

高温・高圧のはなし

(鉱物合成の歴史と最近の地球科学の知識)

⑩

針谷 宥

20 高圧下における造岩鉱物の熔融

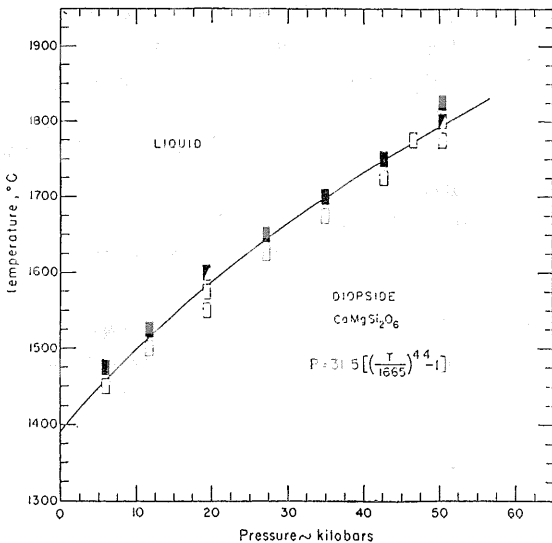
マグマの成因をしるのにもっともよい方法は マントルの上部を構成しているとおもわれる物質を いろいろな温度圧力下で熔融させて推定することである。しかしこの推定方法にはいろいろな困難な問題をふくんでいる。現在は マントル上部に存在するとおもわれる鉱物の高圧下の熔融実験、岩石の熔融実験や、2, 3の簡単な系での結晶と液との平衡関係などをもとにして推論している。ここではおもな造岩鉱物の高圧下での熔融関係とそれにまつわる地球内部の温度をみてみよう。造岩鉱物の高圧下における熔融実験は多くおこなわれてきている。まず最初にとりあげられたのは ダイオプサイドである。1952年ヨーダー(H. S. YODER, Jr)は合成された試料の融点変化を 5kb までとめた。そして熔融点の温度 圧力変化は 次のような式であらわされることをしめた。

$$T(^{\circ}\text{C})=1,391.5+0.01297P(\text{bars})$$

そのボイド (F. R. BOYD) とイングランド (J. L. ENGLAND) は、1958年に 10~30kb まで、また1961年には50kbまでのデータをえている。第1図はそのデータを示したものである。ごく最近1969年にウィリアムス (D. W. WILLIAMS) とケネディー (G. C. KENNEDY)

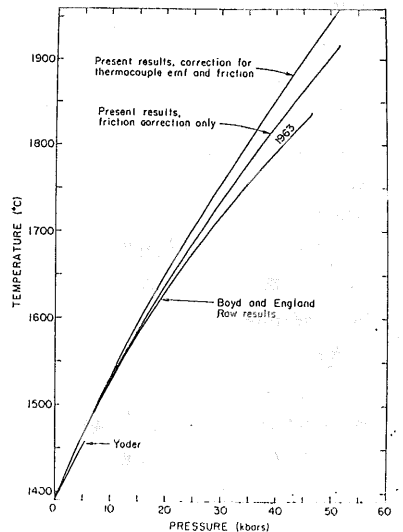
は再びこの鉱物の高圧下での熔融点変化を測定し、圧力較正と熱電対の起電力較正を正確におこない、第2図にみられらようにボイド (F. R. BOYD) とイングランド (J. L. ENGLAND) のデータより、高温側にずれた曲線をえている。

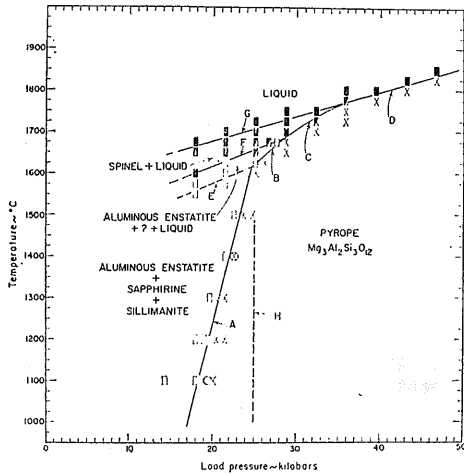
高圧下で安定なガーネットの1種であるパイロープについては、1962年やはりボイド (F. R. BOYD) とイングランド (J. L. ENGLAND) によって 50kb 近くまでおこなわれた。また彼等はエンスタタイトの熔融実験も 30kbまでおこなった。これらの結果を第3図と第4図にしめす。パイロープとエンスタタイトの融点変化はほとんど直線に近く、 dT/dP の値はそれぞれ $14.1^{\circ}\text{C}/\text{kb}$ および $9.5^{\circ}\text{C}/\text{kb}$ となる。ここで興味があるのはエンスタタイトが 6kb 以上の圧力では分解熔融をせずに直接液になることを見出した。このことはすでに1954年フェルフォージェン (J. VERHOOGEN) やその他の人々によって予想されていたが、彼等によって実証されたわけである。ジェダイトについては、1964年ベル (P. M. BELL) によって 50kbまでのデータがしめされたが、1970年ウィリアムス (D. W. WILLIAMS) とケネディー (G. C. KENNEDY) によって再検討がなされ、第5図にみられらように、ベル (P. M. BELL) のデータよりわずかに高温側にずれた曲線をえている。長石についてはすでにのべたので、ここではあらためてのべない。



