

太陽系軽元素同位体組成

大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻 橋爪 光

月の表面は過去数十億年にわたって太陽から吹きつけるプラズマ-太陽風-や隕石や彗星などの様々な地球（月）外物質などによる照射・爆撃にさらされている。月表面は地球表面とは異なり、火成活動が既に終息しており、また、水などによる変成作用により表土が変質したりすることもないので、月試料には数十億年分の照射履歴が蓄積されている。講演では、月試料からこれらの情報、なかでも、太陽風中に含まれる軽元素の同位体組成を求めた最近の成果についてまとめた。

月表土に打ち込まれた太陽風の情報を読みとる試みは多くの研究者により 30 年来続けられているが、2000 年の時点では、隕石等の惑星物質の間で大きく同位体比の異なる成分が多数発見されており特に注目されている窒素、炭素、酸素などの軽元素に関して未だに太陽型同位体比組成が決まらない状態であった。この研究の難しさは様々な物質が折り重なって月表土鉱物表面に記録されるので、従来の分析手法を用いて低い空間分解能で分析すると、起源の異なる物質の混合平均分析値しか得られず、解釈が困難を極める点にある。この困難を乗り越えるためには、鉱物中の注目する同位体の存在する位置（表面からの深さ）を原子レベルに近い nm 単位で把握しながら分析しなければならない。近年の極微小領域分析装置、中でも 2 次イオン質量分析計の進歩により、上記のような高空間分解能分析が可能となった。最初に 2 次イオン質量分析装置による粒子表面近傍での深さ方向同位体プロファイリングという手法を用いて太陽風の窒素の同位体組成を決めた研究が[1]である。この研究では、月表土鉱物の表面約数十ナノメートルの深さに存在する（低エネルギー）太陽風打ち込み層中に含まれる水素と窒素の同位体組成を微小領域分析した。太陽起源の水素が（原始太陽の核燃料としてすべて使い尽くされたため）重水素を全く含まないことを手がかりに、太陽風に多く照射された微粒子を検出し、その粒子に含まれる太陽起源窒素同位体組成を同定した。この研究成果を突破口として、これまでに炭素[2]、酸素[3]などの太陽組成を求めた研究成果が報告されている。これらの成果を総合すると、惑星材料物質の組成は太陽組成とは大きく異なり、各元素で最も存在度の高い同位体(^{12}C , ^{14}N , ^{16}O)が太陽組成に比べて 4%から>24%枯渇していることが明らかになった。これは太陽系星雲から固体惑星材料物質が形成されたプロセスの解明に重要な手がかりを与える。ここでは、この議論に関しては最近発表されている惑星物質形成モデルに関する論文[4,5,6等]に譲る。

これらの一連の仕事を発端として、月試料の記録を読み解く困難さを改めて浮き彫りにする議論も展開されている。月表土試料に記録された窒素同位体のケースはその典型である。月試料中に含まれる窒素の同位体組成は試料毎に大きく異なることがよく知られている[1,7]。地球組成に比べて、 ^{15}N に非常に枯渇した同位体組成のもの($\delta^{15}\text{N} < -240$ permil)から、逆に ^{15}N を過剰に含むもの ($\delta^{15}\text{N} > +100$ permil)まで様々なものが存在することがわかっている。 ^{15}N に枯渇した成分はおそらくは太陽組成であろう、という点に関しては、[1]の報告の次の年に、Galileo 衛星による木星大気の実験分析からも追認され[8]、コンセンサスが得られつつある。しかし、 ^{15}N を過剰に含む成分については現在も議論が続いている。[9]はこの成分の正体は、主には月へ降り注いだ惑星間塵に豊富に含まれる窒素成分であると主張する。これは惑星間塵の $\delta^{15}\text{N}$ 値が、粒子毎に

