

アヒマディ博士に学ぶ『宝石の最新情報と原産地情報』を受講して

幸谷 由利子

Zoomにて行われた阿依アヒマディ博士の講義は、宝石学の基礎から最先端の科学技術まで、広範囲にわたる内容であった。このレポートにて、まず復習として講義内容を纏め、最後に感想を述べさせて頂く。

宝石の定義

美しさ、稀少性、耐久性

宝石鑑別の進歩

エドワード三世の息子の『黒太子のルビー』は 170ct で、当時最大のバラス・ルビーと言われていた (1367 年)。また、6つの王様の名前が刻まれている『ティムール・ルビー』は 249ct で、これも当時最大と言われていた (1621 年)。

長い間、どちらも『ルビー』と思われていたが、アフガニスタンとタジキスタンの間に位置するバダフシャン産の『レッド・スピネル』であることが、宝石学が発展した事により判明された。

宝石学的发展は、結晶学の父と呼ばれるルネ・ジュスト・アユイ (1743-1822 フランスの植物・鉱物学者) が、カルサイトの割れ方を観察し、『結晶は小さなユニットの繰り返しである』と着眼したことに始まった。そして結晶系が纏められ、新しい鉱物種が沢山発見されるようになった。

現在は、5000種類以上の鉱物種が国際的に正式に登録されている。また、その中で、宝石と呼べるものは200種以上に及ぶ。

近年、宝石鑑別において産地の同定が求められることが多くなった。その為に、フィールド調査と最新科学を駆使する事が必要となっている。

近年150年にみる10の主要な宝石と産地

① ダイヤモンド

産地 ; ゴルコンダ …………… ホープ 34ct、コー・イ・ノール
インド
ブラジル
南アフリカ

- ②スリランカ・ラトナプラ産 ブルー・サファイア、ルビー、及び各色
スリランカでは2000年以上前から宝石が掘り続けられている。
その中でもラトナプラは一番古い産地。
ギウダ（乳白色の原石）が多く産出し、加熱により青い発色に改良させている。
- ③ミャンマー・モゴック産 ルビー
品質の高いルビーを産出し、500年以上の歴史がある。
現在は枯渇に向かっていて、流通は若干。
- ④インド・カシミール産 ブルー・サファイア
還流が多いが、今でもラボには鑑別依頼がきている。
パキスタン側のカシミールでも産出されている。
パキスタン産のもミルキークラウドだが、クラシック・カシミールより色が薄い。
- ⑤コロンビア・ムゾー産 エメラルド
18世紀、侵略したスペイン人が現地から奪ってヨーロッパに広めた。
- ⑥ブラジル・パライバ産 パライバ・トルマリン
偶然的な地質環境下で熱水反応により成長。
トルマリンの中でも、銅とマンガンを有する珍しい宝石。
- ⑦タンザニア・アリュウシャ産 タンザナイト
キリマンジャロのすぐ麓。
褐色のゾイサイトが400～500度の火事で、綺麗な青紫色に改変。
火事がなければ、この美しい色が見られなかったかも。
A B C Dの四つの鉱区があり、現在も採掘が続けられている。
地下1250mにある坑道は、蒸し暑く、息苦しい過酷な環境。
- ⑧マダガスカル・イラカカ産 各色サファイア
1988年から2008年の20年間、様々な色合いのサファイヤを産出。
ピンク、ブルー、パパラチアもある。
- ⑨モザンビーク・モンテプエズ産 ルビー
綺麗で鮮やかな赤色のルビー
板状結晶

⑩ クンツァイト

カルフォルニア・パラ鉱山産；クンツァイトが最初に発見された鉱山。
マダガスカル・ヴァキナンカラトラ産；1908年にクンツ博士が視察。
アフガニスタン・ラグマン産；マンガン多く、美しい。ブラジル産より綺麗。
ナイジェリア・イバダン・コム鉱山産；マンガンが最も高い0.2wt%含有。