第1図
ボイドとイングランドによるダイオプサイドの高圧下での融解曲線

第2図
ウィリアムスとケネディーによるダイオプサイドの融解曲線 比較のため1952年のヨーダーのデータとボイド、イングランドのデータを示してある





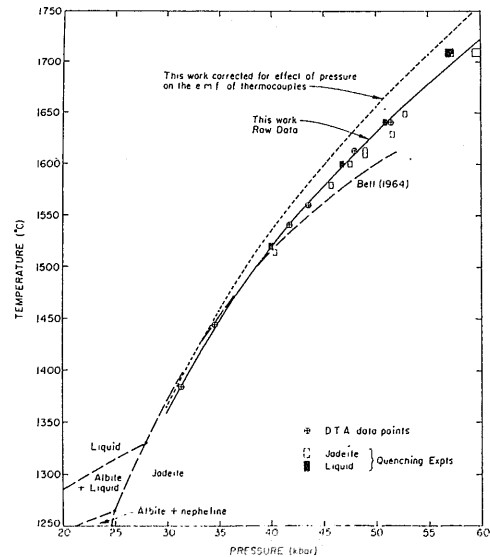
第3図 パイロプの安定領域と融解曲線

さてマントル上部における他の主要鉱物であるオリピンの熔融実験は 高圧下で非常な高温を必要とする。1964年ディビス (B. T. C. DAVIS) とイングランド (J. L. ENGLAND) は 50kb までの Mg-オリピンの融点曲線をもとめ ほとんど直線的に変化することをみだし つぎのような式であたえられることを示した(第6図)。

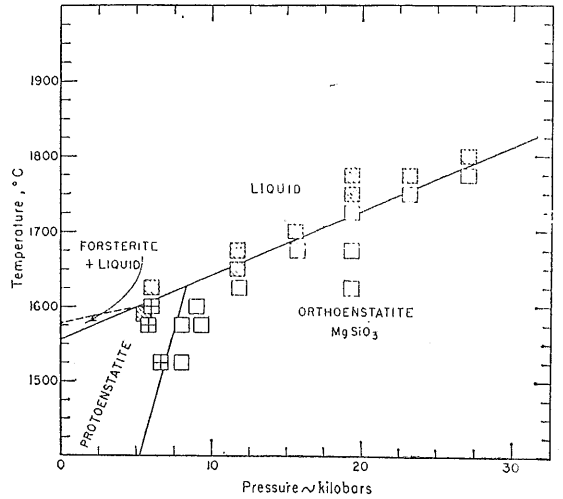
$$T(^{\circ}\text{C}) = 4.77P(\text{kb}) + 1,898$$

一方 Fe の端成分ファイアライトについては 1967年 スー (L. C. Hsu) によって検討され 融解曲線は

$$T(^{\circ}\text{C}) = 1,205 + 4.85P(\text{kb})$$



第5図 ジェダイトの融解曲線 ベルの1964年のデータもしめしてある

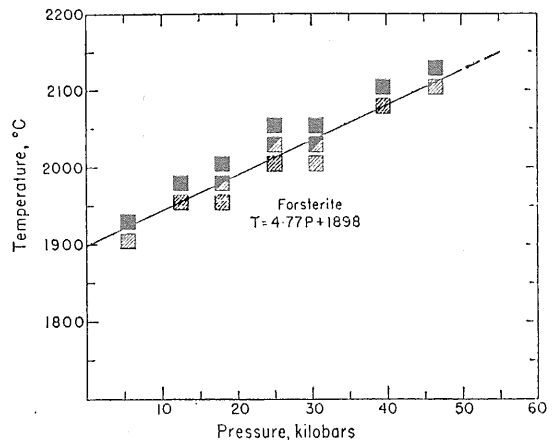


第4図 エンスタタイトの融解曲線

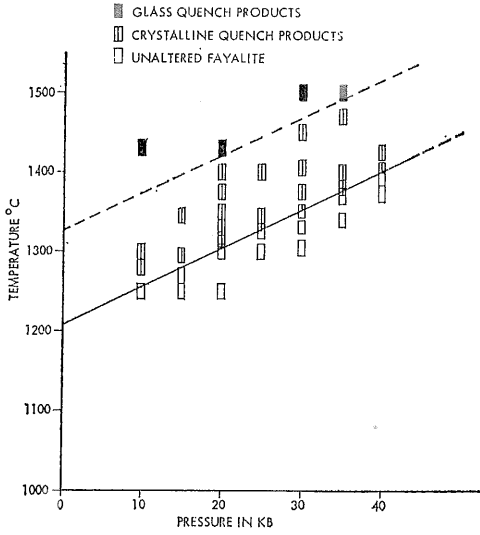
であたえられることをしめた。この曲線の様子は第7図にみられるとおりで フォルスティライトよりもわずかに急傾斜である。

