



Title	南極氷床氷の双晶 : 氷結晶 a 軸の測定にもとづくダイヤモンド・パターンの形成について
Author(s)	松田, 益義; 若浜, 五郎; Budd, W.F.
Citation	低温科学. 物理篇, 34, 163-171
Issue Date	1977-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18308
Type	bulletin (article)
File Information	34_p163-171.pdf



[Instructions for use](#)

南極氷床氷の双晶*

氷結晶 a 軸の測定にもとづく
ダイヤモンド・パターンの形成について

松田 益義

(低温科学研究所研究生)

若浜 五郎

(低温科学研究所)

W. F. Budd

(オーストラリア南極局)

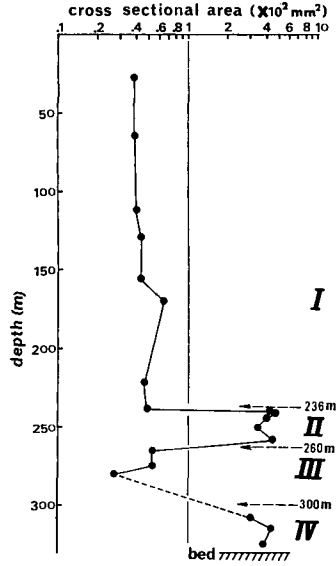
(昭和51年10月受理)

I. ま え が き

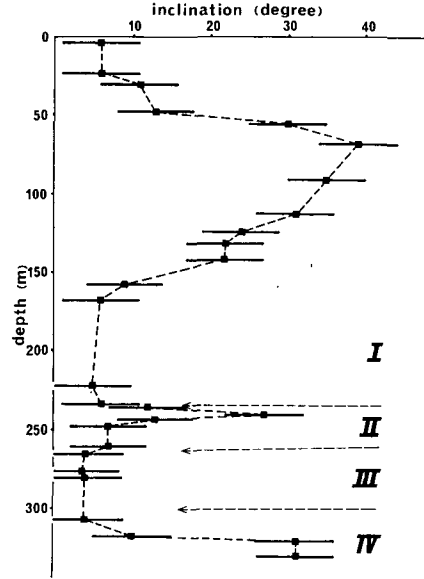
オーストラリア南極観測隊 (Australian National Antarctic Research Expedition, 略称 ANARE) は、1969年、南極の Low Dome の北西端 Cape Folger 附近で氷床にボーリングを行ない、ほとんど底まで達する 330 m の深層氷のコア試料を採取した。Low Dome の氷の流動と関連して、1970年以來、これらコア試料の構造氷河学的解析が進められてきた。氷の組織や結晶主軸方位分布に関する解析結果の一部はすでに若浜¹⁾によって報告されたが、その後さらに氷床の構造および氷の結晶主軸ならびに副軸の方位に関する詳細な解析が進められた。本報告ではこれらの解析結果をのべると共に、それに基づいて4極大型選択結晶方位の形成に関する新しい解釈をのべる。

4極大型選択結晶方位は第2図(b)に示したように、シュミットネットに記入した結晶主軸方位が特徴的なダイヤモンド型をしているので、「ダイヤモンド・パターン」ともいわれる。Rigsby^{2,3)}が北米の氷河で発見して以来、多くの山岳氷河や極地氷床で相次いで発見され、報告されてきた。この特異な結晶方位については、多くの研究者が実験や理論によってその解釈を試みてきた⁴⁻¹¹⁾。実験室で初めて3極大型結晶主軸方位組織をつくったのは田中⁸⁾であるが、4極大型方位組織は得られなかった。理論的研究は、これまで主として、多結晶氷の熱力学的平衡を基にしているが、その形成はいまだにうまく説明されていない。今回、筆者らは Cape Folger 氷の解析結果に基づき、従来の解釈とは全く観点を異にする説、すなわち、双晶の形成による4極大方位の形成を考えたので、以下にそれを報告する。

