

## 4. 地球の構成物質と内部構造

### 4-1 地球を作る元素

**宇宙元素存在度** 太陽の元素組成を宇宙元素存在度(あるいは太陽元素存在度)という。地球はこの中で固体を作る元素からできている。

宇宙元素存在度は太陽大気分光<sup>1</sup>と隕石の分析値を元に推定されている。

宇宙元素存在度 (抜粋)		
元素	原子量	存在度 (個数比)
H	1	$2.79 \times 10^{10}$
He	4	$2.72 \times 10^9$
C	12	$1.01 \times 10^7$
N	14	$3.13 \times 10^6$
O	16	$2.38 \times 10^7$
Ne	20	$3.44 \times 10^6$
Mg	24	$1.076 \times 10^6$
Si	28	$\equiv 1 \times 10^6$
S	32	$5.15 \times 10^5$
Ar	40	$1.01 \times 10^5$
Fe	56	$9.00 \times 10^5$

Siの個数を $10^6$ とし、相対個数で表す

このような存在度は宇宙における元素の進化の過程の帰結である<sup>2</sup>。太陽はありふれた星のひとつであることが他の星との比較から分かっているため、太陽の元素存在度は宇宙の平均的な元素存在度とみなされている。

### 地球の元素存在度

地殻(海水を含む)の元素存在度を重量パーセントで表したものはクラーク数と呼ばれている。10位までを以下に示す(括弧内の数字が重量パーセント)。

O(49.5), Si(25.8), Al(7.56), Fe(4.70), Ca(3.39), Na(2.63), K(2.40), Mg(1.93), H(0.83)

<sup>1</sup>太陽光をプリズム等で波長別に分け、各元素固有の光放出・光吸収の強さを分析して元素の存在度を推定

<sup>2</sup>H, Heは宇宙初期に生じ、より重い元素はHとHeを材料にして恒星内部の核反応によって生じた。

地球全体の元素存在度<sup>3</sup>はクラーク数とかなり違う。重量パーセントで4位まで示すと

Fe (34.63), O(29.50), Si(15.20), Mg(12.7)

となっている。FeとMgが上位に出てくる。これはイオン化傾向の小さいFeが金属核を作っていること、マントルがMgに富む鉱物からできていることによる。

**地球を作る物質の化学結合** 一般的に化学結合には大きく次の5つのタイプがある。地球では物質圏ごとに主要な結合のタイプが違っている。

- 金属結合：自由電子が糊の役割をして結合 Fe と Ni → 核を構成
- イオン結合：電子を放出しやすい元素が陽イオンと電子を奪いやすい元素が陰イオンとなり、これらがクーロン力によって結びついたもの。Si, Mg, Fe, Al, Ca などの金属元素が酸素と化合するとこのタイプに<sup>4</sup>。→ 地殻・マントル(岩石圏)を構成
- 共有結合：最外核電子を共有することで結合 N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> → 大気を構成
- 水素結合：水素化合物のH(正の帯電)が他の分子との糊の役割をして結合 H<sub>2</sub>O の沸点が高い原因 → 海を構成
- ファン・デル・ワールス結合：分子間力ともいう。とても弱いので地球にはこれが主要な結合力となっている物質圏はない<sup>5</sup>。

## 4-2 造岩鉱物

**言葉の整理** 鉱物とは天然に産出する化学組成がほぼ均質かつ一定の結晶構造をもつ固体物質のこと。岩・岩石は鉱物の集合体。

**珪酸塩鉱物の結晶構造** 酸化されたSiを含む鉱物を珪酸塩鉱物という。岩石圏のほとんどを占めるので重要。

Siは酸化されると電子を4つ酸素へ渡して4価の陽イオンとなる。一方酸素は2価の陰イオンになる。占める)は、Siイオン(イオン半径0.4 Å)を4つの酸素イオン(イオン半径1.4 Å)が取り囲むSiO<sub>4</sub>四面体が結晶構造の基本。

<sup>3</sup>地震波速度と密度の情報から地球内部の物質が推定されている

<sup>4</sup>イオン結合性の固体物質を一般的に塩(発音は「えん」という)

<sup>5</sup>ただし太陽系の木星軌道よりも外側では低温の環境が広く実現しており、このタイプの結合が重要になってくる

SiO <sub>4</sub> 四面体の結合の仕方による鉱物の分類 (主なもののみ)			
SiO <sub>4</sub> 四面体の結合形態	代表的な鉱物 (または鉱物群)	Si:O 比	分類名
独立して点在	かんらん石	SiO <sub>4</sub>	ネソ珪酸塩
直線状に結合	輝石群・角閃石群	SiO <sub>3</sub> , Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub>	イノ珪酸塩
面状に結合	雲母群	Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	フィロ珪酸塩
3次元的に結合	石英や長石群	SiO <sub>2</sub> , AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> , Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	テクト珪酸塩

