

# 方解石の構造と複屈折

猿投農林高校 伊賀 順子

造岩鉱物の一つである方解石は複屈折を起こす。この現象について、方解石の構造と光の性質から説明を試みたのでここに報告する。

## 1. 結晶晶系と光学的性質

結晶を光学的性質によって分類すると次のようになる。

### 結晶

- 光学的等方体(複屈折を起こさない)
  - 立方晶系
- 光学的異方体(複屈折を起こす)
  - 一軸性結晶(光軸が1本)
    - 正方晶系, 六方晶系, 三方晶系
  - 二軸性結晶(光軸が2本)
    - 斜方晶系, 単斜晶系, 三斜晶系

複屈折により、文字などが二重に見えることで有名な方解石(Calcite)は三方晶系であるので、光学的異方体の一軸性結晶にあたる。一軸性結晶の構造の特徴は図1のように3回以上の回転対称性を持つ格子を貫く軸が一本だけ存在することである(光学的等方体には上記のような軸が2本以上あり、二軸性結晶にはない)。

### 一軸性結晶

- 正方晶系
  - 例: ルチル
  - すず石
- 六方晶系
  - 例: 氷
  - グラファイト
  - 高温石英
- 三方晶系
  - 例: 方解石
  - 電気石
  - 低温石英

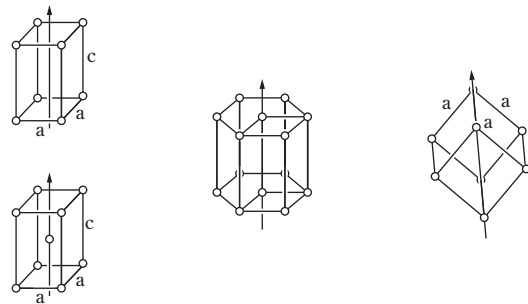


図1 一軸性結晶の構造

一軸性結晶では結晶の対称性から、結晶に入射する光は左記の結晶軸と入射光の進行方向のなす角が0°のとき以外は、速さ、屈折率などが異なり振動方向が直交する2つの平面偏光に分かれて結晶中を進み、結晶の外に出るときも分かれたまま出てくる。この現象を複屈折という。なお、なす角が0°のときは複屈折は起こらない。一般に複屈折を起こさない結晶軸を光軸といい、一軸性結晶とは図1のような対称性を持つ結晶の光軸が一本であることからついた名である。以下、これらについて詳しくみていく。

## 2. 方解石の構造

ここで、方解石の構造を確認しておく。方解石はカルシウムイオン  $Ca^{2+}$  と正三角形の炭酸イオン  $CO_3^{2-}$  とからなり、図2のような構造をしている。

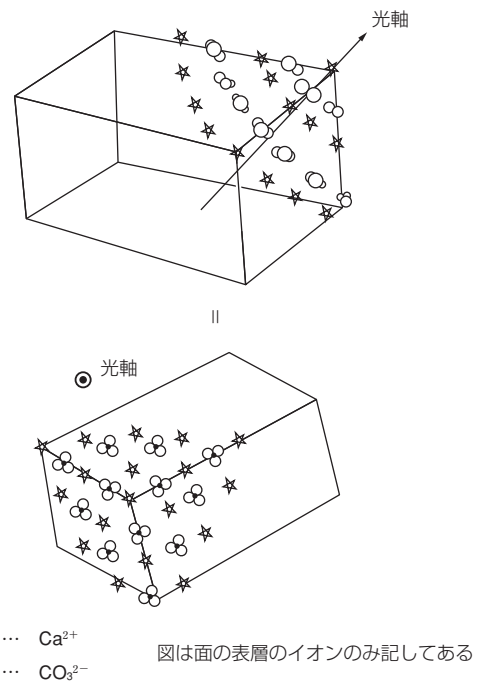


図2 方解石の構造

## 3. 方解石中の光波

次に、光が結晶中に入ると、どのようなことが起きるかを考える。

光は電磁波の一種であり、電場と磁場の時間的変化が空間に伝搬していく現象である。これが結晶中に入ると、結晶を構成する原子やイオンは電場の中に置かれるため分極し、分極によって生じた電場は分極の原因となった光に再び作用する。

