

ダイヤモンドのおいたち

～中世以前の成因論から最近の成因論まで～

⑦

砂川 一郎

宝石用ダイヤモンドの価格をきめる基準の一つに傷の有無や程度がある。傷には内部のひび割れのような傷も含まれるが そのおもなものは異種の包有鉱物である。これらは 黒い点々としてあらわれる場合が多いので 宝石商たちはスポットとかカーボンと呼んでいる。ダイヤモンドというといかにも完全無欠のもののようにきこえるが そのすべてが完全無欠で ほかの異種鉱物を全く含んでいないというわけではない。むしろ異種鉱物を含んでいる結晶の方が多くくらいである。異種鉱物には ダイヤモンドの結晶が成長する過程で結晶にとりこまれた いわば同時生成的なものもあれば 結晶成長が完了したあとの 長い地質学的な時間の間に経験した条件の変化によって 割れ目などに溶液がしみこんで後生的に形成された鉱物もある。いずれの場合にしても ダイヤモンド結晶中にふくまれている異種鉱物の種類を決め その性質を研究しておくことは ダイヤモンドのおいたちを考える上で たいへん重要な手がかりを与えてくれるであろう。

ダイヤモンドの結晶中にダイヤモンド以外の鉱物が入っていることに最初に気がついたのは ジョン・エベリン(John Evelyn)という男のようである。1955年に出版された彼の日誌をみると 彼が1645年のある日ウィーンの貴族 ルギニ(S. Rugini)を訪れて その骨とう品のコレクションを見学した折 コレクションの中にあるダイヤモンドの結晶中に赤い鉱物が入っていることに気がついたと書いている。彼はこの鉱物をルビーであると書いているが もちろんこれは誤りで ダイヤモンド中にはルビー(コランダム Al_2O_3)は含まれていない。鉱物のことは余りよくわかっていない17世紀のこと(アグリコラが有名な *De re metallica* を出版したのは1556年)であるから 赤い鉱物を当時知られていた唯一の赤い宝石であるルビーと鑑定したのも無理からぬことである。エベリンがルビーとした赤い鉱物は 今の知識からみれば多分柘榴石の一種のパイロープだったのであろう。

エベリン以後 ダイヤモンド中の包有異種鉱物はたくさんの人によって研究されてきた。たとえば1840年にはデューマス(Dumas)がブラジル産のダイヤモンドの

比重を測定し 理論値と実験値の違いから ダイヤモンド中にトパズが入っているはずだと議論している。これまた暴論でトパズは入っていない。1840年代から60年代までにはデクロア(Des Cloiseaux)のような有名な鉱物学者も参加し ブラジル産ダイヤモンド中に水晶や気・液二相の包有物があると報告しているが いずれも決定的な証拠があったわけではない。

1860年代に入って南アフリカにダイヤモンドの大鉱床が発見されると ダイヤモンド中の包有鉱物の研究も一層進み また鉱物顕微鏡の使用によってその同定もより確実なものになってきた。それ以後包有物の同定にX線が導入されるようになった1930年代までの間に 次のような鉱物の同定がおこなわれた。これらの同定はいずれも鉱物顕微鏡によったものである。

方解石	Calcite	$CaCO_3$
黄鉄鉱	Pyrite	FeS_2
透輝石	Diopside	$CaMgSi_2O_6$
磁鉄鉱	Magnetite	Fe_3O_4
パイロープ	Pyrope	$Mg_3Al_2Si_3O_{12}$
オリビン	Olivine	$(Mg, Fe)_2SiO_4$
石墨	Graphite	C
水晶	Quartz	SiO_2

この他に不確実ながら存在が報告されたものに

クロム鉄鉱	Chromite	$FeCr_2O_4$
ピコタイト	Picotite	$(Fe, Al, Cr)_2O_4$
チタン鉄鉱	Ilmenite	$FeTiO_3$
輝石	Pyroxene	} 種類不詳
雲母	Mica	

があげられる。

このほかに ダイヤモンドの成因に関する二部にあたる大著をあらわした有名なウィリアムズ(Williams)はその著の中でダイヤモンドの包有物として ダイヤモンドの結晶が成長したときの母液であるマグマの破片が入っていると書いている。これは後で説明するグベリンも同じように報告しており また宝石学の教科書にもしばしばそのように書かれているが 一体マグマの破片とはなんだろうか? その記述を読んでみると マグマが急冷されてできたガラス質の物質をさしているわけでもなさそうである。地学の常識からいえば マグマの破

片などという表現はまことにあいまいなもので 多分同定不能な微細鉱物の集合体のことでもさしているであろう。それならマグマの破片などという不正確な表現はつかうべきではあるまい。私がことさらにこのことをとりあげて書いている理由は 最近出版された宝石中の包有物についての日本語で書かれた本にも この表現が使われ しかも ダイヤモンド中に これが含まれているのは至極当然のことと説明してまいるからである。このような表現はもっと注意すべきであろう。

宝石といえば 宝石中の包有鉱物の種類や形は 宝石鉱物の形成された条件や成長機構で当然違ってくる。同じルビーやサファイヤでも 天然と人工では生成条件や成長機構が違うから その中に含まれる異種鉱物や気泡あるいは液体包有物の種類 形 配列様式などが違っている。同じエメラルドでも 天然と人工で違うであろうし また天然中でも産地によって包有物が違っているはずである。したがって 宝石中の包有物の種類や形 配列状態をしらべて 天然宝石 人工宝石 あるいは天然宝石の産地の相違を鑑別することが可能である。この点に着目して宝石中の包有物を実体顕微鏡や鉱物顕微鏡を使って詳しくしらべたのはスイスの宝石学者グベリン (Gubelin) やエプラー (Eppler) たちである。このうちグベリンはその観察結果をまとめて「宝石鑑別法としての包有物 Inclusions as a Means of Gemstone Identification」をあらわしている。最近 日本でも近山晶が「インクルージョンによる宝石の鑑別」という本を出版し 各種の宝石類中の包有物を記載しているし また宝石顕微鏡と呼ばれる実体顕微鏡が発売されて宝石中の包有物に対する関心が高まっている。宝石顕微鏡

