

Ⅲ Mantle の 構 造

秋 本 俊 一 (物 性 研)

§ 1. はじめに

地震波の測定から，地球は

crust : A

mantle: B, C, D

core : E, F, G

の層構造をなしていることが知られている (Ⅳ 参照)。mantle は B, C, D 三層に分けられる。B, D 層における密度その他の量のゆるやかな変化は，均一な物質の adiabatic compression としてほぼ説明がつくが，C 層 (深さ約 300 km~1000 km) における急な変化はこれでは説明できない。conductivity はここで 10^3 倍変化する。(図 3-3)。

Mantle を構成する物質は silicate と考えられる。これは，

(1) マグマが火山から熔岩として噴出する際，深部の岩石をとりこんでくるので，火山岩を調べることにより mantle 上部の様子がわかるが，これは silicate を主体としている。

(2) 地球は stony meteorite (隕石) が集ってできたと考えられるが，隕石は silicate でできている。

等のことから推定している。crust に孔をあけて直接 mantle の物質をとり出そうという "Mohole 計画" も進行中である。

最近の高圧実験の進歩により，static な方法で約 10 万気圧の発生が可能となつた。これは地球内部にして深さ 400 km, C 層の上部に相当する。そして silicate mineral の高温・高圧下の相転移の研究によつて，C 層における density, conductivity などの急な変化が silicate の相転移と

してほぼ説明がつくようになった。

§ 2. Mohorovicic discontinuity

大陸の下で約 30~50km, 海洋の下で約 10km の深さのところに地震波の速さ (V_p, V_s) の不連続面 Mohorovicic discontinuity がある。 V_p はこの上で $< 7 \text{ km/s}$, この下で $7.6 \sim 8.5 \text{ km/s}$ である。

M-discontinuity の解釈としては

(1) chemical boundary とする,

(2) phase boundary とする,

の二つがある。上の程度の V_p を与える岩石を探すと

$V_p \sim 8 \text{ km/s}$: peridotite (カンラン岩), eclogite (榴輝岩)

$V_p < 7 \text{ km/s}$: gabbro (ハンレイ岩), basalt (玄武岩),

serpentine (蛇紋岩)。

があるが, このうち化学成分の同じものは,

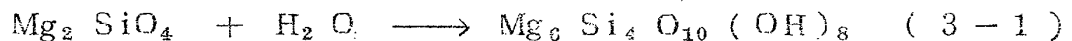
(a) peridotite — serpentine

(b) eclogite — gabbro, basalt.

である。M-discontinuity を phase boundary として説明するとすれば, (a) または (b) の組の間の phase boundary と考えることになる。

(a) peridotite $\longleftrightarrow$ serpentine

これに相当する化学変化としては



(peridotite)

(serpentine)

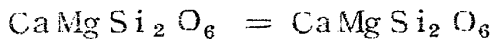
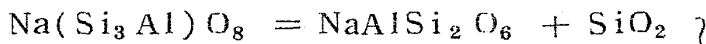
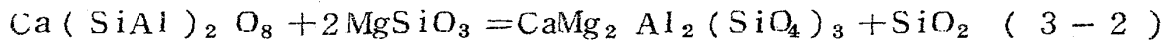
この変化は圧力によらず 500°C 以下でおこる。地球の歴史の中のある時期に M-discontinuity の面に 500°C の等温面がありそれより上では上の serpentine 化が起つたとしてこの discontinuity を説明する。しかしこの仮定には種々の地質学的な観察から考えてかなり無理がある。

(b) eclogite $\leftrightarrow$ gabbro

これを support する高圧実験がある。

(gabbro)

(eclogite)



この反応は 600 °K, 18000 気圧 (ほぼ boundary に相当する圧力) でおこる。

しかし, このような phase boundary だとすると, 等しい深さのところに discontinuity が必要にならず, 大陸下と海洋下の深さの差は説明できない。それで, M-discontinuity は chemical boundary だとするのがもつとも自然であろう。

