

チェリャビンスク隕石の組成・組織の不均質性 Compositional and textural inhomogeneity of Chelyabinsk meteorites

荒井 朋子^{1*}; 阿部 新助²; 大塚 勝仁³; 廣井 孝弘⁴; 小松 睦美⁵; フェイガン ティム⁵
ARAI, Tomoko^{1*}; ABE, Shinsuke²; OHTSUKA, Katsuhito³; HIROI, Takahiro⁴; KOMATSU, Mutsumi⁵; FAGAN, Tim⁵

¹ 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ² 日本大学 理工学部, ³ 東京流星観測網, ⁴ ブラウン大学, ⁵ 早稲田大学
¹Chiba Inst. of Technology, Planetary Exploration Research Center, ²Nihon University, ³Tokyo Meteor Network, ⁴Brown University, ⁵Waseda University

Meteorites are important sources of information on composition and age of the solar system materials. However, collected meteorites are likely biased and unrepresentative of the near-Earth meteoroid population. Mineralogy and reflectance spectra of meteorites are used to link specific classes of meteorites and asteroids, but are not definitive enough. Meteorites of which fall were witnessed are rare and substantial case when meteorites and their parent bodies are directly linked, and both orbital and material data of the near-Earth bodies are known. The fireball was eye-witnessed near Chelyabinsk city of Russia in 15 February 2013, and associated meteorites of total mass of 4-6 ton, were subsequently recovered. Survey of physical and chemical nature of small bodies with an Earth-crossing orbit is crucial in understanding the origin and evolution of the near-Earth materials and in planetary defense. While near-Earth objects (NEO) >1 km dia. have been largely identified by NEO survey programs, most NEOs <?100 m dia. remain unknown. Thus, it is important to study the Chelyabinsk-sized objects. We present mineralogy and reflectance spectra of several chips of Chelyabinsk meteorites, which indicate chemical and spectral inhomogeneity, suggesting the complex history of the parent body.

キーワード: チェリャビンスク隕石, 隕石衝突, 不均質性
Keywords: Chelyabinsk meteorites, Meteoroid impacts, Inhomogeneity

岩石学的タイプ7コンドライトの特徴と分類 Classification and petrologic features of chondrites of petrologic type 7

木村 眞^{1*}; 山口 亮²; フリードリック ジョン³
KIMURA, Makoto^{1*}; YAMAGUCHI, Akira²; FRIEDRICH, Jon³

¹茨城大学 / 極地研究所, ²極地研究所, ³フォーダム大学 / アメリカ自然史博物館

¹Ibaraki University / National Institute of Polar Research, ²National Institute of Polar Research, ³Fordham University / American Museum of Natural History

Chondrites are classified into petrologic types 1-6, which distinguish the degrees of aqueous alteration (types 1-2), and thermal metamorphism (types 4-6). In addition, a petrographic type 7 has also been proposed to indicate an even higher degree of thermal metamorphism [1]. Such chondrites contain only relict chondrules, and plagioclase is commonly coarse-grained. Low-Ca pyroxene contains >1% CaO. However, most of these chondrites may actually be melt rocks or melt breccias [2], and the occurrence of a type 7 is controversial problem. However, LEW 88663 seems to be a genuine type 7 chondrite [3], not a melt rock.

Here we report the preliminary results of our petrographic study on ordinary chondrites classified as type 7, to explore their thermal history, classification, and genetic relationships to melt breccia and others.

Many chondrites are classified as type 7 in NIPR and other collections (77 chondrites at present). However, the detailed petrography has been rarely reported for these chondrites. Here we studied 4 H7, 4 L7, and 4 LL7 in NIPR collections. We also examined Uden (LL7).

All of the chondrites studied here show a well recrystallized texture. Triple junctions among olivine and pyroxene is commonly observed. However, Y-790124 and -790446 include many chondrules, indicative of type 6. A-880844 and -880993 contain clasts of various petrologic types, and are genomict breccias (H5-6 and LL4-6, respectively). Although Y-790144 does not seem to contain any chondrules, it is shock-darkened chondrite, and has lost its original texture.

Y-74160 has been extensively studied [e.g., 4]. This chondrite, Y-791067, and Uden consist of clasts among fine-grained matrix. The clasts comprise coarse-grained olivine, low-Ca pyroxene, and plagioclase. Olivine is typically included as chadacryst in pyroxene. The matrix is also highly recrystallized. Friedrich et al. [5] suggested that Y-74160 and Uden were subjected to Fe-FeS mobilization. These chondrites experienced partial melting, recrystallization, and brecciation, and may be classified as recrystallized breccias.

On the other hand, five chondrites, Y-75008, -790120, and -790960 (H7s), Y-82088 (L7), and Y-82067 (LL7), contain no or only a few relic chondrule in each section. They show highly recrystallized texture, and are not subjected to brecciation and melting. Y-82067 has composition identical to equilibrated LL chondrites [5]. These five chondrites are temporarily classified as type 7, if type 7 chondrite is defined to have experienced only a high degree of thermal metamorphism.

