

| | |
|------------------|---|
| Title | 右水晶と左水晶の区別 |
| Sub Title | Discrimination between Dextrorotatory Quartz and Levorotatory Quartz |
| Author | 大場, 茂(Ohba, Shigeru) 大橋, 淳史(Hashi, Atsushi) |
| Publisher | 慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会 |
| Publication year | 2009 |
| Jtitle | 慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of the natural science). No.46 (2009.) ,p.13- 41 |
| JaLC DOI | |
| Abstract | 慶應義塾大学日吉キャンパスにおける文系学生を対象とした化学実験のテーマの一つとして、キラリテイ（左と右の区別）に関する実験を平成17年度から開始した。これは主に糖の旋光度を測定するテーマであるが、原子や分子レベルのキラリテイが外に表れる例として、水晶の半面像の観察も実験の中に組み込んだ。水晶とは石英のきれいな結晶のことであるが、その内部での原子配列のキラリテイは非対称な結晶面をもとに区別できる。また水晶球については、直線偏光板と円偏光板の間にはさみ、エアリースパイラルを観察してその渦巻の方向から、右水晶か左水晶かを判別できる。本稿では石英の結晶構造をもとにこれらの原理を解説し、また右と左の定義にまつわる話題を紹介する。現時点でも右水晶の定義にまだ混乱がみられるが、「右旋性を示す水晶のこと」に統一すべきである。 |
| Notes | 研究ノート |
| Genre | Departmental Bulletin Paper |
| URL | https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20090930-0013 |

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

右水晶と左水晶の区別

大場茂*・大橋淳史**

Discrimination between Dextrorotatory Quartz and Levorotatory Quartz

Shigeru OHBA and Atsushi OHASHI

概要

慶應義塾大学日吉キャンパスにおける文系学生を対象とした化学実験のテーマの1つとして、キラリティ（左と右の区別）に関する実験を平成17年度から開始した。これは主に糖の旋光度を測定するテーマであるが、原子や分子レベルのキラリティが外に表れる例として、水晶の半面像の観察も実験の中に組み込んだ。水晶とは石英のきれいな結晶のことであるが、その内部での原子配列のキラリティは非対称な結晶面をもとに区別できる。また水晶球については、直線偏光板と円偏光板の間にはさみ、エアリースパイラルを観察してその渦巻の方向から、右水晶か左水晶かを判別できる。本稿では石英の結晶構造をもとにこれらの原理を解説し、また右と左の定義にまつわる話題を紹介する。現時点でも右水晶の定義にまだ混乱がみられるが、「右旋性を示す水晶のこと」に統一すべきである。

1. はじめに

分子のような小さな世界でも、右手と左手のように互いに鏡像関係にあるものが存在する。これら鏡像異性体は旋光性で区別できる。1848年にフランスのPasteur（パスツール）が、酒石酸ナトリウムアンモニウム塩について、結晶の半面像をもとに世界ではじめて光学分割をおこなったことは有名である。そして、この発見が1874年のvan't Hoff（ファントホッフ）によ

*慶應義塾大学化学教室（〒223-8521 横浜市港北区日吉4-1-1）：Department of Chemistry, Keio University, Hiyoshi 4-1-1, Kohoku-ku, Yokohama 223-8521, Japan.

**愛媛大学教育学部理科教育講座（〒790-8577 松山市文京町3番）：Faculty of Education, Ehime University, Bunkyo-cho 3, Matsuyama 790-8577, Japan [Received Oct. 1, 2008]

る「炭素原子の正四面体説」につながった。¹⁾ 有機化合物の場合、不斉炭素をもつことが、キラリティ発現の重要な要素になっている。(不斉炭素については付録参照)。しかし、不斉炭素がなくても、結晶中の原子や分子の配列がキラルであるならば、その結晶は光学活性となる。その代表例が水晶である。

一般に組成式が SiO_2 で表わせるものをシリカといい、ガラスの状態もとりのるが、結晶相も多数知られている。²⁾ その1つが石英であり、石英の結晶面がきれいに発達したものを特に水晶とよんでいる。³⁾ 通常、水晶は六角柱状で先がとがっており、その伸長方向が結晶のc軸であり、これが旋光性を示す光軸ともなっている。水晶の旋光性と、結晶構造の絶対配置、ならびに結晶の半面像との関係が確立された歴史的経過を振り返ると、右と左の定義を明確にすることがいかに重要かがみえてくる。

2. 旋光性

2-1. 右旋性と左旋性

自然の光は、電場があらゆる方向（ただし光の進行方向に対して垂直の方向）に振動している成分を含んでいる。偏光板を通すと、特定な1方向に振動している成分のみを取り出すことができる。*これを直線偏光といい、光の波がつくる平面を偏光面とよぶ。偏光の方向（透過軸）が垂直になるように、2枚の偏光板を重ねると光が完全に遮断される。キラルな物質は、光の偏光面を回転する。これを旋光といい、その回転角を旋光度という（図1）。観測管の中にキラルな物質の溶液を入れ、それを透過軸を直交させた2枚の偏光板の間に置くと、光が多少通過するようになる。1枚目（偏光子）を固定し、2枚目（検光子）を右あるいは左に回転させれば、光をまた完全に遮断することができる。物質が偏光面を右に回転させる性質を右旋性、左に回転させる性質を左旋性という。なお、右旋性とは観測者が光源の方に向かって、偏光面が右（時計回り）に回転した場合をさす。旋光度はもちろん物質の種類とその溶液濃度

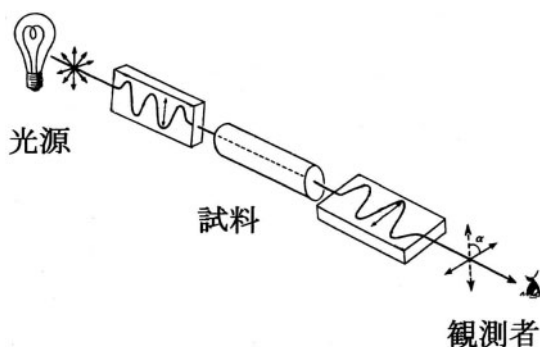


図1. 旋光度の測定

* 偏光板には直線偏光板と円偏光板とがあるが、単に「偏光板」というときは直線偏光板をさす。

c により異なるが、光が物質中を通過する距離 l および光の波長 λ にも依存する。通常はナトリウム D 線の波長を用いる。また、次のように比旋光度 $[\alpha]$ を定義することで、物質固有のデータとして取り扱うことができる。

$$\text{比旋光度}[\alpha] = 100a / (lc) \quad (1)$$

ここで、 l は溶液を入れる観測管の長さ (単位は dm, 1 dm = 10 cm), c は溶液 100 ml 中の溶質の質量 (g), a は旋光度 ($^{\circ}$) である。

偏光計の原型を作ったのはフランスの Arago (アラゴー) であり、光軸に垂直に切った石英の結晶を偏光子と検光子の間に入れ、検光子を回転させると結晶の色が変化することを発見した (1811年)。⁴⁾ アラゴーの同僚であった Biot (ビオー) はさらに詳しく研究し、可視部の赤から紫にかけて、波長が短くなるほど旋光度が増加すること、および石英には 2 種類 (右旋性と左旋性) があることを示した (1812年)。また、右旋性とは観測者が光源の方に向かって、偏光面が右に回転した場合であると定義したのも、また溶液に対する比旋光度を (1) 式のように定義したのもビオーであった (1838年)。⁴⁾

旋光性に関するビオーの定義は化学者の間で広く用いられた。しかしイギリスの Herschel (ハーシェル)** は光の進行方向に対して、偏光面が右 (時計回わり) に回転するときを右旋性と定義し (1822年)、それ以降しばらくの間、物理学者はこちらの定義の方を使っていた。現在は物理でも化学でも、ビオーの定義の方を採用している。

2-2. 石英の比旋光度

石英のような結晶の比旋光度は、1 mm の厚さの層を偏光が通過したときの回転角で表わす。

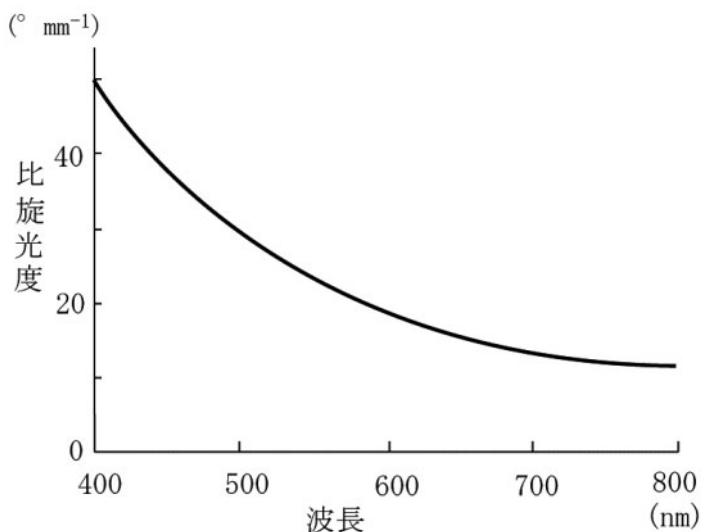


図2. 右旋性石英の比旋光度の波長依存性

**John Herschel. 天王星を発見した William Herschel の子である。

石英のc軸（六角柱の伸長）方向の比旋光度は、ナトリウムD線の光（黄色で波長589.3 nm）に対して $21.72^{\circ} \text{mm}^{-1}$ である。波長が短い青い光については $40^{\circ} \text{mm}^{-1}$ 近くにもなる（図2）。⁵⁾比旋光度 $[\alpha]$ は近似的に光の波長の二乗 λ^2 に反比例することをビオーが見出しているが、もっと正確には多項式を使って表わす。石英の場合は1項だけで次のように表わすことができる。⁶⁾

$$[\alpha] = \pm [7.19\lambda^2 / (\lambda^2 - 92.6^2)] \times 10^6 \quad (^{\circ} \text{mm}^{-1}) \quad (2)$$

3. 石英の結晶構造と外形

3-1. シリカの結晶相

常圧においてシリカ SiO_2 の結晶の、各温度領域における安定相を表1に示す。石英、トリディマイト、クリストバライトという3つの結晶相が存在するが、さらにそれぞれに α 形（低温相）と β 形（高温相）が存在する。²⁾870°C以下の温度においての安定相が石英である。 α -石英を加熱すると573°Cにおいて β -石英へ転移するが、870°C以上に昇温しても大抵はトリディマイトやクリストバライトには変化せず、準安定状態として β -石英の構造を保ち、最後は融解にいたる。なぜならば、いずれの結晶も SiO_4 の四面体が、頂点の酸素原子を共有して3次元ネットワーク構造を形成しているが、その連結の仕方が3つの相で異なり、その構造の組み換えが簡単には起こらないからである。

