

太陽系の起源

— 地球科学との接点 —

中 沢 清*

1. はじめに

太陽系起源論の歴史は古い。しかし原子、分子過程から惑星間重力相互作用まで多岐にわたる相互作用を厳密に積み上げ、真の進化論として飛躍的な発展をとげたのは1970年代に入ってからと言っても過言ではない。60年代までに、星間雲の諸特性、星の形成と原始星の進化、星の進化、超新星爆発と銀河の化学進化など、星の一生と銀河系内での物質の輪廻に関する統一的な描像が得られていた。これが太陽系の形成を調べる上でのバック・グラウンドを与えるとともに、その多様な手法をも提供した。そしてここ10年で太陽系起源の大枠はすでに固まったと言ってよい。

隕石や惑星物質の実験的な研究の発展もみのがせない。隕石や大気、惑星物質の精確な化学、同位体分析は、太陽系内物質の化学組成に関する相似性と非一様性をあばき出した。また人工飛翔体による直接的な測定は豊富な質の良いデータを提供した。これらの諸成果は太陽系の歴史と現状をより正確に描き出すとともに、太陽系起源論のめざすべき方向を指し示した。太陽系起源論が実証科学として今後ますます発展する足がかりを与えよう。

無論太陽系形成の理論と深いかわりをもつ観測は地球科学サイドのものに限らない。天体力学サイドの問題、すなわち惑星、衛星の運動学的特性を太陽系起源論の中でどう説明するかは重要なテーマの一つである。しかしここでは敢えて地球科学的な問題に限ることにしよう。1つには地球科学の成果のいくつかが“時間座標”を含んでいるからである。更に言うならば、天体物理学の成果と手法が地球科学的な問題に対して有効であることが近年認識され始め、天体物理学の地球科学への侵略が今後ますます期待されているからである。

このようなわけで、以下では地球科学等で明らかにされてきた惑星とその歴史に関する諸成果の一端を紹介し、太陽系起源論がそれらをいかに統一的に説明できるのか、またどの部分に未解決な問題を残しているのか述べよう。

2. 太陽系形成のあらまし

やはり、物事の順序として太陽系形成のあらまきは述

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

べておかねばならない。しかしすでに本誌で詳しい解説があるので(林, 天文月報70巻1号), 用語の定義程度の簡略なものにとどめよう。

太陽系形成の第一歩は星間雲の収縮から始まる。小さな角運動量をもつ星間雲の大部分は急激な収縮の後、原始太陽を形成する。星間雲の周辺部分にあり、かなり大きい角運動量をもつ部分は原始太陽より多少遅れて収縮し、星間雲の収縮開始後約 10^5 年で太陽のまわりに薄く広がった円盤状の原始太陽系星雲(以下では単に星雲と呼ぶ)を形成する(図1)。星雲は形成直後かなりの高温(地球軌道付近で $2000\sim 1500^\circ\text{K}$, 木星軌道付近で $1000\sim 500^\circ\text{K}$)となる。しかし円盤表面からの熱放射によって次第に冷却し、ついには太陽放射と星雲表面からの熱放射のつり合った定常状態に入る。定常状態での星雲の典型的な温度、密度は $300\sim 100^\circ\text{K}$, $10^{-8}\sim 10^{-10}\text{g/cm}^3$ であり、円盤の厚さは太陽からの距離の約 $1/20$ である(日下, 中野, 林, 1970)。星雲は質量的には取るに足りない($\sim 0.02 M_\odot$)が、すべての太陽系内天体の母体であり、また惑星形成にとって本質的な役割を果たすガス抵抗の荷ない手でもある。

