

偏光顕微鏡のしくみと観察方法

1. 偏光顕微鏡

鉱物の集合体である岩石等を顕微鏡で観察するためには、通常の顕微鏡ではなく、偏光板その他の付属装置の付いた偏光顕微鏡(図-1)で観察する必要がある。偏光顕微鏡を用いることによって、岩石の組織ばかりではなく、それを構成する個々の鉱物を判定できる。

偏光顕微鏡とその観察方法は19世紀に発明された画期的な技術であって、さまざまな分析機器が発達した21世紀の今日でも、岩石・鉱物を理解するために欠くことのできない技術である。

偏光顕微鏡には通常の透過型の他に反射光を利用して観察する反射顕微鏡(鉱石顕微鏡)がある。透過型と反射型が一体となった反射(落射)装置付きの偏光顕微鏡もある。透過型では不透明鉱物としてしか識別できない種々の鉱物を反射顕微鏡では識別できる。逆に透過型では識別できる非不透明鉱物(石英などの無色鉱物や輝石などの有色鉱物)を反射顕微鏡で識別するのは困難である。すなわち、両者は相補関係にある。

透過型の偏光顕微鏡で観察するには、薄片(通常カバーガラスをかけたプレパラート)を作成しておく必要がある。一方、反射型で偏光顕微鏡観察を行なうには、岩石チップを研磨した「研磨片」の作成が必要である。上述の透過・反射共用型で観察するにはカバーガラスをかけた「研磨薄片」を作成すればよい。研磨薄片の作成は偏光顕微鏡観察の後に、EPMA分析等の鉱物分析を行う場合にも必要である。



図-1 Nikon 製(OPTIPHOT2-POL) 偏光顕微鏡(透過)

2. 偏光顕微鏡（透過）で観察できる鉱物の性質

2-1 観察状態の区別

偏光顕微鏡による観察はニコルと呼ばれる偏光板(図-2)など, その使用する部品の種類によって, 次のように分けられる.

- (1) オルソスコープ orthoscope (ベルトラン・レンズを取り除いた状態のすべてをいう)
オープンニコル one nicol (単ニコル: 上方ニコルを除いた状態)
クロスニコル crossed nicols (直交ニコル, 十字ニコル: 上方ニコルを入れた状態)
- (2) コノスコープ conoscope (コンデンサーを入れ, 上方ニコル(=クロスニコル), ベルトラン・レンズを入れた状態, 400×程度の高倍率で判定)

ここではオルソスコープを例に, 偏光顕微鏡と岩石薄片鑑定の仕組みを簡単に説明する.

図-3のように, 光源から発した光は上方ニコルを入れない場合, 下方ニコル(ポラライザー)がある一方向の面で振動する光のみが透過する. 回転ステージ上の試料を通して対物レンズ, 接眼レンズを介して観察される. この状態をオープンニコルと言う.

対物レンズと接眼レンズの間には, 出し入れ可能な上方ニコル(アナライザー)がセットされていて, これを入れた状態をクロスニコルと言う. 上方ニコルは通過できる光の振動面が下方ニコルを通過できる光の振動面と 90° で交わるようにセットされており, 回転ステージ上に試料がない状態では視野が真っ黒に見える. 図-2の右側の状態である.

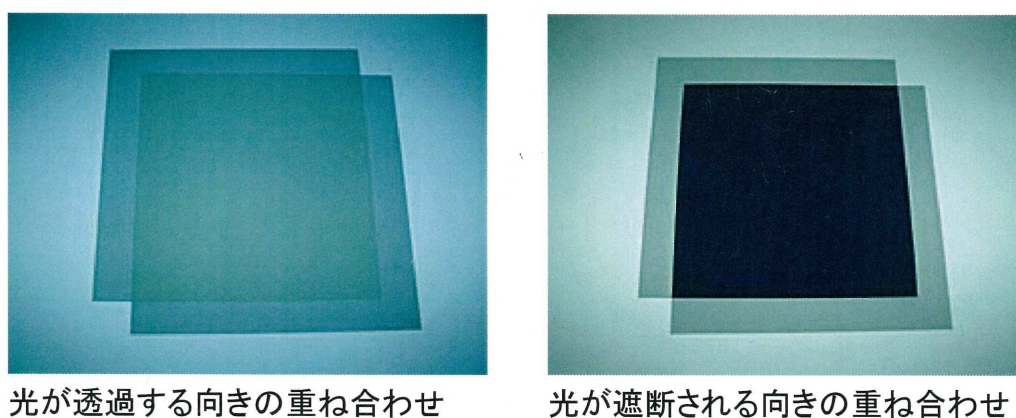


図-2 2枚の偏光板を重ね合わせた様子(日本博物館協会ホームページより)

岩石を構成する鉱物は様々な光学的性質を持っており, 後述する光学的等方体以外の鉱物を透過した光は2方向に分散(偏光)して進む. そのため, クロスニコルでも上方ニコルを通過できる成分が現れ, 視野に鉱物が見えるようになる.