方解石を構成しているイオンのうち、炭酸イオンは中心の炭素原子を3個の酸素原子が取り囲んだ正三角形であるので、正三角形をなす平面に対し、電場が水平方向にかかっているか垂直方向にかかっているかによって分極の仕方に大きな差が生じる。それに対し、カルシウムイオンは単原子イオンであるため対称性が高く、分極に方向性はないとみなせる。よって、複屈折には炭酸イオンの分極が関係していると考えられる。

そこで図3のアのように、 $CO_3^{2-}$ 平面に平行(=光軸に垂直)な方向に振動する光の電場についてみると、 $CO_3^{2-}$ は分極すると光の電場を打ち消す方向に電場を生じるため、合成された電場はもとの光の電場に比べ小さくなる。この結果、 $CO_3^{2-}$ 平面に平行な方向に振動する光(ただし、ここでは光の進行方向は直接関係ないため、どの方向に進行する光でもよい)の速さは真空中に比べて遅くなる。一方、図3のイのように  $CO_3^{2-}$ 平面に垂直(=光軸に平行)な方向に振動する光の電場についてみると、 $CO_3^{2-}$ の分極の影響がアに比べて小さいため、 $CO_3^{2-}$ 平面に垂直な方向に振動する光の速さは真空中に比べると遅いが、アの場合に比べると速くなる。

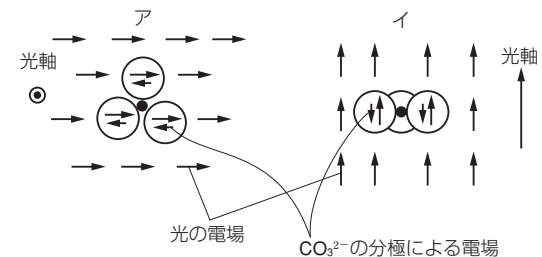


図3 光の進行方向と  $CO_3^{2-}$  の分極のようす

上では、光の電場の振動方向と  $CO_3^{2-}$  平面(あるいは光軸)との関係について述べたが、次は光の電場の振動方向と光の進行方向との関係についてみていく。ここでは、わかりやすいように中空の方解石の球の中心に光源を置いた場合を考える。

## 図4b 光①(入射光と光軸のなす角0°)

光の電場の振動のうち、紙面に垂直な振動(o)も、紙面に平行な振動(e)も  $CO_3^{2-}$ 平面に平行であるため、光軸とのなす角0°で入射した光の速さは振動の方向によらず一定で最も遅い。

## 図4b 光③(入射光と光軸のなす角90°)

光の電場の振動のうち、紙面に垂直な振動(o)は  $CO_3^{2-}$ 平面に平行であるため、光軸とのなす角90°で入射した光のうち、 $CO_3^{2-}$ 平面と平行に振動する偏光の速さは光①の速さと等しく最も遅い。一方、紙面に平行な振動(e)は  $CO_3^{2-}$ 平面に垂直であるため、光軸とのなす角90°で入射した光のうち、 $CO_3^{2-}$ 平面と垂直に振動する偏光の速さは真空中よりは遅いが方解石中では最も速い。

## 図4b 光②(入射光と光軸のなす角 $\theta$ ( $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ))

光の電場の振動のうち、紙面に垂直な振動(o)は  $CO_3^{2-}$ 平面に平行であるため、光軸とのなす角  $\theta$  で入射した光のうち、 $CO_3^{2-}$ 平面と平行に振動する偏光の速さは光①の速さと等しく最も遅い。一方、紙面に平行な振動(e)は  $CO_3^{2-}$ 平面に対し角  $\theta$  をなしているため、光軸となす角  $\theta$  で入射した光のうち、 $CO_3^{2-}$ 平面と角  $\theta$  をなして振動する偏光の速さは角  $\theta$  に対応した中間の速さとなる。

