

地下からの手紙の解読—宝石と鉱物—

砂川一郎¹⁾

子供達の夢とロマンをかき立てる恐竜の話に続いて、多くの方々の強い関心の的である、宝石と鉱物についてお話をしたいとおもいます。

さて、自然史系の博物館の地学のコーナーに入りますと、どこでも多くの美しい鉱物の結晶が展示されています。ここ地質標本館の第4展示室も例外ではありません。実は展示標本のいくつかは、かつて現役時代に私自身で採集したものです。こうした美しい鉱物の結晶、あるいは、それをもとにした宝石類は、恐竜と同じく博物館地学部門の「目玉商品」ということができます。しかし鉱物は、美しいあるいは宝石として価値があるにとどまりません。鉱物は、私たちが立つ大地を構成する物質の単位であり、また、私たちの暮らしを支える資源のもとでもあります。鉱物それ自体は、地下深部に関する情報をもたらす、いうなれば、地下から送られてきた手紙であるわけで、恐竜とは違った意味で私たちの夢をかき立てるものといえます。

今日は、こうした鉱物から地下についてどんなことがわかるのかを、特に宝石の代表とも言えるダイヤモンドに的を絞って、お話をしたいと思います。

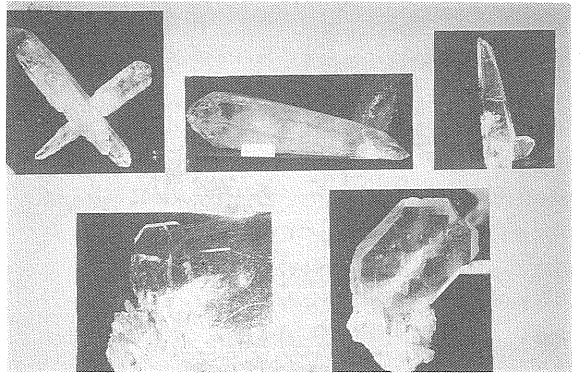


写真1 さまざまな形を示す水晶の結晶。

ですが(写真1)、ステノを驚かせたのは、対応する結晶面同士のなす角(面角)を測ってみると、形が千差万別に変わっているにもかかわらず、どの水晶でも面角は一定していたということでした。この発見は、結晶学のもっとも基礎となる、「面角一定の法則」の発見でありました。

では、こうした規則的關係があるにもかかわらず、どうして鉱物結晶の外形が多様に変化しているのでしょうか？ ステノは、面角一定の法則を提唱した論文の中で、結晶の成長速度が結晶面ごとに違うためと説明しています。この説明は、実は今日の結晶成長学、つまり、結晶がどの様にしてできていくのかを研究する学問の出発点に当たるものだと、私は考えております。結晶成長学は、鉱物の結晶がどの様にしてできていくのかを調べることを通して、地球の中でのいろいろな現象に迫ろうという学問です。

鉱物学の中には、結晶成長学の他に、結晶構造学という学問があります。鉱物結晶が、面角一定の法則に代表される規則性を持った外形をとるのは、結晶をつくる原子の配列が規則正しいことに起因しているからであるという、結晶の骨組みに関する概念が、やはりそのころ生まれてまいりました。その後1912年に、マックス・フォ

1. 鉱物学—地下からの手紙を解読する学問

さて、ダイヤモンドのお話をする前に、宝石としてあつかわれる鉱物のうち最も身近な水晶を例に、地下からの手紙を解読する学問である、鉱物学についてのお話をしたいと思います。水晶は、一般的には美しく整った六方柱状の形をしています。水晶は、鉱物学の歴史の上では、大切な法則の発見につながった鉱物として知られています。

17世紀、デンマークのニコラス・ステノという医師が、イタリアのトスカナの大公の侍医として招へいされ、南に下る途中のアルプスで、アルプス型鉱物脈から、たくさんの水晶結晶を集めました。水晶には、太いの、短い、ややひらたいのと、さまざまな形のものがあるわけ

1) 元所員, 東北大学名誉教授: 〒190 東京都立川市柏町 3-54-2

キーワード: 宝石鉱物, ダイヤモンド, 水晶結晶の完全性, 結晶の形, 結晶の内部組織, 包有物, 成長史

ン・ラウエの示唆にしたがい、二人の学生がX線を鉱物結晶に当て、規則的な回折点を得たことから結晶の中の規則正しい原子の並び方を解析できることを示しました。これが近代的な結晶構造学の始まりであります。

再び水晶を例にとります。水晶は、結晶形が明瞭な石英のことで、 SiO_2 という化学組成を持っています。結晶構造の単位となっているのは、1個のシリコン原子のまわりを4個の酸素原子が取り囲んだ四面体です。隣合う四面体同士が、酸素原子を共有して三次元的につながり、水晶の骨組みをつくっているのです(写真2)。こうした構造体をいろいろな方向から眺めて見ますと、原子の配列は一定の周期をもっており、しかもその周期は方向によって異なっているため、配列の密な方向と粗い方向があるのに気づきます。こうした骨組みの規則正しさが、水晶のもつ三方晶系の対称性をあらわすと同時に、結晶としての成長速度の異方性の原因の一つともなっているわけです。後ほどお話いたしますダイヤモンドは、炭素原子だけで出来ている鉱物ですが、構造の単位は1個の炭素原子のまわりを4個の炭素原子が取り囲んだもので、これがつながってダイヤモンドの構造ができてい

ます。この場合でも、規則正しい炭素原子の配列の中に原子配列の粗・密が認められます。

さて、水晶に代表されるように、天然の結晶した鉱物は、構造的には大変均質な単結晶という状態で産出することが多いわけです。単結晶として産出するものの代表が、ダイヤモンドやエメラルドなどの宝石といえましょう。単結晶とは、その個体のすみからすみまで、同じような原子配列が続いている状態です。これに對置するものとして、細かな単結晶が密に集合してできている、多結晶体があります。同じ鉱物でも多結晶にくらべると単結晶の方がずっと高い透明度をもっています。これに色の美しさや輝きが加われば宝石として用いられることになるわけです。

単結晶で出来ている宝石の場合、一般には石を小さな切り子面で囲んだ、ファセット・カットをいたします(写真3a)。このカットは、単結晶の高い透明度と美しい色を、最大限生かせるカットです。こうしたカットの対象となる透明な石を、例えばカボション・カットという蒲鉾型のカットで仕上げますと、ダイヤモンドなどのもつ美しい輝き、きらめきは、決して生まれてまいりません。ガラス玉とおなじ見かけになってしまいます。エメラルドの場合でも、カボション・カットではその色の美しさと透明感が出せません。

さて、ファセット・カットができるような完全性の高い単結晶の中に、わずかに不完全な部分が含まれる場合を考えてみましょう。あとからダイヤモンドのところでお話いたしますように、天然の鉱物はたとえ宝石質のものであっても、多少の欠陥を持っているのが普通です。こうした場合には、半導体材料などの評価研究の手法として発達してきましたキャラクタリゼーションを応用することによって、欠陥にあたる部分を詳しく調べ、その結晶が理想状態からどれだけずれているかを詳しく検討することができます。こうした検討をすることによって、その結晶が育ったときの、条件や環境を推定することができるわけです。

鉱物を、地下のいろいろな様子を伝える手紙にたとえました。同じ読むなら、ぐしゃぐしゃした多結晶体をつかうよりも、完全度の高い宝石になるような鉱物の単結晶で、理想状態からのずれを解析し、地下で起こっていることを読み取るほうがよいと、私は考えます。このやり方で、ダイヤモンドからはどういったことがわかるのかを、のちほど詳しくお話いたします。その前に、いろいろな宝石とその楽しみ方について、やはり水晶の仲間を例に少しご紹介したいと思ひます。

