HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪粒子間の相対的結晶主軸方位
Author(s)	高橋, 徹; 藤野, 和夫
Citation	低温科學. 物理篇, 34, 71-78
Issue Date	1977-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18299
Type	departmental bulletin paper
File Information	34_p71-78.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Tōru TAKAHASHI and Kazuo FUJINO 1976 Crystal Orientation of Fabrics in a Snow Pack. *Low Temperature Science, Ser. A, 34.* (With English Summary p. 78)

積雪粒子間の相対的結晶主軸方位*

高　橋　　徹
(北海道大学大学院　理学研究科)
藤　野　和　夫
(低温科学研究所)

(昭和51年10月受理)

I. まえがき

積雪は空気と氷結晶の混合体である。この積雪の状態を表す量として密度，硬度，含水率などが広く用いられてきた。しかし，氷が複雑な3次元網目を形成している積雪の状態は到底これらの物理量だけで表現できるものではない。そのため，他の物理量で積雪の状態を表わそうとする多くの試みが為されてきた。たとえば，和泉[1]の熱伝導率や成田[2)3)]の比表面積の測定などはその典型的なものである。

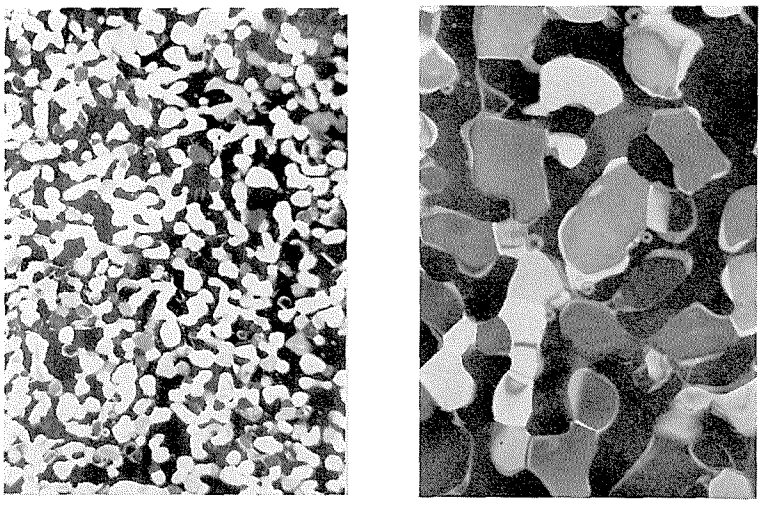
しかし，これらの量は，みな巨視的なものであり，微視的な量は，従来まったく測定されていなかった。そして又，氷自体のもつ固有の物性値で積雪の状態を表わそうとする試みも余りなかった。筆者は，微視的な量で積雪の状態を表わす試みとして，3次元網目状に接合している積雪結晶粒のc軸間の角度αを測定した。この量は，氷結晶の粒界エネルギーに依存する量で，さらに積雪粒子が小さいときには，表面エネルギーにも依存することから積雪の網目構造に関係していると考えられる。今回の測定はその基礎的な資料を得るために比較的安定な構造をしていると思われる試料を用いた。その結果を報告する。

II. 測定方法

測定試料は，しまり雪とざらめ雪の2種類を用いた。しまり雪の試料としては，密度0.34 g/cm^{3}で，札幌市郊外の中山峠より採取され約1年間以上も一定温度の低温室（−15°C）に保存されていたものを用いた。そのため，比較的安定な構造をしていると考えられる。また，ざらめ雪の試料は，密度0.40 g/cm^{3}で，昭和51年3月3日に北海道大学低温科学研究所裏庭より採取した。採取時に，この雪は地面から40 cmから45 cmの層にあり，断面観測の結果[4)]，この層は1月下旬に積った新雪が2月初めの暖気でざらめ雪に変わったもので，その後，雪温は，−1°Cから−2°C程度で融点付近に保たれていたことがわかっている。従って，このざらめ雪は融点近くにカ1月余り保たれていたことになり，この温度付近での比較的安定な構造を示していると考えられる。第1図に，用いたそれぞれの試料の水平薄片を示した。

次に上に述べた2種類の試料からアニリン法[5)]により積雪薄片（約2.5 cm×2.5 cm）を作

* 北海道大学低温科学研究所業績　第1807号



(a) (b)