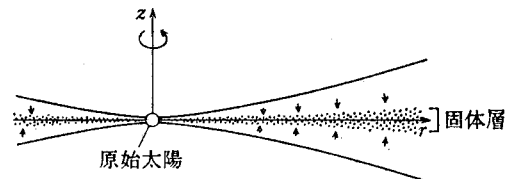


図1 原始太陽系星雲の模式図。原始太陽のまわりを回転する薄い円盤状の星雲と固体微粒子の沈澱によって作られる固体層

星雲が定常状態に落ちついた時、星雲内には $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の固体微粒子が浮遊している。星間雲中のものがそのまま残ったものもあろうし、また星雲形成の際、一度蒸発し、冷却とともに再凝縮したものもあろう。これら微粒子は星雲内でブラウン運動しながら相互に衝突し、付着成長する。同時に微粒子は、太陽重力の z 成分(図1)のため、星雲赤道面に向かって沈澱する。粒子が成長して大きくなれば沈澱速度は早くなる。ところで沈澱は粒子を空間的に集中させ、粒子数密度の増大を促して付着成長を速めるため、沈澱は更に急速に起こることになる。このように付着成長と沈澱は互いに協力的に作用しあい、加速度的な粒子の成長と沈澱が起こる。

沈澱によってガスと固体の分離が起こるが、固体の集

中した薄い層のことを**固体層**と呼んでいる。固体層の厚さが星雲の厚さの1万分の1程度になると、太陽による潮汐力に対して、固体層の自己重力が上廻り、固体層は不安定となって分裂する（サフロノフ, 1969; 林, 1972; ゴールドライヒ及びウォード, 1973）。固体層の分裂は星雲形成後約 10^5 年で起こり、この時固体微粒子は mm ~ cm の大きさにまで成長している。この分裂破片の大きさは半径約 10 km, 質量 10^{18} g で、無論固体微粒子が集まったものである。その数は太陽系全体で 10^{12} 個にも及ぶ膨大なものである。これはもはや粒子というより天体といった方がふさわしく、**微惑星**と呼んでいる。

微惑星は星雲内を太陽重力の下でほぼケプラー回転している。円ケプラー運動からのずれを微惑星のランダムな運動とすると、その速度は 10 m/sec 程度の小さなものである。星雲ガスによる抵抗がランダムな運動を抑制し、一方微惑星相互の重力作用はランダムな運動を励起する。この両者の釣合いとして上記のランダムな運動が決められるのである（中川, 1978）。同時に微惑星はほぼランダム運動の速度をもって相互に直接衝突し、成長する。この過程は中川（1978）によって調べられ、微惑星は約 10^5 年で平均的には 10^{21} g, 最大のものは 10^{25} g にまで成長することが示された。 10^{25} g 以上の微惑星のことを特に**原始惑星**と呼んでいる。

原始惑星を他の微惑星から分けるのは、単にその質量が大きいというだけではない。質量が 10^{25} g 以上となると、その重力も大きくなり、惑星重力圏内に多量の星雲ガスを取込み大気を形成するようになる。この原始大気存在こそが原始惑星の特徴なのである。

さて原始惑星がさらに成長するには、もっと遠くの微惑星をも捕獲しなければならない。微惑星が完全なケプラー運動している場合は、無論軌道長半径は変化せず、遠くの微惑星が原始惑星に近づくことはない。しかしガス抵抗と微惑星相互の重力的な散乱を通して、微惑星はゆっくりと長半径を変化させ、原始惑星に近づいてついに捕獲されるのである。このような原始惑星の成長過程は林, 中沢, 足立（1977）によって詳しく調べられた。それによると、 $10^6 \sim 10^7$ 年で地球型惑星のサイズになり、また $10^7 \sim 10^8$ 年で木星型惑星の中心核（ ≈ 10 ME, ME は地球質量）にまで成長する。原始惑星の質量が地球の10倍を超えると、重力圏内に取込んでいた原始大気は重力的に不安定となり、H, He を主体とする大量のガスが原始惑星表面に重力崩壊する。これによって比重の小さい木星型惑星が作られる（水野, 中沢, 林, 1978）。

以上で惑星系の骨格はでき上がった。この時期は星間雲の収縮から数千万年たっており、太陽はちょうど T Tauri 段階にあって強い太陽風を吹き出している。星雲の表面は強い太陽風に吹きさらされ次第にはがされ、約

10^8 年で星雲は散逸してしまおうと見積もられている。

以上が太陽系形成のあらましである。以下では地球科学等で最近はっきりしてきた惑星の構造と歴史が、上述の太陽系形成の理論とどのようにマッチし、どこにまだ未解決の部分が残されているのか述べていくことにしよう。