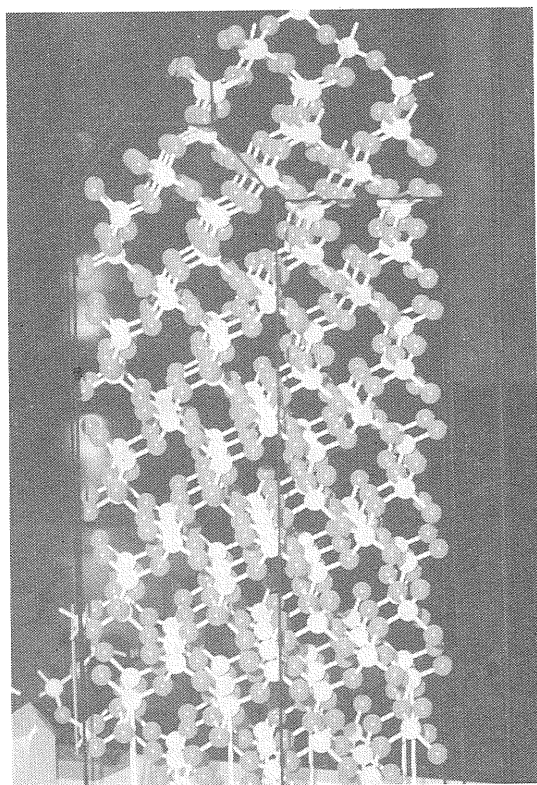


写真2 水晶の結晶構造の模型。白丸 Si (珪素)、黒丸 O (酸素)。(チューリッヒの ETH 博物館)

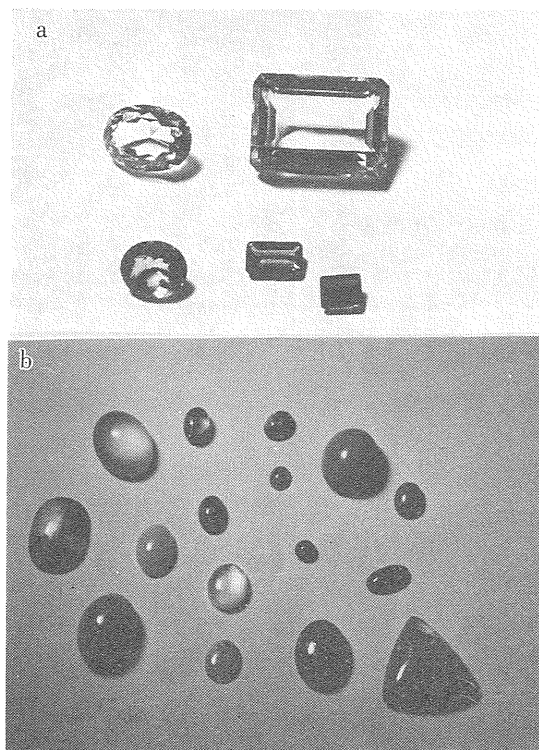


写真3 (a) ファセット・カット, (b) カボン・カット

2. 宝石のさまざま—水晶を例に

さて、水晶を代表とする石英 SiO_2 の仲間には、いろいろな変種があります。その全てが宝石になるわけではありませんし、宝石として楽しめるものにも、いろいろな種類があります。そのうちいくつかを御紹介したいとおもいます。

まず、単結晶質の水晶を原石とするものとして、アメシスト、シトリン、スモーキー・クォーツなど、いろいろな色調のものがあります。エメラルドやルビーのように値段が高くないにもかかわらず、良い色つやもっているため、多くの人に楽しまれている宝石です。

水晶は純粋なときには無色透明です。これも昔からファセット・カットされたり、印材として使ったり、球に磨きあげて占いの水晶球としてつかわれてきました。同じ単結晶質の水晶でも、比較的低温ででき、かつ鉄を不純物としてふくんでいる場合には、それに原因する着色中心(点欠陥)によって紫色透明な美しい宝石になります。これがよく知られているアメシスト(紫水晶)です。アメシストは世界各地で産しますが、ブラジルが一番有名です。ここでは、火山岩のジェオード(晶洞)の中にもわかって族生して産出します。晶洞壁の部分はメノウで

おおわれており、晶洞の中にまずメノウが沈澱し、そのあとアメシストが成長したことがわかります。

アメシストは今では人工的に合成することができます。合成のとき、不純物として鉄をいれておきます。できたままの状態では黒っぽい色をしていますが、それにコバルト60の放射線を照射することで美しい紫色になるわけです。

不純物としてアルミニウムをふくんだ水晶の場合には、放射線照射すると紫色になるかわりに煙色や黒色になります。スモーキー・クォーツと呼ばれているものがそれです。スモーキー・クォーツ(煙水晶)や黒水晶は、アメシストができるよりもっと高温でできたペグマタイトの中にしか産出しません。ペグマタイトの中の放射能鉱物からの放射線が、長い地質時代の間にも最初無色であった水晶の色を煙色や黒色に変えてしまったのでしょう。しかし今日では、放射線照射をして人工的にスモーキー・クォーツをつくっているようです。

シトリンと呼ばれる黄色系や赤褐色系の水晶も、古くから黄色系の宝石として愛用されてきました。これは鉄による色です。しかし、今日では紫水晶を加熱処理してシトリンをつくっていることが多いようです。加熱処理したシトリンは、しばしばトパーズという名をつけて売っているようですが、両者はまったく別の鉱物です。シトリンも人工的に合成できます。

もう一つコバルトを不純物として加えた合成水晶があります。これは、淡いアクワマリン調のスカイブルーの色がついた水晶で、天然の水晶にはみられない色です。緑色系の色調をもった合成水晶もあります。いずれもなかなか魅力的な色調もっています。

このように、単結晶質の水晶の場合、ふくまれている不純物の種類や存在状態で、いろいろな魅力的な色調が生まれ、透明感ともあいまって古くからファセット・カットして宝石として愛用されてきました。

一方、同じ SiO_2 の組成でも、成長条件によっては、結晶が大きく発達せず、微細結晶の多結晶集合体や、規則正しい骨組みをとらず非晶質の状態で産出します。たいていは、低い温度条件で沈澱したもので、玉髄、メノウ、碧玉、オパールなどはその仲間です。この種の微細結晶の多結晶集合体では、単結晶の場合のような透明さは期待できません。かわりに、濃淡や色変りの縞模様的美しさや、粒子の集合に起因する虹色の光の効果による美しさが愛されて宝石や飾石として使われるわけです。メノウ、クリソプ्रेस、ジャスパー、サンストーン、ブラッドストーン、ミルク・オパール、クリスタル・オパール、ファイアー・オパールなどがその例です。

メノウの中味は水晶と同じ結晶ですが、個々の結晶の

大きさは1ミクロン程度にすぎません。こうした小さな水晶の結晶が集まって繊維状組織をつくり、濃淡の縞模様をもつのがメノウです。集まり方の粗・密に応じて、特有の縞模様が現れるわけです。こういうものに対しては、ファセット・カットをしても映えません。かわって、縞模様を生かしたレリーフをつくったり、カボションに磨いて、模様的美しさを出すわけです。貝殻でつくると多くの人に思われているカメオも、もともとはメノウでつくったものです。

同じく水晶の仲間、バラ石英とよばれるピンク色をしたものがあります。これはメノウよりはるかに透明感がありますが、やはり単結晶としては産出しません。これも色の美しさを生かして、彫刻などの細工物に好んで利用されます。

オパールの主成分は SiO_2 ですが、これに少し水が加わっており、結晶構造を持たない非晶質の鉱物です。オパールは非晶質ですが、同じサイズの球がびっしりつまってできているので、それが光の回折格子の役割をします。そのため、球のサイズによってきまる色を放射し、オパールの美しい色彩が生まれるわけです。カボション・カットしなければこの効果はうまくできません。

ここにあげたような、余り高価ではないが色の美しい石を楽しむ方法の一つとして、モザイクがあります(写真5)。イタリア、フィレンツェのモザイク美術館では、トルコ石やメノウの小さなかけらを組み合わせてつくった、美しいモザイクを見ることが出来ます。

このようにして、天然の鉱物と私たちは、それらを宝飾品や美術品として利用することを通じて、長いつきあいがあるわけです。石の文化と余り関係がないと思われております日本でも、今から5000年程前の縄文中期の遺跡から、ヒスイの加工場の跡が見つかっております。日

