

## 雪えくぼのパターン形成 I

納 口 恭 明\*

国立防災科学技術センター雪害実験研究所

### Formation of Dimple-Pattern on Snow I

By

Yasuaki Nohguchi

*Institute of Snow and Ice Studies,*

*National Research Center for Disaster Prevention, Nagaoka, Niigata-ken, 940*

#### Abstract

If, after snowfalls, air temperature rises higher than  $0^{\circ}\text{C}$  or rain falls on a snowcover, a number of dimples with regular intervals sometimes appear on the surface of the snowcover, which was even at first. In Nagaoka, the formation of such dimple-pattern on snow can be observed several times every winter.

To know the mechanism of the formation of the pattern its observation was carried out in 1983 and 1984 winter, Nagaoka. As a result, it was found that whenever the pattern appears a water-saturated layer always exists within new snow layers near the snow surface, and that the snow layers are folded.

The folds suggest that the formation of this pattern is related to elastic instability of snowcover with saturated layer in the initial stage.

#### 1. 序 論

降雪のあと、雨が降ったり、あるいは日射のために表面からの融雪がさかんになると、雪面に、点状に分布する無数のくぼみが現われてくることがある。このくぼみ模様は「ゆきえくぼ」(大沼, 1959)と呼ばれており、温暖多雪な北陸地方では、ひと冬をとおしてしばしば発生する。また北海道のような寒冷地では、冬のはじめの頃や、融雪期に現われること

---

\* 第1研究室

がある。

このくぼみの部分の下は浸透水の下方への通路（「水みち」と呼ばれる）となっており、このためこの部分の雪だけが局所的にざらめ雪に変化し、積雪全体としては雪質の非一様な分布（空間パターン）が形成される（納口，1983）。

このような、雪えくぼ発生にともなう水みちの形成は、積雪中の融雪水（雨水を含む）の、底面への急速な流下を促し、ひいては全層なだれ発生の誘因のひとつとなることも考えられる。

これまでのところ雪えくぼに関する本格的な研究はほとんどなく、そのパターン形成の機構についての説明はまだなされていない。本論文では、雪えくぼの基本的な特徴を整理するというを目的として、新潟県長岡市の雪害実験研究所付近のほか県内数ヶ所でおこった雪えくぼの観察結果を報告するとともに、その発生の過程ならびに発生の機構についての考察をおこなう。なお、雪えくぼの形成に関する理論的な考察、ならびに実測との比較については「雪えくぼのパターン形成Ⅱ」（納口，1984）でおこなう。

## 2. 雪えくぼの発生状況

本報告の観察は1982～1983年と1983～1984年の2冬期のものである。場所は雪害実験研究所構内の他、近くの野球場や圃場、それに新潟県内の数ヶ所（上越市・守門村・六日町など）である。

この地方の冬の天気の特徴は、冬型の気圧配置が強まると多量の降雪をもたらす一方で、それが数日続いた後に冬型がゆるむと暖気となり、雨が降ったり、気温の上昇にともなう表面からの融雪が促進される期間がやってくることである。この繰り返しが、いわゆる降雪期とみなせる1・2月に数回やってくる。雪えくぼは、ほとんどこのひとつひとつのサイクル毎に発生する。

図1は、雪害実験研究所における雪えくぼの発生日（矢印）と日平均気温・降雪の深さを示している。図中のa, b・・・はひとつのサイクル毎につけた降雪の名前である。雪えくぼは、ほとんどそれぞれの降雪に対応して発生しているのがわかる。これら2冬期合計して、雪害実験研究所において16回の雪えくぼの発生が確認できた。

## 3. 観察結果

### 3.1 雪えくぼの空間パターン

写真1は平地にできた雪えくぼの写真である。くぼみは点状に分布しており、またそれらのくぼみがしわ状に連結した2次元のパターンとなっている。

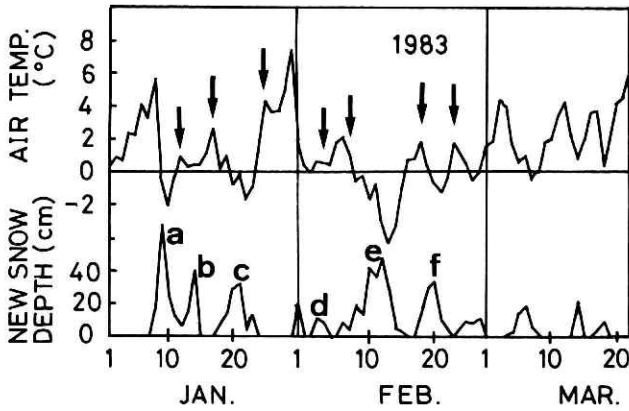


図 1.1 雪えくぼの発生(矢印)と日平均気温・日降雪深(長岡).  
 Fig. 1.1 Occurrence of dimple-pattern (arrow), air temperature, daily new snow depth (Nagaoka).

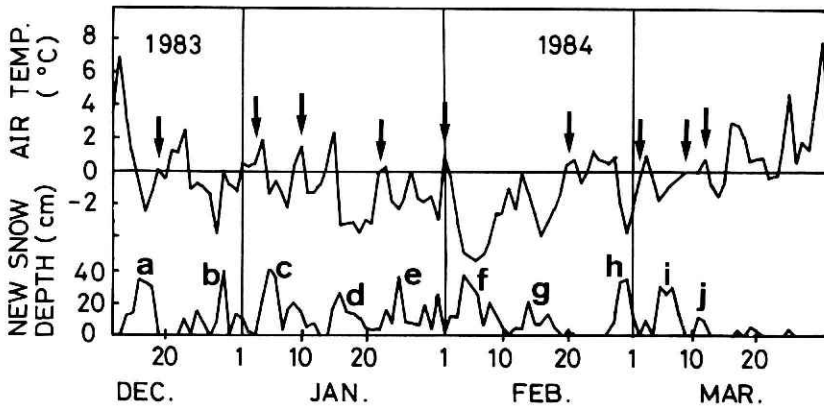


図 1.2 雪えくぼの発生(矢印)と日平均気温・日降雪深(長岡).  
 Fig. 1.2 Occurrence of dimple-pattern (arrow), air temperature, daily new snow depth (Nagaoka).

