

エポックメイキングな隕石たち(その12)： ～ Monahans(1998)とZag ～ 太陽系最初期の水を取りこんだ岩塩を持つ隕石

馬上 謙一¹

2017年12月20日受領，査読を経て2018年1月30日受理。

(要旨) Monahans (1998)とZagは1998年に地球に落下した普通コンドライトである。これらの隕石には岩塩であるハライト(Halite: NaCl)が含まれており、そのハライト中には水を主成分とする流体包有物が存在していた。そのため、小惑星帯に存在する天体の水の起源を考える上で非常に興味深い試料として、様々な研究がなされてきた。これらの二つの隕石の岩石的な特徴と年代学的な研究、及び、ハライトの成因について紹介する。

1. はじめに

Monahans(1998) (以下Monahans)は1998年3月22日にアメリカ、テキサス州西部モナハンズに2つの火球として落ちてきた。共に回収され、それぞれ1.34 kg, 1.24 kgだった [1]。一方、Zagは1998年8月4-5日ごろに、西サハラからモロッコにかけて隕石シャワーとして降りそそぎ、現在までに175 kgが回収されている [2]。Zagの名前はモロッコのアサ・ザグ州に由来する。

これらの隕石が一躍注目を浴びたのは、Monahans隕石中にハライト(NaCl)を含み、そのハライト中に水が発見されたからである [3]。その後、Zagからも同様のハライトが発見された [4]。これらふたつは共にHコンドライトの角礫岩であり、天体表層での衝突・混合過程を反映した様々な岩相が見られる。図1に示すように、大別すると白っぽい岩相と黒っぽい岩相が存在することが分かる。

2. 岩石学的タイプとハライトの特徴

これらの隕石はHコンドライト隕石の角礫岩である。Monahansを構成する岩片(クラスト)は全てH5

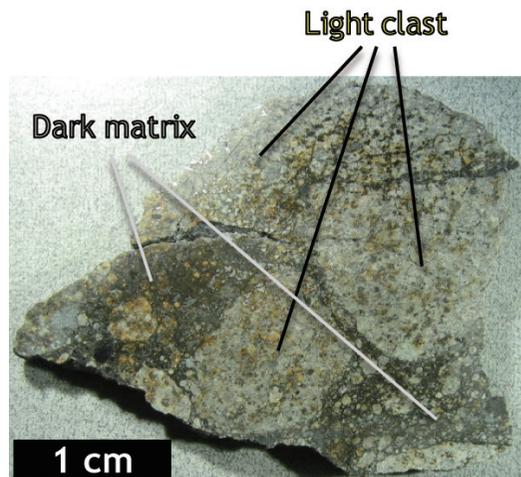


図1：Zagのチップ写真。白っぽい明岩片と黒色の暗マトリクスが分布している。

に分類されるため、隕石全体としてもタイプH5に分類される [3]。一方で、Zagを構成する岩片の岩石学的タイプは4から6とさまざまであるため、隕石全体としてはH4-6と表記される [5]。Zagは、45%ほどを占める白っぽい碎屑岩片 [light-colored metamorphic clast(明岩片)]、50%ほどを占める黒っぽいマトリクス [clastic matrix (暗マトリクス)]、5%を占める黒い碎屑岩クラスト [dark clast(暗岩片)]、ごくわずかのインパクトメルト岩片 (impact-melt-rock clast) からなる [5]。ハライトはこの中の暗マトリクスから発見さ

1. 北海道大学大学院理学研究院
bajo@ep.sci.hokudai.ac.jp

れた[3-5]. MonahansとZagの全岩希ガス同位体分析から、太陽風起源希ガスが捕獲されていることが分かった[6, 7]. 太陽風起源希ガスは特に暗マトリクスに卓越していた。太陽風起源希ガスが捕獲されているということは、これらの角礫岩は母天体存在時にレゴリスとして母天体表層に存在していたということを示している。

Monahansにはハライトに伴い、シルバイト(KCl)が存在していた[3]が、Zagにはシルバイトは認められなかった[5]. いずれの隕石中のハライトも、色は深い青から紫、大きさは大きいもので数mm程度である。太陽風、宇宙線などの放射線によってハライト結晶内に欠陥が生じ、呈色すると考えられている[8, 9]. また、ハライトには流体包有物が見られ、主成分は水であった[3]. ハライト中の流体包有物はZagの方が数多く見られ、これはZagのハライトがMonahansより低温で流体をトラップしたことを示唆している[5].

