

地球化学の話

③

高橋 清

II 地球

この数年来 地球の上部マントルの物質を実際に手に入れるためにいわゆる“モホール計画”なるものが実行に移されようとしている。これによると 大洋地域で数千mないしは1万mの試錐を行なうことによって“モホ不連続面”下の上部マントル物質を岩芯として採取することができる。しかし 地球の半径が約6,400kmであることを思いおこしてみると 盲人と象のたとえ話のようなもので 象の表皮をかみそりではがすような仕事にみえる。また時に 玄武岩の溶岩などの中にゼノリス(包有岩塊)として斑れい岩や橄欖岩などの上部マントル物質と思われるものをとりこんでいるが これもせいぜい深くても地下100~200kmのものにすぎない。

このように地球内部の物質は 現実には表面近くでしか採取できないにもかかわらず その内部構造はよく研究され 中学校の教科書にもさま当り前のように 地球の断面図が書かれている。どのような方法で地球内部の構造を推測したのであろうか?

もっとも大きく貢献しているのは 地震波速度の分布だとか 地磁気の経年変化観測などの地球物理学的な方法である。さらに内部の物質の物理的・化学的性質はこれまで2回にわたって述べてきた隕石の研究結果にもとづいている。

最近では 地球内部の温度・圧力条件を超高圧実験技術により再現して 内部物質を推定する研究が次第に進んできており 地球化学者・地球物理学者・岩石学者などが競ってこの問題を追求している。

地球化学の立場としては 地球内部の問題には 隕石の研究や 溶岩の中のゼノリスの研究ばかりでなく 高温高压下での化学平衡・化学反応や地殻とマントルとの元素の分布の研究などの面で 大きく研究分野が開かれてきている。

第1表 地球の基礎的データ

赤道半径	6378.165km
平均半径 (全体積に等しい球の半径)	6371.22km
扁平度	$1/299.2$
質量	$5.9761 \times 10^{27} \text{g}$
自転軸の周りの慣性モーメント	$8.104 \times 10^{44} \text{g} \cdot \text{cm}^2$
自転角速度	$7.292116 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$
平均密度	$5.517 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$

1. 地球についての知識

地球科学にたずさわっている人たちは 常識として地球の半径は約6,400kmであり 密度が5ぐらいであることは知っており また地球の表面から中心に向って 地殻・マントル・コアの三層からなり 卵の殻・白味・黄味と対応できるような層構造をもっている地球を頭に思い浮かべることができる。

なかば常識的になっているこの地球についての知識はどのような方法で得られたものであろうか?

さきに述べたように われわれ人間にとって気の遠くなるように大きな地球の中心に穴を掘って確かめることは到底不可能であるので 内科医が聴診器で診断するように 何らかの方法で地球を表面から診断せねばならない。この方法として大活躍しているのが 地球物理学であり さらに地球の大きさ 形などを知る上に大いに奮闘したのが 測地学である。

最近の人工衛星の観測によると地球は赤道がややふくらんだ回転楕円体で北極がやや突きでて南極が平たい形になっている。地球の基礎的データを 第1表にしめす。第1表で地球の密度は地球の大きさと 天体のまわりをまわっている衛星の運動の観測からえられた質量から計算されたものである。しかし 実測される地球上の岩石の密度は2~3 gr/cm^3 であるので 地球の中味は地表の岩石よりもさらに重い物質がつまっているものと考えられる。これらは地球の自転運動を観測することによって えられた慣性モーメントのデータとも一致する。慣性モーメントは 内部の質量分布と関係があり 中味が重ければ重いほど慣性モーメントは小さくなる。この慣性モーメントの測定は 外的な観測から内部の様子を推定する上に重要なものであり 地球以外の月や他の惑星の内部を知ることができる。重力の分布も同じような意味をもつ。

このようにして 地表を歩きまわり いろいろな観測を行なうことによって 地球についての基礎的データが集められたが われわれがなかば常識として頭の中は画いている地球の内部構造(層構造)はどのようにして推定されたのであろうか? それは地震波の速度の観測である。19世紀後半の完全弾性体の力学の発達から 地球内部に発生した地震からの波動の速度の解析が可能となり これを利用して地球内部の診断がはじまったわけ

である。地震波には速度の異なる縦波(P波; primary wave)と横波(S波; secondary wave)とがあり 次の式で示される。

$$P波: V_p = \left(\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho} \right)^{1/2}$$

$$S波: V_s = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}$$

K: 非圧縮率 μ : 剛性率 ρ : 密度
 $\mu=0$ は流体を意味し $V_s=0$ となる すなわち S波は流体の中は伝わらない

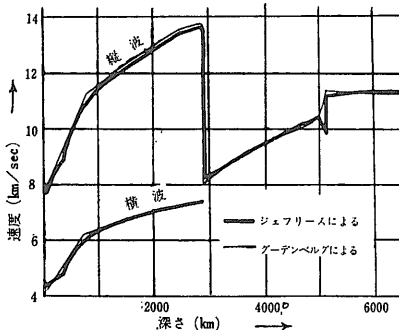
20世紀にはいつて ヨーロッパ各地に地震波の観測所ができ多くの観測が行なわれたが その中でもユーゴスラビアのモホロビッチ(Mohorovičić)は 1909年に地下54km のところに速度の不連続面を見つけた。これが有名なモホロビッチ不連続面あるいはモホ面と呼ばれる地殻マントルの境界面発見の発端である。

