

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～

9

砂川一郎

今までの連載で 私たちはダイヤモンドの色々な性質——結晶の外形からはじまって100万分の1以下しか含まれていない不純物に至るまで——を学んできた。このことから 私たちは 一口にダイヤモンドといつてもその性質は個体々々によって微妙に変動していること、その違いは結晶のおいたちの違いから生れていることを知ることができた。また それぞれの性質の特徴を解析することによって ダイヤモンドのおいたちに関連するいろいろな情報がえられることを知った。

私たちは ダイヤモンドの母岩であるキンバレー岩の産状や性質から いろいろな意見はあるにしろ 現在考えられる最もたしからしいダイヤモンド形成の場所は地下深部の高温高压下のはずだと推定した。これは ダイヤモンド中にコーサイトの包有物が発見されたこと、石墨—ダイヤモンドの安定領域についての熱力学的検討結果、合成実験の結果などからも支持されている。そしてその深さは はじめの頃は100 km よりも浅いところを考えていたが、熱力学的検討や合成実験からみると少なくとも120 km よりも深く、多分200 km よりも深い場所であろうと推定するようになった。

結晶面の表面構造や累帯構造の解析は ダイヤモンドの成長が主として{111}面上の層成長によっておこなわれたことを示してくれ、これからダイヤモンドが固相反応による成長でも、炭素の溶融体からの成長でもなく、炭素を過飽和にふくんだ溶液相(珪酸塩を溶媒とした)からの成長であることがわかった。ダイヤモンドが成長する過程では この溶液は炭素を過飽和に溶かしこんでいたであろう。しかし ダイヤモンドの結晶のすぐまわりでの過飽和度は 成長の進行にともなって増減し、成長速度の早かった時期と おそかった時期がくりかえして起こり、結晶の中に累帯構造をつくりあげた。チッ素のような不純物元素も 成長の全過程を通じて系中で必ずしも均一ではなく、ダイヤモンド中にとりこまれる量に増減があつたようである。

結晶中の転位の集合状態、歪み複屈折、スパイク反射能、紫外線透過率などでみだされた結晶内の線状構造や曇りの目模様の解析結果、および塑性変形に関する実験的な研究から、私たちはダイヤモンドの結晶が成長した後に塑性変形を経験し、しかもそれに伴われて2,000°K

よりもやや高目の温度で焼なましを経験したはずであると推定した。さらに、丸味をもった天然ダイヤモンドの結晶の形から、ダイヤモンドが形成されて後、地表近くまでもたらされる間に、キンバレー岩マグマ中で溶解作用を受けたはずだと結論した。

溶解作用の時間は決して長かつたはずではないと推定し、それから類推して、ダイヤモンドは大陸楯状地塊内だけに発見され、造山帯では、地下のマグマ溜りでマグマが停滞している間にダイヤモンドが溶解しつくされるであろうから、ダイヤモンドの産出は見込まれないだろうと推定した。

こうして私たちは、ダイヤモンドの性質の解析を通して、そのおいたちの歴史を少しづつ明らかにしてきた。しかしまだ、ダイヤモンドの炭素そのものの起源についても、それが形成された場所についても、十分には明らかにされていない。これらの問題を解く鍵は、連載の8で述べたチッ素薄板の中にかくされているようである。この形成機構を検討すること、およびチッ素そのものの起源を考えることから、フランクは新しい成因論に到達したのである。そこで、チッ素薄板がどうしてできたかを検討してみることに、出発して、段々とフランクの成因論の核心を紹介してゆくことにしよう。まず、チッ素薄板の特徴を復習の意味でまとめてみることにする。

チッ素薄板の特徴中第一にあげられるものは、それが天然ダイヤモンドの99%余を占めるI型結晶中にだけ見出しされ、II型結晶や人工ダイヤモンドではみられないという点である。天然のII型結晶では、チッ素含量自身が薄板として集中析出するには不十分な量しか含まれていないから、余り問題はないが、人工ダイヤモンドに薄板が全くみだされないという事実は興味深い。