オープンニコルでは自然光ではなく, 無色のサングラス(偏光板)をかけて見ているのに近い.

クロスニコルでは鉱物にきれいな色(干渉色)がついて見え, ステージを回転させると色が変わったり(多色性), 色が消えたり(消光)するものがあり, これらの性質を利用して鉱物名を同定する.

さらに, 岩石の組織を観察し, 鉱物組合わせなどをもとに岩石名などを決定するのが岩石薄片鑑定である.

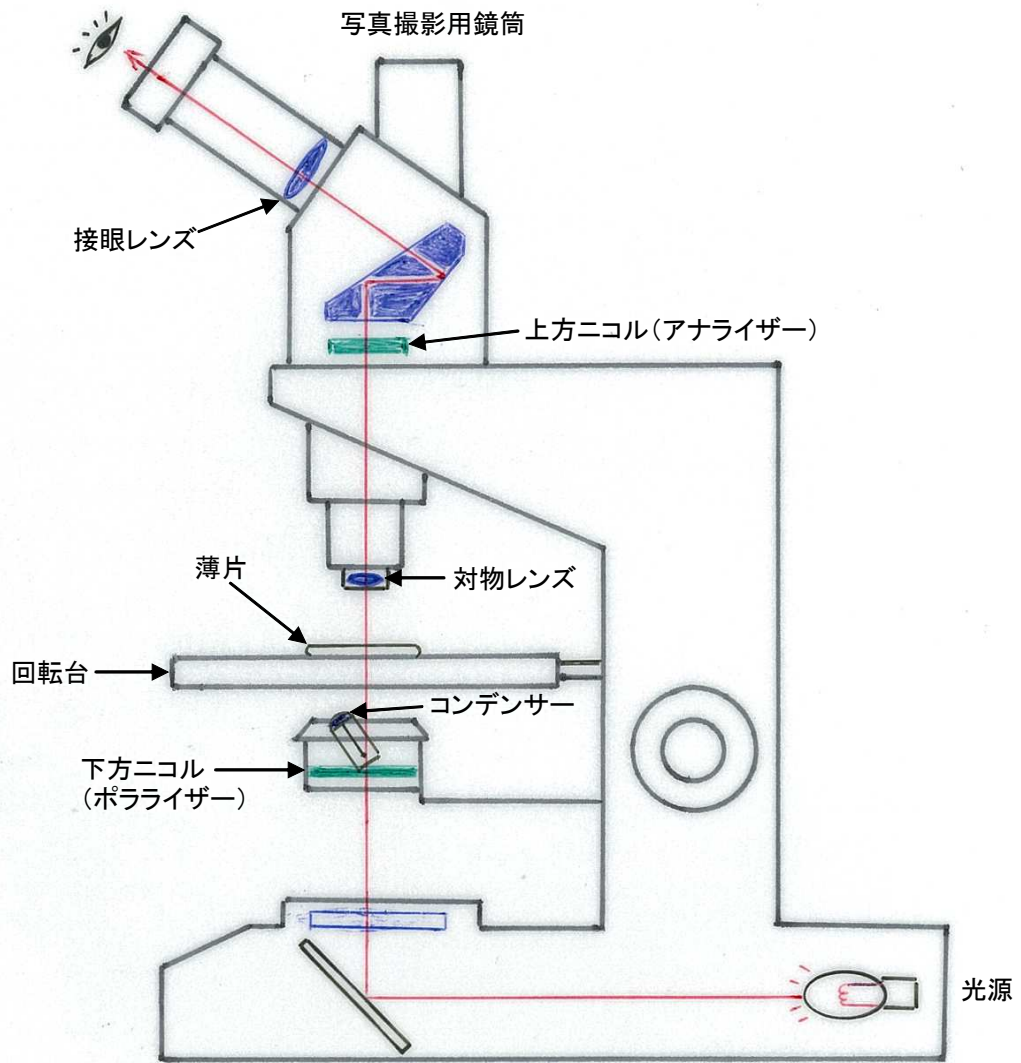


図-3 偏光顕微鏡 (透過型) の構造

2-2 観察内容

(1) オープンニコルによる観察

1) 大きさ (size)