3. 地球科学, 比較惑星学からの情報

(1) 地球の内部構造と地球型惑星の比重

地球の内部構造についてはかなり前からわかっていた。地震波伝播の詳細なデータ解析のおかげである。大まかに言えば地球は二重構造になっている。Fe-Ni 金属から成る核が質量の約 1/3 を占め、残りのほとんどは Mg-Si 化合物を主成分とするマントルである。しかも核とマントルはかなりシャープな境界面（ ≤ 10 km）で分けられている。表層の厚さ 50 km 程は地殻であるが、質量的には 1% 程度にすぎない。太陽系起源論との関係で重要なことは、マントルが完全な熱化学平衡にはなかった（リングウッド, 1975）という事実である。

月では、アポロによる地震波発生装置の設置により、その内部構造も次第に明らかになってきた（残念ながらすでに NASA が受信を中止したためこれ以上のデータ集積は望めない）。それによれば月では金属核はないか、たとえあったとしても質量で 3% 以下である（中村ら, 1978）。月物質の大部分は地球のマントルと物理的性質も化学組成も似た物質によって占められている（リングウッド, 1978）。

表 1 地球型惑星（含月）の平均比重。惑星の質量（地球質量（ 6×10^{27} g）単位）と半径（km 単位）も同時に示しておいた。

	質量	半径	比重
水星	0.055	2440	5.4
金星	0.82	6060	5.2
地球	1.0	6380	5.5
火星	0.11	3390	3.9
月	0.012	1740	3.4

地球、月以外の地球型惑星の内部構造についての直接的な測定はない。平均比重からある程度推定できるだけである。惑星の平均比重は表 1 に示しておいた。金星は質量的にも比重の点からも地球に匹敵しており、内部構造も地球に似ているだろう。ただ金星には磁場は存在しないことが知られている。火星には Fe 金属の核は存在しない。磁場が小さく比重も小さいことから、核があるとしても硫化鉄を主体とするものと考えられている。一般に質量が大きい惑星程比重も大きいという傾向がみられる。質量の大きい惑星はより高温になり（後述）、

組成上の分離が進むこと、また重力で自らをおし縮めることがその理由である。しかし水星は例外である。質量は地球の5%にすぎないが比重は地球に匹敵しているのである。質量の小さい水星がなぜこのような大きい比重を持つに到ったかは1つの謎とされている。

惑星の歴史はどの位わかっているのだろうか。無論、惑星とは言っても地球、月に限られたものである。今までに知られている地球最古の岩石は38億年の年令をもっている。しかもそれが片麻岩(堆積岩の一種)であることから、地球形成後8億年までに地殻及び海洋は形成されていたことになる。また後に述べるように、地球大気もこの頃までに形成されており、結局地球は形成後数億年以内にほぼ現在の姿になったと考えられている。ただ残留磁気をもつ岩石の最古のものは27億年の年令であることから、核とマントルの分離はもう少し後だったのかもしれない。

アポロ11~17号の持ち帰った石の年代測定の結果、いわゆる高地の石はほとんどが40億年の年令を示している。一方月の海の玄武岩の年令は約38~32億年で、この時期に海が形成されたことになる。

大気や地殻そして月の高地がほぼ同時期に形成されたということはおもしろい。もっと拡大解釈して、すべての惑星の大気、表面殻形成が40億年前であった、と考えてもよいだろう。

(2) 地球大気の起源

大気は質量的には微少な存在であるが、太陽系起源論の重要な試金石の一つとして最近注目をあびている。

地球大気では、他の元素に比べて希ガスが極端に欠乏している(図2)。このことからブラウン(1952)は次のような大気2次生成説を提唱した。すなわち、地球大気

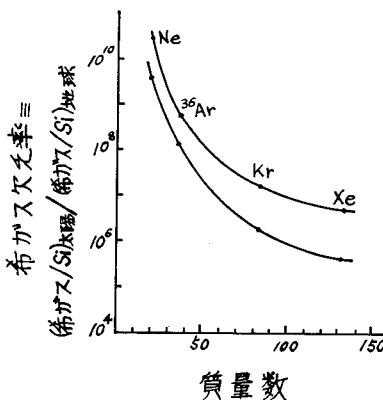


図2 大気中の希ガスの欠乏。Siを基準とした地球の希ガスの存在度を太陽値と比較したもの。最大値は大気だけを考えた場合、最小値は地球内部にとりこまれていたものも考慮した場合の値。但しArについてはAr⁴⁰は除外されている(ブラウン, 1952による)。