は照明装置に特別の配慮を払った実体顕微鏡で 包有物が普通の顕微鏡よりもよく観察できるようにしたものである。

さて グベリンやエプラー あるいは最近の近山の書の中で記載されているダイヤモンド中

の包有鉱物は次のごとくである。

磁鉄鉱 チタン鉄鉱 赤鉄鉱
黄鉄鉱
石墨 ダイヤモンド
パイロープ (柘榴石) 頑火輝石 クローム透輝石
黒雲母 金雲母 緑泥石
オリビン
ジルコン 燐灰石
水晶
マグマの破片 微細な気泡の集合体

このうち 水晶はブラジル産のダイヤモンド中のみ見出されたもので グベリンや近山はこのことからダイヤモンドの地下深部成因説に対して疑問を表明している。しかし後述するように これは同時生成的な包有物ではなく 後生的な成因のものである。燐灰石やジルコンも ダイヤモンドの成因を考えると疑わしい包有物である。うち燐灰石はエプラーが この包有物の屈折率の平均値1.6585から燐灰石と同定したもので これに近い屈折率1.652をもつオリビンを誤認している可能性が高い。ジルコンは近山晶の書の中にあらわれ 形態からジルコンと同定しており それ以外の同定の根拠をもっていない。ダイヤモンドの生成環境から考えても ジルコンの存在は疑わしいといわざるをえない。

さて これまでの研究はもっぱら鉱物顕微鏡か実体顕微鏡を使っての同定であった。したがって 形や色 あるいは屈折率などが同定のおもな手段であった。ダイヤモンドという高い屈折率をもつ鉱物中に含まれている微細な包有物の同定であるのでどうしても不確実である。したがって以上の同定結果を完璧で疑をさしはさむ余地がないものとして取り扱うわけにはゆかない。より信頼のおけるX線解析法がダイヤモンド中の包有物に応用されるようになったのは 1953年のミッチェルとギアルディニ (Mitchell and Gardini) による研究以後のことである。X線を使っての包有物の同定はその後特にロシアの研究者がシベリアのダイヤモンドについて盛んに行ない またイギリスではロンズデール (Dam K. Lonsdale) やミレッジ (Milledge) あるいは最近ではハリス (J. W. Harris) メイヤー (Meyer) らのロンドン大学ユニバーシティ・カレッジの結晶学者たちが地道な研究を進めている。ハリスは最近これらの研究結果をまとめて報告している。その結果によると X線を使って今まで同定されているダイヤモンド中の包有鉱物は 次のとうりである、

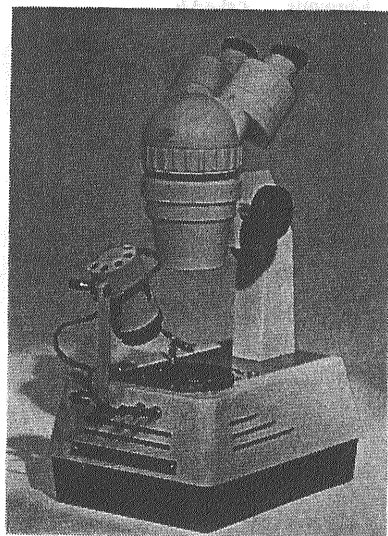


図1 国産の宝石顕微鏡

◎ダイヤモンド	Diamond	C
△石 墨	Graphite	C
△磁硫鉄鉱	Pyrrhotite	Fe _n S _{n+1}
△ペントランド鉄	Pentlandite	(Fe, Ni) ₉ S ₈
△黄鉄鉱	Pyrite	FeS ₂
◎コース石	Coesite	SiO ₂
△水 晶	Quartz	SiO ₂
◎ル チ ル	Rutile	TiO ₂
◎板チタン石	Brookite	TiO ₂
◎磁 鉄 鉱	Magnetite	Fe ₃ O ₄
◎チタン鉄鉱	Ilmenite	FeTiO ₃
△赤 鉄 鉱	Hematite	Fe ₂ O ₃
◎クロム・スピネル	Chrome Spinel	MgCr ₂ O ₄
◎透 輝 石	Diopside	CaMgSi ₂ O ₆
◎頑火輝石	Enstatite	MgSiO ₃
◎オリビン	Olivine	(Mg, Fe) ₂ SiO ₄
◎パイロープ柘榴石	Pyrope garnet	Mg ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂
△白 雲 母	Muscovite	K ₂ Al ₄ (Si ₆ Al ₂ O ₂₀)(OH, F) ₄
△カオリン	Kaolinite	Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈
△方 解 石	Calcite	CaCO ₃
△セ ラ 石	Sellaite	MgF ₂
△ゼノタイム	Xenotime	YPO ₄
△針 鉄 鉱	Goethite	FeOOH

である柘榴石・蛇紋岩 輝岩 エクログナイトなどの主要構成鉱物 たとえばオリビン パイロープ柘榴石 頑火輝石 透輝石などはこのカテゴリーに入る

- 2 ダイヤモンドの安定領域に近い安定領域をもつ高温 高圧 鉱物 たとえばコース石
- 3 自形結晶を示す包有鉱物 たとえば柘榴石 オリビンなど
- 4 ダイヤモンドを包有する鉱物 ウィリヤムズの報告によると パイロープ柘榴石や透輝石の中に包有物としてダイヤモンドが含まれていることがある この事実をもとにして ダイヤモンドがマンツルのエクログナイト岩のマグマ中で形成されたはずだという最初の地下深部生成説が ステルズナーによって提出されたのである
- 5 ダイヤモンドの結晶とエビタキシャルな関係で共生している鉱物 たとえばオリビン

