

# 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～

③

砂川 一郎

ダイヤモンドの結晶形態で 前回のべた事がらのほかに特別に注意がひかれる特徴は 湾曲した結晶面や丸味をもつ結晶が多いことである。天然ダイヤモンドの結晶は 産地・産状の相違にかかわらず そのほとんどすべてが稜や隅のところで 多かれ少なかれ丸味をおびており 結晶面自身も湾曲している場合が多い。ことに {110} 面はほとんど常に湾曲した結晶面で 普通主軸と交る方向にむかって2つの面 (すなわち {hk0} 面) に分割されているとともに {111} 面の方向にも湾曲している。この関係を概念的に示したのが図2である。このため 結晶学的に単一な {110} 面だけでできている {110} 面は 天然のダイヤモンドにはほとんどみだされない。ことに大粒の結晶では ほとんどみられないといっても過言ではない。そのうえ {110} を主体とした12面体型の結晶は湾曲度がとくに著しく かつほとんどの結晶が一方向に著しく伸びた偏倚した形をとっている。これは {111} 面を主とした8面体型の結晶が普通丸味をもちながらも全体として粒状の外形をとっているのは きわめて対蹠的である。

しかし大粒の結晶の {110} 面がひどく湾曲しているのに対して径が1 mm以下の微粒の結晶では 図4で1例を示したように湾曲度の著しくない {110} 面があらわれてくることもある。そのような結晶では {110} 面上には直線的な条線が発達しており かつ {110} を主体としていながら 大粒の結晶にみられるような一方向的のびた外形とはらず 8面体型結晶と同様粒状の外形をと

る。大粒の結晶と微粒の結晶との間の この相違が {110} 面の成因を解く鍵となるであろうが この点についてはもう少し後ほど詳述することにしたい。

{111} 面は面自身は平たんで 稜や隅に近づくにつれて湾曲するのが普通で 上からみると図(b)で 模式的に示したような形をとっている。さらにはなほだしい場合には平たんな部分がなくなって1つの頂点に集中する6つの小面で構成されるようになる(図5(c))。1月号の表紙につかったボルネオ産の結晶はそのような結晶であった。この種の結晶は一見8つの {111} 面でできた8面体の結晶のようにみえるが 詳しくしらべてみると48個の面でできた六八面体型の結晶になっている。48個の1つ1つの面も湾曲している。

さて 天然のダイヤモンドの結晶は なぜほとんどすべてが湾曲した面をもったり 丸味をもった結晶なのであろうか? 結晶の湾曲や丸味はどうしてできたのであろうか?

湾曲面はダイヤモンドのほかにも少数の鉱物の結晶で知られている。たとえば苦灰石の馬鞍状の結晶などはその好例である。

また 方鉛鉱や黄鉄鉱の結晶にも稜に丸味がついている結晶がある。苦灰石では微細な結晶が少しづつ方位を異にして集合することによって湾曲面ができたものと

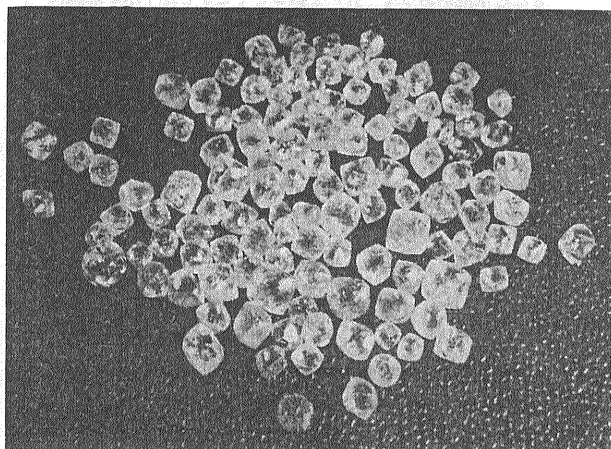


図1 丸味を帯びている8面体型結晶

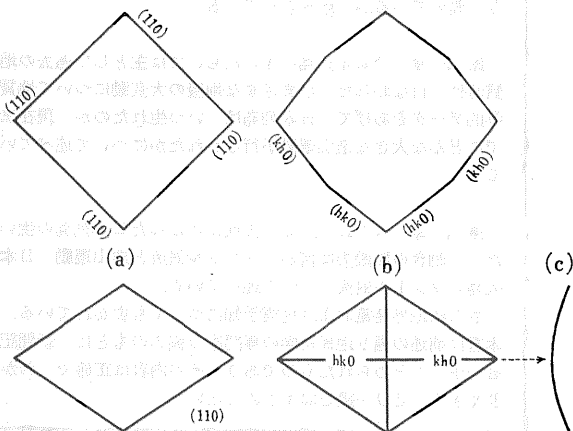


図2 天然ダイヤモンドの{110}面 上図は結晶の断面 下図は結晶面 a) 正規の{110}面 b) 天然のダイヤモンドに普通に見られる湾曲した{110}面 c) はそのプロファイル

考えられ 方鉛鉱では溶解作用が丸味の原因らしい。黄鉄鉱では主成長面上の成長層の稜の積み重なりによって多数の微斜面ができ そのため丸味ができたのである。このように結晶の丸味や湾曲面はまったく正反対の原因でできていることがある。そのため天然ダイヤモンドの湾曲面や丸味の原因についてもむかしから相反する2つの考え方があった。

前者は、成長層の稜の積み重なりによる成長層のステップがつみ重なることによって丸味をもった稜ができたという成長説で(図12) 少数の鉱物学者はこのような考え方にたっている。これに対して 丸味の原因は溶解作用であり、もともと直線的な稜と平らな面をもった結晶が溶解作用をうけることによって、隅や稜に

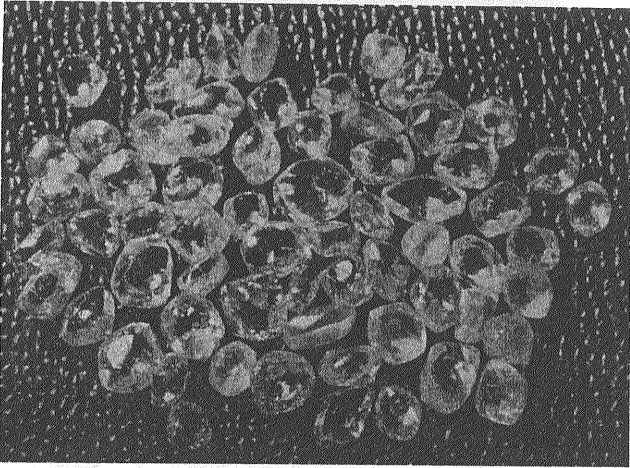


図3 天然ダイヤモンドの12面体型結晶(伸びた結晶)



図4 微粒の12面体型結晶

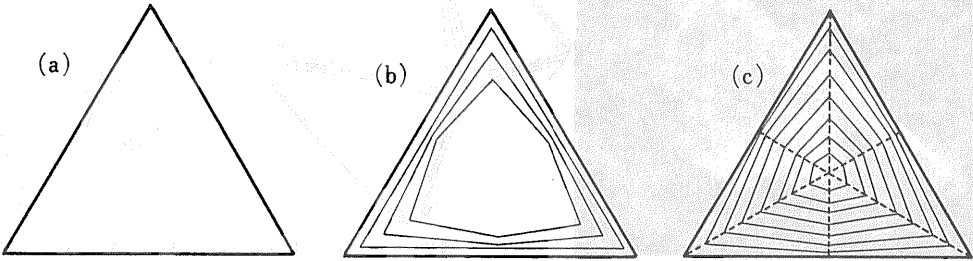


図5 (111)面 a) 溶解をまったく受けていない(111)面 b) 溶解を受けて三角形の成長層の隅が鈍角化した(111)面 c) 著しく溶解の進んだ(111)面



図6 8面体面の干渉写真(水銀の3本の波長を使って撮影したもの)ゆがんだ三角形は溶解によって隅が鈍角化した三角形の成長丘 逆むきの直線稜をもった三角形はトライゴン

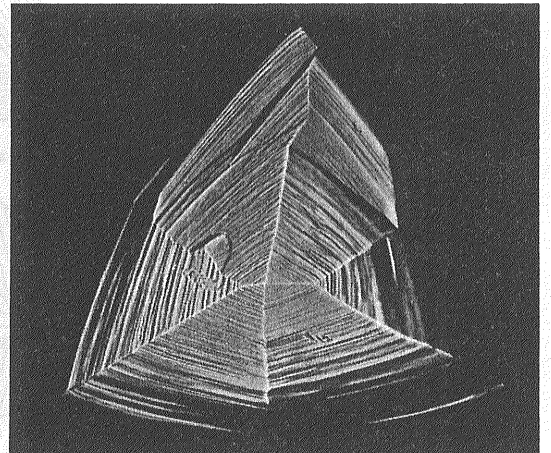


図7 (111)面の溶解が進むと6つの(hhl)面に分化する

丸味がついたのであるという考え方である。 フランクをはじめとする多くの物理学者や鉱物学者がこの考え方をとっている。 どちらかというところでは 溶解説をとる学者の方がはるかに多いようである。

