

## 小惑星レゴリス模擬標的に対する衝突実験：他天体由来インパクターの破壊と捕獲 Laboratory impact experiments of rock projectiles onto simulated asteroid regolith: Impactor fragmentation and capture

長岡 宏樹<sup>1</sup>; 中村 昭子<sup>1\*</sup>; 鈴木 絢子<sup>2</sup>; 長谷川 直<sup>2</sup>  
NAGAOKA, Hiroki<sup>1</sup>; NAKAMURA, Akiko<sup>1\*</sup>; SUZUKI, Ayako<sup>2</sup>; HASEGAWA, Sunao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kobe University, <sup>2</sup>Institute of Space and Astronautical Science

本研究では、角礫岩質隕石が形成される過程に着目し、小惑星レゴリスを模擬したシリカサンドに、他天体を模擬した岩石弾丸を衝突させ、衝突速度やシリカサンドの粒径と弾丸の破壊の程度との関係を調べた。

これまでの室内衝突実験では標的の破壊条件は詳しく調べられているのに対して、弾丸の破壊についてはほとんど研究がなされていない。そこで、神戸大学の火薬銃とガス銃を用いて、衝突速度 1 km/s 以下の低速度実験を行い、宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて、小惑星帯での平均衝突速度約 5 km/s を模擬する高速度実験を行った。弾丸物質として、標的破壊実験との比較のためにパイロフィライトと玄武岩を用いた。実験後に、シリカサンドの中に埋まったインパクターの破片を回収し、最大破片の質量を測定した。

弾丸の最大破片質量割合と、衝突時に発生する圧力を弾丸物質強度で規格化した値との関係を調べたところ、低速度衝突では、動的引張強度程度の圧力で壊れることがわかった。しかし、高速度衝突では、最大破片質量割合が低速度衝突から予想される値よりも大きくなり、特に、シリカサンドの粒径が小さいときにその傾向が顕著であった。その原因は、破片同士や破片とシリカサンドがユゴニオ弾性限界以上の加圧による塑性変形と衝突の温度上昇による焼結もしくは溶融により付着したことによると考えられる。特に、衝突速度 5 km/s で得られた弾丸破片の電子顕微鏡画像では、多数の気孔の存在が確認された。弾丸破片の溶融は、シリカサンドの圧密に伴って発生した熱によるものと考えられる。

キーワード: 隕石, 衝突過程, 小惑星

Keywords: meteorites, impact process, asteroids

## SHRIMP による Chelyabinsk 隕石の年代分析 Secondary Ion Mass Spectrometry (SHRIMP) U-Pb dating of Chelyabinsk meteorite

上岡 萌<sup>1\*</sup>; 寺田 健太郎<sup>1</sup>; 日高 洋<sup>2</sup>; 木村 光佑<sup>2</sup>; Skublov Sergey<sup>3</sup>  
KAMIOKA, Moe<sup>1\*</sup>; TERADA, Kentaro<sup>1</sup>; HIDAKA, Hiroshi<sup>2</sup>; KIMURA, Kosuke<sup>2</sup>; SKUBLOV, Sergey<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, <sup>2</sup> 広島大学大学院理学研究科, <sup>3</sup>Institute of Precambrian Geology and Geochronology,

<sup>1</sup>Osaka University, Department of Earth and Space Science, <sup>2</sup>Graduate school of Science, Hiroshima University, <sup>3</sup>Institute of Precambrian Geology and Geochronology,

2013 年 2 月にロシア、チェリヤビンスク州に隕石が落下した。目撃された弾道の軌道計算、および回収された隕石の鉱物学的記載から、遠日点距離 2.6 AU, 離心率 0.51 の Near Earth Asteroid を起源とする LL5 の普通コンドライトと報告されている。(Zuluaga et al. 2013, Galimov et al. 2013)。その後、Sm-Nd 年代では 37 億年 (Bogomolov et al. 2013)、Rb-Sr 年代では 2.9 億年 (Galimov et al. 2013) など比較的若い年代が報告されており、インパクトなどのショックイベントにより放射壊変系の 2 次的変性の可能性がある。そこで閉鎖温度の高いリン酸塩鉱物に着目し U-Pb 年代分析を行った。