3. 年代学的な研究

これらのレゴリス角礫岩は一般的なHコンドライトと同じく、太陽系形成直後の45-46億年前に形成されたと考えられている[3, 7, 10]. MonahansのAr-Ar年代は暗マトリクスで 43.8 ± 1.0 億年、明岩片は 44.4 ± 0.6 億年であった[7]. しかしながら、 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 比で示される年代スペクトルは複雑で、おそらく角礫化過程での衝撃変成もしくは熱変成によるものと考えられる。また、変成前の、母天体形成年代はAr-Ar年代の中で最も古い45.3億年と見積もられた[7]. Monahans中に存在するハライトのAr-Ar年代はホストである角礫岩部分より若干若く、43億年程度であった[7].

ZagのAr-Ar年代およびI-Xe年代はWhitbyらによって測定された[10]. Ar-Ar年代はMonahansよりも若く、暗マトリクスが 42.5 ± 0.3 億年、明岩片は 42.9 ± 0.3 億年であった。また、ハライト2試料を測定したところ、 40.3 ± 0.5 億年及び 46.6 ± 0.8 億年であった。そして同じハライト試料のI-Xe年代を行ったところ、その年代はともに45.62億年であり、ホストの岩相よりも古い年代を示した。この古いI-Xe年代はハライトがZag母天体形成より以前(もしくは同時期)に生まれ、その後I-Xe系は擾乱されていないことを示唆している。

これらふたつの隕石の宇宙線照射[Cosmic-ray exposure(CRE)]履歴はレゴリス角礫岩であるため複雑である。CRE起源 ^{21}Ne 量はともに明岩片よりも暗マトリクスの方が圧倒的に多い[6, 7]. これは母天体から放出され地球に落下するまでの期間、つまり隕石として宇宙空間に存在した期間生成されたCRE起源ネオンに加え、母天体表層(天体表面から数mより浅い)において当時の宇宙線との核反応によって生成された、レゴリスとして存在した期間に生成されたCRE起源ネオンが、母天体放出イベント以前より存在していたためであると考えられる。この ^{21}Ne 過剰量をもとに、母天体での暗マトリクスのCRE年代は、明岩片に比べ、短くとも1000万年の照射があったと見積もられている[7]. このCRE起源ネオンの存在は、暗マトリクスが太陽風起源希ガスを持つ、つまり母天体表層に存在していたことと調和的な結果である。

4. 母天体の形成とハライトの成因

上記の岩石学的な特徴と年代学的な特徴を組み合わせこれら隕石の母天体とハライトの成因を考えてみる。母天体形成年代が45.3億年[7]とすると、母天体集積後に短寿命核種崩壊による天体内部での加熱により、H4-6程度に対応する熱変成が200-1000万年程度の期間で起きた[11, 12]. その後、多重の小天体衝突により、母天体表層での破碎・混合によるレゴリスが形成され、同時に太陽風及び宇宙線に1000万年程度曝された。太陽風を浴びたレゴリスはその後、母天体深くに移動し、上載圧力による続成作用により角礫岩になった。最終的に母天体から放出され隕石として地球に落ちてきた。

一方、ハライトの成因について、Zolenskyらは二つの可能性を示唆した[3]. 一つは、母天体上でハライトの析出した可能性、もう一つは、Hコンドライト母天体外からの供給であり、具体的には塩を含むような氷天体からもたらされた可能性である。ハライトの流体包有物中には二価のカチオン(Fe^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} など)が存在している[5]ことから、なんらかの熱水が鉱物を溶かしたことが示唆される。そのようなカチオンを含む熱水が母天体上で“水たまり”を形成し、そこでハライトが析出しつつ流体をトラップしたと考える