顕微鏡下で、ある鉱物の大きさを大まかに知りたい場合は、視野の直径(または半径)がわかっているだけでよい。また、ある鉱物の大きさを正確にきめる場合は、はじめに接眼マイクロメーター(eyepiece micrometer)で何目盛かを読み取る。次に接眼マイクロメーター目盛の実長を対物マイクロメーター(stage micrometer)を標準にして測定すればよい。通常、対物マイクロメーターには、スライド・ガラスの中央に1mmを100等分した目盛が刻んである。すなわち、100倍で観察すれば、1目盛は0.01mmである。

2) 形 (form)

鉱物は、その鉱物特有の形をしていることもあれば、なんらかの理由によって、特有の形をしていないこともある。前者を自形(euhedral または idiomorphic)、後者を他形(anhedral または xenomorphic)という。両者の中間的なものを、半自形(subhedral または hypidiomorphic)という。他形であれば、形から鉱物の種類を鑑定できないが、自形であれば、その形からある程度判断できる場合がある。

3) へき開 (cleavage)

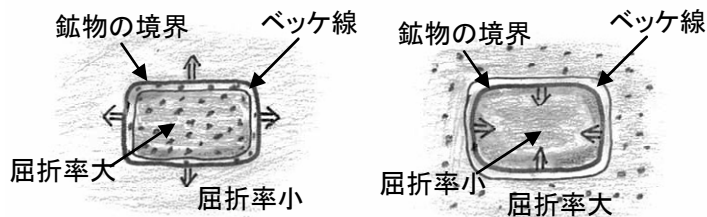
鉱物には、その結晶構造に由来する平行な割れ目であるへき開のあるものとないものがある。あるものは、鉱物によって、その現れる方向や、現れ方の強弱に特色がある。

4) 色 (colour)

鉱物には無色鉱物(colourless minerals)と有色鉱物(coloured minerals)とがある。前者は珪長質鉱物(felsic minerals)ともいう。無色鉱物は薄片にしたとき、無色透明である。後者は苦鉄質鉱物(mafic mineral)にほぼ相当する。有色鉱物は色づいて見える。ただし薄片下の色は、肉眼的に観察される色とは異なる。肉眼で黒っぽい角閃石や輝石も鏡下ではよく光を通し、褐色、緑色などを示す。ただし、不透明鉱物は薄片にしても光を通さない。

5) 屈折率 (refractive index)

鉱物の屈折率は1.4から3.2の範囲にある。顕微鏡下では、屈折率が0.05程度違う場合は、一見して区別できる。0.002という小さい違いでも調べることができる。薄片は屈折率1.54に調整したエポキシ系樹脂など(かつてはバルサムやレーキサイドセメント)に封じ込んであるが、一般にざらざらした感じやはっきりした輪郭を示すものは、屈折率が非常に高いか、逆に非常に低い。なめらかな感じのものは、樹脂の屈折率(1.54前後)に近いものである。2つの物質の屈折率の高低を簡単に比べるには、両者の境のベッケ線(Becke line)を見ればよい。屈折率の異なる2つの物質の境には、絞りをしぼって少し暗くすると、図-4のように光った線が見える。この光った線をベッケ線と呼ぶ。ベッケ線は2つの物質の接合面で乱反射が起こり、光は屈折率の高い鉱物の方に集るために生じる。ベッケ線はステージを下げる(あるいは鏡筒を上げる)と屈折率の高い方へ移動し、ステージを上げる(あるいは鏡筒を下げる)と屈折率の低い方へ移動する。すなわち、薄片と対物鏡の距離が離れると屈折率の高い方へ、近づくと低い方へ移動する。このことから、すでに屈折率のわかっている鉱物(あるいは樹脂)と比較しながら、ある鉱物の屈折率をおおまかに推定することができる。



矢印はステージを下げて(または鏡筒を上げて)薄片と対物鏡の距離を離れたときのベッケ線の移動方向.
このときベッケ線は屈折率の高い方から低い方へ移動する.

