

ブラジル/パライバ・トルマリン鉱山を訪ねて

CGL リサーチ室 北脇 裕士



写真-1:ブラジル/ムルング鉱山産パライバ・トルマリン(左から 2.75ct, 4.24ct)

パライバ・トルマリンの人気は根強く、今なお重要な宝石アイテムの一つです。特に“ブラジル産”と原産地が特定されるとさらにその評価が高まります(写真-1)。最近になって、本来の鮮やかな青色～緑色のパライバ・カラーに加えて、銅の含有量の少ない淡青色のタイプも多く流通するようになりました(写真-2)。ブラジルでは品質の良いものはすでに枯渇したなどのうわさもあり、原産地のブラジルでの採掘状況を視察するために2024年3月にパライバ州とリオグランデ・ド・ノルテ州のパライバ・トルマリン鉱山を訪問しました(図-1)。

パライバ州にはバターリャ(Batalha)鉱山とグロリアス(Glorious)鉱山があります。視察の結果、バターリャでは3つの鉱区のうち1つは試掘がなされていますが、今のところほとんど産出はありませんでした。残りの2つの鉱区は現在採掘が止まっています。グロリアス鉱山はこの数年産出はなく、現在は新たなペグマタイトパイプを探索中です。

リオグランデ・ド・ノルテ州にはムルング(Mulungu)鉱山とキントス(Quintos)鉱山があります。後者は10年以上前に閉山されたままであり、前者はBrazil Paraiba Mineと名称を変えて活発に採掘とカット・研磨が行われていました。ただ、聞くところによると、実際に研磨されているパライバ・トルマリンの一部は、現在採掘されたものではなく、かつて採掘された在庫品とのことでした。



写真-2:近年、CGLの鑑別で見かける機会が増加している淡色のパライバ・トルマリン(ブラジル/キントス鉱山産)

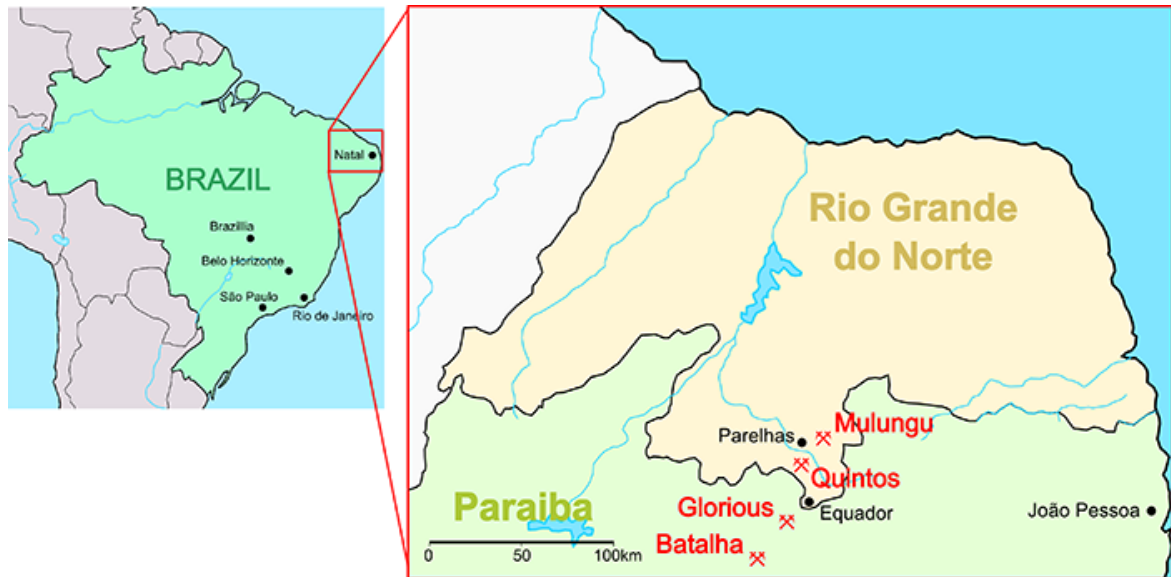


図-1: ブラジル/パラíba鉱山の位置

◆はじめに

パラíba・トルマリンは、1989年に宝石市場に登場した彩度が高く鮮やかな青色～緑色の銅着色のトルマリンです。

当初ブラジルのパラíba州で発見されたため、パラíba・トルマリンと呼ばれるようになりましたが、1990年代には隣接するリオグランデ・ド・ノルテ州からも採掘されるようになりました(図-1)。さらに2000年代に入って、ブラジルから遠く離れたナイジェリアやモザンビークなどのアフリカ諸国からも同様の含銅トルマリンが産出するようになり、そのネーミングに物議を醸しました。また、パラíba・トルマリンのほとんどは鉱物学的にエルバイトという種類に属しますが、モザンビーク産の一部のものはリディコートイトに属するものも知られています。現在では原産地やトルマリンの鉱物種に関係なく、銅が主たる原因の青色～緑色のトルマリンは広義でパラíba・トルマリンと呼ばれています(文献-1)。

日本国内では、一般社団法人日本ジュエリー協会(JJA)と一般社団法人宝石鑑別団体協議会(AGL)の両団体による慎重な協議の上、2006年5月1日より、パラíba・トルマリンは、「銅およびマンガンを含むブルー～グリーン」のエルバイト・トルマリン(産地は問わない)とされました。そして、元素分析を行い、分析報告書に限り、別名としてパラíba・トルマリンの記載が可能となりました。さらに「但し産地を特定するものではありません」とのコメントを記載し、原則として原産地鑑別は行わないこととしました。しかし、近年のトレーサビリティの考え方に則して、AGLでも慎重に議論が重ねられ、2019年10月1日より分析報告書に原産地表記が可能となりました。CGLでは、パラíba・トルマリンの原産地鑑別の依頼があれば、詳細な分析を行い、ブラジル、ナイジェリア、モザンビークのいずれかの産地を記載しています(写真-3)。