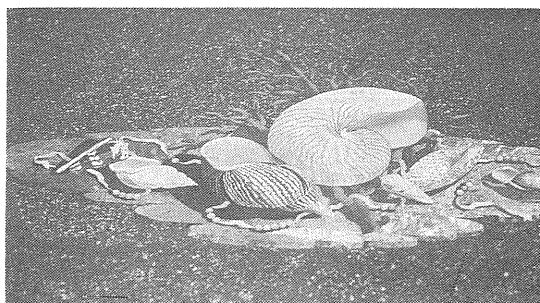


写真5 貴石で作ったモザイク。

本の文化と宝石とは決して無縁であったわけではありません。こうした宝石の一つ一つについてお話したいところですが、宝石になる鉱物が、宝石として以外にも私たちの夢をかき立てる存在であることを理解していただくために、ダイヤモンドの方に話をうつさせていただきます。

3. ダイヤモンドが語る、地球深部

地質調査所、Geological Survey という機関は、世界中どこにもあり、その国の地質や鉱山についての研究を行っているところです。人工衛星だ、宇宙開発だという昨今、地球について研究するこの種の機関は、残念ながら大変地味な色彩の機関と言えようかと思います。人工衛星などを使って今日えられる情報は、きわめて多様で多彩です。ところが、私たちの足元の大地や、地球についての情報は、これに比べて驚くほど少ないのが実情です。

地球のことを知るには、地球をつくる物質を調べなければならぬのはいうまでもありません。人類は直接地球に穴を掘ってその物質をしらべることをしていますが、今までに到達した最大深度は地下10km台にとどまるのです。では、どうやって地球深部をつくっているサンプルを、手にいれるのか？ 現在盛んに言われております超深層ボーリングなどのように、莫大な投資をして、技術開発を進めることにより、この目標に到達するという手法も、たしかに一つのやり方といえましょう。しかし、地球に取って毛穴の深さにすぎない深度10kmをはるかに越すのは、大変むづかしいといえましょう。天然の鉱物は、こうした意味で大変貴重な手がかりを与えるものなのです。

約45億年の歴史を持つ地球は、それ自身の運動の過程で、地下深いところから出来た物質を、地表あるいはその近くに運び上げ続けてきました。こうして運び上げられてきたものを調べることで、私たちは地球深部のことに



写真4 メノウで作った美しいレリーフ。濃淡の縞模様をうまく利用している。

ついでいろいろ知ることが出来るわけです。こうしてもたらされた物の一つに、鉱物があり、宝石があるわけです。

1) 人類とダイヤモンドの出会い

第1図に世界のダイヤモンド産地、原岩であるキンバレー岩の産地、大陸橋状地帯と海嶺の分布を示した図を示します。この図をもとに、ダイヤモンド発見の歴史をたどってみましょう。

人間の歴史上初めてダイヤモンドを見つけて使いたしたのは、インドのドラビダ族でした。紀元前7-8世紀頃のことで、最初は、他の物を研削する工具として使われたようですが、やがて、ダイヤモンドの劈開性に気づき、平らな劈開面でかこまれた八面体をつくって装飾に使うことを始めました。

その次に古い産地は、ボルネオです。紀元4-5世紀に、ダイヤモンドが見つかっております。さらに下って17世紀になりますと、ブラジルでダイヤモンドが見つかるようになりました。

有名な南アフリカのダイヤモンドは、19世紀の中ごろ発見されました。オレンジ川流域でのことでした。南アフリカでも、最初の頃のダイヤモンドは、それまでの産地と同じく河原の石や砂の堆積した場所(漂砂鉱床)から見つかっていました。ダイヤモンドを含んだ原岩が、風化・侵食されて、洗い出されたダイヤモンドが水の流れて運ばれ、他の石ころなどと一緒に関原に堆積したところを掘っていたわけです。

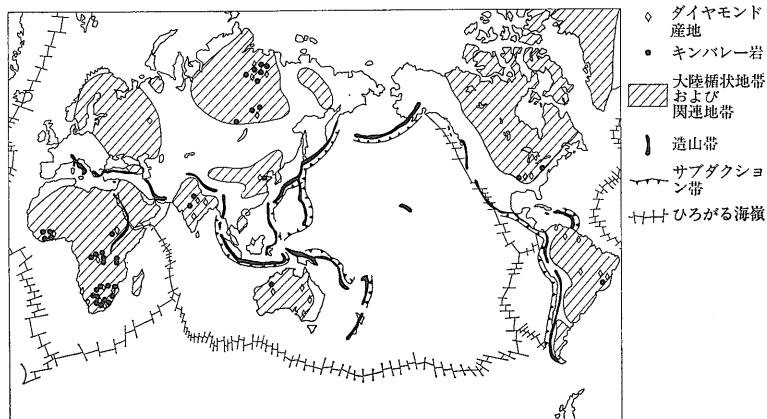
オレンジ川からのダイヤモンドの発見が伝わるや、数万人の人々が押し寄せ、ダイヤモンド・ラッシュが起きました。これにあぶれて川沿いに鉱区が取れなかった人々は、川から外れた農場などを掘り返していましたが、その黄色い土の中からもダイヤモンドが取れま

した。しかしほとんどの人は、ダイヤモンドは漂砂鉱床からしか見つからないという先入観を持っておりまして、黄色い土の下から青黒い硬い石が出てくると、そこで掘るのを止めてしまいました。しかし、バーナー・バルナトという人物は、その青黒い石まで掘り進み、そこにもダイヤモンドを発見したのでした。彼はこの事実を公表することなく、周りの土地を買い占めていき、鉱区がおもいっきり広がったところで、大々的に掘り始めました。彼自身はその後資金に行き詰まってしまうのですが、そこに大資本が入り込み、後のダイヤモンド・シンジケートへと発展していくわけです。こうしてダイヤモンドの原岩は、南アフリカで発見されました。岩石名をキンバレー岩といいます。キンバレー岩は、南アフリカのみならず、世界の安定大陸縁辺部に点々と産出しています。

その後のダイヤモンド大産地の発見は、第二次大戦後を待たなくてはなりません。シベリアでのダイヤモンドの発見です。ダイヤモンドは宝飾品のみならず、パイトやダイスなど工業用品としても大変重要な存在です。ダイヤモンドがなければ飛行機も戦車も作れないといひましょるか、世界情勢にキナ臭いものが漂いはじめると、ダイヤモンドの値段は一挙に上がります。そういうわけで、第2次大戦の時、ドイツのオランダ侵攻を察知したイギリスは、潜水艦を派遣して、オランダのダイヤモンド商の手元にあったダイヤモンドの大部分を回収したという、スパイ小説さながらの事実があります。ソ連は、ダイヤモンドの本格的産地を持っていなかったで、戦後の冷戦の時代に入りますと、必要に迫られてダイヤモンドの探査に乗り出しました。探査指針を与えたのは、今は故人となったソボレフです。ソボレフは、シベリアと南アフリカが地質条件の上で大変よくにており、ダイ

ヤモンドの探査はシベリアで行うべきであると進言しました。ソ連地質省は、この進言にもとづいて多くの地質家をシベリアに送りました。その中の一人の女性地質学者が、パイロプというダイヤモンドにともなわれる赤いザクロ石を漂砂鉱床から発見し、これを端緒としてダイヤモンドを含むキンバレー岩パイプを発見することが出来ました。余談ですが、ソボレフには3人の息子がおり、3人ともダイヤモンドの研究者になっております。

シベリア・ダイヤモンドの発見



第1図 世界のダイヤモンド産地とキンバレー岩分布図(砂川:宝石は語る, 地下からの手紙, 岩波新書).

