



Title	半自動多結晶氷光軸解析の開発
Author(s)	鈴木, 義男; SUZUKI, Yosio
Citation	低温科学. 物理篇, 31, 45-56
Issue Date	1973-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18219
Type	departmental bulletin paper
File Information	31_p45-56.pdf



半自動多結晶氷光軸解析器の開発*

鈴木 義 男
(低温科学研究所)
(昭和48年10月受理)

I. 粒度解析と光軸解析

多結晶氷(雪を含む)の諸性質はその構造に大きく依存するので、構造解析は多結晶氷の研究に欠くことができない。解析は通常2次元断面について行なわれ、統計的手法で処理されるので、多数の結晶粒についての計測が必要となる。

2次元断面の構造解析はまず結晶粒界の確認から始まる。その手段としては、たとえばイ)粒界エッチング法がある。また空孔度の大きい雪では、結晶粒と空孔の境界は、ロ)アニリン法(空孔をアニリンでうめる)¹⁾²⁾、ハ)染色法(氷の部分だけ青色に着色する染料を用いる)²⁾などで明らかになる。この場合、結晶粒同志の境界は形態から判読する(くびれの部分を境界とする)。以上、イ)、ロ)、ハ)とも試料薄片を作る要はなく、一面のみ処理、反射光で観察する。

隣接結晶粒が偶然同一光軸方位をもつ確率は極めて少ないから、光学軸方位のそろった連結領域で単結晶粒を定義してもよい。この時、光軸方位の完全情報は必要ではなく、隣接結晶粒間の光軸方位の差が判ればよい。実際には、ニ)試料薄片の直交ニコル下のオルソスコープ像の照度が、粒子判別の条件に使われる。

粒界を明らかにした上で、各結晶粒の大きさ形などの分布、単位体積あたりの境界面積など、幾何学的構造の解析を行なうことを便宜上以下**粒度解析**とよび、各結晶粒の光軸方位を測定することを**光軸解析**とよぼう。

現在まで、粒度解析は積雪試料についてはロ)、ハ)等の反射光写真²⁾、氷河水についてはニ)の透過光写真³⁾を用い手動計測により、また光軸解析はおもに氷河水について、ニ)の写真を参照しつつ、その薄片試料の各結晶粒について、ユニバーサルステージを用いて手動で行なわれてきた。いずれもきわめて多大の労力を要し、省力化がつとに望まれていたものである。

II. トモグラフィ⁴⁾⁻⁶⁾

粒度解析の自動化は、粉体、細菌や細胞の集合体等を対象に1950年代より研究が進み、当初のアナログ方式より最近ではデジタル処理方式が主流となり、商品化されたものもある。デジタル処理の要点は、試料全面を格子点群でおおい、各格子点毎にこれもデジタル化された粒子判別情報をとった後、電子計算機で隣接格子点間の情報を比較、一致すれば両格子点は同一粒子に属すると判定するのである。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1286号

光軸方位は、多結晶氷のすぐれた結晶粒判別情報であるから、各格子点毎に光軸方位の完全情報がえられれば、粒度解析と光軸解析をあわせた自動化が原理的には可能である。

この見地から、1960年代半ばより、スイス国立雪崩研究所で開発が進められているのがトモグラフ（薄片自動解析器）である。格子点数は標準としては $250 \times 250 = 62,500$ をとるようである。1試料の結晶粒数は数百程度であるから、1結晶粒あたり格子点も100以上となり、かなり複雑な形態の結晶粒も充分解析可能であろう。

結晶粒判別条件としては、円偏光によるコノスコープ上の（本質的には）4点の照度（精度1%）を用いた。したがって情報量は1格子点あたり $\log_2(4 \times 100) \sim 9$ ビットである。現在のところ、天頂角 θ についてはほぼ満足できる ($4\theta \sim \pm 3^\circ$) が、経角 ϕ の精度はよくないようである（このため、実際にはトモグラフは粒度解析にのみ使われているらしい）。スイスでは、経角方位精度の悪いのは光学系の不備によると考え改良を進めているというが、光軸方位測定の実用精度を、20 cm 径標準シュミットネット上で許容誤差 $(0.5 \text{ cm})^2 \times \pi$ とすれば、決定すべき情報量は $\log_2(10^2 \pi / 0.5^2 \pi) = \log_2 400 \sim 9$ ビットであり、上記の情報からこれを導くには100%の効率が必要で、結晶粒あたり100以上の格子点で計測することを考慮しても、實際上無理と思われる。

格子点あたりの情報収集時間は180 ms というから、62,500点の走査には約3時間を要する。なお、格子点情報から結晶粒界を認識し、標準的粒度解析データを得るに要する時間は、電子計算機 CDC 1604-A を用い約30分という。