この鉱山のクンツァイトは太陽光でも退色しない。

ルビーとブルー・サファイアについて

鉱物名； コランダム
宝石名； ルビー（赤色）、ブルー・サファイア（青色）
化学組成； Al_2O_3
結晶系； 三方晶系
硬度； 9 ダイヤモンドに次ぐ固さ
融解温度； 2080度 非常に溶解しにくい鉱物

コランダムの結晶構造

組成はアルミニウムと酸素のみ。

アルミニウム原子を中心に、酸素原子を頂点とした六配位。

六方最密充填の状態で配列。この時、上下の酸素は、ずれている。

配列した6個のアルミニウム原子が六角形を描いているので、六方の様に見えるが、上下の酸素原子がずれているので、120度回転の対称性を示す為、三方晶系となる。

純粋なコランダムは、無色透明だが、わずかな微量元素により、着色される。

アルミニウム原子が、鉄とチタンに置換するとブルー・サファイア、また、クロムに置換するとルビーになる。

やまのおろち 八岐大蛇を彷彿とさせるコランダムの生成

- ・ コランダムの元となる元素は、マグマに含まれている。
- ・ 地下深部のマントルチャンバーではマグマの活動が活発。

- ・ コランダムは、地球の地表に近い所、及び地下深部でも生成される。
- ・ 地下10 km～60 kmには、色んな宝石が成長するゾーンがある。
- ・ プレートテクトニクスによる大陸衝突でアルミニウムに富んだ岩石は高温高压変成し、コランダムを誕生させる。(変成岩起源)
- ・ コランダムはマグマにより生成され、且つ、マグマの活動により地表及び地表近くへ運搬される。(玄武岩起源)
- ・ 噴火には、新しい噴火、古い噴火がある。
- ・ 地球は正しく^{まさ}生きています。
- ・ コランダムを生成し、運び上げるマグマの活動はまるで、八岐大蛇の様である。

コランダムの主な産状について

1 第一鉱床

1) アルカリ玄武岩起源のコランダムの鉱床

オーストラリアの場合、露天掘りをしている第二鉱床の10 km先に噴火口があり、そこが第一鉱床。真っ黒なアルカリ玄武岩に捕獲されたブルー・サファイアが採掘されている。色は濃い青色で、結晶の形は六角平板状と六角両錐状、及び六角犬牙状がある。

全てのアルカリ玄武岩にコランダムが含まれている訳ではない。
コランダムを含有するアルカリ玄武岩は2タイプある。

- ① 単斜輝石+パイロープ・ガーネット+スカポライト+コランダム
- ② スピネル+コランダム+パイロープ・ガーネット

これらの共生鉱物は、コランダム鉱床を見つける際の指標石になる。

玄武岩起源のコランダムは、より深部で発生したマグマに捕獲され、地表、及び地表地殻へ運搬される。

成長環境；20 k b r、温度 1100度 深さ60 km

産地；オーストラリア、タイ、カンボジア、ラオス、ナイジェリア

玄武岩以外で宝石質コランダムを含有する火成岩には、煌斑岩、閃長石がある。

2) 変成岩起源のコランダムとルビー

変成岩起源のコランダムは、角閃岩や白粒岩などアルミニウムに富んだ岩石が高温高压により変成作用を受けて生成される。

① 変成岩起源のルビー-----狭い範囲

変成岩起源のなかでは、最も浅い産状。

大理石起源；石灰岩は高温高压により大理石に変性し、生じた剪断部にルビーは生成される。そのため脈状のルビーとなる。

ブルー・サファイアは火成岩の貫入があった場合に形成される。

産出量はブルー・サファイアに対して圧倒的にルビーの方が多い。

産地；ミャンマー、ベトナム、ネパール、アフガニスタン、パキスタン、タジキスタン

成長環境；圧力 2.6～3.33kbr、温度 620～670 度、深さ 6～12 km

② 変成岩起源のルビー-----広い範囲

角閃岩起源；角閃岩は地球上に多く存在し、その分布はとても広い。

地下深部より上がってきたマグマが、角閃岩中に溜まると、マグマと接触する部分が変成され、そのゾーンにルビーやサファイアが生成される。

モザンビークがこの典型的な例。

成長環境；圧力 8～11.5kbr、温度 750～850 度、深さ 15～30km

産地；ソマリア、ケニア、タンザニア、モザンビーク、マダガスカル、スリランカ・ラトナプラ

③ 変成—交代作用起源のルビー

A) 灰曹長岩ルビー (Plumasite)