以降の大きな発見に、オーストラリアのアーガイルでのダイヤモンドの発見があります。私は今から二十数年前に、「ダイヤモンドの話」という本を岩波新書で出しましたが、その中で、次に見つかるのはオーストラリアではないかと書いた覚えがあります。予想の通りといえますか、見つかった訳です。

また、中国の遼東半島でも、1974年にダイヤモンドが見つかっております。中国については長らく見つかったという話ばかりが伝わり、実態がなかなかはっきりしなかったのですが、この7月(1990年)、中国で開かれた国際鉱物学連合総会の折りに、現地を見学することが出来ました。最初の発見以来現在まで、遼東半島で100本を越えるキンバレー岩パイプが見つまっているとのこと。そのうちのいくつかは、実際に採掘されております。

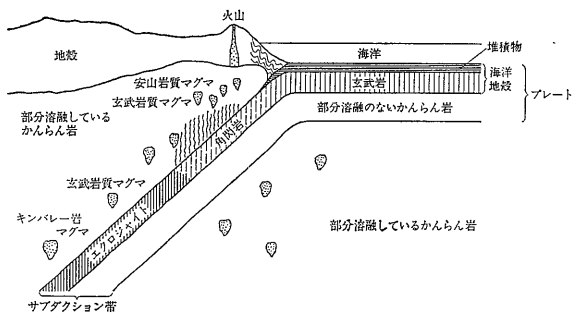
さて、こうして世界各地で採掘されているダイヤモンドですが、その品位は大変低いものです。平均して、1tの原岩から0.5カラット程度しか取れません。グラムになおせば、トンあたり0.1gというわけで、採算にのる含金量にくらべても1/100に過ぎません。いってみればダイヤモンドは、それだけ貴重なものといえるわけです。

2) ダイヤモンドは高压鉱物

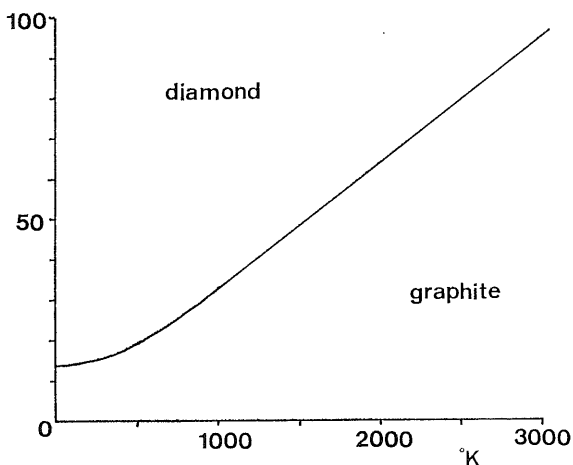
さて、ダイヤモンドの原岩は、さきに出てまいりましたキンバレー岩が一般的ですが、オーストラリアではランプロアイトというキンバレー岩と似た岩石から見つかっています。この二つの岩石は、特殊な超塩基性の火成岩、つまり、 SiO_2 が極端に少なく、代って鉄やマグネシウムにとむ火成岩です。こうした岩石の中の捕獲岩であるエクロジャイト、これは、伊豆大島にみられるような玄武岩が高い温度と圧力にさらされてできた、一種の変成岩ですが、この中からもダイヤモンドが見つかっております。

ダイヤモンドを含むこうした岩石の産出は、先カンブリア紀の安定な盾状地に限られております。日本列島のような、海洋プレートが盛んに沈み込む活動的大陸縁辺には、ダイヤモンドは産出していません。第2図に示しましたように、沈み込み帯の深部では、玄武岩質の海洋地殻がエクロジャイトに変化しますし、その近くのマントルではキンバレー岩やランプロアイトのマグマも出来るわけです。沈み込み帯の火成活動は、浅いところに根があるために、ダイヤモンドを持つにはいたらないのです。ダイヤモンドの生成には、地球深部の高压と、高温が不可欠なのであります。

では、いったいどの程度の温度・圧力が必要なのでしょう。ダイヤモンドのなかでの炭素原子同士の結合



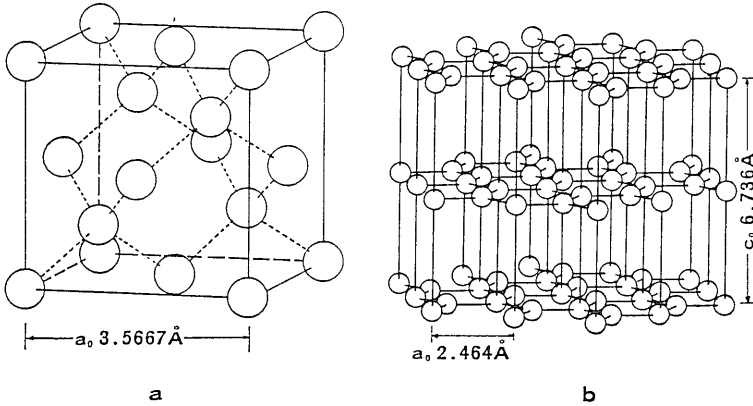
第2図 沈み込み帯とキンバレー岩マグマおよびエクロジャイトの関係(砂川：宝石は語る、地下からの手紙、岩波新書)。



第3図 ダイヤモンドと石墨の平衡状態図。

から計算いたしますと、相対的に高压側でダイヤモンド、高温・低压側でダイヤモンドと同じく炭素だけで出来ている鉱物である石墨が安定であるという関係が導くことが出来ます。炭素についての平衡状態図を第3図に示します。ダイヤモンドは等軸晶系で、四面体状に配列した炭素原子が共有結合で互いにつながりあっています。こうした関係が、ダイヤモンド特有の硬度と大きな屈折率を生み出しているわけです。一方の石墨は、亀の甲状の原子配列を基礎としたものが層状に積み重なった、六方晶系の鉱物で、層と層のあいだはファン・デル・ワールス結合という弱い結合でむすびついています。これがこの鉱物のもつ柔らかい性質にむすびつくと同時に、可視光線の吸収を行い、真っ黒に見えるわけです。第4図にダイヤモンドと石墨の結晶構造を示します。強固なダイヤモンドの構造を形成するのには、常温下でも1万気圧以上という大変な圧力を要するわけです。

第3図の平衡状態図からはさらに、高温高压下でできたダイヤモンドを手に入れるには、出来た状態から圧力



第4図 ダイヤモンド (a) と石墨 (b) の結晶構造。

を下げずに、急激に温度を下げなければならないことがわかります。温度と圧力の二つのパラメータが同時に変わるなら、せっかくできたダイヤモンドも石墨の安定領域に入って石墨になってしまうからです。

さて、各種の宝石鉱物をその生成に関与した地質現象のタイプに従ってまとめてみますと (第5図)、ダイヤモンドの特異性が理解できます。他の宝石の中には、ルビー・サファイア・エメラルド、そしてヒスイなど、変成作用の条件で出来るものはいくつかあります。それと似たような温度条件だが、はるかに圧力の低いところでは、花崗岩類のマグマが固まるのにひきつづいてペグマタイトが形成され、トルマリン・キャッツアイ・トパーズ・スポジュメン・水晶などの宝石鉱物が形成されます。も

っと浅く、低温の領域ではトルコ石などができますし、常温常圧下で生物の働きによって出来る真珠・珊瑚も、宝飾品として用いられております。ダイヤモンド、あるいはこれを産するキンバレー岩と一緒に入ってくるペリドット (カンラン石)・パイロップなどは、宝石類のなかでも特に高温で高圧な、地球深部の環境を代表する鉱物なのです。

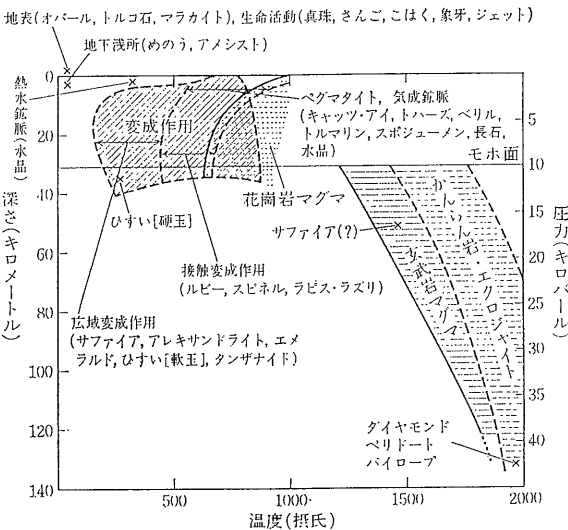
しかし、人間はなかなか知恵がありまして、今日では約 1,000°C 程度の温度があれば、1 気圧近い