まず、走査型電子顕微鏡 SEM-EDS を用いてリン酸塩鉱物の構成元素でマッピングをとり、同定を行った。またリン酸塩鉱物に含まれる微量元素について定量分析を行い、メルリライトとアパタイトを判別した。そして空間分解能の高い広島大学の 2 次イオン質量分析計 SHRIMP を用いて U-Pb 系のシステムティックスを調べ、Chelyabinsk 隕石の形成年代、変性 (ショック) 年代の算出を試みた。当日は、ラマン分光観察によるリン酸塩鉱物の高圧変成相の有無などの結果と併せ報告する予定である。

キーワード: Chelyabinsk 隕石, SHRIMP, リン酸塩鉱物, U-Pb 年代分析

Keywords: Chelyabinsk meteorite, SHRIMP, phosphate, U-Pb dating

## 特異なエコンドライト隕石 NWA 6704 の結晶化およびサブソリダス過程について Crystallization and subsolidus processes of the NWA 6704 ungrouped achondrite

高木 康成<sup>1</sup>; 野口 高明<sup>1\*</sup>; 木村 真<sup>1</sup>; 山口 亮<sup>2</sup>  
TAKAGI, Yasunari<sup>1</sup>; NOGUUCHI, Takaaki<sup>1\*</sup>; KIMURA, Makoto<sup>1</sup>; YAMAGUCHI, Akira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>茨城大学, <sup>2</sup>国立極地研究所

<sup>1</sup>Ibaraki University, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research

**Introduction:** NWA 6704 is a unique ungrouped achondrite. It consists of low-Ca pyroxene, less abundant olivine and plagioclase, minor chromite and merrillite, and trace awaruite, heazlewoodite, and pentlandite (1, 2). Although its bulk oxygen isotopic ratio is within the ranges of the acapulcoite-lodranite and CR chondrites, its petrography and mineralogy are evidently different from both of them (1). The U-Pb dating of this meteorite gives a <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb date of 4563.75 +/- 0.41 Ma (3). To deduce its formation processes is important to understand formation of its parent body that may have predated the formation of chondrite parent bodies.

**Methods:** Polished thin sections were investigated by optical microscopes, electron microprobe analyzer (EPMA), field-emission scanning electron microscope (FE-SEM), Raman spectroscopy, and electron backscattered diffraction (EBSD).

**Results:** The most abundant mineral in NWA 6704 is orthopyroxene containing blobs of augite. Both Raman spectroscopy and EBSD data indicate that this pyroxene is orthopyroxene. The texture of the blob-bearing orthopyroxene is very similar to Kintokisan-type orthopyroxene (inverted pigeonite) (4). We call it early formed (ef-) pigeonite. There are another less abundant low-Ca pyroxenes: augite blob-free orthopyroxene, and pigeonite containing sub-micrometer-size augite exsolution lamellae. Here we call them primary orthopyroxene and later formed (lf-) pigeonite. Lf-pigeonite occurs as coherent overgrowth of the primary orthopyroxene and discrete grains in the interstices of large ef-pigeonite. Lf-pigeonite also occurs as inclusions in olivine. Based on the EBSD data, modal abundances of ef-pigeonite, olivine, lf-pigeonite, primary orthopyroxene, feldspar, chromite, awaruite are 67.2, 16.8, 3.4, 0.6, 10.9, 0.4, and 0.4 vol.%, respectively. Crystallization sequence estimated based on the petrography is following: primary orthopyroxene => awaruite => ef-pigeonite => chromite => lf-pigeonite => olivine => augite (quite rare crystallized from melt) => heazlewoodite => pentlandite => merrillite => feldspar. Early formed pigeonite (blob-bearing orthopyroxene) shows a LPO of the [010] axis. Lf-pigeonite contains complex exsolution lamellae of augite. The thickest lamellae have ~0.2 micrometer in width and 1-2 micrometer wavelength. Finest lamellae have <0.1 micrometer thick and ~0.2 micrometer wavelength.

