

Title	V Coreの問題(2) : 特に超高压物性,惑星進化の観点からみた(<特集>地球と物性研究)
Author(s)	島津, 康男
Citation	物性研究 (1964), 1(6): 477-490
Issue Date	1964-03-07
URL	http://hdl.handle.net/2433/85571
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

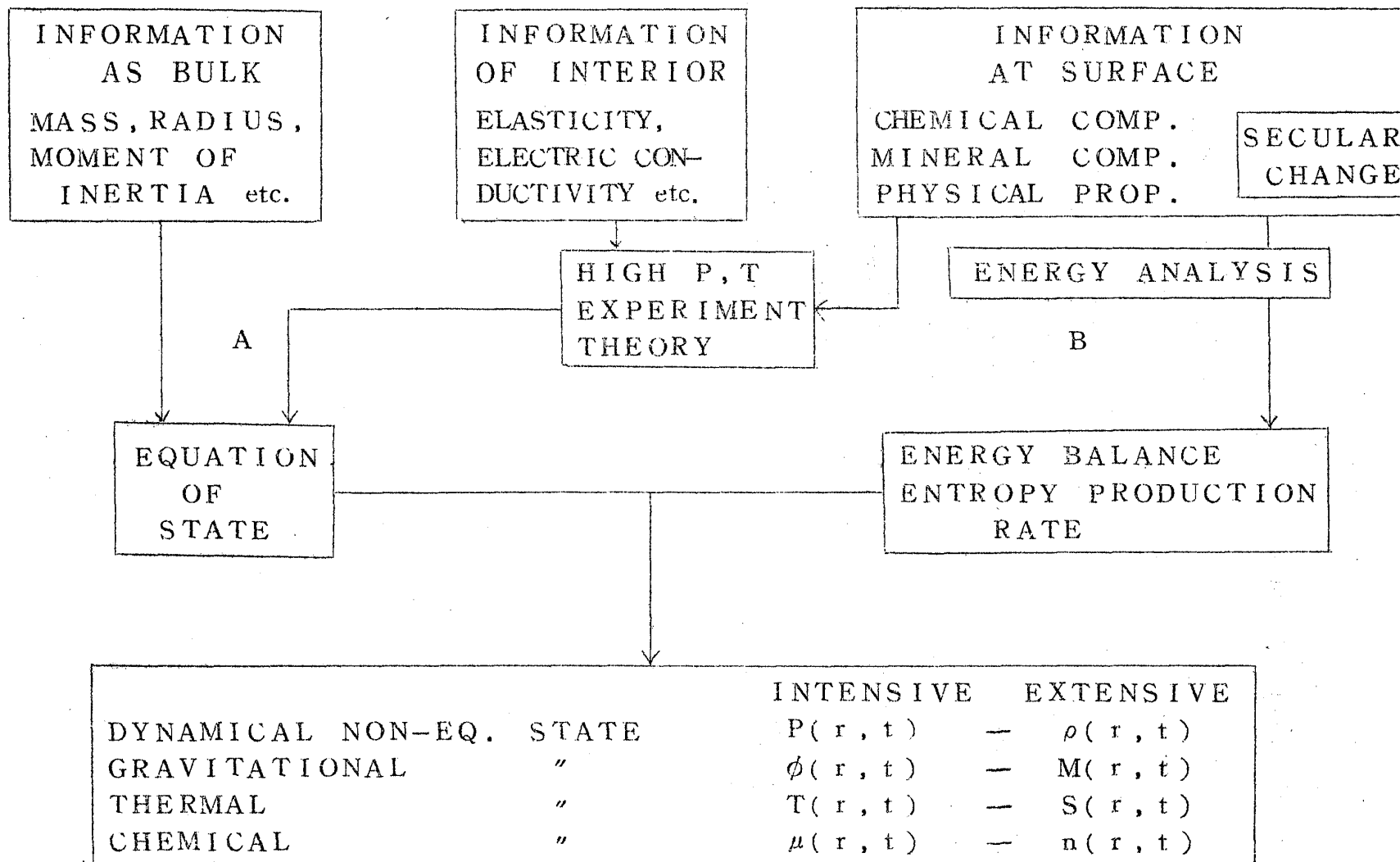
V Core の問題 (2)

特に超高圧物性，惑星進化の観点からみた

島津康男(名大理)

