は、降水量になおして11.5 mmであつた。

第1図は3月4日に作つた断面の写真である。雪洞一ぱいに立ちふさがつている板は、雪

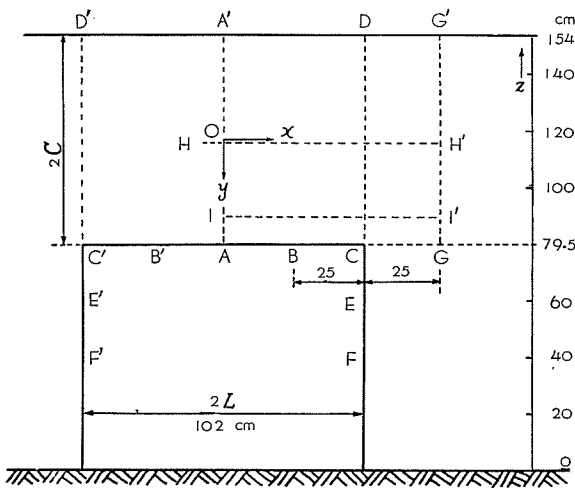
\* 北海道大学低温科学研究所業績 第531号



第 1 図 3 月 4 日に切つた雪洞の断面写真。縦横に入れてある線は 20 cm の間隔になっている。

洞の変形を調べるための基準にする枠として立てたものである。雪洞の断面はもともと 102 cm × 80 cm の矩形であつたものが、3 日後には写真にみられるような形になつたのである。雪洞の奥行は 3.5 m で、第 1 図にみられる断面は入口から約 2.3 m のところである。変形期間中、入口は雪の塊でふさぎ、外気温のえいきよの無いようにした。

**雪洞の変形** 雪洞の天井及び壁には目印としてトタン板を細く切つてさし込み、その移動を調べた。目印をつけたところは第 2 図の A, B, C, E, F, B', C', E', F' で、A は天井の中央、C,



第 2 図 雪洞断面模式図

C' は天井と壁との交点、B, B' は C, C' からそれぞれ 25 cm の距離にある天井の点、E, E' 及び F, F' は壁面にあり、E, E' は地面から 60 cm の高さの点、F, F' は地面から 40 cm の高さの点である。次に、これ等の点が 2.7 日間に生じた移動距離を示すと、A は 6.45 cm 下降、B, B' は 5.03 cm 下降且つ 9 mm 壁側に移動、C, C' は 1.5 cm 下降、E, E', F, F' の 4 点は平均して 0.25 mm 内側に張り出した。すなわち、壁の間隔が 0.5 mm 縮んだ。尚 E, E' は 8 mm 下降した。

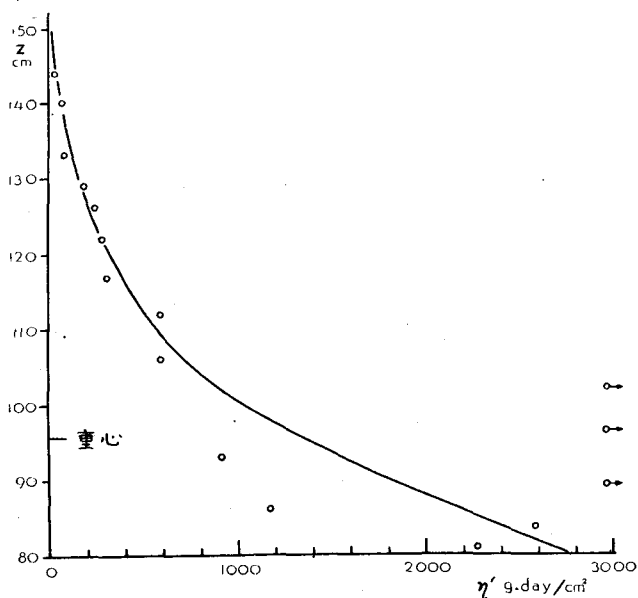
**縦粘性率の分布** 雪洞の変形を論ずるにあたって、積雪は非常に粘性率の大きいニュートン液体であると仮定する。そこで先ず積雪の持つ粘性率がどんな値であるかを知らなければならぬ。積雪の圧縮粘性率を小島の方法<sup>2)</sup>によつて求め、引張り粘性率もこれに等しいと仮定し、両者をまとめて縦粘性率と呼ぶことにした。小島の方法は次のような原理により、積雪の密度変化から求めるものである。平らな地面に積つた雪の層はその層より上に積つた雪の重さ  $w \text{ g/cm}^2$  で圧縮され、はじめ  $h \text{ cm}$  の厚さであつたものが、 $\Delta t$  日後に  $h + \Delta h \text{ cm}$  になる。そのため密度は  $\rho \text{ g/cc}$  から  $\rho + \Delta\rho \text{ g/cc}$  に変化する。この場合は、積雪の厚さが縮むだけで、水平方向にはひずみが生じないから、単軸ひずみの現象である。このとき、単位ひずみ速度当りの応力を  $\eta'$  とすれば