**Discussion:** Because [010] lattice preferred orientation of pyroxene in terrestrial rocks has been interpreted as settling of tabular pyroxene crystals in a stagnant magma chamber (5), ef-pigeonite could have settled in a stagnant magma chamber. Presence of Fe<sup>3+</sup> in chromite and high NiO concentration in olivine (0.89 wt.% on average) suggest that this meteorite crystallized under an oxidized condition. About 1100 °C equilibrium temperature was estimated by using two pyroxene geothermometry and ~950 °C by using olivine-spinel geothermometry. These high temperatures suggest that the meteorite cooled rapidly in this range of temperature. Multiple exsolution lamellae with thickness and wavelength similar to this meteorite were observed in Zagami martian meteorite. Its cooling rate between 1100 °C to 950 °C was estimated to be ~0.02 °C/hr (6). This meteorite could be cooled as slow as Zagami did. Further studies are needed to clarify if a monotonous cooling can accomplish both high equilibrium temperatures estimated by geothermometers and sub-micrometer-size exsolution lamellae in lf-pigeonite. NWA 6704 has petrography similar to that of NWA 6693. However, there is a stark difference between these two meteorites. Blob-bearing orthopyroxene is the most abundant pyroxene in the former. On the other hand, low-Ca pigeonite is the most abundant in the latter. Therefore, it is possible that NWA 6704 is not mere a pair of NWA 6693.

**References:** (1) Irvine et al. (2011), (2) Warren et al. (2012), (3) Iizuka et al. (2013), (4) Ishii and Takeda (1974), (5) Jackson (1961), (6) Brearley (1991).

キーワード: NWA 6704, エコンドライト  
Keywords: NWA 6704, achondrite

## 斜長石の粒径と普通コンドライトの岩石学的タイプ Petrologic type from plagioclase size distribution

川崎 雄大<sup>1</sup>; 木村 眞<sup>1\*</sup>; 野口 高明<sup>1</sup>  
KAWASAKI, Takehiro<sup>1</sup>; KIMURA, Makoto<sup>1\*</sup>; NOGUCHI, Takaaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 茨城大学理学部  
<sup>1</sup> Faculty of Science, Ibaraki University

熱変成作用の程度によって普通コンドライトは岩石学的タイプ 3-6 に分類されている。このうちタイプ 5, 6 の分類基準として斜長石の粒径が一般的に用いられており、タイプ 5 は  $10 \mu\text{m}$  以下の粒子が多く、タイプ 6 は  $50 \mu\text{m}$  以上の粒子が多い、とされている [1]。しかしながら、この基準は定量的ではなく、サイズ分布の統計的検討の必要性が指摘されていた [2]。そこで、本研究では斜長石の主としてサイズ分布を測定し、岩石学的タイプ 5-6 の区分を明らかにすることを研究目的とした。

本研究では H と L、LL グループのタイプ 5, 6 コンドライト、計 26 試料を観察し、それらに含まれる斜長石のサイズ分布を画像処理ソフトウェア ImageJ を用いて測定した。また、斜長石以外の熱変成作用の程度を示す指標として、コンドロールや集片双晶を示す Low-Ca パイロキシンの存在度も観察した。

その結果、タイプ 5 と 6 の斜長石に関しては  $50 \mu\text{m}$  以上のものがどちらにも分布することが明らかになった。個数分布において、タイプ 5-6 間で違いがみられるのは数  $\mu\text{m}$  サイズの小さな粒子の絶対数である。このため、累積個数割合のグラフにおいて、タイプ 5 の分布曲線とタイプ 6 の曲線には勾配に相違がみられる。タイプ 5 の試料は小さな粒子を豊富に含むためその勾配は急になるが、タイプ 6 は比較的大きな粒子が多いため勾配は緩やかになる。以上より、現在一般的に採用されている  $50 \mu\text{m}$  という数値は粒子の個数の観点からは指標にならないことが明らかになった。そこで別のパラメータとして面積に注目すると、タイプ 6 はタイプ 5 に比べて  $80-100 \mu\text{m}$  以上の粒子が面積的に多くなり、両タイプの相違が明確になった。

一方、化学的グループ間の斜長石の特徴の相違も本研究で明らかになった。H グループではタイプ 5 からタイプ 6 に変化するにつれて、コンドロールの組織は他のグループのものと同様に輪郭が不明瞭になりメソスタシスの再結晶度は高くなる。しかし斜長石のサイズ分布をみると、H グループの試料はタイプ 5-6 間でほとんど違いがみられない。H6 においても斜長石粒子は大きく成長してはいない。これに対して、L、LL グループではコンドロールの再結晶度や集片双晶の存在度と斜長石のサイズ分布の間には概ね相関がある。このため、H グループと L、LL グループとでは少なくとも斜長石のサイズ分布に関しては従来とは異なる分類基準を用いて岩石学的タイプを決定する必要がある。

文献: [1] Huss et al. (2005) in *Meteorites and the Early Solar System*, [2] Kovach and Jones (2010) *MAPS*, 45, 246-264.