さて一般に水が存在すると 鉱物の融点は低下することが知られている。マントル上部に水が存在するらしいことはすでにのべた。そこで水の存在するもとの鉱物の融点の測定も重要な意味をもつことになる。そこで多くの研究者によって 水を含む高圧下での数種の鉱物についてのデータが発表されている。2, 3の鉱物についてはすでに前にのべてあるので 他のデータをまとめて第8図にしめておいた。この図から水の存在下では大きく融点が低下することがわかる。

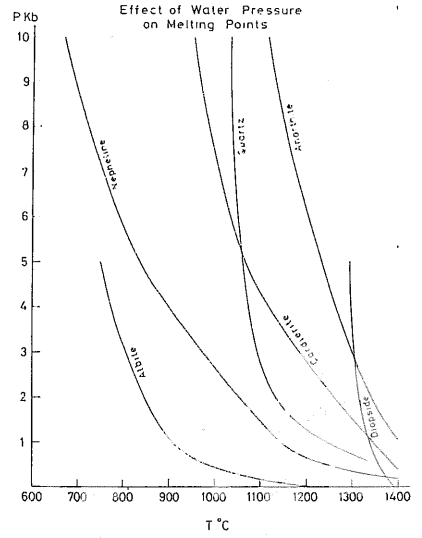
マントルを構成しているのは いままでのべてきたような鉱物の集合物質である。鉱物の熔融実験からのみでマグマの成因を推定することはできない。そこで一方では岩石の高圧下の熔融実験もおこなわれている。



第6図 フォルスティライトの高圧下での融解曲線



第7図
ファイアライトの融解
曲線



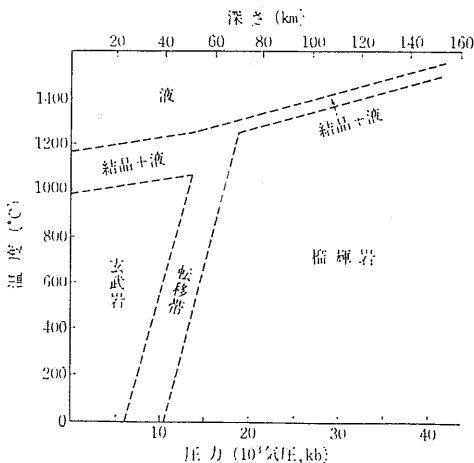
第8図
2, 3の珪酸塩鉱物の
融解曲線におよぼす水
の圧力の影響

そこでヨーダー (H. S. YODER JR.) とティレー (C. E. TILLEY) による玄武岩の高圧下での熔融を示しておこう。第9図にみられるように 10kb で 1,000°C から熔融しはじめ 約 1,200°C で完全にとける。また彼等は玄武岩の高圧相であるエクロジャイトの熔融実験を 20kb 30kb でおこない 熔融温度の範囲は玄武岩のそれより小さく約60°Cであることをみだした。この図はまた玄武岩とエクロジャイトの安定領域を示している。

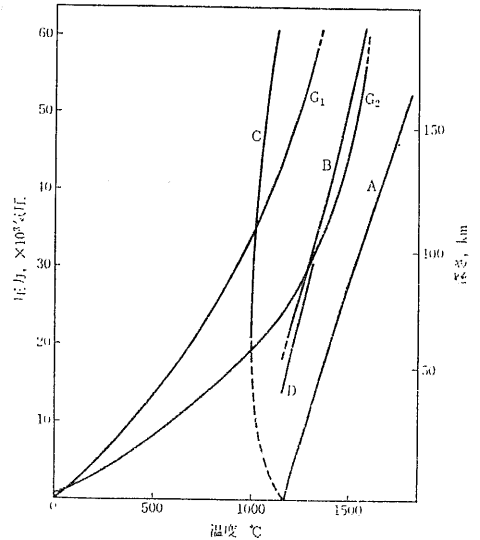
水が存在すると岩石の融点も低下する。ではどのくらい低下するのであろうか。最近上部マントルの物質と考えられるものについて 水の存在下で熔融実験がなされた。1つは久城 庄野 秋本 (1968年) によってなされたハワイのオアフ島の火山岩中に産するカンラン岩包含物で このカンラン岩は上部マントルを構成している岩石と考えられている。もう1つはグリーン (D.

H. GREEN) によって1968年に仮想のマントル物質組成「パイロライト」についてである。これらの結果をまとめて第10図にしめす。これらの曲線はいずれも物質が熔融しはじめる温度をしめすものである。水の圧力と全圧力の差によっても熔融開始温度は異なる。水の圧力≒全圧のときは 無水にくらべて300~700°C 水の圧力<全圧の場合は 200°C 低下することがわかる。

さて鉱物や岩石ばかりでなく 多く物質についての高圧下における融点測定がおこなわれている。そのなかで われわれ地球科学をまなぶものにとってもっとも興味あるのは Fe の融点変化である。というのは地球の