ギリシャ語 ネソ *nesos* 島, イノ *inos* 紐・繊維, フィロ *phylon* 葉, テクト *tekon* 建築屋

### 4-3 地球の各層を作る物質

ここでは地震学的に明らかにされた地球の各層が何からできているのか地表から中心に向かって示す。

**地殻** 地震波速度に加えて実際に岩石を入手できる。

- 大陸地殻：花崗岩質. SiO<sub>2</sub>=58.0wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=18.0wt%, MgO=3.5wt%
- 海洋地殻：玄武岩質. SiO<sub>2</sub>=49.5wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=16.0wt%, MgO=7.7wt%

**マントル** 地震波速度に加えて上部マントルについては実際に岩石を入手できる (捕獲岩や一部の衝上岩体<sup>6</sup>)。

- 上部マントル:かんらん岩質. SiO<sub>2</sub>=45.1wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=3.3wt%, MgO=38.1wt%
- 下部マントル: 組成的には上部マントルと同様だが, かんらん石が高圧鉱物に相転移している. 深さ 450km と 600km の地震波速度の不連続はこの相転移面に対応すると解釈されている。

**核** 地震波速度と密度以外には間接的な推測に頼らざるを得ない. 宇宙元素存在度も考え併せると, 核は Fe と Ni が主成分. 純粋な Fe-Ni 合金よりやや低密度なので S,O,H などの軽元素が不純物として含まれていると考えられている。

### 問題

問題番号に★が一つ付けてあるものは難しいが現在の知識でもきちんと考えれば解ける問題. ★が二つのものは現在の知識+アルファが必要な挑戦問題。

<sup>6</sup>捕獲岩とは地下でマグマに機械的に取り込まれた岩片がマグマと一緒に噴出したものを言う. 日本にも世界的にも有名な捕獲岩の産地がある. その一例は秋田県一の目潟でマール地形の代表例としても名高い. また北海道日高山脈の幌満かんらん岩体は上部マントルが地表まで押し上げられた衝上岩体として有名

4.1 半径  $R$  の 4 つの球を互いに接するように置く.

- (1) 各球の中心を  $ABCD$  とあらわす. 三角形  $ABC$  が  $xy$  平面上にあるものとし,  $A$  が座標の原点,  $B$  が正の  $x$  軸上にあるとき,  $C, D$  の座標を求めよ. ただし  $C$  の  $y$  座標と,  $D$  の  $z$  座標はともに正とする.
- (2) 正四面体  $ABCD$  の内部に 4 つの球に接するようにもう一つの球を配置する. この新たな球の半径を  $R$  を用いて表せ.
- (3) これと  $O^{2-}$  イオンと  $Si^{4+}$  イオンの大きさの関係を比較せよ.

4.2 次の表 1 と表 2 を元に, 地球内部に存在する Si, Mg, Fe の存在度比を個数比で求め, 宇宙元素存在度における比と比較せよ. もちろん電卓を利用して構わない.

表 1 地殻・マントル・核の平均組成 (重量%)

	海洋地殻	大陸地殻	マントル		核
SiO <sub>2</sub>	49.51	60.6	44.9	Fe	89.648
TiO <sub>2</sub>	0.9	0.72	0.2	Ni	5.397
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.75	15.9	4.5	Co	0.248
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	—	0.38	その他	4.708
FeO	8.05	6.71	8.05		
NiO	—	—	0.25		
MnO	0.14	0.1	0.14		
MgO	9.74	4.7	37.8		
CaO	12.5	6.41	3.54		
Na <sub>2</sub> O	2.18	3.07	0.36		
K <sub>2</sub> O	0.07	1.81	0.03		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1	0.13	0.02		

表 2 地殻・マントル・核の質量と主要構成物質

区分	質量 ( $\times 10^{24}$ kg)	構成物質
海洋地殻	0.022	玄武岩質岩石
大陸地殻	0.006	花崗岩質岩石
マントル	4.000	かんらん岩(上部)と 高圧相(下部)
核	1.940	鉄

4.3 ★ 地球の全体組成は宇宙元素存在度に完全に一致しているわけではない. もしも Si, Mg, Fe の比率が宇宙元素存在度に等しい場合, マントルの組成や核が地球の質量に占める割合はどのように変化するか考察せよ.