は太陽組成をもつ原始的なガスが地表に留まったのではなく、地中に捕獲されていたガス成分が真空に近い地表に脱ガスしたものである、と。希ガスは活性が低く微粒子に吸着する確率も小さいため、大幅な欠乏が起こったというのである。

希ガスの同位体比に注目することによって、更に詳しい脱ガス過程が明らかにされた。大気中のAr⁴⁰/Ar³⁶は295という大きい値をもっているが、元素合成時に期待されるこの比は10⁻⁴と小さい。したがって、大気中のAr⁴⁰はすべてK⁴⁰の崩壊核が脱ガスしたものと考えなければならない。もしK⁴⁰の半減期(13億年)よりもずっと後に脱ガスが起こったのであれば大気中のAr⁴⁰/Ar³⁶とマントル中のこの比はほぼ同じであろう。一方十分早い時期に脱ガスした場合には、大気中のAr⁴⁰/Ar³⁶はマントル中より小さいはずである。それ故、(Ar⁴⁰/Ar³⁶)大気と(Ar⁴⁰/Ar³⁶)マントルを比べることによって大気の脱ガスの時期を知ることができる。結論はこうである。地球形成後5億年以内に脱ガスし大気を形成した、と(浜野, 小嶋, 1978)。同様の議論はXe¹²⁹/Xe¹³²(Xe¹²⁹はI¹²⁹の崩壊核)についても展開され、Arからの結論に矛盾しない答が得られている。

以上の事実は太陽系起源論に対して重要な要請を課すことになる。惑星は星雲内で生まれ、その重力圏は大量の原始的なガスで満たされている。星雲も原始大気は惑星形成後5億年以内に散逸しなければならない。しかも現大気中のNeの総量に矛盾しないためには、原始大気の残留量が10²⁰g(形成直後の原始地球は2×10²⁶gの原始大気に覆われている)以下でなければならないのである。

(3) 惑星大気

ゆきがかり上、惑星大気のデータを表2に掲げておこう。大気成分表としてはまだ不十分だが、大まかに次のことは言えるだろう。すなわち、(i)木星大気は

表2 惑星の大気組成(清水, 1978による)

	主成分	同位体比など
金星	CO ₂ (98%) N ₂ (2%)	D/H < 1/80
地球	N ₂ (78%) O ₂ (21%)	D/H ~ 10 ⁻⁴ , C ¹² /C ¹³ ~ 89 Ar ⁴⁰ /Ar ³⁶ = 295, Xe ¹²⁹ /Xe ¹³² ~ 1
火星	CO ₂ (95%) N ₂ (3%)	Ar ⁴⁰ /Ar ³⁶ ~ 3000 Xe ¹²⁹ /Xe ¹³² ~ 2.5
木星	H ₂ (82%) He (18%)	C/H ~ 5 × 10 ⁻⁴ (太陽値) C ¹² /C ¹³ ~ 110 ± 35 (太陽値) D/H ~ 2 × 10 ⁻⁵ (太陽値)

組成上太陽ガスと同じであること、(ii) 地球型惑星の大気主成分は CO₂, N₂ であること、(iii) 地球だけは例外で N₂, O₂ が主成分となっていること、(iv) 地球型惑星の同位体比は惑星によってかなりのひらきがあること、が結論される。(iii) については、地球環境が水の存在を許し、生物が発生しえたことで後に大幅な変化が起った為と考えられている。(iv) については Ar⁴⁰/Ar³⁶, Xe¹²⁹/Xe¹³² が地球と火星で有意な差があること、また地球型惑星一般(?)に D/H が太陽値より大きいことが特筆される。これらは太陽系起源論の中で統一的に説明されるべき問題であろう。