3-2. α -石英と β -石英の構造

石英の低温相と高温相の結晶構造を図3に示す。また旋光性と空間群などの情報を表2にまとめた。 SiO_4 の四面体のつながり方に注目すると、結晶の伸長方向（c軸）に対してラセンを

表1. シリカ SiO_2 の安定相（1気圧下）

| 温度 | 870°C以下 | 870 ~ 1470°C | 1470°C ~ 1730°C (融点) |
|------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| 鉱物名 | 石英 | トリディマイト* ¹ | クリストバライト* ¹ |
| 相と晶系 | α 形（三方晶系） β 形（六方晶系） | α 形（三斜晶系）* ² β 形（六方晶系） | α 形（正方晶系） β 形（立方晶系） |

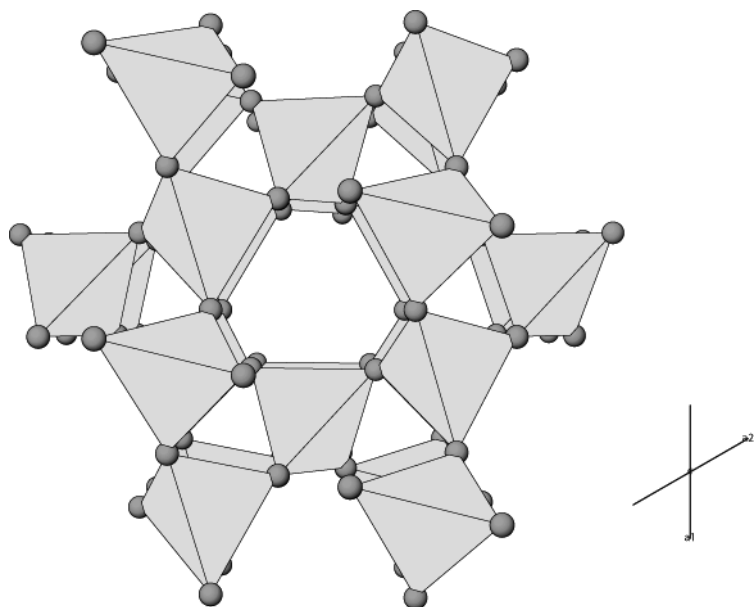
*¹ トリディマイトは870°C以下でも、クリストバライトは1470°C以下でも準安定な相として存在する。

*² α -トリディマイトについては、斜方と単斜の構造も報告されている。

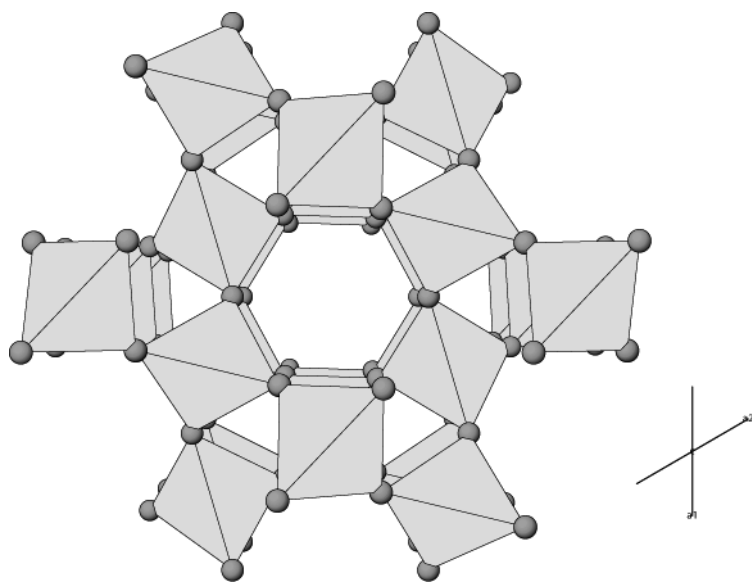
表2. 石英のキラリティと空間群

| 旋光性 | 右旋性 | 左旋性 |
|--------------------------|--------------------|-------------------|
| 半面像の配列 | 右巻きスクリュー状 | 左巻きスクリュー状 |
| α 形の空間群 | $P3_221$ (No.154)* | $P3_121$ (No.152) |
| β 形の空間群 | $P6_222$ (No.180) | $P6_422$ (No.181) |
| SiO_4 のキララな原子配列 | 左巻きラセン | 右巻きラセン |

*カッコ内の数字は、International Tables for Crystallography Vol Aの中の空間群の番号である。



(a)



(b)

図3. 右旋性石英の結晶構造, (a)低温相 α , (b)高温相 β

形成しており、このラセンの巻き方が右巻きの結晶と左巻きの結晶とが存在する。図3は右旋性石英の結晶構造をc軸方向からながめた図であるが、中央の六角柱状のすきまの中心にらせん軸があり、高温相では6回らせん軸 6_2 （左石英では 6_4 ）になっているが、低温相ではそれが3回らせん軸 3_2 （左石英では 3_1 ）に対称性が下がる。しかし、石英の旋光性の符号を決めているのは、三角柱状のすきまの中央に存在する3回らせん軸である。このらせん軸は右旋性水晶では 3_2 らせん、左旋性水晶では 3_1 らせんであり、 β 形から α 形へ転移してもこの対称性は保たれる。高温相に比べて低温相の結晶構造は対称性が下がっているが、 SiO_4 の四面体のネットワークのつながり方は基本的に同じである。

2つのらせん軸 3_1 と 3_2 の違いを図4に示す。両方とも軸のまわりで原子を 120° 回転し $1/3$ 周期ずらす対称操作であるが、 3_1 の方が右巻きらせん、 3_2 の方が左巻きらせんとなっている。ここで、右巻きらせんとは右ネジと同様で、反時計回りに回転しながら進むものをさす。このらせん軸のまわりの原子配列がキラルであるため、水晶のc軸方向に光を通すと旋光性を示すわけである。 α -石英の結晶構造の絶対配置はX線の異常散乱を用いて決定された(1958年)。⁷⁾これにより、右旋性石英中の四面体の配列が左巻きらせん 3_2 であることが判明した。さらに理論的な検討により、他の化合物も含めて、旋光性に関与するキラルな原子配列が右巻きらせんのと

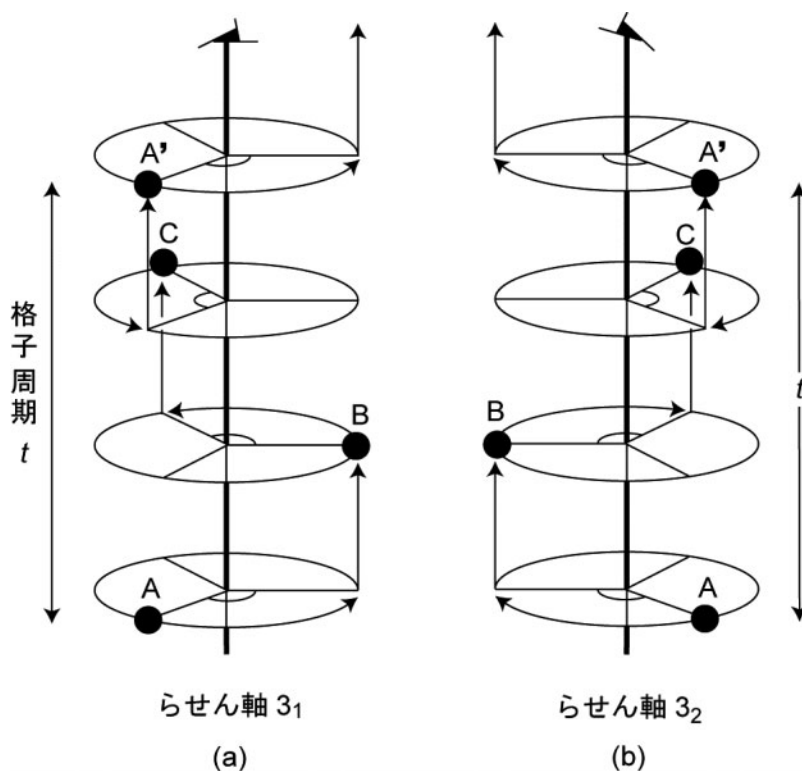


図4. 3回らせん軸, (a) 右巻きらせん 3_1 , (b) 左巻きらせん 3_2

きは左旋性，原子配列が左巻きラセンのときは右旋性となることが示された（1986年）。⁸⁾ なお，結晶学では混乱をさけるために，すべてのらせん軸を右巻きらせんとして取り扱う。 3_2 らせんとは $360/3^\circ$ 右に回転し，軸方向に $2/3$ 周期進むことを意味する。

3-3. 水晶の半面像

水晶（ α -石英）の外形と半面像の様子を図5に示す。⁹⁾ これはかなり理想化した図であり，天然の水晶で微小面 x や s が明確に観測できる例は珍しい。有理指数の法則を導いたフランスの結晶学者 Häuy（アユイ）は，石英の結晶外形はおおまかには正六角柱であるが，微小面まで考慮すると三方対称まで下がること，およびこれらの微小面の配列をもとに，右手と左手の結晶に分けられることに気がついていた。¹⁰⁾ 図5を見るとわかるように，結晶の伸長方向に対して微小面 x と s が (a) 右巻きスクリュー状，あるいは (b) 左巻きスクリュー状に配置されているのである。微小面 x は柱面 m に対してあまり傾いていないが，微小面 s は柱面 m に対して明確な角度をもつ。 x と s が両方とも対で現れるとは限らない。 x 面だけでいる場合でも右手と左手の結晶は判別できるが， s 面は柱面 m と m' に対して対称なので s 面だけでは区別がつかない。（面指数は表3を参照）。ハーシェルは，微小面が左巻きスクリュー状の水晶はすべて左旋性（ビオールの定義での左旋性），右巻きの外形の場合は右旋性であることを示し