走査時間が長いものにもかかわらず、方位精度の悪いことは、粒度解析と光軸解析を一体化するトモグラフの設計思想が、現在の光軸測定法による限り実用的にはあまり有利でないことを示すといえよう。実際、粒度解析だけならば、前述のように、結晶粒判別情報として直交ニコルのオルソスコープ像の照度のような不完全光軸方位情報を用いてよい。この時、走査は電子的に行なえ（例えばテレビカメラで撮影する）、データのデジタル化に要する時間を考えても、数万の格子点の走査は秒以下ですむであろう。一方、光軸方位は結晶粒毎に1回行なえばよいから、1回の測定に1秒（トモグラフの6倍）をかけても600結晶粒に対し10分ですむ。

III. 半自動光軸解析器

前節にのべたようにオルソスコープ像の照度を結晶粒判別条件に用いれば、粒度解析の高速化は達成されると思われるので、以下、光軸解析の自動化について考えることとしよう。

現在の4軸ユニバーサルステージによる手動光軸測定の手順は次の通りである：

手順1) 試料薄片の製作

手順2) 結晶粒界決定と測定点選定

a) 直交ニコル間の薄片のオルソスコープ像撮影

b) 要測定結晶粒に写真に番号記入

手順3) ユニバーサルステージで各結晶粒の光軸方位測定

a) 測定結晶粒の同定は写真を参照

- b) 測定点の重複，脱落を防ぐため，測定ずみ結晶粒は写真にマークをする。
- c) 測定結果の記録

手順4) 多数の結晶粒 (200 以上) について測定が終れば，結果をシュミットネットで整理する。

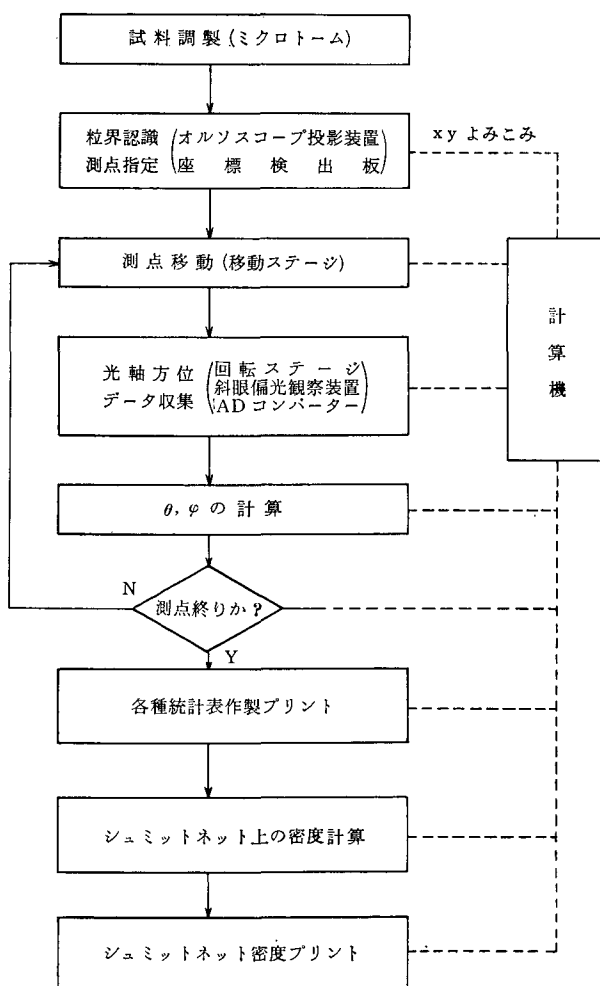
- a) 生記録をシュミットネットに打点
- b) ネット上の指定点 (約 400) 附近の打点密度計数
- c) 計数を指定点に記入
- d) 等密度線をひく

以上の各手順について省力化，自動化の可能性を考えてみる。

手順1)の省力化は適当な切削具の導入でなされる。試料厚みの要求精度は光軸測定法によるが，消光位法 (通常のユニバーサルステージ法はこれに含まれる) では低く，照度法 (後述) では高い。市販マイクロームの改造で後者の要求にも充分応じられる。

手順2)は粒度解析に含まれる。ただし，自動粒度解析はイ)相当高額と予想される，ロ)光軸解析器に後から容易に附加できる，の理由から，手順2)は一応自動粒度解析とは分離して，関連する手順3a, b)とあわせて次のような半自動システムを提案する。すなわち，手順2)で試料台にのせた試料全面のオルソスコープ像を座標検出板に投影し，板上で手動で測定点を指示するとその座標 x, y が検出板で検出され制御電算機によみこまれ，手順3a, b)はこの電算機が試料台をのせた移動ステージを制御，測定点を順次測定装置下に移動させる。