$$\eta' = -w \Delta t / (\Delta h / h) = -w \Delta t / (-\Delta\rho / \rho)$$

である。はじめ  $\rho_0$  であつた密度が  $t$  日後に  $\rho_1$  になつたとすれば、上式を積分して

$$\eta' = wt / (\ln \rho - \ln \rho_0) \tag{1}$$

を得る。注目する層の縦粘性率は、 $t$  日の間隔を置いて測つた密度の測定値がわかつておれば(1)式を使つて算出することができる。第3図は縦軸に屋根層の高さをあらわし、横軸にその層の縦粘性率  $\eta'$  を示してある。層の高さは日を追つて変化するので、3月1日における層の高さ



第3図 雪層の地面からの高さ  $z$  と縦粘性率  $\eta'$  との関係。矢印をつけた点は、 $\eta'$  の値が非常に大きくてこの図に入らない事を示している。実線は平均曲線である。

で示してある。これからも層の高さは3月1日の値を用いる。この図の中の黒点は、各層毎に測定された  $\rho_0, \rho_1$  の値と(1)式とから求めた  $\eta'$  を示している。非常にばらついた値をとつてい

る。積雪の粘性率は一般的な傾向としては上層程小さく、下層程大きいけれども、詳しくみれば、各層毎にその層の履歴に応じた $\eta'$ の値を持っているので、相接する二層のうちの上の層が下の層よりも大きな粘性率を持っていることがしばしばある。これからの計算には $\eta'$ のこのような詳細な分布よりは、全体としての傾向を用いることが多いので、 $\eta'$ のばらつきを平滑化した分布曲線を求め実線で示した。この平滑化のために次のような手続をとつた。先づ第4図(a)に示すように層の高さと、 $\rho$ の実測値から求めた $\ln(\rho_0/\rho_1)$ の値との関係をグラフにし、これ等の点を平均する滑らかな曲線を描いた。これによつて密度測定の際に含まれる確率誤差も平均されて消去された事になる。この滑らかな曲線によつて示される $\ln(\rho_0/\rho_1)$ の値を(1)式に代入して求めた $\eta'$ が第3図の滑らかな曲線である。以後は特にことわらない限り滑らかな曲線を使うことにする。

**天井のたるみ** 前々項で述べたように、2.7日間に下降した距離は、Aでは6.45 cm、C、C'の平均は1.53 cmであつたから、Cを基準にするとAの下降距離は4.92 cmである。1日当たり1.82 cm下つた事になる。雪洞の奥行は充分長いから第1図に示すような断面で起つている現象はこの断面に平行な別の断面でも同じように起つており、又、この断面に垂直な方向には全々変位が生じないと考えられるから、これから取扱う問題はすべて平面ひずみの問題である。それでこれからは第1図の断面に平行で、間隔が単位長さの2枚の平面で雪洞を切つたときに得られる雪の板を取扱うことにする。

前の報告では雪洞の真上の屋根層CC'D'Dを、両端で単純に支えられた梁とみだてて、次のような境界条件、即ちCD面及びC'D'面で働くせん断応力の合力はCC'D'Dの重さに等しい；CD面或はC'D'面に働く法線力の合力は零であり、曲げモーメントも零である；CC'面及びDD'面では法線力も接線力も共に零である、とゆう条件の下に密度 $\rho$ 、縦粘性率 $\eta$ が均一である場合の下降速度をあらわす式を理論的に導いた。AのCに対する下降速度 $v_{cA}$ は次式であらわされる。

$$v_{cA} = \frac{5}{24} \frac{W(1-\nu^2)}{\eta I} L^4 \left[ 1 + \frac{4}{5} \frac{C^2}{L^2} \left( \frac{12}{5} + \frac{\nu}{1-\nu} \right) \right] \quad (2)$$