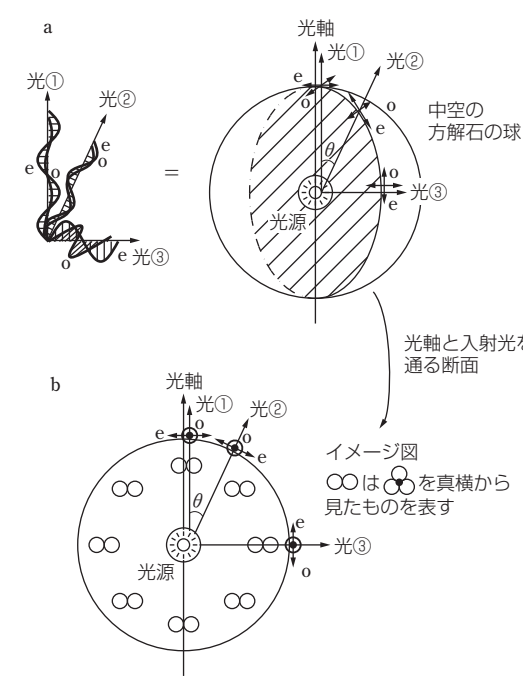


図4 光の電場の振動と光の進行方向の関係

前ページの3つより、図4bで紙面と垂直な振動を持つ偏光は、振動が常にCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>平面と平行であるため、入射光が光軸となす角θによらず速さは一定で最小、屈折率は一定で最大となる。一方、図4bで紙面と平行な振動を持つ偏光は、振動方向とCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>平面のなす角が入射光と光軸のなす角θと共に変化する。このため、速さ、屈折率は一定ではなく、入射光と光軸のなす角が0°のとき速さは最小、屈折率は最大、入射光と光軸のなす角が90°のとき速さは最大、屈折率は最小、入射光と光軸のなす角がθのときは速さ、屈折率共にθに対応した中間の値を取る。

図4bの紙面と垂直に振動する偏光は速さ、屈折率ともに一定で、屈折の法則に従うので通常光(ordinary light)といい、紙面と平行に振動する偏光は速度、屈折率ともに入射光と光軸のなす角θの関数となり、単純に屈折の法則にも従わないので異常光(extraordinary light)という。

#### 4. 方解石(球)の複屈折の観察

方解石でできた球の中心から光を入射させて観察すると、入射光と光軸のなす角θが0°と90°のときは2つの光線は分離せず、θが42°付近で二つの光線の分離幅は最大となる。ここではこの理由について考える。

ここで空気中の光の速さをc、方解石中の通常光の速さをv<sub>o</sub>、屈折率をn<sub>o</sub>、異常光の速さの最大値をv<sub>e</sub>、屈折率の最小値をn<sub>e</sub>と表すと、3.で述べたように通常光はθによらず速さは一定であるため、図4bで円の中心から進む通常光の速度を図に表した光線速度面は図5aのような円になる。一方、異常光はθにより速さが異なるため光線速度面は図5bのような楕円になる。

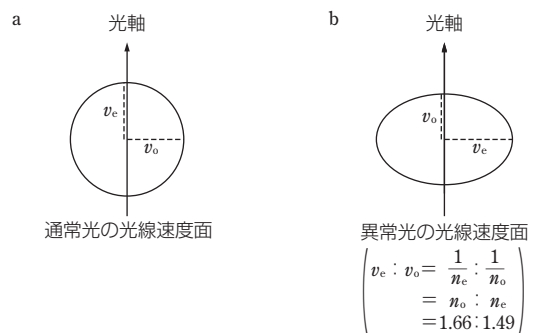


図5 通常光と異常光の光線速度面

ところで、実際に観察される光の進行方向は、今まで論じてきた光線そのものではなく、光線が集まってできる波面によって決まる。そこでホイヘンスの原理を用いて波面の進行方向を求めると次のようになる。