光軸測定は，もっとも単純には通常のユニバーサルステージに上記の移動ステージをつけ，適当な消光位検出装置を用いて，手動の場合と全く同じ操作で自動化することが考



第1図 光軸解析器システム図

えられるが、手動の場合、消光位検出はかなり人間の感覚的総合的判断に依存しているので自動検出の動作の安定性に問題があろう。さらに、移動ステージのためかなりの重量となるユニバーサルステージのいくつかの軸のまわりに往復回転運動を数回行なわすため、測定時間が相当長くなると思われる。それで次節の1軸回転法の実用化が望まれる。

手順 4a, b) は電算機で容易に計算でき、4c) はタイプライター出力でよく、XY レコーダーを用いて 4d) まで行なう要はない。

以上により、粒度解析と分離した半自動光軸解析器として、第 1 図のようなシステムが考えられる。

IV. 斜眼 1 軸回転法

平行光線による次のような偏光観察装置を考える。すなわち、直交座標系 \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} をとり、実効視線軸 (試料内の光線進行方向) を \bar{Z} 方向、偏光板、検光板は $\bar{X}\bar{Y}$ 面に平行、その偏光軸はそれぞれ \bar{X} , \bar{Y} 方向とする。この座標系を検出座標系とよぶ。

この直交偏、検光板にはさまれた氷の C 軸の検出座標系における天頂角を $\bar{\vartheta}$ 、経角を $\bar{\varphi}$ とする。すなわち、 \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} , C をそれぞれその方向の単位ベクトルとすると、

$$\left. \begin{aligned} (C, \bar{Z}) &= \cos \bar{\vartheta} \\ (C, \bar{X}) &= \sin \bar{\vartheta} \cdot \cos \bar{\varphi} \\ (C, \bar{Y}) &= \sin \bar{\vartheta} \cdot \sin \bar{\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

この時、試料内を \bar{Z} 方向に通過した、波長 λ の単波長光の照度は

$$I = I_{\bar{\vartheta}} \cdot I_{\bar{\varphi}} \quad (4.2)$$

$$I_{\bar{\varphi}} \propto \sin^2 2\bar{\varphi} \quad (4.3)$$

$$I_{\bar{\vartheta}} \propto \sin^2 (A \sin \bar{\vartheta}) \quad (4.4)$$

$$A = \pi \frac{d(\varepsilon - \nu)}{\lambda} \quad (4.5)$$

与えられる。ここに、 ν は正常光の、 ε は C 軸に直角方向に進行する異常光の屈折率で、 d は \bar{Z} 方向の試料厚である。

いま、平行平面をもった氷試料を観察する。試料平面に XY 面がある試料に固定された直交座標系 XYZ を試料座標系とよぼう。氷試料の C 軸の試料座標系における天頂角、経角を ϑ , φ とする。 \bar{Z} と Z を一致させて試料を Z 軸のまわりに回転させると、 ω を X と \bar{X} との一致した時を基準とした試料の回転角とすると、

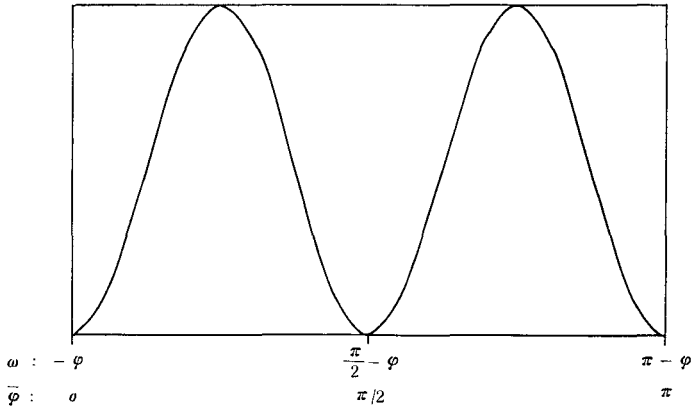
$$\bar{\varphi} = \varphi + \omega \quad (4.6)$$

$$\bar{\vartheta} = \vartheta \quad (4.7)$$

したがって、この時の検出照度曲線は第 2 図のようになる。

もし、 $0 < A \leq \frac{\pi}{2}$ なら、 $\bar{\vartheta}$ は $I_{\bar{\vartheta}} \left(= I \left(\bar{\vartheta}, \frac{\pi}{4} \right) \right)$ の一価関数で $I_{\bar{\vartheta}}$ より $\bar{\vartheta}$ 、すなわち ϑ が一定的にきまる。 φ は消光位の ω より

$$\varphi = 90n - \omega \quad (n = 0, 1, 2, 3) \quad (4.8)$$



第2図 試料回転軸が検出光線軸と一致した時の検出照度曲線 ($\pi \leq \bar{\varphi} \leq 2\pi$ は省略した。この部分は π に関し図と対称である)。