第2の特徴は、チッ素薄板はI型結晶中の一定の範囲内では均質にちらばって分布しており、多数の薄板が塊状に集中して産出する例はみられないこと、薄板の大きさが一つの試料の一つの領域内では、ほぼ一定で、かつ{100}に属する(100)、(010)、(001)の3面上でほぼ等しい密度で分布し、どれか1つの面に偏析していないことである。

第3の特徴は、薄板の密な帯とほとんどあらわれない帯とが、1結晶個体内で累帯的に存在し、しかも2つの帯の境界は電子顕微鏡的なオーダーでシャープであるという事実である。

さて上の第1、第2などの特徴からみると、ダイヤモンド中のチッ素の薄板は、時効硬化を起こさせた金属にしばしば見出せるプレストン・ギニエ帯(Preston-Guiner zone)の特徴とたいへんよく似ていることに気がつく。プレストン・ギニエ帯とは、最初金属の中に固溶体として存在した微量の副成分元素が、温度の降下と時間のファクターによって、固体内での拡散を起こした上で特定の結晶面に平行な薄板として析出してできる組織である。このことからダイヤモンド中のチッ素も、プレストン・ギニエ帯の場合と同じように最初は結晶成長の過程で固溶体として結晶中にとりこまれたが、その後の温度の低下によって固体内での拡散を行なって薄板として析出したのではなからうかという考えが生れてくる。

チッ素含量のきわめて低いII型では薄板がみられないこと、時効硬化や焼なましを経験していない人工ダイヤモンド中にも薄板がみられないことなどはこの機構を側面的にサポートしているかにみえる。しかしここに問題が1つでてくる。すなわち上に述べたチッ素薄板の第3の特徴である、チッ素薄板の密な帯と粗な帯とが電子顕微鏡的なオーダーでシャープな境界で接しているという事実である。この事実は、プレストン・ギニエ帯のでき方をそのままの形でチッ素薄板の形成機構に應用できないことを示している。そこでこれらの事実をふまえて、チッ素薄板の形成機構を考えてみると、いくつかの可能な形成機構が考えられてくる。

チッ素薄板のでき方

まず第1の可能性は、エバンスがサジェストしたもので、チッ素が薄板として凝集する場所として拡散しにくい別種の不純物元素Xがあり、チッ素はダイヤモンド結晶内を拡散した上でこの不純物元素Xのまわりに沈澱したという解釈である。したがって、チッ素薄板による累帯構造は主として不純物元素Xの累帯をあらわしているわけである。この考えが正しいとすると、チッ素薄板の大きさは一つの領域内の一方で大きく、他方では小さくなるはずで、一様な大きさをもっているという観察結果とは矛盾している。この点からみると、エバンスの出した考え方は正しくないようである。

第2の考えは、拡散を全く否定した考えである。チッ素の薄板は拡散によって形成されたものではなく、結晶成長の過程で成長中の結晶の表面に形成されたという

考えである。しかし今まで度々説明したように、ダイヤモンドの成長は{111}面に平行な層成長によっておこなわれるから、{100}に平行に伸びたチッ素薄板が成長過程でつくられたとすれば、薄板ののびの方向は{111}と{100}面の交線に平行か垂直に一樣になるはずである。しかし実際にはそうではない。また今まで述べた種々の事実、たとえば人工ダイヤモンド中に薄板がみいだせない事実に対してもこの考えでは満足のゆく説明を与えてくれない。したがってこの考えも棄却しなければならない。

フランクは上のようないくつかの可能性を検討し、かつマグマが上昇する際における温度・圧力条件の変化とそのチッ素の拡散能力に対する影響(付録1参照)およびチッ素の薄板の溶解に関連する熱力学(付録2参照)について理論的な検討をおこなった上で、チッ素の薄板が次のようにしてつくられたと考えた。

