

太陽系の起源

— 地球科学との接点 — (前月号より続く)

中 沢 清*

前回には、現在までに明らかにされてきた太陽系起源論の概略を述べた。そして近年飛躍的に発展してきた地球科学の諸成果について紹介した。地球がコア・マンツルの二重構造になっていること、地球型惑星の比重は惑星質量の増大とともに大きくなるが、しかし水星だけは例外であること、そしてまた地球大気は地球形成後数億年以内に地中からしみ出したガスによって作られたこと、などである。今回は太陽系起源論がこれら地球科学の諸成果をいかに統一的に説明できるのか、あるいは未解決のまま新たな研究を待っているか述べていこう。

4. 木星型惑星の形成

木星型惑星が小さな比重をもち、大気が太陽組成をもつという事実に加えて、パイオニア11,12号によって木星重力の四重極能率なども測定され、木星型惑星の内部構造はかなり明確になってきた(スレータリー, 1975)。一例として木星の内部構造を図3に示しておこう。大量のH, Heを含む外層部をもつ木星型惑星はいつどのような過程で作られたのであろうか?

この問題を始めてとり上げたのはペリとキャメロン(1974)であった。その後水野ら(1978)は太陽系形成の全過程を念頭においてより現実的な理論を展開した。木星型惑星の形成過程を一口で言えば次のようになる。原始惑星をとりまくガスは、惑星がある限界質量を超えて成長すると不安定となる。そして多量の原始的なガスが惑星表面に重力崩壊し、二重構造が作られるのである。

定量的にこの問題を調べるには、原始惑星重力圏内のガス層の構造と安定性という、恒星内部構造論と同様の議論を展開すればよい。多少違うことと言えば、固体中心核が存在することと、重力圏境界で星雲ガスの温度、圧力になめらかにつながるという境界条件であろう。力学的にはガス層が球状分布で重力平衡にあり、熱的には定常と考えよう。熱的構造を求める際、ガス層全体が必ずしも光学的に厚いわけではない、ということに注意しなければならない。火星軌道以遠では星雲の温度が低いから、難揮発性物質はもとより、 H_2O , NH_3 など揮発性物質まで固体になっている。しかもそれらのほとんどは原始惑星内部にとりこまれている。したがって光の吸収源は、ガス中に残存している僅かの微粒子と分子誘導吸収だけで、吸収係数は非常に小さい。したがってガス層

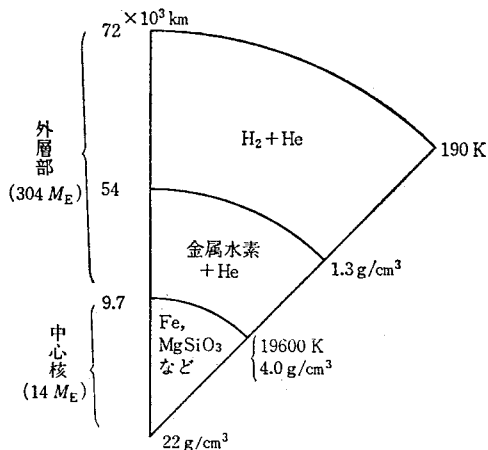


図3 木星の内部構造。大まかに分ければ金属、Mg-Si から成る中心核と H, He を大量に含む外層部の二重構造となっている。各々に含まれる質量(地球質量単位)、境界面等での半径、密度、温度なども示しておいた(スレータリー, 1975のモデルより)。

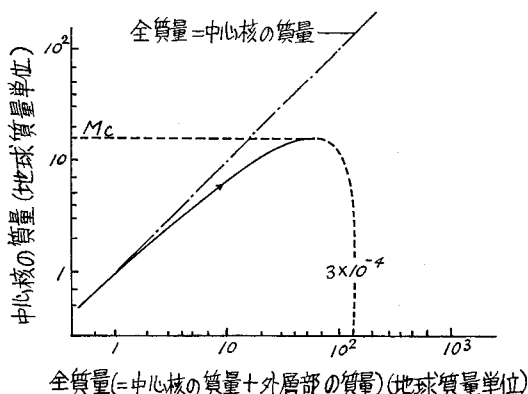


図4 原始木星の中心核質量と全質量の関係。“ \circ ”は外層部が不安定となる限界点を示している。星雲中に残存している微粒子量によって結果は多少変わるが、この図は微粒子量が 3×10^{-4} に減少している場合の結果を示している。

