

地球と物性物理

島 津 康 男 (名大理・地球科学)

(11月11日受理)

§ 1 はじめに

地球科学が現在どんな問題を持っているか、何故それが生れたか、見通しはどうか、こういつた点について特に物性物理学の研究者の興味を考えに入れながらかんたんに述べたい。1963年12月には基研において「地球と物性物理の学校」が開かれ、主として地球科学の研究者から地球の内部について解説がおこなわれた。地球科学は元来雑多な情報の集積として発展してきたので、明快な方法論がない。このために解説を聞かれた物性研究者は、つかみどころがなかつたのではないかと思う。そこで地球研究者の立場からもう少し整理した形で問題の提起を試みた次第である。筆者の専攻分野の故に、主として地表より下の部分、我々が「固い地学」とよんでいる分野に議論を限る。従つて固体の物性が主になり、これに液体・（超高压下の）プラズマ状態が加わる。

地球科学を“地球の構成と発展に関する科学”と定義することがある。その中構成面は地球を作っている物質の状態方程式（各種の相転移をふくめた $P-V-T$ 関係）と、その微分係数としての物性の大きさ、分布をすることによつて目的が果される。一方発展面は現象論的な色彩をもち、物理学の言葉でいえば場の問題である。古典物理的な質量保存・エネルギー保存・エントロピー生成の各式として表現するのが、今日の段階である。物性常数は当然これらの表現式のパラメーターとしてあらわれ、特に熱輸送などの非可逆プロセスは“地球の進化”の物理的表現において重要な意味をもっている。構成面は主に地球物理学の分野のうけもちであるが、地球の生成以来の構成の時間変化（ある意味では発展面に当る）を追究する試みはまだほとんどおこなわれていない。地質学の分野は地球の発展を扱うといわれるが地表近くの発展だけが対象になつており、地球全体には手が及ばないのである。

§ 2 地球科学と物理学のちがい

地球物理学は物理的手段を用いて地球を調べる分野とされている。しかし

島津康男

物理学そのものとは大部分おもむきが違っている。物理学では自然現象の法則性を追究しているように思われる。だから質的なちがいが新しい法則性の発見に興味をもち、たとえば不純物をふくんだGeとかアルカリ金属又はせいぜい酸化物によつて絶縁体、半導体、導体の質的なちがいを明らかにすれば、それ以上にいろいろな物質の物性を記載的に調べあげることには余り興味をもたない。地球科学では対象がまず固定されるので、理論、実験の面からみて扱いやすい物質によつて法則を発見するという手段は使えない。地球は大まかにみてsilicateとmetalとの二つの層からできている。前者は外半分を構成し、もつとも簡単なモデルでも Mg_2SiO_4 を扱わねばならない。このようなモデル化すら地球科学では異端であり、多くの人（主に地質学研究者）は少くもAlやアルカリ金属をふくめて扱わないとダメだと考えている。しかも Mg_2SiO_4 について力学・熱・電磁気などの各物性をすべてほしいのである。このような点からすると、地球の中半分をしめるmetal (Fe, Niの合金だろう)の方が物性物理学の研究者にとつてとりつき易いかもしれない。

ものに対する制限の他に、次のようなスケールの制限がある。地球を作っている物質の存在形態をスケールによつて分類すると次のようになる。

地球	地殻	日本列島	地質構造の単位	岩石の集合体	岩石	鉱物 (多結晶)	単結晶	分子
10 ⁴ km	10 ³ km	10 ² km	km	m	cm	mm		

左に書いたものほどそれより右のものの集合体である。kmより大きいスケールで進行する現象は、全くの現象論—主に古典的な場の扱いか—with記述される。一方現在の物性物理学の興味は量子力学的な立場で記述されるミクロのところにあり、上記の表ではせいぜい右の端のところ又はそれ以下のスケールを扱う。日本列島におこるプロセスが直接固体内のelectronの行動に支配されるとは思えないのであるが、単結晶のオーダーのところで量子力学の効果がなくなるとすれば、同じく物性を口にしても地球科学と物性物理学（の主流？）とは違うところをみているようである。着色中心などの不完全結晶の議論と、同じ不完全な結晶でもdislocationの議論とでは全く扱いかいがかつており、後者では古典的な場の扱いかいがかつて利かせている。これと似たことが、地球の物性にあてはまる。法則の発見に興味をもつという点からすると、結晶のスケ

ールでマクロの扱いとミクロの扱いをスムーズにつなぐことの可能性を、地球科学の研究者として知りたいのである。地球科学においても mm ~ cm のオーダーの現象が重要な意味をもっている。詳しい事は書く余裕がないが、鉱物集合体の変形→破壊は地震の発生の基本プロセスであり、単結晶の変形と非常にことなつた物性を示す。