地震波速度の分布については数多くの研究があるが その中でもグーテンベルグ(Gutenberg)とリヒター(Richter)の分布と ジェフリース(Jeffreys)とブレン(Bullen)の分布とがよく知られている。第1図はグーテンベルグらの速度分布とジェフリースらのものをしめした。両者の速度分布図はほとんど差はないが 地表から数百 km までのところに多少の差がみられる。これらの速度分布図からわれわれは

- (1) 地表から約2,900 km以深ではS波の速度が0となる すなわち 流体であると推定される
- (2) 地表から5~数10km に地震波速度の不連続が認められる

以上のことから 地表から5~数10km までの領域とそれから約2,900km (正確には2898±4 km)までの領域と それ以深の流体の領域の3層に分けられる構造を推定することができた。これらは普通 地表からみて地殻(crust)・マントル(mantle)・コア(core)と呼ばれている。そしてさきに述べたように地殻とマントルとの境界面のことをモホロビッチ不連続面と呼ぶ。

そして地殻とマントルとは固体であり コアは液体であることが地震波速度の分布から読みとられたわけである。その後 人工地震による地震波速度の詳しい解析が行なわれるよ



第1図 地震波速度と地球の深さとの関係 (坪井忠二編 地球の構成 1960より)

うになってさらに次のような細かい構造がわかってきた。すなわち

- (1) 地殻とマントルの境界面(モホ不連続面)は大陸地域で深く 大洋地域で浅く 平均35kmであることがわかってきた
- (2) コアの内部にもう一つの層があることがわかってきた これによりコアは外核と内核とに分けられる
- (3) 地表から数百 km 付近の異常が目されるようになった 地震波速度の不連続は認められないが 速度の深さによる増加が異常である
- (4) 地表から100~200kmの深さに P波 S波の極小があるように見える グーテンベルグらは第1図で見られるようにその存在を認めており 低速度層と呼ばれている

地球についての基礎的データと地震波速度の解析という主として地球物理学的方法によって 地球の内部構造を大まかながら推測することができたが さて 地球の内部の物質はどのような組成のものであろうか?

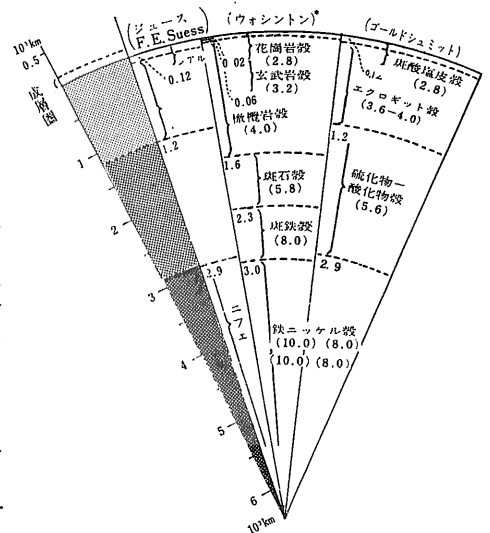
この問題を解く鍵として登場してくるのが これまで2回にわたって解説してきた隕石であり また地球物理学的方法による力学物性 および高温高压実験である。

これらを組み合わせて 多くの地球科学者たちが地球のモデルを発表している。

2. 地球のモデル

(1) 戦前の地球のモデル

わたしが大学に入学する直前 つまり昭和19年に買った「理化学辞典」に地球のモデルとして ジュース(Suess) ゴールドシュミット(Goldschmidt) およびワシントン(Washington)のモデルが掲載されており 地球の構造の項にはこれらをもとにした最新の解説がなされている



第2図 昭和18年版の理化学辞典に掲載された戦前の代表的な地球のモデル

第3図 戦前の理化学辞典の「地球の構造」の解説

ちきゅうのこうぞう 地球の構造 [英 Constitution of the earth] (1) 密度: 地表面近くの地殻を構成する岩石の平均密度は約 2.8 g/cm^3 であるが 気圏を除いた地球全体としての平均密度は 5.52 と推定せられる 従来此事及び他の諸種の事情を綜合して地球は内部に至るに従ひ密度を連続的に増大するとし ルジャンドル* ロッシュ (Roche) ヘルメルト等の推算では夫々中心の密度は 11.0 10.1 11.3 等とせられた 近頃では地震波の観測結果に基づいて密度には地球内部の数箇所で不連続的に増加すると考へられるに至った 例へばヴィーヘルト* は 1400 km の深さ迄は約 3.2 夫以下の所謂核では 8.2 とし 又グーテンベルク* は地表下 60 — 1200 km 間では直線的に増し 2450 km の所で幾分変り 2900 km で飛躍的に其値が 11 となり此処から核となっていると考へたが 之が現在一般に多く採用されている (2) 物質分布: 地球外部の気圏は大気* である(大気の項参照) 地殻の上層は珪酸塩類 硫化物等より成り 内部に至るに従つて密度の大なる鉄 ニッケル等より成ると考へられている (3) 剛性: 地球を構成する物質の剛性は地殻の潮汐現象による鉛直線の変化 地軸の変化(緯度変化*)又は地震波の観測等から求められる 地球全体としての剛性率は 16 — $20 \cdot 10^{14} \text{ c.g.s}$ と推定され鋼鉄の 2 — 3 倍に相当する (4) 温度: 地表下の温度に就ては地中温度の項を見よ 地球生成当時の温度に関してケルヴィン*卿は之を 3900°C と仮定し之が現在迄冷却するには 20 — $40 \cdot 10^6$ 年位を要したと計算したが 此年数は現今では短かすぎると云はれている ジェフリーズ* は地殻表層に含まれる放射性物質からの熱の発生を考慮し 尙種々の仮定の下に地殻生成当時地表では 1200°C 400 km の地下では 1320°C 800 km では 1450°C であつたものが 現在では夫々 0°C 1200°C 1450°C となつたとした