We are now examining modal mineral abundances and conducting mineral analyses, which will shed light on the classification criteria for type 7 chondrites.

References: [1] Dodd et al. (1975) GCA, 39, 1585-1594. [2] Huss et al. (2006) in Meteorites and the Early Solar System II. [3] Mittlefehldt and Lindstrom (2001) MAPS, 36, 439-457. [4] Takeda et al. (1984) EPSL, 71, 329-339. [5] Friedrich et al. (2014) submitted to GCA.

キーワード: 普通コンドライト, タイプ7, 熱変成作用

Keywords: ordinary chondrite, type 7, thermal metamorphism

CR2 コンドライト中に見つかったエクロジヤイト的クラストの起源：巨大な微惑星の頻繁な衝突破壊の証拠？ Origin of eclogitic clasts in a CR2 chondrite: Evidence of frequent collisions and disruptions of large planetesimals?

比屋根 肇^{1*}; 杉浦 直治¹; 木多 紀子²; 木村 眞³; 森下 祐一⁴; 竹鼻 祥恵¹
HIYAGON, Hajime^{1*}; SUGIURA, Naoji¹; KITA, Noriko T.²; KIMURA, Makoto³; MORISHITA, Yuichi⁴; TAKEHANA, Yoshie¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² 米、ウィスコンシン大学マディソン校、地球科学教室, ³ 茨城大学理学部, ⁴ 静岡大学大学院理学研究科

¹Graduate School of Science, The University of Tokyo, ²Department of Geoscience, University of Wisconsin -Madison, USA, ³Faculty of Science, Ibaraki University, ⁴Department of Geosciences, Shizuoka University

NWA801 (CR2) コンドライト中に見つかったエコンドライト的クラストは、惑星科学において次のような重要性を持つ (Sugiura et al., 2008; Kimura et al., 2010, 2013): (i) エコンドライトがコンドライトより早く形成された強い証拠である、(ii) クラストにはエクロジヤイト的な鉱物相 (ザクロ石とオンファス輝石) が含まれており、高压で生成されたことが示唆される (~3 GPa, ~1000 C; Kimura et al., 2013)、(iii) クラストにはグラファイトを含む岩相 (GBL) と含まない岩相 (GFL) が含まれており、GBL におけるグラファイトの存在はユレイライトとの関連性を示唆する。

我々はクラスト中のいくつかの鉱物に対してイオンマイクロプローブによる酸素同位体分析、希土類元素分析をおこなった (Hiyagon et al., 2014)。本講演では、新しく得られたデータおよび拡散計算をもとに、クラストが巨大微惑星内部での高压により作られたのか、衝撃圧によりつくられたのかについて議論する。

鍵となる観測事実は次のとおりである。(1) オリビン粒子 (~20 ミクロン) は化学的にほぼ均一で Mg# 66-68 を示す。(2) ほとんどの opx (~20 ミクロン) は均一で Mg# 70-75 であるが、大きな opx 粒子 (50-80 ミクロン) には Mg に富むコア (Mg# 78-87) がある。(3) 異なる地質温度圧力計 (opx-cpx, garnet-cpx, garnet-opx, garnet-ol の鉱物ペアに対する 7 つの式) が整合的な温度圧力 (940-1080 C, 2.8-4.2 GPa) を示す。(4) すべての酸素同位体データ (ol + opx) は傾き ~0.6 の相関線上に乗る。GFL のデータ (ol) は均一で CCAM line の近くにプロットされ (delta18O ~+5 パーミル) だが、GBL のデータ (ol + opx) は delta18O が +2.4 から +4.4 パーミルまでばらついている。(5) 希土類元素を含む主要な鉱物はクロルアパタイト (軽希土類、重希土類とも) およびザクロ石 (重希土類) である。GBL および GFL の希土類元素バルク組成の推定値は、それぞれ ~1.2 x CI, ~1.8 x CI の存在度でほとんどフラットなパターンである (分別を示さない)。

二つの岩相のグラファイトの有無は、smelting と呼ばれる反応、FeO (silicate) + C (graphite) = Fe (metal) + CO (gas)、の有無が関与していると考えられる。すなわち、GBL は微惑星の深い場所で、GFL は微惑星の浅い場所で生成された可能性がある。

我々は、衝撃圧縮モデルおよび静水圧モデルの二つのモデルについて考察する。拡散の計算に基づいて、次のような議論をおこなった。(1) オリビンおよび opx のほとんど均一な Fe/Mg 比 (一部の opx には Mg に富むコアが見られる) を説明するためには、~1000 C で 120-800 年間の加熱が必要である。(2) GBL に見られる酸素同位体不均一は、オリビンの Fe/Mg 比が均一化する前につくられている必要がある。(3) 異なる地質温度圧力が整合的な温度圧力を示すためには、異なる鉱物ペア間の異なる元素の分配が平衡に達している必要がある。このことは、静水圧的な高压モデルを強く示唆する。(5) 異なる地質温度圧力計の示す値の整合性はまた、数百年間の加熱の後に急冷されたことを示唆するが、このことは微惑星の破壊を示唆しているかもしれない。

本研究の結果は、太陽系の進化過程のある段階での、巨大微惑星の頻繁な衝突と破壊を示唆しているのかもしれない。

参考文献: Kimura M. et al. (2010) (abstract) *Meteoritics and Planetary Science* 45, A105; Kimura M. et al. (2013) *American Mineralogist*, 98, 387-393; Sugiura N. et al. (2008) (abstract) *Meteoritics and Planetary Science* 43, A149. Hiyagon H. et al. (2014) in preparation.