以下具体的な問題を二、三あげたい。

§ 3 状態方程式に関する問題

地球の内部については弾性波の速度が中心からの距りの関数として観測されている。これと適当な仮定より非圧縮率 ($-\frac{1}{V} \frac{\delta V}{\delta P}$) と密度 ($\frac{1}{V}$)、圧力(P)の分布がえられる。ただし物質の組成は分らない。そこで宇宙での存在量からみて妥当な物質の P-V-T 関係を求めて観測値と比べることにより、構成物質をより細かく identify する試みがなされた。これによつて物質がほぼきまると力学物性以外の物性量を推定することができ、電磁気的な量などの観測値(力学物性に比べると精度は少ないが)と比べてより高度のチェックをすることができる。弾性波速度の分布は1930年代にすでに求められ、ひき続いて1940年代にかけて上記の線にそつたアタックがなされた。当時はSeitzやSlaterの固体物質の教課書が出た頃で、地球物理学の研究者はこれを手引にしていた。そこでMie-Grüneisenの状態方程式などの半古典的なものがよりどころとして用いられた。一応の成果をうると研究は停滞した。1940年頃に若かつた地球物理研究者が戦時中多忙な期間(日本だけでなく)を終え、観測の量的な飛躍期に入り今日までその傾向は続いている。若かりし頃に物性物理に大きな関心を示した研究者も、年をとると共に情熱を失ない、学生の関心を促がすことも少なくなる。同時に学問の分化といつた事情、物性物理の発展もあつて、現在では物性物理学と地球物理学とに同等に関心をよせる研究者が非常に少なくなつてゐる。

一方、高圧技術の発展にともなつてP-V-T関係の実験室でのsimulationが可能になり、理論的考察をしないでも 10^5 気圧のオーダーでのsilicateの状態方程式はえられるようになってゐる。しかし深部(10^6 気圧のオーダー)のsimulationは現在でもむづかしく、shock waveを用いても

島津康男

P-V 関係がえられるだけで、かつ数千度と推定される温度、 10^6 気圧のオーダーを共存させるわけにはいけないので、理論的考察を必要とする。特に 10^6 気圧は一般の物質体にとって universal な critical value である。これはふつうの物質の非圧縮率が 10^6 気圧のオーダーであることから理解されよう。地球の中半分では結晶エネルギーのなかで Fermi energy が無視できなくなる。 10^8 気圧以上では Fermi energy が主力をしめ、Thomas-Fermi-Dirac の状態方程式が適用できると思われるが、 10^6 気圧という地球の中心圧は面倒な中間状態であり、もつともな解は metal についてさえ得られていない。これは物質の金属化の問題に通じており、silicate の各種の物性における electron の寄与（電子比熱をはじめとして）は地球の問題にとって重要な意味をもつ（次節参照）。H でさえも 10^6 気圧までの完全な解は得られておらず、分子 H は二体ポテンシャル、金属 H は Wigner-Seitz 法といった今では古くさい（又は単純すぎる）近似がなお横行している。地球は H から出来ているのではないから、地球科学としては意味がない。しかし太陽系惑星の中で、地球とは対照的な木星、土星の主成分は H と思われるので、惑星科学として重要なのである。高速計算機の使用できる今日 H の厳密な状態方程式を求める研究がなぜ行なわれないか、筆者には理解できない。惑星については、H, He の混合、 CH_4 , NH_3 も重要である。

以上を要するに状態方程式の研究は、相変化のおこる P, T の決定という面を通じて地球、惑星の層構造の成因とつながっている。

§ 4 非可逆プロセスの物性の問題

地球は一つの熱-重力機関である。内蔵する U^{235} , U^{238} , Th^{232} の崩壊にともなうエネルギーを主な熱源にして、それを表面へ輸送し、各種の仕事をし、表面から逸散する。故にエネルギーの輸送能力が決定的な意味をもつ。silicate における phonon, photon, exciton 輸送の能力、それらの P, T 効果を求めることは今でもおこなわれてはいるが、物性物理の面からみて余りにも幼稚である。phonon 輸送のみによるなら 45 億年という地球の年令の間にさえ 1000 km より深いところは表面に対して insulate されているはずである。すなわち深いところにも熱源がイン石程度にあれば、熱がこもってしまつて非

常な高温になり他の観測事実に合わない。そこで地球の組成＝イン石の前提を改めるか、地球内部では対流輸送があるか、どちらかでなければならず、地球の発展径路の面で重大なわかれ目になる。半定量的な考察によると、地球内部の P, T では photon 輸送（いわゆる輻射）が phonon による輸送をはるかにこし、exciton は更に大きい寄与をする。前節にみた electron の寄与も無視できない。これらの厳密な議論が要求される。金属化の問題をもふくめて、高压での electron の行動がバンド理論の適用で進めうるか、には問題があるう。