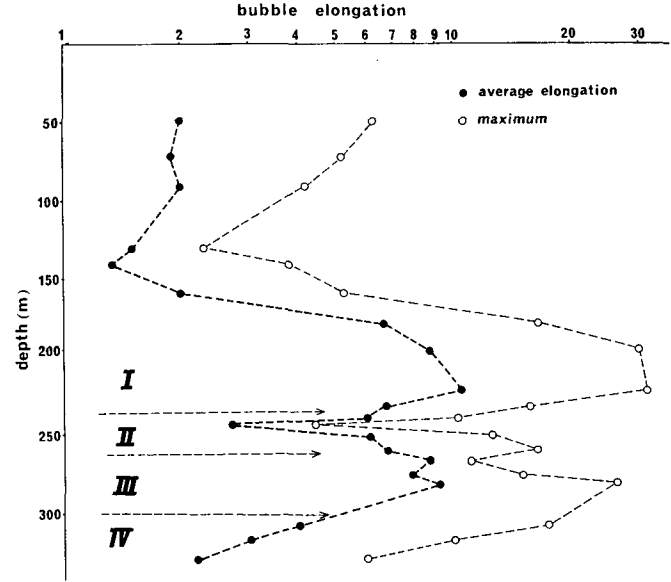
* 北海道大学低温科学研究所業績 第1803号



第1図 Cape Folger 氷床氷のいろいろな深さにおける粒度。矢で印した深さに粒径の不連続がみられるので、それら不連続面を境にして、上から第I、…第IV層と名付ける



第3図 第2図に示した主軸方位分布に関する2回回転対称軸の鉛直方向からのずれの角度が深さと共にどう変るかを示した図



第4図 Cape Folger 氷床氷の各深さにおける気泡の伸張度 (回転楕円型の気泡の長短軸の比)

II. 氷床の多重層構造

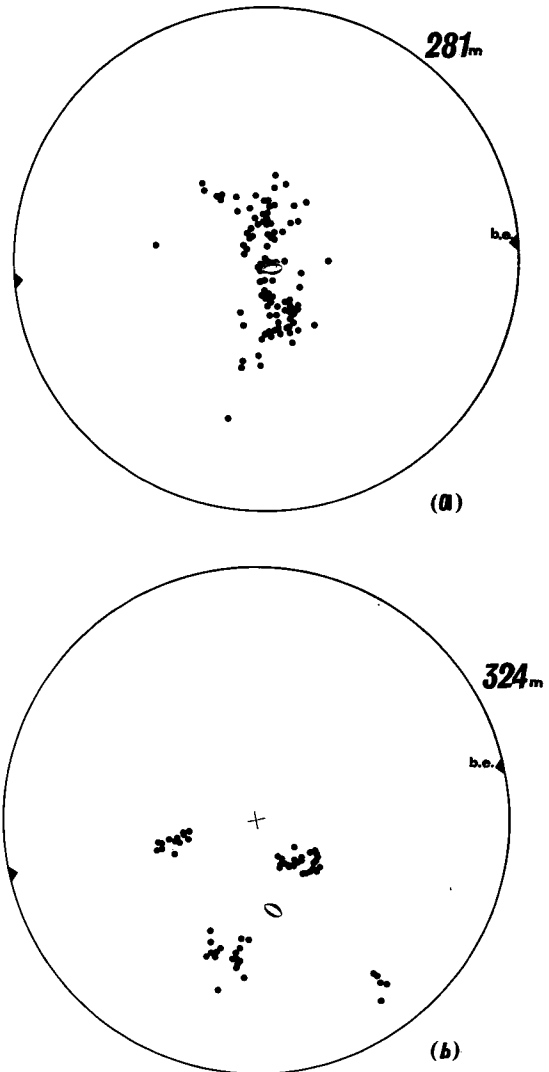
いろいろな深さでの結晶粒の平均の大きさを求め、第1図に示した。結晶の大きさは、深さ236 m, 260 m および 300 m で不連続的に変っている。これらを境にして、上から第I層、…第IV層とよぶことにする。粗粒部 (II, IV層) は細粒部 (I, III層) に比べ、結晶粒が水平断面積にしてひと桁大きい。