終戦前の地球の構造についての知識がどのようであつたかを知るためにはこれらをながめれば納得できると思う。第2図は理化学辞典の地球のモデルであり 第3図は「地球の構造」の項を写しとつたものである。

ジュースは1909年に地表近くの主として花崗岩質の層を Sal (後に Sial) その下方にあると考へた塩基性・超塩基岩の層を Sima と呼び その下にニッケルと鉄からなる核があると考へて Nife と呼んだ。

1922年にゴールドシュミットは 隕石の研究結果をもとにして 地震波速度の解析結果に合うように 第2図右端のようなモデルを提唱した。すなわち 中心部には鉄隕石と同じようなニッケル鉄 (Fe 90 Ni 8 その他 2%) からなる核があり その外側には隕石のトロイライトと同じような硫化物層 (少し酸化物を含む) が 1700 km の厚さでとりまき さらにその外側には石質隕石に対応する珪酸塩層 地表から 120 km くらいの間は花崗岩や斑岩のような普通の岩石からなる珪酸塩殻からなるとした。ゴールドシュミットのモデルの特色は 厚さ 1700 km にもおよぶ硫化物層を考へたことであるが その後の宇宙の元素存在量のデータから このように厚い硫化物層をつくるほど多量の硫黄は地球には含まれていないと推論され あまり支持されなかつた。アメリ

カのカーネギー研究所のワシントンはアダムス (Adams) やウィリアムソン (Williamson) とともに 1923 — 25 年にゴールドシュミットのモデルよりもさらに忠実に隕石のデータに合わせたモデルを考へた(第2図中)。ゴールドシュミットが硫化物層とした厚い層は 中心より石鉄隕石に対応する斑鉄殻 コンドライトに対応する斑石殻とおきかえ さらにその上部はアコンドライトと同じように輝石 橄欖石を主とする橄欖岩殻を考へた。地殻の下部は玄武岩殻 上部は花崗岩殻からなるとした。このモデルは 地球の中心より 鉄隕石→石鉄隕石→コンドライト→アコンドライトと並べ 隕石の知識をフルに活用している点に大きな特色がみられる。

しかし当時の地質学者は ワシントンのモデルを大体において受け入れながらも マグマの起源などを論ずるために一部修正を加えて 地殻の下に融解層があると信じている人達が多かつた。たとえばデイリー (Daly) の終戦直前 (1943年) の説はその代表的なものである。デイリーは地球の層構造はワシントンのモデルと全く同様に考へたが 地表から約 420 km から地殻までの約 350 km の間に融解した岩石層 (下部は超塩基性岩質 上部は玄武岩質) があつてマグマの本源となつていて考へた。このような考へは割合いに根強く多くの地質学者達によって信じられていたようであるが 地震波速度の解析その他の地球物理学的データと調和しないので次第に消えていった。

終戦前までの地球のモデルは 隕石の成因の時に述べたように 最初は太陽から分離した高温の溶融体で 次第に冷却して結晶化がおこり モデルでみられるような層構造となつたとする考へで一貫している。

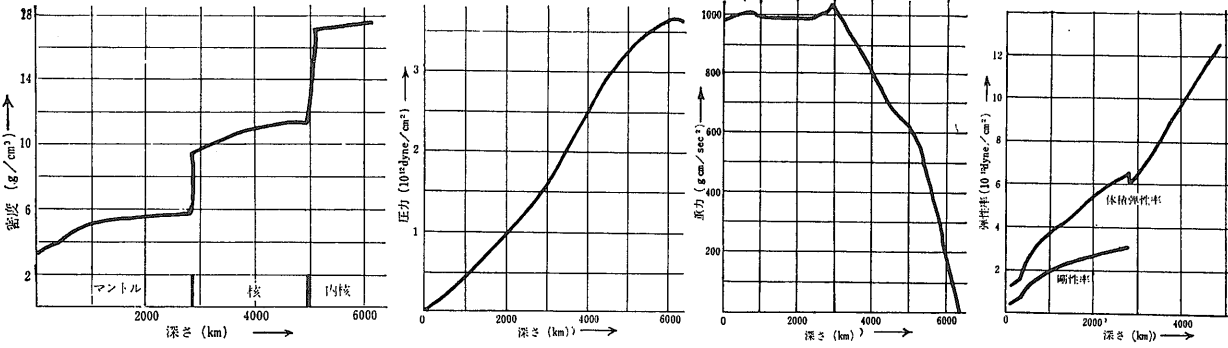
ところが戦後 隕石の研究が著しく進歩し また惑星や隕石母体が低温の宇宙塵からなる星間物質の集合によって生成したとする低温起源説が主流を占めるようになってきてからは 新しい地球のモデルがこの説にしたがつてやや具体的に論ぜられるようになった。このような新しい地球のモデルの基礎となつた地球物理学的研究は主として ハーバード大学のバーチ (Birch) 教授の一門によって行なわれている。これらのデータは新しい地球のモデルの基本となるので少し述べてみよう。

地震波速度の分布は 体積弾性率(K) 剛性率(μ) 密度(ρ) に関係していることはすでに述べた すなわち

$$V_p = P \text{ 波の速度} = \sqrt{\frac{\text{体積弾性率} + 4/3 \text{剛性率}}{\text{密度}}}$$

$$V_s = S \text{ 波の速度} = \sqrt{\frac{\text{剛性率}}{\text{密度}}}$$

上式から $\frac{\text{体積弾性率}}{\text{密度}} = (P \text{ 波の速度})^2 - 4/3 (S \text{ 波の速度})^2$ がえられる 上式の右辺は測定可能な既知量であるので 左辺の分子は圧力