現在 crust, mantle 上部の構造は図 3-1 のように考えられている。

mantle を構成する主要鉱物は Mg, Fe の olivine (M_2SiO_4), pyroxene (MSiO_3) である。

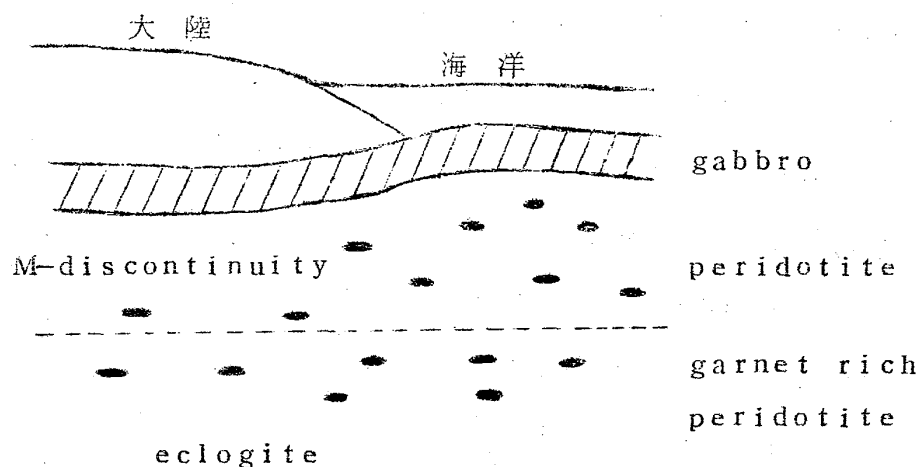


図 3-1. crust, mantle 上部の構造

§ 3. Silicate, SiO_2 の相転移

(1) olivine $\rightarrow$ spinel

この転移は1930年代から予想されており，5～6年前から実験的にも確められた。一番重要な Mg_2SiO_4 についての実験はまだないが， $\text{Si} \rightarrow \text{Ge}$ ， $\text{Mg} \rightarrow \text{Fe}$ ， Ni etc.のおきかえをしたものについての実験から， Mg_2SiO_4 についてもこの転移があることはほとんど間違いない。

$\text{Mg}_2\text{GeO}_4 - \text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 系の相図を図3-2に示す。¹⁾ これから100% Mg_2SiO_4 まで ex-

