

【付録】

氷の多結晶組織の観察

大伴 武都美 (北大・低温科学研究所)

1. はじめに

南極の氷床、海氷や高山の氷河、流氷、それに身近なところでは家屋の軒に下がるつらら、冷蔵庫や池の氷などは氷の多結晶でできている。多結晶とは、種々な結晶軸方位や形態をもった単結晶が集合して出来ているものであるが、これから述べる方法は、透明固態である氷の性質に着目し、透過偏光を使用して氷の多結晶の結晶組織を観察しようというものである。

2. 氷の結晶構造と光学の性質

氷の結晶を構成している原子は水素と酸素であり、水素二原子と酸素一原子で水分子が作られている。氷はこの水分子が規則正しく集合したもので、結晶学的な分類では六方晶系 (hcp, C_6 構造) と呼ばれるグループに属している。図1に示されているように氷結晶は、同一平面上にある三本の等価な結晶軸 (a 軸) とそれらに垂直な結晶軸 (c 軸) をもつ。

固態物質をその光学の性質に従って分類すると表1のようになる。この表から明らかなように、氷は光学的に異方性を持った結晶であり、光学の一軸性結晶に分類される。つまり、氷における光学的な一本の軸は結晶学的な c 軸と一致する。光学的異方体では一般に

光学的等方体 光学的性質に、方向による差異がない。一つの方向に進む光は通常光一つのみである。普通は複屈折の現象がない。	非結晶 等軸晶系の結晶
光学的異方体 光学的性質に、方向による差異がある。一般に、一つの方向に進む光は、たがいに速度を異にする二つの偏光に分かれる。その振動方向はたがいに直角である。複屈折の現象がある。	正方晶系の結晶 六方晶系の結晶
光学の一軸性結晶 光軸が一本あり、その方向は結晶軸と一致する。一つの方向に進む二つの偏光は通常光および異常光である。	斜方晶系の結晶 光学的弾性軸の各々および吸収軸の各々は結晶軸 a, b, c のいずれか一つと一致する。
光学的二軸性結晶 光軸が二本ある。一つの方向に進む二つの偏光は両方とも異常光である。	単斜晶系の結晶 光学的弾性軸のいずれか一つおよび吸収軸のいずれか一つは結晶軸 b と一致する。
	三斜晶系の結晶 光学的弾性軸および吸収軸は一般に結晶軸と一致しない。

表1 固態物質の光学的性質による分類。

坪井誠大郎著：偏光顕微鏡より引用。

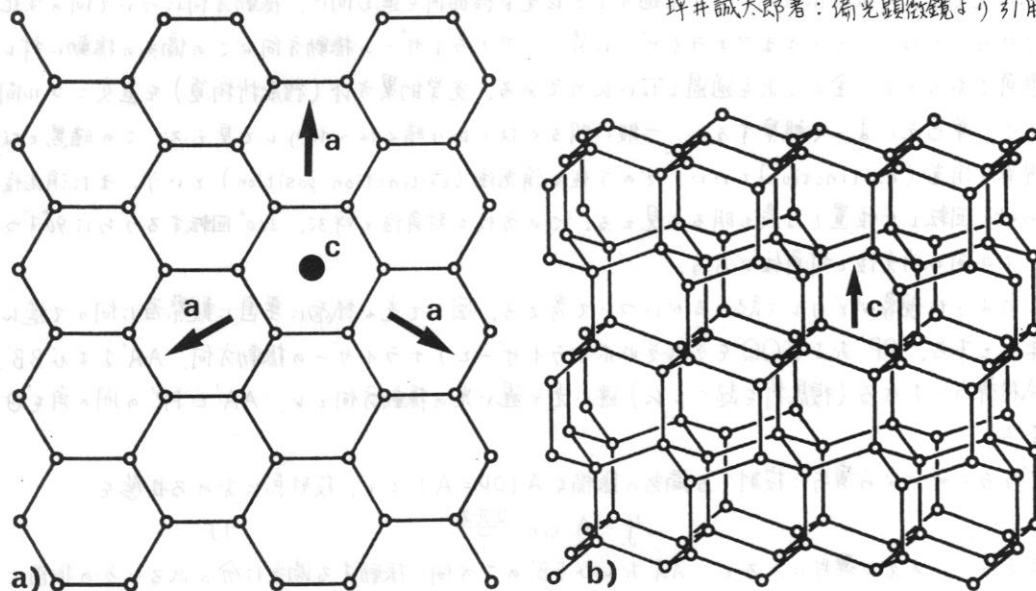


図1. 氷の結晶構造 ○印は酸素原子の位置。結晶主軸 (c 軸) 方向から見ところのが a 図。 a 軸から10度傾いた方向から見ところのが b 図。それぞれの図に結晶軸方向が図示してある。

一方向ごとに二つの屈折率がある。これに外から光が進入するときは、一つの入射光に対して二つの屈折光が得られる。この現象を複屈折という。しかるに、C軸の方向に光は、ただ一つの屈折率しかない。そのためにC軸を光軸 (optic axis) とも呼びわけである。