これに対してダイヤモンドの結晶中に入っている 次のような性質をもつ鉱物は 後生的な鉱物のカテゴリーに入れて考える方がよい。

つまり これらはダイヤモンドの形成と同時に成長したものではなく その後ダイヤモンドが地表まで運ばれる過程での変質作用 あるいはその後の地質学的な時間におたる変質ないし風化作用によってできた鉱物である。それは周囲から供給された溶液より直接沈澱した場合もあろうし またそれによって既存の同時生成的な鉱物が別種の鉱物に変質した場合もあろう。

- 1 同時生成的な包有鉱物のまわりに発達した割れ目に沿ってできている粉末状の鉱物 この割れ目は表面に到達していなくてもよい 石墨あるいは磁硫鉄鉱 ペントランド鉄などの硫化鉱物はこの種の産状を示している
- 2 ダイヤモンドの結晶の表面にまで達している割れ目や劈開面に沿って産出する鉱物 多くはキンバレー岩の2次鉱物で方解石 赤鉄鉱 カオリン ゼノタイム 白雲母 セラ石などはこのカテゴリーに入る
- 3 ダイヤモンドの結晶の外側近くのみ産出し 多くは粉末状か他形の鉱物 時に自形を示すものもあるが それはその鉱物自身の結晶形とは違い 他の鉱物の仮像であることが解る 針鉄鉱や水晶 あるいは白雲母などはこのカテゴリーに入る。

一般的にいえば これらの後生鉱物は熱力学的にダイヤモンドの安定領域とは全く異なった安定領域をもっており (たとえばカオリン) キンバレー岩の2次変質作用で形成された鉱物と同じもので (たとえば赤鉄鉱や方解石) かつダイヤモンドと一定な結晶学的な方位関係をもって連晶していないことが X線写真上から判定できる鉱物である。

この表とこれ以前の顕微鏡だけを使ってきめられた包有物の表を比べてみると いくつかの鉱物名が消え 10種近い新しい鉱物名がつけ加わっていることがわかる。ウィリヤムズやグベリンなどの書物の中に記載されているマグマの破片というようなあやしげな表現は消え去っていることはいうまでもない。 磷灰石やジルコンも消えている。 新しくつけ加わったものに磁硫鉄鉱 ペントランド鉄の離溶共生 SiO₂ の高圧型であるコース石 ルチル 板チタン石などのチタンの酸化鉱物 ゼノタイムや セラ石など およびカオリン 方解石 針鉄鉱などの二次鉱物が新しく顔をだしている。 これらはX線をつかっておこなわれた同定であるから 形や色や屈折率の違いだけで同定された鉱物種よりも 同定がより正確で信頼性の高いものであることはいうまでもない。 以下には これらの信頼性の高いデータだけを基礎において話を進めることにしよう。

上の表で◎印と△印で区別したのは ダイヤモンドの成長と同時に形成された鉱物とはるか後から形成された鉱物とを区別するためである。 ◎印は同時生成的な一次鉱物であり △印は後生的な鉱物である。 文句なしに 同時生成的な鉱物のカテゴリーに入れることができる鉱物種には たとえば 次のような特徴や産状をもつものをあげることができよう。

- 1 ダイヤモンドの母岩であるキンバレー岩 および類縁岩石

さて まず同時生成的な鉱物からその性質を簡単に列記してみよう。 まずダイヤモンド中のダイヤモンドの結晶。これは顕微鏡下では仲々見出しにくい。X線を使って検討すると 方位の違いによって容易に見出すことができ 比較的一般的に産出する。この連載の4 (地質ニュース No. 168) の図14で示したエッチングによる異帯構造にも この種の包有ダイヤモンドの結晶がみとめられる。包有ダイヤモンドの色が母体のダイヤモンドの色と違っている場合には 顕微鏡下でも容易に識別ができるので 包有ダイヤモンドの存在は1853年の昔から知られていた。ダイヤモンド中に包有されているダイヤモンドの結晶は大部分八面体の結晶で {111} 面の上にはトライゴンがみられるそうである。もし母体のダイヤモンドをこわして包有されている結晶だけをきれいにとりだし その結晶面を詳しく調べることができればダイヤモンドの成長機構やトライゴンの成因について貴重な情報がえられることであろう。なぜなら 天然のダイヤモンドの結晶は ほとんどすべてがかなりの程度の溶解作用を経験しており 成長したときそのままのフレッシュな結晶面をしていないが 包有されている結晶には フレッシュな結晶面を期待できるかも知れないからである。

SiO₂ の高压型であるコース石をダイヤモンド中に最初に見出したのは ロンドン大学 University College のミレッジである。この発見は ダイヤモンドが高压下で形成されたことを示す有力な証拠を提供してくれた。彼女はもともとイスラエルの出身で ロンドン大学に留学して以後 クウエカー教徒としても女性結晶学者としても世界的に有名で かつて日本にもきたことのあるロンスデール教授の下で 長年にわたってダイヤモンドの結晶学一筋に研究してきた女性である。G. E. の人工ダイヤモンドが合成されて後 始めて人工ダイヤモン

ドのX線回折点には天然ダイヤモンドにはみられない回折点があられ、それが用いた金属触媒の薄膜に由来することを明らかにしたのも彼女である。ミレッジは最初人工ダイヤモンド中にコース石を見出し 天然にもそれがあるはずだと予想した実証した。この予想に従って行なったハリスらの研究によっても コース石を包有するダイヤモンド2例が明らかにされている。コース石は無色で 1例では自形結晶を示している。

