

地球システム形成過程の物質科学

An experimental perspective on formation of early Earth's system

大谷 栄治[1]

Eiji Ohtani[1]

[1] 東北大、理、地球物質科学

[1] Institute of Mineralogy, Petrology, and Economic Geology, Tohoku University

地球の形成期には地球の集積、マグマオーシャンの形成、マグマオーシャン内部での金属の分離と核の形成、隕石の重爆撃という諸過程が存在した。マンツルの揮発性元素の存在度は地球を形成した材料物質が C1-chondrite に比べて揮発性元素に枯渇していることを示す。マグマオーシャンは金属鉄の核と珪酸塩の地殻・マンツルという地球の最も基本的な層構造を作り出す原因となった。マンツルの親鉄元素の存在度は深さ約 600-900km (20-30GPa) の深いマグマオーシャン内部での金属鉄とマグマの平衡元素分配で説明できる。マンツルの強親鉄元素の存在度は、集積の末期の隕石重爆撃の痕跡を残しているとも解釈できる。

地球の形成期には(1)地球の集積、(2)集積に伴う重力エネルギーの開放によるマグマオーシャンの形成、(3)マグマオーシャン内部での金属の分離と核の形成、(4)隕石の重爆撃という諸過程が存在した。これらの諸過程は、地球の形成初期の数億年の間に生じたい。この時代の痕跡は、その後の地球の変動によって消し去られている。ここでは、この地球形成期の暗黒時代のできごとを推定することができる数少ない情報を検討してみよう。

1、地球の集積過程

地球集積過程の情報は、地殻とマンツルの揮発性の元素の存在度から推定することができる。地殻とマンツルの親石元素の存在度(たとえば Wanke, 1981)は(1)Ca, Al, REE などの難揮発性元素は C1-chondrite の約 1.2 倍(2)Si は C1-chondrite の約 0.8 倍(3)Na, K などは約 0.18-0.22xC1(4)S, Cd, Se などの非常に揮発性の大きな元素は約 0.0001-0.01xC1 のような特徴をもっている。この特徴は地球を形成した材料物質が C1-chondrite とは異なり、揮発性元素に枯渇している。揮発性元素の枯渇を説明する最も単純なモデルは地球を高温成分 90%と低温成分 10%の混合物と考える 2 成分モデル(Ringwood, 1982; Wanke, 1986)であり、地球集積の初期には高温成分に富んだ物質が集積し、後期には低温の揮発成分に富んだ物質を集積したとする不均質集積モデルも提案されている(Wanke, 1981)。

2、マグマオーシャンの形成と核の分離

初期地球においては、集積にともなう運動エネルギーの開放のために表層部が融解し、マグマオーシャンが形成される。マグマオーシャンが形成されたのは、地球が火星程度の大きさになった地球集積の後期である。この時期には地球に集積した微惑星を構成するの金属鉄と珪酸塩が、マグマオーシャン内部で効率的に分離し核の形成が始まった。このようにマグマオーシャンは金属鉄の核と珪酸塩の地殻・マンツルという地球の最も基本的な層構造を作り出す原因となった。

マンツルの化学組成はマグマオーシャンの深さの推定にも制約条件を与える。マグマオーシャンの固化に伴うマンツルの分化の痕跡は、マグマオーシャンの固化時の対流による攪拌や長い地球時代のマンツル対流によって失われている。しかしながら、マグマオーシャン中では金属鉄と親和性のある Ni や Co などの親鉄元素がマンツルから核に取り除かれる。したがって、マンツルの親鉄元素の存在度からマグマオーシャンの痕跡を読むこともできる。マンツルと地殻の親鉄元素の存在度は Wanke (1981)によると、(1)Fe, Ni, Co, W などは C1-chondrite の約 0.08-0.15(2)Pt, Ir, などの白金族の元素、Re などは約 0.003xC1 となっている。最近の研究によると、これらのマンツル存在度は核の分離が深さ約 600-900km (20-30GPa) の深いマグマオーシャン内部での金属鉄とマグマの平衡元素分配で説明することができる(例えば Ohtani et al., 1997; Righter and Drake, 1999)。マグマオーシャンの底に堆積した金属鉄は下部のケイ酸塩マンツル中を沈降する。この過程は金属鉄のケイ酸塩粒界への浸透とレイリー・テラー型の重力的不安定性による分離の二つのメカニズムがある。最近の金属鉄と下部マンツル鉱物の界面でのぬれの研究(例えば神戸・大谷, 2000)によると、両者は濡れにくく浸透による分離は起こりにくい。金属鉄とケイ酸塩の混合物の粘性係数はケイ酸塩相のみの場合に比べて 1 桁以上小さくなり、これまで考えられているよりも容易にレイリー・テラー型の核の分離が進む可能性がある。

3、隕石重爆撃の痕跡

地球型惑星の集積の末期に、隕石の重爆撃があったことは、月や他の地球型惑星の表面のクレータの頻度分布から推定されている。また、マンツルの強親鉄元素の存在度は、集積の末期の隕石重爆撃の痕跡を残しているとも解釈される。すなわち(1)Pt, Ir, などの白金族の元素、Re などは約 0.003xC1 であり、金属とケイ酸塩間のこれらの元素の平衡分配係数から期待される存在度よりもマンツルには 30-300 倍も過剰に存在する。この過剰は、

核の分離後に C1-chondrite 成分が少量集積し、マントルに付加されたと解釈することもできる。この核形成後の少量の原始的隕石様物質の集積は Late veneer と呼ばれ、海洋の水や、生命の起源物質としての有機物を地球に運んだ可能性も指摘されている。

このように、マントルと地殻の化学組成の情報は、核、マントル、地殻、海洋などの地球システムの形成史の痕跡を残している可能性がある。