

Non-perfect Equilibration of Hf-W System by Giant Impacts: Mechanisms and Suggestions

佐々木 貴教[1]; 阿部 豊[2]

Takanori Sasaki[1]; Yutaka Abe[2]

[1] 東大・理・地惑; [2] 東大・理・地球惑星科学

[1] Earth and Planetary Sci., Univ Tokyo; [2] Earth Planetary Sci., Univ. Tokyo

<http://homepage3.nifty.com/noinoi/>

Hf と W はともに難揮発性元素であり、Hf は親石性、W は親鉄性の元素であるため、これらはメタル・シリケイト分化の際に強く分離される。また ^{182}Hf は半減期 900My で ^{182}W に放射壊変する。惑星のコア形成時に ^{182}Hf がマントルに、 ^{182}W がコアに濃集する性質を用いて、この Hf-W システムはコア形成年代を示す時計として近年注目されている年代測定法である (Halliday et al., 1996; Lee et al., 1997)。

この年代測定法を用いて、地球の主な成長ステージが微惑星形成後 10My 程度で終わり、月を作ったジャイアントインパクトが 29My に起こったことが示唆されてきた (Kleine et al., 2002; Yin et al., 2002)。しかしこれらの研究では ジャイアントインパクト時に原始地球は完全に平衡化されて時計が完全にリセットされると仮定した計算しかなされてこなかった。

そこで本研究では、平衡化の程度を定量的に議論し、そもそもジャイアントインパクト時に完全な Hf-W システムのリセットが実現されるのかどうかについて考えた。またその結果をもとに、完全な平衡化を引き起こさないジャイアントインパクトを仮定した計算を行い、その場合に Hf-W システムが我々に与えてくれる情報がいったいどのようなものであるのかについても考察した。

ジャイアントインパクト時にインパクトのメタルが小さな球粒に分裂してコアへ向かって Stokes 沈降していく際、一回のジャイアントインパクトで得られるリセット率を見積もった。その結果、球粒の大きさが最大のもので 50 cm 以下でなければマントルを全球的に完全平衡化させることはできないことが分かった。

この結果に対し、SPH等を用いたN体シミュレーションでは $N = 30000$ 程度しかないため 1 m 以下の球粒の大きさを議論するだけの解像度はない (Canup & Asphaug, 2001)。そこでメタルが原始地球に集積した後の振る舞いについて考える必要がある。

古典的にはシリケイトメルトの上に集積したメタルは Rayleigh-Taylor 不安定を起し、km サイズの大きな塊になってコアへ落ち込むと考えられてきた (Sasaki & Nakazawa, 1986)。それに対して最近 Rayleigh-Taylor 不安定によってむしろメタルは分裂し、cm サイズの非常に小さな球粒 (metal rainfall) になってマントル中を沈降するはずだという考え方が提案された (Rubie et al., 2003)。

しかし、非常に小さな粒が流体中に高密度で存在する場合、それらの粒は全体で一つの大きな流体としてふるまうことが知られている (Kobayashi et al., 1993)。そしてこの混合流体は全体として大きな波長の Rayleigh-Taylor 不安定を起してコアに落ち込む。このように混合流体が大きな波長で Rayleigh-Taylor 不安定を起すことは、室内実験によっても確かめられている (Iga & Kimura, 1993)。

すなわち、完全平衡化の条件であった「50 cm 以下の球粒」による Stokes 沈降は、実現されない可能性が十分にあるといえるのである。

そこで次に、ジャイアントインパクトによる 100% の時計のリセットは実現されないと仮定し、一回のジャイアントインパクトで平衡化される割合をパラメータにモデル計算を行った。その結果、ジャイアントインパクトの回数とそれらの平衡化の度合いが定量的に定まらない限り、Hf-W 時計から地球形成の年代を決定することは不可能であること、および 1 回のジャイアントインパクトで少なくとも 2 割以上の平衡化を起さないと、たとえジャイアントインパクトが 10 回起こったとしても現在の地球の観測値を実現できないことが分かった。

この「2 割以上の平衡化」という条件は、ジャイアントインパクトで放出・蒸発される体積が 2 割以上であるべきだということ、ジャイアントインパクトに対する制約条件と捉えることができる。

さらに本研究では、Hf-W システムを用いて火星の形成過程についての計算も行った。その結果、最低でも 3 割以上の平衡化を起す大きなイベントを火星は経験している必要があることが分かった。火星はマントルオーバーターンを経験している可能性があるが (Senshu et al., 2002)、3 割の平衡化というのはかなり大きなイベントである必要があり、もしかすると火星も地球同様ジャイアントインパクトを経験しているのかもしれない。これは、火星は原始惑星の生き残りであるという現在の常識を覆すものであり、火星の形成過程や火星の大気の起源について再考を促す結果であるといえる。