と判るが、一意的にはきまらない。

この Z 軸のまわりの4回対称性は、 Z 軸と \bar{Z} 軸とが平行でなければくずれ、 φ を一意的にきめることが可能となる。 Z の傾け方にはいろいろのものが考えられるが、ここでは、 Z が検出座標系に対し、天頂角 α 、経角 $\pi/4$ の場合を調べてみよう。検出座標系を \bar{Z} のまわりに $\pi/4$ 回転した座標系を $\bar{X}_0 \bar{Y}_0 \bar{Z}_0 (= \bar{Z})$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} (Z, \bar{Z}_0) &= \cos \alpha \\ (Z, \bar{X}_0) &= \sin \alpha \\ (Z, \bar{Y}_0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

試料の回転基準を、 X 軸が $\bar{Z}_0 \bar{X}_0$ 面を通る時とし、この時の試料座標系を $X_0 Y_0 Z_0$ とすると

$$\left. \begin{aligned} \bar{Z}_0 &= -\sin \alpha X_0 + \cos \alpha Z_0 \\ \bar{Y}_0 &= Y_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

試料が Z 軸のまわりに ω だけ回転すると、 C 軸は $X_0 Y_0 Z_0$ 系に対し天頂角 ϑ 、経角 $\varphi + \omega$ となるから、

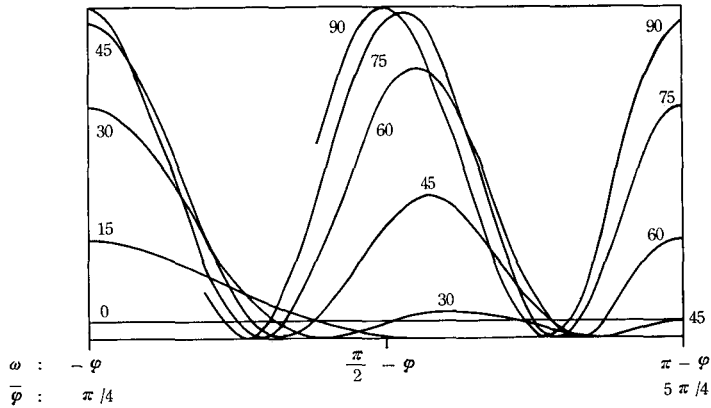
$$\left. \begin{aligned} (C, Z_0) &= \cos \vartheta \\ (C, Y_0) &= \sin \vartheta \sin (\varphi + \omega) \\ (C, X_0) &= \sin \vartheta \cos (\varphi + \omega) \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

この時の C 軸の $\bar{X} \bar{Y} \bar{Z}$ 系に対する天頂角を $\bar{\vartheta}$ 、経角を $\bar{\varphi}$ とすると、 $\bar{X}_0 \bar{Y}_0 \bar{Z}_0$ 系に対しては $\bar{\vartheta}$ 、 $\bar{\varphi} - \frac{\pi}{4}$ であるから、

$$\left. \begin{aligned} (C, Z_0) &= \cos \bar{\vartheta} \\ (C, \bar{Y}_0) &= \sin \bar{\vartheta} \sin \left(\bar{\varphi} - \frac{\pi}{4} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

(4.10) と C の内積を作り、(4.11), (4.12) を用いると、

$$\left. \begin{aligned} \cos \bar{\vartheta} &= -\sin \alpha \sin \vartheta \cos (\varphi + \omega) + \cos \alpha \cos \vartheta \\ \sin \bar{\vartheta} \sin \left(\bar{\varphi} - \frac{\pi}{4} \right) &= \sin \vartheta \sin (\varphi + \omega) \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$



第3図 試料回転軸 Z を検出座標系の \bar{Z} に対し, \bar{X}, \bar{Y} の2等分方向に α だけ傾けた時の検出照度曲線 ($\alpha = \pi/8, A = \pi/2$)。横軸は ω の線形目盛。 ω について変域 π だけ示した。残りの変域 π は図の右縦軸に関し対称。

(4.2~5) および (4.13) による, $\alpha = \pi/8, A = \pi/2$ の時の計算値を第3図に示した。

ω と φ の関係は ϑ に依存し非線形であるが, $\varphi = \pi/4, 5\pi/4$ では ϑ に無関係に $\omega = -\varphi, \pi = \varphi$ と一致する。この点では, $\bar{\vartheta} = \vartheta + \alpha, |\vartheta - \alpha|$ である。照度を ϑ, ω の関数として $I(\vartheta, \omega)$ とすると, $I(\vartheta, -\varphi)$ は $0 \leq \vartheta \leq \pi/2 - \alpha$ で, また $I(\vartheta, \pi - \varphi)$ は $\alpha \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{2}$ で ϑ とともに単調に増大する。これらの範囲で $I(\vartheta, -\varphi)$ は ω の変化に対する $I(\vartheta, \omega)$ の最大値を, また $I(\vartheta, \pi - \varphi)$ は最小極大値を与える。ただし, 第1表にみるように, いまの場合, $I(\vartheta, -\varphi)$ で $\vartheta \geq 50^\circ, I(\vartheta, \pi - \varphi)$ で $\vartheta \leq 40^\circ$ は事実上判別不能なので, $I(\vartheta, -\varphi)$ を $0 \leq \vartheta \leq 45^\circ, I(\vartheta, \pi - \varphi)$ を $45^\circ \leq \vartheta \leq 90^\circ$ の測定に用いるのがよい。