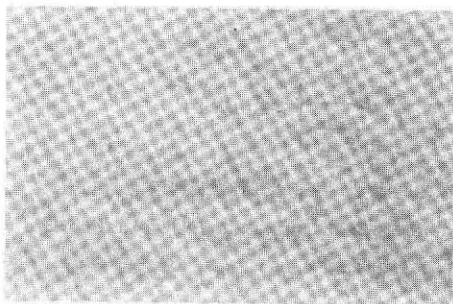


写真 1 平地積雪に発生した雪えくぼ.  
 Photo. 1 Dimple-pattern on a plain.

ラムゾンデを用いて平地の雪えくぼのパターンを示したのが図2と図3である。雪えくぼが発生してしばらくすると、くぼみの下の雪はざらめ雪に変化する。ラムゾンデの貫入抵抗は雪質のちがいによって変化する。したがってラムゾンデを、平面上を一定の格子間隔で雪面から落下させると、その貫入の深さのちがいによって雪えくぼの空間パターンを知ることができる(納口, 1983)。

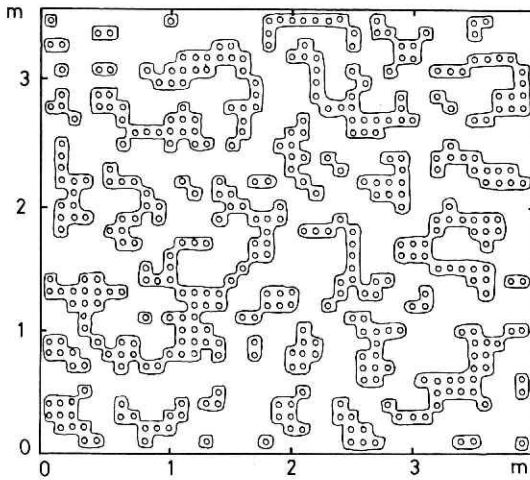


図2 雪えくぼの2次元パターン(納口, 1983)。白丸印の点はラムゾンデの貫入量は小さい。この下にはしまり雪がある。

Fig. 2 Two-dimensional pattern (Nohguchi, 1983). The open circles represent the points where ramsonde was prevented by settled snow from penetrating more deeply.

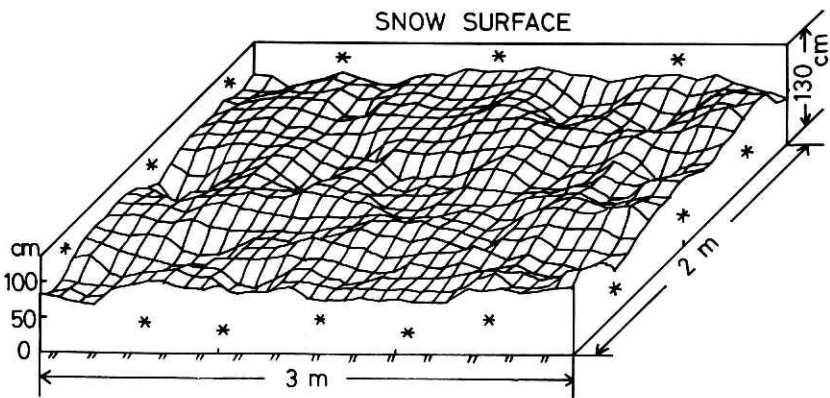


図3 雪えくぼ形成時のラムゾンデの貫入量の2次元パターン(長岡1983年2月17日)。

Fig. 3 Two-dimensional pattern of penetration depth of ramsonde (Nagaoka, Feb. 2, 1983).

つぎに、特殊な例であるが、自然の作用で雪質のちがいにともづく雪えくぼの空間パターンが見えるようになったものを写真2に示す。これは、1984年2月20日に形成された雪えくぼが、その後の大量の降雨に加えて、強風の作用のために表面近くの雪がとり除かれ、その結果として、内部の粒径の大きなざらめ雪の部分が黒っぽいパターンとして現われたものである。このパターンは、2月27の朝に現われたが、続く降雪hのためにすぐに見えなくなってしまった。

これからもわかるように、平地上の雪えくぼの点状のパターンは、孤立したものではなくて、なんらかの形で互いに連結したような構造をしている。

平地の積雪にこのような点状のくぼみのパターンができるとき、斜面上の積雪表面には最大傾斜方向を向いた線状のくぼみのパターンが形成される(写真3)。このような線状の1次元パターンに対しては、「ながれえくぼ」(大沼, 1959)とか「波状雪」(高橋, 1940)とか“Dendritic Pattern”(Gerdel, 1954)といった呼び名があるが、本論文では、すべて雪えくぼと呼ぶことにする。

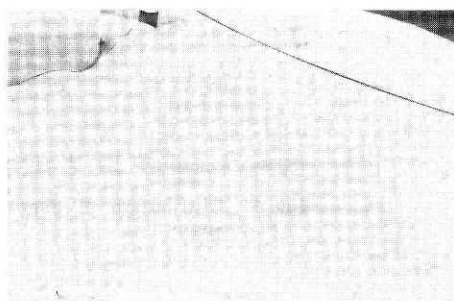


写真2 雪えくぼのパターン。  
Photo. 2 Dimple-pattern.

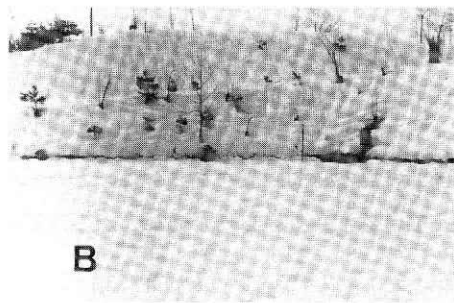
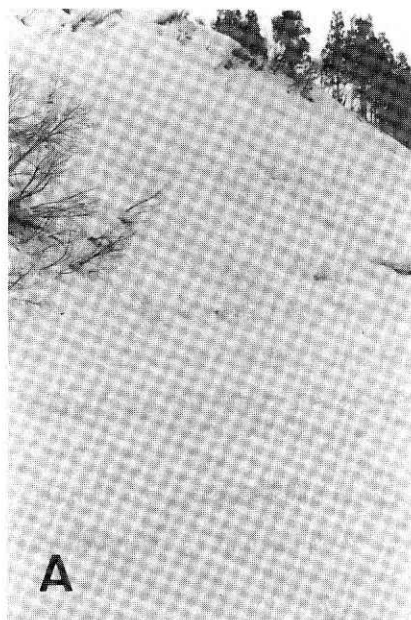


写真3 斜面積雪上のパターン (A:小出, B:長岡).  
Photo. 3 Pattern on a slope.