§ 1. Introduction

地球の中で energy がどう分布しているか，及びその時間的变化はどうかを知ることができれば，状態とその進化が判つたといえる。普通は energy そのものよりその一次微分量 state variable が得やすい。そこで $\rho = f(P, T, n)$ (n は物質を指定する) の形で表される equation of state を得るのが第一目標となる。しかし，mass, energy の変化を示す "field equation" も忘れてはならない。field equation は時間を explicit に含み，地球の進化を記述するための核心となる。⁶⁾ 以上の事情を図 5-1 に示す。



-478-

§ 2. 物性常数

二種類あることに注意する。

(1) energy $\xrightarrow{\text{微分}}$ state variable $\xrightarrow{\text{微分}}$ 物性常数として与えられるもの。地球の状態を指定するのに特に基本的なのは：

$$\text{thermal expansion } \alpha = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} \quad \text{silicate で } 10^{-5},$$

$$\text{metal で } 10^{-5}$$

$$\text{specific heat } C = T \frac{\partial S}{\partial T} \quad \text{silicate で } 0.2 \sim 0.3,$$

$$\text{metal で } 0.1 \sim 0.2$$

$$\text{incompressibility } K = -V \frac{\partial P}{\partial V} \quad \text{silicate で } 10^{12},$$

$$\text{metal で } 10^{12}$$

これらは物質による差が小さく， P ， T dependence は linear に近いから，order としては known とみてよい。

Mie-Grüneisen の状態方程式を仮定すると，

$$r = \frac{\alpha K_T V}{C_V} = \frac{\alpha K_S V}{C_P} = \frac{1}{3} - \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial \log \rho} \left(\frac{1}{V_p^3} + \frac{1}{V_s^3} \right) \quad (5-1)$$

より， V_p ， V_s が判れば α/C の分布が判る。〔IV参照〕

(2) kinetic parameters

Irreversible process に現われるもので，

$$\text{heat flow } Q = -\kappa \text{ grad } T$$

$$\text{electric current } I = -\sigma \text{ grad } V$$

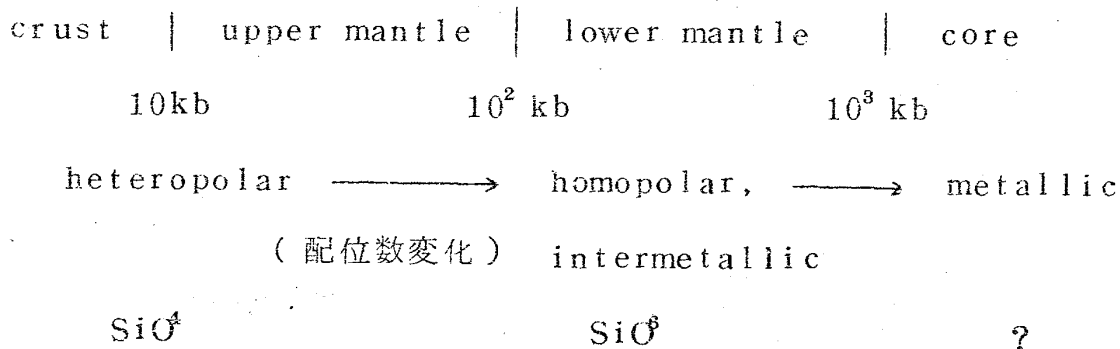
$$\text{diffusion } J_d = -D \text{ grad } n \quad \text{等。}$$

これらの parameters は activation energy に関係し物質（結晶構造）dependence が大きく， P ， T によつて exponential に変るので，その estimation は難かしい。しかし，これらは field equation に現われ，

進化の記述に重大な意味をもつ。

§ 3. 高圧化学からみた core の状態

固体に 10^3 kb の圧力をかけると, その internal energy の変化 (~ 1 ev) は chemical bond の cohesive energy ($1\sim 4$ ev) と同程度になるので, 10^3 kb で化学の領域をこえる。core はまさにその圧力領域にある。



core の状態はまた stellar interior の問題につながる。

§ 4. Core の化学組成

core, mantle の化学組成としては,

stony meteorite (隕石) — mantle

iron meteorite (隕鉄) — core

と対応させて考えるのが常識的である。しかも stony meteorite 中の chondrite^{*}) を地球の始源物質とする考えがある。(VI参照)

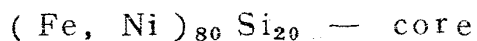
core を $\text{Fe}_{15}\text{Ni}_1$ と仮定し, mantle を $(\text{Mg}_9\text{Fe}_1)_2\text{SiO}_4$ あるいは $(\text{Mg}_9\text{Fe}_1)\text{SiO}_3$ としたときの elements の abundance の比を, mantle を chondrite としたばあいと比較したのが表 5-1 である。