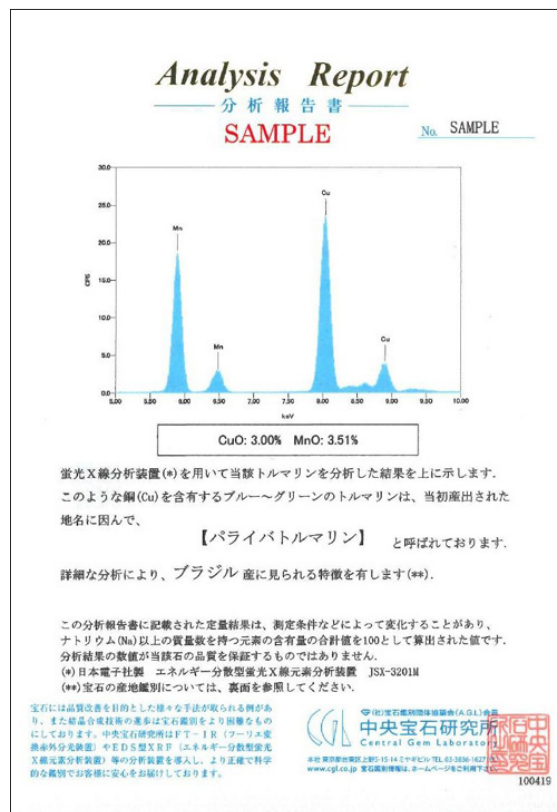


写真-3: CGL のパラíba・トルマリン分析報告書

◆位置および交通

ブラジルのパライバ州および隣接するリオグランデ・ド・ノルテ州は地球儀で見ると、日本の真反対に位置しています。そのため日本からは空路で東回りと西回りのルートがあります。東回りは日付変更線を超えてアメリカ経由となり、西回りは中東やヨーロッパを経由する便が多くあります。いずれにしても飛行時間は乗り継ぎを入れると片道26～30時間ほどになります。今回は韓国を経由してエチオピアのアジスアベバで乗り継ぎ、ブラジルのサンパウロまでやはり30時間ほどかかりました(写真-4)。この飛行時間の間に日本との時差12時間が生じ、機内食が計4回提供されました。サンパウロからは国内線でミナスジェライス州の州都であるベロオリゾンテに向かい、ここを拠点に二日間を過ごし、いくつかの鉱山を訪問しました。初日は世界で3番目に大きい金鉱山であるアングロゴールドアシャンティ鉱山、二日目はイタビラ～ノバエラ地区のエメラルド鉱山を視察しました。三日目にベロオリゾンテから国内線でパライバ州の州都であるジョアンペソアに向かい、そこからはレンタカーでおよそ4時間走り、同州のエクアドルという小さな街に到着しました(写真-5)。エクアドルはリオグランデ・ド・ノルテ州の最南端にある小さな街で宿泊施設と飲食店があり、バターリャ鉱山視察の拠点となります(図-1)、(写真-6)。



写真-4：今回利用したエチオピア航空
(成田-サンパウロ往復)



写真-5：バターリャ鉱山視察の拠点となるエクアドルの街並み



写真-6：エクアドルからの道中にあるバターリャ(Batalha)の標識

筆者は2005年にもブラジルのパライバ鉱山を訪ねており、その際はリオグランデ・ド・ノルテ州のパレリアスという街に滞在しています(図-1)。パレリアスは人口およそ2万人の小さな田舎街で、ムルング鉱山およびキントス鉱山に程近いのですが、バターリャ鉱山までは未舗装道路を含めて1時間半ほどかかります。

今回のパライバ鉱山視察は筆者にとって実に19年ぶりですが、前回と比較してその変貌ぶりについてもご紹介したいと思います。

◆地質

パライバ州とリオグランデ・ド・ノルテ州にはクエイマダス山脈(現地の人はキントス山脈と呼ぶ)と呼ばれる丘陵地があり、この随所に、宝石品質のトルマリン(パライバ・トルマリンを含む)を含有するペグマタイト(巨晶花崗岩)が存在しています。このペグマタイトを含む地域はBorborema Pegmatite Province (BPP) と呼ばれ、第一次大戦中には戦略物資として雲母、シーライト、タングステンなどが採掘されており、大戦後には銅、ニッケル、ウラン、金、イルメナイトなどが採掘されています(文献-2)。ペグマタイトはアルバイトを主体とした長石、石英、白雲母およびトルマリンで構成されています。長石の大部分はカオリンと呼ばれる柔らかな白い粘土

に変質しており、陶磁器の原料や化粧品および薬の添加剤になるため採掘の対象となっています。

この地域に広く分布する基盤岩は新原生代(およそ6億5000万-5億年前)の古い変成岩(主にクォーツアイトや変礫岩)です。この時代は南米大陸やアフリカ大陸が分裂する以前で Gondwana 超大陸を形成していたと考えられています(文献-3)。図-2の水色の領域は、その頃の造山帯を示しています。パライバ・トルマリンを産出するブラジル、モザンビーク、ナイジェリアの3カ国の原産地は共通してこの古い時代の造山活動に関連しています。



図-2: 原生代~先カンブリア代の古地図(Brendan2018 に加筆)

◆パライバ・トルマリンの発見

1982年、ブラジルのパライバ州バターリャ(Batalha)の小高い丘(写真-7)で、Heitor Dimas Barbosa(以下エイトー)氏は数人の仲間とこれまでに見たことのない鮮やかな青色の石を発見しました。エイトー氏が初めて見つけた青色石は品質の良くないものでしたが、1988年には透明度の高い原石が10kgほど見つかりました。エイトー氏はこれらを自身の出身地であるミナスジェライス州のペロオリゾンテや隣接するサンパウロ、リオデジャネイロで販売しようとしていました。しかし、あまりにも鮮やかな色であったため誰も天然石と信じてくれなかったといえます(文献-4)。その後、鑑別機関で天然トルマリンの鑑別書を取り、翌1989年にツーソンジュムショーに出品しました。その鮮やかな色は“ネオン・ブルー”あるいは“エレクトリック・ブルー”と賞賛されました。そして、ショーの初めには\$80/ctだったものが、最終的には\$2,000/ctに跳ね上がるという伝説が生まれました(文献-5)。「この宝石はどこで産出したのか?」という質問に対する回答が「パライバ」であったため、自然にパライバ・トルマリンと呼ばれるようになりました。さらに1989-1990年にかけて15-20kgの原石が採取され、このうちの10kgが高品質であったといわれています(文献-4)。



写真-7: エイトー氏により最初にパライバ・トルマリンが発見された小高い山

◆パライバ州の鉱山

バターリャ鉱山

人口が500人ほどのパライバ州の小さな村バターリャ(写真-8)で発見された銅着色のトルマリンは、パライバ・トルマリンと呼ばれるようになり、一躍大人気の宝石となりました。1990-1991年にかけて生産のピークを迎えますが、価格が急上昇したため、鉱山の所有権の係争問題が発生しました。ブラジルでは採掘権と土地の所有権は必ずしも同じではないようです。所有権と採掘権の両方を取得していれば問題はないのですが、異なる場合には紛争の種となりかねません。発見者のエイトー氏は土地の所有者ではなく、地元の人間でもなかったことで、採掘に関してさまざまな政治的な外圧を受けたようです。また、鉱山労働者への攻撃もあり、採掘の継続が困難となりました。10年近くにもおよぶ裁判の結果、最終的にバターリャの鉱区は3分割されることとなりました。最初に発見された鉱脈を含むエリアをエイトー氏が獲得し、地元の土地所有者のジョンヒッキー氏と地元有力者のハニアリー氏がそれぞれの採掘権を得ることとなりました。写真-9の左側の小高い丘から中央付近までが

エイトー氏の鉱区、写真中央から少し右あたりまでがジョンヒッキー氏の鉱区、写真右側の建物はハニアリー氏の鉱区です。

パライバ・トルマリンの発見により、今や伝説の人となったエイトー氏ですが、残念ながら2023年9月23日に永眠されており(文献-6)、鉱山はご子息のSergio Barbosa(以下セルジオ)氏が引き継がれています(写真-10)。今回の鉱区訪問ではセルジオ氏のご厚意により、内容の濃い視察が実現しました。

エイトー氏の鉱区入り口は小高い丘の中腹にあります(写真-11)。



写真-8:バターリャの街並み



写真-9:バターリャの鉱区全景(2024年4月撮影)



