



若者

# モグラだって夢を見る

— 物質科学から見た太陽系のなりたち —

植田千秋\*

## 1. はじめに

太陽系のなりたちは、古くから人類がその想像力を働かせ続けたテーマのひとつであったが、ごく近年に至るまで、主として哲学、宗教の受け持つ領域であった。そして太陽系は、外と隔絶した閉鎖系で形つくられたとするイメージが漠然ともたれていた。ところがここ四半世紀の間に、電波天文学の観測が進み、恒星の進化過程についての理解が深まった結果、太陽系の進化も、銀河系規模の大きな物質循環の一過程として捉えられるようになった。太陽系を形つくる諸元素は、こうした進化過程のなかで合成され、さらに太陽や惑星の集積も、恒星の終末現象である超新星爆発をきっかけにして、始まったと考えられている。このように周囲の世界で観測された現象は、無論強い説得力を持っており、今日この物質循環モデルにあえて異論を唱えるものはいない。しかしながら、直接手にとって分析できる事柄しか関心がないという“偏狭な”物質科学の立場にあえて立てば、これらはいくまで「状況証拠」であり、その推論は単なる「夢のある話」の一つにすぎない。ところが、このような天文学上の成果と相前後して、始原的な隕石から太陽系外の核合成イベントに起源を持つと考えられる同位体組成が発見された<sup>1)</sup>。これらは太陽系外からの作用を直接証明する「物的証拠」であり、その後、分析にもとづいた太陽系形成史の解明が大きく進展することになった。隕石は地上鉱物とは次の三点が著しく異なる。

- ①元素組成が太陽大気（太陽系質量の99%を占める）に近く、鉱物相が未分化である。

\*植田千秋(Chiaki UYEDA), 大阪大学教養部, 地学科, 助手, 理学博士, 地球科学

- ②形成年代がいずれも、太陽系の年齢とされる45.5億年前後に集中している。

- ③再現実験の結果、隕石の鉱物組織は、地上鉱物とはケタはずれな急冷により形成されたものや、気相から直接凝縮したと思われる微細結晶が含まれる。

その形成過程は、初期太陽系において、ガスから固体微粒子が凝縮し、さらにそこから惑星が集積するプロセスを解明する上で重要な鍵と考えられる。本稿では、そのような試みの一つとして、原始太陽系星雲からシリケートが凝縮する過程を再現した実験生成物の、同位体測定について紹介したい。

## 2. 蒸発・凝縮における同位体比変動の再現実験

シリケートの蒸発・凝縮過程は、初期太陽系において星雲ガスから固体微粒子が形成され、最終的に惑星が集積するまでの過程で、絶え間なく繰り返されてきた、もっとも基本的なプロセスと考えられる。隕石に含まれる高温凝縮鉱物(CAI包有物)は数十%もの大きな同位体質量分別を示し、星雲中における蒸発・凝縮過程に起因すると考えられている。しかし、実験科学の立場から、諸条件を制御してこれらのプロセスを再現する試みは、近年ようやく行なわれるようになったばかりである。最近、オーストラリアのグループが、輝石を出発物質として蒸発・再凝縮実験を行い、再凝縮生成物および蒸発残渣のMg同位体比を測定した結果、出発物質に対する同位体変動率が、隕石中のCAI包有物に相当する大きさを持つことをみいだした。これは、隕石中の異常に大きな質量分別が、蒸発・凝縮過程により引きおこされた可能性を具体的に示唆するものであった<sup>2)</sup>。しかしなが

ら星雲中での固体の形成過程を考察するには、シリケートガスの凝縮プロセスがより重要であり、特に再凝縮の際の、様々な温度での気相・固相間のガスの分別が、凝縮物を解析する上での鍵と考えられる。そこで我々は、図1に示す