第1表 $I(\vartheta_1, -\varphi) \equiv I(\vartheta_2, \pi - \varphi)$ の値

具体的には, ω の 360° の連続変域を適当に量子化し (例えば 2° おき), 各量子点での照度のデジタル化情報を計算機に送る。計算機は, 最大照度値 I_{\max} , 最小極大値 I_{\minimax} と対応する ω の値, ω_1, ω_2 を探す (ω_1, ω_2 は多義のこともある)。 ω_1 が一意的にきまれば $I_{\max} = I(\vartheta, -\varphi)$ だから, ϑ を I_{\max} より計算し, また $\varphi = -\omega_1$ とする。 $\vartheta > 45^\circ$ では ϑ の精度が悪いので, $I_{\minimax} = I(\vartheta, \pi - \varphi)$ より ϑ をきめ, $\varphi = \pi - \omega_2$ とする (この ϑ の範囲では, $\vartheta \neq 90^\circ$ なら ω_2 は原理的に一意的にきまる。 $\vartheta = 90^\circ$ の時は, $I(\vartheta, -\varphi) = I(\vartheta, \pi - \varphi) = I_{\minimax}$ で, $\omega_2 = -\varphi, \pi - \varphi$ と2個になるがこれは全く同一の光軸を表わす。 $\vartheta \sim 90^\circ$ で測定誤差のため同様な2個性が表われるが, これは ϑ の他の値における ω_2 の誤差と本質的

ϑ_1 (°)	ϑ_2 (°)	$I(\vartheta_1, -\varphi) \equiv I(\vartheta_2, \pi - \varphi)$	
		$A = 90^\circ$ (%)	$A = 85.5^\circ$ (%)
—	30	0	0
—	40	2	2
0	45	5	5
5	50	11	10
10	55	19	17
15	60	30	28
20	65	43	40
25	70	57	53
30	75	70	64
35	80	81	75
40	85	89	85
45	90	95	91
50	—	98	96
60	—	100	99

に同じもので、 ω_2 としてどちらを採用してもよい。

以上の方法は、照度を用いるので、試料厚み、試料両面の平行度の精度が問題となる。 $A=\pi \times 0.95/2$ とした時の $I(\vartheta, -\varphi)$, $I(\vartheta, \pi-\varphi)$ の値を第1表にあわせて示した。これによると例えば $A=85.5^\circ$, $\vartheta=90^\circ$ の試料は $I(\vartheta, \pi-\varphi)=91\%$ で、これを $A=90^\circ$ として解析すれば $\vartheta \sim 87^\circ$ をうる。また、 $A=85.5^\circ$, $\vartheta=50^\circ$ のものは $I(\vartheta, -\varphi)=96\%$ で、 $A=90^\circ$ とすると $\vartheta \sim 46^\circ$ となる。ただしこの場合は $I(\vartheta, \pi-\varphi)=10\%$ でこれで解析すれば $\vartheta \sim 49^\circ$ がえられる。すなわち、可能な限り $I(\vartheta, \pi-\varphi)$ を使う方が A の誤差による ϑ の誤差は少ない。いずれにしても、 A の誤差を5%におさえれば、それによる ϑ の誤差は3°以内におさえられるであろう。

以上の斜眼一軸回転法は、本質的にはコノスコープ像のある円周上の全点の照度データを収集するのと同様である。トモグラフの場合はこの中の4点 (ω に関して $\pi/2$ づつはなれた定時点である。第3図でどの位置にくるかは φ に依存する) の照度だけを用いたわけで、われわれの場合は φ の決定には極大値の決定という形で全点の情報を使っているので、 φ の精度がトモグラフに比べてよくなるものと思われる。いま論じた $A=\pi/2$ の場合、 ϑ の決定には1点の強度 $I(\vartheta, -\varphi)$ または $I(\vartheta, \pi-\varphi)$ しか利用しなかった。より多くの強度を利用すれば、 $A > \pi/2$ の場合、また光源が非単色光の場合も当然 ϑ の一意的決定は可能であろう。