第4図 1. 地球内部における密度分布 2. 地球内部における圧力分布 3. 地球内部における重力分布 4. 地球内部における弾性率分布 (坪井忠二編 地球の構成 1960より)

が加わった時 密度がどのように増加するかを示す量と考えられる

ケンブリジ大学のブレン(Bullen)は上記の式を解くことによって 地球内部の密度分布をきめた 密度分布がわかれば 圧力や重力の分布もだすことができるし また体積弾性率(K) 剛性率(μ)の分布も求められる このようにして ブレンは地球内部の物質の物性を明らかにする緒をつかんだ 第4図 1~4 はブレンによって作られた各種物理量の分布図である

その後 ハーバード大学では超高压実験で 1946年度のノーベル物理学賞を授与されたブリッジマン (Bridgman) 教授を先頭に 10万気圧にも及ぶ超高压実験によって実証的にブレンによって作られた分布図を検討していた その門下の一人であるパーチ (Birch) は 物質に大きな静水圧を加えた時 その物質の密度がどのようにかわるかを調べていたが マーナハン (Murnaghan) の有限歪み弾性論にヒントを得て 高压と低压の物理量を直接結びつける状態方程式をなかば理論的に なかば実験的に導きだした ブリッジマンの実験によりアルカリ金属についてはよく当てはまることが知られているが 珪酸塩鉱物のような複雑なものについて 適用できるかどうか 多少の疑問があるが この状態方程式の適用 応用によって 深い高压下の物質を地上にとり出した時の物理量を推定することができるようになったので 地球内部の物性の知識は飛躍的に進歩した このマーナハン・パーチ(Murnaghan-Birch)の状態方程式というのは次のようにあらわされる

$$\frac{2P}{3K_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{7/3} - \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{5/3} \quad P = \frac{3}{2} K_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{7/3} - \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{5/3} \right]$$

P: 圧力 ρ : 圧力Pの時の密度 ρ_0 : 圧力0の時の密度 K_0 : 圧力0の時の体積弾性率

この式が成立すると 単純な物質では密度が2倍 体積が半分になるあたりまで適用されることがわかった

第5図はこの式を使って 地球内部のマンタル物質を地表にもってきた時の密度を各深さについて示したものである この図から約200~900km ではマンタル物質の密度は 3.2~3.3 g/cm³ から約 4.0g/cm³ に増加していることがわかる このような画期的なパーチの仕事とともに いろいろなモデルを使っての地球の熱的歴史 その他の物理量が調べられているがここでは省略する

2.2. 最近の地球のモデル

戦後著しく発展した地球物理学的方法による地球内部の物性の研究とこれを実験室で再現する高压および超

高压実験 さらに低温起原説からすばらしい進展をみせた隕石の研究のこの三本の柱によって 地球の内部構造の物性 物質がどのようなものであるか大分よく判ってきた. ハーバード大学のブリッジマン教授の門下であるパーチをはじめ その弟子のマクドナルド (MacDonald) やオーストラリア出身でパーチの影響を強く受けたリングウッド (Ringwood) らは これらのデータをもとにしてこの10年間に 新しい地球のモデルを提唱した. これらの地球のモデルはまだこれから的高圧 超高压実験のデータの蓄積によって少しずつ変わるだろうが 現在では非常に権威のあるモデルとして通用している.

マクドナルドとリングウッドの地球のモデルを戦後の代表として紹介してみよう.

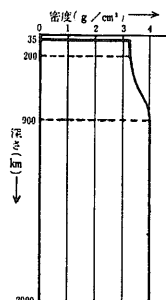
(1) マクドナルドのモデル

マクドナルド (MacDonald) はハーバード大学のパーチ教授の門下であり 多くの地球内部物質の物性の研究を行っていたが 地球のコアがニッケル・鉄の組成を持つとする仮定に疑問を持ち また地球の熱的歴史からマンタル内の組成を考察し 電子計算機を使ってこれを検討したことで有名である.

隕石の話して解説したように コンドライトは酸化還元状態によってさまざまな種類に分類できるが 酸素 水素 炭素 硫黄などの揮発性元素を除いて再計算してみると 不揮発性元素のみの組成の割合いはほぼ一定であり しかも宇宙存在量とよく似ている. それゆえ

コンドライトは 隕石全体を代表しているばかりではなく 地球を含めて太陽系の原物質でもあったと考えられる.

マクドナルドはこの点に着目し 地球物理学的方法で明らかとなった地球内部の物性と矛盾しないように 注意を払いながら コンドライトの不揮発性元素組成と地球全体の不揮



第5図 マーナハン・パーチの状態方程式を使って 地球内部の物質を地表へもってきたときの密度 (坪井忠二編 地球の構成 1960より)

発性元素組成は一致するという仮定をたてて 地殻・マントル・コアにそれぞれ元素を配分し検討した。すなわち マクドナルドは地球のコアはニッケル鉄組成(Fe/Ni=15)をもち マントルについては 輝石組成[(Mg_{0.9}・Fe_{0.1}) SiO₃] 橄欖石組成[(Mg_{0.9}・Fe_{0.1})₂ SiO₄] および橄欖岩組成をそれぞれ仮定して 第2表の値に従って計算を行なった。