通常光が球の中心から境界面に垂直に入った場合、入射光と光軸とのなす角θによらず波面は境界面に対して垂直に進む(図6a)(ただし境界面は入射光に対して充分水平とみなせるものとする)。

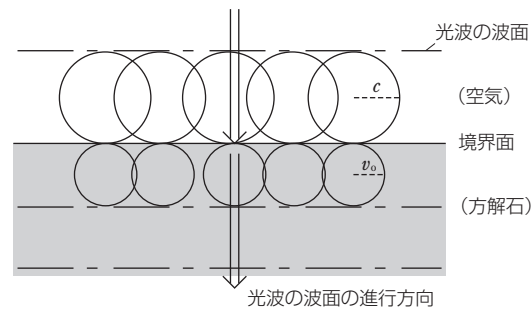


図6a 通常光の光波の波面の進行方向

異常光が球の中心から境界面に垂直に入った場合、入射光と光軸のなす角θにより波面は境界面に対して角度をなして進む(図6b i ~ iii)。

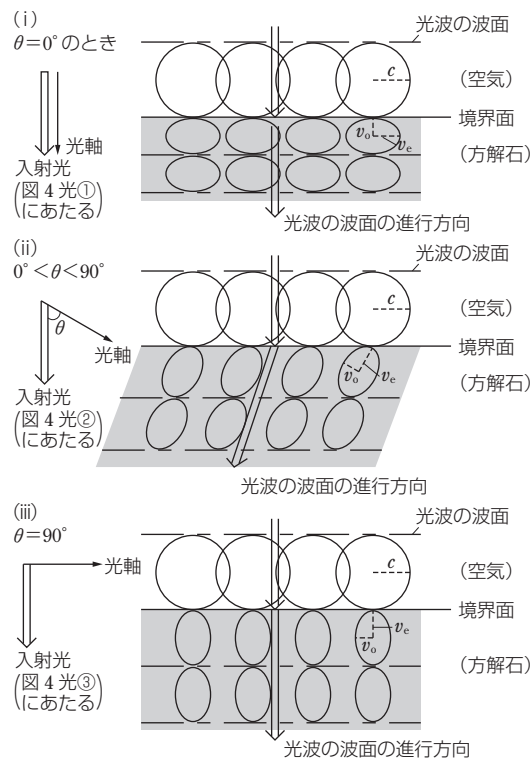


図6b 異常光の光波の波面の進行方向

観察される分離幅は、図6aと図6b i ~ iiiとの差になるため、図6b i, iiiでは分離せず、図6b iiの場合に分離する。このためθが0°と90°では二つの光線は分離せず、θが42°付近で分離幅は最大となる(途中の計算は省略するが、分離幅が最大となる角度θは  $\tan \theta = \frac{n_e}{n_o}$  で与えられる)。

#### 5. 方解石(菱面体)の複屈折の観察

最後に、通常売られている菱面体の方解石で実際に観察される現象について考察する(図7)(これは光軸と入射光のなす角が約45°であるため、図6b iiにあたる)。

- ①文字を書いた紙の上に劈開面を底面にした方解石を置き、真上から見ると文字は二重に見える。さらに方解石の底面を紙面につけたまま方解石を回転させると、通常光による像は位置を変えないが、異常光による像は通常光による像を中心にして回転する。これは、通常光は屈折の法則に従うため、真上から見たとき屈折角はほぼ0°であるが、異常光は単純に屈折の法則に従わないため、真上から見てもある決まった値の屈折角を持つためである。
- ②通常光による像の方がより浮き上がって見えるが、

