

Tungsten isotopic evidence for disproportional late accretion to the Earth and Moon

Mathieu Touboul^{1†}, Igor S. Puchtel¹ & Richard J. Walker¹

- アポロ試料 3つのタングステン同位体を高精度計測
- 地球マントル試料より 20 ppm 程度 $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ が高い
- 月形成直後タングステン同位体比は地球と同じで、その後の集積量に差があったことを示唆

Characterization of the hafnium–tungsten systematics (^{182}Hf decaying to ^{182}W and emitting two electrons with a half-life of 8.9 million years) of the lunar mantle will enable better constraints on the timescale and processes involved in the currently accepted giant-impact theory for the formation and evolution of the Moon, and for testing the late-accretion hypothesis. Uniform, terrestrial-mantle-like W isotopic compositions have been reported^{1,2} among crystallization products of the lunar magma ocean. These observations were interpreted to reflect formation of the Moon and crystallization of the lunar magma ocean after ^{182}Hf was no longer extant—that is, more than about 60 million years after the Solar System formed. Here we present W isotope data for three lunar samples that are more precise by a factor of ≥ 4 than those previously reported^{1,2}. The new data reveal that the lunar mantle has a well-resolved ^{182}W excess of 20.6 ± 5.1 parts per million (± 2 standard deviations), relative to the modern terrestrial mantle. The offset between the mantles of the Moon and the modern Earth is best explained by assuming that the W isotopic compositions of the two bodies were identical immediately following formation of the Moon, and that they then diverged as a result of disproportional late accretion to the Earth and Moon^{3,4}. One implication of this model is that metal from the core of the Moon-forming impactor must have efficiently stripped the Earth's mantle of highly siderophile elements on its way to merge with the terrestrial core, requiring a substantial, but still poorly defined, level of metal–silicate equilibration.

背景

- ・アポロ試料の分析は今も続いている！
 - ・分析精度向上を見込んで残してある
 - ・ほぼ完全に乾燥していると思われたが、鋳物の中に水分が見つかった [e.g., Saal+ 2008, *Nature*]
 - ・酸素同位体の差も見えてきた [Herwartz+ 2014, *Science*]
- ・Hf–W 分析
 - ・ ^{182}Hf → ^{182}W ・・・半減期~9 Myr
 - ・Hf は親石、W は親鉄 → コア形成のタイミングを相対的に知る手がかり
 - ・これまでも月試料の Hf–W 分析は行われてきた [e.g., Lee+ 1997, *Science*]
 - ・ ^{182}W が多いのは ^{181}Ta の中性子捕獲の影響
 - ・Ta-free 試料分析では地球マントル試料との差は見えなかった (次ページ図 1)

本研究でやったこと

- ・KREEP リッチな impact-melt rocks 中の金属を、新たに高精度化した熱イオン化法で質量分析(TIMS)
 - ・サンプルの処理なども工夫 [Touboul & Walker, 2012, *Int. J. Mass Spectrom.*]
 - ・MC-ICP-MS だと $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ 比の精度が $\sim \pm 25\text{ppm}$, 新手法では $< \pm 5\text{ppm}$
 - ・KREEP 岩は Ta-poor
- ・インパクトの影響などを評価するために、他の微量元素 (Ir など) も分析