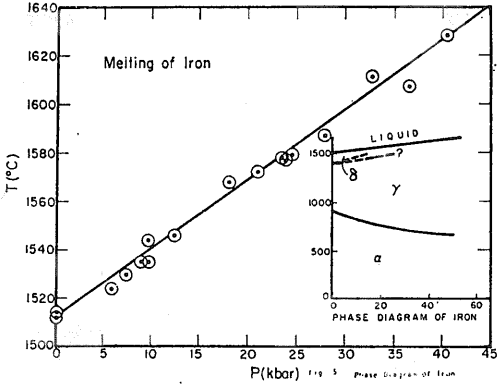


第9図 高圧下における玄武岩—エクロジャイト転移と融解曲線



第10図 カンラン岩包含物およびパイロライト組成の熔解開始曲線

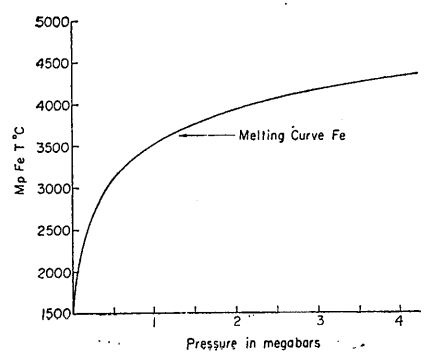
- A: カンラン岩包含物 無水
- B: カンラン岩包含物 水の圧力<全圧
- C: カンラン岩包含物 水の圧力≒全圧
- D: パイロライト組成 水の圧力<全圧
- G₁: 大陸地殻上部マントルの温度分布
- G₂: 海洋地殻上部マントルの温度分布



第11図 鉄のmelting curve

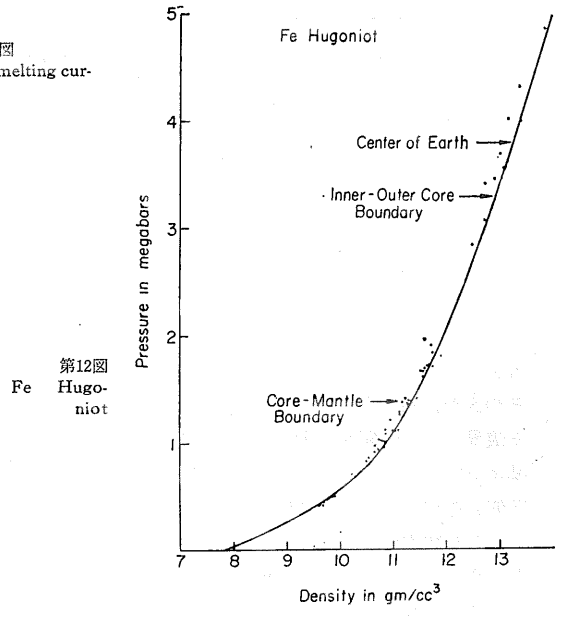
中心核は Fe でできていると推定されるからである。Fe だけでなく鉄—ニッケル合金であるらしいと考えられていたが 近年いろいろなデータから 15%Si—Fe 合金とした方が核にもっとも近い圧力密度分布が与えられらことがしられてきた。このような物質の融解曲線が決定されれば 地球のマントルと核 または外核と内核の境界における温度を直接きめる手がかりになるであろう。Fe の高圧下における融解曲線はいままで多くのデータがあるが 最近のハイギンス (G. HIGGINS) とケネデー (G. C. KENNEDY) の論文からのデータを参考にして 地球深部の温度を考えてみよう(1971年の論文)。近年衝撃波をもちいて数メガバール (Mb) の実験がおこなわれるようになってきた。地球中心部での圧力は 4Mb程度であるので この衝撃波実験は 地球科学的な問題として核の物性を知る唯一の実験手段といつてよいであろう。

およそ 50kb 以下で Fe の融点と圧力との関係は 第11図にみられるように ほとんど直線的に変化する。しかしもっとも高圧のもとではそうにはならないであろうことが予想される。第12図は Fe の衝撃波 Hugoniot である。このようないろいろな実験データや外挿法によって Fe の融解曲線は第13図のようにしめされる。これをもとにして地球内部の温度を推定してみ



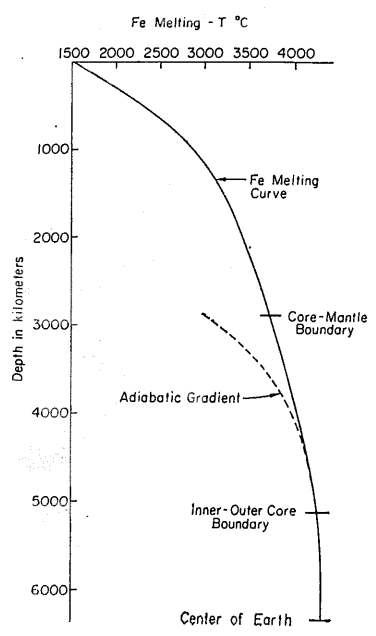
第13図 数メガバール下の Fe の Melting curve

第14図 Fe の Melting point から推定した地球内部の温度



第12図 Fe Hugoniot

よう。第14図は縦軸に深さを 横軸に温度をとってある。内核と外核の境界は 深さにして 5,100km 圧力は 3.3Mb とみつもられているので 温度は 4,250°C になる。核とマントルの境界は 2,900km 温度3,750°C と見積られる。両者の差はおよそ 500°C であることがわかる。これはあくまでも純粋な Fe 金属の融点変化から推定したものである。まえにものべたように Si—Fe 合金か Ni—Fe 合金として中心核を考えれば 温度はこれよりも低いと考えてさしつかえないであろう。