但し $2C$ =屋根層の厚さ $=\overline{AA'}$ 、 $2L$ =雪洞の巾 $=\overline{CC'}=\overline{DD'}$ 、 $\nu$ =ポアソン比、 $W=2\rho gC$ =単位面積の地面上に積つた屋根層の重さ、 $I=\frac{3}{8}C^3$ =高さが屋根層の厚さに等しく単位長さの巾を持つ矩形の重心を通る水平軸のまわりの慣性モーメントである。縦粘性率 $\eta$ は次のように定義したものである。雪の柱に、柱の軸に平行な引張り応力又は圧縮応力 $\sigma$ だけが働き、軸に平行な面には全々応力が働かない単軸応力のとき、軸方向にひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が生ずるものとすれば、 $\eta=\sigma/\dot{\epsilon}$ で $\eta$ があらわされる。単軸応力の場合の縦粘性率 $\eta$ と、単軸ひずみの場合の縦粘性率 $\eta'$ との関係は

$$\eta = \eta' (1+\nu)(1-2\nu)/(1-\nu) \quad (3)$$

によつてあらわされる。ポアソン比さえわかれば、密度の測定によつて得られた $\eta'$ から $\eta$ を求めることができる。(3)式を(2)式に代入すると

$$v_{CA} = \frac{5}{24} \frac{W(1-\nu)^2}{\eta I(1-2\nu)} L^4 \left[ 1 + \frac{4}{5} \frac{C^2}{L^2} \left( \frac{12}{5} + \frac{\nu}{1-\nu} \right) \right] \quad (2')$$

を得る。

(2') 式の計算に当つて  $\nu=0.1$ ,  $C=37$  cm,  $L=51$  cm,  $W=20.8$  g/cm<sup>2</sup> とした。W の値は降雪毎に増えるので 3 日間の平均を用いた。

(2') 式中にある  $\eta$  の値としては、まず、屋根層の  $\eta$  の算術平均 706 g·day/cm<sup>2</sup> を使つた。こうして得られた  $v_{AC}$  は

$$v_{AC} = 2.41 \text{ cm/day}$$

である。実測値  $v_{AC}=1.82$  cm/day より大きい。

次に  $\eta$  の実測値をそのまま使つて (2) 式から  $v_{AC}$  を求めてみよう。(2) 式中の  $I$  の意味は上に述べた。又  $\eta I$  の物理的意味については前の報告でくわしく述べた。ここではただ  $\eta I$  は数値的には屋根層の  $\eta$  の値を横軸にとり、高さを縦軸にとつたときにできる平面図形の重心を通る水平軸のまわりの慣性モーメントであることに注意すればよい。 $\eta$  が一定なときの図形は矩形で  $\eta I=(2/3)\eta C^3$  となるが、 $\eta$  が第 3 図のように高さの関数であるときは  $\eta I$  は数値計算によつて求めればよい。重心の高さは第 3 図に示してある。 $\eta I$  の値は、いまの場合  $\eta I=9.03 \times 10^6$  g·day·cm<sup>2</sup> となる。この値を (2) 式に代入し、式中の [ ] 中の  $C$  としては重心から屋根層の底面、すなわち雪洞の天井までの距離 15.5 cm を用いて計算すると

$$v_{AC} = 3.83 \text{ cm/day}$$

となる。実測値  $v_{AC}=1.82$  cm/day のほぼ 2 倍である。

(2) 式は梁の両端を支点の上に加えた場合の式で、若し両端が固定されていれば、 $v$  の値はこの式の右辺の 1/5 倍になる。第 1 図からもわかるように、いまの場合は単なる支持でもなく、固定でもなく、その中間である。そのため、ほぼ 1/2 の係数が付いたものと思われる。前の報告ではこの係数を考える必要がなかつたのに、今回は考えなければならなくなつた理由はよくわからない。ただ、前の場合には下降速度が小さく、今度の 0.63 倍であつたから、梁の両端での応力も小さく、理論式を導いたときの境界条件に近かつたのであろう。この事は今後の研究を必要とする。