もし マントルが橄欖石組成とすると第3表でみられるように(Fe+Mg+Ni)/Si 比の値は コンドライトにおける比にくらべてずっと大きくなる。次に輝石組成について計算すると コンドライトの比とよい一致を示す。しかし 地震波から得られたマントルの弾性的性質はさきに述べたように輝石のそれとは一致せず 橄欖岩かエクロジヤイトではなくてはならないとするデータに矛盾する。さてこの弾性的性質から得られたマントル物質である橄欖岩についてみると (Fe+Mg+Ni)/Si 比はコンドライトの比よりもはるかに大きい。もし地球全体の不揮発性元素組成がコンドライトのそれと同じで しかもマントルは橄欖岩かエクロジヤイト組成の物質からなるとする 仮定が正しいとすると最後に残る仮定 すなわち コアの組成がニッケル鉄のみからなるとした点に疑問が残る。マクドナルドはマントルの橄欖岩組成の (Fe+Mg+Ni)/Si 比を大きくした原因となっているマントルでの Si の不足分をコアに押し込み地球のコアはニッケル鉄のみではなく 多量の Si (約38%) を含むと結論づけた。地球のコアが単にニッケル鉄だけでなく もっと密度の小さい物質を含む可能性のあることは パーチやアッフェン(Uffen)らによって 1952年 1954年にそれぞれ地球物理学的データをもとにして計算されていたのであるが マクドナルドの地球のモデルでは 地球全体とコンドライトの不揮発性元素組成が等しいと仮定することによって コアに入る密度の小さい物質を Si とした点に特色がある。リングウツ

第2表 地殻・超塩基性岩・コンドライトの元素存在量と宇宙存在量

	地 殻	エクロジヤイト	橄欖岩	ヅナイト	コンドライト	宇宙存在量
Na	1.21×10 ⁵	5.82×10 ⁴	2.78×10 ⁴	2.39×10 ³	4.94×10 ⁴	5.03×10 ⁴
Mg	1.26×10 ⁵	4.44×10 ⁵	1.25×10 ⁶	1.70×10 ⁶	9.34×10 ⁵	4.80×10 ⁵
Al	3.34×10 ⁵	2.54×10 ⁵	1.29×10 ⁵	2.50×10 ⁵	7.91×10 ⁴	4.07×10 ⁴
Si	1.00×10 ⁶	1.00×10 ⁶	1.00×10 ⁶	1.00×10 ⁶	1.00×10 ⁶	1.00×10 ⁶
P	4.68×10 ³	1.46×10 ³	1.29×10 ³	5.22×10 ²	4.55×10 ³	6.90×10 ⁴
K	5.70×10 ⁴	1.49×10 ⁴	7.10×10 ³	6.29×10 ²	5.94×10 ³	2.29×10 ⁵
Ca	1.24×10 ⁵	2.21×10 ⁵	8.70×10 ⁴	1.85×10 ⁴	5.52×10 ⁴	6.03×10 ⁴
Ti	1.11×10 ⁴	1.36×10 ⁴	1.71×10 ³	3.71×10 ²	2.27×10 ³	2.29×10 ³
Mn	2.60×10 ³	3.29×10 ³	3.66×10 ³	3.34×10 ³	5.64×10 ³	5.30×10 ³
Fe	1.19×10 ⁵	2.41×10 ⁵	1.58×10 ⁵	1.67×10 ⁵	7.12×10 ⁵	1.45×10 ⁵

(Si=1.00×10⁶として記算)

ド(Ringwood)もほぼ同時に同じようなアイディアを発表しているが……。

さらにマクドナルドは 地球の熱的歴史をいろいろなモデルを作って計算し はじめ様なコンドライト質の物質から出発した地球が ウラン トリウム カリウムの放射性核種の壊変による熱源によって橄欖化がおりマントル コアが形成され約26億年前に地表近く(600kmまで)にこれらの熱源が濃縮したと考えた。マントルの上部約600kmは ズナイト(dunite)とエクロジヤイトの中間的な組成をもち それより深いマントルでは放射性元素のきわめて少ない橄欖岩組成をもつと考えた。マクドナルドの地球のモデルを第6図に示す。

マクドナルドは現在でも盛んに地球内部の熱的狀態についていろいろのモデルを作って検討している。

(2) リングウッドのモデル

隕石の起原について もっとも親しみやすい説を提唱したリングウッドは 地球についても興味あるモデルを示している。マクドナルドが主として地球物理学的立場をとっているのに対して リングウツはどちらかといえば 地球化学的・鉱物学的立場をとっている。ここでふたたびリングウッドの隕石の起原説を思い出してみよう。太陽系の生成の一環として 炭素質コンドライトに似た宇宙塵からなる星間物質が低温の状態で凝集して 月か月より大きいぐらいの隕石母体をつくり この母体は重力エネルギー 消滅放射能(Al²⁶ Fe⁶⁰ など)長寿命の放射性核種の壊変などのエネルギーにより融解し 炭素質コンドライト中の炭素を還元剤として酸化鉄は還元して金属鉄となり 重力分離を行なってコアに集まり この際の還元程度によって各種コンドライトを作る。いわゆる熔融——対流火山活動のプロセスを考え このような隕石母体が衝突などによって破片となったものが隕石であるとした。この隕石起原説を太陽系内の惑星(もちろん地球を含めて)について当てはめ炭素質コンドライト組成をもつ星間物質が凝集してすべ

第3表 マクドナルドの計算のもとになったモデル

マントルの組成	コアの組成	全地球の	
		$\frac{Fe+Mg+Ni}{Si}$	$\frac{Fe}{Mg}$
(Mg Fe) ₂ SiO ₄ Mg/Fe=9	(Fe Ni) Fe/Ni=15	3.3	0.78
(Mg Fe)SiO ₃ Mg/Fe=9	(Fe Ni) Fe/Ni=15	1.8	1.04
橄 欖 岩	(Fe Ni) Fe/Ni=15	2.9	1.30
コ ン ド ラ イ ト		1.65	0.71
宇 宙 存 在 量		0.71	0.30