低い圧力のもとでも、ダイヤモンドの合成が可能になりました。Chemical Vapor Deposition (CVD) 法という、日本では最初に無機材質研究所が研究を始めた、準安定条件のもとでダイヤモンドを合成する方法で、最近全世界的な関心を呼んでおります。炭素を含んだ物、たとえばウィスキーやブランデーなどの洋酒でも日本酒でもよいわけですが、これと水素の混合気体を高温で反応させると、下の金属やシリコンの基盤の上に小さいながらもちゃんとしたダイヤモンドの結晶を成長させることが出来るというわけです。これは、ダイヤモンド活用の新しい道を開くものだといえましょう。

ダイヤモンドに代表される高圧で安定な物質を、常圧のような低い圧力で作るということには、実は、天然にも多くの例があるのです。貝殻は鉱物名がアラゴナイトと呼ばれる結晶構造を持った、炭酸カルシウムで出来ておりますが、この鉱物は実は高圧型の鉱物で、ヒスイなどと一緒に出来る鉱物なのです。天然の低圧下で安定な炭酸カルシウムは、方解石という別な種類の鉱物ですが、貝殻をつくっているのはおもしろいことに、高圧型なのです。これを見ると、われわれは自然から学ばなければならないことがいっぱいあるなど、感じるわけがあります。

大粒のダイヤモンド結晶の合成は、しかしながら、高温高圧下で行うのが常道です。したがって大型のプレスを用いた高圧下でつくられてきました。この方法で合成したダイヤモンドの多くは六面体と八面体の組合わさった形をしており、色は緑褐色で、普通はミリメートル以下の微細な結晶で、主として研磨材用に使われています。しかし、合成方法を工夫することで、現在は、10カラット以上の宝石質の結晶も作れるようになったとのこと。

3) 天然ダイヤモンドの性質



第5図 温度と圧力 (深さ) の関係でみた宝石の生まれる場所 (砂川：宝石は語る、地下からの手紙、岩波新書)。

10カラット以上の結晶を合成出来るとは言っても、宝石用として使われているダイヤモンドはほとんど全て天然のもので、天然ダイヤモンドは、世界中のどこで取れるものでもすべて皆同じ性質を持っているわけではありません。ダイヤモンドの物理的性質を調べてみますと、大きく分けて2つのグループがあります(第1表)。紫外線に対する吸収を調べてみますと、天然の大部分のダイヤモンドは、3,400Åまでの紫外線しか透過しませんが、中には2,250Åまでの短波長紫外線まで透明なものがあります。前者をI型、後者をII型と呼んでおります。赤外線にたいしては、I型では7.8μのところ吸収が認められるが、II型では6μまで吸収ピークがみられません。さらにX線のスパイク反射も、I型では認められませんが、II型にはありません。この二つのタイプには、この他にも劈開面の粗さ、塑性変形に対する強度、熱伝導率などに明らかな違いが認められます。この二つの型は、さらに互いに二つずつに分けられますが、なかでもII b型とされる天然にはわずかしこ産出ししない型のものは、電気抵抗が大変小さく、半導体とも言うべき特異な性質を持っております。

こう言った性質は、ダイヤモンドのなかにごくわずか含まれております不純物の窒素が引き起こしたものです。窒素は、ダイヤモンドにとって原子オーダーの不純物としては最も多く含まれています。I型ダイヤモンドを電子顕微鏡下で観察しますと、{100}面に平行な、長さ1,000Åに達する薄板状のコントラストが認められます(写真6)。これは、ダイヤモンド中にふくまれていた窒素原子が集まって薄板状に析出したところです。このような析出を、偏析といいます。もともと全体に均質に分布していた窒素が、ダイヤモンド結晶が焼きなましを受けたときに、窒素だけが寄り集まることによって生まれたのだと考えられています。焼きなましは、ダイヤモンドの結晶をふくむマグマが上昇すれば起こりうるでしょう。

第1表 ダイヤモンドのI型とII型

	I 型		II 型	
	I a	I b	II a	II b
紫 外 線	3,400Å		2,250Å	
赤 外 線	7.8μm 吸収		6μm まで透明	
X線(スパイク反射)	あ り		な し	
劈 開 面	荒 い		なめらか	
塑 性 変 形	強 い		弱 い	
熱 伝 導 率	9 watts/deg/cm		26watts/deg/cm	
電 気 抵 抗	10 ¹⁶ ohm/cm		10 ⁻¹⁰ ohm/cm	

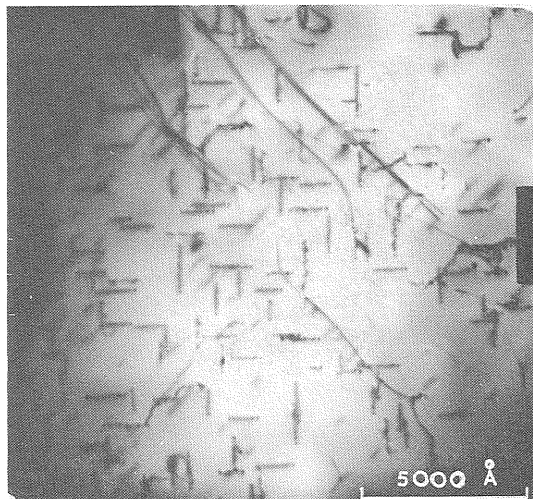


写真6 窒素の薄板状析出の透過型電子顕微鏡写真 (Evans 原図)。

窒素の含有量は、I型ダイヤモンドでは最高0.2%に達します。これに対してII型では、ppm以下の含有量しかありません。つまり、純粋なII型ダイヤモンド、窒素と炭素の合金とも言うべきI型ダイヤモンド、といったところでしょう。

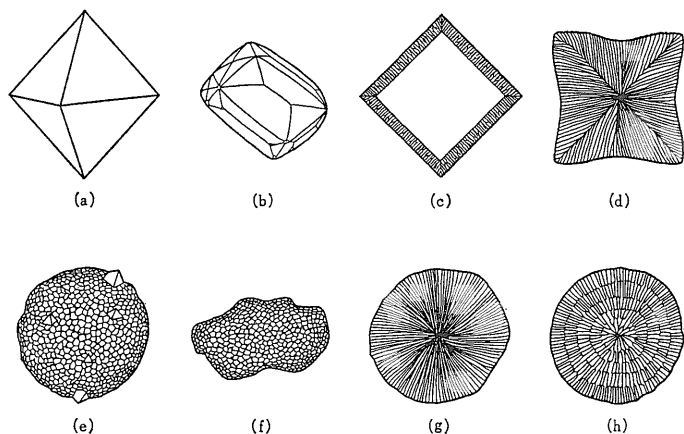
しかしこの窒素は、I型ダイヤモンドの力学的な強さの原因ともなっております。純粋な金属と合金との強度を比較した場合、よく知られている例として、純粋なアルミニウムと合金であるジュラルミン、また、純粋な鉄と炭素鋼の関係を思いだしてみるとよいでしょう。いずれも不純な合金の方が、高い強度を持っております。

4) 天然ダイヤモンド結晶の形態とその意味

さて、一般に良く知られているダイヤモンドとは宝石質の単結晶ですが、ダイヤモンドのすべてがそのようなものではありません。天然ダイヤモンドの結晶の形態には、いろいろなものがあります(第6図)。