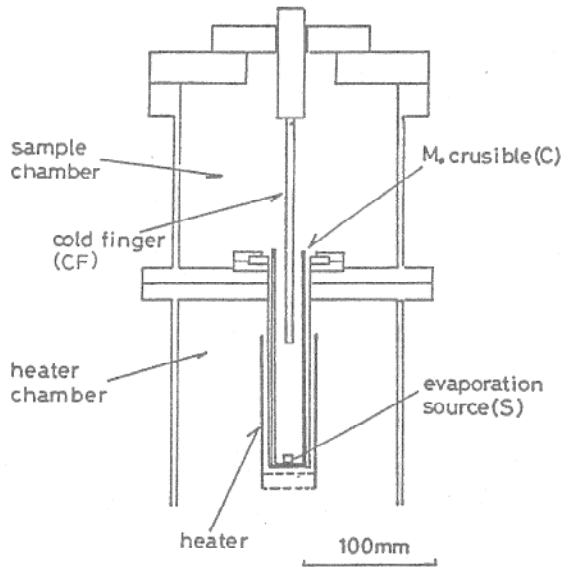


図1 原始太陽系における蒸気・凝縮の再現実験のための真空炉。凝縮物はcold finger上に成長する。(cold fingerの下端は1500℃, 上端は室温。)

ような真空炉により、カンラン石 ( $Mg_2SiO_4$ ) を出発物質として昇華させ<sup>3)</sup>, 1,500℃から室温までの様々な凝縮温度での再凝縮物を生成し、そのMg同位体比を測定した。図2にSIMSによるMg同位体比の測定結果を示す<sup>4)</sup>。縦軸は出発物質を基準とした $^{26}Mg/^{24}Mg$ 比の変動( $\Delta 26$ )をあらわす、横軸はサンプルの凝縮温度 $T_c$ を表す。 $(\Delta 26)$ の値は、室温凝縮物では負であるが高温凝縮物では正となり、1,400℃では+20%近くに達する。(ちなみに地上鉱物の場合、標準値に対するばらつきはせいぜい数%以下である)

今回の実験は、凝縮相がたえず気相から一方的に離脱し続ける非平衡な系であると考えられる。一般にこのような系については、レイリーによる質量分別モデルがあり、これを用いて例えば、地上の降水中の酸素同位体と凝縮温度の関係等が説明されている。今回の結果にも同様のモデルを適用することができる。レイリー分別則に従う場合、同位体変動率は、残存ガスの

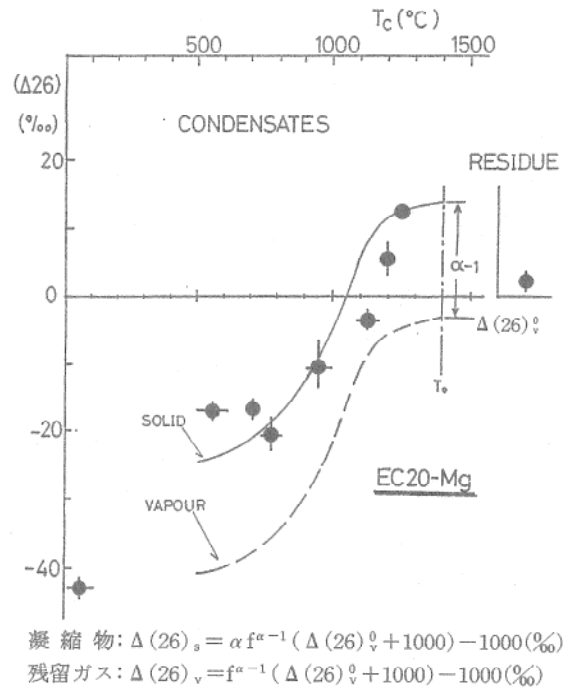


図2 シリケートの凝縮過程におけるMg同位体比。実線、破線は各々、レイリーモデルによる凝縮物、および残留ガスの同位体比の計算値。下式の $(\Delta 26)_0$ は平衡凝縮温度 $T_0$ におけるガス成分の初期値を、 $\alpha$ は気相に対する固相の質量分別定数を表わす。 $\Delta 26 = \{ (^{26}Mg/^{24}Mg)_{\text{サンプル}} / (^{26}Mg/^{24}Mg)_{\text{出発物}} - 1 \} \times 1000$  (%)。

濃度 $f$ に依存する関数となるが、 $f$ の温度曲線はcold finger上に析出した凝縮物の量から推定出来る。このようにして求めた同位体の温度曲線は図2に示すように、測定値と定性的によく一致している。蒸発源を出発したカンラン石組成のガスは、凝縮が始まるまでは、同位体組成は $\Delta(26)_0$ のまま一定である。しかし温度 $T_0$ 以下では、ガスの一部が分別して凝縮し、その際、固相は気相に対して重い同位体が選択的に分別する。残存の気相はその分だけ軽い同位体組成となって、低温の領域へ移動し、そこで同様の分別が繰り返される。これが室温領域に至るまでくりかえされ、同位体組成は残留ガス濃度に依存して、正から負へと大きな温度変化をしめす。