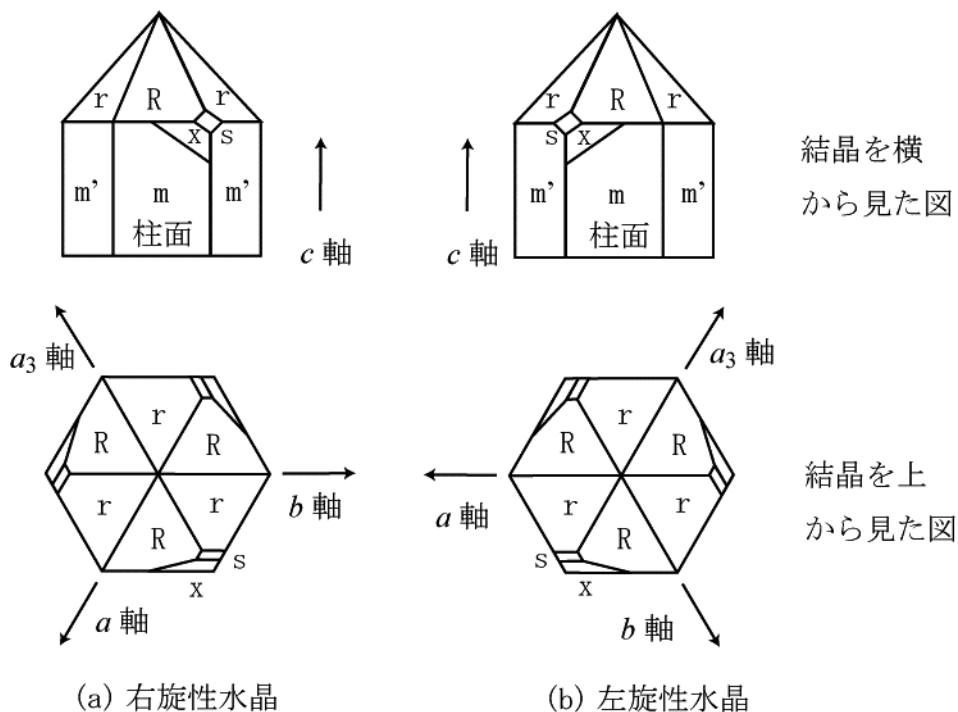


図5. 水晶の結晶外形，(a) 右旋性水晶，(b) 左旋性水晶

表 3. α -石英の面指数

| 旋光性 | 右旋性 | 左旋性 |
|------|----------------|---------------|
| 柱面m | (1, 0, -1, 0)* | (0, 1, -1, 0) |
| 柱面m' | (0, 1, -1, 0) | (1, 0, -1, 0) |
| 斜面R | (1, 0, -1, 1) | (0, 1, -1, 1) |
| 斜面r | (0, 1, -1, 1) | (1, 0, -1, 1) |
| 微小面x | (5, 1, -6, 1) | (1, 5, -6, 1) |
| 微小面s | (1, 1, -2, 1) | (1, 1, -2, 1) |

*結晶軸の取り方と結晶面のシンボルは図5に示してある。なお、面指数 (h, k, l) を六方格子の場合は (h, k, i, l) と表わす。ここで $i = -h - k$ である。空間群 $P3_221$ でも $P3_121$ でも、結晶点群は 321 となるので、 (h, k, i, l) と等価な面指数として (k, i, h, l) (i, h, k, l) の他に $(h, i, k, -l)$ ($i, k, h, -l$) ($k, h, i, -l$) が存在する。

表 4. 水晶の双晶 (c軸を共有している場合)

| 名称 | 結晶成分の組み合わせ | 2つの結晶成分の配置 |
|----------|-------------------------|--|
| ブラジル式双晶 | 右水晶と左水晶 | 1方の結晶成分を反転させると他方の結晶成分の配向と一致する。 |
| ドフィーネ式双晶 | 右水晶と右水晶, あるいは左水晶と左水晶 | 1方の結晶成分をc軸の回りで180°回転すると、他方の結晶成分の配向と一致する。 |

た (1822年)。¹⁰⁾

なお、水晶が六角柱状のきれいな形をしていても、それが右か左かの単一成分からなるとは限らない。双晶といって、方位などの異なる複数の結晶片が組み合わさって一緒に成長したものかもしれない。水晶についてc軸を共有した双晶には2種類ある(表4)。これらの双晶の場合、基本的には六角柱状の形は保たれるが、図5の結晶外形の断片が組み合わさったようなものとなり、微小面の配列は三方の対称性を満たさなくなる。³⁾

3-4. 高温形低温水晶

高温の状態では β -石英として結晶化したものは、温度が下がっても結晶外形はそのまま保たれるが内部構造は α -石英になる。これを高温形低温水晶とよぶ。通常的水晶は何か核となるところから放射状に成長するので、六角柱の片側だけが尖っている。しかし、Herkimer (ハーキマー) ダイヤモンドと呼ばれ、アメリカのニューヨーク州で産出する、やや小さめの水晶はころっとして、両端が尖っている。結晶面はすべて平坦であり、どこかに付着して成長したような跡はない。これは火山活動に伴い、二酸化ケイ素 SiO_2 を含む高温の熱水の泡がドロマイトという堆積岩の隙間に入り、結晶が浮いた状態で1粒ずつ成長したためと推定される。結晶外形は基本的に六角柱の部分が短い両錐形である。図6に示した写真の例では、正面に非対称な7角形の柱面(m)があり、その右上と左上および左下に微小面sが細長い長方形として現われている。もし α -石英(三方晶系)で双晶でないならば、図5で示したように、微小面sと等価な位置は六角柱の上3ヶ所(および下3ヶ所)に限られる。しかし、ハーキマーダ



図6. ハーキマーダイヤモンド (全長約7 mmの結晶の実体顕微鏡写真)

ダイヤモンドの結晶外形はこれに当てはまらないものが多くみられることから、結晶が生成したときは β -石英の構造(六方晶系)であったと推定される。結晶化した後に温度が下がり、 β 形(高温形)から α 形に転移したが、結晶外形は保存されている。このように、結晶構造の対称性と異なる外形をもつことを仮像といい、他の鉱物でも見られる現象である。

なお、高温形水晶としては、柱面がまったくない六角両錐形(そろばん玉の形)のものがよく知られている。これは結晶ができたときの高温状態を反映した外形となっているが、これももちろん仮像である。¹¹⁾ β 形の結晶構造の方が α 形に比べて対称性が高いといっても、既にこの段階で右水晶か左水晶かが決まっているので、 α 形へ転移しても分子配列のキラリティは保存されている(表2)。

4. 屈折率の異方性と光の干渉

4-1. エアリースパイラル

学生実験では、水晶球が左か右水晶かを区別するために、簡易型の偏光器(商品名:きらりビューアー)を用いる。図7でAの部分は1枚目の偏光板(偏光子)、Bの部分には雲母板(1/4波長板)と2枚目の偏光板(検光子)それにレンズが入っている。2枚の直線偏光板は直交配置になっている。図8にきらりビューアーの光学系を示した。1/4波長板と直線偏光板を組み合わせることにより、これが円偏光板として働く。(1/4波長板については付録参照)。水晶球の光軸(c軸)がちょうどABを結ぶ直線方向と一致したときだけ、虹色のエアリースパイラル(Airy's spiral)が見える(図9)。そして、左水晶では左巻き、右水晶では右巻きの渦になるので、その渦巻きの方向から水晶球の右と左が区別できる。なぜ、このような色鮮やかでキラリな模様が生じるのかについて、以下に順を追って説明を試みることにする。なお、エア

リースパイラルを観測中に、たとえば右水晶球を180°回転してc軸の方向を逆転させても、渦巻き模様は右巻きのままである。しかし、きらりビューアのBにはめ込んである雲母板をもし仮にAの窓の内側に移してこちらを円偏光板にすると、渦巻き模様が反転して逆向きになることがわかっている。

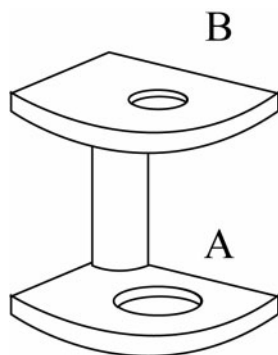
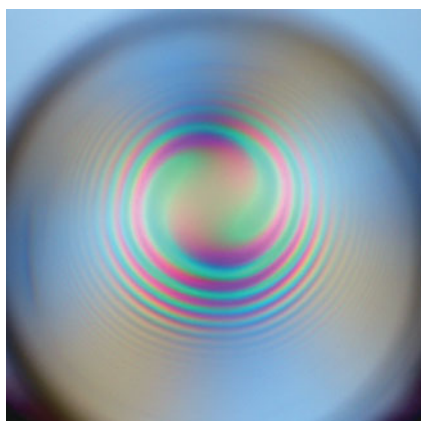


図7. きらりビューア, (A) 偏光子, (B) 雲母板と検光子



図8. きらりビューアの光学系



(a)



(b)

図9. エアリースパイラル, (a) 左水晶, (b) 右水晶
(鉱物・化石-やまもと店のQDLファインダーと水晶球15 mm φを用いて撮影)



図10. 右水晶板の上に左水晶板を重ねたときのコノスコープ像
(水晶板の厚さは各 4 mm, 偏光板は垂直配置)

G. B. Airy (エアリー) はイギリスの天文学者であり、1836年から1881年にかけてグリニッジ天文台長にもなった人である。天文学以外の分野でも、結晶による干渉縞を調べ、色消し接眼レンズの研究などを行った。¹²⁾ エアリースパイラルは彼の名前に由来している。なお、エアリースパイラルのオリジナルは、図10に示すような4重渦巻きであった。^{13, 14)} (詳しくは後に述べる)。

4-2. 結晶中での光の伝播

結晶中での原子や分子の配列は一般的に異方的である。このため光が伝播するとき、光の進行方向と振動方向によって光の進む速さが違ってくる。物質中の光の速度 v と、真空中における光速 c との比を屈折率 (あるいは絶対屈折率) n という。

$$n = c / v \quad (3)$$

光の速さは空気中でも真空のときとほぼ同じなので、屈折率は空気中と物質中における光の速度の比と考えてもよい。一般に結晶の屈折率は方向依存性があるため、それを三次元空間で表わすとだ円体となる (図11)。¹⁵⁾ 屈折率だ円体の中心を通り光の進行方向 s に対して垂直な断面はだ円となる。このだ円の長軸および短軸の長さを n_1 , n_2 とすると、これがそれぞれその軸の方向に振動する光の屈折率に対応する。つまり、 s 方向に進む光はだ円の長軸および短軸方向にそれぞれ振動する2つの偏光成分 (偏光面が互いに垂直) からなると考えることができる。また、長軸方向に振動する光の成分の方が短軸方向に振動する成分に対して進行速度が遅く、相対的に位相が遅れることになる。(光の振動数は一定なので、結晶中で伝播する際に光の波長が短くなることを意味する)。屈折率だ円体の断面が円となるような s の方位を光軸という。光軸が1本だけ存在する場合を一軸結晶といい、光軸が2本ある場合を二軸結晶という (表5)。水晶は一軸結晶であり、光軸は c 軸と一致する。つまり、水晶の c 軸方向に進む光は振動方向にかかわらず速度は同じであるが、光の進む方位が c 軸から傾くと振動方向によ

