岩石だけじゃない 偏光顕微鏡の 原理・構造と多種多彩な用途について*

It's Not Just Rock—the Principle and Mechanism of Polarizing Microscope, and Its Various Uses

石口孝貴**
Takaki ISHIGUCHI

Key words

polarizing microscope, crossed Nicols, birefringence, retardation, extinction angle, elongation, refractive index

1. はじめに

偏光顕微鏡は光学顕微鏡の一種であり、偏光を用いて岩石や鉱物に代表される複屈折物質（光学異方性物質）の性質を観察あるいは分析するための装置である。

光は電磁波の一種であり、進行方向に対して垂直に振動する横波を発生させる。自然光では横波の振動方向はランダムであるが、偏光では横波の振動方向は規則的で偏りがある。偏光は結晶などの複屈折物質を透過することで変化することが知られている。上記のように表現するとなんだか分かりにくい、偏光サングラスで海やプール水面に映り込むギラギラした太陽光（偏光）をカットする、または偏光メガネにより右目側レンズと左目側レンズでそれぞれ異なる映像を透過させて3D映像を実現するなど、偏光の原理は身近な場面でも幅広く応用されている。

偏光顕微鏡は偏光の変化を観察・分析することで観察対象である複屈折物質の性質を検査するための装置である。

偏光顕微鏡は、かつては岩石顕微鏡または鉱物顕微鏡と呼ばれていたこともある。そのため、偏光顕微鏡は岩石や鉱物観察専用の顕微鏡だと考えられていることも多い。確かに岩石や鉱物の薄片は偏光顕微鏡の主な観察対象ではあるが、複屈折物質は岩石、鉱物以外にもさまざまなものが存在し、偏光観察法を有効活用できることがある。

当記事では第2章にて偏光顕微鏡の歴史と原理を解説する。第3章では偏光顕微鏡の構造について解説する。第4章では環境分析、医療、素材研究、製品検査等、偏光顕微鏡の多種多彩な分野での活躍を紹介する。

当記事が皆さまにとって偏光顕微鏡についての知見を深め、偏光観察法の有効な活用法を見いだしてくださるものになれば幸いである。

2. 偏光顕微鏡の歴史と原理

長野主悦著『光学顕微鏡の技術系統化調査』¹⁾によると、

偏光は、フランスのマリュス（E. Malus, 1775～1812）が1808年に発見したとされている。宮殿の窓の反射光を複屈折物質である方解石で観察して発見したという。複屈折物質に光が入射すると複屈折という現象が発生し、スネルの法則（屈折の法則）に従う常光線と法則に従わない異常光線に分かれる。

イギリスのニコル（W. Nicol, 1768～1856）は、1828年に二つの方解石プリズムを貼り合わせたニコルプリズムを発明した。また、このニコルプリズムを用いた偏光装置を考案し、自然光から一定の振動方向をもつ直線偏光を得ることを可能にして岩石や鉱物の研究に活用した。また、イギリスのタルボット（H.F. Talbot, 1800～1877）は、偏光装置を活用し、1834年に偏光顕微鏡を発明したとされている。

第1の偏光装置により得られた直線偏光に対して振動方向が直角になるように第2の偏光装置を配置すると、直線偏光はカットされる。この状態をクロスニコルやクロスポーラ、または直交ニコルと呼ぶ。このときの第1の偏光装置をポラライザ（polarizer：偏光子）、第2の偏光装置をアナライザ（analyzer：検光子）と呼ぶ。二つの偏光装置の間に複屈折物質があると、ポラライザによって発生した直線偏光は複屈折物質を透過することで変化し、アナライザを透過して観察ができるようになる。

複屈折物質のない場所の光はカットされて暗黒となり、複屈折物質のある場所の光は観察ができるという性質は、偏光顕微鏡による偏光観察法の最も基本的な原理であるといえる。

その後、アメリカのランド（E.H. Land, 1909～1991）が、1929年に薄板状の偏光板を発明し、「ポラロイド polaroid」と名付けた。彼は後の「米ポラロイド社 Polaroid Corporation」の創業者である。偏光顕微鏡に使用するニコルプリズムは材料である大きくて良質な方解石が入手困難であったことから大変高価なものであったが、ポラロイドは安価、なおかつ薄くて使いやすいという利点があり、ほとんどの偏光顕微鏡に採用されるようになった。