写真-10:発見者エイトー氏のご子息である Sergio Barbosa 氏(右)と筆者

丘の上まで進むと管理施設があり、玄関前にはエイトー氏が鉱床発見当時使用していたという車両が置かれていました(写真-12)。

施設内にはエイトー氏の肖像写真や荣誉市民の賞状なども飾られていました(写真-13)。

バターリャ地区の鉱区にはペグマタイトの脈が少なくとも6つ確認されており、それぞれにL1~L6まで番号が振られています。エイトー氏は最初にパライバ・トルマリンを発見した場所の近くから縦坑を掘り(写真-14)、そこから鉱脈に沿って横坑を掘り進めています(写真-15、16)。過去には常に10人程度のスタッフが働いていましたが、幾度となく資金難や隣接するハニアリー氏との地下での所有権の係争で採掘が中断しているようです。資金面では風化しペグマタイトを採掘した際に出るカオリンが売り上げになり、鉱山継続の支えになっているようでした。坑内を案内してくれた技術者の話によると、L1では当初グリーン・ブルーのパライバ・トルマリンが産出したとのことです。L2は最も有望なラインで、良い結晶を大量に産出しており、市場に流通したものの多くはこのラインから採掘されました(写真-17)。L3はグリーン、ブルーに加えてバイオレットやバイカラーなど各色が



写真-11:エイトー氏の鉱区入り口



写真-12:エイトー氏がかつて使用していた車両

産出しました。L4は品質があまり良くなく、10年ほど前に産出したきりとのことです。L5はセルジオ氏が2023年から試掘を始めたばかりで、L6はほとんど手つかずのようです。この6本のライン以外にも派生した何本ものペグマタイト脈が走っており(写真-18)、どの脈にパライバ・トルマリンが含まれているか予測するのは困難なようです。

ハニアリー氏の鉱区には外部からの侵入者を防ぐための高い塀と監視塔が設置されています(写真-19)。1990年代の最盛期には30人ほどのスタッフが働いており、活発な採掘が行われていました。筆者が前回訪れた2005年当時には縦坑の深さが30mほどでしたが(写真-20)(文献-7)、2014年には120mにも達していたそうです(文献-4)。2015年頃には新たな場所から(写真-21)サイズは小さいもののかなりの量が採掘されたようです(写真-22)。現在はエイトー氏との採掘権問題の係争中で採掘は中止しているようです。

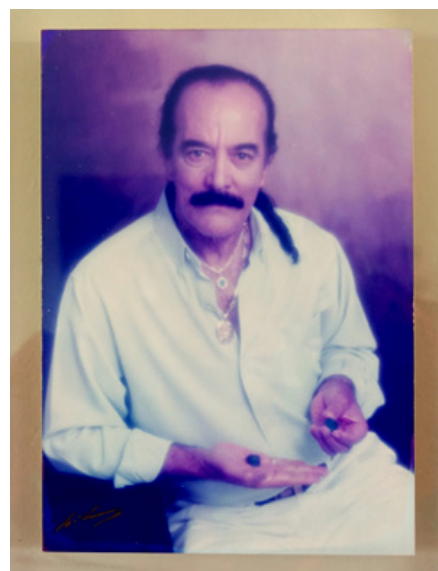


写真-13:エイトー氏の肖像写真



写真-14:パライバ・トルマリンが最初に発見された場所



写真-15:エイトー氏鉱区の横坑入口



写真-16:エイトー氏鉱区の横坑内



写真-17:エイトー氏鉱区の L2 (空間はペグマタイトが採掘された跡)

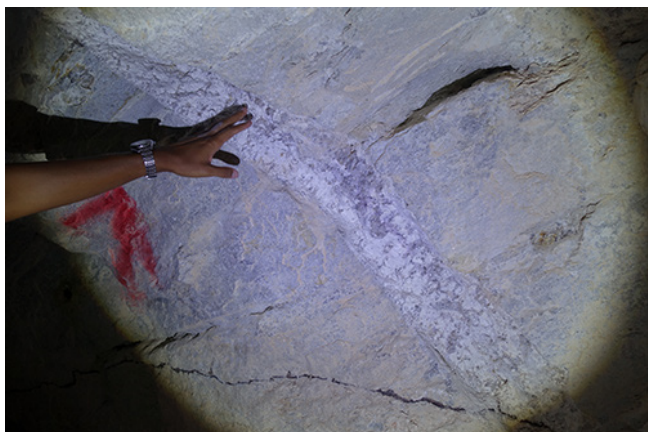


写真-18: エイトー氏鉱区の細いペグマタイト脈



写真-19: ハニアリー氏鉱区(白い建物は監視塔)



写真-20: ハニアリー氏鉱区の旧縦坑入口



写真-21: ハニアリー氏鉱区の新しい縦坑
(2015年くらいに産出)

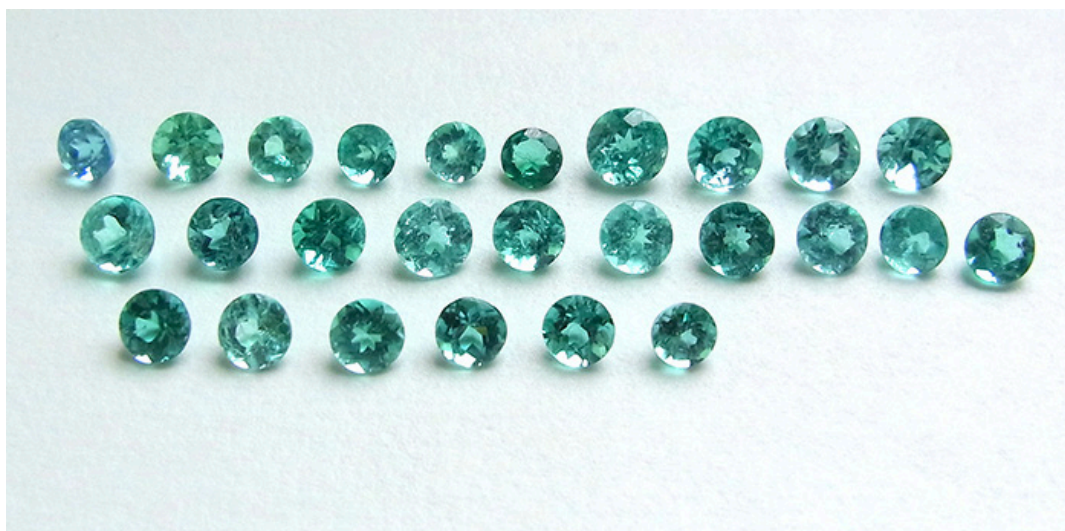


写真-22: ハニアリー氏鉱区から産出したパライバ・トルマリン(0.11-0.22ct)

ジョンヒッキー氏の鉱区では1990年代の最盛期には50人ほどのスタッフを擁し、重機を使用して活発に採掘していました。2005年に訪問した際には地下の坑道を案内していただきましたが(文献-7)、今回訪問した際には採掘権の問題で採掘は行われていませんでした(写真-23, 24)。鉱区内を見渡しても採掘活動の痕跡は見当たりませんでした。地元関係者に聞くところによると、以前掘り起こした土砂から鉱石を細々と選別しているだけのようです。ただ、昔の在庫があり、時折市場に供給されているようです。