第1図 試料の水平薄片
(a) しまり雪 (b) ざらめ雪 ×2.5

成した。しかし，このままでは，測定中に薄片が動き廻るので吸い取り紙で融かしたアニリンを取り除いた。このようにすると，薄片はスライドグラス上に張り着いて動かなくなる。接合ている積雪粒子のc軸間の角度αはスカラー量であるからこの操作中に動いても変化しないし，また薄片の運動はスライドグラス上の水平運動に限られているから，水平薄片では鉛直軸とc軸間の角度βも変化しない。このように作成した薄片から，偏光顕微鏡に取りつけたユニバーサルステージを用いて各積雪粒子のc軸方位を求めた。このc軸方位は，Langwayの方法[6]に従って補正され，測定のときに描かれたスケッチをもとにしてウルフ網から角度αを決定した。各結晶粒のc軸方位の誤差は，1°から2°と考えられるから[6]，角度αの測定誤差は最大5°以下である。また，ウルフ網上で90°より大きな角度αが現われたときには，その補角を採用した。

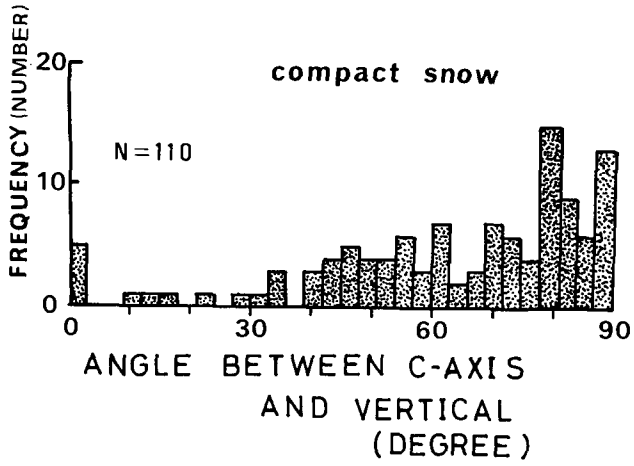
III. 測定結果

1. 鉛直軸と各結晶粒のc軸間の角度β

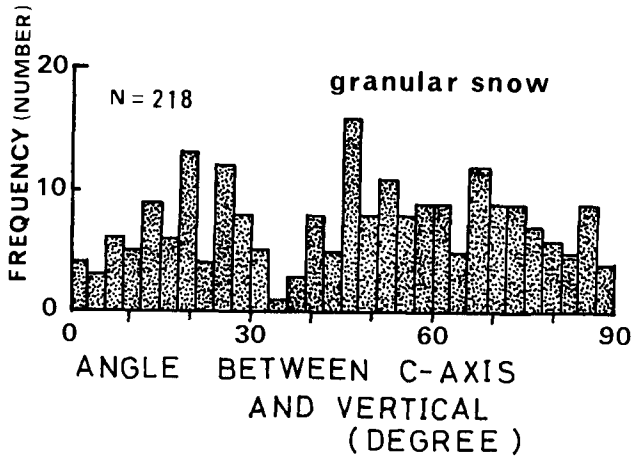
第2図に水平薄片から求めたしまり雪とざらめ雪の各結晶粒の角度βの頻度分布を示した。しまり雪ではc軸が水平になっているものが鉛直になっているものより非常に多い。一般的には，c軸が鉛直方向を向いているものが多いと云われているが必ずしもそのようになっていなかった。ざらめ雪は，しまり雪と異なり35°付近を境にして大きく2つに分けられ，20°と45°付近にピークを持って分布していた。

2. 各結晶粒の相互のc軸間の角度α

第3図にしまり雪とざらめ雪の隣り合う結晶相互のc軸間の角度αの頻度分布を示した。しまり雪は，90°, 70°, 65°, 35°, 25°, 15°付近にピークを持っており，他方ざらめ雪では，90°, 60°, 55°, 50°, 40°, 30°, 25°, 18°付近にピークを持っている。また一般的傾向として，ざらめ雪

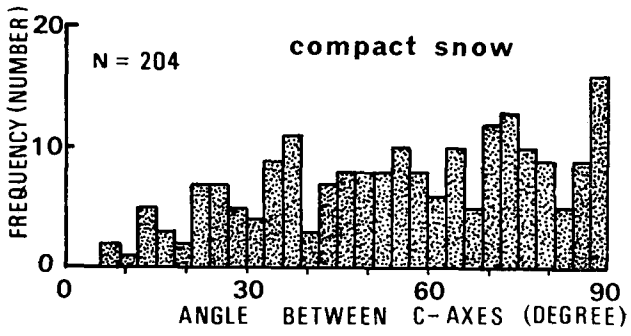


(a)