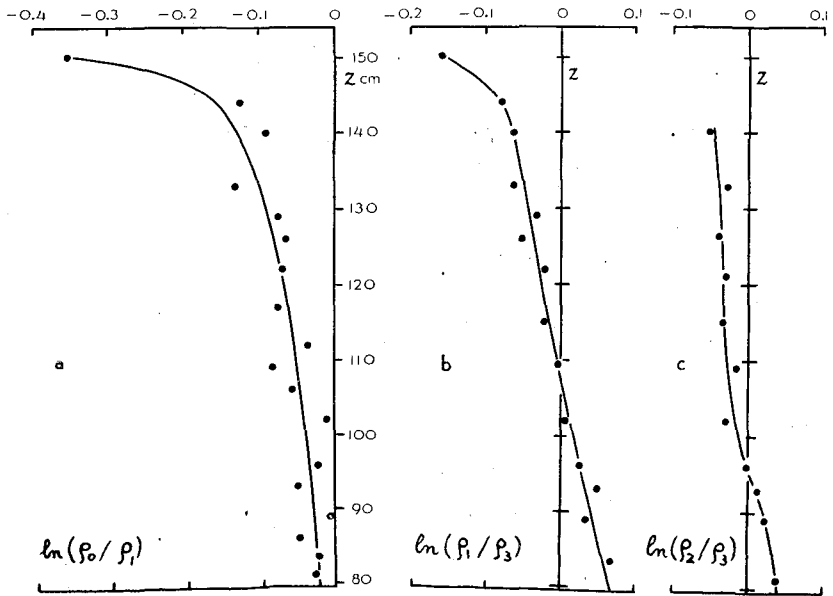
**屋根層内のひずみ及び応力分布** 積雪の鉛直断面を作つて、それにインクを噴霧器でかけ更にトーチランプであぶると、積雪層の縞がはつきりと現われる。水平な地面に自然に積つた積雪の層は水平で、縞も水平に現われる。積雪の層は上層の雪の重さで時間とともに縮むので、注目する 2 本の縞の間隔はせまきはなるが平行であることに変りない。しかし、雪洞の屋根層では、同一の層についても応力が場所によつて異なるから、縞の間隔が場所によつて違つてくる。第 1 図のような断面を作つて縞の間隔を調べ、もとの間隔と比較すれば上下方向のひずみを知ることができる。しかし、今回は、この断面を作つたとき、この目的に沿うような精度で縞の間隔を正確に測定してなかつたので、又降雪時の風の影響で縞の間隔は雪洞を掘る前にすでに平行でなかつた様子がみられたので、ひずみを 0.02 程度或はそれ以上の正確さで求めることは

困難であつた。ところが、密度の測定は割合に精度がよく、0.01 程度の誤差で測定できた。そこで3月4日、第1図に示した断面を作つたとき、第2図に示す鉛直線 AA', GG', 水平線 HH', II' 線上の密度分布を求めた。G 点は雪洞の壁 C 点から 25 cm の距離にあり、HH', II' はそれぞれ地上 115 cm, 90 cm の層である。雪洞を掘つた3月1日に別の地点で密度が求めてあるので対応する層の密度の変化を比較することによつて膨張度(体積の変化率)を求めることができる。膨張度は鉛直方向のひずみと水平方向のひずみとの和であり、鉛直方向の応力と、水平方向の応力との和の関数であるから、膨張度を求めてこれから主応力の和を求めることができる。

いま AA' の中点を O として、この点を通つて水平に x 軸をとり、鉛直下向きに y 軸をとることにする。

雪洞から充分離れていて、雪洞の影響のない地点で、3月1日に測定した密度を  $\rho_0$ 、3月4日に測定した密度を  $\rho_1$  とし、やはり3月4日に測定した GG' 線上の密度を  $\rho_2$ 、AA' 線上の密度を  $\rho_3$  とする。

ある積雪の密度が  $\rho$  から  $\rho'$  に変つたことは、体積が  $V$  から  $V'$  に変つたことを意味し、その間には  $\rho/\rho' = V'/V$  なる関係がある。この自然対数をとると、 $(V' - V)/V \ll 1$  の場合には



第4図 (a)  $\ln(\rho_0/\rho_1)$  と積雪層の地上高  $z$  との関係。

(b)  $\ln(\rho_1/\rho_3)$  と " "

(c)  $\ln(\rho_2/\rho_3)$  と " "

$\rho_0$ : 雪洞から充分離れた地点での雪の密度。 3月1日の測定値。

$\rho_1$ : " " 3月4日の測定値。

$\rho_2$ : GG' 線上の雪の密度。 3月4日の測定値。

$\rho_3$ : AA' 線上の雪の密度。 3月4日の測定値。

$$\ln(\rho/\rho') = \ln(V'/V) \doteq (V' - V)/V = \epsilon_x + \epsilon_y$$

となり  $\ln(\rho/\rho')$  は膨張度をあらわす。  $\epsilon_x$  と  $\epsilon_y$  とはそれぞれ  $x$  方向のひずみと  $y$  方向のひずみとをあらわしている。