実際ダイヤモンドの結晶には 結晶成長完了後にうけた溶解作用の証拠が数多くみいだせる。 たとえば 先月号で紹介した {110} 面上の網目状 円卓状 首飾り状などの模様や {100} 面上の細かい凹凸などは 結晶が完成されたあとからうけた溶解作用の証拠である。 したがって ダイヤモンドの結晶のほとんどすべてが 結晶成長完了後になんらかの溶解作用を受けていることは間違いないようである。

さて 結晶成長によって平坦な面と直線的な稜やすどい隅をもった結晶ができ これがその後に溶解作用

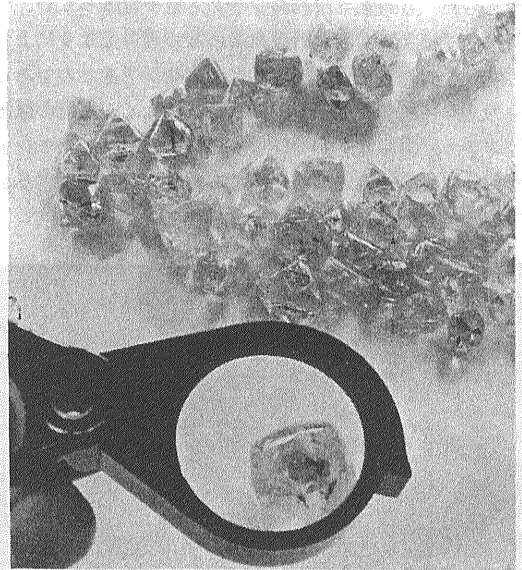


図8 丸味をもった8面体型の結晶

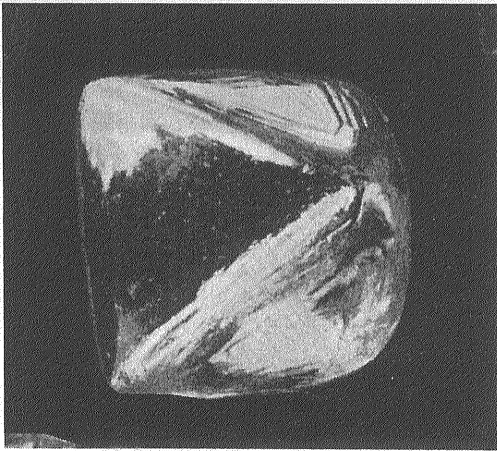


図9 隅や稜で丸味をもっている8面体型の結晶

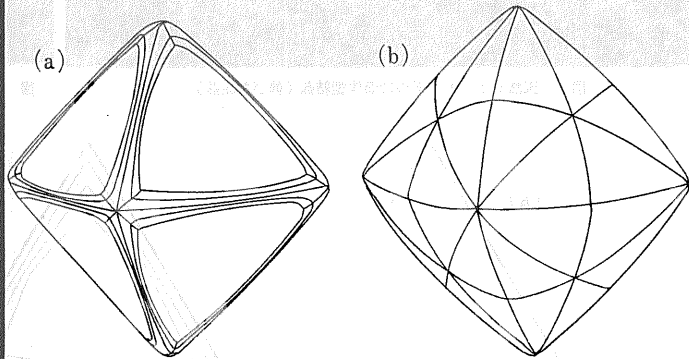


図10 a) 溶解の初期段階 b) 溶解の進んだ結晶

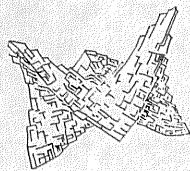


図11 ドロマイトの馬鞍状の結晶

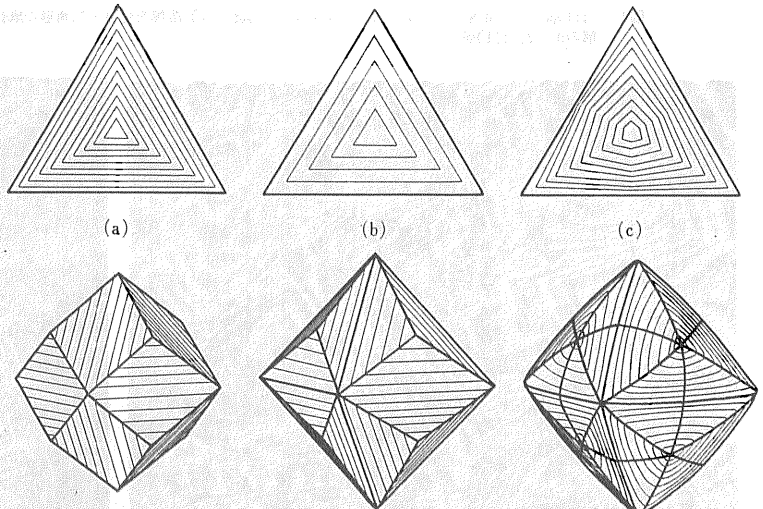


図12 成長説の立場でみたダイヤモンドの結晶 (111)面上の成長層の形や積み重なり方で結晶の形が変わる

をうけるとすると 溶解作用まはず稜や隅のところから出発するであろう。なぜなら 突出部が最も溶解を受けやすいところだからである。その結果まず結晶の稜や隅に丸味がつけられてゆく。この順序は 2 次元的な成長層が溶解をうける場合でも同じで 正三角形の成長層が溶解作用をうけると 三角形の頂点のところから溶解がはじめられ 図 5 で模式的に示したようなプロセスをたどって溶解が進行するであろう。その結果 正三角形は図 5 (b) のようなゆがんだ形に変わってゆくはずである。天然の 8 面体の面の上には このような形をもったステップがよくみいだされる(図 6)。溶解がさらに進むと図 5 (c) に示したように  $\{111\}$  面が 6 つの小面に分割されてゆくものと考えられる。

こうして考えてみると天然のダイヤモンドの結晶の丸味や 湾曲面は基本的には溶解作用の結果つくられたと考えるのが妥当のようである。さてそれなら  $\{111\}$  面以外の湾曲度のとくに著しい結晶面 たえば 上の 6 つの小面や  $\{110\}$  面などの結晶面は 溶解作用の結果はじめて出現した結晶面なのだろうか？ それとも 成長によって最初できたが のちに溶解作用をうけて湾曲したのであるだろうか？ 上のプロセスを考えると  $\{111\}$  が 6 つに分解されてあらわれた  $\{hhl\}$  面などは溶解作用によってあらわれた結晶面と断定できそうである。また  $\{110\}$  面も溶解によってできた結晶面かも知れない。しかし  $\{110\}$  面についてはもう少しつっこんで調べてみる必要がある。

ダイヤモンドの  $\{110\}$  面の成因に関連して 最近とくに重要な証拠を提供したのはイギリスのシール (M. Seal) である。彼はダイヤモンドの結晶を  $(100)$  に平行に切断し その切断面を強い酸化剤をつかって軽くエッチング (腐蝕) してみた。エッチングによって微細なエッチ・ピットができる。その分布状態は個体によって違っているが 多くの結晶で エッチ・ピットの密な帯と粗ないしはピットがほとんどできない帯とが累帯状に配列していることが明らかになった。エッチ・ピットは結晶中にふくまれている色々な欠陥を出発点としてつくられるから ピットの密な帯は欠陥密度の高い帯でありピットのできていない部分は 結晶が完全で欠陥の少ない部分に相当している。結晶の中でわずかつつ性質の違った部分が累帯状に分布しているのを累帯構造とよんでおり 多くの天然の結晶にみいだすことができる構造である。累帯構造は色の違いや 屈折率 X 線や放射線着色の違い あるいはエッチ・ピットの密度の違いとしてあらわれ 結晶が成長してゆく途中で条件が変化する

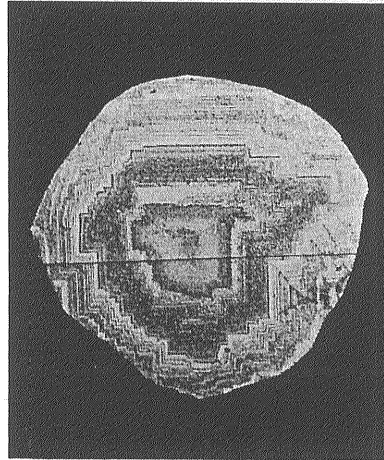


図13 エッチングによってあらわれたダイヤモンドの異帯構造(Seal 原図)