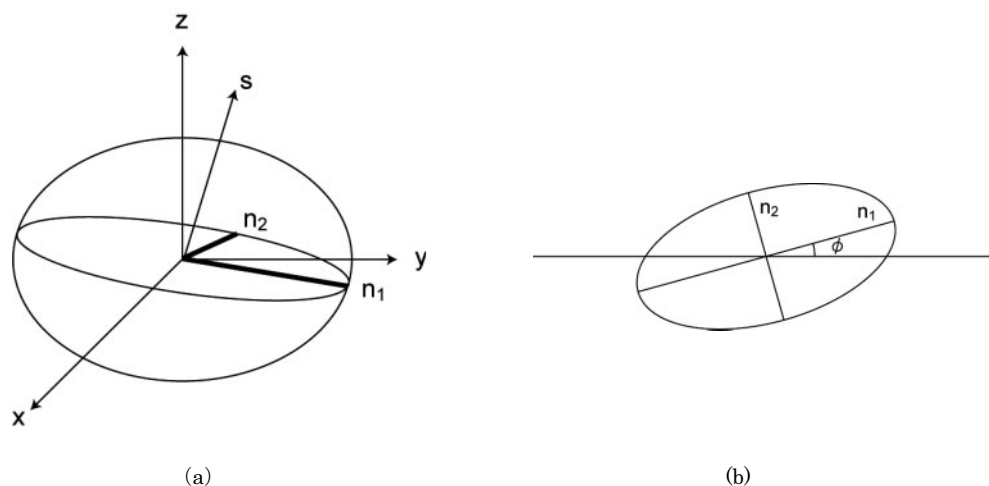


図11. (a) 屈折率だ円体と光の進行方向sに垂直なその断面, (b) だ円形断面の主軸 n_1 , n_2 と傾き角

表 5. 結晶系と光学的性質

| 結晶系 | 光学的性質 | 複屈折の有無 |
|------------|-------|---|
| 立方 | 等方性結晶 | 複屈折はおこらない。 |
| 正方, 三方, 六方 | 一軸結晶 | 光学軸を1本もつ(結晶のc軸方向)。複屈折によって分かれた2つの光の成分のうち, 一方は正常光, 他方は異常光となる。 |
| 三斜, 単斜, 斜方 | 二軸結晶 | 光学軸を2本もつ。複屈折によって分かれた2つの光の成分は, 両方とも異常光のようにふるまう。 |

表 6. 一軸結晶の屈折率(波長589 nm, 室温)⁶⁾

| | 正常光, n_o | 異常光, n_e (\perp c 軸) | Δn ($= n_e - n_o$) |
|------------------|------------|---------------------------|------------------------------|
| 方解石 | 1.658 | 1.486 | -0.172 |
| サファイア (コランダム) | 1.768 | 1.760 | -0.008 |

表 7. 水晶の屈折率(室温)の波長依存性⁶⁾

| 波長 λ (nm) | 正常光, n_o | 異常光, n_e | Δn ($= n_e - n_o$) |
|-------------------|------------|------------|------------------------------|
| 200.06 | 1.64927 | 1.66227 | 0.013 |
| 589.3 | 1.54424 | 1.55335 | 0.009 |
| 2053.1 | 1.52005 | 1.52823 | 0.008 |

表 8. 遅い光の振動方向

| | 遅い方の光の成分 | その光の振動方向(光線に垂直) |
|-------|----------|-----------------|
| サファイア | 正常光 | 結晶の光軸にも垂直 |
| 水晶 | 異常光 | 光軸と光線とを含む平面内 |

て速度が違ってくる。

方解石を通して見ると文字が二重に見える。これは、方解石の結晶中で光が2つに分かれ、別々の方向に屈折して進むからである。¹⁶⁾ このような現象を複屈折という。方解石も水晶と同じく三方晶系で、結晶のc軸が光軸になっている。これら一軸結晶では光の成分のうち、屈折の法則に従う方を常光線といい、結晶中の光の速度 v_o は進行方向によらず一定である。他方は異常光線といい、結晶の光軸とのなす角度が大きくなるほど、速度 v_e は v_o との差が大きくなる。光軸の方向に進行している場合に限り、 v_e は v_o と等しくなる。¹⁷⁾ 結晶中の光の速度は屈折率と反比例の関係にある。方解石では入射方向が光軸から傾くと異常光の屈折率が減少するが、正常光に比べて最大で10%も違うため(表6)、正常光と異常光とが別方向に分かれて進むことになる。水晶やサファイアの場合は異常光の屈折率が正常光に対して、最大で0.5%程度しか違わないため(表6, 表7)、正常光と異常光がたどる経路はほぼ同じとみなすことができる。なお、水晶では正常光に比べて異常光の方が伝播速度が遅いが、サファイアでは正常光の方が遅くなる(表8)。

水晶の六角柱の伸長方向(c軸)を横に倒して、垂直配置の2枚の偏光板の間にはさみ、水平面内で回転させてやると90°ごとに暗くなる。これを消光位という。図12の写真中央の大き



図12. 水平面内での水晶の光軸の方位と通過光との関係(偏光板は垂直配置)

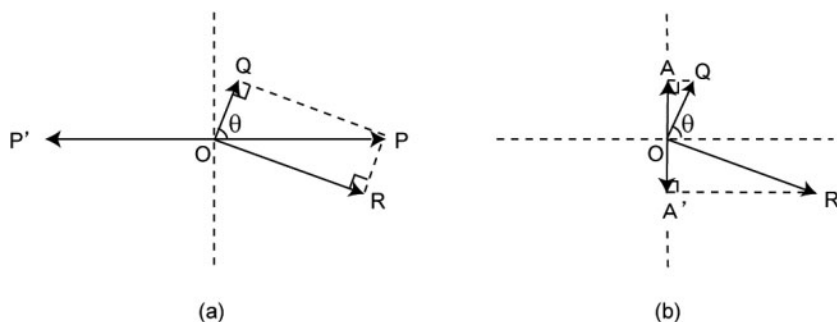


図13. 水晶の光軸が偏光子の透過軸と角度 θ のときの光の振動ベクトル, (a) 偏光子を通過後, (b) 検光子を通過するとき

い結晶の c 軸は鉛直方向に向けてあり、そのまわりに小さい結晶を c 軸が放射方向になるように配置してある。 c 軸が水平方向（偏光子の透過軸）あるいは鉛直方向（検光子の透過軸）を向くと光が通過せず暗くなっている。これらの透過軸に対して光軸が 45° 方向にある水晶粒は光が通過して輝いている。今、結晶の光軸が偏光子の透過軸と角度 θ の向きにあるときを考えよう（図13）。偏光子を通過した光の振動ベクトル OP （あるいはその逆方向の振動ベクトル）が水晶に入射すると、屈折率だ円体断面のだ円の主軸方向に振動する2つの成分に分かれ、それぞれが異なる速度で結晶中を進むと考えることができる。今の場合、光軸が水平面内にあると仮定しているので、だ円の主軸の1つは光軸の方向である。光軸方向に振動する成分の振動ベクトル OQ の長さは $|OP|\cos\theta$ 、光軸に対して垂直に振動する成分の振動ベクトル OR の長さは $|OP|\sin\theta$ となる。水晶は光学活性ではあるが、光が光軸に垂直に進む場合は偏光面が回転しない。これら2成分の光が検光子を通過するとき、鉛直方向（検光子の透過軸）の振動ベクトル成分だけが取り出されて合成されるので、 $OA' = |OR|\cos\theta$ （ $=|OP|\sin\theta\cos\theta$ ）の成分と $OA = |OQ|\sin\theta$ （ $=|OP|\sin\theta\cos\theta$ ）の成分を合わせたものとなる。¹⁷⁾ ただし、結晶中で2つの偏光成分は速度が異なるため、検光子を通過する際に OA と OA' の位相が半波長だけずれていると光の波が強め合って明るくなるが、位相が同じならば打ち消し合って暗くなる。屈折率（よって物質中の光の速度）は光の波長によって違うので、水晶中を進む際の2成分の位相のずれの大きさも異なるため、白色光が干渉し合って全部消えるということはない。光の強さは振幅の2乗に比例する。 $\sin\theta\cos\theta = (1/2)\sin 2\theta$ であることより、 $\theta = \pm 45^\circ$ の方向が一番明るくなり、 $\theta = 0$ または 90° のとき消光することがわかる。

4-3. 光軸に垂直な水晶板による旋光

図14のように、水晶の c 軸に垂直に切った板（厚さ d mm）を2枚の直線偏光板ではさんだときを考える。水晶板から観測者の目までは十分に離れていて、結晶板の c 軸に平行に入射した光が目には届くものとする。光軸（ c 軸）の方向に進む光については、その振動方向によらず進行速度は等しい。偏光子を通過した時点で偏光面は偏光子の透過軸と平行になっているが、水晶中を通過するに伴い偏光面が回転する。今、光源として白色光を用い、右水晶の光軸方向の比旋光度を $[\alpha]$ ($^\circ\text{mm}^{-1}$) とする。

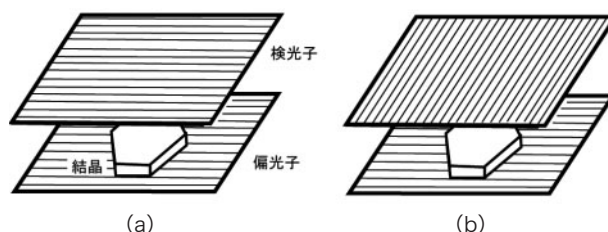


図14. 2枚の偏光板を用いての結晶の観察，(a) 平行配置，(b) 垂直配置

(i) 2枚の偏光板が平行配置のとき、

$$[\alpha] d = 90 + 180 (n - 1) \quad (n \text{ は } 1 \text{ 以上の整数})$$

を満たす波長成分は検光子によって遮断される。

$$[\alpha] d = 180 n$$

を満たす成分は特によく通過して目に入る。(水晶板を面内で回転させても明るさは変わらない)。

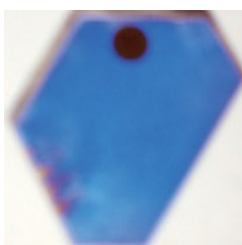
(ii) 2枚の偏光板が直交配置のとき、

遮断される光の成分と、特によく通過する光の成分が (i) のときと入れかわる。

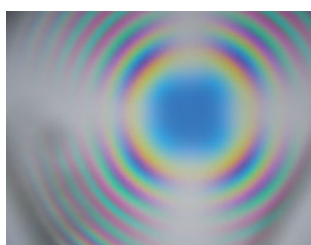
c 軸方向の厚さ d が 4 mm の場合について計算した結果を表 9 に示す。偏光板が平行配置のときに遮断される可視光は波長が 580 nm 付近の黄色成分であり、偏光板が垂直配置のときに遮断されるのは波長が 420 nm 付近の紫色成分と予想される。よって、それらの補色としてそれぞれ青と黄緑に見えるはずだが、実際に図 15 (a)(c) に示したように、ほぼそれに対応している。この写真を撮影するときに、光源としてライトパネルを使用したのが、ミニ分光器によ