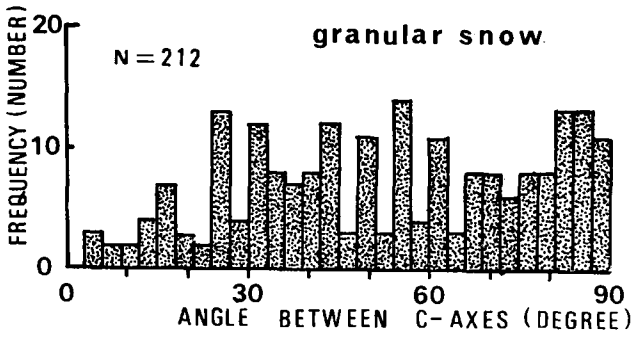


(b)

第2図 角度βの頻度分布



(a)



(b)

第3図 角度αの頻度分布

のピークはしまり雪のそれに較べ非常に鋭くなっており，60°, 55°, 40°, 25° 付近のピークが特徴的である。しまり雪に見られた90°, 70° 付近のピークは，ざらめ雪では広がってしまい明瞭でなくなっている。

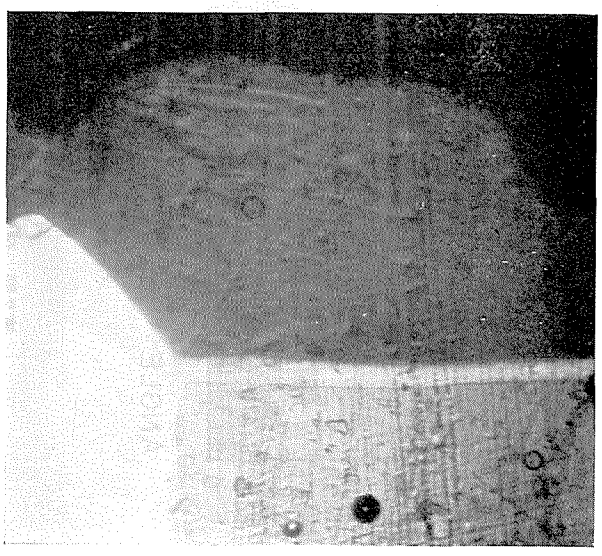
3. 結晶粒界面

薄片をある程度厚くすると網目状に連結している結晶の粒界面が傾いているため2本の線が見える。この2本の線が1本になるようにユニバーサルステージを動かすことによって粒界面の方位が決定できる。この測定は薄片を適当な厚さにすることが必要なため，結晶粒の大きなざらめ雪についてしか測定できなかった。

一般に粒界面は平面でなく複雑に入り組んでいるので，薄片からの測定では粒界面の一部しか見ていない恐れがある。しかし，今回測定したざらめ雪では粒径（約2 mm）と薄片の厚さ（約0.5 mm）から考えて大部分測定された粒界面で接合していると思われる。また，第4図に示したように粒界面を表わす2本の線は直線的であり，観察から氷結晶粒同志の接合部はきれいな平面となっていることがわかった。粒界面の方位の測定誤差は最大10° 以下であり，またこの方位はスネルの法則に従って補正された。

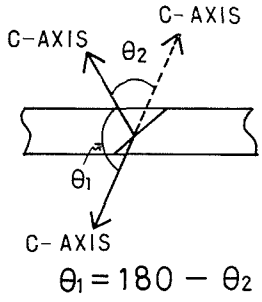
結晶粒界のエネルギーを議論するとき，第5図に示したように粒界面を挟むc軸間の角度 θ_1 とその補角 θ_2 を区別する必要がある。しかし，粒界面を決定しない限り θ_1 と θ_2 を区別することはできない。従って，第3図に示した角度 α には角度 θ_1 と θ_2 の両方が含まれている。上に述べた方法で粒界面の方位が測定できたので角度 θ_1 の分布を知ることができた。

第6図 (b) に角度 θ_1 の頻度分布を示した。また，第6図 (a) は (b) を 90° で折り返えした角度 α の分布で，影をつけた部分は角度 θ がその角度の補角であることを示している。第6図 (a) の一般的傾向は同じざらめ雪の試料について得られた結果を示した第3図 (b) と同様である。しかし，角度 α の分布に見られた18° 付近のピークは角度 θ_1 の162° 付近のピークであることがわかる。