外層部では光学的に薄く、ほぼ等温である。また光球より内側の光学的に厚いところでは微惑星集積による大量の重力エネルギー解放によって対流状態となっている。以上の諸点に注意して、力学的にも熱的にも定常なガ

* 京都大学・理学部 Kiyoshi Nakazawa: Origin of the Solar System

ス層の構造を求め、原始惑星の質量 M_p と全質量 M_t (原始惑星+ガス層) の関係を示したのが図4である。原始惑星の質量が大きくなるとそれだけ重力も強くなりより多くのガスが引きつけられている。しかし $M_p \geq M_0$ となると、もはや力学的に平衡な解がなくなる。このことの意味は重大である。すなわち、原始惑星が微惑星を集積して次第に成長するが、その質量が M_0 を超えるとまわりのガスは不安定となり、原始惑星表面に重力崩壊するのである。これが木星型惑星の形成である。多量の星雲ガスが原始惑星をつつみ覆うわけで、太陽組成をもつ軽い外層部を形成し、二重構造を作ることは明らかであろう。しかも図4からわかるように、 $M_0 \approx 10 \sim 15 M_E$ であり、現在得られている木星のモデル(図3)ともよく一致している。

5. 地球の溶融

地球内部は大まかに言って核とマントルから成ることはすでに紹介した。この層構造がいかにして作られたか、という問題は地球科学の中心テーマの一つである。最も単純に考えれば形成直後の地球がどろどろに溶けていれば問題はなさそうにみえる。溶融すれば金属と Mg-Si 物質の間に化学的な分化が起こり、比重の大きい金属が中心に沈澱すると考えられるからである。

その熱源としていくつかの可能性が指摘された。そのうち最も有力視されたのが微惑星集積時の重力エネルギー解放である。原始地球の質量を M 、半径を R 、質量増大率を \dot{M} とすれば、解放されるエネルギーは単位時間あたりにはほぼ GMM/\dot{R} である。一方温度 T の地球表面からの熱輻射は $\sigma T^4 \cdot 4\pi R^2$ であり、両者のつり合いから温度が決まる。すなわち、

$$4\pi R^2 \sigma T^4 = GMM/\dot{R} = L \dots\dots\dots (1)$$

T が地球溶融に十分 ($\geq 1800^\circ\text{K}$) であるためには、 10^6 年以内に地球集積が終らなければならないことがわかる。すでに述べたように、地球の成長時間は $10^6 \sim 10^7$ 年であり、これでは地球を溶かすことはできない。それならばと言うわけで、金属だけを先に集め、核を作った後に Mg-Si 物質を集めればよいという考えも提唱された(ターキアン及びクラーク, 1969)。無論、太陽系形成過程の中で都合よい過程が存在するわけではない。

かくして層構造の形成問題は謎につつまれたままということになる。しかし上述の取扱いは問題を余りに単純化しすぎた誤まったものであり、もっと現実的な物理的素過程に目を向けなければならないことが林及びサフロノフによって指摘された。林の主張はこうである。4. で述べたように、原始惑星は多量の光学的に厚いガスで覆われている。そのため地表からの放熱は強く抑えられ、温度は(1)で決まるのではない。定性的に言えば、ガス層の光学的な厚さ τ ($d\tau = \kappa \rho dr$) を用いて

$$L \equiv GMM/\dot{R} = 4\pi r^2 \frac{4\sigma}{3\kappa\rho} \frac{dT^4}{dr} \approx 4\pi R^2 \sigma T^4 / \tau \dots\dots\dots (2)$$

