

### 3. 物質の歴史

化学は物質の多様性にかかわる学問であり，身の回りの自然には化学的多様性が満ちあふれている．しかし，物質世界は，はじめからそのような多様さを持っていた訳では無かった．したがって，物質に歴史性を見出すことは，基本的な物質観として重要である．また，それだけでなく，生命が作り出した化学的多様性は化学という学問を進める上で非常に示唆的でもある．

#### 3. 1 元素合成

■**宇宙の始まり** 宇宙は 137 億年前にビッグバンと呼ばれる大爆発と共に生まれたという．時間が経過すると宇宙の膨張と共に温度が下がり，はじめの 3 分ほどの間に陽子と中性子から重水素核 ( $^2\text{H}$ )，ヘリウム ( $^4\text{He}$ )，リチウム ( $^7\text{Li}$ ) などの軽元素核が合成されたと考えられている．このときの平均熱エネルギーはこれら軽元素のイオン化エネルギーより大きかったので，原子は完全にイオン化した状態にあった．このような状態を**プラズマ**という．その後 30 万年ほど経って，温度が 3000 K ほどに低下すると電子と原子核が結合した中性原子が大部分を占めるようになった．こうしてようやく私たちがよく知っている化学物質を主体とする世界ができあがったことになる．

■**原子核の結合エネルギー** 宇宙の始まりから 30 万年ほどが経過して「普通の物質」からなる世界ができたとしても，この段階では軽元素しか存在していないので，現在，私たちが目にするような物質世界の多様性は望むべくもない．重元素も含めた様々な元素が存在することが物質世界の多様性を担保しているわけである．

宇宙空間に漂う軽元素を主体とする物質が万有引力によって互いに引き合い，塊を作る．重力エネルギーが熱に変わって，中心部では高温高压になる．一定の条件を満たすと，水素やヘリウムの原子核が結合してより重い原子核を作るようになる．このとき余分なエネルギーが熱となって輝くようになった星が恒星である．

恒星の内部で進行する元素合成でどのような元素が合成され得るかは原子核の結合エネルギーを見ると推測できる．アインシュタインが明らかにした質量 ( $m$ ) とエネルギー ( $E$ ) の等価性 ( $E = mc^2$ ,  $c$  は真空中の光速) により，原子核の質量 ( $M$ ) と原子核を構成する陽子 (質量  $m_p$ ) と中性子 ( $m_n$ ) の総和の差は原子核の結合エネルギーに比例する：

$$\Delta m = M - (Z m_p + N m_n) \quad (3.1.1)$$

ここで， $Z$  は陽子数すなわち原子番号， $N$  は中性子数である． $\Delta m$  を質量欠損という．核子 (陽子と中性子) 1 個あたりの結合エネルギー  $\Delta mc^2/(Z + N)$  を計算すると図 3.1 が得られる．単位の MeV は  $e$  を電気素量 (電子および陽子の電荷の絶対値，約  $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ) として  $10^6 e \cdot (1 \text{ V}) \approx 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$  である．1 mol では  $10^6 F \cdot (1 \text{ V}) \approx 96.5 \text{ GJ mol}^{-1}$  であるから ( $F$  はファラデー定数)，原子核の結合エネルギーは化学反応にかかわるエネルギーより何桁も大きいことがわかる．

恒星の内部で進行する元素合成反応 (核反応) は，温度に応じて次のように考えられている．以下では元素合成研究の習慣に従って燃焼という表現を用いるが，通常の意味の「燃焼」とは異なっていることは言うまでもない．

