HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	氷河氷の形態と結晶軸方位の関係
Author(s)	大伴, 武都美; 若浜, 五郎
Citation	低温科學. 物理篇, 41, 151-158
Issue Date	1983-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18466
Type	departmental bulletin paper
File Information	41_p151-158.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Mutsumi OHTOMO and Gorow WAKAHAMA 1982 Correlation Between Shape and Crystallographic Axes of Single Crystals in Glacier Ices. *Low Temperature Science, Ser. A, 41.* (With English Summary p. 157)

氷河氷の形態と結晶軸方位の関係*

大伴武都美
(北海道大学大学院理学研究科)
若浜五郎
(北海道大学低温科学研究所)

(昭和57年10月受理)

I. 緒　　言

氷河氷を形成する個々の単結晶の形態に関する研究は今までにもいくつか行なわれてきた。Bader[1]は氷河から採取した単結晶氷が立体的にからみ合った複雑な形態をしていることを示し，Rigsby[2]は氷河内の氷単結晶の形の研究に定量的な方法を導入することを提唱した。木崎[3]は氷河上流のポリゴナルな氷が流動に伴なって成長し，不規則な形に変ることを示した。一方，多結晶の形態組織の研究も行なわれており，成田ら[4]は南極のボーリングコアの解析に定量形態学の手法を導入した。しかしながら，これまでの研究のほとんどは結晶の形態そのものに注目したものであり，結晶の形態と結晶軸方位の関係について論じていない。そこで著者らは，氷河氷の結晶粒の形態とその結晶の結晶軸方位の関係を調べ，両者の相関を明らかにした。また定量形態学の手法を利用し，結晶の形態と結晶軸方位の相関の起源を考察した。

II. 測定と解析

1. 結晶の形態と結晶軸方位の測定

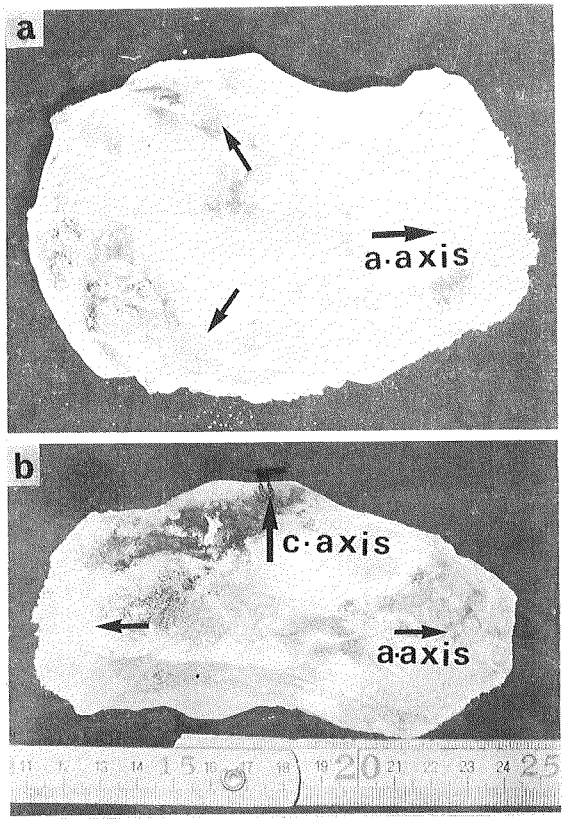
測定に用いた試料は次に述べる二種類である。ひとつは北海道大学第三次アラスカ氷河調査隊[5]がアメリカ合衆国アラスカ州メンデンホール氷河から持ち帰った巨大単結晶氷であり，もうひとつはオーストラリア南極観測隊がウィルクス氷丘 (Wilks Dome, 現在 Law Dome とよばれる) 周縁部のフォルガー岬 (Cape Folger) 附近で行なったボーリングで得られたコア試料[6,7]のうち深さ 324 m から採取されたものを用いた。メンデンホール氷河，フォルガー岬コアはいずれも主軸方位分布は典型的な四極大パターンを示している[5,7]。また試料の結晶粒径は，メンデンホール氷河において測定された粒径分布のうちでは最大[5]であり，またフォルガー岬のボーリングコア試料についてもすべての深さにわたって測定された粒径分布中最大[7]のものであった。

単結晶氷の結晶軸方位は，メンデンホール氷河氷については，氷の結晶表面に凝着させた霜の結晶柱面 $\{10\bar{1}0\}$ あるいは底面 {0001} を利用して決定した。またフォルガー岬のボーリン