すなわち、チッ素はまず結晶成長の過程で分散した形で固溶体としてダイヤモンドの結晶中にとりこまれる。このときの温度・圧力条件下では、チッ素の固体内での拡散能力はいちじるしく低いから、固体内を拡散して薄板状に析出することはできない。ただ成長過程での周囲の過飽和条件(チッ素などの不純物元素に関しての)は、内部の累帯構造からも理解できるようにくりかえして変動をしていたから、固溶体として存在しているチッ素の含量にも累帯的な変化が存在していたはずである。

こうして形成されたダイヤモンドが、その後何らかの原因によって温度が上昇するか、あるいは温度降下をともなわない圧力降下を経験するとすれば、チッ素の拡散能力は増加し、その結果チッ素は固体拡散を起こしてプレストン・ギニエ帯ができると同じように薄板として凝集・析出するのであろう。一般のプレストン・ギニエ帯の形成機構とチッ素薄板のでき方との差は、温度・圧力のファクターにおける差であることがこれからわかる。一般的にいうと、元素の固体内での拡散能力は圧力減少か温度の上昇によって増加する。フランクの計算によると(付録2参照)、固相と液相の混合物であるマグマの上昇によって圧力が降下する際には、温度の急激な降下がおこるのでチッ素の拡散能力は低下する。しかしメルト(マグマと異なり完全な融液体をいう)を主とする物質が地下深部から上昇するときには、圧力降下にもなって温度は逆に急上昇し、したがってチッ素の拡散能力は高くなるはずである。したがって、ダイヤモンドの成因を考えるにあたっては、ダイヤモンド形成後にこのような条件変化がおこったことを仮定しなければならない。また、ダイヤモンド中にチッ素がこれだけ多

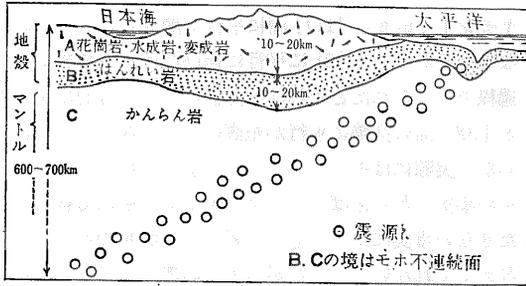


図1 地殻マントルの構造と震源の分布の模式図(久野より)

量にふくまれているという事実に対する説明を与えることもとくに大切になってくる。

さて 結晶の形 表面構造 内部の累帯構造 格子欠陥の分布 チッ素薄板の形や分布についてのこれらのデータをまとめてみると ダイヤモンドは それが成長したときから地表にもたらされるまでの間に実にさまざまな条件の変化に遭遇し 複雑多岐な履歴をへていることが読みとれる。成長の過程では その溶媒の成分や濃度(チッ素含量をふくめて)にくりかえして変化がおこっている。

成長が完了した後に溶解作用をうけているが ただその期間はごく短期間であったはずである。なぜなら長期間の溶解作用がつづけば完全にとけさってしまうからである。さらに 多分 $2,000^{\circ}\text{K}$ ないしそれ以上の温度条件下で強いストレスをうけており またその程度の温度下で かつあまり高くない圧力下で焼きなまし期間が存在したはずである。また成長完了後に温度の上昇ないしは温度の急速な降下をとまなわないうちじるしい圧力降下を経験したはずである。

このような条件を考えてみると ダイヤモンドはどうしても 地下深くのダイヤモンドに関して炭素が飽和状態にあった液相中から晶出したと考えざるをえない。温度を $2,000^{\circ}\text{K}$ とすると そのような条件とは圧力最低6万気圧 深さにして190 km 以深のところに相当する。多分それよりもずっと深いところであろう。

このような深さのところ すなわちマントルでの物質の状態は ちょっと考えると均質でチッ素のような元素は本来ピュリファイされてしまっているように考えられる。しかし この深さでも均質ではない場所が1カ所だけありうる。それは地震の震源である とフランクは考える。

ここでフランクは日本列島からシベリア大陸へかけての断面図のスライドを示しながら説明する(図1)。理論物理屋のフランクを地質屋か地球物理屋のように錯覚させる一瞬である。