*原稿受付 令和2年4月14日

**メイジテクノ(株) (埼玉県入間郡三芳町竹間沢 322-1)

図1 偏光顕微鏡の構成

3. 偏光顕微鏡の構造

一般的な明視野生物顕微鏡の光路に、ステージから見て上下の位置に1枚ずつ偏光板を加えたものが、最も簡易な偏光顕微鏡の構成となっている(図1)。クロスニコル状態で複屈折物質の検出や形状観察を行いたいだけであれば、このような簡易な構成で問題がない場合もある。実際には本格的な偏光顕微鏡には回転ステージや偏光観察向け対物レンズ、検板やコンペンサタそしてそれを挿入するためのスロットの付いた中間鏡筒等が備わっており、偏光観察法を最大限に活用できるよう設計されている。これらの装備について解説をする。

まずは偏光板についてだが、照明装置側にある偏光板をポラライザ①、回転ステージ②を挟んで反対側にある偏光板をアナライザ③と呼ぶ。

照明装置から発せられた自然光はポラライザを透過することで直線偏光となる。ポラライザは回転させて向きを変えることが可能だが、直線偏光の振動方向は西-東(左右方向)に合わせたときをゼロとするということがISOおよびJISにより基準として定められている。

ポラライザにより発生した直線偏光に対して振動方向が垂直になるようにアナライザを配置することで、クロスニコル状態となる。ポラライザやアナライザはそれぞれ光路

からの「はねのけ」「抜き差し」が可能となっている。光路にポラライザのみを挿入した状態をオープンニコルまたはオープンポーラと呼ぶ。光路からポラライザもアナライザも除けば、通常の生物顕微鏡と同様の観察が可能になる。

クロスニコル状態のポラライザとアナライザの間に複屈折物質がある場合、常光線と異常光線の屈折率差と物質の厚さにより両光線に位相差(レターデーション retardation)を生じる。この二つの光線はアナライザを透過後互いに干渉するが、波長によって干渉の強度が異なるため色付きを生じる。これを干渉色と呼ぶ。レターデーション量(複屈折量)と干渉色の関係を示す干渉色チャートというものが存在している。干渉色に影響を及ぼさないよう、偏光顕微鏡用対物レンズ④とコンデンサレンズ⑤は光学的ひずみのないよう製造されている。

複屈折物質が直線偏光に与える変化は、複屈折物質の向きによっても異なる。回転ステージにより向きを変えることで、複屈折物質の透過光は変化をする。なお、ステージを回転させた際にきちんと観察視野の中央が中心になって回らないと観察しにくい。ため、偏光顕微鏡のレボルバ⑥は対物レンズごとに芯出し調整を行えるようになっている。

クロスニコル状態で透過光が最も暗く見える角度を消光位、最も明るくなる角度を対角位と呼ぶ。消光位と対角位の向きはちょうど45°異なる。回転ステージには360°目盛りが表示されているので、対角位にする際には、まず消光位に合わせてから45°回転させて対角位にする。とよい。

複屈折物質には伸長(延伸)方向がある。伸長方向がクロスニコル状態のポラライザ、アナライザの振動方向に対して平行または垂直になった際に最も暗くなる場合、この複屈折物質の性質を直消光と呼ぶ。平行または垂直以外の角度で最も暗くなる場合、この複屈折物質の性質を斜消光と呼ぶ。観察しながらポラライザとアナライザの振動方向が確認できるように、偏光顕微鏡の接眼レンズのうち一つには十字線マイクロメーター⑦が組み込まれている。

「伸長方向の屈折率>垂直方向の屈折率」である場合は正の伸長、「伸長方向の屈折率<垂直方向の屈折率」である場合は負の伸長と呼ぶ。正負判定を行う際には対角位での観察を行うが、200 nm 以下のような微弱なレターデーションの場合、通常のクロスニコル状態ではほとんど着色が見られない。このような場合、検板スロット⑧に鋭敏色板(530 nm)を挿入する。