オリビンのように 超塩基性岩の主要構成鉱物が ダイヤモンド中に含まれていることはかなり古くから知られていた。ただし 鏡下で薄緑色をした包有物を一律にオリビンと判定していたきらいがある。X線で調べた結果によると 薄緑色をした包有物は頑火輝石か透輝石で オリビンは無色透明の場合の方が多いそうである。オリビンの自形結晶は多くの場合 [101] 方向に伸びた棒状の外形をもっており 普通の産状のオリビンの結晶形とはたいへん違った形をとっている。これはオリビンの(010)面が ダイヤモンドの結晶の(111)面と平行にかつオリビンの[101]方向が ダイヤモンドの[101]方向に平行になるような結晶学的な関係で共生しているからで 一種のエピタキシャル成長の関係にある。オリビンの [101] 方向の構造周期は7.66Åでダイヤモンドの[101]の構造周期の5.03Åの³/₂とたいへんよく一致している。両者の値の喰い違いはわずかに1.5%である。そのためオリビンとダイヤモンドは結晶学的に一定の方位で共生することができるわけである。ところで オリビンの (010)に平行な P. B. C. ベクトル (本連載の2参照) は[001] [101] [100]で このうち[101]方向の構造周期がダイヤモンドの構造周期と喰い違いが最も少ない。その結果 ダイヤモンドにとりこまれて成長したときオリビンは[101]方向には自由にのび [001] [100] 方向では伸びがおくれ 結局 [101] 方向に伸びた結晶になるわけである。通常の成長条件下では3方向とも自由に成長するので ダイヤモンド中にとりこまれたときは異なった外形ができるわけである。

パイロープ柘榴石の色は 深紅色からオレンジ色まで

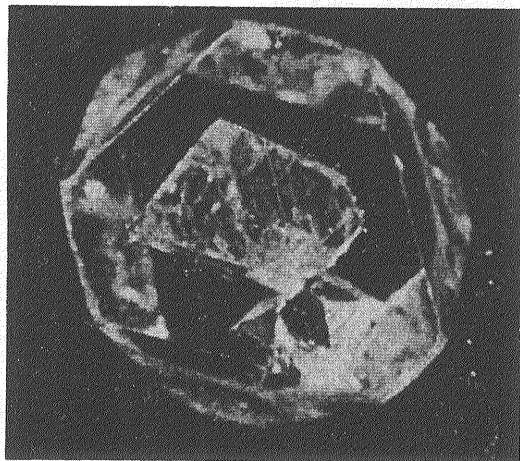


図2 ダイヤモンド中のダイヤモンド 約×6.5 (Harris より)



図3 コース石の自形結晶 約×250 (Harris より)

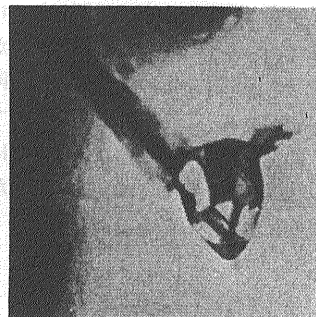


図4 オリビンの自形結晶 約×150 (Harris より)

ある。ダイヤモンドとパイロープ柘榴石の関係は切っても切れないくらい深い。パイロープ柘榴石はキンバレー岩の主要鉱物の一つであり、そのためダイヤモンド漂砂鉱床中あるいはその近くにはパイロープもいっしょに堆積している。そこでパイロープのように目立つ色をした鉱物をダイヤモンド漂砂鉱床を探索するための指示鉱物として使うことができる。実際ソ連地質省の地質技師たちがシベリアのヤクーツク地方でダイヤモンド鉱床の探査を行なったとき、唯一の手がかりにした鉱物はパイロープ柘榴石であり、また最初の鉱体の発見もパイロープ柘榴石の堆積が端緒になっている。さらにエクログイト中の柘榴石の中に包有物としてダイヤモンドがふくまれているという報告がいくつかあるから、両者は成因的にも密接に関係しているといえるわけである。パイロープと似たような赤から褐色の色を示す包有物にルチルがある。同じ化学組成の板チタン石も報告されている。

薄緑からエメラルド・グリーンをしているためしばしばオリビンと誤認されてきた包有物に透輝石がある。このような美しい色をした包有物は透輝石だけで、オリビンは無色透明からまれに淡緑色透明、頑火輝石も淡青色で、透輝石ほど美しい緑色をしていない。自形結晶で産する場合には(111)面と(001)面で構成された結晶を示している。

黒色の同時生成的鉱物には磁鉄鉱、チタン鉄鉱およびクロム・スピネルがある。磁鉄鉱は八面体結晶として産するのはきわめてまれで、大部分は不規則塊状である。磁性をもつ塊状ダイヤモンドとして知られているスチューワールタイト(Stewartite)は3~19.5%もの不純物を含んでいる微結晶の集合体で、磁性の原因は多分不純物中の磁鉄鉱に由来するものであろう。

チタン鉄鉱はエプラーによって報告されているが、ハ

リスによるX線の研究ではダイヤモンド表面上の孔の中で見出されただけで、ダイヤモンド中に完全に包有されたものとしては見出されていない。またシベリアのダイヤモンドではまだ報告されていない。したがって後生的である可能性が強い。クロム・スピネルは普通濃赤色から黒色不透明で粒ないし棒状であるため、石墨や磁鉄鉱と誤認しやすい。