超塩基性の角閃岩や橄欖岩に、地下から上がってきたペグマタイト質マグマが貫入することで、基盤岩石中のアルミニウム成分と交代作用し、コランダムが生成される。

産地；カシミール・Sumjam ルビー、タンザニア・ウンバ川ルビー

B) スカルンルビー

石灰岩に、地下から上がってきた花崗岩質マグマが貫入し、交代作用が生じ、コランダムが生成される。

産地；スリランカ・カタラガマ、アンドラノンダンボ・マダガスカル

◎ルビーを含有する変性岩起源の母岩の種類

- 大理石； ルビーは、脈状の鉱脈中に生成。
- 片麻岩； ルビーは点在して生成。
- 珪岩； ペグマタイト由来。
- 角閃岩； サファイアが見つかりやすい。
- 白粒岩； グリーンランドに見られる。

2 第二鉱床

一次鉱床；火成岩起源、変成岩起源

宝石は最も多く含まれるが、残念な事に品質は、それほど高くない。

二次鉱床；堆積層、堆積岩起源。

原石は、摩耗により結晶形を示さずコロコロした形。

透明度のある高品質の結晶が多い。

谷や川底に溜まった状態。

◎二次鉱床の種類

残積層(Eluvial)；噴火口地表部などの一次鉱床の岩石が、その場で風化してできた層。

瓦礫層(Diluvial)；一次鉱床から岩石が少し雪崩れてできた層。

例) ミャンマーのルビー鉱床は、真っ白な大理石の残積層と、
瓦礫層。

崩積層(Colluvial)；雨や風、水などで、平らな所まで運ばれてできた層。

例) モザンビーク・モンテプエズ鉱山

沖積層(Alluvial)；河川で流され、堆積してできた層。

例) マダガスカル、スリランカ、オーストラリア、タイ

◎有名なコランダム第二鉱床

マダガスカル・ディディー鉱床；2012年に発見された鉱床。

色相の良いルビーとブルー・サファイアが産出されている。

スリランカ・バランゴダ鉱床；2015年に発見されたお茶畑の中にある鉱床。

イエロー・サファイアを多く産出している。ピンクなどは少量。

モザンビーク・モンテプエズ鉱床；21世紀最大の発見と称される鉱床。

六角板状のルビーを産出。

アメリカ・モンタナ鉱床；ヨーゴに代わって、ロッククリークで盛んな採掘。
ブルー・サファイア、ファンシーカラー・サファイアを産出。

コランダムが生成された4つの時期

1) ゴンドワナ大陸由来

9億年前から6億年前にかけて、大陸（現在のアフリカ、インド、スリランカ、マダガスカル、オーストラリア、南極、南アメリカ）が衝突しながら合体を始め、超大陸ゴンドワナを形成。その際に生じた高温高圧により、変成帯（モザンビーク・ベルト）が形成された。ソマリア、ケニア、ザンビア、モザンビーク、マダガスカル、スリランカのルビー、サファイアは、モザンビーク・ベルトに位置しており、このイベントにより、7億5000万年前から5億年前の間に、地球史上で最も多くのルビー、サファイアが生成した。

2) ヒマラヤ造山運動由来

インド大陸は1億1000万年前、ゴンドワナから離れて北上し、5000万年前にユーラシア大陸と衝突し始め、ヒマラヤ山脈が誕生。衝突と合体のエネルギーにより東南アジアから中央アジアにかけて高温高圧の変成帯が形成され、コランダムが生成した。

