

私は研究でよく光学顕微鏡を用いています。光学顕微鏡というと、マイクロサイズの物体の形状を観察するためのもの、という印象があると思いますが、光路にちょっとした工夫を加えることでより多くの情報を得ることができます。本稿では、その中でも少し珍しい、光学顕微鏡を使ったコッセルパターン（Kossel pattern）観察について紹介します。

1. コッセル効果

コッセル効果（Kossel effect）とは、1935年に発見された、収束電子線を結晶性試料に照射したときに生じる回折現象のことを指します¹⁾。電子線を結晶性試料に照射すると、 $\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$ のブラッグの法則を満たす条件において強い回折が生じます。ここで図1 (a) に示すように試料に対して電子線が平行に入射する場合、ブラッグの法則はある特定の入射角で満たされることとなり、電子線に対して試料をある一定角度傾けた場合に強い回折スポットが観測されることとなります。

一方、図1 (b) に示すようにさまざまな入射角を含む収束電子線を試料に照射した場合、試料を回転させなくても、入射する電子線の一部はブラッグの法則を満たし、試料により回折されます。また、回折は三次元的に起こるため、この強度の明暗は点ではなく、二次元的な線状のパターンとして出射ビームに重畳されます。つまり、試料の対称性を反映した二次元パターン、コッセルパターンが観測されます。このパターンを観測することによって、試料の面方位や周期性を調べることができます。

回折は波動に対する現象ですから、電子線以外の

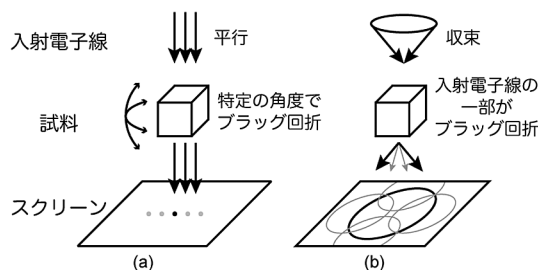


図1 (a) 平行電子線が試料に入射した場合と、(b) 収束電子線が入射した場合の回折の概念図。

電磁波に関しても、扱う試料が波長と同程度の周期性を有する場合には同じ現象が起こります。光学顕微鏡で扱う可視光線は波長がおおよそ400~700 nmですから、屈折率にもよりますがおよそ数百 nm の周期性を有する試料について、コッセルパターンの観察ができます。数百 nm 程度の周期性はコロイド結晶や後述のブルー相液晶など、いわゆるソフトマターとよばれる材料に多くみられます。コッセルパターンを観察することで、単純な明視野観察では得られない周期性などの情報を得ることができます。

2. 光学顕微鏡を用いたコッセルパターン観察

前節の説明の通り、コッセルパターンは収束光に対する試料からの回折光を観察することに対応しています。光学顕微鏡において回折像を観察しようとする場合、対物レンズの後側焦点面を観察する必要がありますが、通常の顕微鏡は対物レンズの前側焦点面で結像する像を観察する仕様となっていますので、そのままでは回折像を観察することはできません。そこで、光路に後側焦点面を観察するようなレンズを挿入することで、コッセルパターンの観察が可能となります。これだけ聞くと、顕微鏡を改造しなければならないのかと思われる方もいらっしゃるかもしれませんが、そこはご安心ください。実はこのような回折像の観察手法は、異方性材料の光軸の評価手法として確立している conoscopy 観察 (conoscopy) という手法と全く同じです。つまり、顕微鏡の標準オプションとして購入可能な conoscopy ユニットを顕微鏡に取り付けるだけで、簡単に回折像が観察可能となります。

また、ブラッグの法則から明らかのように、回折角は入射波長に強く依存します。そのため、通常はモノクロメーターや干渉フィルターで切り出した単色光を用いてコッセルパターン観察を行います。

3. コッセルパターンの観察：ブルー相液晶を例に

ここでは、私が研究対象としているブルー相液晶 (blue phase) とよばれる材料を題材に、コッセルパターンの観察例を紹介したいと思います。ブルー相は可視光波長程度の三次元秩序構造を自発的に形成する珍しい液晶材料です。ブルー相の分子配列は