5893 N_a に対し氷は $\varepsilon=1.3107$, $\nu=1.3093$ であるから、 $A=\pi/2$ になるための試料の厚さ D は、

$$(D/\cos \alpha)(\varepsilon-\nu)/\lambda = 1/2 \quad (4.13)$$

から、 $\alpha=22.5^\circ$ に対し

$$D = 0.194 \text{ mm} \quad (4.14)$$

となる。氷をこの厚さに $\pm 2\%$ 位の精度で仕上げるのは必ずしも困難ではないが、大形の試料に対してはもう少し厚い方がとり扱いやすい。 $A=\pi$, あるいは $A=2\pi$ にした時の照度曲線については、次報でのべよう。

実際にこの方法を前節のシステムに組み込むには、移動ステージをのせた試料台を連続回転させておく。1測点について、 ω の 360° の変域の照度データを収集したら、移動ステージは直ちに測点を移動し、次のデータの収集にかかる。この時 ω のどの点からデータを取り初めてもよい。試料台を120 rpm で回転させれば、1測点のデータ収集は0.5 sである。移動時間を0.5 sとすれば、1測点あたりあわせて1 sですむ。計算機は、移動時間中に粗データから、 ϑ , φ を算出できるであろう。

V. シュミットネットについて

a) 記録と整理

シュミットネットの2次元極座標 r , β と光軸の試料座標系における天頂角 ϑ , 経角 φ の関係は、

$$\left. \begin{aligned} r &= a\sqrt{1-\cos \vartheta} \\ \beta &= \varphi \\ a &: \text{定数 (標準 10 cm)} \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

シュミットネット上の指定点 r_0, β_0 附近の光軸密度は、手動計数では、

$$r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\beta - \beta_0) \leq \left(\frac{a}{10}\right) \quad (5.2)$$

をみたく r, β をもつ光軸数を数え、全光軸数で割る。式 (5.2) をみたく光軸は方位球面上で (r_0, β_0) の対応点 (ϑ_0, φ_0) をふくむ $2\pi/100$ の立体角をはるが、その方位球面上の形は ϑ_0 に依存する。これをさけるには、(5.2) の代りに

$$\sin \vartheta \cos \varphi \sin \vartheta_0 \cos \varphi_0 + \sin \vartheta \sin \varphi \sin \varphi_0 + \cos \vartheta \cos \vartheta_0 \geq 0.99 \quad (5.3)$$

を用いればよい。小形制御用電子計算機を用いる場合は、 (ϑ, φ) がどの代表点に属するかを (5.2) 又は (5.3) で計算するのは非常に時間がかかるので、テーブル索引法* を用いるのが現実的である。この時、(5.2) を用いるかを (5.3) 用いるかはテーブルの違いだけであるから、(5.3) を用いるのがよい。

b) プリントフォーマット

手動の時、密度計算の指定点はシュミット円内に $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 格子点約 320、円周上に円弧約 1 cm 毎に 63 点をとる。標準タイプライタ (10 字/時, 6 行/時) で正方格子を作るには 5 字 3 行毎に印字し直径 10 時の円を用いればほぼ手動と同じ割合になる。正方格子を使う必然性はないから、1 字とび行間なしの方がよい様に思える。この時、1 字あたりの面積は $1/30$ 吋² であるから、

イ) 5 吋径、水平径上 25 点、垂直直径上 29 点、代表点数約 590

ロ) 4 吋径：水平直径上 21 点、垂直直径上 25 点、代表点数約 380

のいずれかが適当であろう。

なお、大型計算機を使い、(5.3) より (ϑ, φ) の帰属代表点をきめ、正方格子フォーマットで出力させるプログラムは概に使われている⁷⁾。

* 密度計算用テーブルはいろいろ考えられるが、(5.3) が複雑であることと 1 測点が複数個の代表点に属しうることで必要容量がふえる。1 例としては次のものが考えられる。

6b ⋮	8b ⋮	8b ⋮	10b ⋮
ϑ_n	φ_n	Δ_n	k_n

これは、 $\vartheta = \vartheta_n, \varphi_n \leq \varphi \leq \varphi_n + \Delta_n$ なる (ϑ, φ) は、代表点 k_n に属するというテーブルである。 $\vartheta_n \leq \vartheta_{n+1}$ 、また同一の ϑ_n に対し $\varphi_n < \varphi_{n+1}$ で整理されているとする。1 つの代表点に対し (5.3) 式の ϑ は最大 16.2° かわるので、 ϑ を 2° おきに量子化した時、1 つの代表点には 8 又は 9 の ϑ_n が属する。したがって、テーブル容量 (n の変域) $< 9 \times$ 代表点数となる。データ (ϑ, φ) は、 $\vartheta = \vartheta_n$ の部分だけサーチすればよいから、全体の比較回数は、

$$(\text{データ数}) \times (\text{テーブル容量}) \div (\vartheta \text{ の分割数})$$

の程度で、今の場合、 $500 \times 5000 \div 45 \sim 50000$ である。1 比較に平均 10 ステップ $100 \mu\text{s}$ かかるとしても 500 データの密度計数は 5 s で終了する。