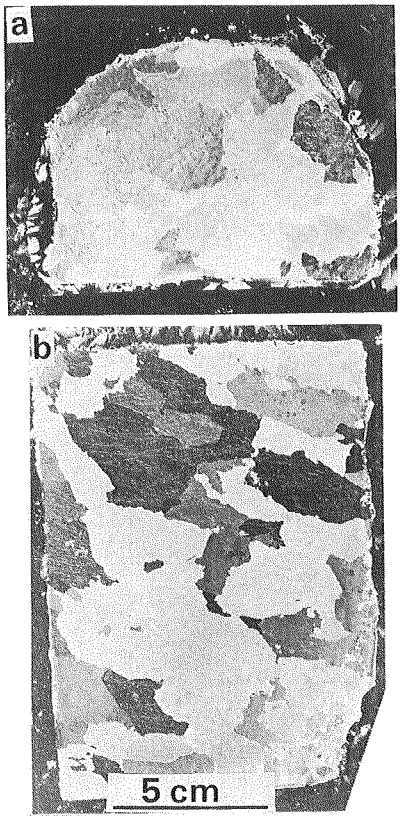
* 北海道大学低温科学研究所業績　第2500号

グコアについては透過ラウエ法で結晶軸方位を決定した。

第1図にメンデンホール氷河産の巨大氷単結晶の平面（第1図-a）と側面（第1図-b）の写真をその結晶軸方位と共に示す。また第2図にフォルガー岬ボーリングコアの水平薄片（第2図-a）と鉛直薄片（第2図-b）を偏光写真で示す。個々の結晶の形は，第1図と第2図に見られるように，多少凸凹はあるものの，全体としてだ円体に近似できる。そこで，個々の結晶に近似しただ円体の3本の軸長を測定した。フォルガー岬のコア試料については5 mm おきの連続薄片をつくり，これらの薄片からだ円体の軸長を求めた。



第1図　メンデンホール氷河産氷巨大単結晶の平面（a）と側面（b）および結晶軸方位



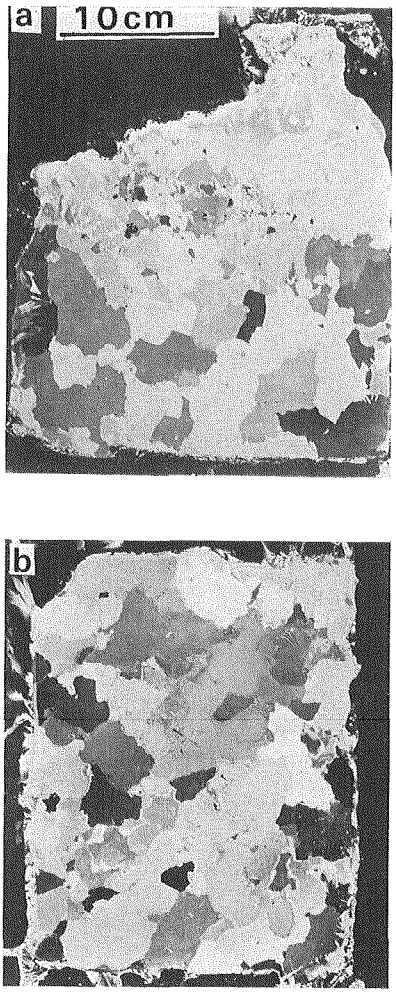
第2図　フォルガー岬ボーリングコアの薄片の偏光写真，深さ 324 m。水平断面（a）と垂直断面（b）

2. 形態学的解析

多結晶体を形成する個々の単結晶の形については，前節の方法で測定したが，これらの結晶が集合して出来ている多結晶における統計的な形態の配向（Oriented structure）を調べるために Underwood[8]，De Hoff[9]，諏訪[10] による形態学的手法を試みた。

メンデンホール氷河氷の形態学的解析には単結晶を採取した氷山から切り出した大きな氷塊の水平および鉛直薄片を用いた。第3図にこれらの偏光写真を示す。一方，フォルガー岬の深層氷については，第2図に示したコア試料の水平薄片と鉛直薄片を用いた。

もし多結晶試料から作成した薄片上において，伸長の単結晶がある特定の方向を向いているならば，この試料は薄片面上で線配向 (Linear oriented structure in plane) をもつといわれる。また，もし空間内である多結晶試料内で伸長した結晶粒の長軸がある特定の方向を向いているならば，この多結晶試料は空間内で線配向 (Linear oriented structure in space) を持つと呼ばれる。空間における配向は基本的には，1) 線配向 (Linear oriented structure)，2) 面配向 (Planar oriented structure)，3) 面—線配向 (Planar-linear oriented structure)，そして 4) 配向をもたない等方的な系 (Isometric) の 4 つに分類される[8~10]。空間的な配向状態を定量的に求めることは困難であるが，本研究では，互いに直交する面上での配向状態を調べて空間配向の定性的な情報を得た。