ることによってひきおこされた結晶欠陥の分布や化学組成などの変化によってできる構造である。ところでダイヤモンドの結晶をエッチングしてあらわれた累帯構造は 多くの場合  $\{111\}$  面に平行に発達している。まれには  $\{111\}$  に平行でない場合もあるが これについては後ほど考察することにして まずこの  $\{111\}$  面に平行な累帯構造と実際の結晶上にあらわれている  $\{110\}$  面との関係について検討してみよう。シールの研究結果によると 図13で1例を示したように  $\{111\}$  に平行な累帯が現実の  $\{110\}$  面を切るような形で発達している場合がしばしばみとめられる。すなわち 結晶成長の結果つくられた累帯が  $\{110\}$  面で切られたような形を示しているわけである。このことからシールは天然のダイヤモンドの  $\{110\}$  面は 結晶成長の結果できた面ではなく 現在ある結晶よりもずっと大きく育った 8 面体型の結晶があって それが溶解作用をうけた結果  $\{110\}$  面があらわれてきたのであろうと考えた。  $\{110\}$  面は成長によってはまったくつくられず 大きな 8 面体結晶が溶解されて はじめてあらわれてくる面であるというのである。さらに この考え方の側面的な証拠として 人工ダイヤモンドに  $\{110\}$  面がほとんどあらわれることがなく その面が出現した人工結晶は合成過程で溶解現象がおこったことを疑わせるような条件下でできた結晶にかざられているという観察事実もあげている。

ところで シールのように 天然ダイヤモンドの結晶にあらわれる  $\{110\}$  面はすべて溶解作用の結果出現した面で 結晶成長の結果できた面ではないと極論されてしまうと 天然の鉱物を取りあつかっている鉱物学者としては ついつい反論を試みたくなくなる。私自身もこの問題についていろいろ考えてみたので 以下に 彼らの考え方に対してすこし反論したい。

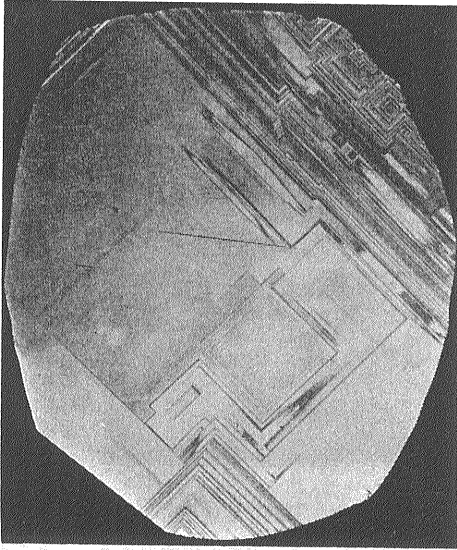


図14 異帯構造を切る12面体面 (Seal 原因)

まず {110} 面が大形の8面体結晶の溶解作用によって出現した結晶面であるとする。8面体型の結晶と {110} だけでできている12面体型の結晶との間には、サイズ分布に明らかな違いが存在するはずである。つまり、8面体型結晶は12面体型の結晶に比べてはるかに大粒の結晶の方に高い出現頻度を示し、小粒の結晶ほど12面体型の結晶が多くなるはずである。この関係をしらべた人はいないが、一般的な傾向としてそのような傾向はどうもみられないようである。大粒の結晶にも小粒の結晶にも12面体型の結晶がみだせるし、また、径1 mm以下の微小な結晶(0.00nカラット)にもきれいな8面体型の結晶がたくさんみだせる。

第2に、一般的な傾向として、8面体型の結晶は等方的な外形をもち、一方にのびた偏倚した結晶はむしろまれである。このような結晶から出発して溶解作用が進んだ結果、12面体型の結晶ができて、その結晶はやはり等方的な外形をもち、一方にのびた偏倚した結晶にはなりにくいのではなからうか。なぜなら、溶解を受けやすい稜や隅は、等方的な8面体型の結晶では等方的に存在するからである。等方的な結晶が溶解作用によって異方的な結晶になるためには、溶解作用自身が異方的に働かなければならないし、天然のダイヤモンドの履歴でも、ダイヤモンドの結晶の性質自身でも、そのような異方的な溶解作用を証拠づけるものはみだせないのである。

ところが、現実の12面体型結晶のほとんどが8面体型結晶に比べて、著しく一方に偏倚しているのが普通で

ある。このような偏倚結晶は、もともと偏倚した結晶から出発して、溶解作用が進んだのでなくてはできないのではなからうかと私は考えるのである。こう考えると12面体型の結晶は、8面体型の結晶が出发点となつたのではなくて、もともと12面体型の結晶(この種の結晶の方が8面体型の結晶よりも偏倚の程度が著しくあらわれる)あるいは{111}と{110}の聚形であった結晶が溶解作用を受けた結果、現在みられるような一方にのびた外形をとるに至つたのではなからうかと推測される。いいかえれば、{110}面はまず成長の結果、{111}面上の成長層の稜の積み重ねによってつくられ、その後、溶解作用を受けたのであろうというのが私の考え方である。

結晶面の網面密度からみても、P. B. C. ベクトルの点からみても、{110}面の方が{111}面よりもはるかに弱い結晶面で、溶解作用を受けやすい面である。溶解されにくい{111}面だけでできている結晶を出发点とした場合には、まず隅や稜に丸味がつき、ついで六八面体の等方的な結晶ができ、その後さらに溶解が進んではじめて12面体型の、それも等方的な外形をもつた結晶ができ、しかもこの過程はたいへん長くかかるであろう。これに対して、もともと溶解されやすかつ成長によって偏倚しやすい12面体型の結晶から溶解がはじまれば、{110}面が2つの{hk0}面に分割され丸味を帯びた面になり、かつ一方にのびた外形をとるにいたるのは、さほどむずかしいことでも、長い時間かかることでもない。

ところで、私のこの考え方がもし正しいとすると、著しい溶解作用を受けていない{110}面が見つかるはずである。その面は弯曲して2つの{hk0}面に分割されておらず、また{111}との稜に平行な方向の直線的な条線が主として発達しているはずである。なぜなら、ハルトマン式の解析からダイヤモンドの{110}面はS面であり、唯一のF面である{111}面上に発達する成長層の稜の積み重ねによって構成される面のはずであるからである。事実、径1 mm以下の微細なダイヤモンドを調べてみると、図4に1例を示したような{110}面をもつた12面体型の結晶の出現頻度がかなり高いことにきがつく。また、シールやフランクが考えるように、すべての天然ダイヤモンドの結晶が、8面体結晶のみから出発したとすると

- 1) 溶解作用を全くうけていない平坦な{111}面と直線的な稜だけでできている結晶
- 2) 稜、隅が丸味を帯びただけで{111}面は平坦である等方的な8面体型結晶
- 3) 平坦な{111}面はまったくなくなり、6つの{hkl}面に分化して合計48の面からできている等方的な結晶

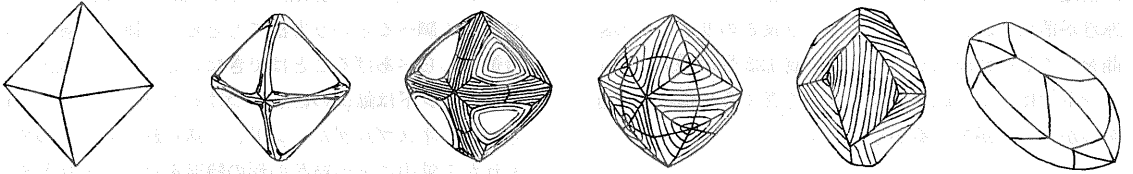


図 15 溶解が進むにしたがって左から右のように形が変わる

- 4) 弯曲した2つの {hk0}面よりなる {110} 面で構成されている等方的な12面体型の結晶
- 5) 同様の結晶面で構成されているが一方向的にびた偏倚結晶

が 漸減的な頻度で出現するはずである。

なぜなら 上の順序は8面体型結晶を出発としたときの溶解の進行にともなって形が変化してゆく順序であるからである。しかし 実際のダイヤモンドの結晶はこのような頻度では出現していないし 等方的な結晶とのびた結晶との間には断絶が存在するようである。

したがって これらの観察結果をまとめると ダイヤモンドの {110} 面がシールやフランクが主張するように溶解作用だけで形成されると結論することは いささか極論すぎるようで やはりまず成長の結果で その後溶解作用をうけたのであると考えるのが一番穏当な考え方のように思える。

ダイヤモンドの結晶の中には 今まで述べた形のもの以外に三角形の平板状の結晶がしばしばみだされる。ダイヤモンド原石の選別にあたっては この種の形の結晶はマクレと称して一まとめにとりあつかわれている。この種の結晶のうち無色透明な結晶は古くからポートルストーンと称して珍重されてきた。小さな肖像画の上にかぶせてペンダントのような形につくってつかわれていたのである。また 三角板状の形にあわせて ハート形 たこ形などにカットし2つ1組としてイヤリン

グなどにつかわれることも多い。これらの三角板状の結晶は 実は単結晶ではなく {111} 面を双晶面として2つの8面体型の結晶が接合してできたスピネル式の双晶である。