結晶粒度の急変と共に、結晶主軸の選択方位性および組織も同時に急変する。第I層の下半部と第III層は1極大主軸集中型 (第2図 (a)) を示し、組織は圧砕組織 (cataclastic texture) である。これに対し、第II, 第IV層は典型的な4極大型主軸方位 (第2図 (b)) を示し、組織は相互貫入組織 (interlocking texture) である。

主軸方位の分布に関し、全層を通じて特徴的なことは、主軸の集中方位の配位に対称性が認められることである。すなわち、主軸方位の分布がすべての深さで、第2図 (a), (b) に示したように、分布の中心に2回回転対称軸をもっている。その対称軸の鉛直方向からのずれの角度が深さと共にどう変るかを第3図に示した。深さ75 m 近辺と、第II層および第IV層の中央部でそのずれが最も大きい。

同様の傾向は、氷に含まれる気泡の伸張性についても認められる。気泡の長短軸比の変化を第4図に示した。白丸は軸比の最大値、黒丸は平均値である。第II, 第IV層の中央部で気泡の伸びが極端に小さくなり、球形に近くなっている。

以上結晶粒度、結晶軸方位、組織、対称軸の鉛直方向からのずれ、および気泡の伸張度などの構造要素から明らかのように、Cape Folger 附近の氷床は4層の氷体から構成されており、各氷体がひとつの構造单元¹¹⁾ となっていることが



第2図 シュミット網に投影した結晶主軸方位分布。各図の中心が地理的鉛直方向。第I層下半部および第III層には (a) のような一極大型が、また第II, 第IV層には (b) のような四極大型が観測された。図中の楕円印は、結晶主軸方位分布の2回回転対称軸を、また、b. e. は気泡の伸長方向を示す

わかった。

III. 多極大結晶方位構造

従来、氷河氷の結晶方位は主軸 (c 軸) についてのみ測定され、研究されてきた。しかし、c 軸方位だけでは氷結晶の三次元方位を完全に記述することはできない。そこで筆者らは、氷の薄片に蝕像を作ることにより、c 軸だけでなく、副軸 (a 軸) の方位をも測定した¹²⁾。

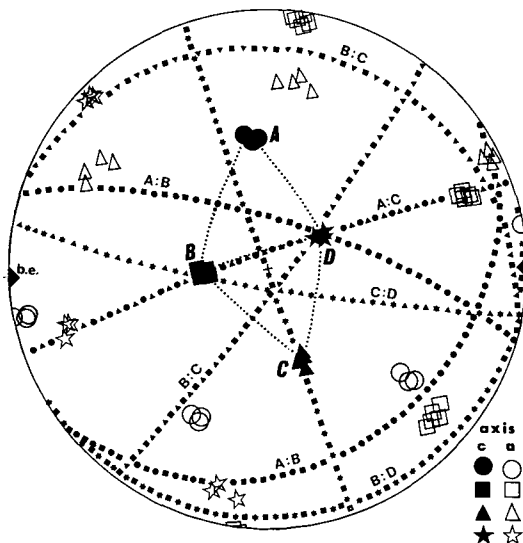
前述のように、第 II、第 IV 層では、結晶主軸方位が典型的な 4 極大型を示す。第 5 図は、第 II 層の深さ 259 m のコアから切り出した薄片を構成するすべての氷結晶について測定して得た c 軸および a 軸の方位を、同一のシュミット・ネットに投影したものである。

c 軸が同一方位にある氷結晶 (同じ記号で示す) は、その a 軸 (同記号で中空) も同一方位にあることがわかる。同一の結晶方位にある氷結晶粒は、いずれも、薄片上では互に隣接していない。にも拘らず、それらは 1 つの大きな単結晶の一部であるかのように、結晶軸のすべての方向が一致している。