これまで一般に蒸発・凝縮における同位体比変動については、凝縮物は出発物質に対して軽い方へ分別し、蒸発残渣は重い方へ分別するという、一見シンプルな判別法が受け入れられて

いたが、今回の測定結果により、たとえ再凝縮物であっても凝縮温度が高温である場合には出発物質よりも重い方向へ質量分別しうることがわかった。

隕石を構成する組織の中には、CAI 包有物の他にも直接ガスから凝縮したと考えられる形状をもつ微細な鉱物組織が数多く見出されるが、残念ながらこれらの組織については、組織が微細なため同位体の研究はあまり進んでいない。一方、計算により固体微粒子の凝縮過程を考察した試みとして、太陽大気組成のガスを凝縮させた場合の、各元素のガス残存率と温度の関係が求められている。現在、我々は図2の結果をふまえ、隕石中の微細組織の同位体組成を、SIMS を用いて *in situ* で測ることをめざしている。これが可能になれば、同位体の温度曲線から星雲ガスが冷却した際の、諸元素の残存ガス濃度  $f$  の温度曲線を推定でき、上に述べた平衡凝縮の計算を、実際に隕石の同位体比データから検証できる。さらに、原始星雲中の冷却過程がどの程度平衡であったかなど、惑星形成過程についての基本的な情報をもたらすと考えられる。

### 3. おわりに

惑星科学は、太陽系の形成という非可逆過程の探求がメインテーマの一つであり、他の自然科学に比べると考古学的な要素の強い分野といえる。隕石の分析を通じてこれに携わる人々は、EPMA や SIMS を使って、 $\mu\text{m}$  オーダーの不均一組織の分析を行なう一方で、得られたデータのもつ意味を明らかにするために、広大な空間を相手に、あえて「ヨシのズイから天を覗く」ような、大胆な想像力が要求される。このような背反する作業を進めることは痛快ではあるが、それにしても太陽系の成り立ちをあますことなく、確信をもって説明するには目下のところ情報が少なすぎる。無論、天然のサンプルから引き出せる情報にも限りがある。その一方で、初期太陽系のような極限条件における、物質合成についての基礎的なデータが不足していることも大きな制限となっている。現在、惑星科学に携わる多くの研究者が再現実験の必要性を痛感

し、先に述べたように、具体的な成果もあがりつつある。しかし求めるべきデータの量が膨大であり、他の分野からの広範な協力が望まれる。

惑星科学は、現在すでに多くの分野のオーバーラップする、いわゆる学際領域であるが、単に諸分野の結果の寄せ集めでなく、各々の分野の方法論のエッセンスを盛りこむだけの包容力をもつ領域である。今日、自然科学のどの分野でも、認識法は共通なものにならされつつあり、方法論の特質に拘泥するなど、あるいは時代遅れなのかもしれない。しかしながら、遠い未来の歴史学者たちが、現文明のもつ世界観を解明することになった時、おそらく現代の科学体系が第一のよりどころとなるであろう。芸術、宗教が世界観を表現できなくなった今日、自然科学のもつ方法論の多様さが、好むと好まざるにかかわらず、“縄文土器”の役割を担うことになりそうである。今後、物質合成、材料合成に携わる人々が、それぞれの“方法論”共々、この分野に片足を突っ込まれることを祈念するしだいである。

### 参考文献

- 1) R.N. Clayton, R.W. Hinton, and A.M. Dans, Isotopic variations in the rock-forming elements in meteorites, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 325, 383-501, 1988.
- 2) T.M. East, R.H. Spear and S.R. Taylor, Isotope anomalies induced in laboratory distillation, *Nature* 319, 576-578, 1986.
- 3) A. Tsuchiyama, Condensation experiments in the system Mg-Si-O-H, *Lunar Planet. Sci. Conf. XX, Proc.*, pp.1136-1137, 1989.
- 4) C. Uyeda, A. Tsuchiyama, and J. Okano, Isotopic abundances of silicates produced in gas-condensation furnace, in: *Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS VII*, A. Bennighoven et al. eds., pp.381-384, Springer-Verlag, Berlin, 1990.