このイベントによるコランダム生成年代

ミャンマー・モゴック産サファイア；6,700万年前～2,700万年前 平均4500万年前。
ミャンマー・モゴック産ルビー； 3,200万年前～2,200万年前
ベトナム・ダラット産サファイア； 713万年前～105万年前
ラオス・パイリン産サファイア； 130万年前～120万年前
タイ・チャンタブリ産サファイア； 200万年前～100万年前

3) グリーンランドのコランダムが生成された時期

地球史上で、最も古いコランダム。

4) アメリカやコロンビアのコランダムが生成された時期

世界の主なコランダム生成年代

グリーンランド 29億7000万年前
マダガスカル 6億5000万年前
スリランカ 5億5000万年前
東南アジア 4億5000万年前～100万年前
USA 4800万年前
オーストラリア 500万年前～200万年前
コロンビア 1200万年前～800万年前

コランダムU-Pb年代測定法について

鉱物の年代測定には、ウラン (^{235}U - ^{238}U) が自然崩壊で徐々に鉛に変化する事を利用して、どのくらい時が経過したかを推定する方法がある。しかし、コランダム(Al_2O_3)の組成にウラン(U)は存在しない。そこで、コランダム中にインクルージョンとして存在しているジルコン(ZrSiO_4)結晶を用いる。ウラン(U)は、ジルコン中の元素ジルコニウム(Zr)と置換して存在している。

測定には、コランダムと同時期に生成した(共生)ジルコン・インクルージョンを選択する必要がある。

ジルコン・インクルージョンには、C軸に沿って成長した結晶と、B軸に沿って成長した結晶があるが、コランダムのC軸と平行である前者を共生のインクルージョンとみなし、測定に用いる。

パン・アフリカ造山期のコランダム中のジルコンのU-Pb年代測定

・ルビーの母岩中のジルコンの測定年代

ケニア・ジョンソウル鉱山産	6億1200万年前	±600万年
タンザニア・ロンギド鉱山	6億1000万年前	±600万年

・ブルー・サファイア中のジルコン

マダガスカル・アンドラノンダンボ鉱山	5億2300万年前～5億1000万年前	
マダガスカル・イラカカ鉱山	6億5200万年前	±4100万年
スリランカ・ラトナプラ鉱山	5億4700万年前	±570万年

1) スリランカ-----スリランカは島のほぼ全域が複雑な変成帯で出来ている。

ラトナプラ鉱山； スリランカで一番古い鉱山。第二鉱床。

ルビー、ピンク・サファイア、ブルー・サファイア、各色が産出。
ギウダが多く、加熱が行われている。

カタラガマ鉱山； 2012年に発見された鉱山。第二鉱床。

ルビー、ブルー・サファイア、各色が産出。
鮮やかで青みのある原石が特徴。透明度が高い。
ブルー・サファイアはとても綺麗で、非加熱でも美しい。
2、3年で掘り尽くしてしまった。
ギウダが多いラトナプラとは異なる産状。

バガワンタラワ鉱山； 2015年に視察を行った。第二鉱床。

産出量豊富。

特に黄色いサファイアを多く産出

青色、ピンク色も産出し、淡いが綺麗。

一部の石を現地にてディーゼルで加熱。

現地で研磨、ヨーロッパへ輸出。

研磨のクオリティが向上され、ファセット・カットが綺麗。

2) マダガスカル

アンドラノンダンボ鉱山； 1993年に、マダガスカルのサファイアが始めて論文
で発表された。

綺麗なブルー・サファイアを産出。

イラカカ鉱山； 1989年から2008年の間、20年掘り続けた。

黄色、青色もあるが、特にピンク色を多く産出。

加熱はタイ・チャンタブリで行われている。

加熱の手法も向上している。

ディーゼルがガスで加熱。アルゴンを使ったりしている。

加熱されたブルー・サファイアは、とても綺麗。

デディー鉱山； 2012年に発見された。
鮮やかなルビーとサファイアが産出。
加熱の必要が無いほど、原石は美しい。

ベマイティ鉱山； 2016年に発見された。
2017年に視察に行った。
大きな谷状の鉱床。
クラシック・カシミールに似たブルー・サファイアが産出。
カシミールに似た100ctアップのブルー・サファイアも産出。
パパラチア・サファイアも綺麗。