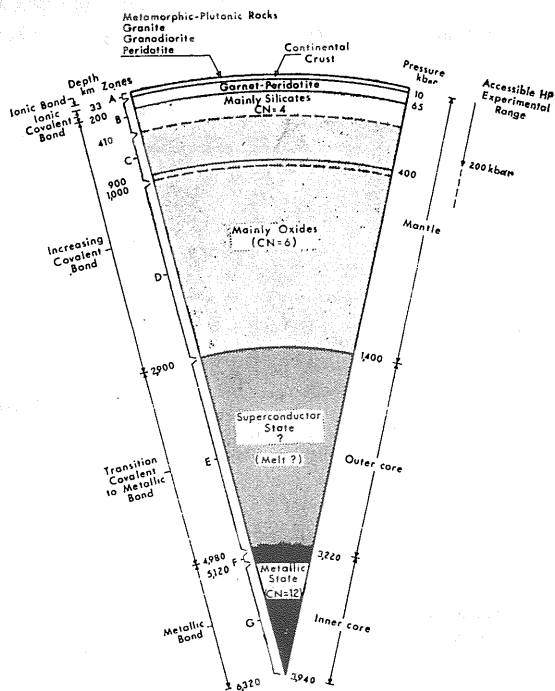
21 地球内部の鉱物組成

さて今までがながと 高压下の鉱物の転移や平衡関係をながめてきた。このような高压実験のデータが地球内部の知識をえるのにどれだけ有効であろうか？ そんな観点から少し地球内部のことにふれてみよう。

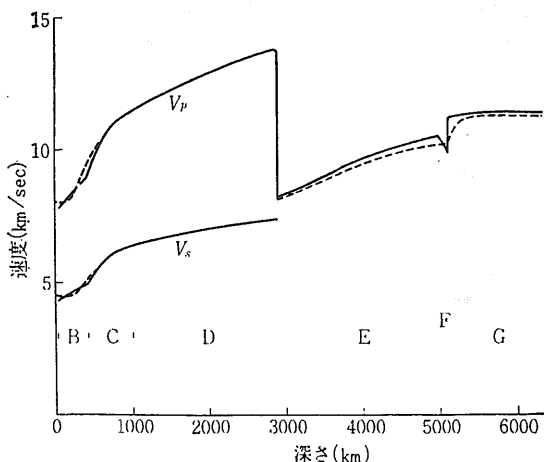
第15図は最近考えられている地球内部のモデルである。このようなモデルをつくるのに もっとも基本となる資料は 地球内部を伝わる弾性波の速度分布である。各深さにおける縦波 横波の速度 V_p V_s は第16図のようにえられており プレン (K. E. BULLEN) は地球内部をかりに7つの部分にわけてA B C……と命名しその区分が図の中にしめしてある。Aは地殻とよばれる表層で その厚さは大陸部分で35km 海洋部分で5kmである。圧力にしておよそ10kb 変成岩 深成岩 花崗岩やペリドタイトで構成されており ionic bondをもった珪酸塩鉱物とその主体となっている。410kmの深さまでB層とよび A層とB層の境は 1909年クロアチアの地震学者モホロビッチ (A. Моновоичић) によってバルカン地震の地震現象を調べた結果 この間に不連続面のあるところを見いだした。この不連続面より浅いところでは地震波速度がそれより深いところよりおそく また変化にとんでいる。モホロビッチ不連続面でのもっとも確からしい温度は 大陸地域で500~600℃ 大洋地域で150~300℃である。モホ面の上下では地震波をつたえる媒質が その物性を不連続にかえていることを意味するにちがいない。そこでモホ面は異なる

化学組成をもつ物質の境界であるか この境界面で物質は相転移をおこしているのかいづれかであろう。しかし不明な点が多い。現在われわれがしている岩石と対応させるとすれば エクロジャイトあるいはカンラン岩が最も適当であるように考えられる。もしマントル最上部の物質がエクロジャイトだとすると 第9図にみられるように高压下で玄武岩からエクロジャイトに転移するためには 圧力にして6~8kb位の漸移帯が存在することが高压実験から知られている。しかしモホ面はたいへんシャープに変わっているので 漸移帯が存在するとは考えにくい。しかし北米大陸の太平洋岸のある部分ではモホ面がはっきりしない。そのようなところではこのような漸移帯が存在し マントル最上部ではエクロジャイト様物質が存在するのかもしれない。また一方化学組成が変化する境界面だとすると なぜこのように急激にモホ面を境にして組成変化がおこるのであるか？ 一応第15図では garnet-peridotite と考えておく。