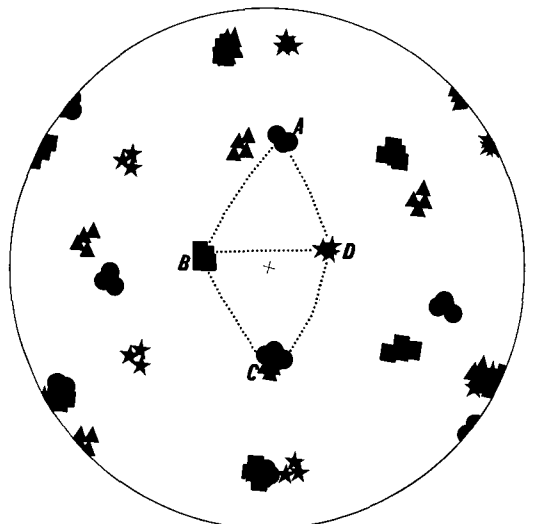
さらに、c 軸が同一方位にある結晶群、第 5 図の A, B, C, D の [A, D] を除くいずれの 2 者の組合せ (例えば [A, B], [A, C], ……) に関しても、2 者の結晶主軸方位が非常によい鏡映対称の関係にあることがわかる。それぞれの対称面を第 5 図に大円で示した。

これらの事実は、ほとんどの結晶粒が、その隣接する結晶と、少なくとも結晶方位に関しては双晶の関係にあることを強く示唆している。

氷の結晶構造には、水素結合によって結ばれている酸素と酸素の結合線が、c 軸方向を含めて 7 方向ある。それらの間の角度は、正四面体角の $109^{\circ}28'$ に等しい。従って、測定された c 軸と a 軸の方位から、7 つの酸素・酸素結合線の方位のすべてを知ることができる。4 つの結晶



第 5 図 第 II 層の深さ 259 m のすべての結晶粒について測定された c 軸 (黒ぬり) および a 軸 (白ぬり) の方位分布。図中の大円は、結晶方位の鏡映対称面



第 6 図 第 II 層の深さ 259 m の各結晶粒について、酸素-酸素の結合線の全方位をシュミット網に投影した図

方位群 A, B, C, D について、結合線の全方位を求めたものが第6図である。各結晶群の7つの結合線のうち、2~3本が、他結晶群の結合線と一致した方向にあることがわかる。

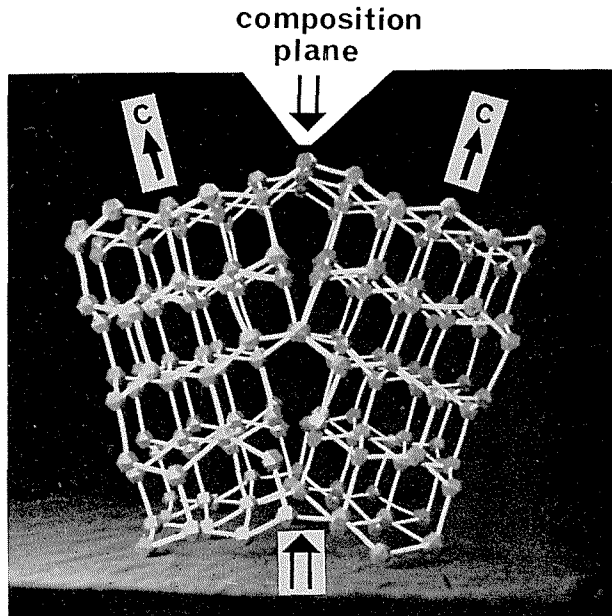
隣接結晶が双晶関係にあるかどうかは、結晶粒界での結合の良さが問題になる。酸素・酸素結合線方向が一致していることは、隣接結晶が双晶関係にある可能性を強く示している。そこで粒界での原子の接合状態を鏡映面(11 $\bar{2}$ 1)を例にとって考えてみよう。第7図の写真は、その接合面の模型を示す。接合面に最も近い酸素原子は、接合面上の酸素・酸素結合線間の角度が正四面体角の109°28'からわずかにずれることによって両結晶によって共有されている。

しかし、第2近接酸素原子は共有されない。従って、この写真に見られるように、両結晶の接合面には、酸素原子を共有する結合部と共有しない非結合部とが1層おきに交互に出現する。