ベマイティ鉱山は、デディー鉱山から徒歩でジャングルの中を約50km。危険で過酷な道のり。デディー鉱山に居たほぼ全てのガリンペイロ達は、ベマイティ鉱山に移って来ていた。灰色の層を手掘りし、貯めた水で土砂を洗い流し、コランダムの結晶を採取していた。一方、人が移り去った後のデディー鉱山は、畑になっていた。

現地の原石一つを三つのファセット・カット石に研磨した結果、二石は、インクルージョン・クリーンで、イラカカ産に似た濃い青色のルースになり、あと一つは、クラウドが入った、クラシック・カシミールに似た鮮やかな青色のルースに仕上がった。

3) モザンビーク

モザンビーク・モンテプエズ鉱山；

2009年にモザンビーク・モンテプエズにて羊飼いが、赤い透明石を拾い、歩いてタンザニア・アルーシャへ行き、そこで、インド人の宝石バイヤーにその赤い石を見せた。羊飼いは、その赤い石を何処で拾ったかを尋ねられ、答えてしまった。すると、あっという間に話しが広がり、モンテプエズに人が集まり、あちこち地面は掘り起こされた。

灰色の層を川へ運び、洗い、ラッキーならばルビーが見つかる。結晶は鮮やかで綺麗なピンク色の板状。

現在、英国資本のジェムフィールド社により地域は買い上げられている。10人の地質学者により十分な科学的地質調査が行われ、そのサンプルコアは1000本以上に及ぶ。一次鉱床のサンプルコアには、風化された角閃岩にルビーが含有。二次鉱床は、

5億年前の川底だった灰色の20～30cmの帯状の層にルビーが含有。40年かけて二次鉱床を採掘し、その後60年かけて一次鉱床を採掘するという持続性の高い採掘計画が立てられている。

最先端科学技術を用いて、フィールドワークなどで得た試料石に対して、ラボにて行うこと

- 1) 研磨機にて光軸を得る為に研磨する。
- 2) 電子顕微鏡にてインクルージョンの観察と撮影をする。
- 3) UV-Vis と FTIR(紫外-可視分光計とフーリエ変換赤外分光光度計)にてスペクトルを得る。(産地同定に有効)
- 4) ラマン分光分析装置にて、インクルージョンの種類や特徴を調べる。
- 5) LA-ICP-MS、EDXRFにて、コランダムの断面に色々な元素のレーザーを当て、どんな微量元素が含まれているかを調べる。100万分の1～10億分の1の分子レベルまで解析できる。そこで、沢山のダイヤグラムの組み合わせ(フィンガープリント)を照合し、産地を割り出す。また従来は、母岩の付いていない二次鉱床の原石は、生成環境が分からなかったが、Hf、Y、Yb、Smなどの超微量元素を調べることで、その母岩が、超塩基性岩、あるいは塩基性岩などが判断できるので、母岩が何かを推定する。
- 6) U-Pb 地質学的年代測定をする。
コランダムの生成年代が分かれば、このコランダムの誕生の前後の圧力や地質環境を推定する事が出来る。
- 7) ラマン分光スペクトルにて、コランダムのジルコン・インクルージョンの残留圧を調べることで、コランダムの生成深度を推定する。

ラマン蛍光スペクトルの圧力シフトの計算

コランダム中のジルコン・インクルージョンには、テンションクラックが生じている。これは、コランダムとジルコンの圧力による伸縮率の違いを示している。

コランダムは、生成された環境からマグマによって上方へ運搬されると、減圧により膨張する。その際、コランダムよりもジルコンの方がより大きく膨張するので、ジルコンの周囲にテンション・クラックが生じる。

ラマン分光スペクトルにより、ジルコン・インクルージョンの残留圧を調べることで、コランダムがどの位の深度で生成したかを推定する事ができる。

オーストラリア・ニューサウスウェールズ産サファイアを調べたところ、ジルコン・インクルージョンの残留圧で、最も高い部分は、0.47GPaであった。この数値は、地下30km相当にて、コランダムが生成したことを示唆している。