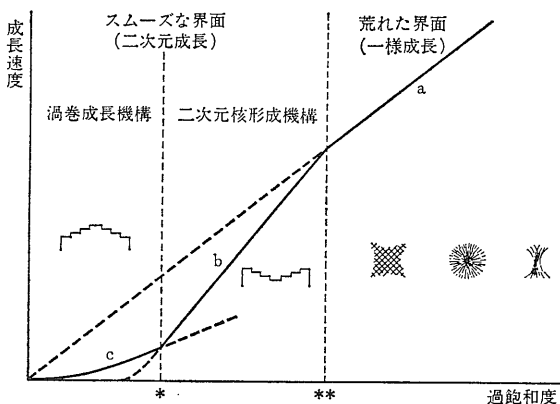
宝石質の天然ダイヤモンドは、言うまでもなく単結晶です。しかし天然ダイヤモンドとしては、多くの結晶が集まった多結晶体のものも珍しくはありません。多結晶体には、集合組織の様子に応じていろいろな名前がつけられております。また、単結晶と多結晶が複合した状態でも出るものもあります。単結晶質の結晶を核として、そのまわりに繊維状のダイヤモンドができていく coated stone から、放射状の内部構造を持った物まで、いろいろなタイプがあるわけです。

では、どうしてこうしたタイプが出来たのでしょうか？ それには、ダイヤモンドの核形成や結晶成長の早さが関係しています。縦軸に結晶成長速度、横軸に過冷



第6図 ダイヤモンドのさまざまな結晶。

(a) (b) 単結晶質ダイヤモンド, (c) コーテッド・ストーン, (b) キューボイド, (e)~(h) 多結晶質ダイヤモンド, [(e) フラメサイト, (f) カーボナード, (g) ショート・ボルトおよびパラス, (h) ヘイルストーン・ボルト]. (c) (d) (g) (h) は断面図 (砂川: 宝石は語る, 地下からの手紙, 岩波新書).



第7図 球晶, 樹枝状結晶, 骸晶, 多面体結晶の関係, 縦軸, 成長速度, 横軸過飽和度, 過冷却度などの成長の駆動力の大きさを示す (砂川: 宝石は語る, 地下からの手紙, 岩波新書).

却度や過飽和度といった結晶成長の駆動力となるパラメータをとった第7図で考えてみます。この図からは、平滑な面を持った多面体の結晶が成長するには、過冷却度や過飽和度が低い状態でないといけないことがわかります。過冷却度や過飽和度が大きいと、骸晶状の結晶や、雪の結晶にみられるような樹枝状の結晶になってしまいます。従って、多結晶質のダイヤモンドや、放射状の組織をもったダイヤモンドは、大変結晶成長速度が大きい領域で出来たのに対し、単結晶のダイヤモンドは比較的成長速度の小さい領域で出来たことが推定されるわけです。では、中間型のタイプの石は、どういうところ

で出来たのでしょうか？ 例えば、駆動力の低い領域でゆっくり成長していた単結晶のダイヤモンドをふくむマグマが、上昇すると過冷却度が大きくなり、急速な樹枝状成長を始めて、coated stone になったのかも知れません。このようにして、個々の天然ダイヤモンドを詳しく調べることによって、それらが生い育った環境を知ることが出来るわけです。

5) X線トポグラフ法でダイヤモンドを探る

結晶の形態だけでなく、内部構造もダイヤモンドの生い立ちを探る上で重要なことは言うまでもありません。これを探るのに有効な手段として、X線トポグラフ法という方法があります。この方法は、結晶の中の格子欠陥の分布を明らかにしてくれますが、格子欠陥のかかなりのものは結晶の成長にともなって導入されていることから、結晶の成長史をたどる上で、きわめて役に立っているのです。

ここに一つの例をあげたいとおもいます。写真7の結晶は、稜や角の部分が丸みをおびているものの、基本的には八面体をした、透明な宝石質のダイヤモンドです。

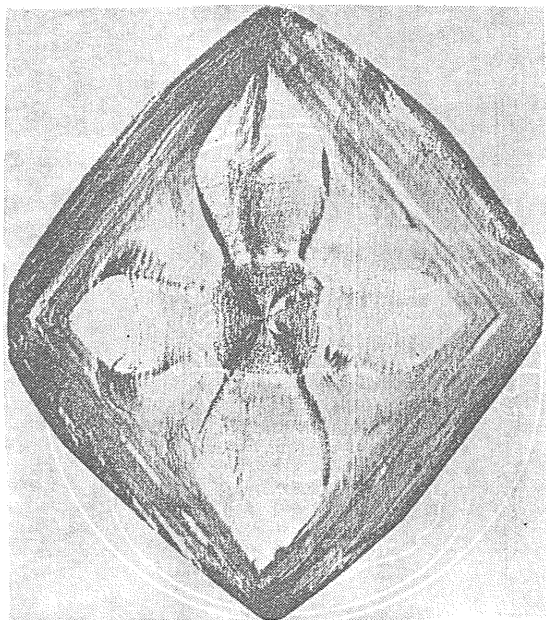


写真7 中心部に十字架状の構造をもつ八面体のダイヤモンドの結晶のX線トポグラフ (Suzuki and Lang, 1976).

肉眼的には、これといった欠陥は認められません。ところがこの結晶をX線トポグラフ法で調べてみますと、中に十字架状の構造がみえてきます。十字架の外は、外形と同じく八面体の{111}面が取り巻いています。これはどうして出来たのでしょうか？

十字架構造は、六面体の面{100}と八面体の面が組合わさって出来たもので、この結晶の成長の初期に、将来はサイコロのような六面体になるような成長をしていたことを示しています。しかしこの面は、成長の途中で消えてしまい、かわって八面体面による成長がおこなわれるようになりました。八面体面による成長が行われていた領域では、X線トポグラフ写真上に現れた縞模様は大変スムーズで直線状ですが、六面体の面が認められる領域では、縞模様は曲線状にゆらいでいます。つまり成長のしかたがこの2つの面で歴然と違うわけです。

これにさらに、エッチングという別の方法を併用してみますと、エッチピットの粗密に対応して、縞模様があらわれてきます。縞模様は、エッチピットの少ない完全性の高い部分と、欠陥に富んだ部分が交互に層状をなして存在していることを示しています。この縞模様、つまり、エッチピットの多い領域と少ない領域は、窒素含有量の多いところ・少ないところにも、対応しています。このように、大部分の天然のダイヤモンドは、宝石質であっても、結晶学的にみてけっして完全性の高いものではありません。

しかし中には、地質調査所の安田俊一さんと共同研究したシベリア産ダイヤモンドのように、完全性のきわめ

て高いものもご紹介します。私どもで調べた一番完全性の高い結晶では、きれいな八面体結晶をしていて、転位と呼ばれる結晶構造の線状のずれがたった11本程度しか認められなかった例があります。写真8に示した結晶の場合、転位は結晶の中心を外れたところから始まっています。こうした転位のうちの2本が、写真8の左側に示した八面体面上に顔を出してあります。面上の対応する場所には、成長丘という、成長層の広がりを中心になるところがみられ、ここからはじまった層成長によって、この面が出来たことがはっきりわかります。

また、X線トポグラフによって結晶の中での転位の分布を調べ、結晶面の上の数多くの成長丘と、それを中心として発達する渦巻状の成長層との対応を確かめた例もございました。これは、天然ダイヤモンドでの渦巻成長を確認した、初めての例でした。転位が結晶面上に顔を出しますと、その部分にステップ状の原子配列が出来ます。そこは原子がくっつき易い場所となるので、そこを中心として、成長層が渦巻状に広がって行くというわけです。こういう成長が出来るということは、天然のダイヤモンドが、変成岩のようなほとんど固体(鉱物質)で流体がちょっぴりという環境でなく、どろどろに溶けたマグマから成長したものであることを、示しているわけです。

もう1枚、おもしろいX線トポグラフ写真(写真9)をお見せいたしましょう。これは、日銀ダイヤモンドの中のカットしてあるダイヤモンドについて、X線トポグラフを撮ったものです。石は、ラウンド・ブリリアント

