

誕生石の鉱物科学

— 10月 オパール —

奥山康子¹⁾

10月の誕生石は「オパール」です。正確には、precious opal (和名は貴蛋白石) というべきものです。オパール (和名: 蛋白石) は、化学式 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ と表される、水を含んだ二酸化ケイ素 (シリカ) で、見た目も組織も実に多様です。宝石質のオパールは、その貴重な一部なのです。

宝石質オパールの魅力は、言うまでもなく「遊色 play of color」と呼ばれる虹色の煌めきにあります。無色、あるいは「ブラック・オパール」での暗色の下地に、角度によって赤、緑、青と煌めく光—これこそこの宝石の最大の魅力です。英語表現の通り、光の戯れそのものです(第1, 2図)。光の七色そのままの煌めきは、鉱物自体の色ではなく、鉱物の何かの働きによって入射した光が分光され、干渉効果で強めあって観察する私たちに返ってくることを示唆しています。オパールの場合、この「鉱物の働き」とは何なのでしょうか？

マクロな物質の内部に密度や光の屈折率の違う層からなる層状構造が存在する場合、光の回折と干渉が起きることが知られています。屈折率の違いのため、並行して入射する光が層状構造の境界面で反射されるものと内部に侵入して反射されるものに分かれ、両者に光路差が生じること

と、低密度の物質を通った波長 λ の入射光がより高密度の物質で反射されると反射光に $\lambda/2$ の位相のずれが起きることが、鍵となります。

密度の低い物質 n と、より密度が高く薄膜状 (厚さ d) の物質 m が接するとき (第3図)、 n を通ってきた入射光 I が反射点 O に達した時点で、入射光 II はすでに m の中に侵入していますが、境界で折り曲げられるため、先端の位置は C にあります。 n にて波長 λ である光に対する m の屈折率は、この光の m の中で波長を λ' とし、 $AO/BC = \lambda/\lambda' = \mu$ と定義されます。ここで、 $CD = CD'$ ですから、 $CD + CD' = 2CD = 2d \cos i$ です。反射光 $I' \cdot II'$ の位相がそろった時、つまり波の山同士、谷同士が重なり合う関係になった時、光は強まり、一定の波長 λ なる強い光として私たちが認識することになります。光の位相の関係を導入すると、干渉で強い光となる条件は、

$$2d \cos i = (2n + 1) \cdot (\lambda'/2) \quad n = 0, 1, 2 \dots$$

となります。物質 m 中の波長 λ' と反射角 i とを屈折率 μ を使って書きかえると、干渉の成立する条件は最終的に、

$$2d (\mu^2 - \sin^2 i)^{1/2} = (2n + 1) \cdot (\lambda/2) \quad n = 0, 1, 2 \dots$$

と整理されます。数式の導き方はだいぶ簡略化していますので、詳しくは原典 (秋月, 1995) をご覧ください。



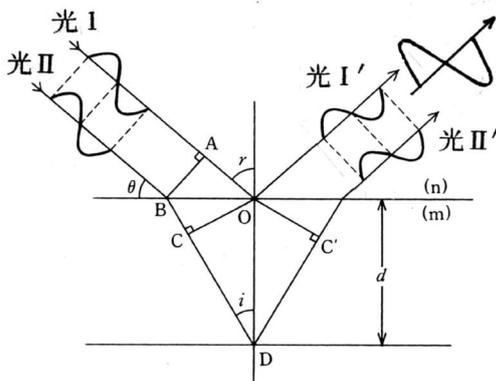
第1図 オーストラリア産オパール。
水酸化鉄セメントで糊結された砂岩中に脈をなす。質的には、「ブラック・オパール」相当。地質標本館所蔵、館口ビー「宝石コーナー」展示標本。



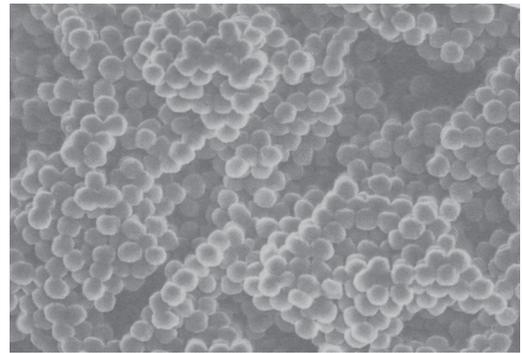
第2図 カボションに磨いたオーストラリア産オパール。
図の横幅=約3 cm。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 宝石, 誕生石, オパール, 遊色, 回折, 干渉, 二酸化ケイ素, 非晶質



第3図 物質 n, m の層状構造による光の干渉. 秋月 (1995) に加筆.