写真-23:ジョンヒッキー氏鉱区入り口



写真-24:ジョンヒッキー氏の鉱区

グロリアス鉱山

2006年の初め頃、パライバ州のバターリャ鉱山から直線で北東に30kmほどの地にグロリアス鉱山が開坑されました(文献-8)。この地質はバターリャと同じく新原生代の古いクォーツアイトなどの基盤岩が広く分布しており、そこにペグマタイトが貫入しています。鉱山ではこの脈状に貫入したペグマタイトが採掘されています(写真-25)。ペグマタイトは主に風化した白いカオリン質の粘土からなります。先述のとおり、カオリンは高級な陶磁器の原料となりますが、この地のカオリンは特に品質が良いとのこと。そのため掘削したカオリンを販売して鉱山経営を継続しながらパライバ・トルマリンが採掘されてきました。このようにパライバ・トルマリンの鉱山は掘削した土砂もカオリンとして活用することができ、資源の有効活用が行われています。グロリアス鉱山で採掘されたパライバ・トルマリンは銅の含有量が多く色は良いのですが、採取量は少なく、ほとんどが1 ct未満の小粒石です(写真-26)。



写真-26:グロリアス鉱山から産出した パライバ・トルマリン (0.096-0.23ct)

近年はCovid-19の影響もあり、鉱山は長らく放置されてきました。そのため、掘り出されたペグマタイトの跡地の空洞は雨水で水没してしまっています(写真-27)。しかし、最近になって日本人の開拓者たちが改めて採掘を始めています(写真-28)。現在、従来のライン(ペグマタイト脈)をさらに延長するか、新たなラインを探すか検討されているようです。今回の視察時には重機が導入され、地表付近のペグマタイトの分布が調査されていました。

グロリアス鉱山は近隣にカオリンが採掘されたペグマタイトが複数存在し、一部にはパライバ・トルマリンを含む鉱石も見つかっていることから(写真-29)、今後の動向に期待が持てます。



写真-25:グロリアス鉱山で最初にパライバ・トルマリンが発見されたペグマタイトの採掘跡



写真-27:グロリアス鉱山のペグマタイトの採掘跡(現在は雨水が貯まっている)



写真-28: グロリアス鉱山を再開発する日本人開拓者の皆さん



写真-29: グロリアス鉱山のパライバ・トルマリンを含む原石

◆リオグランデ・ド・ノルテ州の鉱山

キントス鉱山

パライバ州に隣接したリオグランデ・ド・ノルテ州にも2つのパライバ・トルマリンの鉱山があります(図-1)。パライバ州に近い方からキントス(Quintos)鉱山とムルング(Mulungu)鉱山です。

キントス鉱山は人口約2万人のパレリアスの街から南に10kmほどの山腹にあり、ドイツのポールビルド(Paul Wild)社が経営していたため、地元ではジャーマンと呼ばれていました。1995年にこの地のペグマタイトからパライバ・トルマリンが発見され、90年代の終わりごろから本格的な操業が始まりました。2005年に筆者が訪問した際には60名ほどのスタッフが従事しており、バタリーヤよりも機械化が進んでいる印象がありました(文献-7)。キントス鉱山では数ctサイズのブルーの他にグリーンのパライバ・トルマリンも産出していましたが、産出量は限定的で、残念ながら10年ほど前に閉山されました。しかし、最近になってCGLの鑑別業務中にキントス鉱山産と思われる淡色のパライバ・トルマリンを見かける機会が増加しており(写真-2)、モザンビークやナイジェリア産との識別に困難を伴うようになっています(文献-9)。そのためこれらの流通経路が確認できればと思っておりました。



写真-30: キントス鉱山の入り口(門は閉ざされているが新しい轍が見られる)

今回訪問した際には鉱山入り口には門番がおり、鉱山に続く道には轍がありましたので何らかの操業が行われていることがわかりました(写真-30)。地元の事情通と業界関係者の話によると、閉山後に水没した坑道からは一部水が抜かれ、新たに拡張はされていないものの、当時の“ずり”から再度選鉱が行われているようです。また、ドイツの本社にはこれまでのストックがあり、品質の劣るものはカボションカットに、透明度の高いものはファセット加工がなされて市場の動向を注視しながら適宜供給されているとのこと。

ムルング鉱山

ムルング鉱山はパレリアスの街から北東5kmの山麓に位置しています(図-1)。キントス鉱山よりも早く、1991年には含銅トルマリンが発見されています。かつてはMineracao Terra Branca社が所有していたためMTB鉱山としても知られていましたが、現在はBrazil Paraiba Mineと改称されています(写真-31, 32)。会社のホームページも立ち上げられており(<https://brazilparaibamine.com/en/home/>)、鉱山の概要を知ることができます。また、InstagramやFacebookなどのSNSなどを利用した広報活動にも力を入れています。会社概要によると、200名の従業員が18の業務部門に配属されており、採掘、選別、カット・研磨が自社で一貫して行われています。



写真-31: Brazil Paraiba mine(ムルング鉱山)の入り口



写真-32: Brazil Paraiba mine のプラント

ブラジルでのパライバ・トルマリンの採掘規模としては現在最も大きく活動的です。2005年に訪問した際にはドラム缶の中に2名で入り、ワイヤーで吊るされてゆらゆらと縦坑を降りましたが(文献-7)、今回は7-8名ほど入れる安全柵付きの昇降機が設置されていました(写真-33)。縦坑の深さは100m近くあり、そこから幾本もの横坑が開けられています。横坑は非常に広い空間が広がっており(写真-34)、ショベルカーなどの重機が稼働しています(写真-35)。現場の技術者の話によると、岩盤の掘削能力は最大で一日に200tに及ぶとのことでした。実際、地上に作られたいくつもの“ずり”の山からも活発に掘削が行われていることが確認できました(写真-36)。



写真-33: Brazil Paraiba mine の縦坑入口の昇降機



写真-34: Brazil Paraiba mine の広い横坑内



写真-35: Brazil Paraiba mine の坑内で稼働する重機



写真-36: Brazil Paraiba mine の“ずり”の山

パライバ・トルマリンの採掘はパライバ州の鉱山と同じく新原生代の古い基盤岩(変礫岩など)に貫入したペグマタイト(写真-37)がターゲットですが、ムルング鉱山ではペグマタイトの風化(カオリン化)は進んでおらず、比較的硬い岩盤のままです。ペグマタイトはアルバイトが主体の長石、石英、白雲母、黒色トルマリン、ベリル、スポジューメンなどで構成されており、ごく希にパライバ・トルマリンが含まれています。今回視察した坑内の中では

わずか1か所でしかパライバ・トルマリンを発見することができず(写真-38)、改めてパライバ・トルマリンの希少性を体感することができました。



写真-37: Brazil Paraiba mine の基盤岩(手を添えた灰色部)とペグマタイト(赤っぽい部分は長石、黒い結晶はトルマリン)

写真-38: Brazil Paraiba mine のペグマタイト中に見られる パライバ・トルマリン

掘削された岩石は複数の段階を経て親指大くらいのサイズに分割され、大型の自動選別機に通されます(写真-39)。2005年に訪問した際には総勢で60名ほどの女性スタッフがすべて手作業で選別を行っていましたので(文献-7)、機械化によって大幅に作業効率が上がっているようです。案内をしていただいた技術者の話によると、この選別機はパライバ・トルマリンの青色を認識して選別しており、97%以上の回収率だそうです。機械を通った碎石はさらに女性スタッフによる再チェックが行われていました(写真-40, 41)。選鉱された残りの岩石はさらに細かく碎かれ、水洗いされて行きます(写真-42)。