3. 偏光と偏光板

光の振動はその進行方向に垂直な平面内で起こる。通常の光の振動の様子は一般に複雑な振動も簡単な振動の重ね合わせとして考えることができる。偏光とは、振動がある特定方向にのみ限られたものである。最も簡単な偏光は、その振動方向が直線上に限られたもの、すなわち直線偏光である。通常 (偏光していない) 光をガラス面や水面に反射させると、一般に多少偏った光が得られる。その振動方向は光の進行方向に対して直角で反射面に平行である。

光学器械において偏光を得るには、ニコル (偏光) プリズムや偏光板を使用する。ニコルプリズムは、透明な方解石の結晶を特定の方向に切り磨き、それを組み合わせたものであり、偏光板は約10%のポリビニルアルコール (Polyvinyl alcohol) の水溶液を、水平に置いてガラス板上に放置乾燥し、厚さ0.1mm程度の透明なフィルムを作り、これを約90°Cに加熱して、一つの方に引き伸ばし、これを沃素-沃化カリウム水溶液に浸し、わずかに青色になったものを乾燥したものである。現在では光学器械を含めて、一般にはこの偏光板を用いている。

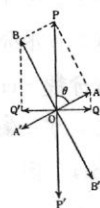


図2

4. 交叉偏光板下での単色光による観察

直交ニコル

互いに振動方向が直交する二枚の偏光板を通して透過する光を観察すると、暗黒に見える。この状態を直交ニコルと呼び、光源に近い偏光板をポラライザー、眼に近い偏光板をアナライザーと呼ぶ。直交ニコル間に光学的等方体を置き回転させながら観察すると、常に暗黒に見える。これはポラライザーを通してき光が結晶内を進む間に、振動方向について何の変化も与えることなく、そのままアナライザーに達し、アナライザーの振動方向がこの偏光の振動に対して直角であるので、全くこれを通過しないためである。光学的異方体 (複屈折物質) を直交ニコル間におき、単色光によって観察すると、一般に明るくはなり暗くはなりして見える。この暗黒となる現象を消光 (extinction) といい、その方位を消光位 (extinction position) という。また消光位から45°回転した位置では最も明るく見える。この方位を対角位と呼ぶ。360°回転するうちに90°ずつ隔って4回の消光位と対角位がある。

このような現象がどうして起こるかについて考える。図2で光が紙面に垂直に観察者に向かって進んで来るとする。PP' および QQ' をそれぞれポラライザーとアナライザーの振動方向、AA' および BB' を試料薄片における (複屈折を起こした) 速い光と遅い光の振動方向とし、AA' と PP' の間の角を θ とする。

ポラライザーから薄片に投射する偏光の振幅を A ($OP = A$) とし、投射点における状態を

$$y = A \sin \frac{2\pi x}{T} \quad 1)$$

で与える。この光が薄片に入ると、AA' および BB' の二方向に振動する偏光に分かれるがその振幅はそれぞれ

$$OA = A \cos \theta \quad 2) \quad \text{および} \quad OB = A \sin \theta \quad 3)$$

であって、薄片に入射した点における状態はそれぞれ

$$y_1 = A \cos \theta \sin \frac{2\pi x}{T} \quad (4)$$

および

$$y_2 = A \sin \theta \cdot \sin \frac{2\pi x}{T} \quad (5)$$

で与えられる。薄片の厚さを d とすれば、この両偏光が薄片を出る点においては、

$$y_1 = A \cos \theta \sin 2\pi \left(\frac{1}{T} - \frac{d}{\lambda_1} \right) \quad (6)$$

$$y_2 = A \cos \theta \sin 2\pi \left(\frac{1}{T} - \frac{d}{\lambda_2} \right) \quad (7)$$

となる。ただし λ_1 および λ_2 は薄片内における複屈折を起した両偏光の波長である。 λ_1 および λ_2 に相当する屈折率を n_1 および n_2 とし、この偏光の空気中における波長を λ_0 とすれば、

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n_1}, \quad \lambda_2 = \frac{\lambda_0}{n_2}$$

であるので、これを (6), (7) 式に入れると

$$y_1 = A \cos \theta \cdot \sin \left(\frac{2\pi x}{T} - \frac{2\pi d n_1}{\lambda_0} \right) \quad (8)$$

$$y_2 = A \sin \theta \cdot \sin \left(\frac{2\pi x}{T} - \frac{2\pi d n_2}{\lambda_0} \right) \quad (9)$$

を得る。すなわち、光が薄片を出る点における両偏光の位相差 δ は

$$\delta = \frac{2\pi d n_2}{\lambda_0} - \frac{2\pi d n_1}{\lambda_0} = \frac{2\pi d}{\lambda_0} (n_2 - n_1) \quad (10)$$