$T \approx 2 \cdot 10^7 \text{ K}$       水素燃焼による  ${}^4\text{He}$  の合成

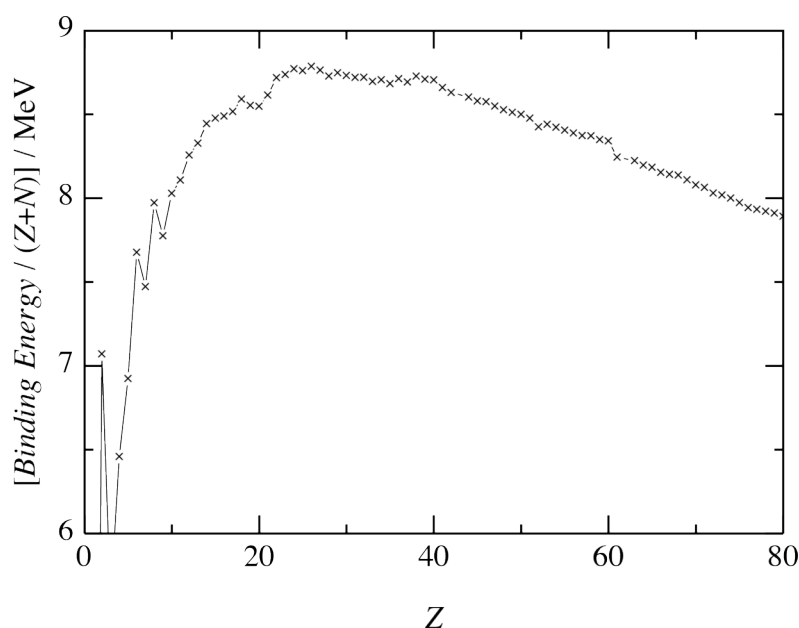


図 3.1 存在量の最も多い安定同位体核の結合エネルギー (核子 1 個あたり)

$T \approx 2 \cdot 10^8 \text{ K}$	ヘリウム燃焼による $^{12}\text{C}$ および $^{16}\text{O}$ の合成
$T \approx 7 \cdot 10^8 \text{ K}$	炭素燃焼による (Ne – Al) の合成
$T \approx 1.5 \cdot 10^9 \text{ K}$	ネオン燃焼による Mg の合成
$T \approx 3 \cdot 10^9 \text{ K}$	酸素燃焼による (Si – Ca) の合成
$T \approx 4 \cdot 10^9 \text{ K}$	ケイ素燃焼による (Cr – Cu) の合成

この最終段階で最も安定な Fe が合成される。

実際には、恒星の寿命とどの段階まで元素合成が行われるかは恒星の質量によって決まっている。現在の太陽ははじめの水素燃焼の段階にあり、あと 50 億年ほどほぼ同じ状態を保つと考えられている。一方、太陽の 10 倍以上の質量の恒星では、最後のケイ素燃焼の末に中心に Fe のコアが形成されるが、燃え尽きた後に重力に抗しきれず重力崩壊をおこし、超新星爆発の後に中性子星やブラックホールが残されることが考えられている。超新星爆発で宇宙空間にまき散らされた元素は次に誕生する恒星の素になる。

■**超重元素の合成** 図 3.1 から熱平衡反応によっては Fe より原子番号の大きい元素を合成することができないことがわかったが、実際には図 3.2 に見られる通り Fe より原子番号の大きな元素が存在し、物質世界を豊かにしている。こうした元素はどのようにして合成されたのだろう。

ある種の超新星爆発においては中性子が非常に過剰になると考えられている。中性子は電荷をもたないので、原子核との衝突において電氣的斥力を受けないため、反応しやすい。原子核が中性子と反応して質量数を増やす現象を中性子捕獲という。一般に中性子過剰な核は不安定で  $\beta$  崩壊をおこすが、中性子が非常に高密度に存在する場合には  $\beta$  崩壊する以前に次の中性子を捕獲し、 $\beta$  崩壊によって原子番号が増える形で超重元素が合成されたと考えられている。このようなメカニズムが妥当と考えられることは、図 3.2 において存在量の多い元素が特定の中性子数の付近に集中していることに現れている。これは、原子核が特定の中性子数をもつときに特に安定になることに起因している。このときの「特定の数」を**魔法数**という。原子が特定の電子数で「安定」になるのと同じである。