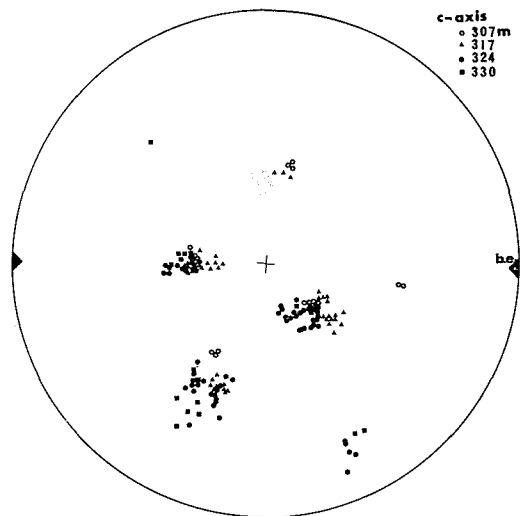
(11 $\bar{2}$ 1)面は、結晶方位に関しては上述のように鏡映面になっているが、原子の位置に関しては鏡映面になっていない。しかし、原子の位置は、接合面内において、両結晶のc軸を2等分する軸(双晶軸)の周りに180°の回転操作をすることにより合同となる。

IV. 巨大網目状氷結晶の多連双晶

氷のコア試料に含まれる気泡の伸長方向がこの附近の氷床の流動方向とほぼ一致することは、1974年のANAREの調査で確かめられている¹³⁾。採取された各コア試料の地理的空間に対する方位は不明であるが、気泡の伸張方向を基準にすれば、各コアの方位をきめることができる。そこで、気泡の伸長方向と氷結晶主軸の選択方位との関係が深さと共にどう変化するかを調べた。



第7図 鏡映面(11 $\bar{2}$ 1)での隣接結晶([B, D]の組合せ)の水分子の接合状態を示す模型。結晶底面が一層おきによく接合する



第8図 第IV層のいろいろな深さの結晶粒について測定した結晶主軸方位を、各結晶粒に含まれる気泡の伸張方向を同一方向に固定して(図のb.e.の方向)、同一のシュミット網に重ねて投影した図

第IV層のいろいろな深さの氷について測定した結晶主軸を、気泡の伸長方向を同一方向に固定して、同一のシュミット網に重ねて投影した。第8図に得られた結果を示す。大部分のc軸は3方位に、少数のものが他の2方位に選択的に集中している。第II層についても同じことを行なったところ、ほぼ同様の結果を得た。この事実は、第II、第IVの各層、約30mの厚さに含まれるほとんどすべての結晶が、非常に少数の特定の結晶方位をとっていることを示している。これはRigsby¹⁴⁾が報告したように、ひとつの薄片内で同一主軸方位にある結晶が薄片の外で互に連結し合っている可能性を強く暗示している。

そこで、深さ327~328mの1本のコアから、1cm間隔で13枚の連続薄片を作成し、それら薄片内に含まれるすべての結晶の主軸方位を測定した。その結果、直径11cm、長さ13cmのこのコアは、複雑な形をした互に入り組んだ、たった4個の単結晶で構成されていることがわかった。同一の結晶方位にある結晶はすべて互に連結しているのである。

以上の事実から次のことが結論される。結晶主軸が多極大型、ダイヤモンド=パターンを示す第II、第IVの両層は、非常に少数の極端に大きな網目状の氷結晶で構成されており、それらの結晶は互に双晶関係にある。

V. ま と め

南極のLaw DomeのCape Folger附近で採取された深層氷の構造解析を行なった結果、この附近の氷床は結晶粒の形、大きさ、気泡の伸長度、結晶主軸方位などが異なる4つの層から成っていることがわかった。氷の組織を特徴づけるこれらの諸量が急激に変化する深さは、それぞれが非常によく一致している。このことは、これらの諸量が互に密接な関係をもっていることを示している。