レターデーションが530 nm 前後の場合、わずかなレターデーションの差で黄色→赤→青と急激な干渉色の変化があり、これを鋭敏色と呼ぶ。鋭敏色板はこの性質を利用した検板で、挿入することで鋭敏色での観察が可能となる。このとき、クロスニコル状態で暗黒であった視野は530 nm 加色され赤紫色に変化し、わずかなレターデーションの差を大きな干渉色の変化で確認することが可能となる。対角位は伸長方向が左下→右上方向の場合(ここでは+45°の対角位と呼ぶことにする)と右下→左上の場合

(-45° の対角位と呼ぶ) の二つのパターンがある。鋭敏色での観察では、正の伸長の場合「 $+45^\circ$ の対角位」の場合は青緑、青、緑などに変化し、「 -45° の対角位」の場合は橙や黄色に変化する。負の伸長の場合は逆に「 $+45^\circ$ の対角位」の場合は橙や黄色、「 -45° の対角位」の場合は青緑、青、緑などに変化する。

1/4 波長板はレターデーションが 200 nm 以上の場合に有効である。1/4 波長板を挿入するとクロスニコル状態で暗黒であった視野は 147.3 nm 加色され灰色に変化する。「 $+45^\circ$ の対角位」の場合、正の伸長の場合は背景の灰色より明るくなり、負の伸長の場合は背景より暗くなる。レターデーションがさらに大きく、例えば複屈折物質の伸長が正でレターデーションが +350 nm の場合、「 $+45^\circ$ の対角位」の場合は $147.3 + 350 = 497.3$ nm となり、干渉色チャートに照らし合わせると赤紫になる。逆に複屈折物質の伸長が負でレターデーションが -350 nm である場合、 $147.3 - 350$ はマイナスになってしまう。この場合は「 -45° の対角位」で観察すると赤紫色に変化するので、伸長は負であると判定できる。

レターデーション量を測定する場合に役に立つのがコンペンセータであり、これも検板スロットに挿入して使用する。0~1 λ (1 λ =546 nm) まで測定可能なセナルモンコンペンセータ、0~3 λ まで測定可能なベレックコンペンセータ、1~6 λ までの大まかな測定が可能な石英くさび型検板等、さまざまな種類の製品が市販されている。観察対象に応じて最適な製品を選択してほしい。

これまで述べてきた偏光顕微鏡による最もオーソドックスな観察法は総合してオルソスコープ (orthoscope) と呼ばれるが、コノスコープ (conoscope) という観察法もある。これはベルトランレンズ^⑨を光路に入れることにより可能となる。これは試料の形状を見るのではなく、NA (開口数) の大きな対物レンズの後側焦点付近にできた干渉縞を観察する方法である。干渉縞を観察することにより、一軸性結晶なのか二軸性結晶なのかの識別や、光軸角の確認に役立つ。使用頻度は低いと考えられるので詳細は割愛する。

4. 偏光顕微鏡の多種多様な用途

偏光顕微鏡を使用することにより、クロスニコル状態での複屈折の有無の確認、回転ステージを用いての消光角 (消光する角度) の確認、検板を使用しての伸長の正負の確認、コンペンセータを用いてのレターデーションの測定等を行うことができる。観察対象の形状に加えて光学特性も観察・分析できるという偏光顕微鏡の特長は光学顕微鏡ならではの個性であり、SEM や TEM といった電子顕微鏡では実現ができない。岩石の薄片が偏光顕微鏡の最もオーソドックスな観察対象だが、それ以外にも実にさまざまな場面で偏光観察法は活用されている。いくつかの例を紹介したい。

環境分析会社では、建材中アスベストの定性分析や定量

(1) 鋭敏色板挿入

(2) クロスニコル

(3) 分散染色観察

図2 クリソタイル

分析に偏光顕微鏡が活用されている。アスベストは繊維状の鉱物であり複屈折があるため、偏光顕微鏡を用いた分析方法が ISO や JIS で規定されている。建材を双眼実体顕微鏡で観察し繊維状の物質を見つけ、ピンセット等で採取し屈折液 (浸液) でプレパラートを作製する。プレパラートの観察には分散染色用対物レンズを備えた特殊な偏光顕微鏡を使用する。クロスニコル状態にて繊維の形状と色、消光角を、鋭敏色板を挿入した状態で伸長の正負を、オープンニコル状態で色 (多色性) と屈折率を、分散染色観察にて分散色をそれぞれ観察し、アスベストの特性と照らし合わせて診断する。