表 9. 水晶 (c 軸方向長さ 4 mm) の旋光度の計算

| No. | 2枚の偏光板によって遮断される条件 | $[\alpha]$ | 対応する波長 λ (色とその補色) |
|-----|------------------------------------|--------------|---------------------------|
| (1) | (平行配置のとき) $4 [\alpha] = 90^\circ$ | 22.5° | 580 nm (黄で、その補色は青) |
| (2) | (垂直配置のとき) $4 [\alpha] = 180^\circ$ | 45° | 420 nm (紫で、その補色は黄緑) |
| (3) | (平行配置のとき) $4 [\alpha] = 270^\circ$ | 67.5° | 350 nm (紫外部) |
| (4) | (垂直配置のとき) $4 [\alpha] = 360^\circ$ | 90° | 310 nm (紫外部) |



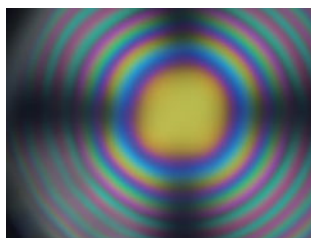
(a)



(b)



(c)



(d)

図 15. 水晶板 (厚さ 4 mm) の観察, (a) 平行配置, (b) 平行配置でのコンスコープ像, (c) 垂直配置, (d) 垂直配置でのコンスコープ像

りそのスペクトルを測定した結果を図16に示す。偏光板がない場合、蛍光灯は三波長形昼白色の典型的なスペクトルを示している。偏光板自身も可視光を吸収するため、(a) 偏光板2枚を平行配置にして、それを通過させると光の強度が約1/4に減衰するが、基本的なパターンは変わらない。(b) 偏光板2枚を垂直配置にしたときの波長の光もバックグラウンドレベル

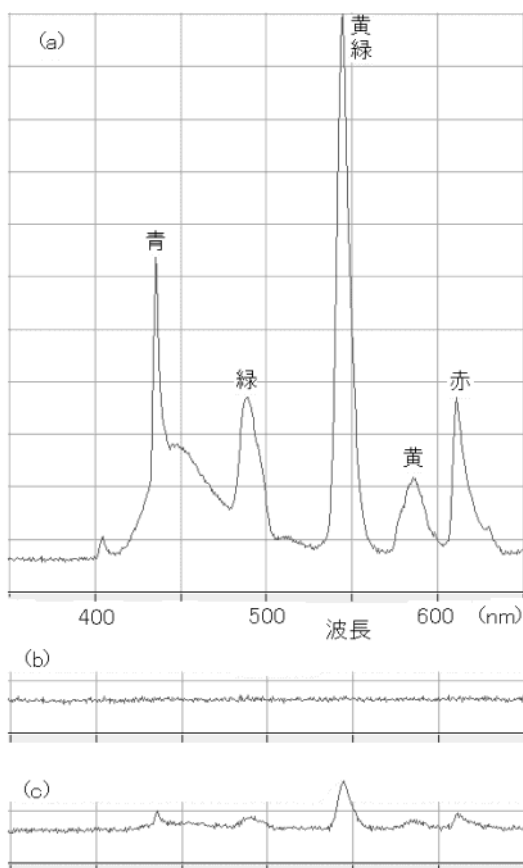


図16. ライトパネル（蛍光灯）のスペクトル，(a) 偏光板が平行配置のとき，(b) 垂直配置のとき，(c) 垂直配置の偏光板の間に水晶板（厚さ4 mm）を入れたとき

表10. 水晶（c軸方向長さ12 mm）の旋光度の計算

| No. | 2枚の偏光板によって遮断される条件 | $[\alpha]$ | 対応する波長 λ （色） |
|-----|------------------------------------|--------------|----------------------|
| (1) | （平行配置のとき）12 $[\alpha] = 90^\circ$ | 7.5° | 990 nm（赤外部） |
| (2) | （垂直配置のとき）12 $[\alpha] = 180^\circ$ | 15° | 705 nm（赤） |
| (3) | （平行配置のとき）12 $[\alpha] = 270^\circ$ | 22.5° | 580 nm（黄） |
| (4) | （垂直配置のとき）12 $[\alpha] = 360^\circ$ | 30° | 510 nm（緑） |
| (5) | （平行配置のとき）12 $[\alpha] = 450^\circ$ | 37.5° | 455 nm（青） |
| (6) | （垂直配置のとき）12 $[\alpha] = 540^\circ$ | 45° | 420 nm（紫） |

まで下がったが、(c) 偏光板の間に水晶板をはさむと弱いながらも光が通過する様子がわかる。青色のピーク（極大波長435nm）は赤色のピーク（極大波長611nm）に比べて元々は約2倍くらいの強度があるが、それが(c)では同じ位の高さになっている。これは、先に計算したように波長420nm付近の成分が検光子によって特に遮断されたからである。このため、青の補色として黄色に見えたのである。

水晶の厚さが増して、たとえば $d=12\text{mm}$ となると、偏光板によって遮断される可視部の波長は2ないしは3成分になる（表10）。厚さがさらに増すと、旋光度が1周遅れの波長成分も遮断されるようになるので、可視部の波長領域を細切れに裁断して1つおきに遮断（あるいは通過）させることになる。

4-4. 水晶板のコノスコープ像

偏光板にはさんだ水晶板（c軸に垂直な切片）に目を近づけると、図15 (b)(d) のような縞模様が現われる。より広範囲の角度からの入射光線が目に入るようになり、水晶板中の光の通過距離が角度によって違ってくる（図17a）。また光の進行方向が結晶の光軸から傾くほど屈折率の異方性の影響が強くなるため、検光子を通過する際に白色光のうちの特定の波長成分が消え、多彩な色が現われる。これをコノスコープ像（あるいは干渉像）という。図15bの同心

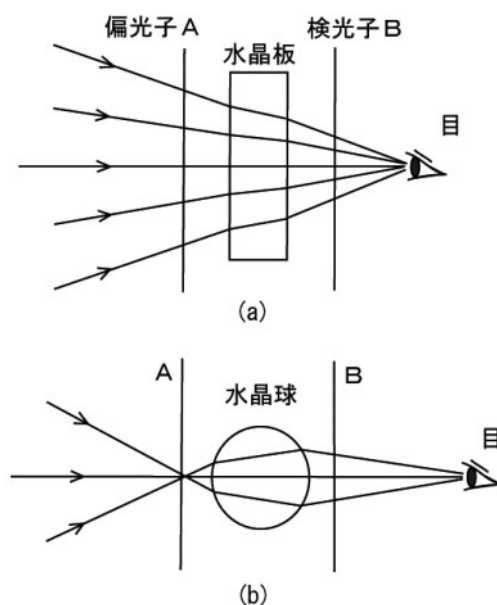


図17. 干渉像観察における、(a) 水晶板と (b) 水晶球による光の屈折

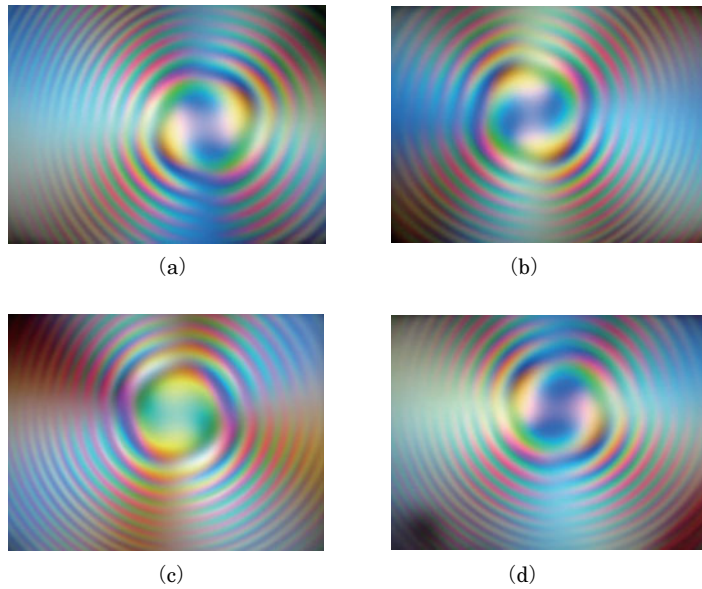


図18. 水晶板のコノスコープ像（偏光子の透過軸は水平方向で、検光子として円偏光板を使用）。(a) 左水晶（左円偏光）、(b) 左水晶（右円偏光）、(c) 右水晶（左円偏光）、(d) 右水晶（右円偏光）。

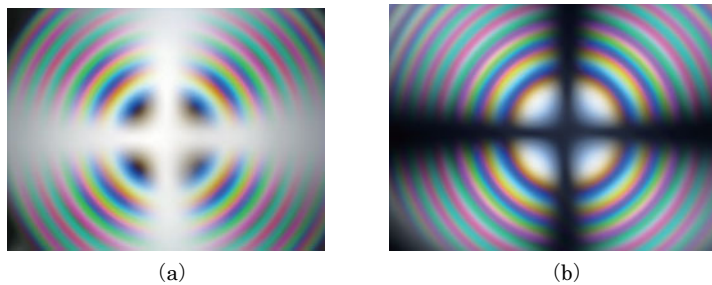


図19. サファイア板（厚さ 4 mm）のコノスコープ像，(a) 平行配置，(b) 垂直配置

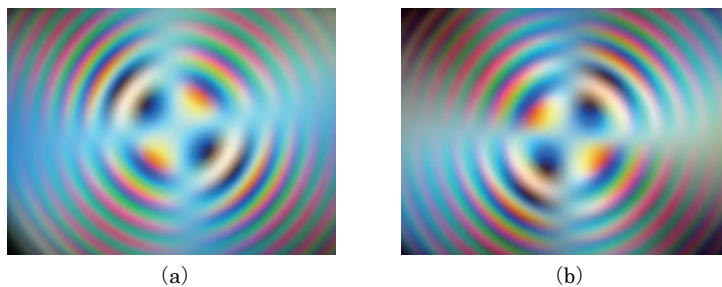


図20. サファイア板（厚さ 4 mm）のコノスコープ像。検光子として (a) 左円偏光板，(b) 右円偏光板を使用（ただし偏光子の透過軸は水平方向）

円の中央部分は、図15aと同じ青色だが、これは水晶板に対して垂直に通過した光の部分が見えているからである。目に近い方の偏光板（検光子）を円偏光板に変えると、同心円状であった縞模様が渦巻き模様になる（図18）。これがエアリースパイラルである。このとき、右円偏光板を使おうが左円偏光板を使おうが、渦巻きの方向は変わらない。右水晶ならば右巻き（時計回り）、左水晶ならば左巻きとなる。ただし、左と右の円偏光板を使ったときに、渦巻きの明と暗の位置が入れかわっている。