第3図　メンデンホール氷河において，巨大単結晶を採取した氷山から切り出したブロックの薄片の偏光写真。a) は A 面，b) は D 面とし，互いに直交している

多結晶内の個々の結晶粒の形態学的配向状態は，可視的には花形グラフで表され，定量的には配向度 (Ω) で表現される。花形グラフは一定の長さをもった試験線 (Test line) をある定められた点を中心にある角度おきに回転し，この試験線と結晶粒界との交点の数をそれぞれの回転角ごとに数えて，回転角に対する交点の数を Polar plot で表現したものである。もし花形グラフの形が円に近ければ，配向が等方的であることを示す。また，全角度にわたって平均した交点の数よりも著しく交点の数が少なくなる方向 (花形グラフでは Polar plot の円の中心方向にグラフが折れ曲る) と配向の方向が一致する。配向度 (Ω) は，もしこの値が 0.1 (あるいは 10%) ならば，解析を行なった面上の単位面積のうちのすべての線素 (ここでは結晶粒界) のうちの 10% がある特定の方向に向いていることを示す。前述の二種類の試料について，このような手法で解析を行なった。

III. 結　　果

1. 結晶の形態と結晶軸方位

第1表にメンデンホール氷河産の単結晶氷について測定しただ円体の軸長とその結晶方位を平均軸比 (R) と共に示す。また第2表にフォルガー岬ボーリングコア試料について得られただ円体の軸長，結晶方位および軸比 (R) を示す。これらの結果をみると大部分の結晶は結晶主軸 (c 軸) に直角な方向に平らな形をしており，特に一本の副軸 (a 軸) の方向に伸長している

第1表 メンデンホール氷河産の単結晶氷の形から近似しただ円体の軸長とその結晶軸方位

Length of shortest axis and its crystallographic orientation		Length of middle axis and its crystallographic orientation		Length of longest axis and its crystallographic orientation	
5 cm	c-axis	5 cm	b-axis	10 cm	a-axis
7	b	9	c	10	a
5	b	7	c	9	a
4	c	8	b	13	a
7	c	8	b	12	a
7	c	7	b	15	a
7	b	9	a	16	a
7	c	11	b	16	a
6	b	9	c	20	a
4	c	8	b	11	a
6	c	6	b	11	a
4	c	8	b	11	a
4	c	6	b	10	a
7	c	7	b	11	a
6	c	11	b	15	a
6	c	6	b	15	a
7	b	9	a	10	c
7	c	9	b	11	a
5	c	7	b	10	a
5	c	8	b	13	a
6	c	6	b	12	a
6	c	8	b	11	a
4	c	8	b	12	a
4	c	8	b	13	a
3	c	7	b	10	a
6	c	9	b	13	a
6	a	11	c	17	b
4	c	4	b	12	a
5	c	11	b	14	a
7	c	8	b	12	a
4	c	6	b	10	a
5	c	5	b	9	a
5	c	8	a	15	b
5	c	6	b	12	a
5	c	7	b	11	a
6	c	9	b	13	a

Mean axial ratio $(R) = \dfrac{\text{mean length of the shortest axis}}{\text{mean length of the longest axis}} = 0.31$

c-axis: $\langle 0001 \rangle$, a-axis: $\langle 11\bar{2}0 \rangle$, b-axis: $\langle 10\bar{1}0 \rangle$