最後に、このシステムにおけるデータの必要精度とそれに対応する必要メモリー数の推算を次表にかかげる。

第2表 データ精度と必要メモリー

項 目	精 度, そ の 他	必 要 メ モ リ ー
測 点 位 置 x, y	各 7b, 最大測点数 512	14b×512w
照 度 デ ー タ $I(\vartheta, \omega)$	7b, ω は 2° おき	7b×180w
測 定 結 果 ϑ, φ	2° おき, $\vartheta < 6b$, $\varphi < 8b$	14b×512w
ネ ッ ト 代 表 点	計数値格納, 代表点数 400~600	9b×400~600w
密 度 テ ー ブ ル		32b 3600~5400w

VI. おわりに

この論文は、1972年末極地研究センター（現、極地研究所）から、自動多結晶氷解析器開発の可能性の検討を依頼されたのに答えて書かれた。この機会を与えられたことを、同所の楠宏教授に感謝するとともに、この装置のすみやかな実用化を望むものである。

本研究の黒岩大助教授からは、私信、未発表論文を含めトモグラフ関係の多くの論文を貸与され、また若浜五郎教授にはいろいろ討議していただいた。深く感謝いたします。

なお、実用化のための基礎実験は、大学院学生中尾正義氏により進行中である。

文 献

- 1) 木下誠一・若浜五郎 1959 アニリン固定法による積雪の薄片。低温科学, 物理篇, **18**, 77-96.
- 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**, 77-86.
- 3) 黒岩大助・中谷吉郎 1970 Physical properties and internal structure of Greenland snow. *CREEL Res. Rept.* **89**, 33 pp.
- 4) Jaccard, C. 1967 Automatic thin section analysis with the tomograph, Reports and Discussions of IUGG Bern Assembly, 345-351.
- 5) Good, W. 1970 Ein automatisches System zur Aufnahme und Auswertung von kristallinen Dünnschnittpräparaten. Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesell. 180-187.
- 6) Good, W. 1973 Le neige de la station de Jarl-Joset. Preprint for 1973 Grenoble Assembly of the French Hydrotechnical Society.
- 7) 中尾正義 未発表.

Summary

A structural analysis of a polycrystalline ice (including snow) consists of two parts, geometrical and optical, where the former is concerned with such geometrical features as grain sizes, shapes, specific boundary areas and so on, while the latter with the optical direction of each grain.

A standard digital method for the former goes as follows: At every point of a grid on a sample, some information capable of distinguishing one grain from another

is collected, digitalized and fed to a computer, then a comparison is made successively between two sets of information taken at two adjacent points. If the two sets are equal, the computer recognizes that two points belong to a grain.

The optical direction of an ice grain offers the best information to distinguish it from other ice grains. Hence, if one uses it as a source of grain identifying information in the digital method, an optical analysis will be simultaneously done with a geometrical analysis.

Swiss researchers have been working on this principle to make a "Tomograph" (automatic thin section analyzer for snow) with a seemingly limited success. Though it gives a good result for a geometrical analysis, it takes rather a long time to treat a sample and yet optical direction measurements are not sufficiently accurate.

The reason is that they have attempted to obtain complete information on optical directions at every grid point. Since the number of grid points should be large (250×250 as standard) to give a good geometrical analysis, a very short time is allowed to collect optical information at one grid point.

Difficulties will be easily overcome if one separates geometrical from optical analyses. Indeed, as grain identifying information, incomplete information on optical directions such as brightness of an orthoscopic image is sufficient, which may be collected by electronic scanning as rapidly as less than one second over all grid points. After recognizing grains by geometrical analysis, one needs to measure optical directions only once for each grain. Since the number of grains is about one hundredth of that of grid points, even if one spends ten times as long as the case of a Tomograph, one can reduce a treating time to one tenth shorter than that of the Tomograph.

Thus a system of automatic structural analysis has been considered: firstly a geometrical analysis using brightness of an orthoscopic image as grain identifying information, and secondly an optical analysis to obtain information on the optical direction of each grain which has been identified by the geometrical analysis.

Because many devices for a geometrical analysis have been already commercially available, only the latter analysis is discussed in the following: In the above system, an optical analysis is based on the identification of a grain by the geometrical analysis. But since a geometrical analyzer is rather expensive, it is desired that an optical analyzer is able to work independently of a geometrical analyzer. Hence, a semi-automatic optical analyzer doing the following procedures is proposed:

- 1) The orthoscopic image of a specimen is projected on a "coordinate digitizer".
- 2) Points to be measured are indicated manually on the coordinate digitizer, which digitalizes their coordinates and feeds digitalized data to a computer.
- 3) The specimen is set on a moving stage which by the control of the computer carries the first point to a device of collecting optical information.
- 4) The device collects information and feeds it to the computer.
- 5) The computer controls the stage so as to carry the next point to the device, while translating the information into two angular data (zenithal and azimuthal) during the movement of the stage.
- 6) Repeat procedures 4) and 5) until the last point is treated.
- 7) The computer makes various statistical analyses, including Schmidt's net ana-

lysis.