第4図(a)には  $\ln(\rho_0/\rho_1)$  と雪層の地上高  $z$  との関係, (b)には  $\ln(\rho_1/\rho_3)$  と  $z$  との関係, (c)には  $\ln(\rho_2/\rho_3)$  と  $z$  との関係を示してある。  $\rho_0$  が  $\rho_1$  に変化する際には  $\epsilon_x = 0$  であるから (a) 図の  $\ln(\rho_0/\rho_1)$  は  $y$  方向のひずみ (正確には自然ひずみ)  $\epsilon_y$  をあらわしている。  $y$  方向の圧縮では各層毎に粘性率が不連続に変つているので, (a) 図に示されているように高さ  $z$  と  $\epsilon_y$  との関係は滑らかな曲線の上に乗らない。ところが(c)図は  $GG'$  線上の雪に対する  $AA'$  線上の雪の膨張度をあらわしており,  $\epsilon_y$  ばかりでなく,  $\epsilon_x$  も含んでいる。  $\epsilon_x$  は高さで不連続に変わることがないので (c) 図の測定点は割合に滑らかな曲線上に乗っている。(a) 図の値と (b) 図の値とを加えたものが  $\ln(\rho_0/\rho_3)$  で  $AA'$  線上の雪が3日間に生じた膨張度の分布を示す。又これから (c) 図の値を差引けば  $\ln(\rho_0/\rho_2)$  が得られ,  $GG'$  線上の雪が3日間に生じた膨張度をあらわす。A点のひずみについては別の測定があるから, こうして得られたひずみがどの程度の精度であるかをたしかめることができる。B, B' は2.7日間に真下に下降したばかりでなく, 各々9mm壁に近ずいているから,  $\overline{BB'}$  の長さは少なくとも  $9 \times 2 \text{ mm}$  だけ長くなっている。 $\overline{BB'}$  はもともと52cmであつたから,  $\overline{BB'}$  間の  $\dot{\epsilon}_x$  の平均は0.0128/dayであることがわかる。A点の  $\dot{\epsilon}_x$  はほぼこの値か, 或はこれより少し大きいであろう。A点で  $\sigma_y = 0$  であることは明らかであるから,

$$\dot{\epsilon}_y = \dot{\epsilon}_x \nu / (1 - \nu) \quad \text{【後出(4)式参照】}$$

が成立ち,  $\nu = 0.1 \sim 0.2$  を考慮すれば,

$$\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y = 0.0141 \sim 0.0154/\text{day}$$

となる。一方第4図の値を使つて  $[\ln(\rho_0/\rho_1) + \ln(\rho_1/\rho_3)]/3$  から  $\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y$  を求めると

$$\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y = 0.0157/\text{day}$$

となり, 上に求めた値とほぼ等しい。

$xy$  面に垂直な方向, 即ち雪洞の奥行の方向にはひずみを生じないと考えてよいから, 当面の問題は平面ひずみの場合に相当する。この場合には応力  $\sigma_x, \sigma_y$  とひずみ速度  $\dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y$  との関係は次式であらわされる。すなわち

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_x &= \frac{1}{\eta} [(1 - \nu^2) \sigma_x - \nu(1 + \nu) \sigma_y] \\ \dot{\epsilon}_y &= \frac{1}{\eta} [-\nu(1 + \nu) \sigma_x + (1 - \nu^2) \sigma_y] \end{aligned} \quad (4)$$

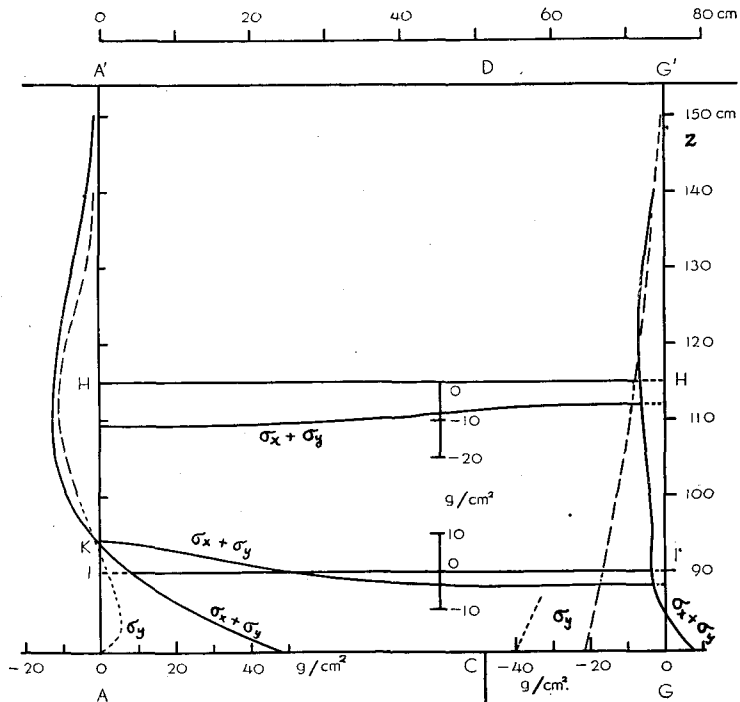
或は

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\eta}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [(1 - \nu) \dot{\epsilon}_x + \nu \dot{\epsilon}_y] \\ \sigma_y &= \frac{\eta}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [\nu \dot{\epsilon}_x + (1 - \nu) \dot{\epsilon}_y] \end{aligned}$$

である。これから膨張速度  $\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y$  と  $\sigma_x + \sigma_y$  との関係

$$\sigma_x + \sigma_y = \frac{\eta}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y) = \frac{\eta'}{(1-\nu)} (\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y) \quad (5)$$