となり、(1)よりも $\tau^{1/4}$ だけ高い温度を与える筈である。

一方、サフロノフは微惑星の衝突過程に注目した。微惑星が原始惑星に衝突した時、その重力エネルギーは表面だけに与えられるのではない。ほり返された原始惑星の表面層に一樣に与えられるはずだというのである。後に述べるように、林の指摘したガスの毛布効果は質量の大きい惑星 ($M \geq 0.2 M_E$) で顕著であり、一方ほり返し効果は小質量の原始惑星で重要となる。

原始大気による毛布効果は、林、中沢、水野(1978)によって詳しく調べられた。原始惑星表面で光度 $L = GMM/\dot{R}$ をもち、熱的にも力学的にも定常なガス層(原始大気)の構造を計算するのである(これは巨星の外層部の解を求めることと似ている)。そして大気の底の温度 T_b を知ればよい。

T_b を原始惑星の質量の関数として示したのが図5である。 T_b は M_p に強く依存しているが、これは M_p の増大に伴って原始大気量が増え、毛布効果が顕著になるためである。特に $M_p > 0.2 M_E$ では(1)から得られる温度よりもずっと高温になっている。 $M_p \approx M_E$ では 4000°K にも達し、原始大気量は $2 \times 10^{26} \text{g}$ ($1/30 \cdot M_E$) にも及んでいる。

T_b はとりも直さず原始惑星の表面温度であること、また惑星物質の熱伝導率が非常に小さいことから、図5は

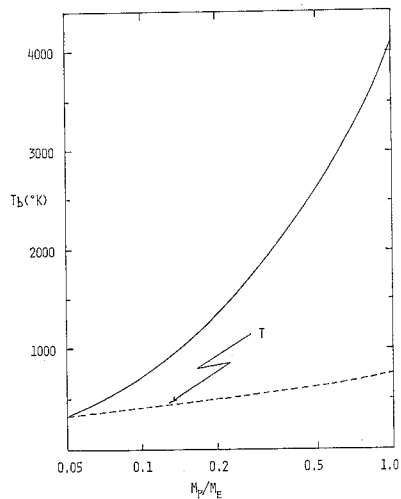


図5 毛布効果による原始惑星の表面温度。惑星質量 M_p (地球質量単位) と大気の底の温度、 T_b (惑星表面温度) の関係を示している。(1)で与えられるガスのない仮想的な温度 T も同時に書き入れてある。これから $M > 0.2 M_E$ では毛布効果が顕著なことがわかる。

同時に地球内部の形成直後の温度とみることもできる。これによれば地球形成直後の平均的な温度は 2500°K を超え、地球は毛布効果だけで十分溶けることが期待される。

しかしこれで核-マンツルの形成問題のすべてが片付いたという訳ではない。上の議論には高温で惑星物質が溶け、更には蒸発するという事は全く考慮されていない。蒸発熱を考えれば温度はもっと低くなるだろうし、また惑星物質の蒸気やその凝結微粒子が大気に混在することにもなる。

また、形成直後の地球の内部温度が例えば図5のようになめらかであったとは考えられない。かなりの不均一性があったはずである。半径 100 km 程の微惑星が高温の地表に落ちた時、瞬時にして周囲の温度になる訳はない。 $10^7 \sim 10^8$ 年の時間を要するのである。従って形成直後の地球は“ぶどう入りパン”のように温度的にも化学組成的にも不均一性を残していたに違いない。このことは、マンツル物質が完全な化学平衡になかったこととも符合しているし、また後に大気を供給すべき揮発性物質の保存のためにも都合がよいだろう。

このような状況の原始地球でどのようにして核-マンツルの分離が起こったのか、分離に伴う重力エネルギー解放はどんな作用をするのか、そしてその後の熱的な歴史がどうであったのか、は今後の重要な問題である。仮想的な初期条件、境界条件の下で惑星の熱史を追跡してきた従来の地球科学のやり方をこの辺で書き改めてゆく必要がある。

6. 地球型惑星の比重

もう一度図5にもどっていただく。金星の質量は地球の0.8倍で、図5からみる限り、原始金星は地球と同様十分な高温を経験したはずである。そのため核-マンツルの分離も起こり、比重も地球と似たものになったのだろう（にもかかわらず金星に磁場がないのは長い自転周期のためと考えられている）。