The information collecting device should finish its operation at one point in, say, two seconds. Then, for a specimen of 600 grains, the scanning time would be reasonable 20 minutes. The manual method using a four-axis universal stage is difficult to be automated to do the operation in that short time, because the method requires many back and forth rotational movements around several different axes. Hence, a method using a one-way rotation around one axis is devised, which may be called as "tilted axis rotation method".

Consider an ordinary crossed Nicol system. Take a Cartesian coordinate system $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ with $\bar{x}\bar{y}$ -plane being parallel to the polarizer and the analyzer, \bar{x} -axis to the polarizing axis of the former and \bar{y} -axis to that of the latter. Consider another Cartesian coordinate system xyz , fixed on a parallel surfaced ice with z axis being normal to the surface. Let the zenithal and the azimuthal angle of the optical direction of ice referred to xyz system be ϑ and φ and those referred to $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ system $\bar{\vartheta}$ and $\bar{\varphi}$, respectively.

As is well known, when the ice is put between the polarizer and the analyzer with z parallel to \bar{z} and is rotated around z , the transparency of the whole system for a ray moving along \bar{z} is changed as shown in Fig. 2, where ω is the rotational angle of the ice with $\omega=0$ showing that x coincides \bar{x} . For a favorable thickness of the ice, ϑ is a one-value function of the maximal transparency, I_{\max} , and can be determined by it, while φ , being calculated from ω at I_{\max} , has four possible values.

This arbitrariness of φ -determination disappears if the rotational axis z is tilted to \bar{z} . As an example, a case where z tilts from \bar{z} by an angle 22.5° to the direction $\bar{x}+\bar{y}$ is considered. Fig. 3 shows the results of calculations of the transparency $I(\vartheta, \omega)$ for a monochromatic light of wave length λ moving along \bar{z} (in ice) and with the ice of thickness $D=\lambda \cos 22.5^\circ/(\epsilon-\nu)$, where ν is the refractive index of a normal ray while ϵ that of an extraordinary ray moving normal to the optical axis. The abscissa of Fig. 3 is expressed by the linear scale of the rotating angle, ω , with $\omega=0$ now showing x to be on z z -plane. Numbers indicate ϑ of curves. Note that $\bar{\varphi}$ is a complicated function of φ , ω and ϑ , but $\omega=-\varphi$ and $\pi-\varphi$ correspond to $\bar{\varphi}=45^\circ$ and 225° , respectively. The numerical values of $I(\vartheta_1, -\varphi)=I(\vartheta_2, \pi-\varphi)$ are tabulated in the third column of Table 1, where in the fourth column those for an ice thickness of $0.95D$ are also shown for their sensitivity to an ice thickness to be seen.

In order to obtain ϑ and φ from the transparency curves, one first searches the highest transparency I_{\max} , and corresponding ω_1 . If one gets two or three values for ω_1 , skip to searching for the lowest maximum transparency. If not, I_{\max} is surely $I(\vartheta, -\varphi)$ and $\varphi=-\omega_1$. Compute ϑ from I_{\max} . If one gets ϑ less than 45° , regard it as a true value. If not, one may rather use $I(\vartheta, \pi-\varphi)$ for determining ϑ , because $I(\vartheta, -\varphi)$ is insensitive to ϑ ($>50^\circ$) as seen from Table. 1. Now, search for the lowest maximum $I_{\min\max}$ and corresponding ω_2 . Because ϑ is now larger than 45° , $I_{\min\max}$ is surely $I(\vartheta, \pi-\varphi)$. One has only one value for ω_2 except in case $\vartheta\sim 90^\circ$, where one has two ω_2 values, ω_2 and $\omega_2+\pi$. Here one may choose either one. φ is clearly given by $\pi-\omega_2$ and ϑ is computed from $I_{\min\max}$ giving a value larger than 45° . Above procedures can be applied to the case where an ice thickness is less than D . If it is

thicker than D , determination of ϑ and φ becomes very complicated.

From Table 1, it is seen that, if one measures the transparency to a 1% accuracy, one can get ϑ in an accuracy of 1° , and a comparison between columns 3 and 4 shows that a 5% error in the ice thickness will give less than an error of 3° for ϑ .

In section 5, procedures of Schmidt's net analysis are discussed and a rough design of a computer program is shown.