写真-39: Brazil Paraiba mine の自動選別機

このようにして採取されたパライバ・トルマリンは(写真-43)、管理された別棟で色や品質ごとに選別され(写真-44)、カット・研磨されます(写真-45)。2005年に訪問した際にはカット・研磨はすべてタイに送って行われていましたが、現在は自社加工できるようになっていました。原石の選別には10名弱、カット・研磨には20名以上のスタッフがかかわっており、相当量のパライバ・トルマリンの原石が処理されていました。ほとんどが小粒石でしたが、今回の掘削作業風景ではこれほどのパライバ・トルマリンが採掘されているようにも思えなかったため、複数の関係者に確認したところ、一部の原石は2004年～2014年に採掘された過去のストックとのことでした。

ムルング鉱山産のパライバ・トルマリンはかつて相当量が日本国内に輸入されています。特に小粒石を複数あしらった製品などはほとんどがムルングのもので、今回、売り物の商品を見せていただいたところ、直径1-2mm程度の小粒石にも一粒単位で値段がつけられるなど、全体的にかなり高額となっていました(写真-46)。また標本石も良いものは数千ドルとなかなか手が出るような値段ではありませんでした(写真-47)。



写真-40: Brazil Paraiba mine の女性スタッフによる選鉱



写真-41: Brazil Paraiba mine で採取された
パライバ・トルマリン原石



写真-42: Brazil Paraiba mine の選鉱場



写真-43: Brazil Paraiba mine で採取された
パライバ・トルマリン原石



写真-44: Brazil Paraiba mine の原石選別工程



写真-45: Brazil Paraiba mine のカット・研磨工程



写真-46: Brazil Paraiba mine のカット・研磨された商品



写真-47: Brazil Paraiba mine のパライバ・トルマリンの
原石標本

◆まとめ

パラiba・トルマリンは人気の高い宝石で、特にブラジル産は評価が高まります。この数年、銅の含有量の少ない淡青色のタイプも鑑別に持ち込まれるようになり、モザンビークやナイジェリア産との識別が困難なものが増加しています。ブラジルでは品質の良いものはすでに枯渇したなどとのうわさもあり、淡青色のパラiba・トルマリンの出所を確認する必要がありました。

今回の視察の結果、パラiba州のバターリャ(Batalha)鉱山では今のところほとんど産出はありませんでした。グロリアス鉱山も近年産出はなく、今後の採掘が期待されます。

リオグランデ・ド・ノルテ州のキントス(Quintos)鉱山は10年以上前に閉山されたままですが、品質のやや劣る過去のストックが適宜カット・研磨されているようです。ムルング(Mulungu)鉱山はBrazil Paraiba Mineと名称を変えて活発に採掘が行われていましたが、カット・研磨されているものの一部は過去に採掘されたもののようです。

このようにブラジルのパラiba・鉱山ではBrazil Paraiba Mineを始め現在も操業されていますが、新たに採掘されたものに加えて過去の在庫が市場供給されているのが現状のようです。

◆謝辞

グロリアスジェムス有限会社の酒巻英樹氏には今回の視察の立案から旅程のすべてにおいてお世話になりました。Mineracao Heitorita社のSergio Barbosa氏とBrazil Paraiba Mine社のAldo Bezerra氏には鉱区の視察に便宜を図っていただきました。Marcelo Antunes Maia氏には通訳と現地におけるアレンジをしていただきました。株式会社ミュキの亀山卓哉氏、Glorious Mine社の皆様には旅程において終始お世話になりました。ここに記して感謝いたします。

◆文献

1. LMHC Information Sheet#6 Paraiba tourmaline version.7 Dec.2012
2. Beurlen H. (1995) The Mineral Resources of the Borborema Province in Northeastern Brazil and its Sedimentary Cover: A Review. Journal of south American Earth Sciences, Vol.8 (3-4), pp365-376.
3. Brendan J. M., Damian R. N., Keppie J., Jaroslav D. (2018) Role of Avalonia in the development of tectonic paradigms. Geological Society London Special Publications, 470(1).
4. Hsu T. (2018) Paraiba Tourmaline from Brazil the neon-blue burn. InColor, Vol.42(2), pp42-50.
5. 古屋正司. (2007) パラiba・トルマリン- 脳裏に焼きつくエレクトリック・ブルーの輝き. 宝石の世界, 日独宝石研究所.
6. GIA Staff. (2023) In Memoriam: Heitor Barbosa. Gems and Gemology, Vol. 59, No.4, p542.
7. 北脇裕士. (2005) パラiba・トルマリンの故郷を訪ねて. Gemmology, 2005年12月号, pp19-23.
8. Furuya M. (2007) Copper-bearing tourmalines from new deposits in Paraiba state, Brazil. Gems and Gemology, Vol. 43, No.3, pp236-239.
9. 江森健太郎., 北脇裕士. (2020) パラiba・トルマリン ~LA-ICP-MSを用いた組成分析と原産地鑑別への応用. CGL通信, No.56, pp1-12.

Cr含有赤色マスグラタイトの分析

リサーチ室 趙 政皓, 北脇 裕士, 江森 健太郎
色石鑑別課 岡野 誠, 間中 裕二, 海老坪 聡



図1: 1.593 ctの赤紫色マスグラタイト

◆マスグラタイトとは

マスグラタイト($\text{BeMg}_2\text{Al}_6\text{O}_{12}$)はIMAに登録されている正式な鉱物名はMagnesiotaaffeite-6*N*3*S*(三方晶系)であるが、宝石としては伝統的にマスグラタイトと呼ばれており、きわめて希少性が高くコレクターの垂涎的となっている。同じく希少宝石であるターフェアイト($\text{BeMg}_3\text{Al}_8\text{O}_{16}$ 、IMAに登録された鉱物名はMagnesiotaaffeite-2*N*2*S*)よりさらに希少である。両者はほぼ重複する特性値と類似する化学組成を有しており、識別が困難なことで知られている。

1945年にジュエリーから外された50個ほどの宝石の鑑別中にターフェアイトが発見された。これは宝石から新種の鉱物が見つかった初めての例である。その後、2番目、3番目のターフェアイトが見つかった。マスグラタイトは1967年にオーストラリアで発見されたが、当初はターフェアイトのポリタイプであると考えられ、taaffeite-9*R*と表記されている。1979年に赤色のターフェアイトと思われた石が調べられたがターフェアイトとは異なる新種の鉱物Taprobaniteとして条件付きでIMAに登録された。1981年にオリジナルのターフェアイトの記載に誤りが発覚し、Taprobaniteはターフェアイトと同種であるとされた(文献1)。名称についてはターフェアイトに優先権があるとされTaprobaniteの名称は削除された。1981年に南極にて世界で2番目のマスグラタイトが発見され、ターフェアイトのポリタイプではなく独立種とされた。

1993年にはターフェアイトと思われていた石がマスグラタイトであったことが報告され、これが宝石品質の初めてのマスグラタイトであった。1998年にはターフェアイトとマスグラタイトの非破壊の鑑別にはラマン分光法が有効であることが示された(文献2)。そして2002年にターフェアイトグループの分類が見直されている(文献3)。