第2表　Cape Folger 深層氷の結晶粒の形から近似しただ円体の軸長とその結晶軸方位

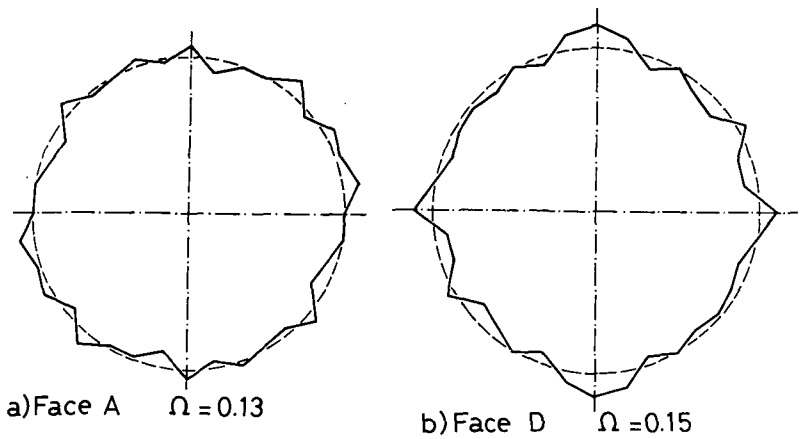
Length of shortest axis and its crystallographic orientation		Length of middle axis and its crystallographic orientation		Length of longest axis and its crystallographic orientation	
4 cm	c-axis	8 cm	b-axis	11 cm	a-axis
2	c	4	b	6	a
1.5	c	3	b	6	a
5	c	7	b	12	a
5	c	5	b	8	a
2	c	2	b	4	a
4	c	6	b	6	a
4	c	4	b	7	a
4	c	6	b	12	a
4	c	4	b	4	a
4	b	6	c	10	a

Mean axial ratio (R)=0.46

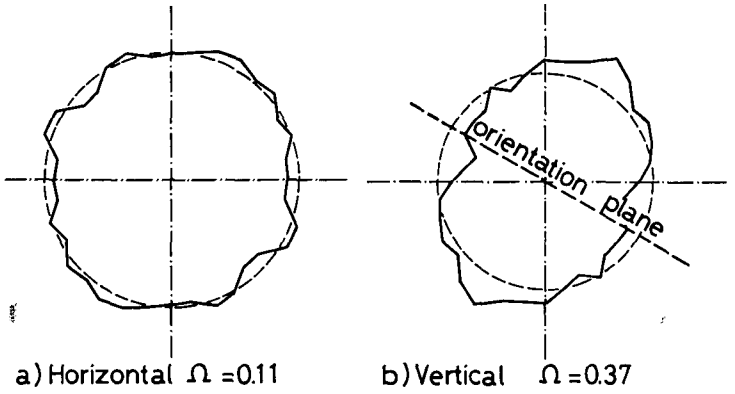
ことがわかる。たとえば，第1図に示したメンデンホール氷河産の単結晶のばあい，c軸は第1図-a（平面図）の紙面に垂直な方向であり，一本のa軸は結晶の長軸方向に一致する。それぞれの試料についての平均軸比（(軸比)=(最短軸の長さ)÷(最長軸の長さ)）はメンデンホール氷河試料で0.31，フォルガー岬コア試料では0.46であった。

2. 形態学的解析

第4図にメンデンホール氷河氷の互いに直交する面内での配向を表わす花形グラフを配向度と共に示す。また第5図はフォルガー岬深層氷の結果を示す。メンデンホール氷河氷の花形グラフはほぼ円に近いので，特定の配向はない。一方，フォルガー岬コア試料の水平薄片では



第4図　メンデンホール氷河試料の結晶粒の形態の配向を示す花形グラフと配向度（Ω）。点線は交点の数の全方位にわたる平均を示す円。a) は第3図に示したA面，b) はD面



第5図 フォルガー岬試料の水平 (a) および垂直 (b) 断面の結晶粒の形態の配向を示す花形グラフと配向度 (Ω)。点線は交点の数の全方位にわたる平均を示す円

特定の配向は認められず，垂直薄片においてのみ線配向 ($\Omega=0.37$) が見られた。この線配向を，コア試料について検討した結果，他のいずれの垂直薄片においても，線配向を示したので，空間的には面配向であることがわかった。

IV. 考　　察

メンデンホール氷河氷とフォルガー岬のコア試料を解析した結果，これらの形態と結晶軸方位の間に強い相関が認められた。すなわち，いずれの結晶においてもその形態はだ円体に近似でき，だ円体の長軸は，その結晶粒の一本のａ軸と，短軸はｃ軸とほぼ一致することが明らかになった。言いかえれば，結晶粒はそのｃ軸に直角な方向に広がるような形をしており，特に１本のａ軸の方向に伸長している。平均的な結晶粒において，その最長のａ軸方向の長さはｃ軸方向の長さの 3.2 倍（メンデンホール氷河氷）あるいは 2.2 倍（フォルガー岬コア試料）であった。このように伸長した結晶粒が集合して形成している多結晶体は，形態学的に配向した構造をもつことが予想される。しかし形態学的な解析を行なった結果は，メンデンホール氷河氷においては，ほとんど配向は示さず，フォルガー岬コア試料については面配向は示したものの線配向は示さなかった。もし結晶粒の伸長が氷河の流動による変形が原因で起こるならば，氷において予察的に示されたように[11] あるいは，他の材料で広範に示されているように[8,9,12] 形態学的な線配向を持つと考えられる。このような見地に立つと本論文に示されたような伸長が氷河の流動によって起こされると考えることは困難である。