### 3.2 くぼみの空間分布

雪えくぼのパターンは、その発生場所が平地であるか斜面であるかによって点状の2次元パターンと線状の1次元パターンが出現するが、そのくぼみの空間分布についての観測結果を次に示す。

図4は1983年の降雪aのあとに発生した雪えくぼのくぼみの点の空間分布である。

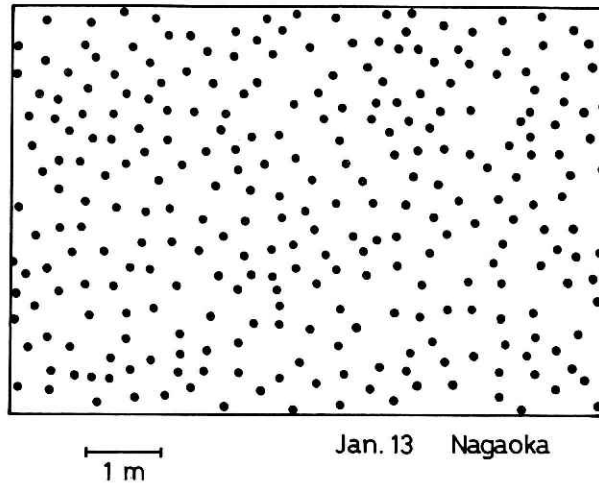


図4 平地積雪におけるくぼみの空間分布(長岡1983年1月13日)。

Fig. 4 Distribution of dimples on plain (Nagaoka, Jan. 13, 1983).

一般に点の空間配置パターンは、その点の間の相互作用に応じてポアソン型、規則型、集中型の3通りに分けられる(種村他, 1981)。ポアソンパターンは点が互いに独立にどの地点にも同一の生起確率で出現するときの生起された点の配置パターンで、点の間に相互作用がまったく働かない場合のものである。規則型配置は点どうしが互いに近づくことを避け合うような相互作用が働く場合で、各点が一定の距離を保った配置パターンである。集中型配置は点どうしに引き合う作用が働く場合で、ところどころに点が集中するような配置パターンとなる。

図4の点の空間配置パターンは、どちらかという、ある間隔を保つような分布のしかたをしている。これを見るために、点の空間配置パターンの集中度指数  $I_d$  (森下の指数)

$$I_d = q \frac{\sum_{i=1}^q n_i (n_i - 1)}{N (N - 1)} \quad , \quad N = \sum_{i=1}^q n_i \quad (1)$$

を求めた ( $n_i$  は  $q$  個の等面積区画における各区画内の点の数)(図5)。  $I_d = 1$  の場合は

ポアソンパターンであり、 $I_d < 1$  の場合は規則型、 $I_d > 1$  の場合は集中型である。

この場合は、明らかに規則型であることがわかる。すなわち、雪えくぼの各くぼみは互いにある一定の間隔を保つように分布していることになる。

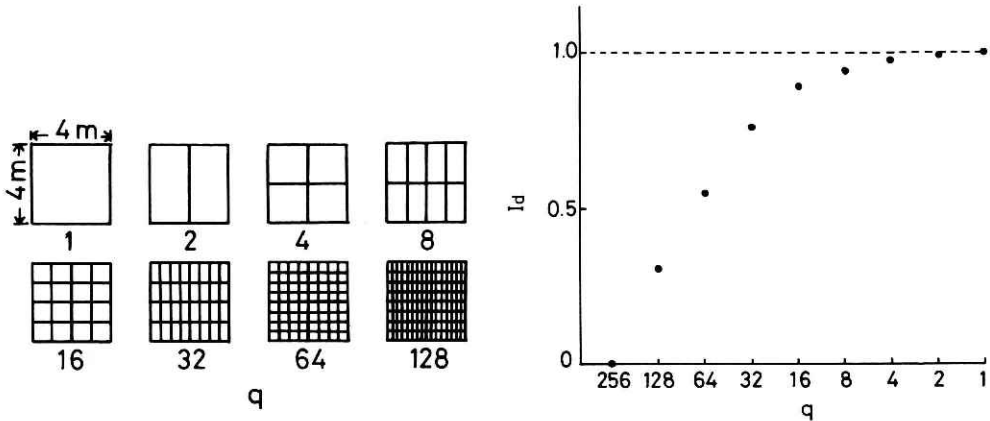


図5 空間の分割と森下の集中度指数。  
Fig. 5 Division of space and Morisita's index.

つぎに斜面上に発生した線状の1次元パターンのくぼみの間隔の頻度分布の例（1984年3月2日長岡，1984年3月23日八海山スキー場）を図6に示す。斜面の勾配は約15°ある。くぼみの発生が互いに独立である場合、その間隔の分布は指数分布

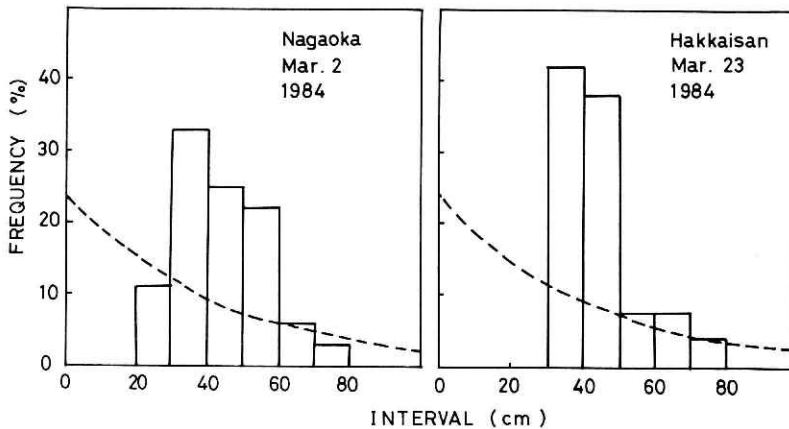


図6 斜面上のくぼみの間隔の頻度分布（長岡1984年3月2日と八海山スキー場1984年3月23日）。破線は指数分布。

Fig. 6 Frequency distribution of intervals of dimples on slope (Nagaoka, Mar. 2, 1984 and Muikamachi, Mar. 23, 1984). The broken line represents exponential distribution.