* 球粒状隕石。隕石の90%以上を占める。組成は均質で, 高圧型 pyroxene と olivine とが主要鉱物。

表 5 - 1

mantle	chondrite	$(\text{Mg}_9 \text{Fe}_1)_2 \text{SiO}_4$	$(\text{Mg}_9 \text{Fe}_1)\text{SiO}_3$
core	$\text{Fe}_{15} \text{Ni}_1$	$\text{Fe}_{15} \text{Ni}_1$	$\text{Fe}_{15} \text{Ni}_1$
$(\text{Mg}+\text{Fe}+\text{Ni})/\text{Si}$	1.65	3.3	1.8
Fe/Mg	0.71	0.78	1.04

これからみると $(\text{Mg}_9 \text{Fe}_1)\text{SiO}_3 \rightarrow \text{mantle}$ の方がよい。しかしこれでは $\rho(P)$ があわないし、 MSiO_3 (pyroxene) は高温高圧では spinel + stishovite に分解するらしい。そこで、core に Si をまわして



としてつじつまを合せる考えもある。

しかし隕鉄にこのような Si がふくまれている例は知られていない。隕鉄は Fe-Ni の合金とみてよく、face-centered cubic の組織をもつものと、body-centered cubic のものとの両方がある。phase diagram からみて数百度 °C 以下でゆつくり冷却したものと思われ、地球の core との対応を考えるさい注意すべきである（隕鉄の始源状態又は母天体の大きさと地球の大きさとの差）。隕石の母天体の大きさについてははつきり判っていない。diamond の存在から火星又はそれ以上の大きさを考える人もあるが、地球への落下の際の shock pressure によつてできたとすればそのように大きな天体を必要としない（しかし $\text{Mg}_2 \text{SiO}_4$ の spinel はみつかつていない）。又数百度からのゆつくりした cooling はせいぜい半径 2~300km の天体を必要とするが、隕鉄表面の凹凸からみて天体の破片ではなく、もともとその大きさだつたと考える人もある。

地球全体としては O-Si-Fe-Mg（これだけで 90%）を考え、その 10^3 kb , 数 1000 度での state を調べればよい。⁸⁾

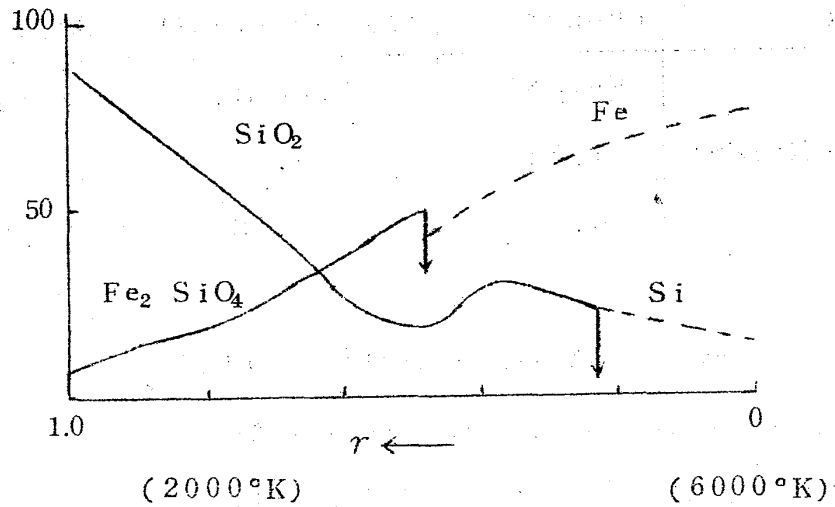


図 5-2. 地球を熱平衡にあるとして決めた elements の分布
(Shimazu)

中でも O は体積の 90 % を占める。(高圧ではそうは限らないが。) 軽元素は表面に濃縮している。

trace elements として重要なのは radioactive elements で、地球の thermal history に重要な関係をもつ。

layer structure は

chemical affinity (+ electron degeneracy)

gravity differentiation

のかねあい決る。 trace element では前者がかち、 Fe では後者がかつて core が形成されたように見える。

§ 5. Equation of states

(1) Degenerate electron gas (Thomas-Fermi model)

これは $P \gtrsim 10^5 \text{ kb}$ でよいとみられる。状態方程式は

$$P = \alpha_1(Z) \rho^{\frac{5}{3}} - \alpha_2(Z) \rho^{\frac{4}{3}} \quad (5-2)$$