B層のもう1つの特徴は 玄武岩マグマの起源がこの層にあるらしいことである。圧力下での融点1,200°~1,300℃であり マントル上部の温度が玄武岩の融点にもっとも近づく深さをもとめると 50~150km位となる。およそこの位の深さで 地震波の低速度層が存在することが知られている。この低速度層は何を意味しているのでしょうか？ 低速度層は部分的に熔融した玄武岩マグマのたまりと考えることができる。そうだとすると火山作用の起源はこの低速度層にあると考えられる。このようにB層はひじょうに著しい不均質性がある。これは本質的な物質組成の変化と関係しているのではなく 高温 高压下で二次的な組成変化 あるいは相変化によるものだと考えられている。いずれにせよB層のもっとも確からしい初生的岩石は あきらかにザクロ石

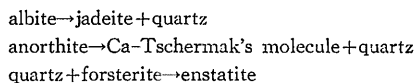


第15図 地球内部の構造

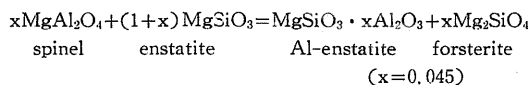


第16図 地球内部における弾性波の速度分布

うに圧力の増加と共に



となり jadeite Ca-Tschermak's molecule は pyroxene のなかに solid solution として入ってしまうので 高圧下で斜長石は安定に存在しえない。そこで plagioclase pyrolite はその産出が限定され normal oceanic region や地殻のうすい 高い熱流量をもつ local な部分にみられるであろう。すなわち日本や北米西海岸の1部に存在することが期待される。斜長石が高圧下で輝石に相転移すると pyroxene pyrolite の安定領域になる。この領域は高温側と低温側の2つの領域にわけられる。第18図のBC以下ではスピネルが形成される。温度の増加と共にスピネルは減少し BC line で

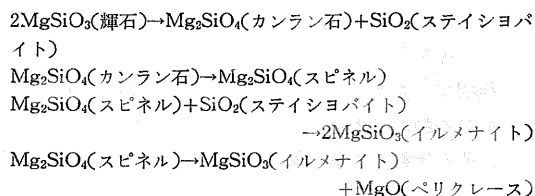


の反応でスピネルは消失する。この平衡関係は1964年マックグレゴール (I. D. MacGREGOR) によって研究されたものである。pyroxene pyrolite の安定領域は130~140km まで広がる。そこで第17図にみられるように ocean や normal continent の下部に存在し もっと深いところでは garnet があらわれて garnet pyrolite となる。この pyrolite は相当に広い安定領域をもっており この相集合の olivine と low Al pyroxene は400 km の深さまでの高温高圧状態で安定であり また garnet は denser phase に転移するが やはり相当の高圧下で安定であるので garnet pyrolite は地下 400km すなわちB層の下部をしめているものであろう。このようなモデルによって一応観測される地震波に説明をあたえることができる。

一方マクドナルド (G. J. F. MacDonald) は 主として熱流量のデータと熱源の分布についての仮説から出発して 上部マントルはカンラン岩5:玄武岩1の組成の岩石からなると考えた。彼はカンラン岩の下にはダンカンラン岩を考えた。そうするとマクドナルド (G. J. F. MacDONALD) の上部マントルは リングウッド (A. E. Ringwood) のそれよりも若干塩基性になる。

B層についてながながとのべてきた。まだいろいろな仮説があるが 最近の高圧実験の成果でずいぶんわしくわかってきている。このことはC層についてもい

るところである。B層よりC層では物質がより密な構造に転移していることは明らかである。すなわちオリビン 輝石などの珪酸塩が 高圧の結果 最密構造をとった酸化物型のスピネルあるいはコランダム構造にだんだんと転移する漸移層と考えられ それが深さにして 410 km から 900km にまでおよぶ。クラーク (S. P. CLACK) やリングウッド (A. E. Ringwood) 等は次のような転移を考えた。



このような転移は深さとともに次第に進行し 密度も 3.2から3.9に増大する。またその結合様式も イオン性の強いものから共有性の強いものへと変わるであろう。また最近実験に成功した 輝石→コランダム型転移はカンラン石→スピネル転移より高圧下でおこると考えられるので C層の下部で実際におこっているであろう。C層の研究は地球についての科学にまったく新しいページを開くものといえる。そして現在の超高压技術はC層の圧力まで発生できるようになっている。われわれはまさにその第1歩をふみだしたといえることができよう。珪酸塩が酸化物型の最密構造にかわる転移はほぼ地下 900km すなわちC層で完了し 以下 2,900km までのD層 すなわち下部マントルでは 主としてスピネル コランダム構造にかわった相であると考えられる。このD層は 1,000~2,900km まで すなわち核との境界までであり 地震波速度は深さとともにゆっくり増大している。この特徴は 同じ組成 同じ状態のものが深さにもなって増大した全圧の効果として完全に解明される。

以上のべたようにマントルが珪酸塩または酸化物を主成分とすることは確からしい。しかしその深部の核をつくっている物質については まだたしかかな答は用意されていない。2,900km より内部は核とよばれ それは外核と内核の2つにわけられる。ブレン (K. E. Bullen) は E F G層とよんだ。さてこの核は横波がとれず かえって強い反射波がみられることなどから液体であろうと推定されている。ただ 5,000km の深さで縦波速度が急にまじっており (第16図) これより内部のいわゆる内核は 固体であろうといわれている。核