2個の8面体結晶がスピネル式双晶をすると 2個体の間の3つの方向に図18の a で矢印で示したような凹入角ができる。凹入角はいわば吹き寄せの場所であるから 結晶成長にあたって粒子が優先的に供給されやすい。そのため この方向に急速に成長が進むであろう。これに対して残りの3方向(矢印のついていない方向)では稜はつきだしており 凹入角が存在しないので ここでの成長速度はきわめておそい。

その結果凹入角のある3方向で急速に成長しても 凹入角のない方向でのおそい成長に規制されて 結果として図18の b で示したように 三角形の平板状の結晶ができあがるわけである。ただこの場合 成長のおそい方向に規制されるので ある大きさ以上に達し凹入角が消失してしまうと それ以上の大きさにはなかなか成長しない。もし もう1個の結晶が同様にスピネル式双晶の関係で接合し 都合3個(ないし奇数個)の結晶の集合ができると 凹入角は6方向につくられ 成長のおそい方向はなくなるから 結晶粒子が供給される限り成長は無限に継続されて 単結晶よりもはるかに大きな六角板状の結晶ができあがるであろう。天然のダイヤモンドの結晶には 残念ながらこのようなくりかえした双晶はみだされていない。そのかわり ダイヤモンドと結

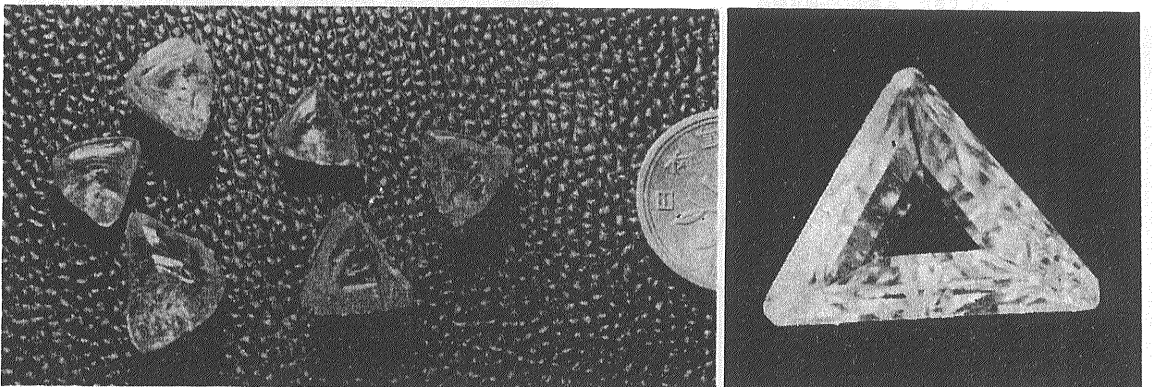


図 16 双晶によってできた三角形の平板状結晶 図 17 マクレを利用したカット

晶構造が同じであるゲルマニウムの結晶づくりで この原理が活用され数十メートルという長さのリボン状の結晶をつくるのに成功している(本誌123号参照)ダイヤモンドでは人工合成の結晶を大きく育てるのにこの原理をつかうことができるかもしれない。

今まで述べてきたのは ダイヤモンドの結晶形態の一般論である。産地や産状によって結晶の形がどう違うか? 結晶の形(晶相)と産状の間に一貫した関連性がみいだせるか? などの研究がおこなわれていると色々面白いことが明らかにされるかもしれない。しかしこの種の研究はダイヤモンドの採掘や貿易の慣習からみて、余り期待できないし、実際自由国圏のダイヤモンド鉱山についてはこの種の研究がおこなわれた例を知らない。

ダイヤモンドの含有量はきわめて低いので、黄鉄鉱や方解石の結晶の形と産状との関係をしらべるように、実際に産出している場所で結晶の形と産状とを比較するというような種類の研究をおこなうことはまったくできないわけである。個々の鉱山鉱山全体としての特徴をし

らべようとしても、各鉱山にある期間づつ常駐しながら歴訪して調べるという方法でもとらない限り、各鉱山の特徴をしらべあげることはいし、一たん産出したダイヤモンドは鉱山の区別をつけることなくすべて一括してヨハネスブルグからロンドンに送られてしまうので、それから鉱山ごとの結晶の形の特徴をだすことなどまったく不可能である。そのため、産状とむすびつけた結晶の形態に関する研究は、西欧圏に関する限りほとんどおこなわれていない。

これに対して、ソ連のヤクーチヤ地方のダイヤモンドの結晶の形に関しては、この種の研究がおこなわれている。この地方のダイヤモンド鉱床についてまとめた単行本である『ヤクーチヤのダイヤモンド鉱床 АЛМАЗНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЯКУТИИ』を調べてみると、“ミール” “ウダーチヨナヤ”などのキンパレー岩鉱筒中や、エネルデクスカヤ、チコングスカヤ、ペルフネムスキー地方などの、漂砂鉱床中でのダイヤモンドの結晶の形の出現頻度の統計結果が示されている。表1と図20はこの本からとったもので、結晶の形は単純な8面体型結晶、8面体と12面体型との中間型を示すもの、12面体型結晶とに3大別されている。それ

ぞれの型の出現頻度が産地によって著しく違っていることがこの図から気がつかれるであろう。また、この図をみるとミールやウダーチヨナヤなどのキンパレー岩鉱筒中のダイヤモンドでは8面体ないし{111}と{110}との聚形の結晶の出現頻度が過半数を占めているのに対して、漂砂鉱床では12面体型のものの方が高くなっていることが注

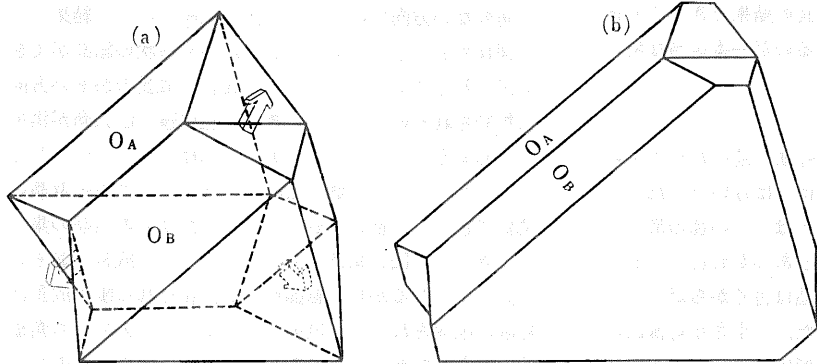


図18 ダイヤモンドのスピネル式双晶の凹入角における優先的結晶成長  
 a). スピネル式双晶でできる凹入角の方向(矢印) O<sub>A</sub>は個体Aの(111)面 O<sub>B</sub>は個体Bの(111)面  
 b). a)の矢印方向の凹入角で、結晶成長が優先的に起こってきた、三角形の平板状結晶

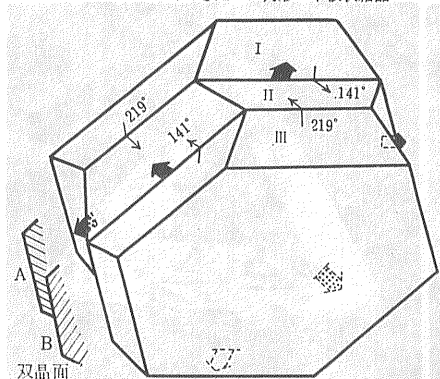


図19 スピネル式双晶が3個くりかえして行なわれると六角板状の大型結晶ができる 矢印は凹入角方向

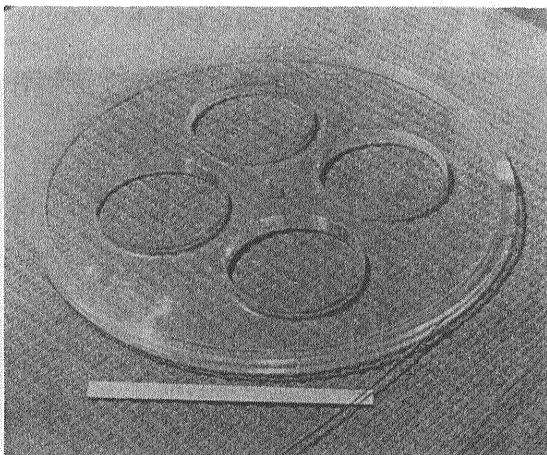


図20 ゲルマニウムのリボン状結晶

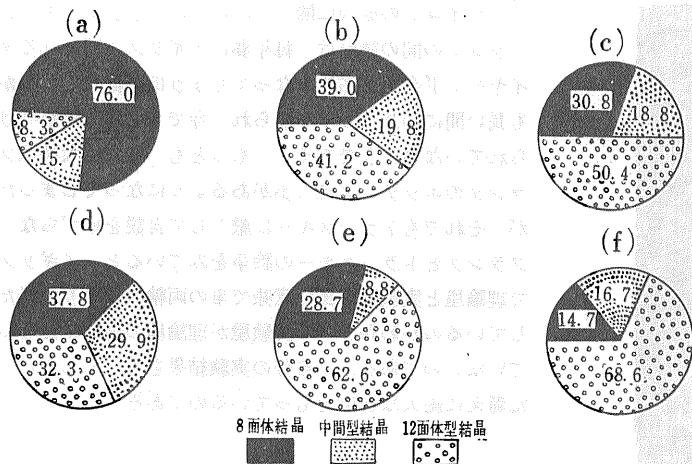


図21 ヤクーチャ地方の鉱床での晶相頻度図  
1. 8面体型結晶, 2. 中間型結晶, 3. 12面体型結晶 a)ミール キンバレー岩鉱床中 b)ウダーチョナヤ キンバレー岩鉱床中 c)ザルニックア キンバレー岩鉱床中 d)エネルデクスク湾漂砂鉱床 e)ツコンガ川 漂砂鉱床群 f)チマラスフ川 ムーナ川 流域の漂砂鉱床群