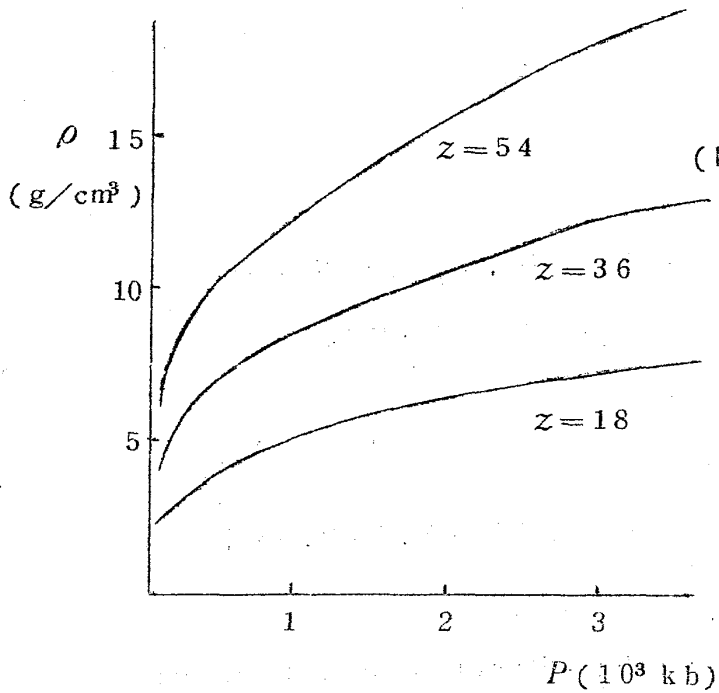


図 5 - 3

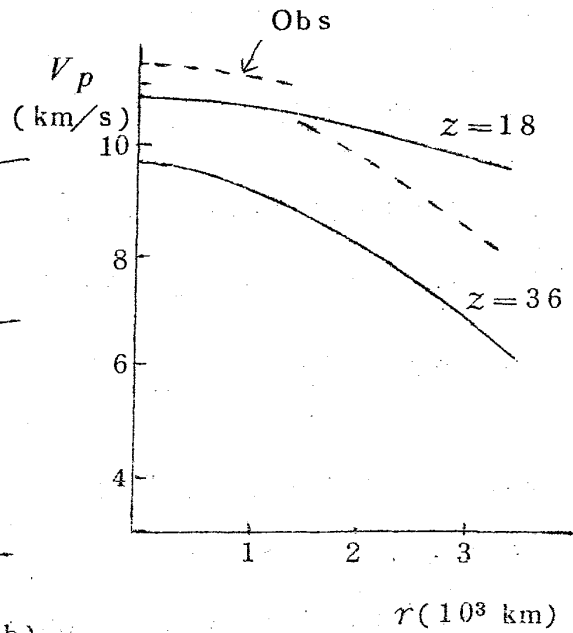


図 5 - 4

(Z ; atomic number) で与えられる。種々の Z について (5-2) によって $P \sim \rho$ の関係を図 5-3 に示した。地球の内部でも (5-2) がよいとして $r - V_p$ の関係を求めると図 5-4 の実線のようになり、観測値 (点線) と比較すると, core では $Z = 20 \sim 30$ で大体あり。 $Z_{\text{Fe}} = 26$ だから, これは若干 Si が mix していることを示している (?). 但し, core でも圧力は 10^3 kb の程度で, Thomas-Fermi model は適用できないので, この結果がどれだけ意味をもつか判らない。

(2) Classical ion-ion interaction

ion-ion interaction を

$$E_{\text{int}} = -A \left(\frac{r_0}{r}\right)^m + B \left(\frac{r_0}{r}\right)^n \quad (5-3)$$

とすると, 状態方程式は

$$P = A' \left[-\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\frac{m}{3}} + \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\frac{n}{3}} \right] \quad (5-4)$$

となる。また

$$\frac{\partial K_T}{\partial P} = \frac{m+n+6}{3}$$

ただし、地震波は adiabatic process と考えられ、 V_p の分布からは $\partial K_S / \partial P = 3.3$ が与えられる。 $\partial K_T / \partial P$ と $\partial K_S / \partial P$ の間には

$$\frac{\partial K_T}{\partial P} = \frac{\partial K_S}{\partial P} + 5T\alpha r \quad (5-5)$$