地球の中半分をしめていると思われる Fe(+Ni) の 10^6 気圧での比熱・電気伝導度・粘性を知ることは、地球磁場の成因に関して重要である。現在磁場は magneto-hydrodynamical に維持されるものと思われているが、必要な電流—電導性流体の運動—が維持しうるかが鍵になるからである。magnetohydrodynamics は古典的な場の問題であるが、それにあらわれる物性パラメーターはミクロな立場から求めねばならない。同様に木星の磁場に関連して金属 H の物性（熱・電気・光学）が必要になる。地球の場合は中半分が電導性流体外半分が silicate insulator であるが、木星では全半径 6 万 km の内、内部の 5 万 km が金属 H であつて、insulator の外層はむしろ薄い。従つて地球とことなつて内部の電磁場はシールドされることなく表面にもれている可能性があり、表面での観測情報から magnetohydrodynamics の妥当性をチェックするのに適当なのである。

話は変わるが地球に照射する neutrino が地球を貫通するさいの衝突によつて熱エネルギーを発生し、地球発展のエネルギー源として無視できないという考えがある。衝突断面積からみて中半分をしめる metal での発熱が主となる。イン石からの類推（Fe(+Ni) からなるイン鉄）によつても、又、化学的な性質からみても metal には U, Th は入らないから、地球中心部での核崩壊エネルギーの発生は少ないものとされていた。neutrino の寄与が少なくないとすれば、外半の insulator の熱伝導度は更に大きくなければならないことになる。

§ 5 場の問題

地球の発展は古典的な場の問題として扱かうのが適當だと述べた。山ができ

島津康男

たり、地震がおこつたりするいわゆる地学現象は極めて複雑であり、地質学法則といった独自のものに支配されているのだと、地球科学の研究者の多数をしめる地質学者はいう。しかし地球物理学者の多くは地学現象が物理法則に従っている事に疑いをはさまない。ただ力学・熱・電磁気といった各プロセスが強くカップルしているので、複雑に見えるのだと考えている。magnetohydrodynamics はその一例である。古典的な場の理論の範囲又はせいぜい非可逆過程の熱力学の範囲で地球の発展を扱かうこと、これは地球科学でも新しいみ方であり、将来の方向の一つとなるだろう。しかし量子力学を手段とする多くの物性物理学研究者の興味をひかないだろう。不完全結晶の集合体の物性についての扱いかや非可逆過程の熱力学の具体例に興味を抱く方があれば、地球科学は豊富なデータを用意していることを強調したいのである。

さらに地球の発生プロセスを扱かうという新しい方向のあることを述べておきたい。天体の発生・進化は天体物理学の対象であり、そこでは核エネルギーのレベルで過程が進行していく。太陽はそれでよいとして太陽系の惑星となると、エネルギーレベルはずつと低くなつて、化学結合エネルギーのレベルになる。その中間状態がつまり惑星の発生プロセスである。天体物理学と宇宙化学物性物理学とのギャップを埋めること、これは既製の学問をつなぎ合わせることによつて可能か、それとも未知の方法論を必要とするか、まだ分らない。§ 3, 4 に述べた問題が、既製学問の知識をつなげばよい種類の境界領域なのに対して、§ 5 の問題はそれ以上の意味をもっているように見える。筆者は個人的にはある程度の見とおしをもっているが、ここでは省くことにしよう。

地球以外の惑星の構成はついて観測値が与えられることも遠い将来でなくなつた今日、議論のチェックに利用しうるデータは益々ふえるはずであつて、これまで述べたような問題を今すぐアタックしても、決して空論に終らないことを強調しておきたい。地球科学の現状・将来についてのもう少し詳しい記述は終りに示した文献を参照していただきたい。筆者の個人的フィルターがかつているから、問題点がこの小文に述べたものだけに限られるとはいえない。しかし問題点を更に明確化し協同研究を行なうに至るまでにもつて行ければ幸いである。ただしこの種の研究分野一俗に地球内部構造論とよばれている一を専攻している研究者は、我が国では非常に少数である。系統的な教育も行なわ

れていない。その最大の理由は、物性物理学が余り多岐に発達し、とてもついていけないからである。地球物理学の研究者としての地位を保ちながら、片手間に勉強するには余りにむづかしいからである。国際的な協同観測などすべき研究は加速度的にふえているのに、地球科学関係の研究者定員が少しもふえないので、各人が非常に忙がしくなっていることも理由の一つである。地球科学はどうしても記載学の色彩をもち、データの集積にウエイトがかかり、それ自身が目的であるかの如く考える人の多いのも事実である。

終りにこの小文を書く機会を与えられた小野周，碓井 恒丸，吉森昭夫の諸先生に感謝したい。

「高温・高圧の科学」 特集号 科学 32 (1962) No.10

地球と物性研究 基礎物理学研究所 (1964)

地球科学の将来 (島津康男) 科学 34 (1964) No.8