目される。似たような傾向が同書 463 頁にのせられている図にもみられる (図21)。この図では結晶の形を単純に8面体と12面体 および丸味をもった結晶に3大別したもので キンバレー岩鉱床であるミール鉱床では8面体型の結晶が圧倒的に高いが下流の漂砂鉱床にゆくにしたがって8面体型の出現頻度は減少し12面体型や丸味をもった結晶の出現頻度が上昇していることが示されている。

これらの ヤクーチャ地方のダイヤモンドの結晶の形について調べた結果をみるとダイヤモンドの結晶が川の流れによって運搬されてゆく過程で磨耗され丸味がついてゆくらしいこと および12面体型結晶の一部もそうした過程でつくられてゆくらしいことがわかる。したがってダイヤモンドの結晶の丸味や12面体結晶は先に述べた溶解作用 (これはダイヤモンドの結晶がキンバレー岩のマグマの中で運びあげられる過程でおこった現象である) のほかにも地表での運搬の過程での磨耗作用が加味されてつくられたものと考えることが必要であろう。

結晶の丸味や彎曲面あるいは{110}面のようにそのでき方が成長によるのか溶解によるのかで古くから意見がわかれていたものにトライゴン(trigon)があげられる。

表1 ヤクーチャ地方のダイヤモンド産地と晶相の出現率

産ダイヤモンド地域	8面体型	中間型	12面体型
“ミール” キンバレー岩鉱床	76.0%	15.7%	8.3%
“ウダーチョナヤ” キンバレー岩鉱床	39.0%	19.8%	41.3%
エネルデクスク湾漂砂鉱床	37.8%	29.9%	32.3%
ツコンガ川流域漂砂鉱床	28.7%	8.8%	62.5%
ベルフネムンスキ地域漂砂鉱床	14.7%	16.7%	68.6%

トライゴンと呼ばれる模様は{111}面上に普遍的に観察される三角形の凹みで面の三角形とは逆の方位をもっている。トライゴンの存在はぜひぶん昔から気がつかれていたらしい。バイブルの「出エジプト記」28章と39章にてでくる祭司の胸当てにちりばめる12個の宝石にはそれぞれイスラエルの子らの名の頭文字を刻み込まねばならないことになっている。この12の

宝石名のほん訳にあたって yahalom をダイヤモンドと訳した聖書と赤緋めのうと訳したものとがあり新しい日本語版の聖書で赤緋めのうとしてあるのは当時の技術ではダイヤモンドのように硬い物質に頭文字を刻みこむことは不可能だったからだと考えたことによるそうである。しかしトライゴンの中には肉眼でもみえるような大きさのものもあるからそのような結晶をつかえばヘブライ語の頭文字と酷似しているのでわざわざ字を刻みこんだと仮定しなくてもよさそうである。なお余談であるがダイヤモンドの結晶の隅をつかいてダイヤモンドに字や肖像画をほりこむことはインドではかなり古くからおこなわれていたらしい。現在モスクワにあるシヤーという固有名詞をもったダイヤモンドには数人の所有者の名前と年代とがペルシア語で刻みこまれているしシカゴの博物館に保管されているダイヤモンドには肖像画のレリーフが彫りこまれている。

さてダイヤモンドの結晶面上にみられるトライゴンについては古くから気がつかれていたがこのでき方を最初に科学的に問題にしたのは有名な鉱物学者のフェルスマンとゴールドシュミットの2人でその共著のDer Diamant 中でトライゴンの成因論を展開している(1911)。その後ダイヤモンド成因論という2部にわた

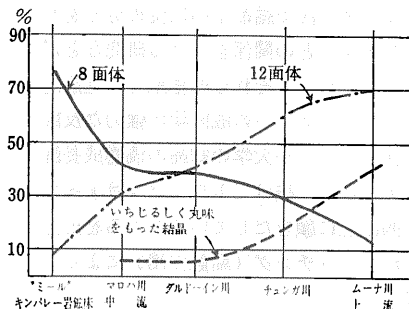


図22 シベリア内の鉱床によるダイヤモンドの晶相出現頻度の傾向



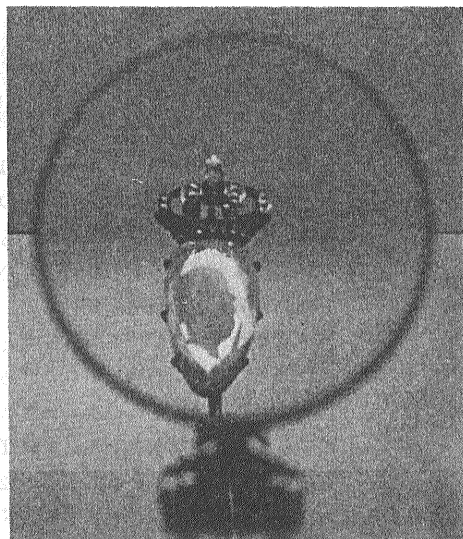


図23 シカゴ博物館所蔵のレリーフを刻みこんだダイヤモンド

る大著を著した(1932)ウィリアムズも同様 トライゴンの成因に論及している。

彼らは いずれもトライゴンが溶解作用によってつくられたと考えた。しかし 彼らはせいぜい低倍率の普通の顕微鏡をつかってトライゴンの性質をしらべた程度で詳しく観察をおこなったわけではない。

位相差顕微鏡や多重光束干渉法のように 結晶面上に存在する数オングストローム程度の微小な凹凸まで観察・測定することのできる近代的な方法を駆使して 古くから関心をもたれていたトライゴンの性質を詳しく調べ トライゴンの成因論にアンチ・テーゼをだしたのはロンドン大学のトランスキーである。彼は自分の観察結果をもとにして トライゴンが成長によってできたと主張した。つまり {111} 面上に発達する三角形の成長層の埋め残したところがトライゴンであると考えたわけである。

トランスキーのだしたアンチ・テーゼは トライゴンの成因に関する新しい関心をまきおこした。そして表面構造の解析だけでなく ラング法やベルグバレット法などのX線トポグラフィー法で結晶中の転位の分布をしらべ それらとトライゴンとの関係をつける研究などがおこなわれるようになった。それらの結果と 理論的な考察をもとにしてトランスキーの成因論に強力な反論を展開したのは ブリストール大学の結晶の渦巻成長論で有名なフランクである。彼は トライゴンはすべて結晶中の転位が結晶面上に顔をだしているところを出発点としておこなわれたエッチング(腐蝕作用)によってつくられたと主張した。

トライゴンの成因に関して斗わされるトランスキーとフランクの間の議論は 毎年春にイギリスで開かれるダイヤモンド会議の名物となってしまいうほど激しく しかも長い間にわたってつづけられ 今でもまだ結着がつけられていないようである。もっとも 今では大勢はフランクのエッチング説に歩があるようになってしまったが それでもトランスキーは厳として自説をゆずらない。フランクとトランスキーの論争をみていると イギリスで理論屋と実験屋が良い意味で車の両輪の役割りを果たしているのがわかる。実験屋が理論屋の走狗にはなっていないのである。自分の実験結果をもとにしてだした考えに絶大な自信をもっているのであろう。