の関係があるので (IV 参照), $T\alpha r \sim 4 \times 10^3 \times 10^{-5} \times 1.2 = 0.05$ より $\partial K_T / \partial P \sim 3.7$, $m+n \sim 5$ を得る。

Finite strain theory による Murnaghan-Birch の equation of state (IV 参照) は

$$P = \frac{3}{2} K_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{7}{3}} - \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{5}{3}} \right] \quad (5-6)$$

となる。これは moderate pressure で成り立ち、extreme pressure で正しいとみられる (5-2) との間ができていない。

§ 6. Transition to metallic phase

core を Fe(+Ni+Si) とする考えが popular であるが、Ramsey (1949) は core を silicate の high-pressure metallic phase と考えた。彼によると core-mantle boundary が sharp なことは物質の不連続ということでは説明できない。 $\partial K / \partial P$ が連続なことも証拠の一つにあげている。

mantle - ground state $\rho_1 \sim 6$, energy E_1

core - metallic state $\rho_2 \sim 9$, " E_2

boundary の pressure $P = 1.4 \times 10^2$ kb

とすると Gibbs の free energy が等しいことから

$$E_2 - E_1 = P(V_1 - V_2) \simeq 12 eV/mol$$

となつて excitation energy として unreasonable な値ではない。また metallic phase への転移にともない融点がることも予想されるから、core の fluid state を保証しそうにみえる。問題は silicate の転移を理論か実験で示すことにある。

高圧相への転移圧力については、つぎのような計算がある。

表 5-2 高圧相への転移(理論)

	$P_{\text{trans.}}$ (Mbar)	
H	0.7 ~ 2	
He	28 ~ 191	fcc \rightarrow 1s, 2p overlap
Fe		Fe ¹⁶⁺ + (3s ² 以上が overlap)
MgO	0.7 ~ 1.5	O-O effect > Mg-O

このうち、H, He は H, He でできているとみられる木星、土星などの内部構造の問題と関連して興味を持たれており、とり扱いかいのもつとも簡単な物質でもあるので、理論的での進歩(より厳密な計算)がのぞまれる。

H, He の $\rho(P)$ の計算結果とそれを用いて求めた木星の内部構造¹⁾を 図 5-5 に示す。中心圧は木星で 110 Mbar, 土星で 55 Mbar となつている。

Fe の高圧相については、Henry²⁾ が 3s² 以上の electron はすべて conduction electron になるとして計算した。結果は 図 5-6 のようになる。

core を ion + free electron の mixture と考えれば ρ, P, T を与えることによつて electron density を知ることができ (Fe, Silicate のいずれであつても), electric conductivity などが計算できる。