図-4 ベッケ線

6) 多色性 (pleochroism)

ステージを回転させたとき、鉱物の色が変わる現象を多色性という。どのように変化するかは鉱物によって特徴がある。ステージを回転させても色の濃淡が変わらない場合を多色性「なし」、わずかに認められれば「あり、ないし弱い」、明瞭であれば「強い」という。例えば黒雲母や普通角閃石は多色性が強い(図-5)。



図-5 多色性(例:普通角閃石)

7) 岩石組織

ある鉱物が岩石のなかで、どのような形をしていて、他の鉱物とどのような関係をもって存在するかは、きわめて大切なことである。例えば、火成岩であればその冷却速度に応じて特徴的な組織ができる。

各造岩鉱物の結晶作用の順序関係がわかることもある。堆積岩や変成岩は独特の組織をもつ。また、微小な断層、変形構造、孔隙の形態や量などさまざまな情報を得ることができる。

(2) クロスニコルによる観察

1) 干渉色 (interference colour)

薄片を白色光によってクロスニコルの下で観察するとき、ステージを回転するにつれて、色づいて見えたり、暗くなったりする。これを干渉色と呼ぶ。干渉色は鉱物の**複屈折**(birefringence または double refraction)によって生じる。クロスニコルの状態のとき、本来は光がまったく通過してこないで、例えばガラスを薄片にして間に挟んでも、暗黒に見える。複屈折とは鉱物の種類によっては鉱物を通過する光が振動方向の異なる2つの**偏光**に分かれるため、下方ニコルを通過したために振動面が一方向にそろった光も次に鉱物を通ることによって、上方ニコルの通せる光の振動面と直交しなくなるため、2方向の光が、それぞれ少しずつ上方ニコルを通過できるようになる。この2つの偏光は波長が互いに若干異なる(鉱物によって特徴がある)ため、互いに干渉して様々な色(干渉色)を呈することになる。ステージを回転しても常に暗く見える場合には、複屈折の大きさがゼロ(ガラスなどの非晶質物質やざくろ石などの等軸晶系の鉱物は通過する光が2手に分かれず、そのまま通るのでゼロ)か非常に小さいことを示している。ステージを回転したとき、例えば斜長石は白～灰～黒に見えるが、これは複屈折の大きさが小さい。赤～青～黄などカラーで見えるものは、複屈折の大きさが大きい。干渉色はオープンニコルで観察する「色」や「多色性」とは異なる現象で、天然の色とは直接の関係がない。干渉色(レターデーション*)と薄片の厚さの関係を示すカラーの図がつくられており、「ミッシェルレヴィの干渉色図表」と呼ばれている。

2) 双晶 (twin)

オープンニコルによる観察では、均質な1つの結晶に見える場合で、クロスニコルの下で観察すると、干渉色が異なる2つ、あるいはそれ以上の部分に分かれていることがある。これはたいてい双晶によるものである。鉱物によって双晶するものとしらないものがある。また、双晶形式も鉱物によって特徴があり、同じ鉱物でも、生成環境によって異なる。例えば斜長石のアルバイト双晶と呼ばれる双晶は後述する消光角と化学組成との関係が調べられており、「斜長石のアルバイト双晶の最大対称消光角法」でCa/Naの割合を推定することができる。

3) 累帯構造 (zonal structure)

鉱物はその個体のなかで、全体が一様の組成でないものがある。その場合もオープンニコルによる観察では均質な1つの結晶に見えるが、クロスニコルの下で観察すると、干渉色が異なるいくつかの部分に分かれる。その場合、一般には結晶の中心部と外側とで組成が違うことが多い。これを鉱物の累帯構造という。化学組成が違くと化学的性質も違ってくるので、干渉色の微妙な違いが出て、累帯構造が現れる。