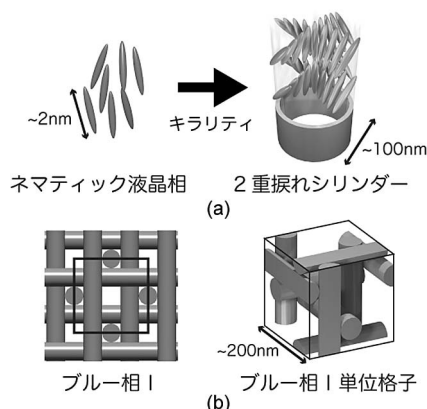


図2 (a) 分子の掌性による分子配向の捻れと、(b) ブルー相 I の構造の模式図。体心立方構造 ($I4_132$) を有する。

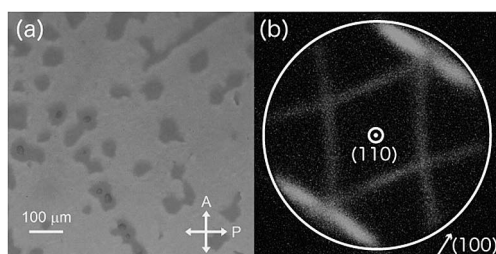


図3 (a) ブルー相 I 液晶の偏光顕微鏡像と、(b) 試料中央部におけるコッセルパターン。

非常に複雑ですが、その構造は模式的に図2のように表されます。棒状の分子が集団として一方向に配向しているネマティック液晶にキラル分子を導入すると、分子配向に捻れが生じます。捻れの誘起力が十分強い場合、配向が 360° 方向に捻れた二重捻れ構造が安定となり、自己組織的に積層して三次元構造を形成します。紙幅の関係で詳細は省きますが、熱力学的に安定なブルー相は3種類確認されており、図2(b)に示す体心立方構造のブルー相 I のほかに、単純立方構造のブルー相 II と二重捻れ構造の短距離秩序のみ有するブルー相 III が存在するとされています。

ブルー相 I は 200 nm 程度の格子定数を有するため、ブラッグ反射に起因する構造色を示します。図3(a)に示すように、光学顕微鏡下では着色した光学組織を観察することができますが、明視野観察の

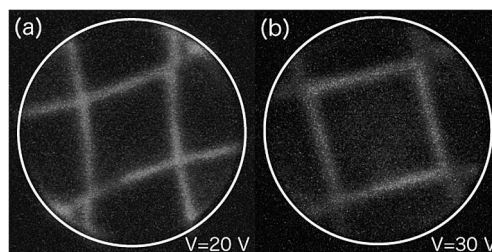


図4 電界印加時のブルー相 I のコッセルパターン。(a) 20 V 印加、(b) 30 V 印加。

みでは面方位や周期性の情報は得られません。それらの知見は、コッセルパターン観察より得ることができます。図3(b)に同じ試料のコッセルパターンを示します。明確な2回対称の模様が見えることから、試料は視野に垂直方向に(110)面を向けていることがわかります。また、簡単な考察から(100)面の方向や格子定数の値などを予想することができます。

さらに興味深い現象として、電界印加時の構造変化があります。ブルー相 I の $\langle 110 \rangle$ 方向に電界を印加すると、徐々に格子が伸長し、面心斜方晶へと変化します(図4(a))。さらに電界を印加すると、あるところで4回対称の体心立方晶へと変化します(図4(b))。このような電界誘起相転移は古くから知られていますが、構造変化のダイナミクスや周期性と他の物性の相関などはまだ明らかではありません。それらのことを解明すべく、研究を進めています。

光学顕微鏡の少し珍しい観察手法として、コッセルパターン観察を紹介させていただきました。ありきたりなツールも、小さな工夫によって魅力的な研究装置に変わります。皆さんも視点を変えて周りを見てみると、新たな発見があるかもしれないですね。
(大阪大学 吉田浩之)

文 献

- 1) 今野豊彦：物質からの回折と結像，第4版(協立出版，2007) p. 181.