$$f = \frac{1}{\bar{x}} \exp\left(-\frac{x}{\bar{x}}\right) \quad (2)$$

となる ( $x$  はくぼみの間隔,  $\bar{x}$  はその平均値). 図中の破線は, この指数分布を比較のために記入したものである. この1次元パターンの場合も, 当然くぼみの間隔はある一定の距離を保つような分布となっていることがわかる.

以上から, 雪えくぼのくぼみのパターンには, 1次元にしる2次元にしる, ある一定の「波長のようなもの」(完全に周期的なパターンであるという意味ではなく, しまつたことでたらめという意味でもないようなもの) が存在するといえる.

### 3.3 くぼみの波長

雪えくぼの波長らしきものの大きさは, 同時期に発生した雪えくぼに関してはかなり広い空間スケール(少なくとも km のオーダー以上) にわたってほとんど同程度であるが, 同じ場所にあっても異なった時期に発生した雪えくぼに関しては, その波長は一般に異なる値となる. これは雪えくぼの波長が, それが発生した時の積雪の状態と何らかの形で密接に関係しているからに他ならない.

写真4は, 雪害実験研究所に現われた比較的波長の長い雪えくぼ(A: 1983年12月21日撮影)と波長の短い雪えくぼ(B: 1983年1月13日撮影)の例である. また, 図7は1983年の降雪eの後にできた長い波長の雪えくぼと, その次の降雪fの後にできた短い波長の雪えくぼの雪面形を示したものである.

いま, くぼみの点状の2次元パターンに対して, その単位面積当りのくぼみの数(くぼみの空間密度)の逆数の平方根を雪えくぼの波長と呼ぶことにする. また, 線状の1次元パターンに対しては, その平均間隔を波長と呼ぶことにする. これらの値は, 測定する領域が小さいほどばらつきは大きくなるのではあるが, くぼみの個数が10個程度の領域をとれば, 個

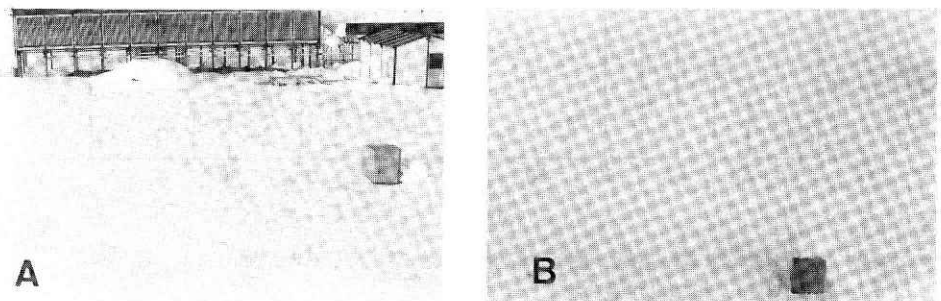


写真4 波長の長い雪えくぼ(A)と波長の短い雪えくぼ(B).

Photo. 4 Long wavelength pattern (A) and short wavelength pattern (B).



数のばらつきも1・2個程度となる。

表1は、雪害実験研究所構内とその他の数ヶ所で観測した平地積雪の雪えくぼの波長を示したものである。これからもわかるとおり、形成される雪えくぼの波長は、同じ場所でも、発生時ごとに異なる大きさとなり、その範囲は数cmから1m以上にまでわたっている。

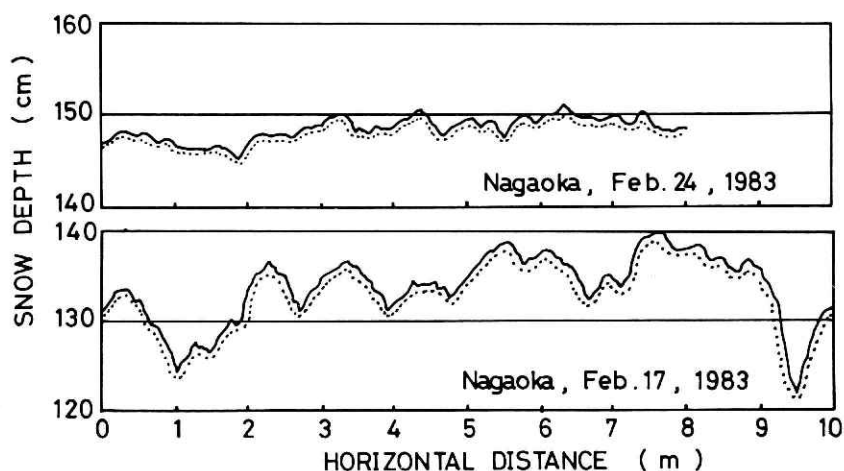


図7 波長の短い雪えくぼ（長岡1983年2月24日）と波長の長い雪えくぼ（長岡1983年2月17日）の雪面の凹凸。

Fig. 7 Short wavelength pattern (Nagaoka, Feb. 24, 1983) and long wavelength pattern (Nagaoka, Feb. 17, 1983).

表1 平地積雪における雪えくぼのくぼみの空間密度と波長。

Table 1 The number of dimples per 1 m<sup>2</sup> and wavelength.