◆マスグラタイトとターフェアイトの違いについて

マスグラタイトもターフェアイトもターフェアイトグループの鉱物であり、両者とも変形したノラナイトモジュール($N = \text{BeMgAl}_4\text{O}_8$)とスピネルモジュール($S = \text{Mg}_2\text{Al}_4\text{O}_8$)により構成されている。ただし、マスグラタイトはc軸方向に沿って*N**N**S*が重複することに対し、ターフェアイトはc軸方向に沿って*N**S*が一つのユニットとして重複する。その結果、マスグラタイトは三方晶系、ターフェアイトは六方晶系となる。

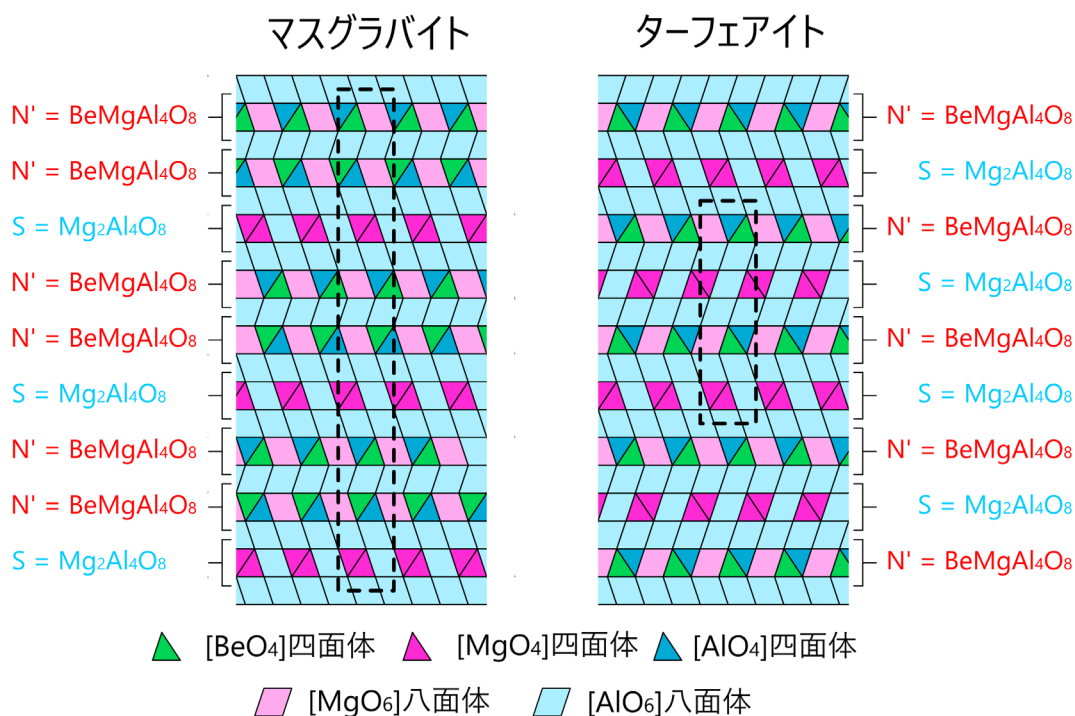


図2 : a 軸方向から見るマスグラバイトとターフェアイトの構造図。黒点線で囲った範囲がユニットセルとなる。

結晶系が異なっても、構成する基本ユニットが重複するため、化学式が類似し、比重、屈折率等の性質がかなり近くなる。表1に示すように両者の比重、屈折率がほぼ重複するため、これだけでは両者の識別は困難である。化学式が類似してもマグネシウムとアルミニウムの比率が異なり、蛍光 X 線元素分析(EDS)による定量分析も鑑別の手がかりの一つとなっている(文献4, 5)。

表1 : マスグラバイトとターフェアイトの比較(L. Kiefert and K. Schmetzer, 1998)

	マスグラバイト Magnesiotaaffeite-6N'3S	ターフェアイト Magnesiotaaffeite-2N'2S
結晶系	三方晶系	六方晶系
化学式	BeMg ₂ Al ₆ O ₁₂ (MgO:Al ₂ O ₃ = 2:3)	BeMg ₃ Al ₈ O ₁₆ (MgO:Al ₂ O ₃ = 3:4)
比重	3.61~3.71	3.62~3.69
屈折率	1.719~1.730	1.719~1.728
光学特性	一軸性負号	一軸性負号

◆ 赤色を呈するマスグラバイト

2022 年年末、中央宝石研究所(CGL)東京支店に 1.593 ctのクッション・ミックスカットが施されたルビーのような赤色を呈する石が鑑別依頼で持ち込まれた(図1)。これらは検査の結果、マスグラバイトであることが分かった。依頼者によると、この石は中古市場で入手した商品でルビーではないかと思っていたらしい。ファセット・エッジには一部欠けたところも見られ、長い間マスグラバイトとは鑑別されずに市場にあったものと推測される。このような鮮やかな赤色を呈するマスグラバイトのカット石は我々の知る限り宝石学の文献には記載がなく、これが初めての報告と思われる。

一見した限りではルビーやスピネルを思わせたが、屈折率は 1.715-1.721 で複屈折量は 0.006 であった。さらにシャドーエッジの動きと干渉像から一軸性負号であることが確認できた。通常光では紫赤色、異常光では黄赤色の明瞭な多色性が見られた。比重は 3.60 であった。これらからターフェアイトやマスグラバイトの可能

性が示唆された。

顕微鏡観察では、液体インクルージョン(図3)や酸化鉄を含むフラクチャーが観察できた(図4)。残念ながら鉱物種が同定できる明らかな固体インクルージョンは観察されなかった。また、ヨウ化メチレンに浸漬して観察すると、光軸方向からは赤紫色の色帯と他の方向からは無色の色抜けした部分が見られたが、六方晶系か三方晶系かを示唆する特徴は得られなかった(図5-6)。