4) 消光位と消光角

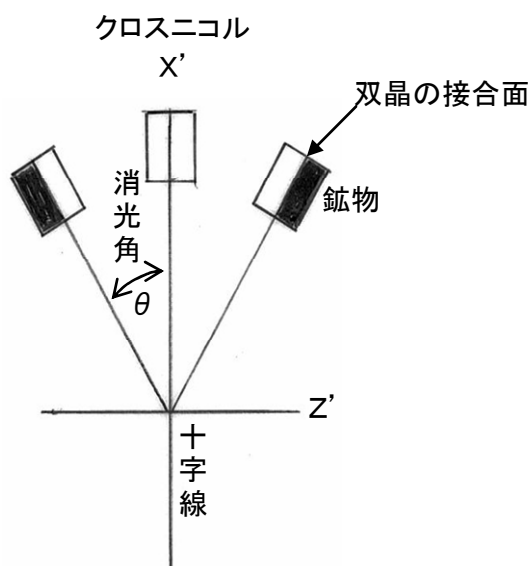
非晶質のガラスや等軸晶系のざくろ石など光学的に等方な鉱物をクロスニコルの下で観察すると、暗黒に見える。ステージを回転しても、常に暗黒である。ところが、光学的に異方な鉱物をクロスニコルの下で観察する場合、ステージを回転すると明るさが変化し、1回転の間に4回暗黒になるところがある。この暗黒になる現象を消光(extinction)といい、その位置を消光位(extinction position)という。この消光位が結晶軸(a, b, c など)の1つやへき開の方向に一致すると**直消光**(straight extinction)といい、一致しないと**斜消光**(oblique extinction)という。直消光の場合、消光角(extinction angle)はゼロであり、斜消光の場合、消光角はある任意の値を示す。ただし、

* レターデーション: 干渉色すなわち複屈折の大きさに関係する量で、薄片の厚さdとその薄片に垂直な方向の2つの屈折率の差 $n_2 - n_1$ との積のこと。すなわちレターデーション $R = d(n_2 - n_1)$ 。薄片では同じ鉱物であっても薄片に垂直な方向の2つの屈折率の差の値が異なるので、レターデーションの大きさは粒子ごとに異なる。

光学的分散の著しい結晶は消光位にも分散が起こり、白色光では完全に消光しないものがある(光の波長=色によって異なる消光角になっている)。

偏光顕微鏡は直交する上下ニコルを通る光の振動方向と視野の十字線とが一致するようにつくられており、直消光の場合、鉱物の伸長方向と十字線が一致すると暗黒になる。

斜消光の場合も、ものによって消光位はさまざまである。消光角(図-4)は鉱物の種類によって、また鉱物をどのような角度で切断したか、あるいは同じ鉱物でも化学組成の違いによって異なる。同じ鉱物の消光角はいくつか測って最大のもを参考にする。例えば単斜輝石の消光角は 45° に近いが、角閃石は 30° 以下である。



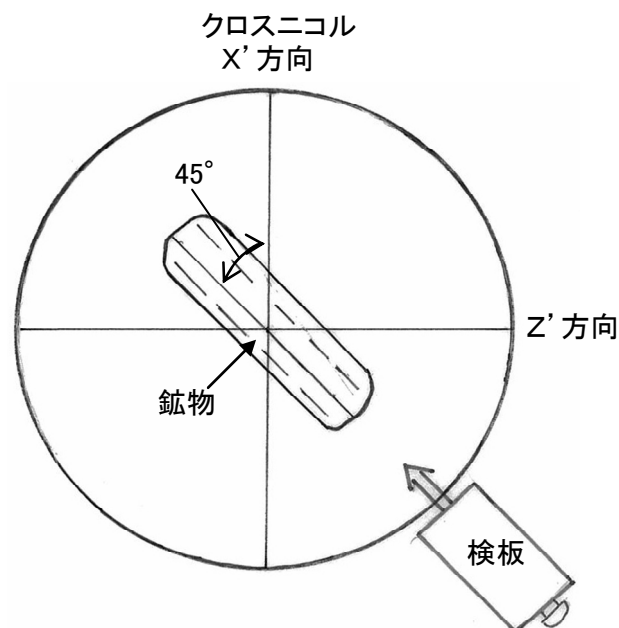
消光角は θ であって、 2θ ではない。
最大対称消光角も 2θ でなく、 θ である。

図-6 消光角

5) 伸長 (elongation) の正負

薄片において、結晶が1つの方向に伸長した形をしていて、その輪郭が直線であり、しかもその結晶が直消光を示すか、または小さな消光角を示す場合には、結晶の伸長の正負 (zone character) を決めることができる。すなわち、結晶の伸長方向が偏光の振動方向 Z'^* と一致するか、 Z' に近いときには伸長は正であるという。伸長方向が偏光の振動方向 X'^* と一致するか X' に近いときには伸長は負であるという。伸長の正負を決める場合には、レターデーションが $530\text{m}\mu$ の石膏検板などの検板を使用して、偏光の振動方向が X' か Z' かを決める必要がある。検板は視野の右下から左上(十字線と 45° の方向)へ差し込むので、この方向に鉱物の伸長を合わせたときの色(干渉色)の変化を見る。このとき鉱物の干渉色は検板との重ね合わせによって変化する。黄色などのマイルドな色(干渉色図表でレターデーションの低い方向)に変化すれば、**伸長正**(相減)、逆に青など鮮やかな方向に変化すれば**伸長負**(相加)である(図-5)。