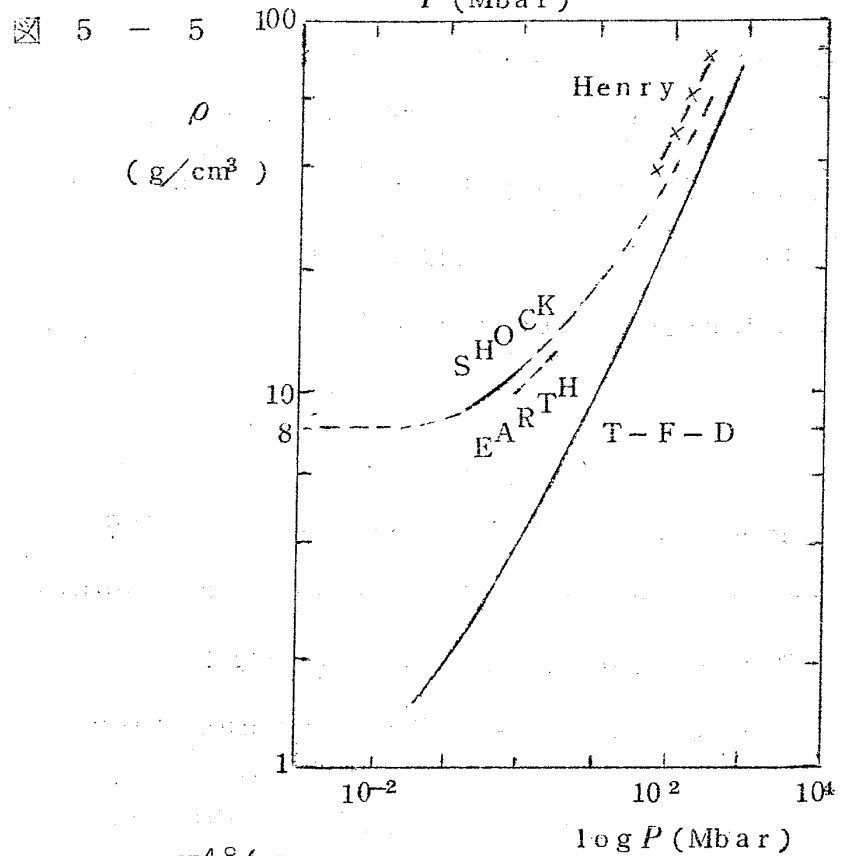
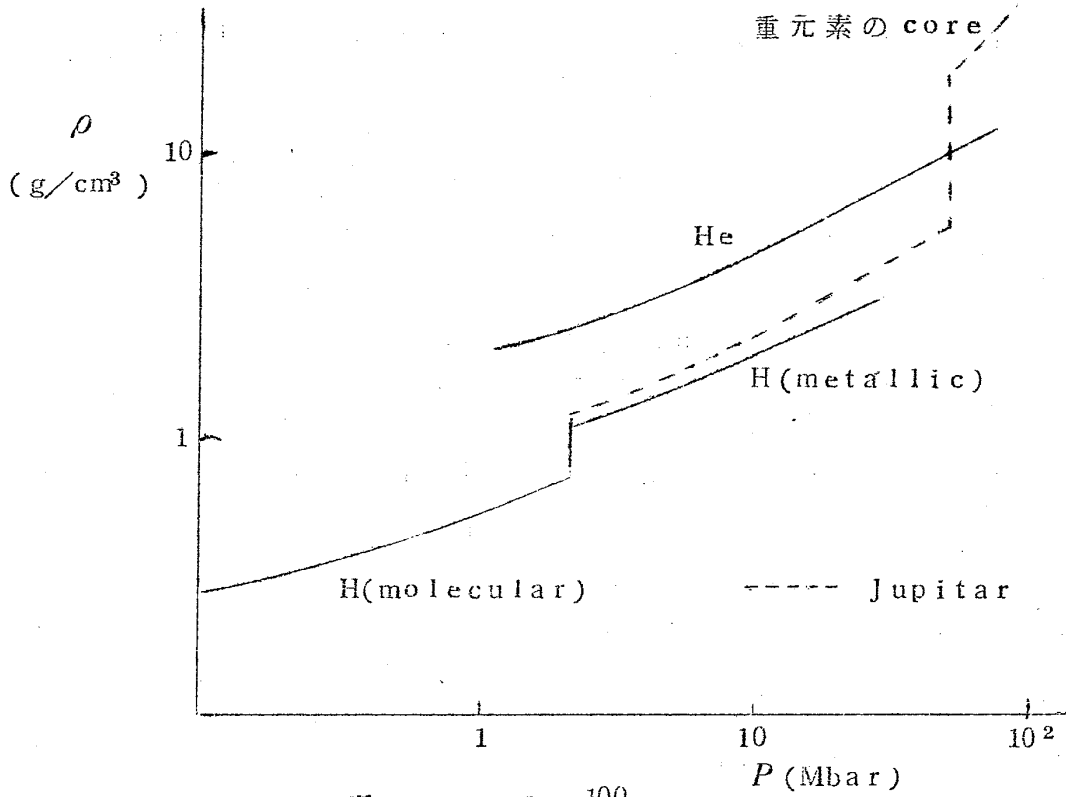
³⁾⁴⁾ $Z = 10 \sim 30$ についての結果は:

$$\text{viscosity } \eta \sim 10^{-3} \text{ poise (gas core), } 10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ poise}$$

(liquid core)

electric conductivity $\sigma \sim 2 \sim 4 \times 10^3 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

thermal conductivity $\kappa \sim 0.05 \sim 0.5 \text{ cal/cm} \cdot \text{deg} \cdot \text{sec}$



mantleの値と比べると, mantleはcoreに対してthermal, electrical に insulator と考えてよい。地震波の減衰から mantle では $\eta < 10^9$ poise と推定されている。

coreをsilicateとするとradioactive materialはcoreにも mantle程度に存在するだろうし, Feだとするとmantleに濃縮しているはずで, thermal stateを考える上で重要な問題である。熱源がmantleとcoreとに一樣に分布しているとすれば, 到底現在のthermal stateは説明し得ない。(Ⅶ参照)

§ 7. coreの成因⁶⁾¹⁰⁾(Ⅶ参照)