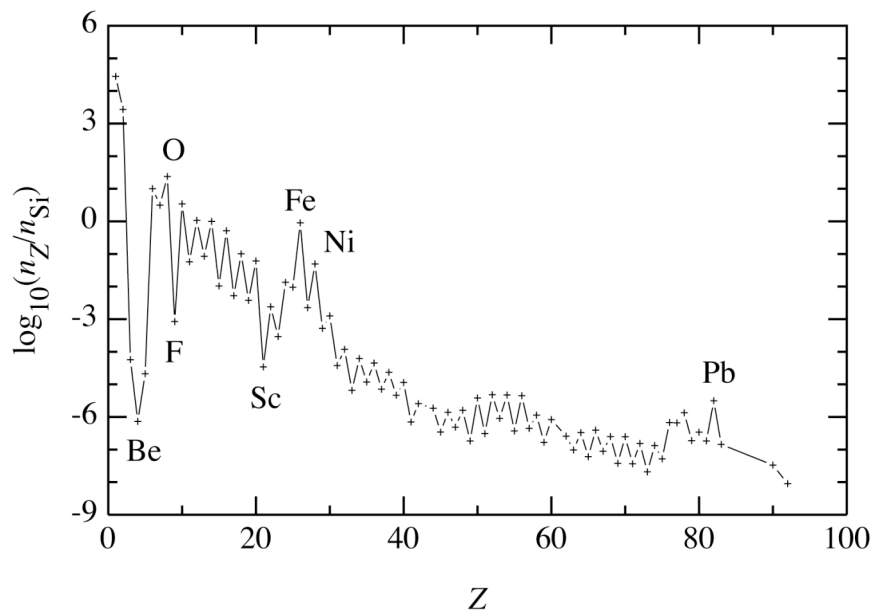


図 3.2 太陽系の元素存在度（アンダースとグリヴェッセによる）

■**元素存在度** 宇宙の元素組成は恒星内部における元素合成によって刻々と変化している。さらに、先に述べた通り、恒星を形づくっている物質は星の誕生・進化・死を通じて「輪廻転生」している。この意味で私たちの身の回りの物質世界の元素組成はその前史を含め太陽系の歴史を反映している。現在、考えられている太陽系の元素組成を図 3.2 に示す。この組成は、原子が特定の波長の光を吸収するために太陽光線のスペクトルに暗線（**フラウンホーファー線**）が現れること、その強度が元素存在量に比例することや、太陽系誕生時の組成を保存していると考えられる隕石の分析などによって決定されたものである。

原子の数で比較をすると水素が圧倒的に多く、90%以上を占める。次がヘリウムであり、この両方で99.9%に達する。つまり、私たちの身の回りの物質世界の多様性は、太陽系全体から見ればほんの0.1%の原子によってもたらされている。実はこれは驚くには当たらない。太陽系の質量のほとんど（99.87%）が太陽に集中しているからである。

地球の元素組成を図 3.3 に示す。全体的には図 3.2 と類似性が認められ無いわけではないが、いくつかの元素の存在量が著しく少ないなど、異なった特徴もある。地球誕生の段階では組成は水素、ヘリウムのような気体を除けば太陽系