ブルー・サファイアに含まれる微細インクルージョンの性質

クラシック・カシミール、スリランカ・ラトナプラ産、マダガスカル・イラカカ産、マダガスカル・アンドンドロミフェー産のブルー・サファイアは、クラウド状のインクルージョンを有している。肉眼および、顕微鏡下でも非常に似通っており、産地の同定が難しい。

微量元素の測定をしても産地の同定ができない場合は、集束イオンビームにて $15\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}\times 0.15\mu\text{m}$ のナノ・インクルージョンのサンプルをつくり、超高压の電子顕微鏡にてクラウド・インクルージョンを観察し、産地による違いを調べる。

◎ブルー・サファイアに見られるクラウド・インクルージョンの産地別特徴

産地	鉱物種	形状と分布
スリランカ・ラトナプラ産	ルチル	微細な薄い板状のルチルがコランダムのC軸と平行に、均等に配列
マダガスカル・イラカカ産	ルチル	直径50ナノメートルから100ナノメートルの粒々状のルチルがコランダムのC軸と平行方向に点在。
クラシック・カシミール	ルチル	100ナノメートルの針状ルチルが不規則に点在。

破壊検査だが、アカデミックな研究

レーザーは地球物理学、医学、生物学など広い分野で色々な技術に応用されている。現在、東京大学では世界で最も強力なレーザーを使って研究をしている。

従来のレーザーが、シングルスポットなのに対し、東京大学のレーザーは、マルチスポットのタイプで、一度に複数カ所を照射することができる。その為、短時間で良い結果を得ることができる。また、周波数に関しても、 1mm^2 の範囲を照射するのに、従来の 1kHz ではゆっくりだが、 60kHz では一瞬である。

宝石鑑別においてもLA-ICP-MSを用い、レーザーで試料を蒸発させることにより、超微量元素を分析している。イエロー・サファイアを用いて実際に照射してみたところ、 $50\mu\text{m}^2$ を 1kHz 、10秒で、綺麗なデータを得る事ができた。

最先端技術を学び、宝石鑑別技術に取り入れる必要が今後、どんどん増えていく。

今回の講義では、ルビー、サファイアをテーマにしたが、今後数回に分けて、他の宝石を取り上げ、そこにどんな科学があるのか、自身の研究がどこまで進んだか説明していきたい。

以上、アヒマディ博士による講義の纏めとする。

以下に、受講の感想を述べる。

感想

宝石の産地の同定や処理の看破を最先端の科学を以て挑むアヒマディ博士の研究に対する熱意を感じました。特に感動したのは、クラシック・カシミールと、他の産地のカシミールタッチ・ブルー・サファイアの産地同定についてです。クラウド・インクルージョンの正体がナノサイズのルチル・インクルージョンで、しかも産地によってその形と分布の仕方が異なっているという、徹底的な証拠をみつけたのですよね、本当に素晴らしいと思いました。また、コランダム中のジルコン・インクルージョンを調べることで、コランダムの生成年代と生成深度が推定できるというのも、面白かったです。

小さな島国であるスリランカで産出するブルー・サファイアに関して、ギウダを多く産出するラトナプラ産と、濃い青色味が特徴のカタラガマ産において、それぞれの原石は、見た目の違いのみならず、生成環境が全く異なる事を語っている。また、スリランカ産、マダガスカル産、モザンビーク産などのモザンビーク・ベルト起源のコランダムを見るに、現在ではとても離れた国々なのだが、ゴンドワナ大陸という時代に共に成長していただなんて、ロマンスを感じます。

宝石という小さな結晶と、その中に存在するもっと小さなインクルージョンから、地球のダイナミクスを解明できるのも、科学技術の発展あってこそ。今回、アヒマディ博士により、産地、産状の新しい情報と共に、宝石鑑別の最先端をご講義頂けたこと、深く感謝致します。

以上。