図5からわかるように、火星 ($0.1M_E$) になるともはや十分な温度には達せず、低温凝縮物質がとける程度であろう。この時金属は遊離できず惑星の比重は余り大きくなれない。このことは火星や月の小さな比重とよく符合している。しかし月や火星の表層数百 km はかって溶けていたと考えられているが、この事実はどう説明すればよいのだろうか。無論毛布効果では無理である。たぶんサフロフ (1978) の言うほり返し効果によるものだろう。彼の計算によれば火星表面では 1500°K 程の高温になる。しかも微惑星の直撃を受けた部分はもっと高温になったはずである。

しかし“ほり返し効果”は十分定量化されているとは言い難い。微惑星衝突によって表層の一部が吹きとばさ

れクレーターを作るが、放出物質の飛翔中にどれだけ熱を失うか、またこの過程に原始大気存在がどう影響するのかなどわかっていないことも多い。今後“ほり返し効果”の素過程を明らかにすることは重要であろう。

惑星比重に関する謎は水星である。水星のモデルとして核-マンツル層構造を考えたとすれば、核の大きさは半径の $3/4$ にも及ぶ。すなわち、Mg-Si 物質が水星では欠乏していると考えなければならない。どの惑星も似たような物質から、同じ過程を経て形成されたという立場からすれば一寸考えにくい問題である。

一つの可能性として次のような考えはどうであろうか。水星は例外的に大きい離心率 (~ 0.2) をもっている。そのため星雲ガスとの間に大きな相対速度 (\sim マッハ 10) をもっていたはずである。ガス中を固体が超音速で飛ぶわけで、彗星と惑星間ガス、銀河と銀河間ガスの相互作用に似た状況となる。すなわち、原始水星前面に衝撃波が作られ、表面は高温となる。重い金属成分は溶けて惑星内部に沈澱し、軽い Si-Mg 物質は一部蒸発して下流へ流れ去ったのではなからうか。

7. 星雲と原始大気の散逸

『地球形成後、5億年たって真空中に近い地表に内部から脱ガスして大気を形成し、ほぼ同時期に地殻も作られた。』これが地球科学の得た結論である。一方太陽系起源論から言えば、原始地球は星雲の中で生まれ重力圏には 10^{26} g を超える原始的なガスが存在していた。この両者が矛盾しないためには『惑星形成後数億年以内に星雲ガスは消失し、惑星のまわりの原始大気も散逸した。そのため毛布効果も薄れ表面は冷えて地殻を形成し、その後脱ガスして大気も作られた』という筋書きでなければならぬ。従って星雲と原始大気の散逸を調べることが先決であるが、その詳細はまだよくわかっていない。

星雲の散逸過程としては、今までに“太陽風説”と“乱流説”が考えられている。木星型惑星の形成時期は星間雲の収縮から約数千万年の頃である。太陽はちょうどこの時 T Tauri 段階にあり、強い太陽風を吹き出している。多量の高速度粒子の衝突によって星雲を表面から次第にはがそうというのである。エネルギー的な考察だけからすれば、現在の 10^3 倍の太陽風によって約 10^8 年で星雲はなくなってしまうことがわかっている。これが“太陽風説”である。“乱流説”では質量の大きい木星、土星の重力作用によって星雲内に作られる乱流に着目する。もし十分な乱流が生じれば、乱流拡散によって角運動量が能率よく輸送され、星雲の一部は太陽に、残りは系外へ飛び去るだろう。しかしいずれの過程もまだ定量的な議論はなされておらず、今後の詳しい研究が待たれる。

星雲の散逸に続いて原始大気がどう散逸するか、は地球大気の起源と直接結びついた重要な問題である。しか

しこの問題についても明確な答はまだない。そこで予測もまじえることになるが考えられている大気散逸過程について述べておこう。

原始大気は星雲の圧力におされて閉じこめられていたともみなせるわけで、星雲散逸とともに星雲圧力に比例して大気も減少すると予想される。しかし物事はそう簡単ではない。原始惑星成長時には微惑星集積による重力エネルギーの解放があり、原始大気をおし上げる作用をしていた。惑星の成長が止まると光度は減少し、大気量は増大する傾向をもつ。このようなわけで星雲散逸後の残留大気量は 10^{25} g を下らないのである。現大気の Ne 量から課せられる許容残留量 10^{20} g からみればまだ大きい開きがある。