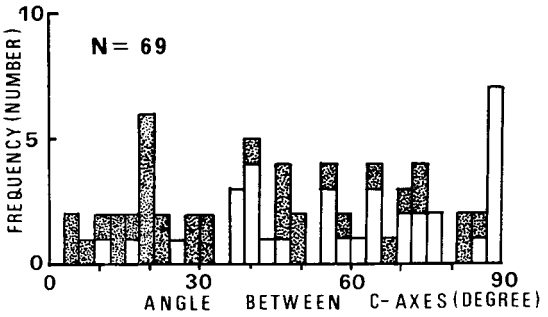


第4図 ざらめ雪の粒界面 ×20

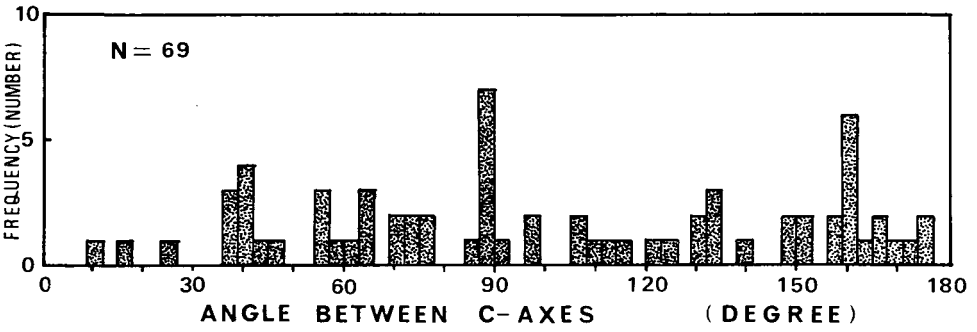
第7図に結晶粒のc軸と粒界面の法線の間の角度 γ の頻度分布を示した。今回の測定ではアニリン薄片



第5図 角度 θ_1 と θ_2 の関係
θ_1 は粒界面を挟むc軸間の角度，
θ_2 はその補角

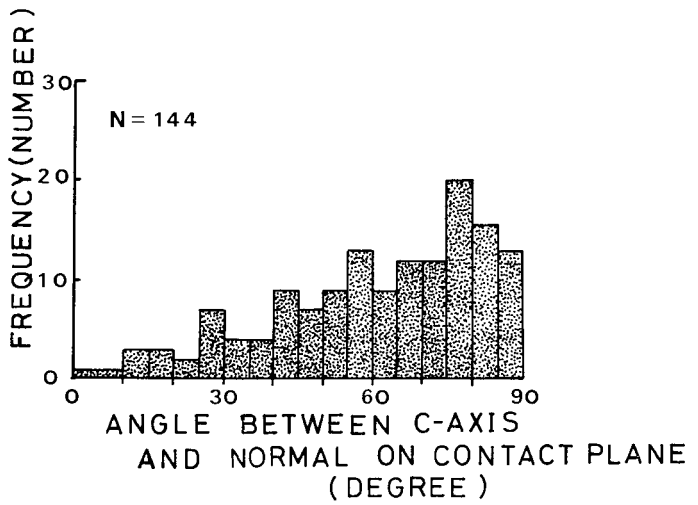


(a)



(b)

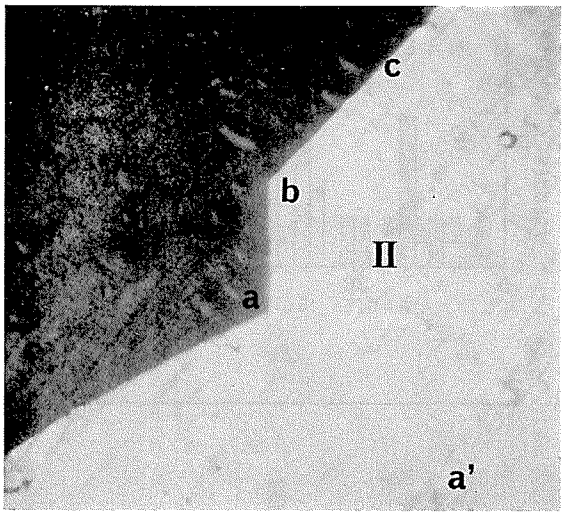
第6図 角度 α と θ_1 の頻度分布
(a) は (b) を 90° で折り返した角度 α の分布