発 生 日	場 所	空間 密度 m <sup>-2</sup>	波長 cm	発 生 日	場 所	空間 密度 m <sup>-2</sup>	波長 cm
1983年1月12日	長岡	6.4	40	1983年2月23日	長岡	15	26
" 1月17日	"	2.7	61	1984年1月8日	上越	1.3	88
" 1月24日	"	22	21	" 1月10日	長岡	0.88	107
" 2月3日	"	2.0	71	" 3月2日	"	5.9	41
" 2月7日	"	434	4.8	" 3月12日	"	15	26
" 2月16日	守門	6.2	40	" 3月22日	六日町	5.1	44
" 2月23日	長岡	1.3	88				

### 3.4 くぼみの発生と成長

数10センチメートル以上の波長の雪えくぼの場合、その発生は、条件のいいとき（光が陰影をつける場合）でも、少なくとも雪面の凸凹が1cm以上にならなければ判別できない。したがって、雪えくぼが発生した時間を雪面の目視から厳密に知ることは困難である。しかし、その発生はかなり突如として起ることは確かである。1983年2月23日に発生した雪えくぼの例では、降雪のeのあとの暖気でこの日は朝から小雨が降っていたが13:00までは雪えくぼはまったく現われていなかったが、13:30には周囲一面にくぼみが発生した。その後くぼみの凹凸は大きくなり14:30には数cmに達してほぼ安定した。またこの間、くぼみの波長等、空間パターンには変化はなかった。

一般に、雪えくぼの発生はかなり瞬間的な現象である。ただし、その凸凹の成長はゆっくり進むために雪えくぼのパターン形成自体もゆっくりした現象のような錯覚をもちかねない。むしろ、雪えくぼのパターン形成と、くぼみの成長とを別の現象として考えるのがよい。

いったん形成された雪えくぼの波長は、くぼみの成長中に変化することはないが、一見、波長が長くなるような場合も時々現われることがある。しかし、これは別の機構であり、それについては後述する。

### 3.5 積雪の内部構造

雪えくぼの発生直後に積雪の断面を観察すると必ず浸透水によって飽和した帯水層を発見する。そして積雪はこの層を中心として、雪面の凸凹と同じパターンをもって褶曲しているのがわかる（写真5）。またこのとき、その褶曲がおよんでいる厚さは、積雪層全体ではなく、帯水層の近くの層に限られている。

くぼみの直下の部分、すなわち帯水層のもっとも低いところでは、この層に沿って流れてきた水が集中しており、その保水能力を越えたところで下方へと浸透している。ときには水の集中で、この層が破壊されているような場合もある（写真6）。

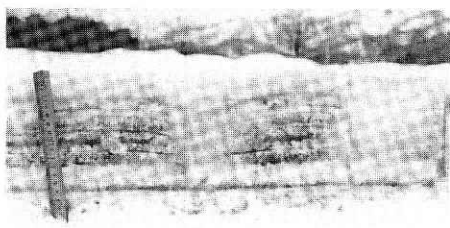


写真5 雪えくぼ発生時の積雪の断面。  
Photo. 5 Vertical section of snow cover.

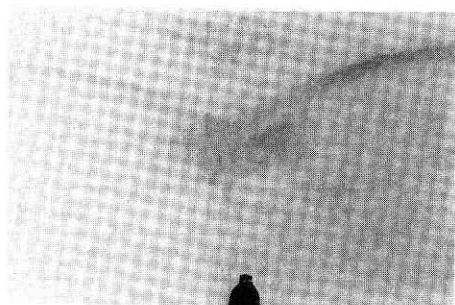


写真6 積雪内の帯水層と水みち。  
Photo. 6 Water saturated layer.

水につかった部分はやがてざらめ雪に変化する。このざらめ雪への変化は雪えくぼの形成後しばらくしてからである。写真7は、1983年1月12日発生 of 雪えくぼについて、その内部のざらめ雪を示したものである。

以上から、雪えくぼの発生には帯水層の存在が必要条件であり、その発生初期には、褶曲を生み出すような、なんらかの変形が関与していることがわかる。また、くぼみの発達は、水の集中や、そこの雪のざらめ化によってもたらされることがわかる。

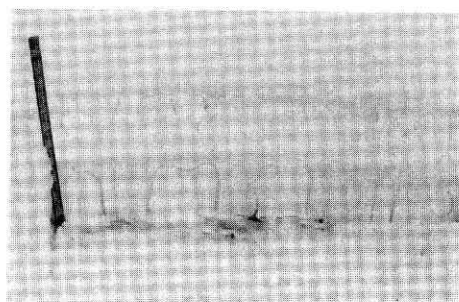


写真7 積雪の内部の構造。

Photo. 7 Granular snow within snowcover.

### 3.6 地形の凹凸の影響

地面に凹凸があれば、その上に積った新しい積雪層にも相応な凹凸が存在することになる。しかし積雪が深くなればその凹凸はだんだん小さくなるし、また降雪中にある程度の風があると雪面の凹凸は肉眼ではまったくわからなくなることがある。

一見、平らに見える雪面上に、雪えくぼの発生によって地形のパターンが浮び上がることがしばしば観察される。写真8は畑の畝が雪えくぼの発生により雪面上に浮き出てきた例である（A：1983年1月25日松之山，B：1983年12月21日長岡）。点状のくぼみは畝の間の溝に沿って発生しており、その点を結ぶように一本のしわがその上を走っている。

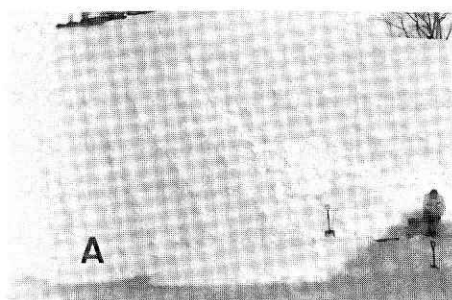


写真8 畑の畝の間の溝に沿って現われたくぼみ（A：松之山，B：長岡）。

Photo. 8 Dimple-pattern on troughs in field.