を得る。3日間の膨張度  $\epsilon_x + \epsilon_y$  が第4図からわかるから、膨張速度  $\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y$  もわかり、(5)式により  $\sigma_x + \sigma_y$  が算出できる。第4図の(a), (b), (c)を組合せて  $\ln(\rho_0/\rho_2)$ ,  $\ln(\rho_0/\rho_3)$ を求めるとき、各々の測定値をそのまま使わないで、図に示してある滑らかな曲線を使った。又(5)式に含まれる  $\eta'$  の値も、第3図の滑らかな曲線を使った。これは応力分布の大概かみな傾向を知りたいからである。膨張度の値も、 $\eta'$  の値も、個々の層について得られた値をそのまま使えば、実際にその層に働いている応力を得ることができる。 $\epsilon_x$  は高さとともに連続的に変つても、 $\eta'$  の値は高さとともに不連続に変動するから、実際に積雪中で働いている応力も高さとともに不連続に変動することがわかる。これでは正確な応力分布がわかつて、全般的な応力分布の傾向を知ることはむずかしい。それぞれ上に述べたように平滑化した曲線を用いた。こうして得られた  $\sigma_x + \sigma_y$  の分布を第5図に実線で示した。AA', GG' 線上の応力については基準線の右側が正であり、II', HH' 線上の応力については基準線の上側が正である。AA' 線上では積雪にあらわれた縞の間隔を測つて  $\epsilon_y$  を求め、先に求めた膨張度  $\epsilon_x + \epsilon_y$  の値から  $\epsilon_x$  も得られるので(4)式を使つて  $\sigma_y$  を計算し、図上に破線で示した。前にも述べたように、縞の間隔から  $\epsilon_y$  を求め



第5図 雪洞の屋根層内の  $\sigma_x + \sigma_y$  の分布 (実線) 及び  $\sigma_y$  の分布 (破線又は点線)

するときの精度は非常に悪いから、 $\gamma'$  の大きな下層では測定  
の誤差が誇張されて  $\sigma_y$  にあらわれ、正しい値を得ることがで  
きなかつた。それで  $z=100$  cm よりも低い層については、測  
定値も考慮に入れて妥当と思われる  $\sigma_y$  の値を点線で示した。  
GG' 線上の  $\sigma_y$  は、その上に積つた雪の重さによるものと仮  
定して破線で示した。別に G 点附近の  $\sigma_y$  の値を点線で示し  
てあるが、これは G における  $\sigma_y$  の値を後に述べる別の方法  
で推定したものである。実線と破線との差は  $\sigma_x$  をあらわし、  
実線が破線の左側にある所では  $\sigma_x$  が負、すなわち圧力であ  
り、右側にあるときは張力である。AA' 線上で  $\sigma_x + \sigma_y$  の値  
が零になる K 点は、A 点から約 14 cm 上で、A 点から 15.5  
cm 上にある  $\gamma$  の分布の重心と一致していると考えてよい。  
 $\sigma_y$  もこの点で零になるものと考えられる。K 点よりも上層で  
は  $\sigma_x$  も  $\sigma_y$  も圧力であり、下層では張力になっている。GG'  
線上の応力分布をみると、ここでも未だ雪洞のえいきようが  
明らかにみられ、下半分では  $\sigma_x$  が張力として働いていること  
がわかる。

屋根層のうち、雪洞の真上の部分 CC'D'D が一つの均質  
な梁であり、両端で単純に支えられているものとすれば、そ  
の時の梁の内部応力はすでに前の報告に示されている。AA' 線上にあらわれる  $\sigma_x + \sigma_y$  及び  $\sigma_y$  は

$$\sigma_x + \sigma_y = \rho g \left[ \frac{2}{3} \frac{L^2}{C^2} x^2 y - \frac{1}{10} y + \frac{1}{2} \frac{y^3}{C^2} \right] \quad (6)$$

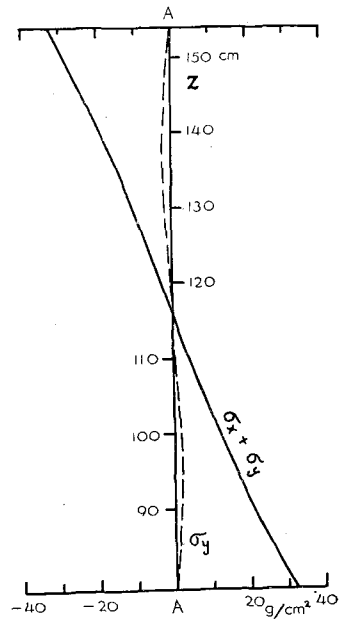
$$\sigma_y = \frac{\rho g}{2} \left( 1 - \frac{y^2}{C^2} \right) y$$