第7図 c 軸と結晶粒界面の法線との間の角度 γ の頻度分布

を用いたため a 軸方位は測定できなかったが，粒界面が結晶底面となる場合はほとんどなく，c 軸と粒界面の法線は比較的大きな角度を為していることがわかった。

第8図に奇妙な接合をしている粒界面を示した。同種の接合をしている粒界は全測定中に



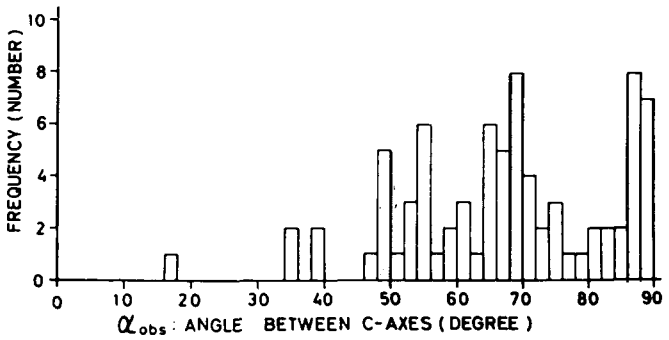
第8図 V字型粒界面
I, IIは単結晶で粒界はV字型の接合をしている ×34

わずか2例しか見られなかった。a-a′には結晶粒界があり，IとIIは単結晶である。三叉粒界aから伸びている結晶粒I, IIの粒界はb点で直線的に折れ曲がりV字型の接合をしている。他の1例も同様な接合形態を示していた。第8図の結晶粒I, IIのc軸間の角度θ_1は114°で，粒界面a-bとb-cは41°で交わっていた。また，結晶粒Iのc軸と粒界面a-b, b-cの法線との角度γはそれぞれ88°, 77°で，結晶粒IIのc軸とのそれは37°, 16°であった。もう1つの例では，角度θ_1は176°，粒界面の角度は28°，角度γはそれぞれ63°, 59°と62°, 60°であった。

IV. 考　　察

測定した結晶粒のc軸と鉛直方向の間の角β及びc軸間の角αの頻度分布はいずれも無定方位結晶のそれに見られる様な任意性の強いものとは異なり，有意な頻度分布をしている様に見える。このことは，これらの分布が氷自体の有する物性値に応じたある値を，その構造に応じた状態で表現していると考えられる。特に結晶粒のc軸間の角度αの分布は，積雪が変態過程である安定な状態に近づいていくために現われると考えられる。このことは粒界エネルギーの大小に従ってエネルギーの小さな特別な接合が保存されることを表わしている可能性が強い。しかし，これら結定な接合が形成されるのは，降雪時の雪結晶自体の特質によるものか，又は変態過程に於ける特定のエネルギー状態によって定まるのかは明らかでない。

Lee[7]，上田[8]によれば，天然の多結晶型雪結晶のc軸間の角度αは，立体樹枝では70°付近に1つの大きなピークが見られ，放射樹枝では同様の70°付近のピーク以外に55°と40°付近にも小さなピークが見られることを示した。Leeはこのことを結晶底面に対するミスフィットの小さくなる接合として説明している。小林・古川ら[9]は第9図に示した砲弾集合の角度αの頻度分布を求め，これらのピークを一般化された共存点理論（GCSL理論）をもとにして双晶と云う考えで説明している。またLeeの砲弾集合の測定では，全測定数が19個と少ないにも



第9図 砲弾集合の角度 α の頻度分布
小林・古川ら (1976)[9] より

かかわらず30°と25°付近にもピークが見られた。筆者の積雪粒子の測定でも同様のピークが見られ，このピークは降雪時の雪結晶の特質を反映しているとも考えられる。しかし，降雪時の雪結晶の質量に較べ，実際の積雪粒子の質量は2から3桁程異なり，それらの粒子の凝集過程で固有の軸方位が保存されることは困難と考えられる。一方，小島[10]は，降雪時の雪の結晶形が力学的性質にかなり影響を与えることを示した。従って角度 α の分布が変態過程のエネルギー状態のみで形成されるとするのも困難である。このことから角度 α, β の有意の分布は降雪結晶固有の特性とエネルギー状態の両方によって定まる可能性が強い。これらのことを検証するには，降雪時の雪結晶の特性と変態初期からの角度 α, β の分布の時間的変化を追跡する必要がある。