この断面図とは 地球物理の分野では広く知られている震源の分布図のことである。この図によると 大陸周縁部の下部では震源はせいぜい70km程度の深さであるが 大陸の下部にゆくにしたがって震源の深さが増加し 深い所で700 kmの深さにまで達している。フランク自身の意見によると マントル中のこの深さで地震が発生するためには固相中に液相のパッチの存在を仮定しなければならないという。固相間の相転移だけでは地震は発生しえないというのである。そこで フランクはダイヤモンド形成の場所をこの深さの液相のパッチに求める。ダイヤモンドは明らかに溶液相から成長したものであり かつダイヤモンド中でのチッ素の拡散能力が小さく 最初に固溶体の形でダイヤモンド中にとりこまれたチッ素が固体拡散を起こさないためには これだけの高い圧力が必要であると考えるのである。それならいったい 炭素あるいはチッ素はどこからもたらされたのか?

ヘス(Hess)やディエツ(Dietz)によると これらの震源は 地殻からマントル内部にむかってひろがる広大な表面上に分布しており この面は 大洋底が大陸の底にむかってひきずりこまれてゆく いわゆるスラスト面であるという。これは大陸漂移とも関係している。この考えをさらに拡張発展させて フランクのダイヤモンド成因に関する壮大なスペキュレーションが生まれてくる。

フランクによると 大洋底に堆積した有機源の炭質物は このスラストによって地下700kmの深部までひきずりこまれるという。珪酸塩溶媒中に溶解した炭素はこの深さから液相が上昇する過程での圧力降下によって多分500 kmの深さのところあたりでダイヤモンドとして晶出するであろう。大洋底の堆積物より以上によい炭素とチッ素の起源は考えられないだろうと彼はいう。

こうしてダイヤモンドの結晶粒をふくんだ液相は 周囲よりも密度が小さいので上昇運動をおこす。上昇にともなう圧力降下でまわりの固相を溶解し みずからの通路をつくりながら 川の流れのようにして上昇を続けてゆく。メルトのうちのあるものは 地下70km程度の深さにマグマ溜りをつくり そこに長時間停滞した上で 現在大陸周縁部にみられるような火山として地表に達するであろう。しかしこの場合 ふくまれていたダイヤモンドは完全に溶解しつくされてしまう。したがって このような地域にダイヤモンドの産出は期待できないはずである。このことはすでにこの連載の4でかなり詳しく議論したとおりである。

一方 このような間接的な噴出によらず 古い安定地

塊である大陸楯状地帯内になんらかの原因によって割れ目がつくられるとするとそこをたどってのメルトの急速な上昇運動がおこる。ダイヤモンドにとってメグステープルな深さである最後の100 kmの深さのところは数時間という短い時間内にこのメルトが一挙にかけ上げて地表近くまで到達し(付録3参照)キンバレー岩のパイプをつくりあげると考えるのである。そうでなければダイヤモンドは完全に溶解しつくして地表には産出しないであろう。

上昇の最後1~2 kmの浅さのところまでは揮発性成分はあまり重要な役割を果たさない。この深さに達してはじめて揮発性成分の濃縮・分離によって爆発がおこり周囲の岩石を粉碎しその破片をとりこみ現在みられるような異種岩石の破片にどんだキンバレー岩のパイプが形成されたのである。キンバレー岩中の異種岩片がほとんど熱変質をうけていないのはマグマが地表近くに到達した最後の段階で異種岩片をとりこんだからである。ところでフランクのこの成因論が正しいとするとダイヤモンドは大陸楯状地帯のみ産出するはずで造山帯には産出が期待できないはずである。実際従来のダイヤモンドの産地をみるとまさにそのとおりである。したがって日本にはダイヤモンドが産出する可能性は将来ともまったくなくなるわけでもし将来ダイヤモンド鉱山が発見されるとすれば今まで未発見であった楯状地帯のカナダかオーストラリア西部ということになる。実際最近の報告によるとカナダ北部でキンバレー岩が発見されたそうである。