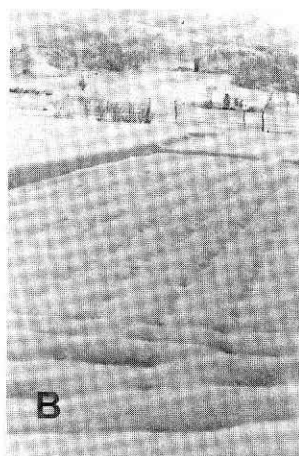


図8に溝上のくぼみの間隔の頻度分布を示す。これは、1983年12月21日雪害実験研究所近くの圃場で測定したもので、溝は秋耕のさいに田圃につけられたものでその間隔は130 cmであり、雪えくぼ発生時の積雪の深さは約60 cmである。図中の破線は指数分布を仮定した場合であり、これと比較すると点の分布には、前述のとおりある一定の波長が存在するのがわかる。

雪えくぼの一冬期の観測中には、発生した雪えくぼの凹凸が次の新しい降雪の始まりまでなくなってしまう場合もあるが、ときには残ってしまって次の雪えくぼの発生に影響を与える例もある。

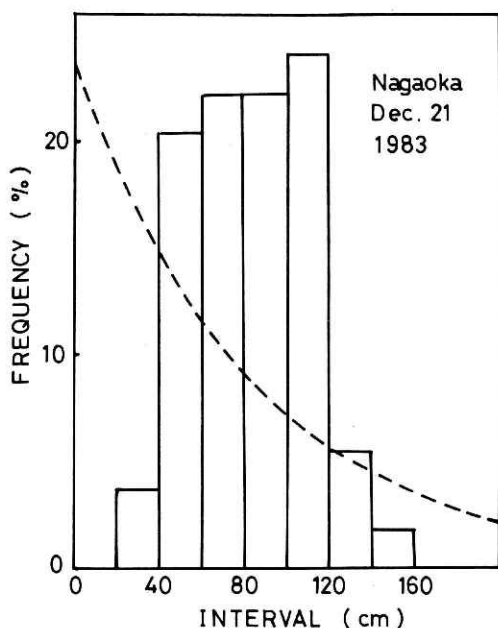


図8 畑の畝の間の溝に沿って発生したくぼみの間隔の頻度分布(長岡1983年12月21日)。破線は指数分布。

Fig. 8 Frequency distribution of intervals of dimples along a trough (Nagaoka, Dec. 21, 1983). The broken line is exponential distribution.

1983年1月12日に発生した雪えくぼは、それが消える前に次の降雪があり1月17日に新たな雪えくぼが発生した。図9はこのときの積雪の断面を示している。最初の雪えくぼは波長が40 cmであったのに対して次の雪えくぼの波長は61 cm(表1)となっており、2番目の雪えくぼの方がくぼみの数は少ない。実際、新しくできたくぼみの下には、最初にできたくぼみがあるが、古くからあったくぼみのところにすべて新しいくぼみが発生してはいない。

以上の例が示すように確かにくぼみの発生位置に関しては地形の影響を受けている。しかし、地形のパターンがそっくりそのまま雪えくぼのパターンとなって現われるのではない。実際、畝の例のように、畝の間の溝に沿う点状のくぼみに相当するくぼみが溝についているわけではないし、また逆に古い雪えくぼの例のように、すべての古いくぼみ上に新しいくぼみができるわけではない。したがって地形のパターンは何らかの取捨選択の機構が介在した

結果として雪えくぼのパターンとなって現われると考えるのが妥当である。

この意味から、一見、完全に平らな地面上の雪えくぼのパターンにしても、いろいろな波長の微視的なゆらぎがこの取捨選択の結果として現われたものと考えべきである。

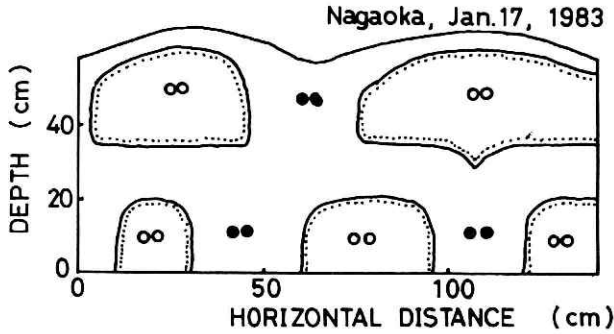


図9 雪えくぼ発生時の積雪断面（長岡1983年1月17日，白丸印はしまり雪・黒丸印はざらめ雪）。下層の雪えくぼは12日に発生した。

Fig. 9 Vertical section of snowcover (Nagaoka, Jan. 17, 1983). The dimple-pattern of upper layer occurred on Feb. 17, and that of lower layer occurred on Feb. 12.

### 3.7 2重周期の雪えくぼ

3.4 では雪えくぼの波長は発生後、一定で変化しないと述べたが、一見、波長が長くなるような例がときどき見られた。これは、はじめ短い波長で発生したくぼみのうち、時間がたつにつれて、そのうちのいくつかのくぼみだけがさらに大きく成長して長い波長の雪えくぼとなり、結果的に2重周期的な構造となったものである。

写真9は1983年2月17日雪害実験研究所構内で撮影した2重周期の雪えくぼの断面であり図10はそのときの雪質と密度を示したものである。はじめ密度の小さな上層内で波長の短い凹凸が発生した。やがて浸透水はこの層を越えてその下のところに帯水層を形成した。このときその下の層に波長の長い凹凸が現われてきた。この層は上の層よりしまっていて密度は大きい。

これと同じ例は1984年1月8日上越と1984年1月10日長岡でも観察された。

このような過程で、同時に2つの周期の雪えくぼが現われたのはこの3例だけであるが、長波長の雪えくぼが現われるまえに、はじめの短波長の雪えくぼが短時間で消失したりすることも考えられるから、このような過程は実際上あまりめづらしくないものと思われる。また、原理的には2重周期よりもっと多い多重周期の雪えくぼも考えられるが、これまでの観察例にはない。

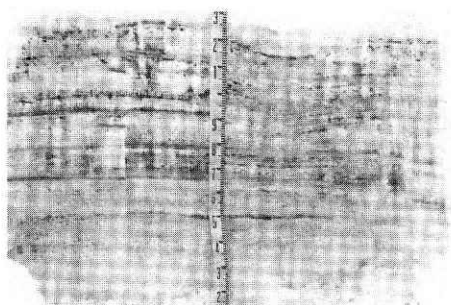


写真9 2重周期の雪えくぼの積雪断面。

Photo. 9 Vertical section of snowcover with doubly periodic dimple-pattern.