第II、第IV層の両層は、典型的な4極大型選択方位を示し、少数の網目状の巨大結晶から成っている。一方、第I層の下半部と第III層は、鉛直方向に主軸が集中する1極大型の選択方位を示す。結晶は細粒で、典型的な圧砕組織を示している。これは、高い圧力のもとでの大きな剪断変形を受けたために形成された組織と考えられる¹⁵⁾。このような組織を示す層に含まれる気泡が、他の層に比べ2~3倍も長く伸長している事実が、このことをよく示している。

4極大型の結晶主軸方位は、隣接結晶が互に双晶関係にあることで説明された。双晶は熱力学的に非常に安定な方位関係である。第II、第IV層で双晶がこのようによく発達しているのは、剪断応力が比較的弱く、変形の小さい条件下にあったものと考えられる。

この研究は北海道大学低温科学研究所およびメルボルン大学気象学教室において行なわれ、それぞれの研究室の多くの方々への援助を受けた。また、琉球大学教養部の木崎甲子郎教授からは種々の有益な助言を受けた。以上の方々に深く感謝の意を表する。

文 献

- 1) 若浜五郎 1974 南極アメリカ棚氷、ウイルクス氷丘およびフォルガー岬の深層氷の構造・組織について。昭和48年度文部省科学研究費総合研究(A)報告書(代表者: 黒岩大助) 99-108.
- 2) Rigsby, G. P. 1951 Crystal fabric studies on Emmons Glacier, Mt. Rainier, Washington.

- J. Geol.* **59**, 590-598.
- 3) Rigsby, G. P. 1960 Crystal orientation in glacier and experimentally deformed ice. *J. Glaciol.* **3**, No. 27, 589-606.
 - 4) Kamb, W. B. 1959 Theory of crystal preferred orientation developed by crystallisation under stress. *J. Geol.* **67**, 153-170.
 - 5) Brace, W. F. 1960 Orientation of anisotropic minerals in a stress field. *Mem. Geol. Soc. Amer.*, **79**, 9-20.
 - 6) McDonald, J. F. 1960 Orientation of anisotropic minerals in a stress field. *Mem. Geol. Soc. Amer.*, **79**, 1-8.
 - 7) Jonsson, S. 1970 Structural studies of subpolar glacier ice. *Geografiska Ann.*, **52**, Ser. A, 129-145.
 - 8) Tanaka, H. 1972 On preferred orientation of glacier and experimentally deformed ice. *J. Geol. Soc. Japan*, **78**, 659-675.
 - 9) Budd, W. F. 1972 The development of crystal orientation fabrics in moving ice. *Zeit. Gletschenkunde Glaziologie*, **8**, 1-2, 65-105.
 - 10) Kumazawa, N. 1963 A fundamental thermodynamic theory on nonhydrostatic field and on the stability of mineral orientation and phase equilibrium. *J. Earth Sci. Nagoya Univ.* **11**, 145-217.
 - 11) 木崎甲子郎 1974 Ice fabrics の研究史とその問題点. 昭和 48 年度文部省科学研究費総合研究 (A) 報告書 (代表者: 黒岩大助), 85-93.
 - 12) Higuchi, K. 1958 The etching of ice crystals. *Acta Metallurgica* **6**, 636.
 - 13) Budd, W. F. 1976 私信.
 - 14) Rigsby, G. P. 1968 The complexities of the three-dimensional shape of individual crystals in glacier ice. *J. Glaciol.* **7**, No. 50, 233-251.
 - 15) Shumskii, P. A. 1964 Principles of structural glaciology. Dover Publications Inc., New York, p. 497.

Summary

Ice core drilling was carried out to the depth of 330 m (just above the bed) near the Cape Folger on the Law Dome by ANARE (Australian National Antarctic Research Expedition) in 1969.

Marked changes in size and shape of ice crystals were found at the depths of 236, 260 and 300 m, as shown in Fig. 1. Very abrupt changes in bubble elongation (Fig. 4) and crystallographic orientations were also found at exactly the same depths. These suggest that the Cape Folger ice consists of four ice layers: I, II, III and IV, with sharp boundaries in-between as shown in Figs. 1, 3 and 4.