trapolateして，

Mg_2SiO_4 は100kb

あたりで spinel に転

移することが予想され

る。その他，

$\text{Ni}_2\text{GeO}_4 - \text{Mg}_2\text{SiO}_4$

系²⁾ Ni_2SiO_4 ³⁾ など

の実験もある。現在ま

でに得られ，あるいは

予想されている転移は

表3-1のようになる。

実際に mantle を構成

している $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 -$

Fe_2SiO_4 系については Mg_2SiO_4 (4%) + Fe_2SiO_4 (96%) が1300℃，

70kbで spinel に転移した。⁴⁾ Mg_2SiO_4 の量を多くしたものについての

実験はまだない。最近物性研に設備された tetrahedral anvil 型超高压

発生装置を用いて得られた Fe_2SiO_4 ， Ni_2SiO_4 についての olivine-

spinel 転移に対する相平衡図を図3-3に示す。

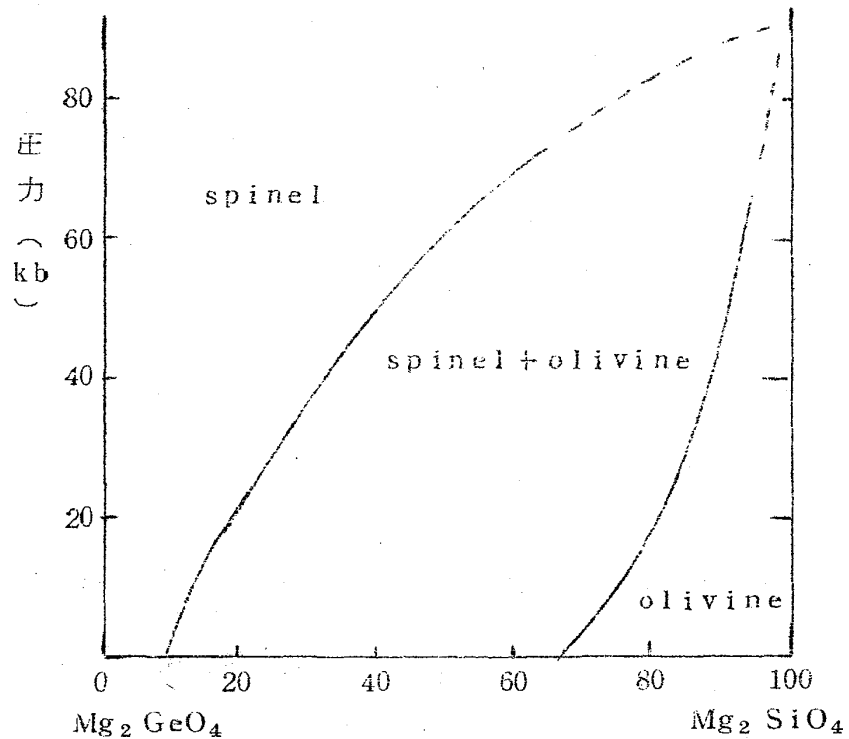


図3-2. $\text{Mg}_2\text{GeO}_4 - \text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 系の相図
(542℃)