第4図 オーストラリア産宝石質オパールの走査電子顕微鏡像. 画面横幅=5 μm . JSM-6400, 加速電圧10kV, 照射電流1nA.

以上の関係は、物質内部に光の波長オーダーの厚みの細かな層状構造が存在すれば成り立ちうるので、オパールの場合それが何であるのかを知ることが、煌めきを理解するために重要になります。宝石質オパールをよく観察すると、全体が単色の煌めきを発することはほとんどなく、様々な大きさの分域ごとに異なる色の煌めきを見せることが分かります (第1図)。つまり光を回折・干渉させる層構造は、オパールの塊全体に同じように存在するわけではなく、向きを変え、広がりを変え、おそらく間隔も部分的に変えつつ発達するものなのでしょう。

遊色をもたらす構造の原因としては、様々なものが考えられました。オパール内部に生じた微細な割れ目も、まじめに原因として議論されたことがあるくらいです。

オパールのミクロな構造と遊色の関係は、1960年代に電子顕微鏡が鉱物学の世界で一般化してようやくわかり始めました。第4図のように電子顕微鏡で見る宝石質オパールは、1 μm (= 1,000 nm) より径の小さな二酸化ケイ素の球体が整然と緻密に並んだ層が、3次元的にも部分的な規則性を持って重なるものでした。球体の隙間には、水分子が存在すると考えられています。

宝石質オパールでの球の大きさは、標本内でも場所ごとに様々でしたが、ちょうど可視光の波長程度 (380 ~ 770 nm) の範囲にあり、しかも層状構造をなす部分では径が良くそろっていることが著しい特徴でした。つまり、径のそろった二酸化ケイ素の球が規則配列する層が3次元的に規則正しく積み重なる部分がある、そして球の大きさが違うことで層間隔が場所ごとに少しずつ異なる—これが光を様々に回折・干渉させ、皆を感動させる煌めきを生み出していたのです。

一方、オパールの中には、白く濁ってちょうどゆで卵の白身のような物も知られています。というのか、実際にはそのようなオパールの方がはるかに普通なのです。これはオーストラリアの宝石質オパールの産地でも同様で、

precious opal に対して「普通オパール common opal」と呼ばれています。そのようなオパールも、微細な二酸化ケイ素の球の集まりでした。しかし、球の大きさが不揃いだったり、3次元的に整った層状構造がほとんど認められなかったのです。つまり、光を回折・干渉させる「道具立て」に欠けていたのでした。

では、光を回折・干渉させる規則的構造をもつオパールは、「結晶」なのでしょう。か？「結晶」は、原子が3次元的に規則配列した状態で、鉱物の重要な基本性質の1つです (森本ほか, 1975)。

意外なことにオーストラリア産の宝石質オパールは、非晶質、つまりガラス同然でした。「オパール」として包括される含水シリカの中には、X線回折でシリカ鉱物多形の反射を示すものもあるのですが、オパールの代表ともいべきオーストラリア産宝石質オパールは結晶ではなかったのです (秋月, 1995)。オパールは、非晶質であるにもかかわらず鉱物として取り扱われる、例外的存在でもあるのです。

ということは、電子顕微鏡で見た小さなシリカ球は、吸湿剤のシリカゲルの玉っころと親戚ということ？ そうなっちゃいますねえ。だから自然は、とても面白いと思いませんか？

文献

- 秋月瑞彦 (1995) 虹の結晶—オパール・ムーンストーン・ヒスイの鉱物学. 裳華房, 東京, 140p.
森本信男・砂川一郎・都城秋穂 (1975) 鉱物学. 岩波書店, 東京, 640p.

OKUYAMA Yasuko (2012) Mineralogical science of birthstones — October Opal —.

(受付: 2012年8月2日)