さて次回には、地球科学で明らかにされた観測事実と太陽系起源論がどうマッチし、またどこに矛盾や未解決な部分を残しているか、という本論に入ることしよう。惑星が地球型と木星型に分離したのはなぜか、地球のコア・マントル二重構造はどのようにして作られたのか、そしてまた、地球型惑星の比重の差はどう説明されるのか。こんな疑問に、現在展開されている太陽系起源論はどこまで迫れるのだろうか(続)。

☆ ☆ ☆

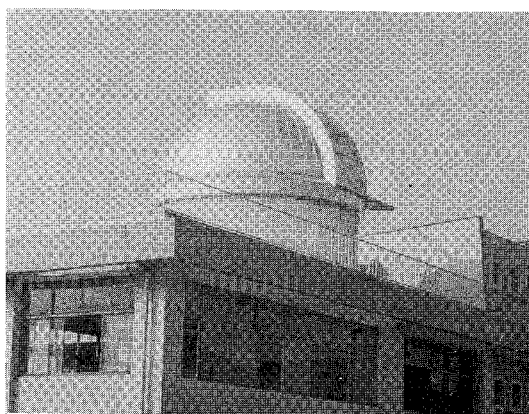
雑 報

Fujikawa 彗星 (1978 n) のその後

本誌先月号にて速報したように、藤川繁久氏により発見されたこの彗星は、その後の観測が集まり精しい軌道が計算されて来るにつれ 1881 年 10 月 4 日にデニングによりしし座に 7 等級で発見され、その後全く行方不明になっていた周期彗星 Denning 1 (1881 V) の再発見ではないかと考えられていた。近着の天文電報によると Fujikawa 彗星 = 周期彗星 Denning 1 の 11 回目の周回という同定が成立したようで、今後は Denning-Fujikawa 周期彗星と呼ぶそうである。なお、この Denning 1 周期彗星に関しては、英国の R. J. Buckley が 1881 年の観測を基にして次のような軌道を計算して発表していた。参考のために今回の軌道要素を並べて記載しておく。藤川氏により発見された時は約 11 等級であったが、10 月末から 11 月始めには約 16 等級にまで暗くなっている。

by B. G. Marsden	by R. J. Buckley
$T=1978 \text{ Oct. } 2.036 \text{ ET}$	1980 Mar. 20
$\omega=334^{\circ}044$	324^{\circ}1
$Q=40.955$	46.8
$i=8.682$	7.0
$q=0.77857 \text{ AU}$	0.905 AU
$e=0.82017$	0.804
	$P=9.88 \text{ 年}$

(香西洋樹)



ASTRO TOKYO 営業品目

天体望遠鏡ならびに双眼鏡

天体写真撮影用品とパーツ

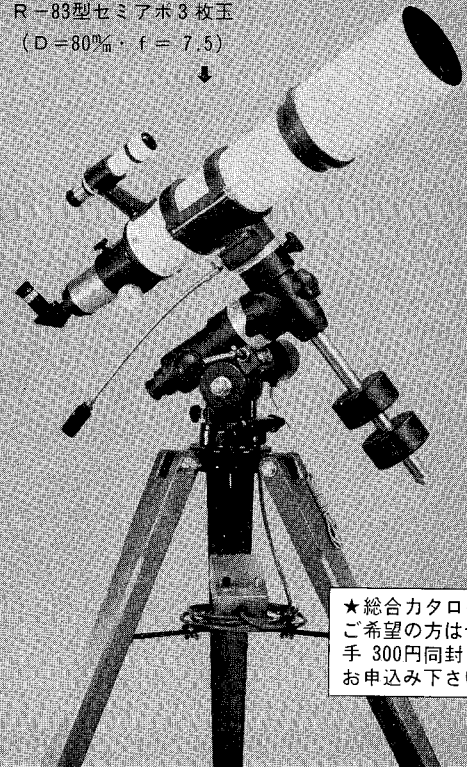
望遠鏡各種アクセサリ

観測室ドームの設計・施工

ASTRO 光学工業株式会社

〒170 東京都豊島区池袋本町2-38-15
☎03 (985) 1321 振替口座東京 5-52499番

彗星捜索用望遠鏡
R-83型セミアポ3枚玉
(D=80mm・f=7.5)



★総合カタログ
ご希望の方は切
手 300円同封し
お申込み下さい