は大きく異なるが、全体としては+100 ないし +200 permil の値を示し[10]、また、[9]が月試料中に含まれる窒素同位体組成を用いて見積もった月への惑星間塵の降着率が地球への降着率[11]とそれほどは変わらないことを根拠としている。しかし、[12]は異議を唱え、月試料中の ^{15}N に富む成分は地球の磁場が弱い時期に地球大気から運ばれたものではないかと主張している。ただし、このモデルでは、月試料の多くに見られる窒素が地球大気よりさらに ^{15}N を過剰に含むことの説明が出来ないので、[9]の説に置き換えて月へ供給される窒素フラックスの全体を説明するというよりは、[1,9]で主張されている成分に加えて[12]のような成分も過去に存在したかも知れない、という位置づけなのかもしれない。ごく最近では、太陽風酸素の同位体組成を巡って全く異なる2つの報告[3,13]がなされている。これら両方において、基本的な分析手法は、[1,2]にある太陽風中の窒素・炭素同位体分析と同じで、二次イオン質量分析計を用いている。ただ、これまでの窒素・炭素分析の時は、月表土試料中の岩石粒子を用いて分析できたが、酸素を主要構成元素とする岩石に照射された太陽風酸素は観測出来ないで、[3,13]では、月表土試料中にはごくわずかにしか含まれない金属鉄を探しだして分析の対象としている。唯一の違いは[3]は古い試料(10-20億年前に太陽風に照射されたと推定される月表土試料)、[13]は比較的最近(数百万年以内)に照射された試料を用いている点である。結果は全く逆で、分析において基準とする地球組成にくらべ、太陽組成が、[3]は ^{16}O が4%過剰に存在すると報告し、逆に[13]は ^{16}O が8%欠乏していると報告する。現時点では、これらの報告がやっとそろって公になったばかりの段階であり、これらを丸く収めて解釈することは不可能であるが、あえてこれらの結論を無理やりまとめた解釈を仮に提示するならば、太陽表層の同位体組成が時代と共に変化し、昔は ^{16}O が過剰に存在していたのだが、現在 ^{16}O に欠乏している、と解釈することは可能である。実はこの類の「太陽組成経年変化説」はわずか5年程前まで月試料毎に異なる組成を示す窒素同位体を説明するために主張され広く支持された有力仮説であった[7]。しかし、上で紹介したような微小領域分析に基づく最近の研究結果[1,9,14]が提出されてからは、この経年変化説を持ち出す論文は多くない。[7]の解釈の基本は、月試料に供給される「月外成分」は太陽風以外には存在し得ない、と仮定した点にある。これに対して、[1,9,12,14]では月試料において様々な窒素同位体組成が見えているのは太陽風だけでなく様々な成分が寄与しているためであると反論し、現在多くの研究者にその主張が受け入れられつつある。[3,13]の議論もおそらくは月試料に供給される「月外酸素」の inventory が明らかではないことによるものと思われる。今後の研究が進めば、[3,13]のいずれか、あるいは、両方が太陽風以外の起源を持つ成分であると解釈されるものと予想する。そして、太陽風でなければその成分の正体はいったい何なのか、という点が明らかになれば我々の惑星物質の起源に関する理解が大きく進むはずである。

上で述べた月試料の記録を読み解く困難さを表す事例は、見方を変えれば、月試料、あるいは今後持ち帰られるであろう小惑星表土物質の情報量の豊富さを如実に表す好例である。要は我々の分析技術が未熟なだけであって、我々が未知であると主張する惑星形成過程を理解するための鍵を握る様々な情報が詰まった試料の多くは実はとくに我々のすぐ手元に届いていたのでは無かろうか。微小試料分析は今後の惑星探査あるいは惑星科学のパフォーマンスを左右する重要基本技術である。さあ、最先端分析に精進しよう。

1. Hashizume K., Chaussidon M., Marty B. and Robert F. (2000) Solar Wind Record on the Moon: Deciphering Presolar from Planetary Nitrogen. *Science* **290**, 1142-1145.

2. Hashizume K., Chaussidon M., Marty B. and Terada K. (2004) Protosolar carbon isotopic composition: Implications for the origin of meteoritic organics. *Astrophys. J.* **600**, 480-484.
3. Hashizume K. and Chaussidon M. (2005) A non-terrestrial ^{16}O -rich isotopic composition for the protosolar nebula. *Nature* **434**, 619-622.
4. Clayton, R. N. (2002) Self-shielding in the solar nebula. *Nature* **415**, 860-861.
5. Yurimoto, H. and Kuramoto, K. (2004) Molecular cloud origin for the oxygen isotope heterogeneity in the solar system. *Science* **305**, 1763-1766.
6. Lyons J. R. and Young E. D. (2005) CO self-shielding as the origin of oxygen isotope anomalies in the early solar nebula. *Nature* **435**, 317-320.
7. Kerridge J. F. (1993) Long-term compositional variation in solar corpuscular radiation: Evidence from nitrogen isotopes in the lunar regolith. *Rev. Geophys.* **31**, 423-437.
8. Owen T., Mahaffy P. R., Niemann H. B., Atreya S. and Wong M. (2001) Protosolar nitrogen. *Astrophys. J.* **553**, L77-L79.
9. Hashizume K., Marty B. and Wieler R. (2002) Analyses of nitrogen and argon in single lunar grains: towards a quantification of the asteroidal contribution to planetary surfaces. *Earth Planet. Sci. Lett.* **202**, 201-216.
10. Messenger S. (2000) Identification of molecular-cloud material in interplanetary dust particles. *Nature* **404**, 968-971.
11. Love S. G. and Brownlee D. E. (1993) A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust. *Science* **262**, 550-553.
12. Ozima M., Seki K., Terada N., Miura Y. N., Podosek F. A. and Shinagawa H. (2005) Terrestrial nitrogen and noble gases in lunar soils. *Nature* **436**, 655-659.
13. Ireland T. R., Holden P., Norman M. D. and Clarke J. (2006) Isotopic enhancements of ^{17}O and ^{18}O from solar wind particles in the lunar regolith. *Nature* **440**, 776-778.
14. Hashizume K., Chaussidon M., Marty B. and Robert F. (2001) Isotopic variability of nitrogen in lunar regolith. *Science* **293**, 1947a.