第6図に示したように，角度 α の分布の18°付近のピークは角度 θ_1 の分布の162°付近のピークであり，一般的傾向として角度 α の小さなものは，角度 θ_1 では150°から180°付近に分布している。

第8図に示したV字型接合は，粒界が直線的に折れ曲っていることから，a-b, b-c の接合は共に安定であることを示している。

V. 結　　論

積雪粒子の微視的状態を表わす量として，接合している結晶粒のc軸間の角度 α と粒界面を挟むc軸間の角度 θ_1 が測定された。c軸間の角度 α の頻度分布のピークは，天然の多結晶型雪結晶で観測されたピークと良く一致した（第3図，第9図）。

粒界面の法線はc軸と大きな角度で交わり，結晶底面が粒界面となることは殆どなかった（第7図）。

粒界面を挟むc軸間の角度 θ_1 の分布から，角度 α の小さなものは角度 θ_1 の150°から180°付近に対応しており，特に角度 α の分布の18°付近のピークは粒界面を挟むc軸間の角度 θ_1 の分布の162°付近のピークに対応することが示された（第6図）。

この研究の種々の点について，若浜五郎教授をはじめ応用物理学部門のかたがたから有益な御助言をいただいた。ここに厚く感謝の意を表わします。

文 献

1) 和泉 薫・藤岡敏夫 1975 積雪の変態と熱伝導率の研究 I. 低温科学, 物理篇, **33**, 91-102.
2) 成田英器 1969 積雪の比表面積の測定 I. 低温科学, 物理篇, **27**, 77-88.
3) 成田英器 1971 積雪の比表面積の測定 II. 低温科学, 物理篇, **29**, 69-82.
4) 遠藤八十一・秋田谷英次・高橋 徹・和泉 薫 1976 石狩・勇払平野における積雪の特性. 低温科学, 物理篇, **34**, 133-145.
5) 木下誠一・若浜五郎 1959 アニリン固定法による積雪薄片. 低温科学, 物理篇, **18**, 77-96.
6) Langway, E. C. 1958 Ice fabrics and the universal stage. *SIPRE Tech. Rept.*, **62**, 1-16.
7) Lee, C. W. 1972 On the crystallographic orientation of spatial branches in natural polycrystalline snow crystals. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **50**, 171-180.
8) 上田博 1975 多結晶型雪結晶と凍結水滴の結晶習性について. 北海道大学大学院理学研究科修士論文.
9) Kobayashi, T., Furukawa, Y., Kikuchi, K. and Ueda, H. 1976 On twined structures in snow crystals. *J. Crystal Growth*, **32**, 233-249.
10) 小島賢治 1968 雪の結晶の変態に関する二三の実験. 雪氷, **30**, 141-148.

Summary

A preliminary study was carried out to express the metamorphosing states of snow pack by using the crystal orientation of grains in its fabrics.

In a metamorphic process in a snow pack, the phenomenon of growth and decay of grains which form its network is strongly dependent on the relative energy state with neighbouring grains. This energy state of the snow pack cannot be expressed by such macroscopic quantities as bulk density, hardness and grain size etc., which have been commonly adopted for indicating snow pack properties.

Crystal orientation in the fabrics may give a kind of measure for expressing such a state of the process.

Crystal orientation of each grain in thin sections which were prepared from a snow pack by the method of aniline solidification, was determined by using U-stage under a polarized microscope.

Samples of compact fine grain snow (Fig. 1 a) were used by keeping them in the cold room (−15°C) for about one year; samples of coarse granular snow (Fig. 1 b) were also used, which were kept in a near melting point for about one month under a natural condition.

Accordingly, these samples were considered to be in the steady state of metamorphic process.

The distribution of β; the angle between c-axis and vertical are shown in Fig. 2 a, b; those of α, the angle between c-axes of two neighbouring grains are shown in Fig. 3 a, b.

It is clear from these figures that both α and β seem not distributed at random but have some particular predominants peaks.

It should be noted the some of the peaks of α are in good agreement with those obtained from natural polycrystalline snow flakes (Fig 9).

It is considered that the obtained peaks of α and β might be indicating some particular states under the process of metamorphism which has a strong influence on the rearrangement of grains ni the fabrics of a snow pack and also might be reflecting partially the original crystal orientation of a polycrystalline snow flake.