フランクの新しいダイヤモンドの成因論はまさに壮大華麗なスペキュレーションといえよう。あまり壮大すぎて多くの人ことに地質学者はまず眉に唾をつけて聞くかもしれない。その人たちの間に浮んでくる疑問はいろいろある。たとえば地下深くにあったマグマが一挙に地表まで上ってくるために必要な割れ目はどうしてできたのか?最後の100 kmを数時間で駆け上ってきたなどということが本当に可能なのだろうか?その場合キンバレー岩マグマの化学組成から考えてその粘性がそのようなスピードを実際に許してくれるのだろうか?もし急速に駆け上ってきたとしたらマグマの温度は2000°Kを余り下っていないはずである。それにもかかわらずキンバレー岩中にふくまれる異種岩片にいちじるしい熱変質を与えていないのは何故か?など色々な疑問が浮んでくるであろう。しかしその人たちにフランクの成因論を完全に否定しきれぬ根拠があるだろうか?

フランクが結晶成長についての渦巻成長説を発表したときの多くの人々の反応もそれと似たりよつたりのものであったらしい。しかし事実はわずか1年後に彼の理論のドラマチックな実証がありそれ以後現在まで約20年近く渦巻成長説をのりこえる理論はあらわれていないのである。彼は20年間で予見し支配したのだといえよう。彼のダイヤモンド成因論はどういう結果になることであろうか?彼にとつてもたいへんな冒険をおかしているといわねばなるまい。私はむしろその勇氣に敬服しこれだけの想像力をはたかせる彼の自由闊達な心構えになにはともあれ脱帽せざるをえないのである。この勇氣と飛躍をわれわれはみならうべきではなからうか……

私の第2の強い印象は彼の成因論の生れ方である。彼はダイヤモンドという小さな結晶の中にふくまれているおいたちを示すキーコードをたねんにときほぐしてゆくことによってこの成因論に到達した。キーコードになったものは転位や不純物結晶の形や表面構造あるいは結晶内の累帯構造などである。いわば結晶の不完全性であり理想状態からのずれである。これが一方でダイヤモンドの物理的な性質に決定的な役割を果たし一方で結晶のおいたちをさぐる上で最も大事なキーコードの役割を果たしていたことは今までの記述で十分理解していただけたことと思う。結晶のおいたちと性質とは互に深くむすびついているのである。

フランクの成因論が生れてきた過程をみると私にはそこに今まで余り縁のなかつた固体物理学と地球科学との間のみごとな橋渡しをみる思いがするのである。ここに地球科学の新しい進み方の一つの方向を感じるのには私1人であろうか。

付録 フランクの成因論での計算の基礎

(F. C. Frank, Defects in diamonds, in Science and Technology of Industrial Diamonds (J. Burls Ed.) I. D. I. B, London, 1967 より翻訳)

1. マグマが上昇する際の温度・圧力変化と

その固溶体成分の拡散に対する影響

温度 T 圧力 P が同時に変化するとき拡散係数 D に対する圧力の影響の方が温度の影響よりも強くなるための条件は次のようにあらわされる。

$$-\delta \log D / \delta p > (\delta \log D / \delta T) (dT / dp) \quad (1)$$

$$\text{この式で } \delta \log D / \delta p = -V_D / kT \quad (2)$$

$$\delta \log D / \delta T = (U_D + PV_D) / kT^2 \quad (3)$$

であり U_D は活性化エネルギー V_D はダイヤモンド中の拡散に対する活性化体積である。

dT/dp を相変態をともしなわれない可逆的な断熱膨脹による温度変化とすると

$$(\delta T/\delta p)_s = (\delta V/\delta S)_p = \alpha T/\rho C_p \tag{4}$$

この式で α 体積熱膨脹係数
 ρ 密度
 C_p 一定圧での比熱

であり これらの値は変化中の全物質に対する平均値である。

したがって条件(1)は

$$V_D > (U_D + p V_D) \alpha / \rho C_p \tag{5}$$

$$\text{ないしは } U_D < p V_D \frac{(\rho C_p - 1)}{\alpha p} \tag{6}$$

となる

$$\begin{aligned} \rho &\sim 4\text{gm/cm}^3 & C_p &\sim 10^7\text{erg/gm deg} \\ \alpha &\sim 10^{-5}\text{ deg}^{-1} & p &\sim 100\text{ kb} \end{aligned}$$