* KREEP: カリウム、希土類、リンに富んだ岩石タイプ。月マグマオーシャンの最終残液成分。

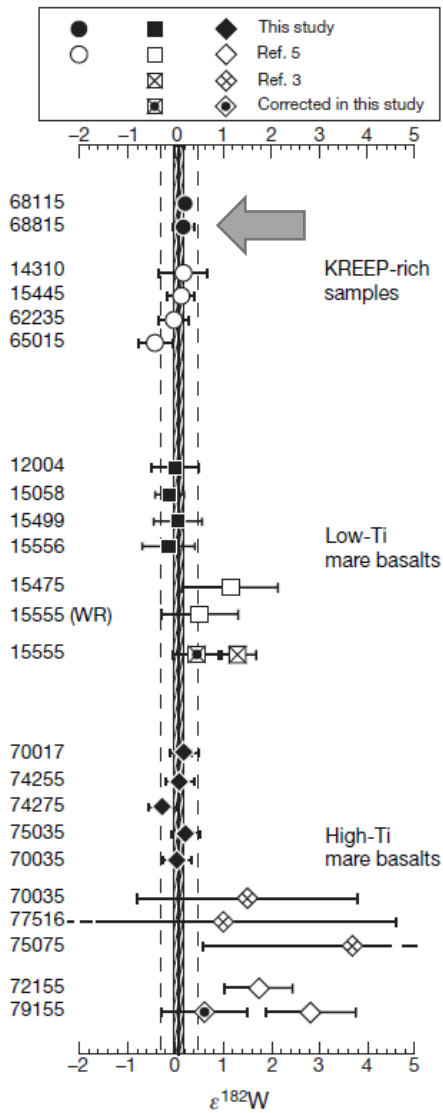


図1：先行研究の結果 [Touboul+ 2007 を改変]

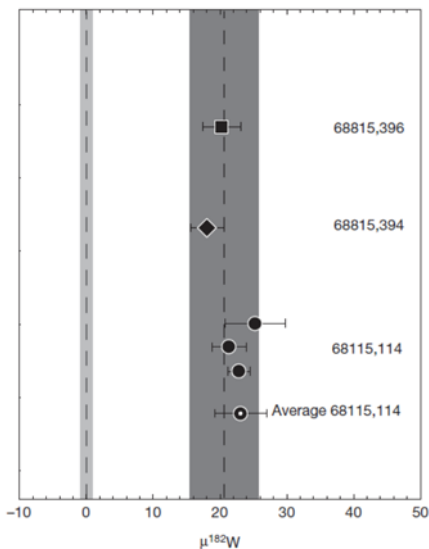


図2：本研究の結果

結果と議論

- ・ $\mu^{182}\text{W} = +20.6 \pm 5.1$ と、地球試料との違いが見えた (図2)
- ・ 先行研究では $\mu^{182}\text{W} = +19 \pm 23$ [Touboul+ 2007, *Nature*]
- ・ 原因1: Ta の中性子捕獲? → No
 - ・ Ta に欠乏しているので無視できる
- ・ 原因2: インパクターの W 同位体比? → No
 - ・ KREEP 岩の典型的な組成 + コンドリティックなインパクターを仮定すると、後者の寄与は~0.4% W なので無視できる
 - ・ Ru/Ir, Pt/Ir, Pd/Ir は鉄隕石のそれに近いが、鉄隕石をインパクターとしても、Ir が少ないので寄与は無視できる
 - ・ 幅広い親鉄性元素濃度のサンプルで同じ $\mu^{182}\text{W}$ → ターゲット由来の同位体比と考えられる
- ・ 原因3: 月マントルが地球マントルより Hf に富んでいた? → No
 - ・ 先行研究で否定されている [e.g., König+ 2011, *GCA*]
 - ・ 仮に月マントルに Hf が多かったとしても、今回分析した KREEP は最終残液なので、むしろ W に富むはず
 - ・ 地球と異なる W 同位体比を持つ月形成インパクターの影響があるとしたら、 μ 値はもっとばらつく [e.g., Halliday+ 2004, *Nature*]
- ・ 原因4: Disproportional late accretion → Yes
 - ・ Late accretion... コア分離後に天体衝突でコンドリティックな物質が付加されること
 - ・ 地球にはより多く、大きな衝突が起きやすい → 月の1000倍の質量 [Bottke+ 2012, *Science*]
 - ・ 但し、Late accretion 前は地球マントルと月マントルは同じ W 同位体比である必要
 - ・ ジャイアントインパクト以前の accretion で地球マントルに供給された親鉄性元素を地球マントルから取り除く必要
 - ・ 月形成インパクターのコアが地球コアへ持って行った?

$$\epsilon^{182}\text{W} = \left[\frac{(^{182}\text{W}/^{184}\text{W})_{\text{sample}}}{(^{182}\text{W}/^{184}\text{W})_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 10^4$$

$$\mu^{182}\text{W} = \left[\frac{(^{182}\text{W}/^{184}\text{W})_{\text{sample}}}{(^{182}\text{W}/^{184}\text{W})_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 10^6$$