Crystallographic orientations were measured by the universal stage and etch-pit techniques. For each thin section from the ice layers II and IV remarkable multi-maxima preferred orientations of c-axes, the so-called diamond pattern, were found. C-axis and a-axis directions of all the crystals in the section from the core at the depth of 259 m in the layer II were plotted on an equal area projection net (Schmidt net) respectively with solid and open symbols in Fig. 5. Ice crystals which have the same c-axis orientation (indicated by the same symbol) have their a-axes also in the same orientations. Although all the crystals in the same orientation plotted in Fig. 5 were apparently separated in the thin section, they appear to be the parts of a large single ice crystal connected in the third dimension.

It was also found that any pair, e. g. (A, B), (B, C), ... except (A, D), of four crystal groups A, B, C and D has one plane or two planes of symmetry, i. e. a relationship of mirror reflection. The mirror planes are indicated in Fig. 5 by the great circles. These facts strongly suggest that all the four crystal groups A, B, C and D should be regarded as having twinning relations with each other except (A, D), as far as their crystallographic orientations are concerned.

In an ice crystal, the oxygen-oxygen line linked by a hydrogen bond has a c-axis and six other different oblique directions making a tetrahedral angle of $109^{\circ}28'$. All the possible orientations of 0-0 lines thus derived from the four crystal groups A, B, C and D in Fig. 5 are plotted in Fig. 6 by using corresponding symbols. Two or three 0-0 lines out of seven orientations of each crystal group closely coincide with the 0-0 lines of other crystal groups. This coincidence also strongly suggests that the four crystal groups may have twinning relations.

As for the mirror plane (B, D), for instance, oxygen atoms closest to the composition plane $(11\bar{2}1)$ can be held in common by the two neighbouring ice crystals, while those second closest to the plane cannot. However, only a slight change, a few degrees, of the 0-0-0 angle of the crystal lattices very close to the composition plane allows us to join two neighbouring crystal lattices very closely as shown in Fig. 7. Strictly speaking, the plane $(11\bar{2}1)$ is, therefore, not the reflection plane, hence not the twinning plane. However, the congruence of the oxygen atom positions is achieved by the operation of rotation through 180° about the twinning axis which lies in the direction bisecting the angle formed by the c-axes of the two neighbouring ice crystals.

The relative crystallographic orientations of the diamond pattern obtained for the different depths in each of the layers II and IV were compared, assuming that the bubble elongations are in the same direction throughout each of the two layers II and IV, because the bubble elongation has since been found by D. Russel of the 1974 ANARE to coincide with the flow direction of the ice mass. Then, fixing the bubble elongation, all the c-axis orientations of ice crystals in the thin sections from several different depths of each layer were plotted on one and the same Schmidt net. Fig. 8 is that for the layer IV. Most of the c-axes are concentrated in three small areas and a few c-axes in fourth and fifth areas, each of which makes a diamond pattern together with the other three c-axes concentration areas. Similar results were obtained for the layer II as well. This fact gives rise to the possibility that all crystals having the same orientation may be interconnected to be a large single crystal of ice outside of the thin section as described by Rigsby in 1968. To examine this possibility, thirteen successive thin sections were prepared at intervals of 1 cm from the core at the depth of 327-328 m and the orientations of all crystals in these sections were measured. It was found from this observation that the 13 cm long core was composed of only five crystals of complex shape, that is, all the crystals in the same orientation were interconnected with each other. From all the observed results described above, it could be concluded that both ice layers II and IV are composed of a very small number of extremely large network-like ice crystals in mutually twinning relations.

Multi-maxima patterns (diamond patterns) were found throughout the layers II and IV which consist of large crystals of network-like texture, while single maximum

c-axis preferred orientations in the vertical direction were observed throughout the lower half of the layer I and in the layer III which consist of small crystals of cataclastic texture. Air-bubbles in these layers (I and III) are much more elongated (two or three times) than those in other layers (II and IV). The cataclastic texture may be derived from extensive deformation under high shear stress. Hence, the twinning of ice crystals seems to have developed with less deformation in the layers II and IV, producing a multi-maxima preferred c-axis orientations in a diamond-like pattern.