スピネルが見出されたのはシベリアウラルシエラ・レオンおよびガーナ産のダイヤモンドで、南アフリカのダイヤモンドにはまだ報告されていない。

さて以上は100倍程度までの顕微鏡で観察可能な0.05mm~0.4mm程度の比較的大形の同時生成的包有物であるが、ダイヤモンドの中にはこれらよりもはるかに微細で数~10ミクロン程度の包有物でしかも同時生成的なものが存在する。その1つは最初ソ連の研究者によってシベリアのダイヤモンド中に見出され、ついでハリスによって南アフリカの結晶にも見出された粉末状のオリビンである。その大きさは10ミクロン程度で、黒い雲のような形に密集して産出している。高倍率の顕微鏡下で観察すると、雲のうちのあるものはダイヤモンドの劈開面の方向に平行に配列しており、X線で調べてみると細かい結晶の一つ一つがダイヤモンドと定方位の関係で連晶していることがわかる。大形のオリビンの結晶とダイヤモンドの結晶との間の関係と全く同じであるので、粉末状のオリビンもまた同時生成的であったと考えることができる。

ダイヤモンド中に気泡(多くの人はCO₂と考えている)あるいは気・液2相の包有物が存在するという報告は、今まで何人もの人によってなされている。もし実際に気・液2相の包有物が存在するとすれば、これはダイヤモンドの成因にとって相当に重要な事実である。まず、ダイヤモンドが地下数百kmの深部で成長したと

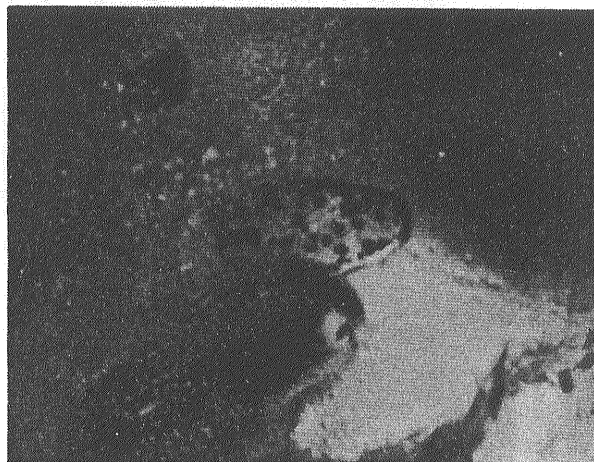


図5 オリビンの自形結晶 約×130 黒い点々はあとから表面にできた別種の鉱物(Harrisより)

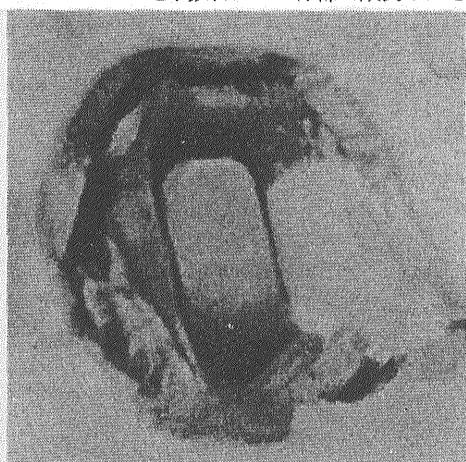


図6 パイロープ柘榴石の自形結晶 約×70 (Harrisより)

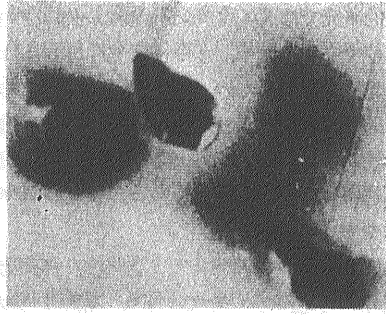


図7
磁鉄鉱 約×60
(Harrisより)

すると水溶液相からの晶出は全く考えることができないし、気・液2相の包有物が存在することは少なくとも水溶液相があったことを示しているからである。また気・液2相の包有物が存在すれば、加熱によって気相が消失し液相一相になるときの温度を調べることによって生成温度の推定が可能だからである。しかしグベリンとカスペンサー(L. J. Spencer イギリスの有名な鉱物学者で長年 Mineralogical Magazine の編集長であった)をふくむ数人の研究者の報告にもかかわらず、気・液2相あるいは気相のみの包有物の存在は依然として不確実である。ハリスが気相あるいは気・液2相包有物として誤認されそうな白色の雲状の微細包有物について行なったX線的な研究では、これらが微弱ながらX線回折を与えることが確認されている。したがって結晶質であることには間違いない。これは顕微鏡下では白色の四角から丸味をもったミクロン以下の大きさの物体である。ただし如何なる鉱物かはまだ決定されていない。同様の包有物がシベリアのダイヤモンドにも見出されており、ソ連の研究者によるとこれらは最初気相包有物で、ダイヤモンド形成後に気相から析出したものであるとされている。ラングもこの種の物質のX線トポグラフィ的研究から、これらがダイヤモンド形成後に沈澱したものであると推論している。しかし、いずれにしても気相ないし気・液2相の包有物の存在については、まだま

だ研究しなければならないことが多いようである。

さて、前にも少しふれたように(連載の6「地質ニュース No. 176」)ダイヤモンドの結晶を偏光光線下で観察すると、多くの包有物のまわりに歪み複屈折が観察される。この存在に最初に着目したのはサットン(Sutton)で1918年のことである。この種の歪み複屈折は、包有物が原因になってダイヤモンドの結晶中に歪みを起こしているためにあらわれるものである。するとこの種の歪み複屈折の解析がダイヤモンドの成因を考える上で役に立ってくれるかも知れない。なぜなら、ダイヤモンドの熱膨脹係数は他の鉱物のそれに比べてはるかに小さいから、もし包有物が単純な高温下でダイヤモンド中に包有されたとすれば、包有物は冷却にともなってダイヤモンドよりも余分に収縮し、ダイヤモンドと包有物の間にすき間をつくるであろう。しかし、高温下と共に高圧下でダイヤモンド中に包有された場合には常圧下での成長に比べて圧縮された形であるから、ダイヤモンドが冷却したのちにもこの大きさは余り変わらず、ダイヤモンドによって完全にとりかこまれていることであろう。その場合にはまわりのダイヤモンドに対して歪みを発生させる可能性がある。したがって包有物のまわりの歪み複屈折の状態を調べておくことは必ずしも無意味ではない。一方、高温高圧下での鉱物の熱膨脹係数は常温常圧下の値とかなり違おうから、ダイヤモンド中のおもな包有鉱物の高温高圧下での熱膨脹係数を測定し、ダイヤモンドのそれと比較してみれば、天然ダイヤモンドが成長したときの温度・圧力条件を推定することが可能となるかも知れない。この方向の研究は、現在イギリスの国立物理学研究所で進行中とのことである。一方、偏光顕微鏡下での包有物の周囲の歪み複屈折の観察結果によると、ダイヤモンド中のダイヤモンド包有物のまわりでは歪み複屈折を見出すことはできないが、それ以