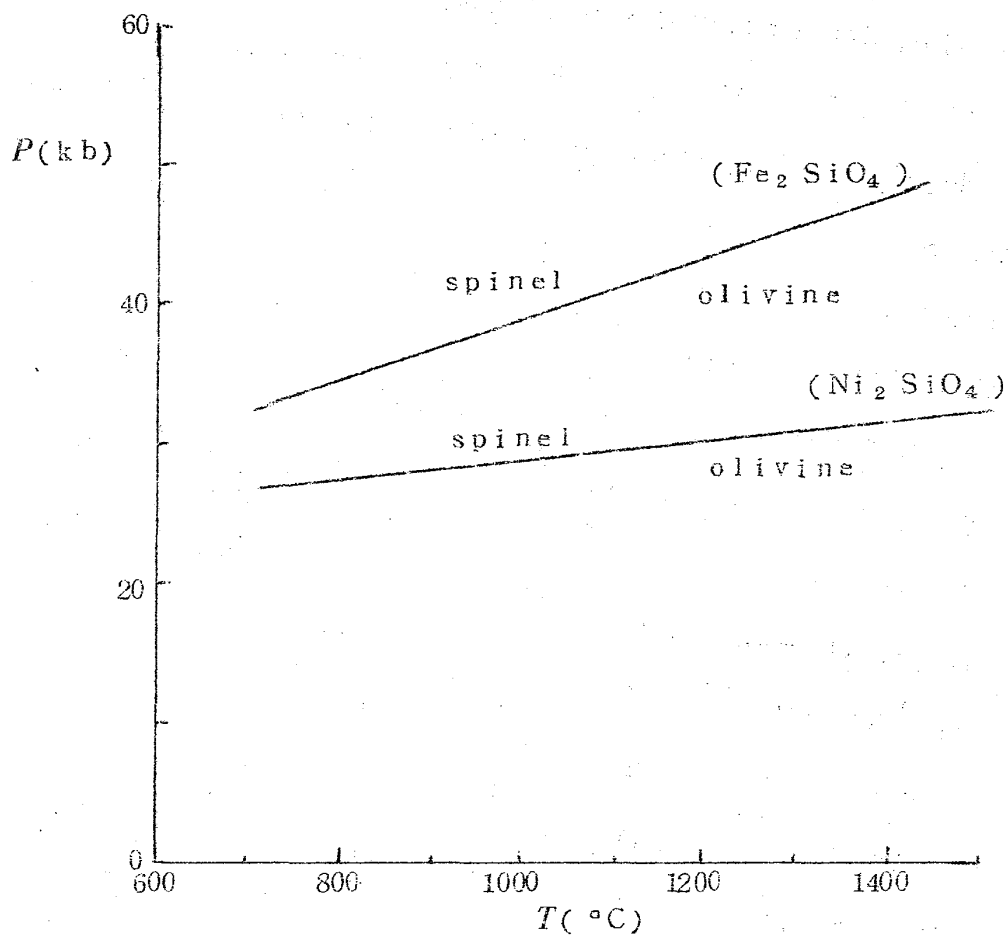


図 3-3. Ni_2SiO_4 , Fe_2SiO_4 の olivine-spinel 転移に対する相図

表 3-1. olivine $\rightarrow$ spinel 転移

component	温 度	転移圧力	密度増加
Mg_2GeO_4	820 °C	0 kb	8.5 %
Ni_2SiO_4	650	18 ± 5	9
Fe_2SiO_4	600	38	10.5
Co_2SiO_4	700	70 ± 20	9.8
Mg_2SiO_4	600	130 ± 20	> 9
(予想)			

Fe_2SiO_4 について常温で resistance を測定したところ

olivine : $10^6 \sim 10^7 \Omega\text{m}$

spinel : $10^3 \sim 10^4 "$

と予想通り spinel の方が 10^3 倍だけ conductive である。

(2) pyroxene $\rightarrow$ corundum⁵⁾

Si^{4+} , Ge^{4+} のイオン半径は $R_{\text{Si}} = 0.42 \text{ \AA}$, $R_{\text{Ge}} = 0.49 \text{ \AA}$ である。silicate, germanate の相転移が, $R_{\text{Si}}/R_{\text{O}}$, $R_{\text{Ge}}/R_{\text{O}}$ (R_{O} : O イオンの半径) が圧力によつて変化し, 一定の値を越えたときにおけるとすると, R_{O} の方が大きいだけに圧力の影響も受け易いだろうから, $R_{\text{Si}} < R_{\text{Ge}}$ で germanate の方が低い圧力で転移することが予想される。olivine $\rightarrow$ spinel でもそのような事情があつたが, pyroxene $\rightarrow$ corundum でも germanate の方が実験が容易である。

種々の germanate の pyroxene について実験した結果, いくつかの型の相転移がみられた。

(a) $\text{MgGeO}_3 \rightarrow \text{MgGeO}_3$

orthopyroxene ilmenite

28kb でおこり, 密度は 15 % 増加する。同じ型の転移をするものに,

MnGeO_3 : 25kb 密度増加 18 %

$\text{Mg}(\text{Ge}_{.97}\text{Si}_{.03})\text{O}_3$: $\sim 60\text{kb}$ " 14 %

がある。この転移で Ge は 4 配位の位置から 6 配位の位置にかわつており, close packed に近い構造となるので密度の増加が大きい。

(b) $2\text{FeGeO}_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{GeO}_4 + \text{GeO}_2$

clinopyroxene spinel rutile

10kb でおこり密度は 11 % 増加する。同じ型の転移をするものに:

CoGeO_3 :	10kb	密度増加	11 %
$(\text{Mg}_{.75} \text{N}_{.25}) \text{GeO}_3$:	22kb	"	10 %
$\text{Mg}(\text{Ge}_{.90} \text{Si}_{.10}) \text{O}_3$			
$\sim \text{Mg}(\text{Ge}_{.50} \text{Si}_{.50}) \text{O}_3$:	50kb	"	15 %

がある。

(c) その他。 garnet 型の構造に転移する例として CaGeO_3 がある。

(3) SiO_2 の相転移^{6), 7)}

quartz から 500~800 °C, 35kb で coesite にかわり, 1200 ~ 1400 °C, 120kb でさらに稠密な stishovite にかわる。stishovite は rutile 構造 (Si は 6 配位) をもち, 密度は coesite に比べても 46 % も大きい。

§ 4. Mantle の構造

§ 3 で述べた高温高圧実験の結果から, mantle の主要構成鉱物は

B 層: olivine, pyroxene, garnet

C 層: 相転移がおこっている漸移層

D 層: spinel, corundum, rutile

と考えられる。C 層での pyroxene の転移としては,

pyroxene $\rightarrow$ olivine + stishovite

$\rightarrow$ spinel + coesite

$\rightarrow$ spinel + stishovite

などが可能であるが, spinel よりも stishovite の方ができ易いことを考えると, まず第一の型の転移がおこるものと考えられる。

転移層が 400~1000km と広い巾をもつことは, 化学組成が単純であれば理解できない。しかし, 実際に mantle を構成する物質は複雑な化学組成を

もつであろうから，このような広い巾もおかしくない。

D 層のさらに深いところではどうなっているか？ おそらく， MgO , SiO_2 のような oxide になつているであろう。O が close packed structure をとり，その間に他の element が入り込んでいるような構造が想像される。