ことができる。この場合、流体包有物を含むハライトの形成は熱水反応(含水珪酸塩の脱水反応だとするとおよそ500℃ [13])も100℃以下の低温で起こらなければならぬ[3, 5]ため、ハライト形成と鉱物-熱水反応とは異なる領域で起きたはずである。

ハライトが母天体などの含水鉱物を含む天体で形成したとすると、ハライト及び流体包有物の起源は母天体形成時に含水ケイ酸塩が脱水した際に放出された熱水であると考えられる。Hコンドライト母天体の場合、ほぼ現存しない含水鉱物がHコンドライト母天体に存在しなければならない。また、ハライト形成がその後の角礫化のステージと関係ないとするならば、なぜ、暗マトリクスからのみしかハライトは見つからないのか。上記二つの矛盾と疑問は、流体包有物の水がHコンドライト母天体起源でなくCコンドライトなど他の母天体起源と考えればうまく説明できる。

含水鉱物を多量に含むCコンドライトの一つであるCIやCMコンドライト的な天体や水が主成分の彗星などがハライト中の水の起源ならば、水の水素・酸素同位体組成はその起源を判別する極めて有用な指標になる。それぞれの隕石・彗星は水素・酸素同位体組成が異なる[14 and references therein]ことから区別することができる。YurimotoらはMonahansとZagの流体包有物の水素・酸素同位体分析を試みた[14]。流体包有物を研磨により試料表面にむき出しにすることができないため、真空の試料室内で、流体が凝結するように試料を冷やしながら(-190℃)、一次イオンで数十μm掘り進めた後、同位体分析が行われた。同位体分析の結果、Hコンドライト母天体起源の酸素と彗星起源の酸素の成分が混ざったような同位体比を示し、これはそれぞれの成分の非平衡な流体包有物への取り込みを示唆しているのかもしれない。いずれにせよ、水の起源はHコンドライト母天体だけでなく、炭素質コンドライトや彗星などの他天体起源の水も混ざっているらしい。

5. おわりに

MonahansとZagという、レゴリス角礫岩中にハライト(及びシルバイト)結晶を含む隕石の特徴とその成因を紹介してきた。これら二つの隕石は非常によく似た特徴を持つが、ハライトの特徴や年代学的特徴がお

互いに少しずつ異なることからペア隕石ではなさそうである。コンドライト母天体の水の起源は、地球の水の起源にもかかわる可能性のある重要な情報である。また、ハライトの形成年代とホストの岩相の年代の関係は、流体の形成順序を考える上で必要不可欠である。共に、より詳細な研究が行われ、コンドライト形成領域での水の挙動とその歴史が解き明かされることが期待される。

謝辞

本稿を執筆するにあたり、建設的な意見をいただいた中嶋大輔氏、岡崎隆司氏、野口高明氏、山口亮氏に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Meteoritical Bulletin No. 82, 1998, *Meteoritics & Planetary Science* 33, A221.
- [2] Meteoritical Bulletin No. 83, 1999, *Meteoritics & Planetary Science* 34, A169.
- [3] Zolensky, M. E. et al., 1999, *Science* 285, 1377.
- [4] Zolensky, M. E. et al., 1999, *Meteoritics & Planetary Science* 34 (Supplement), A124.
- [5] Rubin, A. E. et al., 2002, *Meteoritics & Planetary Science* 37, 125.
- [6] Schultz, L. and Franke, L., 2004, *Meteoritics & Planetary Science* 39, 1889.
- [7] Bogard, D. D. et al., 2001, *Meteoritics & Planetary Science* 36, 107.
- [8] Chang, F.-R. et al., 1996 in *Rock-Forming Minerals*, 369.
- [9] Nassau, K., 1983, in *The Physics and Chemistry of Color*.
- [10] Whitby, J. et al., 2000, *Science* 288, 1819.
- [11] Huss, G. R. et al., 2006, in *Meteorites and the Early Solar System II*, 567.
- [12] McSween Jr., H. Y. et al., 2002, in *Asteroids III*, 559.
- [13] Lipschutz, M. E. et al., 1999, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites* 12, 57.
- [14] Yurimoto, H. et al., 2014, *Geochem. J.* 48, 549.