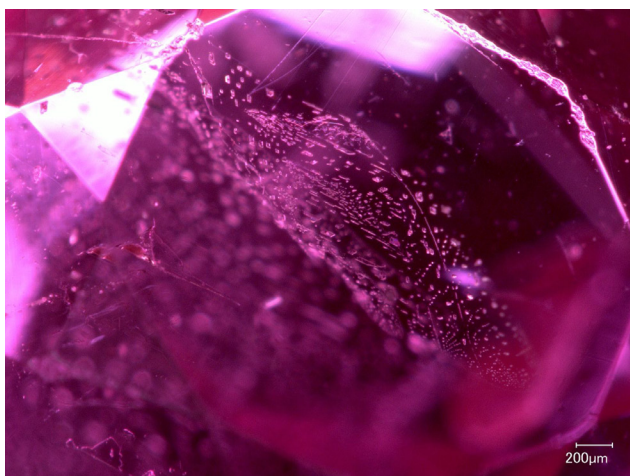


図3：気泡を含むブロック状の流体インクルージョンと線状の流体インクルージョン

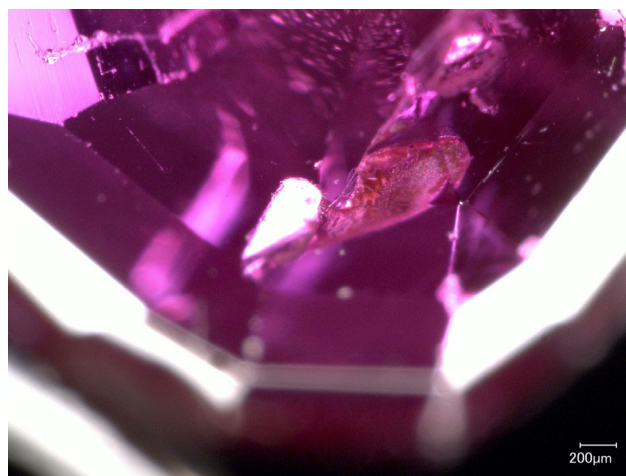


図4：黄色インクルージョンを含むフラクチャー

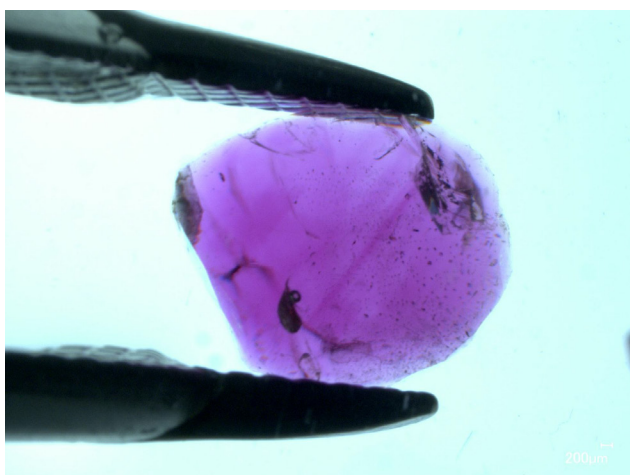


図5：光軸方向から観察される赤紫色の色帯

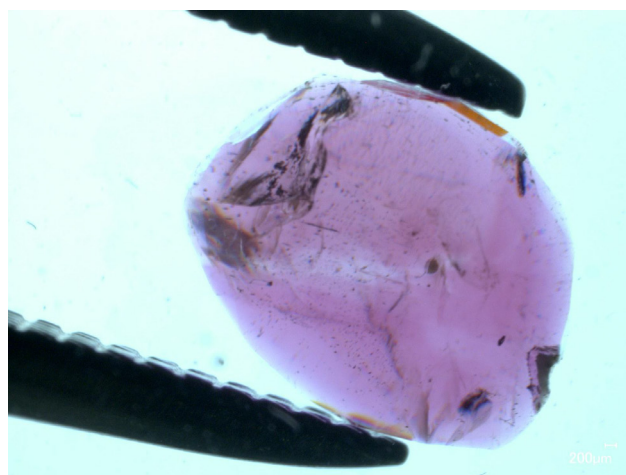


図6：中央部に無色の部分が見える

表2はエネルギー分散型蛍光X線分析装置 Jeol JSX3210S を用いて当該石を分析した結果である。二価金属酸化物のモル分数の合計 $\Sigma XO \text{ Mol}\%$ ($X = \text{Mg, Ca, Mn, Fe, Zn}$) = 40.25%となった。マスグラタイトの化学式は $(\text{BeMg}_2\text{Al}_6\text{O}_{12})$ でターフェアイトは $(\text{BeMg}_3\text{Al}_8\text{O}_{16})$ であり、この二価金属酸化物のモル分数の合計値はマスグラタイトであることを示唆している。注目すべきは、先行研究(e. g. 文献6)の結果と比べて、Cr、Zn、Gaの含有量が明らかに高く、Feの含有量が低いことである。高いCrの含有量という特徴は、K.Schmetzer et al.(2000)(文献7)が報告した紫がかった赤色を呈するターフェアイトと類似する。

表2：蛍光X線分析の結果

酸化物	重量%(wt%)	モル%(mol%)
MgO	20.57	39.63
Al ₂ O ₃	77.79	59.25
K ₂ O	0.09	0.01
CaO	0.05	0.07
TiO ₂	0.02	0.02
V ₂ O ₃	0.03	0.01
Cr ₂ O ₃	0.54	0.28
FeO	0.10	0.11
ZnO	0.47	0.44
Ga ₂ O ₃	0.42	0.17

図7はラマン分光分析装置(Renishaw InVia Raman System)を用いて取得したラマンスペクトルである。このラマンスペクトルでは 409、489 cm^{-1} 付近の高いピーク、711 cm^{-1} 付近の比較的に高いピーク、441、574、620、662 cm^{-1} のピークと 820 cm^{-1} 付近の太いピークが見られる。これは、ターフェアイトよりもマズグラバイトに近似している。

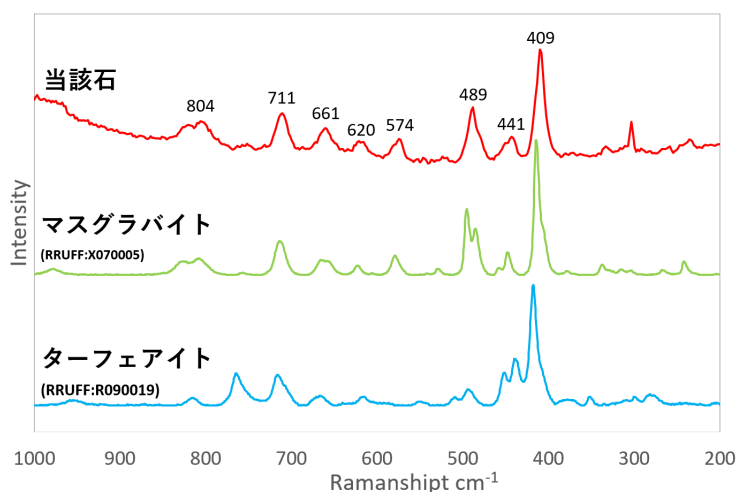


図7：当該石のラマンスペクトル(赤)。緑は RRUFF のデータベース(文献8)に掲載されているマズグラバイト、青は同じくターフェアイトのラマンスペクトルである。当該石がマズグラバイトであることを示唆する。

図8はフーリエ変換型赤外分光分析装置(JASCO FT/IR-4100)を用いて測定した赤外反射スペクトルとCGLで作成したマズグラバイトとターフェアイトのリファレンススペクトルを並べたものである。このリファレンススペクトルは先行研究(文献9)で用いられたものであり、ラマンスペクトルと粉末 X 線回折分析においてマズグラバイトとターフェアイトが確定されている。赤外反射スペクトルにおいては 756、547 cm^{-1} 付近の吸収ピークが存在し、530 cm^{-1} の吸収ピークは存在しない。これらのスペクトルパターンはターフェアイトではなく、マズグラバイトと完全に一致している。