なぜこのような、キラレな模様が生じるのか（2回回転対称性は保たれているのに、なぜ左右対称性がくずれるのか）考えてみよう。水晶板を通過する際に光は屈折率の異方性と旋光性の両方の影響を受けるが、屈折率の異方性の影響が桁違いに強く、光の進行方向が結晶のc軸から傾くほど旋光性の効果はかかれてしまう。¹⁴⁾ サファイアは水晶と同じ一軸結晶であるが、旋光性を持たず屈折率の異方性の効果だけが現れるので比較するのに便利である。c軸に垂直に切り出したサファイア板（無色透明）を2枚の偏光板の間にはさみ、コンスコープ像を撮影すると図19のようになる。平行配置でも垂直配置でも、同心円状の縞模様が観察されるのは水晶のときと同じで、複屈折による干渉のためである。円の中央部分に着目すると、サファイア板のとき、光の波長によらず全て通過するか、あるいは全て遮断されている。これは、サファイアが旋光性をもたないことと対応している。検光子を直線偏光板から円偏光板に変えると、図20のような像になる。左円偏光板を使うかあるいは右円偏光板を使うかによって、画像中の明暗の位置が入れかわる。この理由は次のように説明することができる。サファイアの場合、偏光子の透過軸（水平方向）に対して結晶中の光の振動方向が $\phi = \pm 45^\circ$ の角度のとき、結晶中を伝播する2つの光の成分の振幅が同じになる（図13a参照）。これら2成分の位相が1/4波長だけずれると円偏光となる（図22）。すなわち、遅い光の成分OQが水平方向に対して $+45^\circ$ の場合に、光の進行方向から振動ベクトルの時間変化を観察すると、振動ベクトルが左側（反

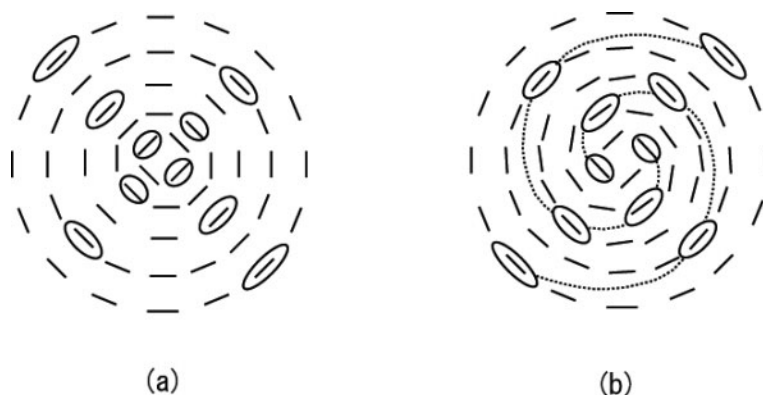


図21. 結晶板（c軸に垂直な面）を通過した正常光成分の振動軸，(a) サファイア，(b) 右旋性水晶。○で囲んであるのは、左円偏光となる位置（ただし偏光子の透過軸は水平方向）。(b) の点線は、エアリースパイラルを示す補助線。

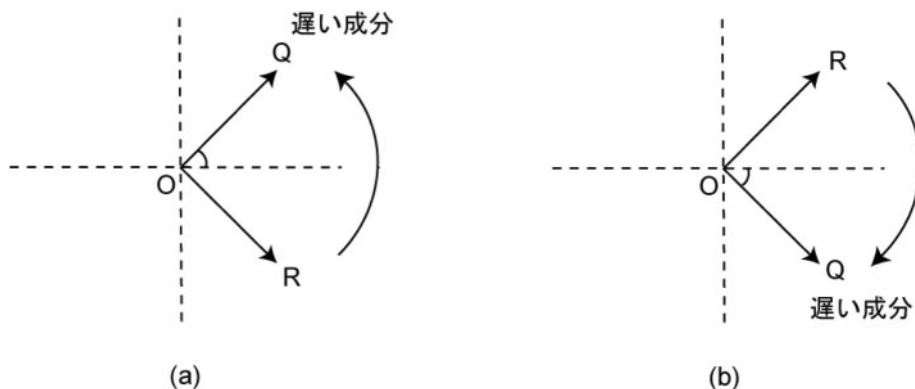


図22. 円偏光の2つの振動成分, (a) 左回りの円偏光, (b) 右回りの円偏光

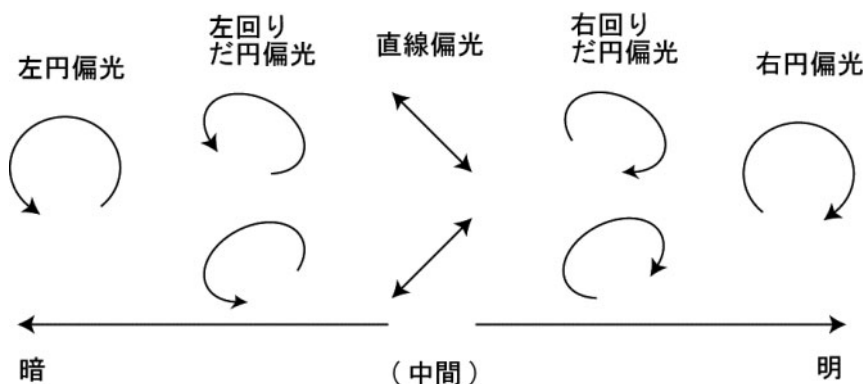


図23. 右円偏光板を通過して見える光の強度

時計回り)に回転する,つまり左円偏光となっている(図22a)。遅い光の成分が水平方向に対して -45° の場合には,右回りの円偏光となる(図22b)。右円偏光板は右円偏光を通すが,左円偏光は通さない(図23)。よって,右円偏光板を通すと,遅い成分の振動軸の角度 $\phi = -45^\circ$ の部分が明るく見え,左円偏光板のときは $\phi = +45^\circ$ の部分が明るく見えることになる。c軸から徐々に傾くにつれて光成分の位相差が大きくなり, $1/4\lambda$ (左円偏光), $1/2\lambda$ (直線偏光), $3/4\lambda$ (右円偏光), λ (直線偏光),……と交互に変わっていく。ちなみに,その他の位相差の場合にはだ円偏光となる。図21では結晶から出てくる光が左円偏光となる位置を丸で囲って示している。その配置をみると,2回回転対称性は保たれるが水平方向(偏光子の透過軸)に対しての鏡面对称性はくずれていることがわかる。また,検光子を左円偏光板から右円偏光板に変えると,明暗の位置が逆転する理由も明らかである。

水晶の旋光度は入射光の波長によって違うので,たとえば波長589 nmの光が厚さ1 mmの右水晶板を通過した場合を考えよう。偏光子の透過軸方向に振動する直線偏光は,結晶のc軸に平行に進んだときにはまったく複屈折の(結晶中で電場の振動方向によって光の速度が異なる

表11. 辞典にみられる右水晶と左水晶に関する記述の混乱

| 辞典名 | 辞典中の記述内容 (抜粋) | コメント |
|----------------------|--|---|
| 理化学辞典 ¹⁸⁾ | 旋光性が互いに逆の右旋性型 (右石英), 左旋性型 (左石英) がある。 | 右と左の定義が, 旋光性に基づいており, 記述内容は正しい。ただし, 「石英」の項目として書かれており, 「水晶」の項目はそれを引用する形となっているため, 目立ちにくい。 |
| 化学辞典 ¹⁹⁾ | 573°Cを転移点として, 低温型 (α 水晶) の三方 $P3_121$ (右水晶)・ $P3_221$ (左水晶) と高温型 (β 水晶) の六方 $P6_422$ (右型)・ $P6_222$ (左型) とがある。 | 右と左の定義が結晶の空間群によってなされているが, 本来は旋光性に基づいてなされるべきであり, 右旋性の水晶の空間群は $P3_221$ なので訂正を要する。 |
| 物理学辞典 ¹²⁾ | z 軸とよばれる3回らせん軸をもち, このらせん軸の向きにより, 右水晶 ($P3_121$) と左水晶 ($P3_221$) との2種がある。 円偏光複屈折の大きさは右水晶で $n_L - n_R = 2.365 \times 10^{-4}$ (波長236 nm), 左水晶では逆符号で同じ値である (n_L, n_R はそれぞれ左円偏光, 右円偏光に対する屈折率)。 | 前半では水晶の右と左を結晶構造のらせんの向きに基づいて定義している。(この定義に従うと右水晶は左旋性型になってしまう)。しかし, 後半の旋光性に関する説明で, 右水晶では $n_L > n_R$ としている。これは右旋性を意味しており, 上記の定義と矛盾する。右水晶と左水晶は旋光性に基づいて定義されるべきであり, 訂正を要する。 |