先に述べたように本研究に用いた二つの試料の結晶粒径は同じ氷河あるいは深層氷内の他の位置で測定された粒径よりも大きかった[5,7]。このため氷河における結晶成長過程が，このような結晶の形態の形成に大きな役割を果たしている可能性がある。すなわち氷河内における結晶成長速度の異方性によって，このような結晶粒の形態が決定されるのならば，結晶軸方位が優先配列することによる以外は形態学的配向をもつ必要はない。このようにして，氷河の氷に見られる特徴的な形態は，成長速度の異方性によることが考えられる。

本研究に用いた氷試料は，第3次北海道アラスカ氷河調査隊（隊長：東　晃北海道大学工学部教授）およびオーストラリア南極局（W. F. Budd 博士）によってもたらされたものであり，メンデンホール氷河氷の解析によって得られた成果は同調査隊の業績の一部である。

文　献

1) Bader, H. 1951 Introduction to ice petrofabrics. *J. Geol.* **59**, 519–536.
2) Rigsby, G. P. 1968 The Complexities of three-dimensional shape of individual crystals in glacier ice. *J. Glaciol.* **7**, 233–251.
3) Kizaki, K. 1969 Ice fabric study of the Mawson region, East Antarctica. *J. Glaciol.* **8**, 253–276.
4) Narita, H., Maeno, N. and Nakawo, M. 1979 Structural characteristics of firn and ice cores drilled at Mizuho station, East Antarctica. Mem. National Inst. Polar Res. Special Issure, No. 10, 48–61.
5) Higashi, A., Matsuda, M., Shōji, H. and Ohtomo, M. unpublished.
6) Budd, W. F. 1966 The dynamics of the Amery Ice Shelf. *J. Glaciol.*, **6**, 353–358.
7) 若浜五郎 1977 南極アメリー棚氷，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．極地氷床氷の物理的化学的研究，99–108.
8) Underwood, E. E. 1970 Quantitative stereology, Addison-wesley, Reading, Mass, 48–79.
9) DeHoff, R. T. and Rhines, F. N. 1968 Quantitative Microscopy, McGrow-Hill, N. Y., (計量形態学，牧島邦夫監訳，内田老鶴圃新社，1972年，132–137).
10) 諏訪紀夫 1977 定量形態学．岩波書店，60–65.
11) Budd, W. F., 松田益義 1974 二軸クリープ圧縮における多結晶氷の選択方位性について．低温科学，物理篇，**32**, 261–265.
12) 和泉　修・諸住正太郎・寺沢正武 1972 金属組織写真集 非鉄材料編，日本金属学会，130–145.

Summary

Studies were made of a correlation between the crystallographic axes and shape of an individual single crystal of a crystalline aggregate, using two samples, which had a typical fabrics pattern of the four-maxima type, one from Mendenhall Glacier, Alaska, U. S. A. (Fig. 1) and the other a boring core at a depth of 324 m of Cape Folger, Antarctica (Fig. 2). The individual grain of the crystalline aggregate was approximated to an ellipsoid, then the length of three axes of the ellipsoid were measured. The samples had a flattened and elongated form. Mean axial ratio (R) was 0.31 for the Mendenhall Glacier ice (Table 1), and 0.46 for the Cape Folger boring core (Table 2). Crystallographic axes of the single crystal were determined by the method of optical reflection utilizing a piece of hoar condensed on the surface of the crystal, or by x-ray Laue photography. The result shows that the crystallographic axes correlated in most cases with the axes of the ellipsoid ; that is, the longest and the shortest axis of the ellipsoid are coincident with one of the a-axes and the c-axis of a crystal respectively (Tables 1 and 2).

As it is considered sufficiently well that the crystalline aggregate formed by such elongated crystals may have a stereologically oriented structure, samples were analyzed by introducing the stereological method. No sign of linear oriented structure was given from both samples. The Mendenhall Glacier sample showed almost an isometric structure (Figs. 4-a and b), and the Cape Folger boring core sample indicated a planar oriented structure. If the correlation

is originated by the effect of glacier flow, it is strongly supposed that the result of the stereological analysis shows a linear oriented structure. Consequently, it is considered that the factor in determining the shape of the individual crystal of a glacier is not glacial flow but anisotropy in growth rate while it grows in the glacier or the ice sheet.