を構成する物質がなんであるかという問題は 宇宙化学
 その他の観点からも大へん重要である。 また核物質を
 推定するのに隕石の研究も重要である。 隕石を大きく
 わけると 珪酸塩を主成分とする石質隕石と Fe Ni 合
 金からできている隕鉄とがあることは よく知られてい
 る。 隕石が地球の生成条件にいた条件でできたとすれ
 ば

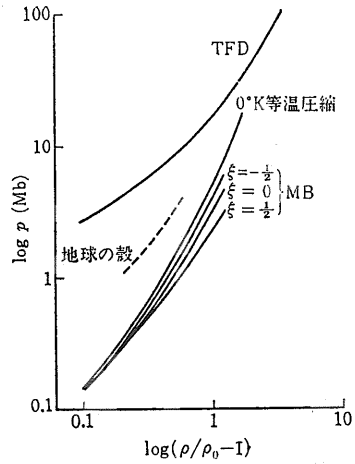
石質隕石 → マントル
 隕鉄 → 核

と対応して考えるのも無理はない。 この考えは必ずし
 もむじゅんしない。 たしかに核の密度 (平均10gr/cm³
 程度) は ある状態方程式にしたがって Fe を核での圧
 力まで圧縮したときの密度に近い。 Feの衝撃波実験の
 計算結果は アルシュラー等 (L. V. AL'TSHULER) によ
 って 第19図に示めされるようになる。 Murnaghan-
 Birch の状態方程式によく沿っていることがわかるが
 さらに 高压の状態 (約 100Mb 以上) では Thomas-
 Fermi-Dirac の量子統計をもちいた状態方程式につな
 がるようにみえる。 図には地球の核での圧力と密度の関
 係がしめされているが 温度の影響を考えても明らかに
 地球の核が Fe だけでできていると考えると重くなりす
 ぎることがわかる。 おそらく他の軽元素と合金をつ
 づいている可能性があるが 事実 最近ソ連とアメリカで
 珪素鉄合金について衝撃波実験がおこなわれ 約15%Si
 -Feがもっとも核に近い圧力密度分布を与えることがし
 めされた。 また隕鉄の中からワイ (C. M. WAI) によ
 って Si-Fe 合金が発見され 核の物質に対する多くの
 インフォメーションがえられるようになってきている。

最近の高压実験は より高い圧力 より高い温度にと
 その技術の進歩はめざましく。 またより一層の地球物理
 学的観測データと相まって 地球深部の知識もより一層
 確実な。 そしてより新しいデータが期待される。 さて
 高压実験の成果は 地球深部の物質の状態の知識ばかり
 でなく 地殻における鉱物の平衡関係やその温度 圧力
 に対する共生関係の知識を大いに提きょうしてくれる。
 このことは今までにのべた高压下における鉱物の平衡図
 をみてもらうとよく理解できるであろう。 そこで少し
 変成岩を例にとつてこのことを見てみよう。

22 変成相における鉱物平衡関係

1939年にエスコラ (P. Eskola) は 8つのおもな変
 成相を確立した。 この8つの変成相によって 地球上
 のおもな変成岩の多様性の様子が かなり正しくしめさ



第19図
 衝撃波実験から求めた Fe
 の 0°K 等温圧縮曲線
 MB: Murnaghan-Birch
 TFD: Thomas-Fermi-
 Dirac

れている。 ここでは最近のウィングラー (H. G. F.
 WINKLER) の著書と ターナー (F. J. TURNER) の著書
 から 温度 圧力に対する変成相の分類をながめてみよ
 う。 ウィングラー (H. G. F. WINKLER) は 次のよ
 うにしめしている。

I. 浅い接触変成作用

A. 1,500bars 以下の非常に低い流体圧 (1)~(4)へと温度の上昇をしめす。

- (1) albite-epidote-hornfels facies
- (2) hornblende-hornfels facies
- (3) K-feldspar-cordierite-hornfels facies
 (pyroxene-hornfels とよんでいる)
- (4) sanidinite facies

II. 広域な動力熱変成作用

A. 2,000~6,000bars までの低い圧力か 中程度の圧力の
 場合 P_T~P_S (1)~(2)と温度の上昇をしめす。

- (1) green schist facies
- (2) cordierite-amphibolite facies

B. 6,000bars 以上の非常に高い圧力 P_T≅P_S (1)~(3) へ
 と温度の上昇をしめす。

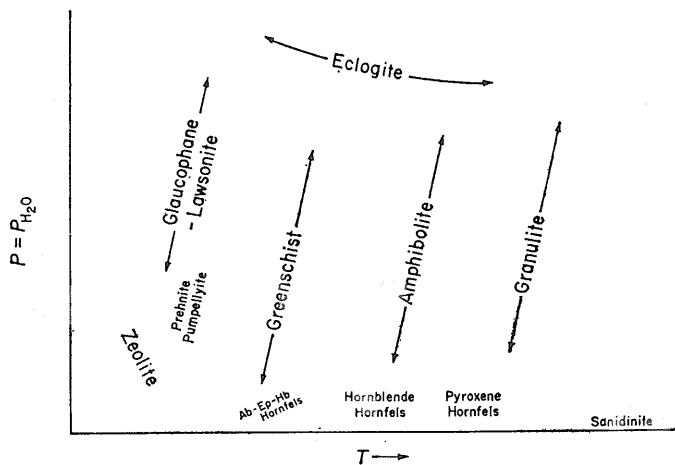
- (1) green schist facies (時に glaucophanitic green
 schist facies)
- (2) almandine-amphibolite facies
- (3) 特に高温で P_{H2O}≪P_S のとき
 granulite facies