ところが星雲が散逸してしまえば状況は一変することに注意しなければならない。太陽輻射、太陽風が直接大気に影響するようになるからである。可視光は地表近くまでとどき、熱源となって大気をおし上げる一方太陽風は大気上層粒子を地球重力圏外にたたきだす。前と同様現在の 10^3 倍の太陽風を仮定すると1億年のオーダーで原始大気は散逸しそうである。

H や He は散逸できたとしても、分子量の大きい Ar や Xe が H とともに散逸できるかどうかは疑問である。むしろかなりの量が残る可能性が強い。それならば発想

を転換して、現大気の希ガスは原始大気の残留物であると考えるのはどうだろう。惑星大気の Ar, Xe 同位体比にかなりのばらつきがあることはすでに述べておいた。

この理由を見出すことは容易ではないらしい。例えば火星の Ar^{40}/Ar^{36} 比を説明するには火星物質中の K 含有量を極端に大きくとらなければならないという(浜野, 1976)。もし Ar^{36} が原始大気の残留物と考えるなら同位体比のばらつきもさしておどろくことはない。K 量は惑星質量に比例し、従って Ar^{40} 量も惑星に比例する。一方 Ar^{36} は原始大気量にほぼ比例し、惑星重力(即ち質量)に強く依存する。その結果地球より火星の方が K^{40} に対する Ar^{36} が少なく、大きい Ar^{40}/Ar^{36} 比を与えることになる。この考えに立てば一般に質量の大きい惑星ほど Ar^{40}/Ar^{36} 比は小さくなる。

無論この考えには厳密な証明が必要であり、現時点では単なる推測に過ぎない。しかしこの問題にしる、水星の比重にしる、地球科学的な問題を天体物理学からみた時ずい分違ったとらえ方ができるという一例ではある。それが敢えて推測を書きつらねた理由である。

地球科学と関連する問題はまだまだある。しかし編集の方と御約束した制限枚数ははるかにオーバーしてしまった。この場を借りて編集の方々におわびをしながらペンを置くことにしよう。

わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

定価280円(千49円) 79-3月号・2月5日発売!

●3月号のおもな内容

- ★月がおこす食現象三つ。6ヵ月ぶりの部分月食、アルデバランの食、火星食と1ヵ月の間に3回、ぜひ晴れてほしいものです。観測ガイドは藤井旭さん。
- ★早春の宵の空は、西へ傾いてゆく冬の星座、木星、土星それに水星と明るい星も多くてにぎやか。空の暗い所ならば黄道光も見られます。案内は菊岡秀多さん。
- ★南の果の島ニュージーランドには、かわいい小さな天文台が二つあります。小さいけれど、なかなか活発な活やくをしています。紹介は訪問された寿岳潤さん。
- ★天体写真におけるフィルムとフィルターの関係は?
- ★アメリカのアマチュア観測家たち、観測ガイドなど他

写真で見る 自作天体望遠鏡

天文ファンが自分で作った望遠鏡といえば、昔からもう相場がきまっていました。しかし、最近では天文ファンのあいだで、とてもシロウトとは思えない大型望遠鏡や特殊な望遠鏡が作られ、大活躍しています。

天文ガイド編集部では日本全国から情報を集め、既にな名になっている大型望遠鏡や、まだだれも知らない特殊なもの、すごく便利なポータブル望遠鏡などを写真で紹介しました。●天文ガイド編/B6判・700円発売中

天文年鑑1979

●天文年鑑編集委員会編/B6判・430円発売中

全天星雲星団ガイドブック

●藤井旭著/A5変型判・332ページ・1,500円発売中

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
振替東京7-6294 電話03(292)1211