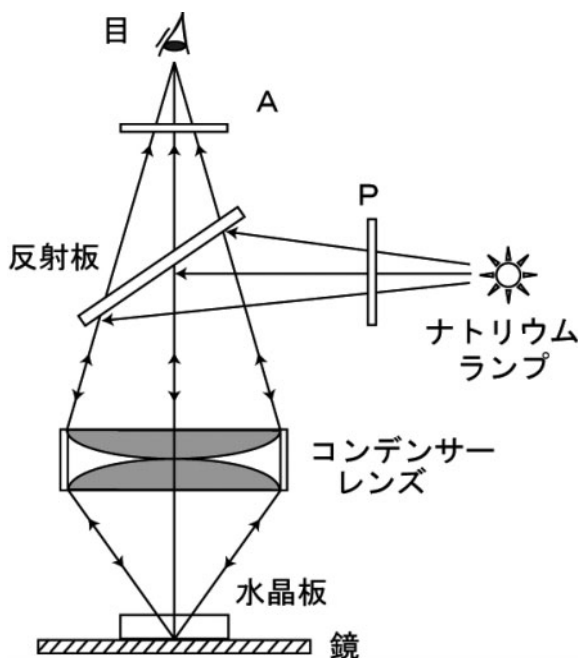


図24. エアリースパイラル測定装置の原型 (PとAは直線偏光板)¹²⁾

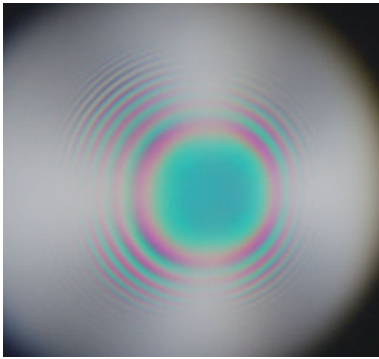
ってくる) 影響を受けず, 偏光面が約 22° 右に回転した状態で結晶から放出される。c 軸に対して光線が傾くと, 複屈折と旋光性の両方の影響を受ける。偏光子を通過した直線偏光が, 水晶中を伝播するにつれて振動方向が右回りに回転するという事は, 結晶中を伝播する光の振動方向を固定して考えると, 水晶の屈折率だ円体の断面のだ円が左に回転することに相当する。c 軸から光線が傾くと旋光性は徐々に弱くなる(垂直のとき旋光性はなくなる)。図21bでは図の中心に近づくにつれて, 正常光成分の振動軸が円周方向から左へ回転しているが, これは水晶の旋光性が中央部分で顕著であることを示している。水晶についても, サファイアの場合と同様に光の振動方向が $\phi = \pm 45^\circ$ の角度のとき右円偏光あるいは左円偏光の明るい光が観察される。ただし, サファイアでは正常光が異常光よりも遅く, 水晶ではその関係が逆転することに注意しなければならない(表6, 7)。図21bにはエアリースパイラルの二重渦巻き方向を補助線で示してあるが, 右旋性の水晶に対応して右回りの渦巻き模様になっている。(エアリースパイラルの定量的な解析は, 参考文献14を参照)。

右水晶板の上に左水晶板(両方とも厚さ4 mm)をのせ, 垂直配置の直線偏光板ではさんで, カメラのレンズを接近させて撮影したのが図10である。右回りの4重渦巻き模様となっている。これがエアリースパイラルの原型である。水晶板が正確にc軸に垂直でないと, 干渉像はまだ模様となってしまうが, 結晶板の方位を調整して, 2枚の水晶板の干渉像の中心円がうまく重なるように合わせてやれば, 4重渦巻きが見える。2枚の水晶板の厚さが多少違っていても問題はない。このように, 原理的には右水晶と左水晶板を重ねて光軸の方向を一致させ, それに光を通過させなければならない。しかし, 鏡による光の反射を利用すると, 水晶板1枚だけで同様な観察をすることができる。水晶板が右結晶とすると, 右水晶を通過して鏡で反射した光は, 同じ厚さの左水晶板を通過した光と同等なので, もう一度右水晶板を通過させてから検光子を通過させる仕組みがかつて用いられていた(図24)¹³⁾ この装置を使うと, 左結晶と右結晶の区別の他に, 切り出された水晶板の方位が正確にc軸に対して垂直かを検査することができる。

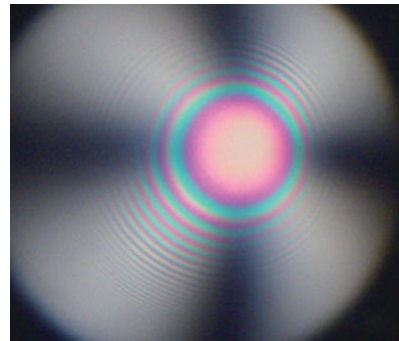
4-5. 水晶球の干渉像

2枚の偏光板ではさんで水晶球を観察すると, 結晶のc軸を入射光線の方向に一致させたときに同心円状の縞模様が見える(図25)。球の中央の色は平行配置と垂直配置とで異なるが, これは水晶球の中心付近を通りほぼ直進する入射光については, 球の直径と同じ厚さの水晶板のときと同様で, 光の波長による旋光度の違いが効いている。球に対して斜めに入射あるいは放射したときは, 光の屈折が起こるので, 水晶球がレンズのような働きをしている(図17b)。また, 結晶中で光軸から傾いた方向に進む光も目に入ってくるため, 屈折率の異方性の影響で干渉縞が現われている。

水晶と同じ一軸結晶であるサファイア球についても, c軸を入射光線に平行に向けたときに縞模様が現れる(図26)。検光子を円偏光板に変えても, 渦巻き模様は現われず, 交互に切れた円環状となる(図27)。これは基本的にサファイア板のときと同じである。

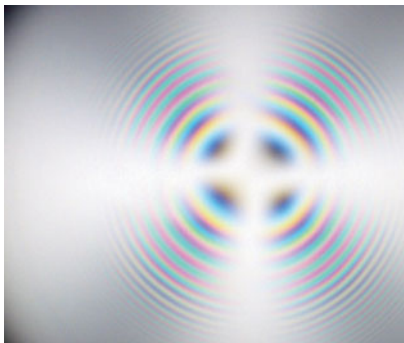


(a)

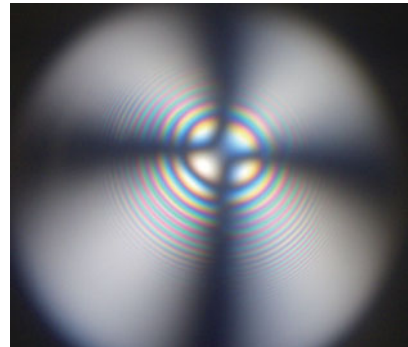


(b)

図25. 水晶球（右水晶12 mm ϕ ）の干渉像，(a) 平行配置，(b) 垂直配置。（結晶の c 軸を入射光線に平行に向け，焦点距離50 mmのレンズをカメラの直前に入れて撮影）



(a)



(b)

図26. サファイア球（直径14.2 mm ϕ ）の干渉像，(a) 平行配置，(b) 垂直配置。（結晶の c 軸を入射光線に平行に向け，焦点距離50 mmのレンズをカメラの直前に入れて撮影）

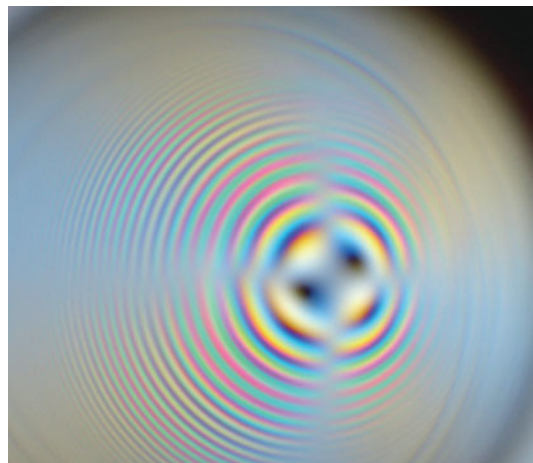


図27. サファイア球（直径14.2 mm ϕ ）の干渉像（検光子として円偏光板を使用）

5. 考察

5-1. 石英か水晶か

この解説を書く際に、表題を「右水晶と左水晶」にするか「右石英と左石英」にするか迷った。物質名として英語では quartz であり、日本語としては石英がそれに該当する。しかし、単に石英という場合、石英ガラスもあり必ずしも結晶を意味しない。辞典によっては「右石英と左石英」を採用しているものもあるが、¹⁸⁾ 結晶をイメージした場合、「右水晶と左水晶」の方がより自然に感じられる。なお、紫色の石英は「紫水晶」とよび、「紫石英」とはよばない。また水晶は時計の発振子としても利用されているが、クォーツとも水晶時計ともいう。結局、どう呼ぶかは習慣の問題であり、必要に応じて使い分けるのが良いと思われる。³⁾

5-2. 右水晶と左水晶の定義

従来より、右旋性の水晶を右水晶、左旋性のものを左水晶とよぶ。日本の工業会では、人工水晶はすべて右水晶に統一されている。³⁾ 石英を溶融させ、そこに種結晶を入れて引き上げて大きい結晶をつくるが、種結晶が右水晶であれば、それから成長したのも右水晶になる。辞典を調べてみたところ、水晶の結晶構造の3回らせん軸にもとづいて、右か左かを定義しているものがあり、これは旋光性にもとづく右と左の定義と逆であり、修正を要する(表11)。1958年に水晶の絶対構造がX線回折法で決定されたときでも、その水晶の旋光性と絶対構造との関係が確立されたことに意味があった。⁷⁾ 結晶の物性として測定可能な旋光性にもとづいて、右と左を定義するのが論理的でありかつ実用である。なお、左右の定義が混乱している現状では、あいまいさを避けるために、右水晶といわないで右旋性水晶とよぶべきかもしれない。

かつて、生物学では植物のつるの右巻きと左巻きの定義を観察者からみたときの右回りと左回りとしていた学者もいて、右巻きらせんと左巻きらせんの呼び方が混乱していた。¹⁾ 現在では、進行方向に向かって右回り(時計回り)のものを右巻きらせんと定義している。構造の左と右が入れかわるような同様の混乱は、過去に結晶学においても生じた。⁹⁾

5-3. 円偏光板の役割

水晶のエアリースパイラルを観察するためには、検光子として直線偏光板ではなく円偏光板を用いる。この円偏光板とは、1/4波長板と直線偏光板とを組み合わせたものである。(1/4波長板については付録参照)。円偏光板は透過軸のようなものを持たないため、どのような角度に回しても観測結果は変わらないはずである。しかし、実際に円偏光板を回すと、エアリースパイラルの像が変化する。これはどうしてであろうか。実は1/4波長板というのは厳密には特定の波長のときにしか正しく働かないからである。例えば波長589nmの光に対して、それを通過した後の2つの光の成分の位相差がちょうど1/4波長になるように厚みを調整した場合、青色の光(435nm)に対しては位相差がもっと大きくなり1/3波長程度になる。つまり、可視

光の全波長領域に対して厳密に円偏光板になっているわけではないのである。

ある種のコガネムシ（特にスジコガネやダイコクコガネ亜科に属するもの）から反射される光は左円偏光になっているとのことである。²⁰⁾ 市販の左円偏光板をたとえばミドリダイコクコガネにかざしても明るさは変わらないが、右円偏光板では確かに暗くなる。ただし、右円偏光板を回すと暗さが多少変化する。