III. 埋没変成作用

A. 低温 中圧条件 P_T≅P_S

- (1) laumontite-prehnite-quartz facies (普通 zeolitic
 facies ともよんでいる)
- (2) pumpellyite-prehnite-quartz facies (普通 prehnite
 -pumpellyite-metagreywacke facies とよんでい
 る)

(1)の facies より(2)の方がやや温度が高い。



第20図 変成相と温度圧力との関係

また ターナー (F. J. TURNER) は

- A. 低圧相
 1. albite—epidote—hornfels
 2. hornblende—hornfels
 3. pyroxene—hornfels
 4. sanidinite
- B. 中圧 高压相
 5. zeolite
 6. prehnite—pumpellyite—metagray-wacke
 7. green—schist
 8. amphibolite
 9. granulite
- C. 非常に 高压の条件
 10. glaucophane—lawsonite—schist
 11. eclogite

B. 低い温度 高压かまたは非常に高い圧力条件 $P_T \approx P_S$

- (1) lawsonite—albite facies
 - (2) lawsonite—glaucophane facies (普通に glaucophane—schist facies とよばれているもの)
- (1)より(2)の相が圧力が高い、温度が高くなると glaucophanitic green—schist facies になる。

のように分類している。これらの相の温度と圧力の関係を第20図にしめてある。さて最近の高压実験のデータから もう少しくわしく相平衡をつぎにながめていこう。

(筆者は北海道大学理学部地質学鉱物学教室)



地学と切手



国際地球物理観測年記念切手

P. Q.

1957~58年の国際地球物理観測年を記念した切手は 各国で発行されている。ノルウェーではこの切手として 1957年7月1日に北極にあるスピッツベルゲン (35オーレ) ヤンマイアン (25オーレ) と南極大陸 (65オーレ) がとりあげられている。

ノルウェーは本国でさえも 北緯58度から71度に達する高緯度の国であるが 大西洋をめぐってくるメキシコ湾流に洗われているため 緯度の割には寒くない。

ヤンマイアン島は ノルウェー本土の北端とほぼ同じ緯度の大西洋中央にある火山島で アイスランドより約400km北にある。これはアイスランドと同様 中央大西洋海嶺の頂部をなす火山のひとつで 典型的な楕圓石玄武岩からなっている。この島の南半はややゆるやかな地形であるが 北半には海拔 2,277mのハーコン七世峰がそびえ 頂上には円い火口湖状の部分があり 水の代りに氷がたまっていて 北西側の火口壁が破れ 頂上から海ま

で壮大な氷河が流れ落ちている。溶岩は不整合で上位と下位に分けられ 上位はケラトファイヤー質玄武岩や無斑玄武岩 下位は粗面安山岩や玄武岩が多い。この島には北大西洋の重要な無電基地があり 気象観測や航海・航空ガイドに活躍している。

スピッツベルゲンはノルウェーではスヴァールバルドと呼ばれる。これは北緯77度から80度にわたって分布する2つの大きな島と 無数の小島を含む一群の島々で 第一次世界大戦後 政治的にはノルウェー領と決められたが 領土としては国際領土なので どの国でも利用することが出来る。現在でもノルウェーとソビエトの炭鉱(白亜紀~古第三紀層) イギリスのサテライト追跡ステーション アメリカの石油会社が石油の探査をつづけているという具合である。この島々の東半には 先カンブリア系結晶質基盤が露出し 西半はカレドニア造山帯に属し 西岸沿いに高度変成岩や花崗岩が分布する。このカレドニア変成帯はデボン紀から地塊運動を行ない 中期古生代から新第三紀まで ほぼ完全に連続した地層がゆるやかに褶曲して分布する。これらのうち石炭紀層や白亜紀~古第三紀層には石炭がはさまれ こんな高緯度にも炭坑が開かれている。近年 白亜紀層の砂岩の上に恐竜の足跡が発見されて話題をよんだ。

この島は今世紀はじめまで いくつかの有名な北極探検隊の基地として用いられ ノルウェーは国立極地研究所をもって毎年定期的な調査隊を送って 科学的調査を進めている。島の大部分がこのような科学探検隊によって開かれたので 地名に科学者の名がつけられているものが多い。最高峰ニュートン峰をはじめ ハーカー氷河 エスコラ湾 ゼーダーホルム氷河など 地質学者の名称も各地にみられる。