ところでトライゴンはほとんどすべての天然ダイヤモンドの {111} 面上にみいだすことができる。径 1 mm 以下のきわめて微細な結晶では まれにトライゴンがごく少数しかみいだせないこともあるらしいが これはむしろ例外で {111} 面には必ずといってよいくらい多数のトライゴンを見出すことができる。結晶によっては 1つの結晶面上に数百から数千個もの大きささまざまなトライゴンをみいだすことができるほどである。これについては面白い話がある。ある年のダイヤモンド会議の席上で トランスキーがトライゴンがすべての {111} 面にみいだせるという話をしたとき 1人のダイヤモンド鉱業界に席をおく地質学者が やおら胸のポケットから美しい宝石用の大粒のポートレートストーンをとりだし もしこのダイヤモンドにトライゴンを見出すことができたなら この結晶を教授に差し上げよう と宣言した。三角形の平板状のポートレートストーンで 大きく発達した1対の8面体面は美事な鏡のように平坦で その上にいささかの凹凸も存在しないような逸品である。しかし トランスキーが教室にもち帰ってしらべた結果 鏡のように平らなこの8面体面の上に数千個もの小さいトライゴンがみいだされ 当時の時価で35万円もしたこの原石はトランスキーのコレクションに加えられるようになったのである。図26は この結晶について私が撮影した位相差顕微鏡写真である。

さて トライゴンの特徴は その大多数のものが直線的な稜をもった正三角形の凹みで {111} 面の3角形や成長層の三角形とは逆向きであることである。トライゴンには底の平坦な平底型と ピラミッドを逆さにしたような底が尖ったものとの2種類がある。前者をF型(Flat bottomed trigon) 後者をP型(Pyramidal trigon)と呼ぶことにしよう。両者は1つの結晶面上に共存している。図24はF型とP型が共存している {111} 面の

高分散多重光束干渉写真である。P型トライゴンでは数本の干渉縞が三角形に走っているのがみられ、深さがF型よりもはるかに深く底が尖った地形をもっていることがわかる。これに対してF型のトライゴンでは三角形は一樣な黒さで占められている。これは、底が平坦でかつ深さがきわめて浅いために1本の干渉縞の中でカバーされつくしてしまうからである。多重光束干渉法では1本の干渉縞の中での濃度変化はきわめて著しく $3\text{\AA}$ の高低差で10%もの濃度変化が起こるから、この干渉写真はF型トライゴンの底が分子的に平坦でかつ浅いことをはっきり示している。

図25と図26はそれぞれP型およびF型トライゴンの位相差顕微鏡写真である。位相差顕微鏡も多重光束干渉法と同様、微小な高低差に対してきわめて敏感で、数 $\text{\AA}$ 程度の高低差まで検出可能であるから、これらの写真もまたトライゴンの上のべたような特徴をはっきり示しているものといえよう。P型とF型のトライゴンの特徴について、今までえられた観察結果をまとめてみると次のようである。

F型トライゴンでは、底が分子的に平坦で、数オンゲストロームのきわめて浅いものが多い。しかしまれには深さ数マイクロンに達する深いものも存在するが、そのような場合でも底面は分子的に平坦である。大きさもF型トライゴンの場合には大小さまざまであり、大きいF型トライゴンの中に小さいF型トライゴンが発達している場合もみられる。しかし、一般的にいうとP型トライゴンに比べてF型トライゴンは小形のものが多い。トライゴンの側面もまたP型トライゴンと異なり、F型では急な傾斜をもち{111}面にほぼ平行な面で構成されている。

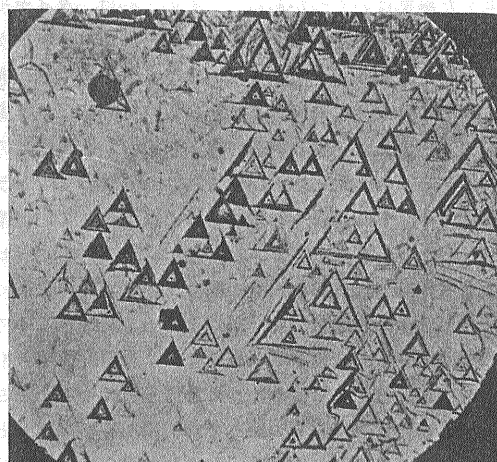


図24 トライゴンの低倍率顕微鏡写真 (S. Tolanskyより)

F型トライゴンには大小さまざまなものがみだされているのに対して、P型トライゴンの大きさはほぼ一定しており、一辺の稜の長さが $100\sim 150\mu$ 程度の大型のものが大部分である。まれには $10\mu$ 以下の小型のP型トライゴンも存在するが、それは小範囲内に多数のP型トライゴンが密集して発達している場合に限られている。また、P型トライゴンが一直線上に配列し、その中心を結んですべり線が発達している場合もみだされている。P型トライゴンの側面は、F型トライゴンの場合よりもはるかにゆるやかである。側面の傾角には2種類みだされており、1つは側面の傾斜が $15'$ 前後の緩傾斜の浅いピラミッドであり、他は $100'$ 程度の傾斜をもっているものである。いずれもF型トライゴンの側面の傾斜( $70^\circ 32'$ )よりもはるかにゆるやかな傾斜である。

さて、上述のような特徴をもっているトライゴンが成長層の埋め残しによってできたものだとトランスキー

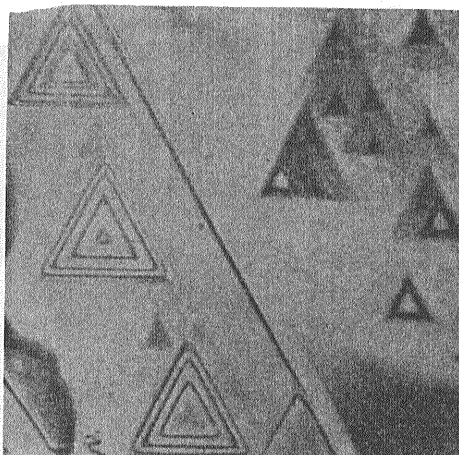


図25 高分散干渉写真 天然ダイヤモンドの(111)面 左側3個のトライゴンはP型 右側の小型のものはF型 (S. Tolanskyより)

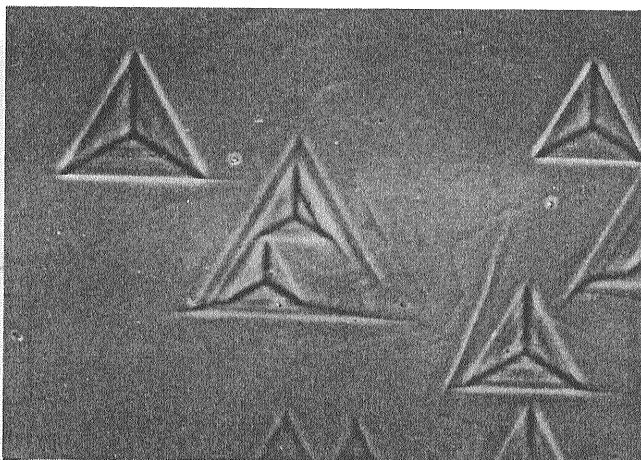


図26 P型トライゴンの位相差顕微鏡写真 中央下2つはF型トライゴン ( $\times 130$ )

が考えた論拠はいくつかある。その1つはダイヤモンドの結晶を強い酸化剤につかかって人工的にエッチングしたときできるエッチ・ピットがトライゴンとは逆向きで8面体面の三角形と同じ向きをもっていることである。トランスキーらの実験ではトライゴンと同方位のエッチ・ピットはまったく形成されなかつたのでトライゴンはエッチング以外の原因で考えねばならないと推定したわけである。さらにこの種人工的なエッチ・ピットは三角形ではあるがその稜はトライゴンのように直線的ではなく弯曲したり隅のところで丸味をもっているものばかりでトライゴンのように直線的な稜をもってはいないことも論拠の1つにあげられている。さらに多重光束干渉法をつかかって厳密にしらべてみるとF型トライゴンの底の平面がしばしばその周囲にある平坦な成長層の表面とまったく同一表面上にあることがわかった。エッチングでF型トライゴンがつくられたとした場合このような現象がおこるとは考えられない。

トライゴンはまたしばしばすべり線と考えられる一直線上に底辺を並べて配列しておりかつその外側では成長層が不規則な前線の形をとっていることもエッチングでは説明できない現象としてあげられている。さらにトライゴンが多数密集して存在していても個々のトライゴンの形はほとんどくづされておらず直線的な稜が維持されている。これに対して人工的につくったエッチ・ピットの三角形では隣接するエッチ・ピットが互に喰い合って三角形の形がひどく乱れているのである。これらの事実からトライゴンはエッチングによってできたものとは考えられず成長層の埋め残して形成されたと考えざるをえないというのがトランスキーの主張であった。

これに対してフランクが反論を唱えだしたのは1957年頃からでエッチングの実験結果トライゴンの形態的解析結晶中の転位とトライゴンの分布との関係という3種類の新しい実験結果をもとにしている。1958年にフランクとパットリックはダイヤモンドの結晶をキンバレー岩の粉末にいれた状態で加熱しながら酸化剤を加えて人工的なエッチングをおこなった。その結果ただ1個だけであるがトライゴンと同じ方位をもった三角形のエッチ・ピットをつくるのに成功したのである。つづいて1961年にはエバンス(Evans)とソウター(Sauter)の2人はダイヤモンドを1000°C程度に加熱しておいてこれに濡れた酸素(wet oxygen)あるいはそれと窒素との混合気流を加えることによってトライゴンと同方位のエッチ・ピットをつくるのに成功した。これらのエッチ・ピットはトライゴンのように直線的な稜をもった正三角形ではないがこれでトランスキーが成長説の論拠にしていた人工エッチングではトライゴンと逆方位のピットしかできないという事実がうちやぶられてしまった。