* X' は偏光の振動方向のうち速度の速い方の光(屈折率の低い方)の振動方向のことで、 Z' は速度の遅い方の光(屈折率の高い方)の振動方向。一方、 X 軸、 Z 軸、 Y 軸は光学的二軸性結晶にある**光学的弾性軸**のことである。この振動方向と光学的弾性軸の間にはビオ・フレネル(Biot-Fresnel)の法則と呼ばれる関係がある。



消光角が 40° (±)以下の鉱物は伸長の正・負を決められる
 伸長正: 相減となり, 一般に黄(～赤)
 伸長負: 相加となり, 高次側の色に(青など)

図-7 伸長の正と負

(3) コノスコープによる観察

光学的に等方な鉱物(非晶質物質や等軸晶系の鉱物)以外は, すべての鉱物は光学的に異方である. すなわち, 透過する光が2つの偏光に分かれて進む結晶を光学的異方体と呼ぶが, 光学的異方体はさらに**光学的一軸性結晶**(ジルコン, 石英, 方解石など)と**二軸性結晶**(かんらん石, 普通輝石, 斜長石など)に区別できる. 光学的異方体ではある方向に進む光は速度の異なる二つの偏光に分かれて進むが, ある特殊な方向では偏光の速度が一致して一つしかなくなる. この方向を**光軸**(optic axis)と呼ぶ. 光軸は光学的一軸性結晶では1本で, それは別な鉱物学的基準で定められた結晶軸 c に一致する. 光学的二軸性結晶では光軸は2本ある. また, 一軸性結晶と二軸性結晶はさらにおのおの**正号結晶**と**負号結晶**とに分けられる.

これらは, コノスコープにすると観察できるコノスコープ像(conoscopic figure)または干渉像(interference figure)によって識別できる. また, 二軸性結晶の光軸角の大小もコノスコープ像(干渉像)から推定できる. (1), (2)で述べたオルソスコープによる観察では用いられる光は互いにほぼ平行で, 薄片をほぼ垂直に通っている. 一方, コノスコープは薄片をさまざまな方向に通る光をつかって鉱物の性質を調べる. コノスコープの観察はコンデンサーとベルTRANレンズを入れて, 高倍率(400×など)で行なう. コンデンサーはさまざまな方向に進む光をつくる. コノスコープ像を出す場合には, 薄片中の目的の鉱物のうち, 出来るだけ複屈折の小さいものを選ぶことが必要である. そのようなものは, 光軸が薄片にほぼ垂直であるので, 光学性の負や光軸角の大きさを決めるのに便利である.

また, 光軸の方位が光の色によってひどく異なる場合には, コノスコープ像の光軸点の付近に, 分散による色が現れる. 赤い光に対する光軸点には赤い光が欠けているので, 青味のある色が現れる. 青い光に対する光軸点には青い光が欠けているので, 赤味のある色が現れる. すなわち, 光軸点にあたる位置の両側に, 青と赤の色が現れる.

ここでは偏光顕微鏡では何が観察できるかについての概略を述べた. より詳しい解説や個々

の鉱物・岩石の鏡下での特徴については以下のような参考文献で勉強しつつ、鏡下観察の実践を積み重ねることが必要である。なお、ここでは述べなかったが参考文献には反射顕微鏡（鉱石顕微鏡）についての文献も示した。

参考文献

- 井上 勤(監修)(2001):新版顕微鏡観察シリーズ④「岩石・化石の顕微鏡観察」. 地人書館, 315p
- 菅木浅彦(編)(1988):「鉱石顕微鏡と鉱石組織」. テラ学術図書出版, 470p
- 黒田吉益・諏訪兼位(1983):「偏光顕微鏡と岩石鉱物(第2版)」. 共立出版, 343p
- 日本博物館協会(やまびこネット製作):http://www.j-muse.or.jp/kagaku_tanken/vd3/hikan02/page01.html
- 都城秋穂・久城育夫(1973):「岩石学 I - 偏光顕微鏡と造岩鉱物」. 共立出版, 219p