アスベストの中でも、例えばクリソタイル (Chrysotile) (図2) はカール状の形状が特徴的である。クロシドライト (Crocidolite) は形状は直線的で色は青、伸長が負であるといった特徴がある。トレモライト (Tremolite Asbestos), アクチノライト (Actinolite Asbestos) は斜消光をする。アスベストに似た物質も多数あるが、形状および多数の光学特性を総合的に検証することで定性分析を可能としている。観察対象の形状と光学特性の両方を確認することができる偏光顕微鏡の特性をうまく利用しているといえよう。

医療分野では、リウマチ膠原病科にて結晶性関節炎の診断に偏光顕微鏡が活用されている。結晶性関節炎の代表として尿酸ナトリウム (MSU) 結晶による痛風、ピロリン酸カルシウム (CPP) 結晶による偽痛風があるが、これらの結晶を偏光顕微鏡で観察する事ができる (図3)。患者から患部の関節液を採取し、それを一滴スライドガラス上に載せカバーガラスをかけてプレパラートを作製する。痛風の原因となる尿酸ナトリウム結晶は針状の形状、負の伸

図3 尿酸ナトリウム（MSU）結晶とピロリン酸カルシウム（CPP）結晶

長，強い偏光（複屈折）が特徴的である。偽痛風の原因となるピロリン酸カルシウムは主に平行六面体や桿状の形状，正の伸長，弱い偏光または偏光なしといった特徴がある。特別な前処理なしに関節液を直接診断できるため，その他の方法より迅速に診断ができるという利点がある。

高分子素材も複屈折物質であるため，偏光顕微鏡は有用である。ポリプロピレン（PP），ポリエチレン（PE），液晶などの形状および光学特性についての観察に活用されている。これにより配向など，高分子成形物の構造に対して重要な多くの情報を得ることができる。

また，雪も結晶であるため，偏光顕微鏡での観察が有用である。雪の結晶主軸の方向（伸長の正負）や位置関係の検出に使用されている。

製薬会社でも偏光顕微鏡を使用する。薬の原材料を偏光顕微鏡で観察し，品質検査を行っている。そのほか，乳液やでんぷんも偏光顕微鏡での観察が行われている。

5. お わ り に

複屈折性をもつ観察対象は想像している以上に多い。皆さまが検査や研究をしている観察対象は，偏光観察法によりこれまで分からなかった有用な情報が得られる可能性がある。固定観念にとらわれることなく，皆さまもぜひ積極的に偏光顕微鏡を試してみしてほしい。

参 考 文 献

- 1) 長野主税：光学顕微鏡の技術系統化調査，技術の系統化調査報告，**24**，（2017）305.
- 2) 長野主税：顕微鏡の基礎，日本顕微鏡工業会ホームページ
- 3) 偏光顕微鏡 MT9000 シリーズ取扱説明書，メイジテクノ株式会社
- 4) 日本工業規格 JIS B 7251（2000）
- 5) 日本工業規格 JIS A 1481-1（2016）
- 6) アスベスト測定用偏光・分散顕微鏡 MT6930 製品紹介ホームページ，メイジテクノ株式会社
- 7) 横川直人：結晶性関節炎の迅速診断—医師による関節液の鏡検，高尿酸血症と痛風，**26**，2（2018）121.
- 8) 関節液鏡検用偏光顕微鏡 ML9300L/SFA 製品紹介ホームページ，メイジテクノ株式会社
- 9) 栗屋裕：高分子素材の偏光顕微鏡入門，株式会社アグネ技術センター，（2001）.
- 10) 菊池勝弘，梶川正弘：雪の結晶図鑑，北海道新聞社，（2011）.

石口孝貴

平成 14 年 3 月東洋大学経済学部経済学科卒業，平成 30 年 10 月光学顕微鏡メーカー・メイジテクノ（株）の代表取締役専務に就任。マーケティングに注力し，営業活動の傍ら多くの専門家や業界団体からの情報収集に努め，製品企画に反映させている。