図8 頭火輝石包有物 約×60 (Harrisより)



図9 クロム・スピネル 約×80 (Harrisより)

外の同時生成的な包有物のまわりには程度の差はあれほとんど例外なくそれを認めることができる。そのあられ方は様々で、包有物のまわりにデスク状にあらわれるものもあれば放射状にあらわれているものもある。

後生的な包有物としてまとめたもののうち最も問題になるのは水晶であろう。水晶は SiO_2 の低圧型であるからもしそれが同時生成的であればダイヤモンドも低圧下の地表近くで形成されたと考えねばならない。また SiO_2 の高圧型であるコース石がダイヤモンドの同時生成的な包有物として産出するという事実と著しく矛盾する。またダイヤモンドの母岩であるキンバレー岩やその類縁岩石は、いずれも超塩基性岩で SiO_2 に乏しく斑晶としても石基の中にも水晶を含まない。このこともまた水晶がダイヤモンドと同時生成的な包有物ではなさそうだとすることを示している。事実、包有物としての水晶の産状もまたこの推測を裏づけているのである。

ダイヤモンド中の包有物として水晶を最初に報告したのはペッツォルド (Petzold) で 1842年のことで、ブラジル産ダイヤモンドについてである。それ以後コロニー (Colony 1923) コーレンズ (Correns 1931) グベリン (Gubelin 1948) などによる報告があり、いずれもブラジル産の結晶中に見出されている。またオルロフ (Orlov 1959) はウラル産のダイヤモンドに水晶の包有物が存在することを報告し、X線的にも確認している。さらに最近のハリスのX線的研究によるとガーナ産のダイヤモンド中にも水晶の包有物が確認されているようである。ここで注意しておく必要があるのは、これらの水晶の包有物を確認することのできたダイヤモンドの結晶はすべて漂砂鉱床中からの、しかもプレ・カンブリア紀のたいへん古い (少なくとも6億年より前) 地層中の

漂砂鉱床からの産出であるという事実である。南アフリカやシベリアのようなキンバレー岩中のダイヤモンドには水晶は包有物としては見出されていないのである。

第2に注意がひかれる点は、包有物としての水晶は常にダイヤモンドの結晶の周縁部に限って産出し、結晶での中心部ではみられないこと、またガーナの結晶はしばしば針鉄鉱が共生しているという事実である。これらの事実を考えると、ダイヤモンド中の水晶の包有物はダイヤモンドと同時生成的な鉱物ではなく、ダイヤモンドの結晶ができて後の地質学的に長い時間の間にうけた火成作用などによって既存の包有物に変質したためかあるいは外から加えられた溶液から晶出したかのいずれかであると結論せざるをえない。宝石中の包有物についてのある人の著作の中には、ブラジル産のダイヤモンド中に水晶が含まれていることから、ダイヤモンドの成因が従来考えられていたものとは違う可能性があるという推論が書かれているが、この推論は根本的な誤りであると云わねばなるまい。

水晶と同じような産状を示す包有物に針鉄鉱と白雲母がある。針鉄鉱は褐色不透明、白雲母は暗褐色不透明で、いずれもしばしば結晶の外形や條線模様などを示している。白雲母の形はしかし通常の白雲母のように薄板状ではなく粒状で、むしろパーミュキュライトの外形に近い。水晶と針鉄鉱は結晶の周縁部にみられ、白雲母はいちじるしく破碎されたダイヤモンド中にみいだされたので、結晶中のどの部分かは明らかでないようである (Harris 1968)。これらの鉱物が後生的な包有物であることには余り疑問はないであろう。針鉄鉱や白雲母にみられる條線模様はこれらの鉱物自身の成長による條線模様というよりは、他の同時生成的な包有物の結晶 (たとえば磁鉄鉱) のもっていた條線模様が残ったもので、針鉄鉱や白雲母はそれらの仮像であると考えられそ

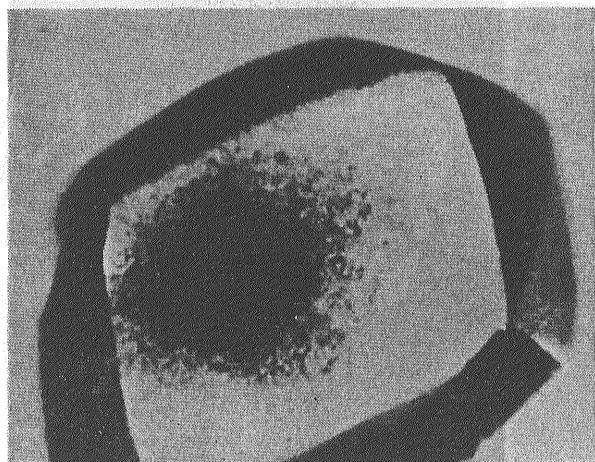


図10 微粒のオリビン包有物の集合 約×45 (Harris より)