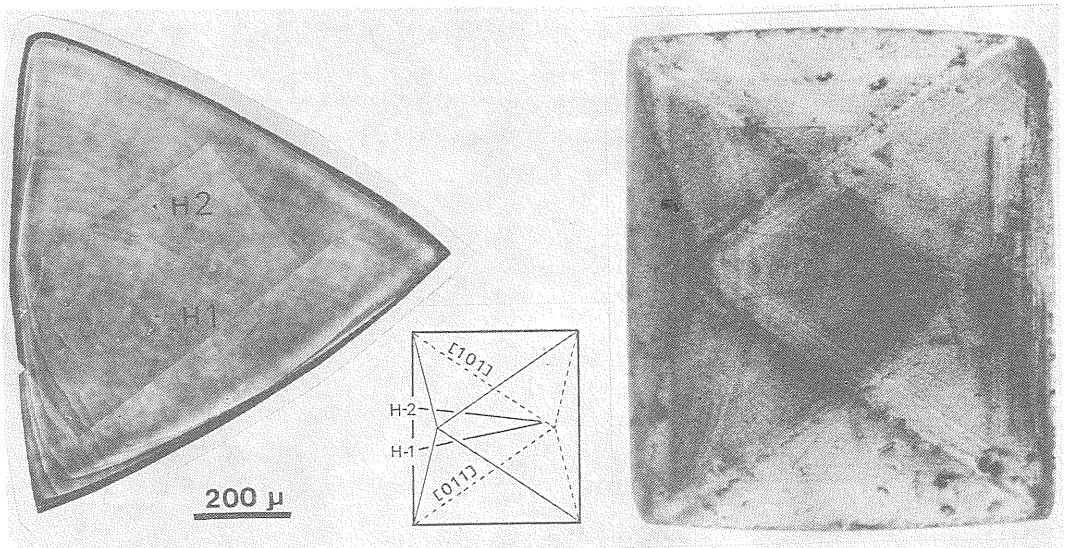


写真8 シベリア産ダイヤモンド八面体結晶の表面 マイクロトポグラフ(左)とX線トポグラフ(右)。(左は塚本勝男氏撮影, 右は安田俊一氏撮影)

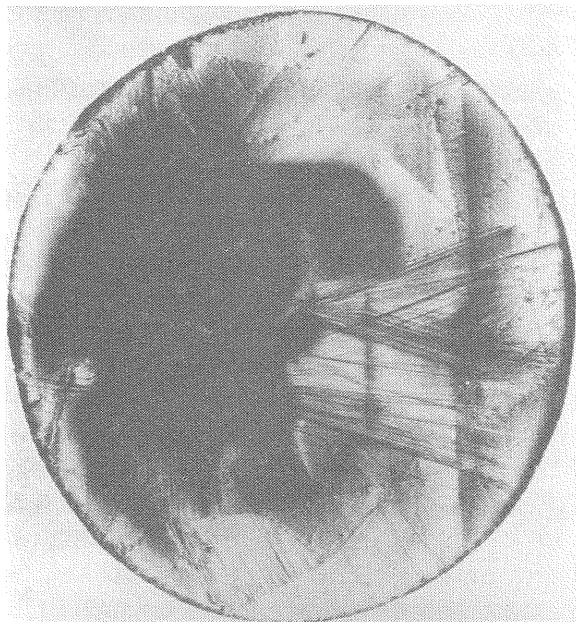


写真9 日銀ダイヤモンドのラウンド・ブリリアントカットのX線トポグラフ。線状の束が転位(安田俊一氏撮影)。上下4.1mm。

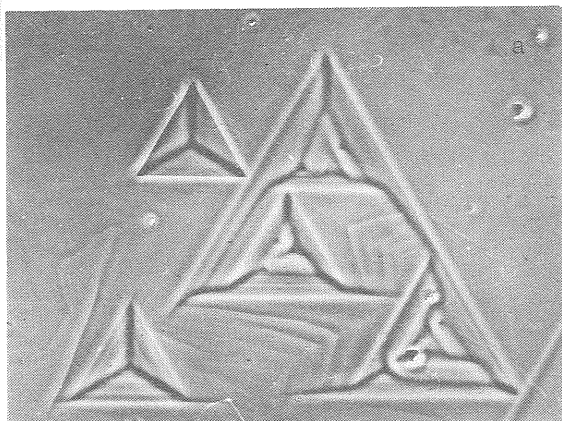
にカットされており、ガードルやファセットのエッジも見えております。そして、この石の中心をかなり外れたところから転位の束が発達して、外に向かって盛大に伸びているのがわかります。磨かれてきれいなきらめきを発する宝石ダイヤモンドにも、その生い立ちの様子をうかがわせる転位などの格子欠陥は、ちゃんと残っているわけです。これまでお見せしたX線トポグラフ写真からおわかりいただけますように、結晶の中での格子欠陥の分布は、結晶ごとに違っております。つまり、天然に出てくるダイヤモンドの1個1個が、異なった成長履歴を持っていることを示しているわけです。言ってみれば欠陥の分布は、人間で言えば指紋に当たるように、その結晶個体の同定に使えるものかも知れません。こうした記録をとっておけば、あるいは、盗難にあったとき見つけ出す手がかりになるかもしれません。

写真7のダイヤモンドは、成長の初期に六面体の面と八面体の面が組合わさっていたのが、のちには八面体の面によるスムーズな成長をしたことは前にもお話いたしました。写真7で、結晶の角の曲面をおびている部分にご注目ください。ここでは、内部にみられる直線状のスムーズな八面体に平行な成長縞が外側の曲面で切られているのがみえます。これはこの部分が、結晶ができあがったあとに、溶解されたことを示しています。このダイヤモンドは、もともと今より大きかったのですが、最

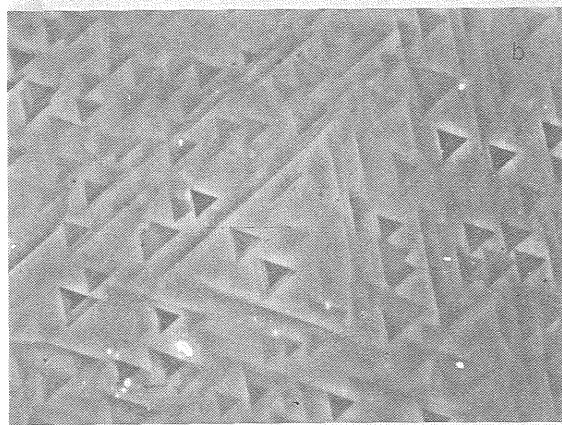
後の段階で溶解作用を受け、今日ある姿になったというわけです。

ところで、天然ダイヤモンドの結晶は、程度の差こそあれ、ほとんど必ず溶解作用を経験して角が丸くなっております。溶解が顕著なものでは、フットボールの球のような形になっていることもあります。これに対して、合成ダイヤモンドは、きちんとした面で囲まれた多面体をなしていますが、天然のダイヤモンドでは、このようなことはまずありません。

丸みをおびたダイヤモンドをよく観察してみますと、八面体面上の成長層も、同じように丸みをおびています。そして八面体面の上に、トライゴンという逆三角形のへこみが多数認められます(写真10)。このトライゴンも、天然のダイヤモンドには必ず存在するといつてさしつかえないもので、溶解作用の産物であります。トライ



20 μ



50 μ

写真10 天然ダイヤモンドの八面体面上に普遍的にみられるトライゴン。上は底の尖ったもの。下は底の平らなもの。

ゴンには、底の尖ったものと平らなもの、2種類があります。尖ったトライゴンは、その底に転位が顔を出しており、転位から始まったエッチピットと考えられます。一方底の平らなトライゴンは、点欠陥から生まれたものです。

さらに溶解が進みますと、元来三角形の八面体 {111} 面が6個に分割され、結晶は六八面体の形になります。また分割された面の上にリング状や首飾り状の模様が重ね焼きされるようになります。