(MacDonald, Researches in Geochemistry, 1959 p. 485より)

ての惑星が生成したとすると 惑星の不揮発性元素組成はどの惑星についても同じであると考えた。太陽系の惑星には 地球とよく似た大きさで密度も3~5程度の水星・金星・火星・地球の一群と 大きさが地球の約100倍 密度も1ぐらゐの木星・土星の一群があるが リングウッドはこのちがいはすべて惑星に含まれている揮発性成分の量のちがいと 酸化還元状態のちがいによるものとし これらを除いた不揮発性元素組成は同じだと考えている。地球にもどって考えてみれば 地球やその他惑星 隕石全体および炭素質コンドライトの不揮発性元素組成は同じである。炭素質コンドライトの不揮発性元素組成は容易に計算できるが 隕石全体の組成は 石鉄隕石と鉄隕石の割合いがはっきりしないのでむずかしい。それでリングウッドはコンドライトの組成を使い 地球物理学的に求められた地球のマントルとコアの質量比から地球内部の元素の分配を計算した。

これを第4表に示す。この表からも明らかのように地球のコアの組成は マクドナルドの結果と同様にニッケル鉄ばかりでなくSiを約11%含んでいると結論している。表のマントル組成は マントルと地殻とを平均した値であるが 地殻は地球全体の質量の0.5%以下であるので計算にはほとんど影響していない。リングウッドのコア組成は 頑火輝石コンドライト中の金属鉄中にSiが相当量含まれている事実を示唆を得ているように地球化学的な考え方にもとづいている。

第4表のマントル組成は 玄武岩とヅナイト(dunite)との中間の組成で ヅナイトにより近い。リングウッドはこれをマントルの原物質と考えパイロライト(pyrolite)と名付けパイロライトは橄欖岩と玄武岩の比率が3:1となるように定めた。地殻はこのパイロライトから分化生成したものであるから マントル最上部では組成変化がみられるが 地殻の質量は地球全体からみるとほんのわずかであるので マントルの大部分はパイロライト組成であると考えられる。モホ不連続面

下部の上部マントル(100~200km)に地震波速度の低速度層があることが グーテンベルグ以来指摘されているが リングウッドのモデルからは合理的に説明できる。

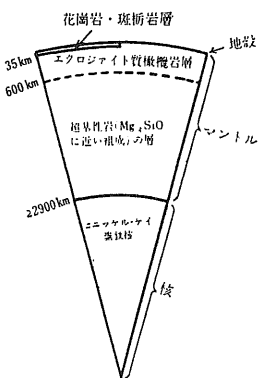
パイロライトからなるマントルからパイロライトよりも酸性の物質がぬけ出して地殻を作るとすると残りの物質はパイロライトよりさらに超塩

第4表 マントルの FeO/MgO 比とマントルとコアの質量比から Type I の炭素質コンドライトの還元によって生じた地球のモデル (Ringwood, Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 30, P.62, 1966より)

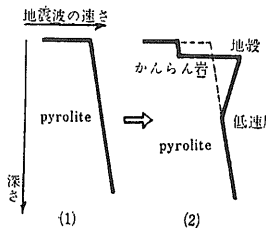
	炭素質コンドライト Type I	地球のモデル	
SiO ₂	33.32	29.84	マ ン ト ル →
MgO	23.50	26.29	
FeO	35.47	6.38	
Al ₂ O ₃	2.41	2.69	
CaO	2.30	2.57	
Na ₂ O	1.10	1.23	
NiO	1.90	---	
	100.00	69.00	100.00
Fe		25.87	コ ア →
Ni		1.66	
Si		3.47	
		31.00	100.00

基性となってマントル上部を構成する。したがって地殻を作ったために酸性物質がぬけたマントル上部は酸性物質のぬけていないパイロライトより速い地震波速度を与えるはずで このことと圧力効果を組み合わせることによって第7図のようにマントル上部の低速度層の存在を説明することができる。このぬけがらのパイロライト層はヅナイトに近い組成(ザクロ石橄欖岩)をもつようになる。このように100~200kmの厚さのヅナイト層の下部にはパイロライト層があるが 地震波速度は200~400kmのところから1000kmあたりまで急激に増加するいわゆる遷移層がある。リングウッドは相転移によりスピネルだけの層に変わる転移帯であると解釈している。1000kmから2900kmのコアとの境界面まではこのスピネル型構造をもつパイロライト層からなる。このリングウッドのモデルは非常に細かく地球化学的・地球物理学的データに注意を払い しかも地殻とマントルの関係 マグマの発生などの地質学的な現象にも矛盾しないように組立てられている点で注目に値する。リングウッドのモデルを第8図に示す。

マクドナルドとリングウッドのモデルの特色は 隕石の中でもコンドライト(マクドナルドはコンドライト平均組成 リングウッドはType I 炭素質コンドライト)を地球の原物質と考え 地球の内部は隕石よりも還元的で鉄やニッケルばかりでなくシリコン(Si)までも還元して金属状態になりコアに入っているということである。また リングウッドは地球の磁場の発生については マントルとコアとの間は平衡状態になっていないためと考えている。すなわち地球内部で融解したニッケル鉄(シリコンを含む)が重力によりマントルの中を通過して中心部に集まってコアを作るとき 沈降の速度が大きくてマントルとコアの間の化学平衡に達しないので その間