と仮定すると かつこの第1項は約40になり 第2項は無視できるので 上の条件は

$$U_D < V_D \rho C_p / \alpha \tag{7}$$

となる。ここで 上の見積りと $V_D = 3 \sim 4\text{ cm}^3$ を使うと式の右辺は $3 \sim 4 \times 10^{10}\text{ erg}$ ないしは $12 \sim 16\text{ eV}$ となる。これで条件はよく満足されるであろう。

一方 固相と液相の混合物であるマグマ中では 温度は圧力溶融法則 (Pressure melting law) にしたがって変わる。

すなわち

$$dT/dp = dV_f/dS_f$$

ここで dV_f と dS_f はわずかに溶融物が増えたときの体積とエントロピーの増加で この値は相変化を伴わないときの $(\delta T/\delta p)_s$ よりも大きいと見積ることができる(たとえば $dS_f \sim 2R = 16.8 \times 10^7\text{ erg/gm atom deg}$ $dV_f \sim \text{gm atom}$ あたりの体積の $1/20$ あるいは平均の原子量24と 密度4に対して 0.3 cm^3 ; これらの値から dV_f/dS_f は約 2 deg/Kb ; 一方上の見積りを使うと $T = 2,000\text{ K}$ での $\alpha T/\rho C_p$ は 0.5 deg/Kb である)

したがって条件(1)はマグマ中でのダイヤモンドの上昇に対しては満足されないであろう。

式(4)を導きだした仮定として 膨脹中の物質の中に摩擦がないということが前提になっている。膨脹による仕事はすべてたとえば地表をもちあげるような外部的な仕事に消費されるかそうでなければカイネティックなエネルギーとして転換される。(音速に近い流速がつけられない限り無視できる程度まで)。

膨脹の仕事量の1部は流体摩擦として内部的に消費されて熱を発生するであろう。仕事量の全部が内部的に消費される極限の場合には 等エンタルピー膨脹となる。この場合

$$\begin{aligned} (\delta T/\delta p)_H &= \frac{1}{-C_p} \left[v - T \left(\frac{\delta v}{\delta T} \right)_p \right] \\ &= \frac{-1}{\rho C_p} (1 - \alpha T) \end{aligned} \tag{8}$$

ここで かつこの第2項は無視できる補正である。したがって等エンタルピー膨脹では 圧力降下に伴って 25 deg/Kb の程度で温度が上昇する。

膨脹の仕事量の1部が内部的に 1部が外部的に消費されるには弱い断熱冷却と強い等エンタルピー加熱の両極端の中間条件がえられ 圧力降下に伴う温度上昇では 拡散係数は実質的に増加する。

マグマ中での等エンタルピー膨脹では 圧力溶融法則に従って温度が降下する。そして式(8)による $C_p dT$ としてあらわれる熱は 固相を次々に溶解するための潜熱として吸収され

てゆく したがって近似的には 次の等エンタルピー的圧力降下に対してマグマは完全に溶解し 100%固相から100%液相へと変わる。

$$\begin{aligned} d\rho &= -T^4 S_f C_p (\delta T/\delta p)_H \\ &\sim \rho T^4 S_f \end{aligned}$$

これは50Kbのオーダーで 約140kmの深さの減少($T^4 S_f/g$)に相応している。

2 析出物の溶解の熱力学

析出物と平衡状態にある固溶液中の原子の単位体積あたりの数を N_s とすると 温度・圧力の同時的な変化による N_s の変化は

$$d \log_e N_s = \frac{-V_s}{KT} dp + \frac{U_s + p V_s}{KT^2} dT$$

であらわせる。ここで V_s は析出物から1個の原子が離れて固溶液に移るときの体積の増加 U_s はエネルギーの増加である。したがって

$$\frac{d \log_e N_s}{dp} = \frac{1}{kT^2} \frac{dT}{dp} (U_s + p V_s - T V_s \frac{dp}{dT})$$

$$\text{もし } U_s > \left(1 - \frac{p}{T} \frac{dT}{dp}\right) T V_s \frac{dp}{dT}$$