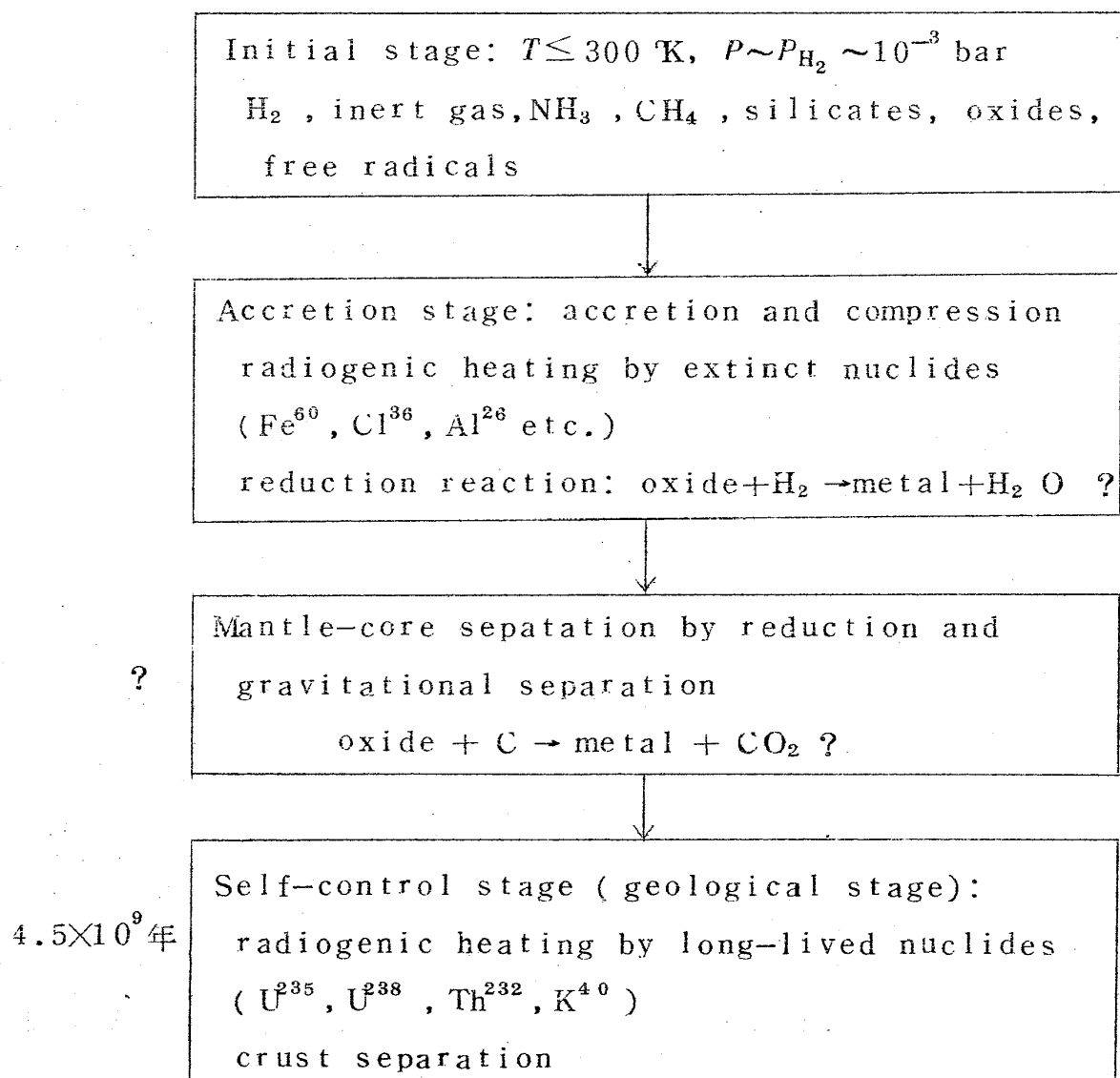
coreの組成・状態の問題は, その発生のmechanismにまでさかのぼることを要求する。ここでは地球は低温のcosmic dustの凝集によつてできたという考えにたつ。もしcoreがsilicateのmetallic phaseなら, 凝集のprocess進行中に中心圧が適当なcritical valueに達した時にcoreが発生し, ぼう大な内部エネルギーを放出したことになる。もしcoreがFe(+Ni+Si)ならhomogeneous chondrite material(oxidized state)からreductionとgravitational differentiationによつて生じたことになる。differentiationの際放出されるgravitational energyは 2×10^{38} ergに達し, U^{238} , U^{235} , Th^{232} , K^{40} の含有量から期待されるradiogenic heatの全量($\sim 1.5 \times 10^{38}$ erg)より大きい位である。しかし, reductionは吸熱反応であり, coreをFe, Niとしてこれがすべてoxide又はsilicateからのreductionによるとすれば, 0.8×10^{38} ergを必要とし, radiogenic heatと同程度である。地表・大気にふくまれている各種のunstable elementのisotope ratioから, 地球の年齢は 4.5×10^9 年程度と推定される。しかもそれらの存在量は 4.5×10^9 年前にすでに隕石の推定初期値に等しい。従つて宇宙存在比から