mantle の構造に対するこのような考えが正しければ，隕石中にも spinel, corundum が見出されそうであるが，まだ発見されていない。

Discussions

△地磁気の測定から推定されるところでは，mantle の conductivity σ は図 3-4 のようである。mantle の底が oxide とすると， σ は spinel より oxide が小さいと思われるが，その点は矛盾しないか？

△D 層での σ の増加は温度の効果 $\log \sigma$ だけで説明できるか？

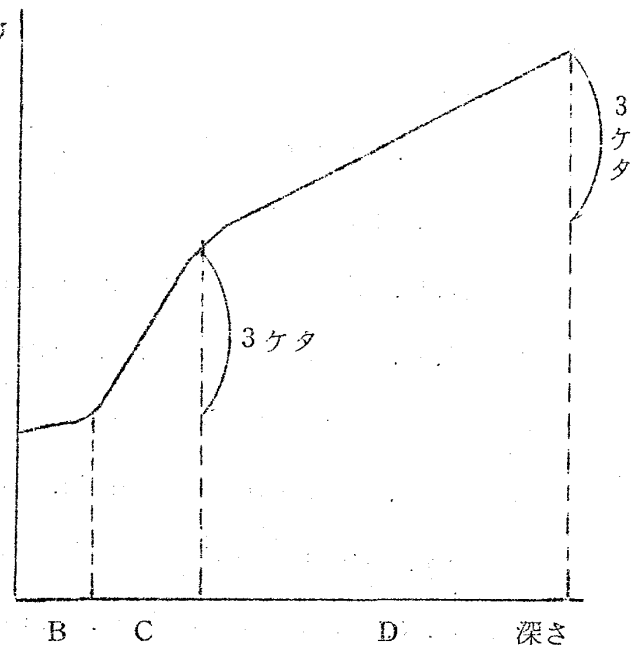
△mantle の底での conduction は electronic か ionic か？

— わからない。

△D 層で Fe が底にいくほど少量ずつふえていたとすると，conduction には大きな影響があるかも知れぬ。

△比較的新しい地震学における観測結果（表面波，及び核爆発）から

地球のマントル上層部はそれ程 図 3-4. Mantle 内の conductivity. 一様でないという事が判つて来た。少なくとも深さ約 100~200km 位の所迄は地域的にかなりの差があると考えられている。又，人工衛星の軌道等から予想される地球の重力場の異常を説明するためにも，かなり深い所迄一様で



ないと考えた方がよい。重力の場合には，深さを正確に推定することは出来ないが，100km の程度の深さであることは十分考えられる。(金森)

△mantle 上層に fluid に近い所があるとみられる。それは，最近の表面波の研究から推定される低速層の存在に基礎をおくものであるが，この低速層は深さ約 100km 位から約 200km 位の所迄の V_s が約 0.3km/sec 位遅いものである。従ってここでのポアソン比の増加は大きく見つもつても 0.05 程度である。従って，fluid といつても，普通の意味の fluid という訳ではない。(金森)

文 献

- 1) F. Dacheille and R. Roy ; Amer. J. Sci., 258, 225(1960)
- 2) A.E. Ringwood and M. Seabrook ; Journ. Geophys. Res., 67, 1975(1962)
- 3) A.E. Ringwood ; Geochim. Cosmochim. Acta 26, 457(1962)
- 4) F.R. Boyd and J.L. England ; Carnegie Inst. Geophys. Lab. Year Book '60
- 5) A.E. Ringwood and M. Seabrook ; Journ. Geophys. Res., 68, 4601(1963)
- 6) F.R. Boyd and J.L. England ; Journ. Geophys. Res., 65, 749(1960)
- 7) S.M. Stishov and S.V. Popova ; Geokhimiya no.10, 837 (1961)