であらわされる。 $\rho$ ,  $C$  の値は (2) 式の計算に用いたものをそのまま使つて計算し、 $\sigma_x + \sigma_y$  及び  
 $\sigma_y$  の値を第 6 図に示した。実測によつて得られた第 5 図とは様子がずいぶん違つている。

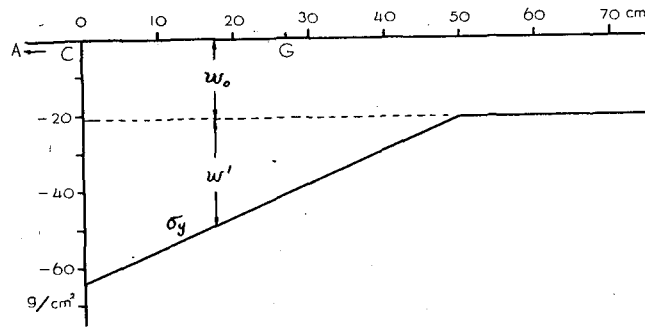
**CG 線上の応力分布** 前の報告では CG 線上の点の下降速度を測定し、この線上における  $\sigma_y$   
の分布を求めた。この報告では C 点、C' 点の下降速度がわかつているので、C 点における  $\sigma_y$   
と、CG 線上における  $\sigma_y$  の大体の減り方だけを求め、第 7 図に示した。C 点における下降速度  
を  $v$  cm/day とすれば、 $t$  日間の下降距離は  $vt$  である。これは壁層の積雪が圧縮応力を受けて  
縮むからである。この際雪洞の奥行に平行なひずみと壁面に働く応力とは共に零である。これは  
前に述べた単軸応力でもなく単軸ひずみでもない。この場合の縦粘性率を  $\gamma''$  とすれば

$$\gamma'' = \gamma(1-\nu^2) = \gamma'(1-2\nu)(1-\nu)^2$$

である。地上  $z$  cm のところにある厚さ  $\Delta z$  の壁層が雪圧  $-w(z)$  を受けて単位時間に縮む長さ  
 $-\Delta h$  は



第 6 図 屋根層の CC'D'D 部分が一つの均一な梁で、両端が単純に支えられているとき、AA' 線上に現われる  $\sigma_x + \sigma_y$  及び  $\sigma_y$  の分布の理論値。

第7図 CG線上における $\sigma_y$ の分布

$$\frac{\Delta h}{\Delta z} = \frac{w(z)}{\eta''(z)} = \frac{w(z)(1-\nu)^2}{\eta'(z)(1-2\nu)} \quad (7)$$

であらわされる。C点の下降速度 $v$ はC点の地上高を $z_C$ とすれば

$$v = \int_0^{z_C} \frac{\Delta h}{\Delta z} dz = \int_0^{z_C} \frac{w(z)(1-\nu)^2}{\eta'(z)(1-2\nu)} dz \quad (8)$$

である。地上高 $z$ の雪の層が上層の雪から受ける圧力 $w(z)$ は、近くに雪洞が無い場合に上層の雪から受ける圧力 $w_0(z)$ と、雪洞があるために余分に加わつた圧力 $w'$ との和である。即ち、 $w(z) = w_0(z) + w'$ である。したがつて(8)式は

$$v \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)^2} = \int_0^{z_C} \frac{w_0(z)}{\eta'(z)} dz + w' \int_0^{z_C} \frac{dz}{\eta'(z)} \quad (9)$$

と書き改められる。(9)式の右辺第1項は雪洞が無い場合にC点と同じ高さの点が沈下する速度 $v_0$ で実測されている。したがつて(9)式から

$$w' = \left\{ v \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)^2} - v_0 \right\} \int_0^{z_C} \frac{dz}{\eta'(z)} \quad (10)$$

が得られる。但し

$$v_0 = \int_0^{z_C} \frac{w}{\eta'(z)} dz$$

である。(10)式の積分は $\eta'(z)$ の分布がわかっているので計算できる。 $v = 0.567$  cm/day,  $v_0 = 0.236$  cm/day,  $\nu = 0.1$ を用いて計算するとC点では

$$w' = 42.2 \text{ g/cm}^2$$

であることがわかつた。 $w'$ の値はCからGにむかうに従つて減少する。ただし、屋根層CDD'C'の重さは両壁で支えているわけであるから、CG線上に分布している $w'$ の合力はCDD'C'の重さ $w_0(z) \times 2L = 20.8 \text{ g/cm}^2 \times 102 \text{ cm}^2$ の1/2に等しい。CからGに向うに従つて $w'$ が直線的に減少するものとすれば、 $w'$ が零になるのはC点から50.3 cmはなれた点になる。CG線上には $w'$ の外に $w_0(z_0) = -20.8 \text{ g/cm}^2$ の圧力が加わつているから $w_0 + w'$ を第7図に示した。この図によれば、G点での $\sigma_y$ は約 $-40 \text{ g/cm}^2$ である。