第6図 マクドナルドの地球のモデル (都城秋徳 科学 32 p.287 1962より)



第7図 バイロライトモデルとマントル上部で深さとともに速さが増すのはおもに圧力効果(金森博雄 科学 35 p.242 1965より)

にわずかながら電位差を生じ この電流の生ずる磁場を生ずるといふ考えである。

戦後代表的な地球のモデルであるマクドナルドとリングウッズのモデルを述べてみたが その他に

ラバリング(Lovering 1958年)のアコンドライトを原物質として考えたモデル(第9図)などがあるがここでは述べない。

これまで述べてきた地球物理学的なデータと地球のモデルから得られた知識から もう少し詳しくマントルとコアを検討してみるのも 地殻とくに大陸や大洋地域の構成を考える上に必要であろう。これについては金森博雄は1965年に簡潔明解に解説しているので これをもとにして紹介しよう。

3. マントルとコア

地殻との境界面であるモホ不連続面から2,900kmの深さの部分のマントルと呼んでいるが マントルについての地球物理学的データを少し整理してみよう。マントル物質を推定するに当って観測できる値は 地震波速度(P波とS波) 密度(ρ)および圧力(P)である。

(1) 上部マントル

さきにリングウッズのモデルで触れたように 均一なマントル物質から地殻を構成している酸性物質がぬけだして残った上部マントルの物質は当然他の部分のマントルよりも超塩基性となるのであろう。地震波速度はこの部分 モホ不連続面から200kmくらいの深さまで 深さとともに減少している。この部分を低速度層と呼んでいる。低速度層は リングウッズのモデルの項で述べたマントルの化学組成の変化による解釈と もう一つはこの部分で温度が急激に上昇したとする解釈で説明できる。すなわち 温度が上昇すると 物質の中を伝わる地震波速度はおそくなり この効果が圧力の影響に打ち勝って速度が深さとともにおそくなるということである。しかし 圧力効果を打ち消すためには非常に急激な温度の上昇が必要で マントル上部の溶融まで 考えなければならないほどの量になりかねないので この温度上昇という解釈の可能性は薄く 物質の化学組成の変化の方が考えやすい。第10図は海洋 大陸および楕状地で波の速度をしめす。楕状地では 大陸 海洋にく

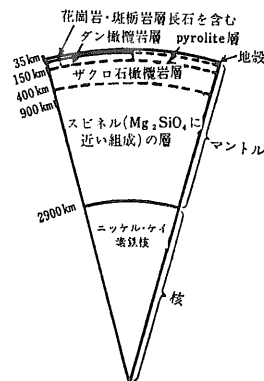
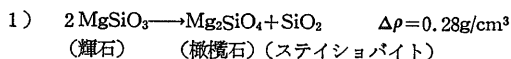
らべて速い速度を示しているのは多量の地殻物質がぬけだしたために 上部マントルのより超塩基性の部分が広がっていることをあらわしている。これは熱流量の測定からも一致した事実をうることができる。

地震波の速度および密度から上部マントルを構成している物質としては 橄欖岩(橄欖石88% 輝石12%)を考えるのが都合がよい。

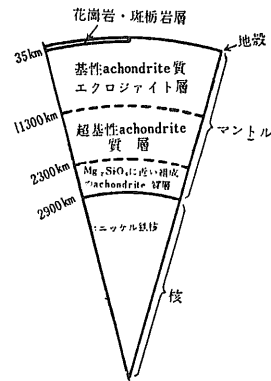
(2) 遷移層

第11図 でみられるように マントル内の地震波速度および密度が約400kmの深さのところから約1000kmの深さのところまで急激に増加する。この部分はブレンのC層にあたり 遷移層と呼ばれている。この急激な地震波速度の増加は一種類の均一な物質の圧力効果だけでは説明できない。密度も同様である。すなわち第11図で1000kmの深さのところの物質を地上に持ってきたとすると 点線で示したように密度は3.9g/cm³となる。上部マントルの物質は約3.3g/cm³であるから 上部にマントルと1000kmの深さのところの物質とでは構成物質が異なると考えざるを得ない。1936年 ジェフリースがP波 S波の分布を発表した時 フランスの鉱物学者パナール(Bernal)はC層の速度の急増の原因は 構成鉱物の結晶構造の変化によるものではないかと発言しているが 実際にこの検討がはじめられたのは1950年を過ぎ高温高压の実験が普及してからであった。パナールの示唆したように この遷移層の存在は 構成鉱物の相転移により より緊密な結晶構造になることでうまく説明できる。

リングウッズによれば マントルの構成成分である橄欖石(Mg₂SiO₄)と輝石(MgSiO₃)との混合物に圧力をかけてゆけば 次々に相転移や反応がおこる。一般に高压下では体積の小さい方に反応が進む。



第8図 リングウッズのモデル(都城秋穂 科学 32 p.287 1962より)



第9図 ラバリングのモデル(都城秋穂 科学 32 p.287 1962より)

- 2) $Mg_2SiO_4 \rightarrow MgSiO_3$ $\Delta\rho=0.32g/cm^3$
(橄欖石) (スピネル)
- 3) $Mg_2SiO_4 + SiO_2 \rightarrow 2MgSiO_3$ $\Delta\rho=0.17g/cm^3$
(スピネル)(スティショバイト)(イルメナイト)
- 4) $Mg_2SiO_4 \rightarrow MgSiO_3 + MgO$ $\Delta\rho=0.27g/cm^3$
(スピネル)(イルメナイト)(ペリクレーズ)
- 5) $MgSiO_3 \rightarrow MgO + SiO_2$ $\Delta\rho=0.07g/cm^3$
(イルメナイト)(ペリクレーズ)(スティショバイト)