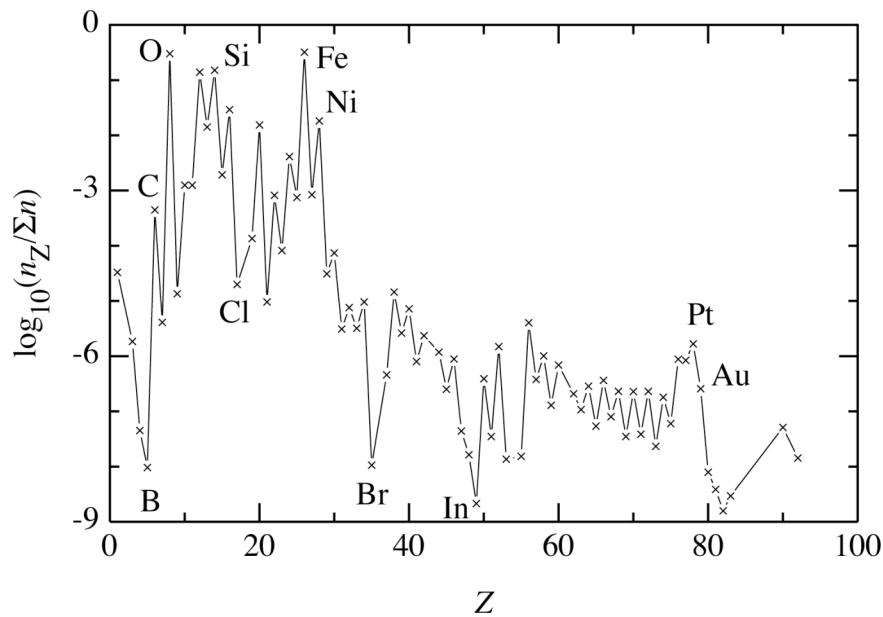


図 3.3 地球の元素組成（モーガンとアンダースによる）

全体の組成と大きく違わなかったと考えられるから、現在の地球の元素組成は歴史の産物である。各元素の性質により宇宙空間に逃げ去ったりしたため、この意味で元素組成は「化石」としての意味を持っているともいえる。現在の地球では大気（N, O, H など）、海洋圏（H, O, N など）、地殻・マントル（O, Si, Al, H, Na, Ca, Fe, Mg, K など）、コア（Fe, Ni など）の化学的組成はそれぞれで著しく異なっている。

### 3. 2 物質進化

■宇宙空間における物質進化 宇宙空間には核反応によって生じた種々の元素が存在している。宇宙空間において最も多い分子はやはり水素（ $H_2$ ）とヘリウムである。この次に多い分子は CO であるといわれている。これらは電波望遠鏡による観測で検出される。

宇宙空間は、地上で実現できる最高の真空度よりもさらに 3 桁ほど「からっぽ」の超高真空であるから、通常の条件では他の原子・分子との衝突で壊れてしまう「不安定」な分子も存在できる。たとえば直線状の  $HC_{11}N$  などという分子も発見されている。

■**生命と地球** 地球上では水の存在という稀な条件が幸いして、長い時間をかけた物質進化の後に、複雑な有機化合物の運動形態として生命が誕生した。生命を物質科学としてどのように理解するかは最先端の研究課題であり、その一端は**生物化学**で学ぶことになるだろう。いずれにせよ、非常に多種類の化学物質を高度に制御された形で配列し、またそれらの化学反応を実現している。たとえば、**酵素**が特定の反応のみを選択的に触媒し、あるいは**分子機械**が非常に高い効率で化学エネルギーを仕事に変換していることはよく知られている。これらは約 40 億年という気の遠くなる長い年月をかけて生命が多数の実験を繰り返して得た仕組みであり、生命の作った化学的多様性といえる。こうした仕組みを人工的・化学的に実現しようという試みが、物質開発を指向した研究分野（有機化学、無機化学、材料化学など）で活発に行われている。

生命はその生存のための物質的な仕組みを発達させてきただけでなく、環境に対して働きかけてきた。植物の光合成によって大気中の酸素濃度が増加したことはよく知られている。それによって化学物質の存在の仕方も変化してきたことはいうまでもない。

身の回りには人工的に新規に合成された化学物質があふれている。これらも考え方によっては生命の作り出した化学的多様性ともいえよう。ここでの化学の能動的な重要性はいうまでもない。

## 参考書

野本謙一（編）、「元素はいかにつくられたか 超新星爆発と宇宙の化学進化」  
岩波書店，2007 年。

海老原充，「太陽系の化学」，裳華房，2006 年