これは通常光の屈折率の方が異常光の屈折率より大きい( $n_o > n_e$ )ためである。  
③方解石を回転させるとき、さらに偏光板を用いると90°ごとに片方の像が消える現象が観察される。これは、入射光と光軸を含む面に対し、通常光(o)の振動は垂直、異常光(e)の振動は平行で、互いに直交しているためである。

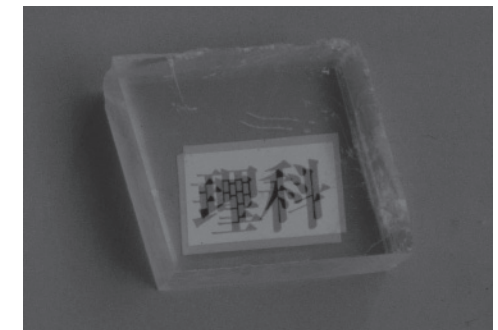


図8 方解石による複屈折

#### 参考文献

- 「結晶学概論」ブラック著 永宮健夫訳
- 「岩石鉱物学実習」東中秀夫著
- 「偏光顕微鏡」坪井誠太郎著
- 「鉱物学」森本信男, 砂川一郎, 都城秋穂著

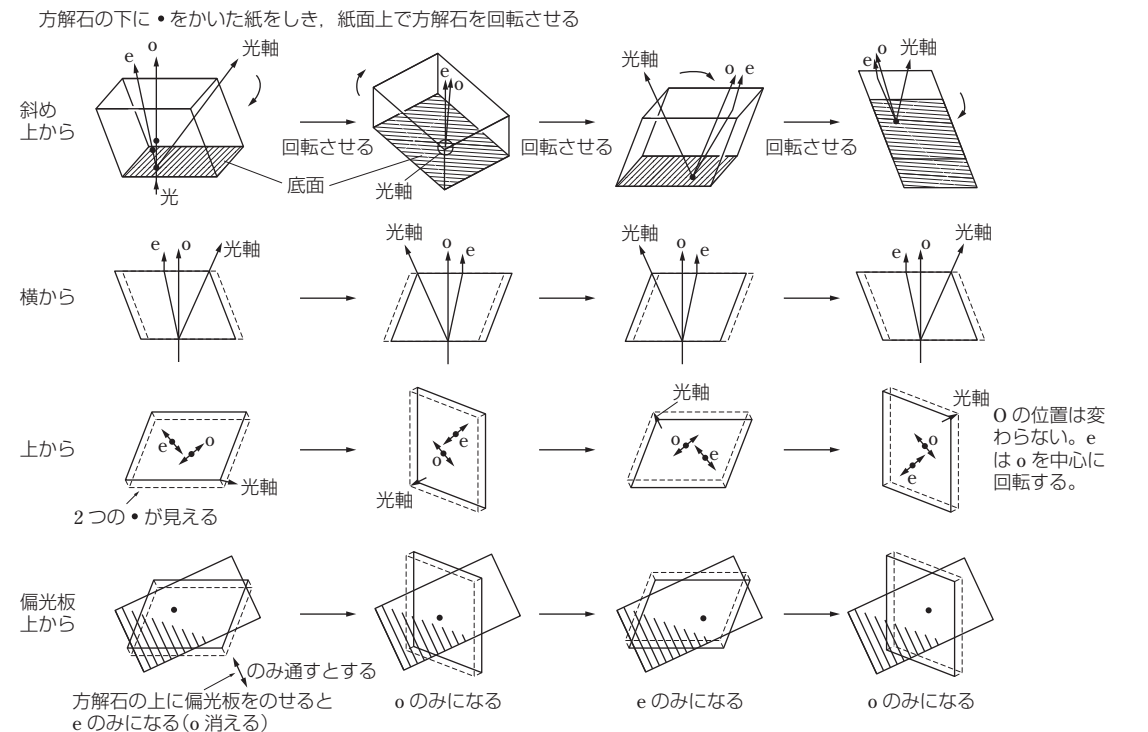


図7 さまざまな方向における複屈折のようす