上の実験がはじめておこなわれた同じころにフランクらは天然ダイヤモンドにみられるトライゴンの形態ことにトライゴンが密集して発達しているときの形態を解析した(Frank, Puttrick & Wilks 1958)。そのようなあらわれ方をするとき図29で示したように一方のトライゴンの頂点は他方のトライゴンの中につきこんで換言すれば2つの三角形が重なり合って存在することはなく一方の頂点は必ず他方の底辺に接して存在している。しかも一方の頂点と他方の底辺とがつくる凹入角のところでは図30でみられるように接点から遠ざかるに従って階段の形が段々と鈍角化しかつその境界はしばしば接触しているトライゴンの底辺ののびでつくられている。このような特徴をもったトライゴンは成

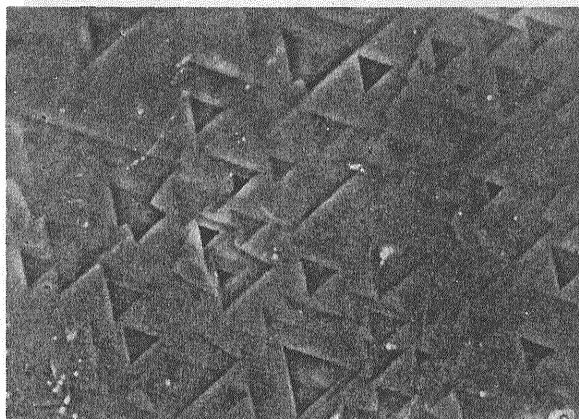


図 27 F型トライゴン(位相差顕微鏡写真) (×500)

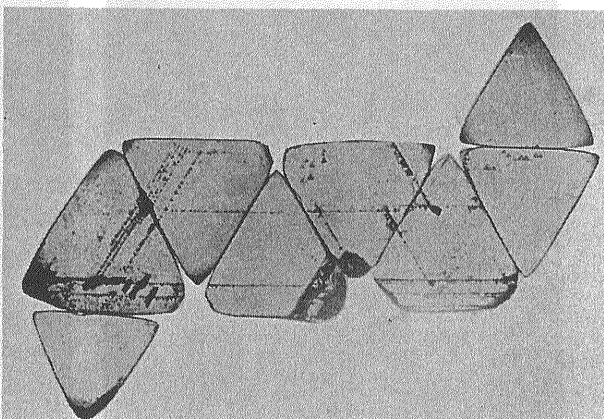


図 28 すべり線に沿って配列したトライゴン(S. Tolansky 原図)

長層の埋め残しでは決してできないとフランクは主張する。なぜなら2つのトライゴンが近接して存在したとき、エッチングの場合にはその進行にともなって大きくなり、ついには2つは接触するに至る。接触したとき2つが交った点Aでは、2つのトライゴンの辺がつくる凸出部が存在する。エッチングは、このような場所では優先的に進行するから、この凸出部は交点の両側で図30のように段々と鈍角化してゆくであろう。これに対して、成長層の埋め残しでトライゴンがつけられたとすると、トライゴンは結晶成長が進むにつれて段々と小さくなり、最初接触していても互に離れてゆくであろう。また、成長の前線も図29でみられるように2つの接触点近傍で急に鈍角から鋭角化するようなことは、ごく近くに成長中心が存在しない限りありえないことである。したがって、このような形態のトライゴンは、エッチングでつけられたと考える以外に方法がないというわけである。ただ、ここで注意しておかなければいけないことは、これらの観察はP型トライゴンについてみとめられたことで、F型トライゴンでは趣が違っている点である。

第3の反論は、ラング法とよばれるX線トポグラフィ法をダイヤモンドの結晶に適用し、結晶中の転位の分布状態を詳しくしらべる実験からえられた。この実験は、フランクの助教授で、ラング法の発明者ラングが中心となり、高木ミエ、神谷六郎、小松啓らの日本人の研究者の活躍によっておこなわれたものである。

ラング法というのは、スリットを通して一定角度でX線を結晶に放射し、結晶全体をスキヤニングする方法である。転位や欠陥のまわりには歪みが存在するので、それが原因になってX線の回折が起こり、転位が存在するとその像が乾板の上に印される。これから結晶の中で転位や欠陥がどのように分布しているかを示す地形図がえられるわけである。

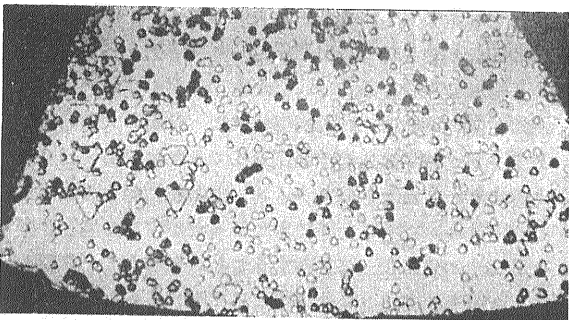


図29 人工的なエッチングによってできたトライゴンとは逆むきの三角形の凹み (S. Tolansky より)

レット法も加味して) によって天然ダイヤモンドの結晶中の転位の存在状態をしらべてみると、しばしば結晶の中心付近に原点をもち、ここから束状に出発して結晶面にまで達している転位線群が存在することがわかった。しかもP型トライゴンが密集している結晶面には、必ずといってよいくらい、この面に達する転位線群が存在していることが、多くの結晶でたしかめられたのである。ただし、この逆は必ずしも真ではなく、転位線群がラング写真上でみとめられても、トライゴンが存在しないこともある。また、転位線群と対立しているトライゴンは、P型トライゴンに限られている。

ラングはさらに特定の結晶1個をとりだし、その{111}面の表面構造を位相差顕微鏡でしらべて、成長丘やトライゴンの存在する個所をおさえておき、その上でこの結晶のラング写真をとって、転位線とトライゴンとの対応を追跡してみた。その結果によると、P型トライゴンはほぼ間違いなしに転位線と1対1の対応を示していることが確認された。ただし、F型トライゴンではこのような対応はみいだされなかった。

ところで、ラング法(それにベルグ・バ

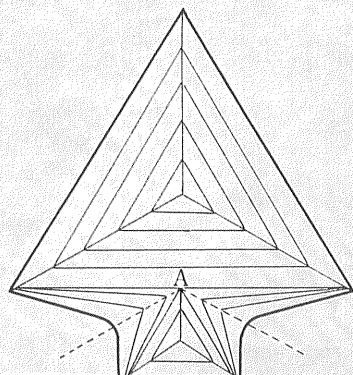


図30 2つのトライゴンが接触したときの形態

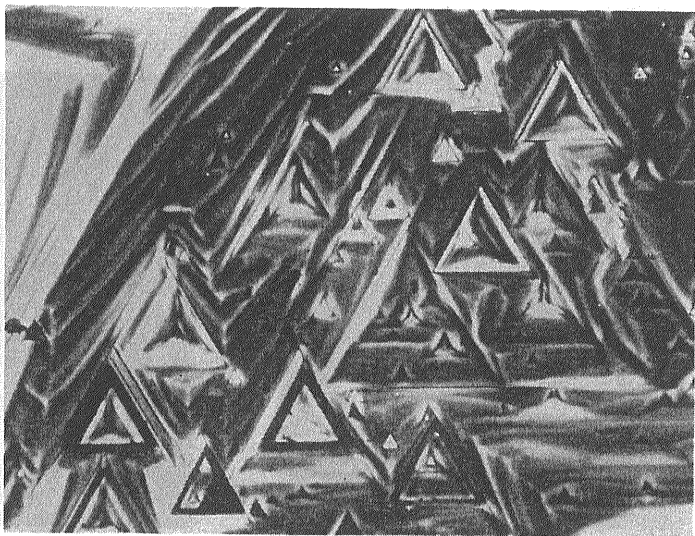


図31 互に接触したP型トライゴンの形態(位相差顕微鏡写真)(×130)

この結果から 少なくともP型トライゴンは転位線が結晶面と交るところを出発点としたエッチ・ピットであると結論したのである。しかも 側面の傾斜の小さい浅いP型トライゴンは刃状転位点に 傾斜の大きい深いP型トライゴンはらせん転位点にできたエッチ・ピットと考えた。またF型トライゴンでは転位線との1対1の対応をみいだすことができなかつたが この型とP型とが1つの結晶面上に共存することから考えて F型トライゴンも同様エッチングによって形成されたと考えざるをえないと結論したのである。