キーワード: 普通コンドライト, 岩石学的タイプ, 斜長石, 熱変成作用  
Keywords: ordinary chondrite, petrologic type, plagioclase, thermal metamorphism



## ユークライトの希土類元素、SrおよびBa同位体研究 Systematic isotopic studies of REE, Sr and Ba in eucrites

世羅 浩平<sup>1\*</sup>; 日高 洋<sup>1</sup>; 米田 成一<sup>2</sup>  
SERA, Kohei<sup>1\*</sup>; HIDAKA, Hiroshi<sup>1</sup>; YONEDA, Shigekazu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院地球惑星システム学専攻, <sup>2</sup> 国立科学博物館理工学研究部

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, <sup>2</sup>National Museum of Nature and Sci.

分化した隕石であるユークライトは小惑星4ヴェスタの地殻部分に起源をもつと考えられ、その同位体研究からは原始惑星内の地殻—マントル分化を伴う初期進化過程に関する物質科学的な知見を得ることが期待できる。本研究では、原始惑星地殻の初期進化過程および太陽系年代学に用いられる手法に関する情報を体系的に得ることを目的として、ユークライトの希土類元素およびSr, Baに着目し、その同位体の分析を試みた。希土類元素同位体からは、放射壊変起源<sup>138</sup>Ce, <sup>142</sup>Nd, <sup>143</sup>Ndの同位体を組み合わせることで初期分化過程に関する年代学的情報を、中性子捕獲反応がもたらす<sup>149</sup>Sm-<sup>150</sup>Smおよび<sup>157</sup>Gd-<sup>158</sup>Gdの同位体シフトをとらえることによって宇宙線照射環境を知ることができる。また、SrおよびBa同位体データからは、ともに反応性に富むアルカリ金属元素を親核種にもつ<sup>87</sup>Rb-<sup>87</sup>Sr, <sup>135</sup>Cs-<sup>135</sup>Ba壊変系に基づいた年代学的情報をもたらすと考えられる。

本研究では、Juvinas, Stannern, Millbillillie, Dar al Gani 380 (DaG 380), DaG 391, DaG 411, DaG 443, DaG 480の8つのユークライトを用いた。各隕石試料約1gを粉碎後、酸分解し、試料溶液とした。各試料溶液を二分し、その大部分は所定のイオン交換法を用いて、Sr, Ba, Ce, Nd, Sm, Gdを化学分離し、表面電離型質量分析計(Triton-Plus)による高精度同位体比測定を行い、残りはICP質量分析計(Agilent 7500cx)を用いてRb, Sr, Cs, Ba, REEの元素濃度測定を行った。

DaG 480を除く7つの試料がその全岩化学組成において、CIコンドライト隕石の数~十数倍の希土類元素存在度を示し、そのパターンはEuを除いてほぼ平坦であり、これまで報告されている典型的な非集積岩タイプのユークライトが持つ特徴を示した。Millbillillieは母天体での部分溶融あるいは地球上での汚染を経験した可能性が示唆される。<sup>138</sup>Ce同位体比では4つ、<sup>142</sup>Nd, <sup>143</sup>Nd同位体比では7つの試料についてデータが得られ、先行研究で示されている各同位体進化線(Makishima and Masuda, 1991; Boyet and Carlson, 2005; Andreasen and Sharma, 2007)と整合性のある結果が得られた。また、 $\epsilon^{142}\text{Nd}$ - $\epsilon^{143}\text{Nd}$ プロットにおいて本研究試料は先行研究で報告されている集積岩ユークライトの同位体データと同一の傾向を示したが、先行研究のコンドライトの同位体データとは違う傾向を示した。<sup>87</sup>Rb-<sup>87</sup>Sr壊変系における同位体比データは同一の外的等時線を形成するには至らず、Papanastassiou and Wasserburg, (1969)にて示されたSr初期同位体比(BABI)を改定することはできなかった。SmおよびGd同位体シフトから見積もられる中性子フルエンスは $(0.28 \sim 4.05) \times 10^{15} \text{ n cm}^{-2}$ であり、これらはほぼ母天体から放出された後の宇宙線照射によるものと考えられる。Ba同位体比では太陽系外での原子核合成に起因する同位体比異常は確認されず、ユークライト母天体における火成活動による同位体比の均質化が起こった可能性が示唆される。しかし、右図に示すように<sup>135</sup>Ba同位体比には顕著な同位体変動が確認でき、ユークライト形成時における消滅核種<sup>135</sup>Csの存在を示唆する結果が得られた。現在、各試料中のRbおよびSrの元素存在度について同位体希釈法を用いて高精度に定量することを検討しており、今後<sup>87</sup>Rb-<sup>87</sup>Sr壊変系に基づく年代学的データと<sup>138</sup>La-<sup>138</sup>Ce, <sup>146</sup>Sm-<sup>142</sup>Nd, <sup>147</sup>Sm-<sup>143</sup>Nd壊変系から得られる情報との詳細な比較を行うと共に集積岩ユークライトおよびユークライトと同一の隕石グループに属するダイオジェナイトについても同様の分析を行う予定である。