おわりに、この仕事に対し、御指導、御激励下さった吉田順五教授に厚くお礼を申し上げます。又この仕事のためにいろいろと便宜をお与え下さった北大演習林の関係者の方々に厚くお礼を申し上げます。なお、この研究は文部省の科学研究費によつておこなわれたものである。

#### 文 献

- 1) 大浦浩文 1958 雪洞の変形について. 低温科学, 物理篇, **17**, 65.
- 2) 小島賢治 1957 積雪層の粘性圧縮 III. 低温科学, 物理篇, **16**, 167.

#### Résumé

The snow cover was 1 m 54 cm deep. The cave was made in its lower half in the horizontal direction, the floor of the cave being the ground surface. The cave was 80 cm high, 1 m wide and about 3 m 50 cm long. The entrance of the cave was closed by thick snow blocks, that the open air temperature might not affect the temperature inside the snow cave.

The ceiling of the cave gradually bulged downward and the walls were contracted vertically, bulging inward slightly. A section across the cave is shown in Fig. 1. The section was made three days after the cave was made. For convenience, points and parts of the sections across the cave were named as shown in Fig. 2.

In the course of 2.7 days the centre of ceiling A descended 64.5 mm, the corner of ceiling C, C' descended 15 mm, the point of ceiling B, distance from C being 25 cm, descended 50.3 mm and moved 9 mm horizontally towards C. The interval between the part of wall EF and E'F' shortened by 0.5 mm.

In the previous paper, the velocity of descent of A relative to C was obtained theoretically under the following conditions. The part CC'D'D, the roof of the cave, was considered to be a plate of unit thickness,  $2L$  wide and  $2C$  high. The total tangential force acting across the two sides CD, C'D' of the part is the same as the total weight of the part. The resultant of forces acting across each side of the part should have no bending couple and no horizontal component. The upper and lower edges of the part are free from the force. The calculated velocity was found to be close to the observed velocity in the previous paper. But in the study described in this paper, the calculated velocity is found to be as large as twice the observed one. The source of this discrepancy between observed value and calculated one is considered to be in the difference between the conditions at CD and C'D' assumed in calculation and the real condition. For instance, if the descending velocity is calculated under such condition that the sides CD and C'D' are fixed firmly, the calculated value may be as small as  $2/5$  of the observed one. In conclusion, the real state is considered to be intermediate between the two assumed conditions.

The change of density of snow layer is caused by the change of volume. Therefore one can know the dilatation of snow by measurements of density. Let  $x$ -axis be taken horizontally and  $y$ -axis vertically as shown in Fig. 2. In the case of plane strain, there

is a relation between the rate of dilatation  $\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y$  and the sum of normal stress  $\sigma_x + \sigma_y$ , that is

$$\sigma_x + \sigma_y = \frac{\eta}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y).$$

Thus the sum  $\sigma_x + \sigma_y$  is obtained by measurements of densities of snow as is shown in Fig. 5 by full line. On the line AA', it must be remarked that the sum  $\sigma_x + \sigma_y$  becomes zero at K which seems to be the location of the centre of gravity of the distribution of viscosity  $\eta$  shown in Fig. 3.

When coloured water is sprinkled over the vertical section of snow cover, many stripes appear vividly as shown in Fig. 1. By measuring the change of the distance between the stripes, one can obtain the strain in  $y$  direction  $\varepsilon_y$ . As the dilatation  $\varepsilon_x + \varepsilon_y$  and the strain in  $y$  direction  $\varepsilon_y$  are known, the strain in  $x$  direction  $\varepsilon_x$  and then the stress in  $y$  direction  $\sigma_y$  can be calculated.  $\varepsilon_y$  was not measured accurately, therefore  $\sigma_y$  calculated from it is not accurate. In Fig. 5, values of  $\sigma_y$  are shown by broken line. The more ambiguous parts are shown by dotted line. The difference of full line  $\sigma_x + \sigma_y$  and broken line (or dotted line)  $\sigma_y$  represents  $\sigma_x$ . It is easily found that even on the line GG' which is more distant from the cave than the line CD there is a horizontal component of resultant force and a bending couple. By use of the measurements of descending velocity of C and the distribution of  $\eta$  in wall layer,  $\sigma_y$  at C can be calculated. In Fig. 7, the approximate distribution of  $\sigma_y$  on line CG is shown.