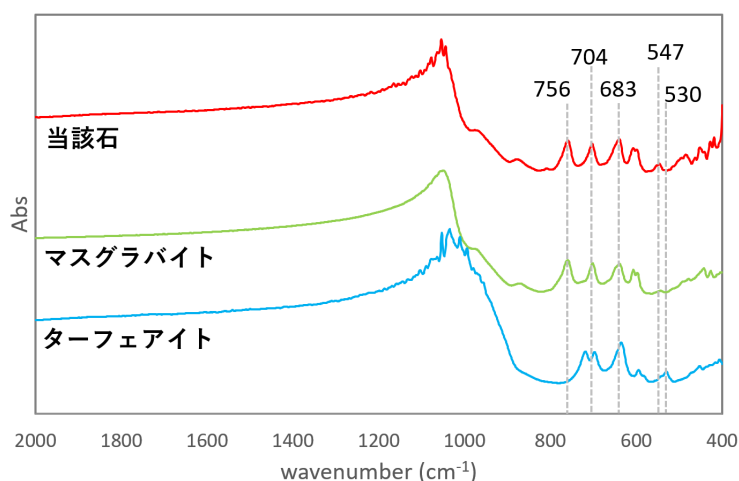


図8：当該石の FTIR 反射スペクトル(赤)。CGL のリファレンスサンプルであるマズグラバイト(緑)とターフェアイト(青)を並べて示した。

ラマン分光分析装置 (Renishaw InVia Raman System)を用いて測定したフォト・ルミネッセンス(PL)スペクトルでは、685.5、686.6 nm 付近のツインピークが見られ(図9)、両者のピーク強度はほぼ等しい。これらはCGLの先行研究(文献9)のマズグラバイトの特徴と一致する。ターフェアイトにも同様のツインピークが見られるが、この場合短波長側のピーク強度が明らかに強くなっており、ピーク位置もマズグラバイトのピークよりわずかに短波長側へシフトしている。

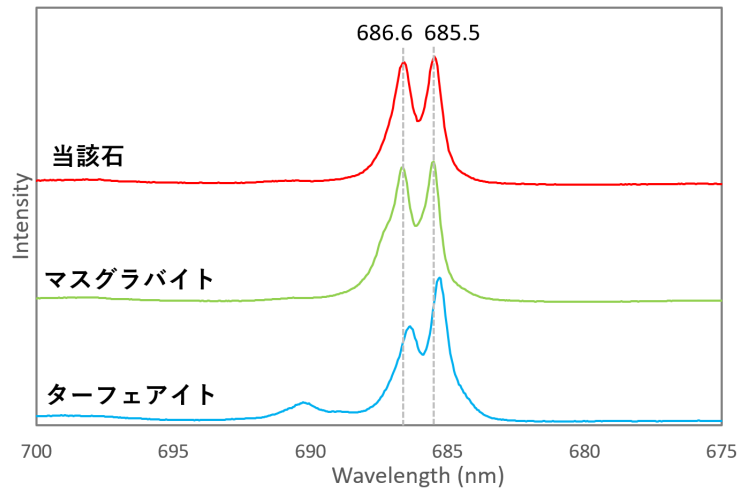


図9：当該石の PL スペクトル(赤)。CGL のリファレンスサンプルであるマスグラバイト(緑)とターフェアイト(青)を並べて示した。Cr の発光によると考えられる 685.5、686.6 nm のツインピークが確認された。

図10 は紫外可視分光光度計(JASCO V650)を用いて測定した UV-Vis-NIR スペクトルである。686 nm 付近の吸収ピークと、547、395 nm 付近にブロードな強い吸収が見られる。686 nm の線吸収はハンディ・タイプの分光器でもはっきりと確認できる。これはルビーやレッドスピネルなどの Cr 含有宝石と類似しており、Cr による吸収だと考えられる。

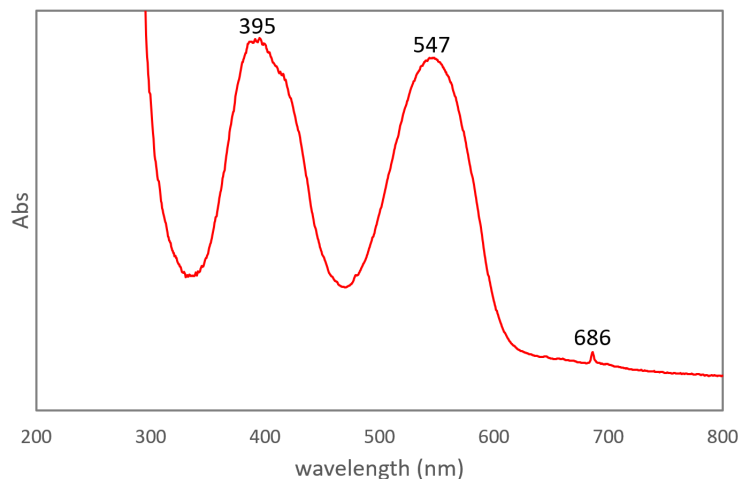


図10：当該石の UV-Vis-NIR スペクトル。686 nm と 546、395 nm 付近の強い吸収は Cr による吸収であると考えられる。

マスグラバイトは希少性の高い宝石である上、赤色を呈するものの報告は極めてまれである。スイスの鑑別機関 SSEF が過去に赤いマスグラバイトの原石を報告した(<https://www.ssef.ch/grandidierite-and-other-rare-gemstones-at-ssef/>)が、カット石の報告は今回が初めてとなる。残念ながら、この赤色のマスグラバイトの産地、産状などの情報は得られていないが、SEEF が報告した原石と同じくミャンマーのモゴック産の可能性はある。今後未だに鑑別されないで市場に流通するマスグラバイトに遭遇するかもしれないので、引き続き注視していきたい。

◆参考文献

1. 砂川一郎. 1982. タプロバナイトとターフェアイト. 宝石学会誌 Vol.9 No.4, 17-20
2. Kiefert, L. & Schmetzer, K. 1998. Distinction of taaffeite and musgravite. *Journal of Gemmology*, 26(3), 165-167
3. Armbruster, T. 2002. Revised nomenclature of högbomite, nigerite, and taaffeite minerals. *European Journal of Mineralogy*, 14, 389-395
4. 岡野誠, 北脇裕士, 阿依アヒマディ, 神田久生. 最近のラボ・トピックス. 2006. 平成18年度宝石学会(日本)講演論文要旨集, 11-12
5. Abduriyim, A., Kobayashi, T., & Fukuda, C. 2008. Identification of taaffeite and musgravite using a non-destructive single-crystal X-ray diffraction technique with an EDXRF instrument. *Journal of Gemmology*, 31(1/2), 43-54
6. Schmetzer, K., Kiefert, L., Bernhardt, H., & Burford, M. 2005. Gem-quality musgravite from Sri Lanka. *Journal of Gemmology*, 29(5/6), 281-289
7. Schmetzer, K., Kiefert, L., & Bernhardt, H. 2000. Purple to purplish red chromium-bearing taaffeites. *Gems & Gemmology*, 36(1), 50-59
8. Lafuente, B., Downs, R. T., Yang, H., & Stone, N. 2015. The power of databases: the RRUFF project. In: *Highlights in Mineralogical Crystallography*, T. Armbruster and R. M. Danisi, eds. Berlin, Germany, W. De Gruyter, 1-30
9. 間中裕二, 尾方朋子. 2009. 平成 21 年宝石学会(日本)「最近遭遇するいわゆるレアストーンの鑑別について(その1)」。Gemmy, 151, 3-8 または https://www.cgl.co.jp/latest_jewel/gemmy/151/77.html