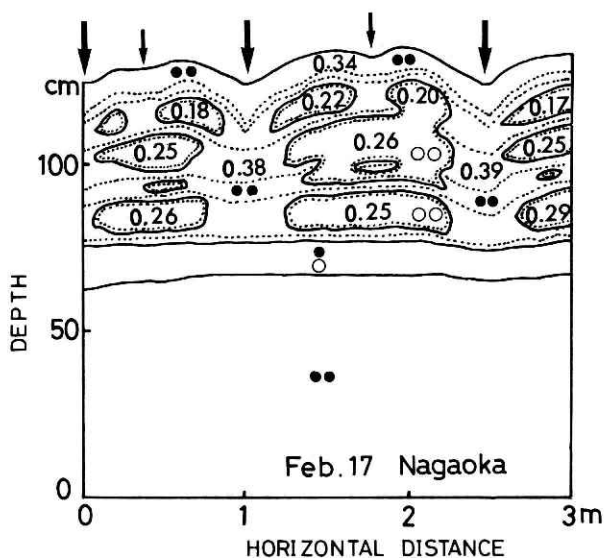


図10 2重周期の雪えくぼの断面 (大きい矢印は大きいくぼみ・小さい矢印は小さいくぼみ), 数字は密度( $g/cm^3$ )を表わす。

Fig. 10 Vertical section of doubly periodic dimple-pattern. The numbers represent snow density ( $g/cm^3$ ).

上記の機構以外で2重周期の雪えくぼが形成された例を次に示す。1984年の降雪jのあとに発生した雪えくぼは発生のはじめから2重周期的なパターンをしていた。そして時間の経過につれて長波長の成分がより鮮明になってきた。この長波長成分は、実はそれ以前の降雪iのとき発生した雪えくぼの影響を受けたパターンである。しかもこのときのくぼみは水の供給が少なく凹凸は小さかったのだが、新しい雪えくぼの発生により、水がこの古い水みちにまで供給され、その結果、時間の経過につれていっそう鮮明になったのである。

2重周期の雪えくぼが形成されるこれら2種類の過程を模式的に図11に示す。

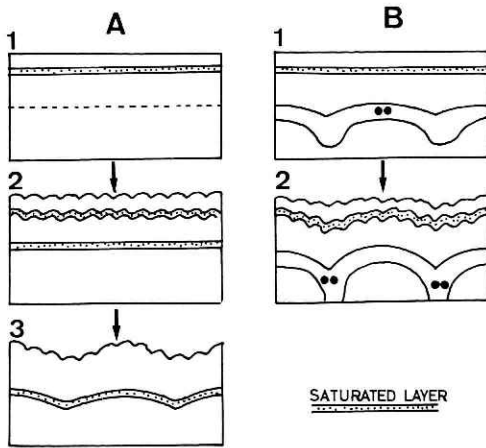


図11 2重周期の雪えくぼが形成される2通りの過程.

Fig. 11 Two kinds of process of the formation of doubly periodic dimple-pattern.

### 3.8 特殊な例

舗装道路や建物の屋上などに数cm程度の新雪が降った直後に雨が降ると写真10のような気泡をもったパターンが出現することがある。これは1983年12月6日長岡における例であるが、他に1983年2月6日柏崎でも同様の現象を観察した。

これらは、形のうえからは雪えくぼと呼ぶにはふさわしくないものではあるが、しかしそのパターンの形成の機構に関しては明らかに雪えくぼと同じと考えられる。

この断面を模式的に図12に示したが、地面がとくに草地のような場合は気泡のような状態にはならず、すぐに全層ぬれ雪となってしまふ。したがって、この気泡は雪えくぼのパターンを少しの間保存しておくような役割をしていることになる。

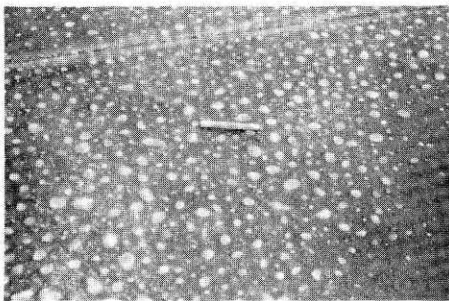


写真10 気泡のパターン.

Photo 10. Air bubble-pattern.

逆に、雪えくぼと似たパターンを持つがまったく別の現象として“ Ablation-hollows on snow ” (「融雪面のくぼみ模様」)がある(写真11)。これは雪面上の風が重要な役割をする現象で(高橋, 1978), 雪えくぼの場合凹部が尖点となっているのに対してこの場

合は凸部が尖点となっている。この現象も北陸地方ではひと冬を通して時々見られる。とくに波長の短い場合は、表面の形態の特徴は明確ではなく、それらを平地積雪表面だけから区別するのは困難である。しかし Ablation-hollow の場合は斜面上でも 1次元パターンとはならないということ、積雪内部に帯水層や水みちがなく、積雪層の褶曲もみられないということにより見分けることができる。

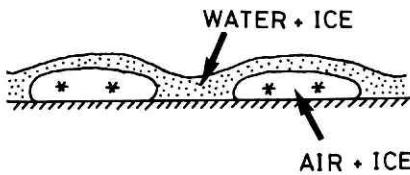


図12 気泡状のパターンの断面。

Fig. 12 Vertical section of air bubble-pattern.

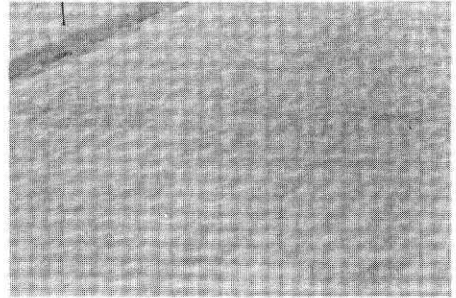


写真11 融雪面のくぼみ模様 (長岡)。

Photo. 11. Ablation-hollows on snow (Nagaoka).