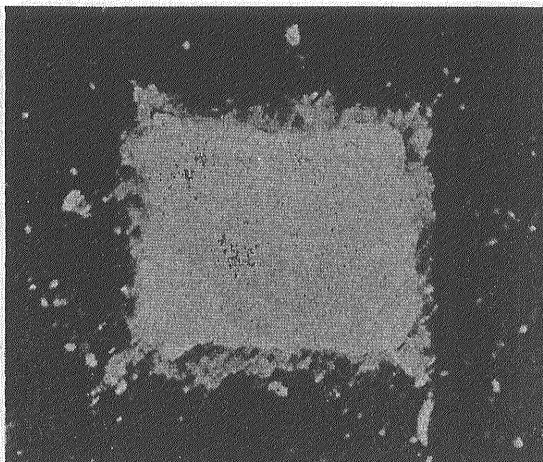


図11 白色の微粒包有物 約×750 (Harris より)

うである。

水晶に次いで問題になる包有物は石墨である。天然に産する炭素の結晶にはダイヤモンドと石墨の二種類しかなく、ベルマン—シモンの状態図でも明らかなように石墨はダイヤモンドに比べて低圧下で安定な結晶である。人工ダイヤモンドの合成で普通石墨を出発材料として使っていることから単純に類推して、石墨の包有物はダイヤモンドと同時生成的あるいはダイヤモンドよりも先に生成してダイヤモンドの結晶の核の役割を果たしたのではなからうかと考える人もいるかも知れない。しかし、少し注意して考えればこの類推が誤りであることはすぐわかる。また石墨のダイヤモンド中での産状も石墨は後生的であることを示している。すなわち石墨はダイヤモンド中の割れ目、他の包有鉱物の周辺にできてゐる割れ目、あるいは劈開面に沿って析出しており、結晶の中心には位置していない。ダイヤモンドの核になったような証拠はまったくみとめられないのである。石墨にはいづれ述べるように二層構造のものと三層構造の多形とが存在することが最近知られており、隕石中の石墨には三層構造のものが多くとされている。天然に産出する石墨は大部分二層構造のものである。ダイヤモンド中の石墨包有物もまた普通の天然の石墨と同様、二層構造の結晶が中心であることがX線的に明らかにされている。

さて、それならダイヤモンド中の石墨は後生的にどのように形成されたのであろうか。ベルマン—シモンの状態図からも理解できるように、ダイヤモンドは低圧下では本来安定な鉱物ではない。大気圧下におかれればいつかは石墨に転移するはずである。ただしこの転移には無限大に長い時間がかかるので、通常の温度条件下では、現実にダイヤモンドの石墨化をみることはできな

いだけである。そのかわり温度を高めて反応速度を早く進めさせれば、実験室的にダイヤモンドの石墨化を起こすことが可能である。石墨化の進行速度やその起こる温度は条件によつて違ふ。

酸化条件下では石墨化の進行速度も早く温度も低くてよいが、還元条件下ではより高温が必要である。真空中で加熱すると1800°C以下では石墨化の速度はきわめておそいが、酸素気流中で加熱すると1000°C以下でも石墨化が起こる。

もう10年も昔、私がトランスキーの教室で研究していた頃、パンデア (D. C. Pandeya) というインドから来ている留学生がいた。彼は勉強するよりも遊びの方が好きな男であつたが、ある日トランスキーが持っていたきれいな八面体の結晶を使ってエッチングの実験を開始した。ダイヤモンドのエッチングは硝酸カリウムの粉末と結晶とを白金のつぼの中に入れ電気炉中で不活性ガスを通しながら加熱することによつておこなうのが普通である。何を感じがいたか彼は不活性ガスを通すのを忘れ、しかも女の子のおしやべりに夢中になつて所定時間をはるかにオーバーした加熱を行なつてしまった。

後からの彼の弁明によると温度は間違ひなしに800°Cでコントロールしていたそうであるが、これとて何処まで信頼できるかわからない。ともかく時間のオーバーに気がついてあわてて結晶を取り出した時には無色透明であつた美しいダイヤモンドの八面体の結晶はあわれ真黒な固体に変わつていたのである。もつとも石墨化が進んで黒くなつたのは結晶の表面層だけであつたが、それにしても条件によっては如何に容易に石墨化が進行するかの良いサンプルであるといえよう。これらのことから考えてみると、ダイヤモンド中の石墨包有物はおそらく、ダイヤモンドが形成後に低圧下で高温状態におかれて、割れ目などから石墨化が出發してつくられた、後生的なものだと結論できさうである。ダイヤモンド中

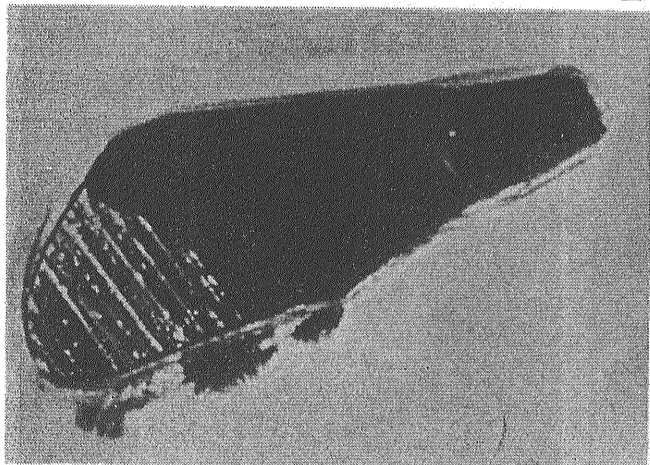


図12 針鉄鉱 ただし針鉄鉱自身は粉末で、ここにみられる結晶の外形や条線模様は他の鉱物のもので、針鉄鉱はその仮像 約×180 (Harris より)