5-4. オリジナルのエアリースパイラル

直交配置の直線偏光板の間に左と右の水晶板（c軸に垂直な切片）を重ねて目を近づけてみると、なぜ図10のような4重渦巻きになるのであろうか。4回回転対称を示すということは、偏光子と検光子の透過軸の方向を入れかえても結果は同じであることを意味する。偏光子を通過して右水晶に（光軸に対して斜めに）入射した直線偏光は、右旋性のため屈折率のだ円が左に回転し、そしてその長軸と短軸の方向にそれぞれ振動する2成分の（位相の異なる）偏光となる。次にそれが左水晶に入射するが、遅い方の光の振動方向は右水晶と左水晶とで共通である（表8）。よって、左水晶を通過する際にそれぞれの振動方向が左に回転しながら、さらに位相のずれが積算されていくことになる。初めの右水晶を通過した時点で右あるいは左円偏光（つまり位相のずれが1/4波長）であった場合、次の左水晶を通過し終わった時点で、速い光と遅い光の位相差がちょうど半波長になるので、それらを合成したものは直線偏光となる。遅い光の成分の振動方向が偏光子の透過軸（水平方向）に対して時計回りに45°でも、反時計回りに45°であっても、2枚の水晶板を通過した後は鉛直方向に振動する直線偏光となるため、検光子を通過し明るく見える。偏光子と検光子の透過軸の方向を入れかえても、観測される干渉像が同じになるのはこのためである。

はじめの右水晶を通過する時点で左円偏光板あるいは右円偏光板を通して明るく見えるはずの位置（図18cとd）が、さらに左水晶を通過して検光子で観察するときには明るくみえると推定される。よって、渦巻きの方向は光がはじめに通過する結晶の旋光性によって決まり、右旋性のときは右回りとなる。図10のうずまきの中心部分は暗くなっている。これは、c軸に平行に進む光は複屈折の影響は受けませんが、右と左の結晶を両方通過するため、旋光性が打ち消されて偏光面の方位が元にもどり、検光子を通過できないからである。

6. 学生実験への対応

右水晶と左水晶が結晶外形からわかるような、天然水晶の標本を手に入れるのに苦労した。天然水晶を売っている店は多数あるが、水晶に右と左の区別があることを知らない場合もあり、また鉱物学的な知識があったとしても微小面がはっきり出ているようなサンプルは非常に珍しいため、注文して買えるような品物ではない。幸運にも、鉱物・化石―やまもと店に在庫があったので、左水晶と右水晶（長さは4～5cm）を各20個程度購入した。これはブラジルから200本まとめて仕入れたもののうち、微小面が肉眼で観測可能なものを選び出してもらった結

果である。それでも、微小面による右と左の判別は慣れないと難しい。

旋光性や複屈折の概念は理解しにくいだが、水晶球を回してエアリースパイラルが見えると、学生は感激する。なぜ渦巻き模様になるのかを知りたがるものはほとんどいないが、水晶球の右と左が容易に区別できることは事実として理解できる。目で見えるものは、それだけ説得力がある。原子や分子のミクロな世界に、右手と左手の違いがあったとして、それが我々にどのようなかかわってくるのかを知ってもらうために、鏡像異性体で匂いが異なるものを用意して、香りを嗅ぎ比べることを実験に加えた。(−)−リモネンは柑橘類のさわやかな香りがして、(+)-リモネンはオイルのような匂いがする。我々の体もキラルな物質からできているため、鼻で不斉が認識できるのである。味の素(L-グルタミン酸ナトリウム)は元々はこんぶから抽出されたうま味成分であるが、非天然型であるその鏡像体は味が無い。我々の舌が味物質を見分けるからである。²¹⁾

水晶は振動子あるいは超音波の発振子として、工業界では重要なデバイスとなっている。²²⁾これは水晶の圧電気性を利用したものだが、時を刻む素子として携帯電話やパソコンにも水晶が使われている。日本ではすべて人工の右水晶が利用されていることを学生に紹介すると、水晶をもっと身近に感じてくれるのではないだろうか。

謝辞

エアリースパイラルの解釈について、慶應義塾大学日吉物理学教室の三井隆久准教授にご協力いただいた。また、ここで報告したキラリティに関する実験テーマの開発は、慶應義塾大学部門内調整費および文部科学省「特色ある大学教育支援プログラム(平成17年度採択)文系学生への実験を重視した自然科学教育」からの助成金を用いて行われた。

参考文献

- (1) ガードナー, M. 著, 坪井忠二, 小島弘共訳「自然界における左と右」(紀伊国屋書店, 1971年)。
- (2) Wells, A. F. (1984). *Structural Inorganic Chemistry*, Clarendon Press, pp. 1004-1008.
- (3) 秋月端彦著, 「山の結晶」(裳華房, 1993年)。
- (4) Mason, S. F. (1982) *Molecular Optical Activity & the Chiral Discriminations*, Cambridge University Press.
- (5) 「理科年表」(国立天文台編, 丸善, 2008年)。
- (6) 「化学便覧, 基礎編」(日本化学会編, 改訂5版, 丸善, 2004年)。
- (7) De Vries, A. (1958). "Determination of the Absolute Configuration of α -Quartz," *Nature* 181, 1193.
- (8) Glazer, A. M. and Stadnika, K. (1986). "On the Origin of Optical Activity in Crystal

- Structures,” J. Appl. Crystallogr. 19, 108–122.
- (9) Donnay, J. D. H. and Le Page, Y. (1978). “The Vicissitudes of the Low-Quartz Crystal Setting or the Pitfalls of Enantiomorphism,” Acta Crystallogr. A34, 584–594.
- (10) Mason, S. F. (1994). From Pasteur to parity nonconservation: theories of the origin of molecular chirality. In “Circular Dichroism”, pp.39–57, eds. K. Nakanishi, N. Berova & R. W. Woody, VCH Publishers.
- (11) 秋月端彦著, 「鉱物マニアになろう」(裳華房, 2003年)。
- (12) 「物理学辞典」(物理学辞典編集委員会編, 三訂版, 培風館, 2005年)。
- (13) Parrish, W. and Gordon, S. G. (1945). “Orientation Techniques for the Manufacture of Quartz Oscillator-Plates,” Am. Mineral. 30, 296–325.
- (14) Geday, M. A. and Glazer, A. M. (2002). “A New View of Conoscopic Illumination of Optically Active Crystals,” J. Appl. Cryst. 35, 185–190.
- (15) 応用物理学会光学懇話会編, 「結晶光学」(POD版, 森北出版, 2003年)。
- (16) 井上勤監修, 「岩石・化石の顕微鏡観察」(地人書館, 2001年)。
- (17) 児玉帯刀著, 「光」(槇書店, 1979年)。
- (18) 「理化学辞典」(長倉三郎他編集, 第5版, 岩波書店, 1998年)。
- (19) 「化学辞典」(大木道則他編集, 第1版, 東京化学同人, 1994年)。
- (20) <http://www.op.titech.ac.jp/lab/Take-Ishi/html/ki/hg/et/sb/goldbug/goldbug.html>
木下修一「モルフォチョウの碧い輝き——光と色の不思議に迫る」(化学同人, 2005年)
p.145–147.
- (21) 李浩喜著, 「暮らしの化学」(裳華房, 1996年)。
- (22) 渋谷和明著, 「やさしい水晶のおはなし」(電気書院, 2005年)。

参考

(1) 不斉炭素

分子中の炭素原子のうち、4種類の異なる原子あるいは原子団がそのまわりに結合したものを不斉炭素（あるいはキラル炭素）という。歴史的に鏡像異性体を区別する過程で、右旋性の(+) -グリセルアルデヒド $\text{CHO}-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2\text{OH}$ から誘導される系列をDと呼び、その鏡像体をLとした。天然に存在するアミノ酸は通常は全てL型、糖はD型である(図28)。なぜ一方の鏡像体だけに限られているのかについては、地球での生命誕生の仕組みとも関わっていて、まだ謎のままである。

(2) 半面像による右水晶と左水晶の区別

水晶は六角柱状であり、その伸長方向が結晶のc軸である。基本的な結晶の形は、柱面(図5の中のmあるいはm')が合計6個あり、先端のとがった部分の斜面(Rあるいはr)が合計6個ある。右水晶と左水晶の判別は以下のようにして行う。

①柱面(mあるいはm')と斜面(Rあるいはr)の間にあるはずの、微小面xをさがす。

微小面xは柱面に対してあまり傾いていない。

②その柱面を正面から見たとき、微小面xが右肩にあれば右水晶で、左肩にあれば左水晶である。(1つの微小面xがたとえば右肩に見つかったら、柱面の1つおきに同じ右肩に微小面xが出ていることが期待される。つまり、合計3箇所)。

なお、微小面s(隣り合う2つの柱面mとm'に対して同じ角度をなす面)しかない場合、右水晶と左水晶の区別はつかない。一般的に、微小面xがはっきり見える例は非常に珍しい。

(3) 1/4波長板

一軸結晶の光学軸と平行な薄板をつくり、それに垂直な方向から光をあてると、複屈折により正常光と異常光に分かれるが、その位相差が1/4波長になるように厚さを調整したものを1/4波長板という。波長589nmの光に対して、雲母を1/4波長板にするには、厚さを0.032mmにすればよい。¹⁷⁾ 正常光に比べて異常光の屈折率が Δn だけ大きいとすると、厚さLの波長板を通過した後での異常光は正常光に対して、 $\delta = (2\pi/\lambda)\Delta nL$ だけ位相が遅れることになる。

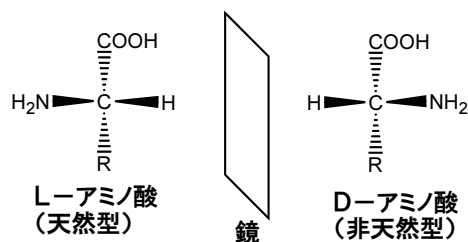


図28. アミノ酸の鏡像異性体

(位相が遅れる方の光成分の振動方向を遅相軸という)。可視領域に対して Δn を仮に一定とすると、同じ厚さ L の波長板を通過したときの位相差 δ は波長が短いほど大きくなることがわかる。

円偏光板は1/4波長板に直線偏光板を重ねることによって作成できる。ただし、重ね合わせの順番と方向が問題となる。観測者からみて手前側にある直線偏光板の透過軸が、奥側にある1/4波長板の遅相軸に対して右に（時計回りに） 45° 傾いているときに右円偏光板、左に 45° 傾いているときに左円偏光板となる。右円偏光とは、光の進行方向から振動ベクトルの時間変化を観察するときに、振動ベクトルが右側に回転するものである。ある瞬間の光の振動ベクトルの空間分布に注目すると、右円偏光は右ネジの配置になっている。⁴⁾

(4) きらりビューアの使い方

- ① 水晶球を指でつまみ、きらりビューアの AB の間にもって行く（図7）。
- ② B の方のレンズをのぞき、水晶球に焦点が合うように水晶球の位置を調整する。
- ③ 水晶球の重心位置をかえずに回転させ、虹色の渦（エアリースパイラル）が現れる方位をさがす。（A から B に向かう方向に水晶の c 軸が一致したときだけ、渦巻き模様がみえる）。右水晶は右巻き、左水晶は左の渦巻きに見えるはずである。