で表される。二つの偏光は薄片を出てからは、この位相差を保ったままアナライザーに達し、アナライザーは各偏光の OQ の方向における分振動の光を通過させる。その分振動の振幅は、図と式 (2),

3) から

$$OA \sin \theta = A \cos \theta \cdot \sin \theta = \frac{A}{2} \sin 2\theta$$

$$OB \cos \theta = A \sin \theta \cdot \cos \theta = \frac{A}{2} \sin 2\theta$$

すなわち、いずれも $\frac{A}{2} \sin 2\theta$ である。またその位相差 δ' は

$$\delta' = \pi - \delta = \pi - \frac{2\pi d (n_2 - n_1)}{\lambda_0}$$

となる。アナライザーを通して眼に達する光はこの両分振動の合成されたものであって、その合成波の振幅 A' は

$$A'^2 = A^2 \sin^2 2\theta \cdot \cos^2 \frac{\delta'}{2} \quad (11)$$

となり、この式に式 (10) を代入すると

$$A'^2 = A^2 \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{\pi d (n_2 - n_1)}{\lambda_0} \quad (12)$$

となり、この式は、光学的異方体の薄片を直交ニコル面におき、単色光を通るとき眼に達する光の明るさを一般的に与える式である。すなわち直交ニコル面で見られる明るさは 1) 薄片の性質 (厚さ d , 屈折率 n_2, n_1) 2) 入射光の性質 (振幅 A , 波長 λ_0) および 3) 薄片の方位 (θ) により決定されることになる。

5. 薄片のレターデーション

(12) 式の右辺にあらわれに $d (n_2 - n_1)$ 項について再び考えてみる。光学的異方体内に光が入射したとき、二つに分かれた (振動方向は直交する) 偏光において、速度の遅い光と速い光の遅れ (retard) について考えてみる。薄片において、速い方の波長を λ_2 とすると、速い方の光は d/λ_1 回だけ振動して薄片がら出てくるのに対し遅い光は d/λ_2 回だけ振動して出てくることになる。すなわち、

薄片の厚さ d に対し速い方の光は速い方の光よりも $d/\lambda_2 - d/\lambda_1$ 回だけ多く振動して初めて薄片からでてくる。しかし各単色光の振動の周期は一定であるから速い方の光が薄片から出るときには速い方の光はすでに距離 R

$$R = \lambda_0 \left(\frac{d}{\lambda_2} - \frac{d}{\lambda_1} \right) \quad (13)$$

だけ先に進んでいることになる。この R を薄片のレターデーション (retardation) という。13) 式

に $n_1 = \frac{\lambda_0}{\lambda_1}$ $n_2 = \frac{\lambda_0}{\lambda_2}$ なる関係を入れると

$$R = d(n_2 - n_1)。$$

直交ニコル間で薄片を見ると、薄片の性質を決定するのはそのレターデーション R である。何故なら単色光をもって一定の方位に薄片をおいて観察し、明の明るさは R によって定まるからである。

6. 直交ニコル間における光学的異方体の白色光による観察

光学的異方体の薄片を直交ニコル間におき、白色光で観察すると色づいて見える。そして薄片を偏光板に平行に回転すると、回転に従って色はほとんど変化しないが、明るさは変化することがわかる。明るさの変化の様子は先に単色光の項に記した通りである。色づいて見える理由は以下の通りである。12) 式において、もし白色光を構成するいずれの単色光においても A^2/A_0^2 が等しいならば、薄片を透過した光において、それぞれの強度も等しく、色はあらわれない。しかし、実際には、光の波長 λ_0 と R が異なるためこの値が各単色光ごとに異なり、眼に達するときに白色光の割合とは異なり色づいて見える。この理由のために、薄片を観察して見える色は、虹とは異なり、種々の単色光の混合による混色であることに注意しなければならない。あらわれる干渉色は $R = d(n_2 - n_1)$ 式において、 $n_2 - n_1$ に順次に種々の値をあて、それぞれの $n_2 - n_1$ について、 R と d の関係を示すことによって Michel-Lévy の干渉色表を利用して得られる。ただし n_2 と n_1 は 2 で述べたように方位の関数であり、光学的一軸性結晶においては、C 軸方位と光の方向との方位差 θ によって決定される。

参考文献

この本引を書くにあたっては、次の二冊の本から多くの引用を行った。坪井誠太郎：偏光顕微鏡 (岩波書店), M. Born and E. Wolf: Principles of Optics 6th ed. (Pergamon Press). また図 1 の氷の結晶構造は、学習院大学のグループ (代表: 入沢寿美氏) が作成したプログラムを用いて北海道大学大型計算機センターの HITAC-M200H システムを利用して描いた。図 3 は、採掘と冒険 オム巻 (朝日新聞社) の成瀬康二: 氷河調査の初歩、から引用した。一般的参考書としては、若瀬五郎: 氷河の科学 (日本放送出版協会), 吉田順五: 雪の科学 (同左), 東 晃: 氷河 (中央公論社), 前野紀一: 氷の科学 (北文図書刊行会) などがある。