キーワード: ユークライト, 希土類元素, 年代学, 同位体  
Keywords: eucrite, REE, chronology, isotope

## 衝撃を受けた隕石中の Lingunite 形成に関する実験的研究 Preliminary experiments on the formation process of lingunite in shocked meteorites

河野 真利<sup>1\*</sup>; 久保 友明<sup>1</sup>; 加藤 工<sup>1</sup>; 近藤 忠<sup>2</sup>  
KONO, Mari<sup>1\*</sup>; KUBO, Tomoaki<sup>1</sup>; KATO, Takumi<sup>1</sup>; KONDO, Tadashi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学・理, <sup>2</sup>大阪大学・理

<sup>1</sup>Kyushu Univ., <sup>2</sup>Osaka Univ.

Albite-rich hollandite (lingunite) has been frequently found in shocked meteorites with other high-pressure minerals (Gillet et al., 2000; Tomioka et al., 2000). According to the laser-heated diamond anvil cell (LHDAC) experiments by Liu (1978), following the decomposition of albite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) into jadeite ( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ ) plus quartz ( $\text{SiO}_2$ ) at 2-3 GPa, these phases recombine to form lingunite in the range of pressure between 21 and 24 GPa at about 1000 °C, and then it decomposes again into calcium ferrite-type  $\text{NaAlSiO}_4$  plus stishovite at pressures above 24 GPa. Similarly, Tutti (2007) observed  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  lingunite at 21-23 GPa and 2000 °C using LHDAC. In contrast to these LHDAC studies, high-pressure experiments using multi-anvil type (MA) apparatus revealed that the maximum solubility of  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  component in hollandite structure is limited to ~50 mol% at 14-25 GPa and 800-2400 °C (Yagi et al., 1994, Liu, 2006). This contradiction has not been solved yet, which makes it difficult to understand the shock conditions for the presence of lingunite in shocked meteorites. Tutti (2007) suggested that the stability of lingunite might be sensitive to temperature and could transform back when quenching rate is slow like MA experiments. However, the formation conditions of lingunite has not been well constrained even by LHDAC experiments.

To investigate the formation process of lingunite, we preliminarily carried out LHDAC experiments using a powder of natural albite as a starting material. The samples were compressed at room temperature, and then heated by the double-sided laser heating method using a Nd:YAG laser. The emission spectra were measured on both side of the heated sample, and used to estimate temperature. Heating duration at the maximum temperature was several minutes. Recovered samples were analyzed by X-ray diffraction method at BL-ARNE7 and BL-ARNE1 of photon factory, KEK. The results obtained suggest that jadeite and stishovite are present at 22 GPa and 1230 °C. The assemblage changed into calcium ferrite-type structure and stishovite at 25 GPa and 1400 °C. Hydrous aluminum silicate (phase egg) was also present in both samples probably due to the effect of absorbed water in the powdered starting material. We measured X-ray diffraction patterns at several points in the sample, which showed changes of the ratio of the constituent minerals due to the presence of pressure and temperature gradients, however we did not observe lingunite in any measured points. Although experimental conditions are still rather limited, our preliminary results suggest that the formation condition of lingunite is more than 1400 °C at these pressure ranges.

Keywords: lingunite, high pressure, LHDAC, shocked meteorite