であれば 上式は正の値である。

温度が約 500 K 以上の温度に対しては ダイヤモンド-石墨の安定領域に関するベルマン・シモンの曲線は 原点からみてほとんど直線的になるから この直線にしたがった温度・圧力の増加に対して 上式のかつこの係数はほとんど0になりしたがって U_s が正の値であれば V_s の大きさに無関係に溶解度が増加することがわかる。

ラングが提唱しているように (連載8参照) ダイヤモンド中のチッ素の薄板の構造が 1コの炭素を2コのチッ素で置換しているような構造であり かつ溶解しているチッ素が置換型であるとする これからチッ素原子が溶解するためには2コのチッ素原子の溶解の度に 1コの空孔がつけられねばならない。この結果 第1次近似として $a_0^2/16$ のチッ素原子ごとに1コの体積増加が起こる。したがって とり除かれたチッ素原子ごとに チッ素の薄板は

$$\frac{1}{2} (a_0^2/2) a_0 l_s = a_0^3/12$$

だけ収縮する。これから全体としては $V_s = -a_0^3/48 = -10^{-24}\text{ cm}^3$ ないしは 1 gm atom 毎に -0.6 cm^3 の収縮が起こることがわかる。これは0に近くなるか あるいは溶解チッ素原子のまわりでの膨脹の結果として サインが逆になる可能性がある。しかし 一般的には小さい負の値の方が可能性が高いであろう。もしそうだとすると ダイヤモンドの安定をつくるのに必要な圧力以上の圧力下では 平衡に関する限り 析出物を溶解して拡散状態にしてしまうであろう。しかし 同時に拡散を妨害することによって平衡に到達しないようにする傾向がでくことも疑ない。もし V_s が 1 gm atom あたり -0.6 cm^3 とすると $2,000\text{ K}$ 100 Kb の条件下では $\exp(0.35) = 1.4$ の小さなファクターで溶解度が強くなる。

3 噴出の流体力学

まわりよりも密度が 4ρ だけ小さいメルトがマグマの垂直な長い柱に対して流体力学的にきいてくる圧力勾配は

$$\frac{dp}{dz} = g 4\rho$$

であらわされる。 $4\rho = 0.1\text{ gm/cm}^3$ の場合 これは 10 Kb/km

となる。この圧力勾配は 流れの平均速度 q を 次のごとく維持することができる。

$$g4\rho = (\lambda/4r)\rho q^2$$

ここで ρ はメルトあるいはマグマの密度 λ は流体力学的な抵抗係数で これは直径1の円筒の長さの中での圧力のロスを速度に対応するよみ点における圧力の値で割った値に等しい数である。

レイノルズ数と壁のあらさに関して対数的にのみ変化する λ の値は 円筒壁の種々の段階のあらさに対して またレイノルズ数 $R = 2rq/\nu$ (ν はカイネマティックな粘性) の $10^3 \sim 2 \times 10^6$ の値の範囲内に対して 0.01~0.06の値をとり (Prandtl: Essentials of Fluid Dynamics, Blackie, 1952, Fig 3.46 p 165) したがって 便宜的に 0.025 という中間値をとって 量の見積りとすることができる。

したがって平衡速度は $q = \left(\frac{4rg4\rho}{\lambda\rho} \right)^{1/2}$ で与えられる。

$\lambda = 1/40$ $4\rho/\rho = 1/20$ とすると

$$q \sim 90r^{1/2} \text{ cm/sec} = 3.24r^{1/2} \text{ km/hr}$$

となる。ここで r は cm であらわされる。

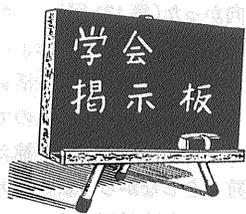
したがって 半径10mのパイプの流速は 約 100km/hr

となる。この場合レイノルズ数 R は $5.6 \times 10^5 \nu^{-1}$

したがって 乱流条件であり 量のオーダーの見積りとしてはかなりよい近似のこの式は $\nu < 500$ とすると ν の値に対して 敏感でなくなる。このようなパイプからの運搬速度は約 0.03 km³/hr となり ほぼ $r^{2/3}$ の割合で半径の増加に応じて増加する。