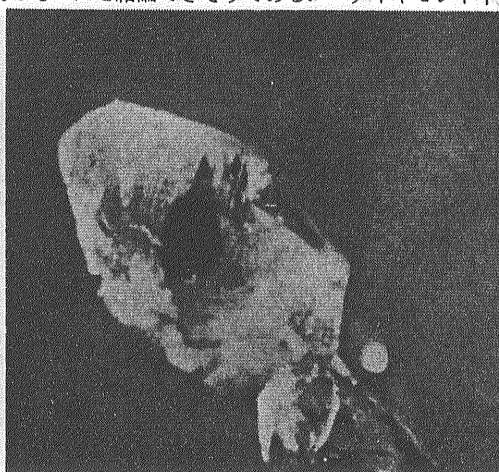


図13 石墨 約×30 (Harris より)

の包有物の研究をしたソ連のオルロフは 石墨化が起こった温度は おそらく900~1000°Cよりも高かったであろうと推定している。

磁硫鉄鉱やペントランド鉄などの鉄—ニッケル系の硫化鉱物の離溶共生もキンバレー岩のような超塩基性岩と関連して同時生成的な印象をうける。しかし これらの鉱物の産状をみると 完全に同時生成的だともあるいは完全に後生的であるともいえないようである。ハリスの研究によると これらの硫化鉱物は常にオリビン包有物のまわりにできてはいる割れ目に沿って産出しあるいはオリビンを被覆するような形で産出している。これらの割れ目は結晶の外にまでは達していない。またまわりに硫化物をともなうオリビンとそれをともなわないオリビンとの結晶学的な性質を比べてみても2つの間にほとんど差はない。そこでハリスはオリビンが形成された後からそれと硫黄との間に一種の化学反応が起こってこれらの硫化鉱物が形成されたので この意味で後生的な鉱物であるとした。

一方 これらの硫化鉱物の包有物を最初にダイヤモンド中に発見したシャープ (Sharp 1960) は 硫化鉱物が高温高压相からもたらされたもので この意味で同時生成的であるが その後の温度 圧力の変化によってもともと一相であった高温高压相が離溶して磁硫鉄鉱とペントランド鉄の共生を示すようになったのだと考えている。もつとも彼はこれらの鉱物が常にオリビンと関係して産出するという事実が気がついていなかったようである。

後生的な包有物には 以上のような種類のほかに明らかにキンバレー岩の変質作用と直接関係している鉱物もある。方解石 赤鉄鉱 カオリン セラ石 ゼノタイムなどはこの類である。これらの鉱物はいずれも表面にまで達しているダイヤモンド中の割れ目に沿って産出している。この種の産状を示すものとしては 上記の他に魚眼石 (Apophyllite $KF Ca_4 Si_8 O_{20}$) 曹灰針石 (Pectolite $Na Ca_2 Si_3 O_4(OH)$) ——以上 Sutton 1921——や針鉄鉱 (Orlov 1959) などが報告されている。蛇紋石も同様のカテゴリーに入る。

これらの鉱物はいずれもキンバレー岩の石基中やキンバレー岩中に細脈状あるいは鉱染状に発達している変質鉱物である。

実際キンバレー岩の特徴はフレッシュなオリビン 頑火輝石 透輝石などがほとんど産せず 大部分が蛇紋石や方解石に変質してしまっている点である。したがってこのカテゴリーに入れられた包有鉱物が キンバレー

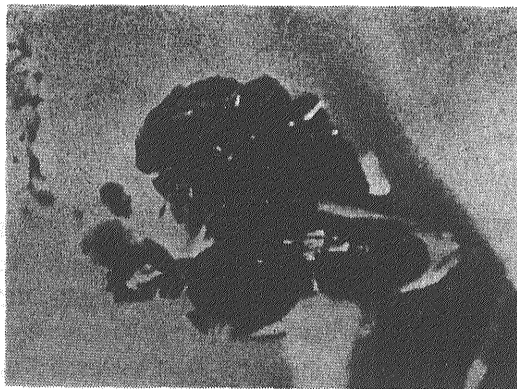


図14 バラの花状の硫化鉱物 約×30(Harrisより)

岩の変質作用の過程で生成され ダイヤモンドの割れ目に侵入してできた後生的な包有物であることには疑問の余地がなさそうである。

以上かなり詳しくダイヤモンド中の包有鉱物の説明をおこなってきたが 少なくとも今までの情報からみる限り ダイヤモンドが高温高压下で形成されたことを否定する包有鉱物はみだされていないということができそうである。

そのもつともよい例が石英の高压型であるコース石の産出である。この一事だけでもダイヤモンドは地下深くの高温高压の条件下で形成された鉱物で 圧力の低い条件下でできたものではないと結論することができよう。コース石という鉱物は ダイヤモンドの成因を考える上でしばしば重要な役割を果たした鉱物である。

いずれ後ほど述べる予定であるが 隕石中のダイヤモンドが もともとの天体の中にあった結晶ではなく 隕石が地球に衝突したときに発生した瞬間的な高温高压条件下で 形成されたという説をサポートする有力な証拠になったのもまたコース石であった。すなわち アリゾナにある大隕石孔の周囲の砂岩中をしらべて その中にコース石が発見されたことによって 隕石の衝突がダイヤモンドの成長に必要な十分な高温高压条件をつくりだしていたことが証明され 衝突説がサポートされたのである。一方 コース石の存在は温度・圧力条件の他に別種の問題を提供している。それは地下深部では S_2O_2 がフリーの形で存在していないという今までの常識に対して少し矛盾しているからである。この問題は今後解決をゆだねられている問題である。(つづく)

(筆者は鉱石課長)

(文中の写真はすべて Harris, Industrial Diamond Review 1968 より引用した)