島津康男

出発すれば 4.5×10^9 年前にはすでに mantle への濃縮が行なわれていたこと、すなわち mantle と core の分離が完成又は相当程度進行していたことを示す。ただし core は Fe-Ni と考えての話である。

Core の発生の問題はこのように地球生成初期の問題につながる。地球の形成プロセスを schematic に示したのが次の表である。

表 5 - 3



地球が現在の mass にまで凝縮して以後は、すべての変化は自己の energy でまかなわれねばならない。故に reduced された Fe が凝縮の前から太陽系

にあつたか、それとも oxide, silicateが地球形成後に reduceしたかは、地球のその後の thermal stateに決定的な差を生ずる。いずれにしても進化の径路は、gas escape, accumulation & gravitational separation, radiogenic heating, redox reaction の相互作用によつて決められる。表に示したように、もし initial state で metal phase がなく、凝集と同時に reductionによつて core ができたとすれば、エネルギー収支、エントロピー生成速度からみて 10^8 年以内にこのプロセスは完了しなければならない。何故なら

(1) reduction に要するエネルギーをまかなうため、半減期 10^7 年以下の extinct nuclideによる発熱が effectiveであることが必要。

(2) effective に mantle-core を分離するには、reductionによつて発生する gasを表面に運び出し、かつ effective な対流がおこるほど全体が heat up する必要。

(3) radiation による熱の逸散を防ぐには、早期に insulator としての大気が発生する必要があり、このために重力場が急速に大きくなる必要がある。

だからである。

一方 dynamo mechanismによつて地球磁場が維持されているとしても (VI参照)、はじめには太陽又は宇宙空間磁場が地球に trap されて magnetohydrodynamical pinch によつて増巾される必要がある。凝集期の trap には metal dust が存在した方が有利である。ここでも又 Fe が metal でいたが oxide でいたかが重要になる。宇宙存在比のような大量の Hの下では明らかに Fe は還元されているが、太陽系の生成→地球の形成の時期の物理化学をもつと調べる必要がある。

なお密度差による重力分離は一種の対流(二成分系対流とよばれるもの)の形で実現され、普通の一成分系での熱対流とは比べものにならない強力な

熱輸送をとまなう(温度差による密度差は $\rho\alpha\Delta T \sim 5 \times 10^{-5} \times 5 \times 10^3 = 0.25$ 以下なのに silicate と Fe の密度差は 5 程度に達する)。従つて thermal state にも大きな影響をもたらす。

References

- 1) de Marcus, W.C., (1958) : The constitution of Jupiter and Saturn. *Astron. Jour.* 63, 2-28.
- 2) Henry, J.F. (1959) : Énergie de cohésion et équation d'état du Fer a haute pression. *Bull. Roy. Soc. Belg. Cl. Sci.* 45, 553-574.
- 3) Жаркоб, В.Н. (1962) : *Физика ядра зем. Труд. ННМ. Физ. зем.* No.20 1-49.
- 4) Miki, H. (1952) : Physical states of the earth's core. *Jour. Phys. Earth* 1, 67-74.
- 5) Shimazu, Y. (1954) : Equation of state of materials composing the earth's interior. *Jour. Earth Sci. Nagoya Univ.* 2, 15-172.
- 6) 島津康男 (1959) : 地球内部の構造の歴史的発展, 地球科学 No.44, 27-33.
- 7) 島津康男 (1963) : 地質現象のエネルギー解析 地球の進化を熱力学的にあつかうための一手段として, 地球科学 No.65, 24-32.
- 8) Shimazu, Y. (1956) : Chemical equilibrium within self-gravitating planets and internal constitution of the earth. *Jour. Phys. Earth* 4, 1-6.
- 9) 島津康男 (1962) : 地球深部の物質 科学 32, 526-529.
- 10) Shimazu, Y. (1963) : Thermodynamical aspects of terrestrial evolution. *Jour. Earth Sci. Nagoya Univ.* 11 (in press)