さて 今まで述べてきた研究結果から 明白にエッチングによってつくられたと結論が下せるのは P型トライゴンのみで F型トライゴンの場合は推論されているにすぎないことが理解されるであろう。F型トライゴンの成因に対する決定的な証拠は 成長説からもエッチング説からもまだあげられていないというのが 少なくとも天然ダイヤモンドのF型トライゴンについてのいつわらざる現状のようである。両方とも 決定的な証拠をあげようとして苦心しているのが現状の正しい報告らしい。そのため 「トライゴンは他のダイヤモンドの結晶が衝突した際 表面の1部が劈開してつくられた凹みである」といういささか突飛な説が最近発表されたのに対して フランクのような人でさえ関心をよせるのである。

以上は 天然ダイヤモンドの{111}面にみられるトライゴンの成因に関する研究結果をまとめたものであるが人工ダイヤモンドの場合 トライゴンは存在するのであるだろうか？ 存在するとしたらどのような形をとっているのだろうか？ これを調べることによって トライゴンの成因を解く鍵がえられるかも知れない。そこで 以下に私がおこなった人工ダイヤモンドの結晶についての

観察結果をまとめてみることにしよう。

人工ダイヤモンドの結晶の大部分は既述のように触媒金属の薄膜に由来する珊瑚の枝状の模様でおおわれている。しかし、ごく少数の結晶ではこれらの模様の下に発達するダイヤモンド自身の表面構造がみられる。

{100}面上にみいだされる渦巻成長層はその1例である。{111}面でも同様で 珊瑚の枝状模様がみられない場合の結晶面に特徴的にみとめられるのは図32で1例を示したように{111}面に平行な3つの方向によく発達した直線群である。この直線は図32 33の干渉写真でみられるように階段で 両側にレベル差が存在する。直線には結晶面全面を横切るものもあるが 多くは面の中から出発し結晶端にまで走っているか 面の中で始まり中で終っている。したがってレベル差も 出発点では0で遠ざかるに従って漸増して 結晶端で最大になるか あるいは0から出発して漸増し 中央で最大となって再び漸減して0になって終るかである。したがって これらの直線群は 一種のねじれ境界かあるいはすべり線に相当しているものといえよう。さらに興味深いことはこれらの直線群と密接に関係して三角形の凹みのいわゆるトライゴンが発達していることである。

直線群とトライゴンとの関係は この種の{111}面を高倍率の位相差顕微鏡下で観察するとさらにはっきりする。図35 36 37はその数例で ここには参差状に発達する細かい薄い三角形の成長層と 3方向に発達する無数の小さいレベル差をもったすべり線と 三角形 菱形 あるいは三角形の二稜のみでかこまれたような凹みが多数発達しているのが認められる。この写真はポジタイプの位相差顕微鏡写真であるから 凹みは暗色にみえる。

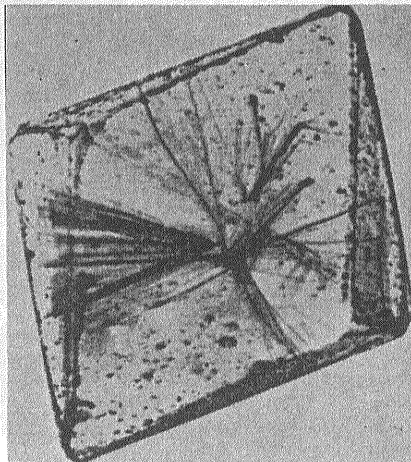


図32 ダイヤモンドの8面体結晶のラング法によるX線トポグラフィー写真 結晶の中心から走る転位の束がみとめられる (Lang 原図)

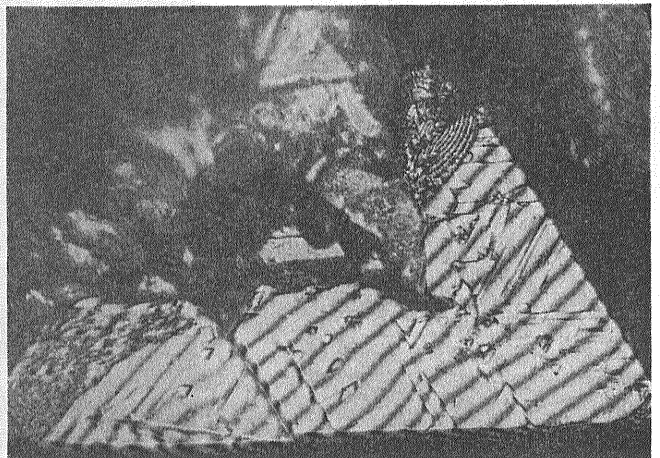


図33 人工ダイヤモンドの(111)面の干渉写真 3方向の直線群に注意 (×180)

この写真でははっきり認められるように 三角形 菱形などの凹みはすべてすべり線と考えられる直線群に沿って発達している。これらのすべり線は結晶成長の過程でつくられたものであることが他の観察結果から確かめられている。そこで 成長の途中でこのようなすべり線ができると そこにはレベル差があるので 後からひろがってきた成長層は すべり線でできた階段をのりこえて前進することができず 次々に積み重なってゆくであろう。最初 分子単位のレベル差しかなかったすべり線も この結果逐次レベル差が大きくなってゆく。三方向のすべり線が交差したところは そのまま三角形の凹みとして残るし 2方向のすべり線の交差や すべり線が一方だけの場合にも その後の3角形の成長層のひろがりによって 三角形の凹みができてゆくであろう。このようにして 少なくとも人工ダイヤモンドのトライゴンの1部は成長の結果つくられたものと考えられる。

一直線上にそってトライゴンが分布することは 天然ダイヤモンドでも人工ダイヤモンドでも しばしばみいだされる現象であり これらは上の形成機構を間接的に証明するものであろう。トライゴンの稜が直線的であるのも すべり線の存在を仮定することによって容易に

説明が与えられる。天然の結晶でトライゴンとすべり線の関係が人工の場合ほどはっきりみられないのは 成長速度の差と 長い成長時間の間での成長層のひろがりによってすべり線の存在がかくされてしまうことに原因しているのであろう。天然ダイヤモンドで 人工の場合ほどすべり線とトライゴンの関係が明瞭ではないといっても 天然ダイヤモンドの少なくともF型トライゴンは人工ダイヤモンドのトライゴンと同じような機構で形成されたのであろうというのが現在の私の考えである。  
(つづく) (筆者は 鉦石課長)

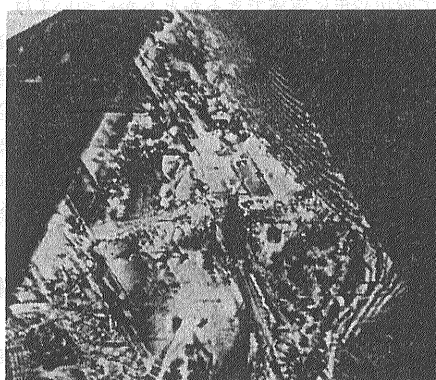
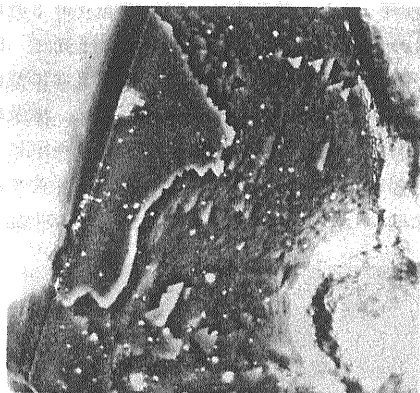
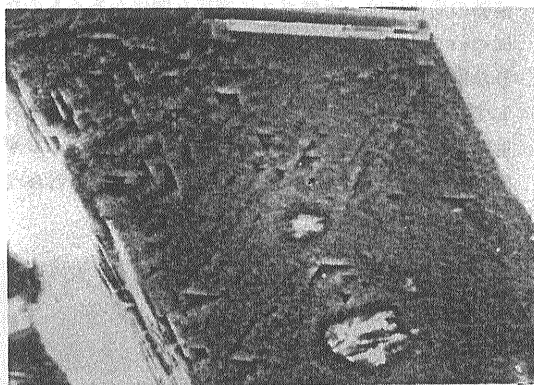


図34 人工ダイヤモンドの(111)面の高分散干渉写真  
3方向の直線群に注意 (×180)



←  
図35  
人工ダイヤモンドの  
(111)面上の成長層  
位相差顕微鏡写真  
(×650)



↑  
図36  
人工ダイヤモンドの  
(111)面上の三角形  
の成長層とトライゴ  
ンや菱形などの凹み  
位相差顕微鏡写真  
(×650)



図37 人工ダイヤモンドの(111)面上の成長層とトライゴン 位相差顕微鏡写真 (×1350)



図38 高倍率位相差顕微鏡写真 (×1350)