() は結晶型

このような相転移が400~1000kmに相当する圧力で1)~5)のように行なわれる。橄欖石型→スピネル型→酸化物型に相転移し $\Delta\rho$ は増加し密度は増加する ($\Delta\rho$: 各転移に伴う密度増加を一気圧のもとに直した値)。輝石は1)→2)→3)→5)の順で 橄欖石は2)→4)→5)の順で転移するから 密度の増加はそれぞれ約 $0.8 g/cm^3$ 約 $0.65 g/cm^3$ となる。第11図の1000kmの深さのところと上部マントルの密度差が約 $0.6 \sim 0.7 g/cm^3$ であるので うまく説明することができる。高温高压装置による相転移の問題は次号までとっておきたい。

(3) 下部 マントル

深さ1000kmからコアとの境界面2900kmの深さまでは地震波速度および密度の増加は一様で 単一の物質に圧力をかけたときの变化で説明することができる。遷移層の項で述べた相転移の考えにもとづくと この下部マントルでは 1) から5) までの相転移がすべて行なわれ全部が MgO (ペリクレーズ)と SiO_2 (スティショバイト) からなっていることになる。 MgO と SiO_2 との比率は高压と常圧との物理量を結びつけるマナーハン・パーチの状態式により近似的に計算すると $MgO : SiO_2 = 1 : 1 \sim 2 : 1$ となる。

2900km より深いコアについては マントルほどのデータはないが、略述すると次のとおりである。

コア(核)

2900km より中心まではコアと呼ばれ S波がとまらないので流体と考えられている。このうちで 5100km から中心まではP波の速さが 2900—5100kmのコアに比

べて約15%はやいので あるいは固体ではないかとする考えもある。P波の速度のちがいがから 2900—5100kmを外核 5100km から中心までを内核と呼んでいる。

外核および内核の構成物質は古くからニッケル鉄からなると考えられてきたが さきに述べた地球のモデルで見られるように 単にニッケル鉄ではなくて これに金属シリコンを含むとする考えが有力になっている。

マントルおよびコアの地球物理学的データを総合すると第12図のようにしめされる。実験室で再現できる圧力範囲を示してあるが これの詳細は次号にゆづりたい。

おわりに

この号ではこれまで解説してきた隕石の研究結果と詳細な地球物理学的方法によるデータにもとづいた地球のモデルを紹介した。戦前のゴールドシュミットやワシントンのモデルと リングウッドらのモデルとを比較すると地球科学の進歩の速さに驚くほかはない。現在は高压装置を駆使して地球内部の反応や相転移の再現の時代に入っている。次号ではこの高压装置による実験の紹介と われわれが生きている地殻とマントルの問題を考えてみることにしたい。

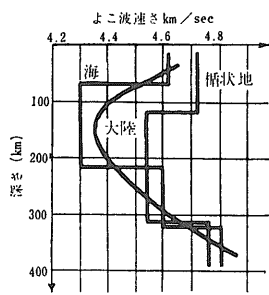
(筆者は地球化学課)

主要な参考文献

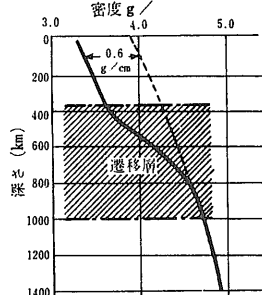
- 坪井忠二編(1960):地球の構成 岩波書店
- 都城秋穂(1962):隕石と地球 科学 32 229-235 284-291
- 金森博雄(1965):地球の内部構造 科学 35 239-245
- 島津康男(1966):地球内部物理学 裳華房
- 島津康男(1967):地球の進化 岩波書店 ほか

外国文献としては

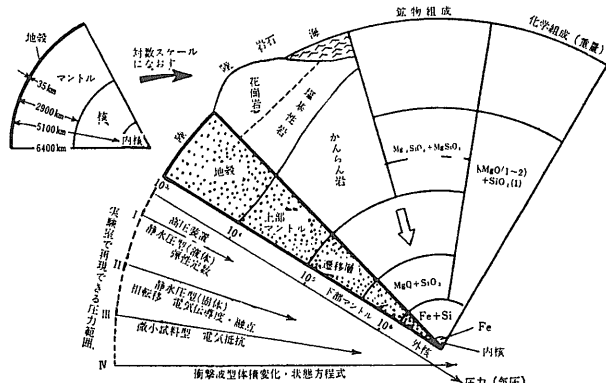
- MacDonald, G.J.F.(1959): Researches in geochemistry, 476-494 John Wiley
- Dachille, F. and R. Roy(1960): Amer. J. Sci., 258 225-246
- Ringwood, A.E.(1958): Geochim. et Cosmochim. Acta, 13 303-321; 15 18-29 195-212
- Ringwood, A.E.(1962): Jour. Geophys. Res., 67 857-868 4005-4010: 4473-4478
- Ringwood, A. E.(1966): Geochim. et Cosmochim. Acta, 30 4-104
- Birch, F.(1964): Jour. Geophys. Res., 69 4377-4388 ほか



第10図 マントル上層部でのよこ波の速さ(深さによる変化)大陸:グーテンベルグモデル 揺状地:カナダ揺状地 海:8099モデル (金森博雄 科学 35 p 241)



第11図 遷移層内の密度分布点線は1気圧下の値へ直したもの (金森博雄 科学 35 p 242 1965より)



第12図 地球の内部構造 (金森博雄 科学35 p 240 1965より)