#### 4. 雪えくぼの形成機構

##### 4.1 雪えくぼに関する性質のまとめ

雪えくぼの形成機構を考察するために、はじめに観察から明らかとなったことを列記する。

- (1) 雪えくぼの発生には、ざらめ化していない雪と水の供給が必要である。
- (2) 雪えくぼの発生時には必ず積雪内に帯水層が形成される。
- (3) 雪えくぼの発生によって積雪層は褶曲する。
- (4) 雪えくぼは平地では点状の2次元パターンであり、斜面上では線状の1次元パターンとなる。
- (5) 雪えくぼのくぼみは互いに一定距離以上近づかないような分布をする。
- (6) 雪えくぼの波長は、それが形成された時の積雪の状態と密接に関係している。
- (7) くぼみの発生位置は地形の影響を受けることがある。
- (8) 雪えくぼのくぼみの下には水みちが形成される。
- (9) 雪えくぼのパターンの発生は瞬間的であり、くぼみの成長中にパターンの変化はない。

##### 4.2 雪えくぼ形成の過程

雪えくぼの形成までの過程をたどると次のようになる。一様に雪が積ったあと雨が降った



り、気温が上昇して表面融雪がさかんになると、積雪内を水が下方へと浸透していく（図13, 1）。積雪内に雪粒子の粒径の不連続による止水層があると、水はここでいったん止まり帯水層に形成する（図13, 2）。水はこの帯水層に沿って凹部に移動、集中する。集中した水がその保水能力を越えたと下へ浸透しはじめる（図13, 3）。それにつれて凹凸は大きくなり、やがてくぼみの部分の雪はざらめ雪となる（図13, 4）。

雪えくぼのパターンは、積雪内に帯水層ができた段階で発生するものといえる。したがって、水みち形成にともなうくぼみの発達は、このパターンを可視化させる役割をしていると考えるべきである。

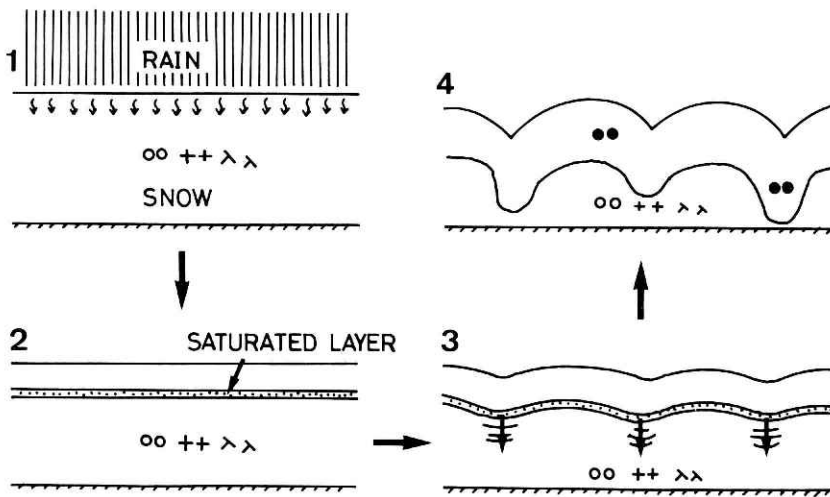


図13 雪えくぼが形成される過程。

Fig. 13 Process of formation of dimple-pattern.

#### 4.3 雪えくぼのパターン形成についての考察

雪えくぼのパターン形成において帯水層の存在は本質的なものといえる。ざらめ化していない雪と水の供給はむしろ帯水層が形成されるための必要条件と考えるべきであろう。したがって、雪えくぼのパターン形成の問題は、帯水層が形成されると、なぜ水は一樣に分布せずに局所的に集中するのかという問題に置き換えることができる。

一般に、自然界におけるパターン形成はなんらかの不安定が関与している場合が多い。とくに雪えくぼの発生にともなう積雪層の褶曲は、積雪の弾性的な不安定の関与を暗示している。

いま仮に、帯水層の下の積雪を考えてみよう。これに仮想的な弾性変形を与えると、水は帯水層に沿って、その凹部に集中し、その変形をよりいっそう大きくする場合が存在するこ

とが考えられる。このような不安定は、たしかにパターン形成の引き金となる。また実際の雪えくぼのパターンには波長らしきものが存在するという事は、波長によって安定・不安定が異なり、不安定なものだけがパターンとして形成されると解釈できる。したがって地形のパターンが雪えくぼのパターンにどのように影響を与えるかは、地形のパターンの波長がゆらぎとして、帯水層とその下の積雪の系に対して安定であるか不安定であるかによって決まることになる。

なお、帯水層をともなう積雪の弾性的不安定の発生に関しては「雪えくぼのパターン形成Ⅱ」で理論的に取り扱う。

## 5. 結 論

雪えくぼの観察を1982～1983年と1983～1984年の2冬期間、雪害実験研究所構内をはじめ、新潟県内の数ヶ所でおこない、そのパターンの特徴、形成過程等を調べた。

雪えくぼはひと冬に数回発生し、それぞれ、その時の積雪の状態と密接に関係すると思われる波長が存在することがわかった。

雪えくぼのパターンの形成には、積雪内にできる帯水層の存在が必要であり、水みちの形成によるくぼみの凹凸の発達はこのパターンを可視化するための過程とみなせる。

雪えくぼのパターン形成の本質は、帯水層とその下の積雪との系が帯水層内の水の移動によって弾的に不安定化するためであると思われる。

## 参 考 文 献

- 1) Gerdel, R.W. (1954) : The transmission of water through snow. Trans. Am. Geophys. Union., **35**, 475 - 485.
- 2) 納口恭明 (1983) : ラムゾンデによる積雪の水平方向の非一様性の観測. 国立防災科学技術センター研究報告, 第31号, 175 - 189.
- 3) 納口恭明 (1984) : 雪えくぼのパターン形成Ⅱ. 国立防災科学技術センター研究報告, 第33号, 255 - 275.
- 4) 大沼匡之 (1959) : 表紙写真. 雪溪の浸蝕模様他. 雪氷, **21** 卷, 130.
- 5) 高橋喜平 (1940) : 融雪水に依る波状雪に就て, 日本雪氷協会月報, **2** 卷, 154 - 158.
- 6) 高橋修平 (1978) : 融雪面の窪み模様に関する研究. 低温科学, 物理篇, **37**, 13-46.
- 7) 種村・尾形 (1981) : 点の空間配地パターンを測る. 数理科学, **213** 号, 11-16.

(1984年6月5日 原稿受理)