ではなぜ、天然のダイヤモンドは溶解作用を受けるのでしょうか？ ダイヤモンドはもともと地下120kmに達する深部でのみ安定な物質なので、それが地上付近に到達するためには、石墨が安定な領域を通過しなければならないわけです。この過程で、ダイヤモンドが溶解作用を受けるわけです。完全に溶けてしまう、あるいは、石墨に完全に転移してしまわずに、ダイヤモンドの形で地表付近まで達するためには、時速100kmを越すスピードでダイヤモンドをふくむマグマが上がってくる必要があるわけです。キンバレー岩パイプごとに、ダイヤモンドの丸みをおびる程度が違っているのは、上昇速度とマグマの化学組成の違いによるものではないかと考えられております。

こうした研究を積み重ねることにより、天然のダイヤモンドについては、成長の様式についてモデルをつくる事が出来るようになってきました。例えば、宝石質の単結晶ダイヤモンドは、八面体の面上での層成長や渦巻成長により出来たというモデルで、理解できます。一方合成ダイヤモンドでは、また違った特徴が認められます。合成ダイヤモンドは、天然ダイヤモンドとは違って、六面体と八面体の面の組合せで出来ております。そして、八面体の面の上だけでなく、六面体の面の上にも、渦巻状の成長層が認められます。六面体の面の上での成長層は、天然のダイヤモンドにはまったく認められませ

ん。さらに1気圧下の準安定領域で合成されたダイヤモンドには、多重双晶粒子という、天然ではまったくみいだされていない特徴をもった結晶があるのです。できる環境や条件の違いによって、それぞれ特徴的な形を示すわけです。

6) ダイヤモンド中の包有物のかたるもの

理想状態からのずれ、という意味では、天然のダイヤモンドがしばしば包有している他の種類の鉱物も、注目されます。こうした鉱物は、ダイヤモンドの結晶が成長するのと同時に出来ていたわけですから、地球深部のダイヤモンドが出来る環境を知るためには、まさに、貴重な手がかりと言えるわけです。

天然ダイヤモンドの中の、包有鉱物は、大きく2つのグループに分けられます(第2表)。一つは、超苦鉄岩質 (ultra-mafic suite) で、キンバレー岩などに含まれるダイヤモンドにはこのグループの包有鉱物が認められます。このタイプでは、カンラン石がかなり認められ、Crに富んだ透輝石やエンスタタイト、またザクロ石としてCrに富んだパイロップも普遍的なものです。もう一方は、エクロジャイト質 (eclogite suite) で、カンラン石は認められず、ザクロ石はパイロップ・アルマンディン系、輝石はNaに富んだオンファス輝石です。このような包有鉱物のタイプから、ダイヤモンドの生まれ育つ環境には、少なくとも2種類あることがわかります。

こうした数々の包有鉱物は、ダイヤモンドの成長した温度や圧力を、推定するのに、大いに役に立っています。詳しい方法の説明は省きますが、推定される温度は、900-1,200℃、圧力は、4-5万気圧にのぼります。こうした温度・圧力の推定値は、ダイヤモンドの熱力学的な安定関係と、合致しております。天然のダイヤモンドは平衡から大きくずれない条件下で出来たことを、示しているわけです。

おもしろいことに、エクロジャイトから産するダイヤ

第2表 ダイヤモンド中の初成の包有物

超 苦 鉄 質 型	エ ク ロ ジ ャ イ ト 型
オリビン (Fo ₉₁₋₉₅ , Cr ₂ O ₃ 0.1%)	—
輝石族 透輝石 (MgO>15%, CaO>18%, TiO ₂ , Na ₂ O, Al ₂ O ₃ , FeO<4%)	オンファス輝石 (高い Na ₂ O, Al ₂ O ₃ , FeO 含有量)
エンスタタイト (がん火輝石, En ₉₂₋₉₄ , Mg に富む)	—
クロム・パイロップ系ざくろ石	パイロップ-アルマンディン系ざくろ石
Mg-Cr-クロム鉄鉱 (TiO ₂ 10.8%, FeO 12.6%, MgO 12.6%)	Fe-クロム鉄鉱
—	イルメナイト (純粋な FeTiO ₃)
金雲母	黒雲母
—	コース石
磁硫鉄鉱・黄鉄鉱	磁硫鉄鉱・黄鉄鉱
—	らん晶石 (?)

モンドには、多結晶質のものが多く、一方超苦鉄質岩の代表でありますキンバレー岩から産するダイヤモンドには、スムーズな面で囲まれた単結晶質のダイヤモンドが多いという傾向があります。これを、ダイヤモンドの生成の場にあたる地球深部の様子から、考えてみましょう。エクロジャイトは、沈み込み帯で沈み込んだ、海洋地殻の玄武岩に起源を持ちます。沈み込み帯で地球の深部に押し込まれた玄武岩が、そこでの変成作用によって角閃岩からエクロジャイトへと変わって行くわけです。このとき、海洋底に堆積した有機物を含む堆積物も、巻き込まれて地球深部へと達します。したがって、エクロジャイトは生物起源の炭素に富んだ状態、すなわち、炭素の過飽和度の高い状態であったと言えます。こうした状態では、ダイヤモンドの核形成は容易であり、わっと大量のダイヤモンドの核が出来て急速に成長すると考えられます。従って、多結晶質や、あるいは球晶状などの形態をとるダイヤモンドが多くなるわけです。一方、超苦鉄質岩のマグマは、こうした場所からしみだしたところにあり、相対的に少しの量の炭素しか含みえません。いわば、駆動力の小さい状態で成長するわけですので、単結晶質で、スムーズな面をかこまれたダイヤモンドになるわけです。

この考え方は、ダイヤモンドをつくる炭素の中に生命起源の炭素があることをも意味しています。ダイヤモンドがしばしば大量の窒素を不純物として含んでいる事実も、こうした考え方と調和的です。ダイヤモンドの炭素同位体組成についての最近の研究からも、こうした見方がある程度支持されています。ダイヤモンドは長らくマグマ起源の炭素からできていると考えられてきており、炭素同位体測定結果もほかのマントル起源の炭素と同じ

く狭い値しか知られておりませんでした。それが、測定例が増えるにしたがって、生物起源と考えられる軽い炭素同位体組成を持つものがだんだん知られてまいりました。先ほどお見せしたような沈み込み帯からの炭素の供給と言うことも、現実的なことと考えられるわけです。

以上まとめますと、天然のダイヤモンドと合成のダイヤモンド、また、合成ダイヤモンドのうちでも高圧下で合成されたものと、常圧下のものとは、出来たときの環境条件の違いに応じて、形態、表面のマイクロトポグラフなどがまったく異なっていることがわかります。特に天然ダイヤモンド1個1個には、様々な格子欠陥などの形で、地下での生成条件がみごとに反映されているのです。こうしたダイヤモンドの個性を理解することによって、地球深部のわれわれの手の届かないところで起こっている現象が理解できるわけですから、これは科学者達の夢をかき立てるわけでございます。美しい宝石が、御婦人ばかりでなく科学者にとっても、魅力に富み、貴重なものであり、そして、博物館に展示されるような美しい宝石を調べることで、地球についてのどういった謎に迫ることが出来るのか、おわかりいただけたとすれば幸いです。

こうしたお話を、地質標本館の10周年記念にさせていただくことが出来まして、私もうれしく思っております。御静聴、ありがとうございました。

SUNAGAWA Ichiro (1991): Deciphering letters from the depth of the Earth—Gemstones and minerals.

<受付：1991年1月24日>

新刊紹介

山口県の岩石図鑑 山口地学会編 第一学習社 224P.

1991年5月1日発行、定価4,800円。

読んで楽しい本が出版された。全ページカラーからなる山口県の岩石図鑑である。野外写真71点によって山口県を中心に西南日本内帯で普遍的な地質諸現象を解説し、291点にも及ぶ原寸大の標本写真、71点の偏光顕微鏡写真によって、その実体を引き出している。

この本は山口地学会が、その25周年記念事業の一つとして、総力を挙げて企画・編集したものだそうであるが、山口県にこんなすばらしい露頭があったのかと思わせるほど良いカラー写真が集められており、この企画に対する会員の熱意が感じられる。また標本や顕微鏡写真もシャープできれいだ。

教育用としては勿論であるが、座右に置き一般地学の普及活動用に便利な一書となるう。

(石原舜三)