(つづく)

(筆者は鉱石課長)



・日本質量分析学会

1. 昭和44年9月8日 (月)~12日(金)
2. 質量分析国際会議
3. 京都市左京区宝池 国立京都国際会館
Tel: (075)791-3111
4. 日本質量分析学会
5. 大阪府豊中市待兼町1-1

質量分析学会国際会議事務局 緒方健一

Tel. (0727) 61-1381(内線2460)

(ISSMFE)

5. 日本ユネスコ国内委員会事務局科学課
地盤沈下に関する国際シンポジウム係
東京都千代田区霞ヶ関3-2-2 文部省内
Tel. (03) 581-4211(内線548)

・日本地理学会

1. 昭和44年10月9日(木)~12日(日)
2. 日本地理学会1969年秋季学術大会
3. 宮城教育大学 仙台市荒巻字青葉 Tel. (0222) 22-1021
4. 日本地理学会
5. 東京都文京区本郷7-3
東京大学理学部地理学教室 西川 治
Tel. (03) 812-2111(内線3288)

・地学団体研究会

1. 昭和44年8月8日(金)~10日(日)
2. 地学団体研究会第23回総会
3. 北海道大学教養学部 札幌市北八条西
Tel. (0122) 71-2111
4. 地学団体研究会
5. 札幌市北八条西
北海道大学教養学部内 地学団体研究会第23回総会準備委員会事務局 Tel. (0122) 71-2111(内線2817)

・日本地質学会

1. 昭和44年10月11日(土)~13日(月) 講演会
14日(火)~16日(木) 見学会
2. 日本地質学会秋季学術大会及び総会
3. 新潟大学 新潟市西大畑町
4. 日本地質学会
5. 新潟市西大畑町
新潟大学理学部地質学教室 島津光夫 Tel. (0252) 23-6161

・日本鉱業会・物理探鉱技術協会

1. 昭和44年9月13日(土)~15日(月) 分科研究会
16日(火)~17日(水) 見学会
2. 昭和44年度鉱業関係学協会合同秋季大会
3. 東北大学工学部 仙台市荒巻字青葉
Tel. (0222) 22-1800
4. 日本鉱業会・物理探鉱技術協会・全国炭鉱技術会・パクリアリーチング研究会
5. 東京都中央区銀座西8-7
日本鉱業会(須田) Tel. (03) 572-5091

・日本原子力学会

1. 昭和44年8月4日(月)~5日(火)
2. 第8回資源探査現地討論会
3. 山口市 県立山口博物館
4. 日本原子力学会
5. 鳥取県倉吉市 動燃事業団 倉吉出張所総務係
Tel. (08582) 2-2131

・国際水文学会・日本ユネスコ国内委員会

1. 昭和44年9月17日(水)~22日(月)
2. 地盤沈下に関する国際シンポジウム
3. 赤坂プリンスホテル 東京都千代田区紀尾井町1
Tel. (03) 262-5151
4. 国際水文学会(IASH)・日本ユネスコ国内委員会・東京都後援 ユネスコ・日本学術会議・国際土質基礎工学会

・日本岩石鉱物特殊技術研究会

1. 昭和44年7月28日(月)~30日(水)
2. 第13回研究発表会(金属 非金属 構造地質 耐火物等の薄片 研磨片の作成に関する講演会)
3. 秋田大学鉱山学部鉱山地質学科教室(秋田市手形)
4. 日本岩石鉱物特殊技術研究会
5. 川崎市久本135 地質調査所内
Tel. (044) 86-7131(内線211)

[注] 1. 開催年月 2. 会合名 3. 会場
4. 主催者 5. 連絡先(掲載順位は原稿到着順)