キーワード: エクロジヤイト, CR コンドライト, 酸素同位体, 希土類元素, 微惑星衝突, 拡散

Keywords: eclogite, CR chondrite, oxygen isotopes, rare earth elements, collisions of planetesimals, diffusion

アングライト母天体の半径の推定 Estimation of the size of the angrite parent body

鈴木 博子^{1*}; 小澤 一仁¹; 永原 裕子¹; 三河内 岳¹
SUZUKI, Hiroko^{1*}; OZAWA, Kazuhito¹; NAGAHARA, Hiroko¹; MIKOUCHI, Takashi¹

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

アングライト隕石は非常に古い結晶化年代 (4557 - 4564Ma) を持つ隕石であり (Brennecka and Wadhwa, 2012; Kleine et al., 2012)、分化した原始惑星のマグマ固結物 (e.g. Prinz and Weisberg 1995; Baker et al., 2005; Weiss et al., 2008; Suzuki, et al., 2012) と考えられている。このため、アングライト隕石は太陽系最初期の分化した微惑星?原始惑星の情報を持つと考えられ、惑星の形成や分化を明らかにする上で重要である。しかし、その母天体は見つかっておらず、その形成進化過程を知る上できわめて重要な情報である天体サイズは不明である。アングライト母天体の半径の下限値は、ダイナモの存在から示唆される核形成のためには、²⁶Al の壊変による発熱で充分長期間にわたって天体内部が高温に保たれている必要があることから半径 100~200km 以上とされている (Weiss et al., 2008; Elkins-Tanton et al., 2011)。一方、半径の上限値は、揮発性成分に乏しいこと (Papike et al., 2003) や、スピネルの反応組織を高圧条件での反応であると考え (Kuehner et al., 2006) から、水星サイズ (半径 2440km) という主張もあるが、まったく制約されていないと言って良い。このため、アングライト母天体半径により強い制約を課す必要がある。

本研究では、アングライト隕石の一つである D'Orbigny に含まれる真球状気泡 (Varela et al., 2005; McCoy et al., 2006) に着目して、アングライト母天体の半径の推定を行った。真球状の気泡サイズは 0.3 ? 25 mm (McCoy et al., 2006; Kurat et al., 2004) で、周囲は細粒の初期晶出相である olivine と plagioclase にのみ囲まれており、これらの結晶化開始時に気泡の形が凍結されたことがわかる。冷却速度を計算すると数度/時という速い速度が推定され、D'Orbigny は母天体表層で固化したと考えると良い。また、気泡の濃集層が存在することから気泡がメルト中を運動していたと考えられる。上昇する気泡の形を支配する無次元数には、慣性力と粘性力の比を代表するレイノルズ数、浮力と表面張力の比を代表するエトベス数、気液密度比、気液粘性率比があり、中でもレイノルズ数とエトベス数は天体の重力に依存するため、母天体の半径の制約に用いる事が出来る。上昇している気泡が球状になるか非球状になるかを分けるレイノルズ数とエトベス数の関係は、Bhaga and Weber (1981) の実験や Hua and Lou (2007) の数値計算結果により推定されている。D'Orbigny マグマのレイノルズ数とエトベス数を計算するにはメルトの密度や粘性を推定する必要がある。特に重要なのは、これらに大きな影響を与える気泡凍結時の温度である。これは、最初に結晶化した olivine の準安定リキダス温度とし、MELTS (Ghiorso and Sack, 1995) を用いて推定した。この他、最大気泡直径 25mm、表面張力を 0.35N/m (Walker and Mullins, 1981)、凍結時の気泡表面の結晶被覆率を 0.5、金属核を持つ天体である 4 Vesta 程度の母天体密度 4000kg/m³ (Zuber et al., 2011) を用いて、D'Orbigny マグマのアングライト母天体表層でのレイノルズ数とエトベス数の関係を求めた。これらと、球状・非球状領域の境界線との交点から、母天体の半径の上限を 700 ± 100km と推定した。これは、先行研究で主張されていた水星の半径よりかなり小さな値である。

キーワード: アングライト, 微惑星, 母天体半径, 微惑星内部構造, ドビグニー, 原始惑星

Keywords: angrite, planetesimal, parent body radius, parent body internal structure, D'Orbigny, protoplanet

Almahata Sitta および南極産ユレイライトに見られる α 鉄、 γ 鉄、鉄化合物の結晶化実験

Crystallization experiment of alpha-Fe, gamma-Fe and iron compounds found in the Almahata Sitta and Antarctic ureilites

青柳 雄也^{1*}; 三河内 岳¹; 杉山 和正²; 横山 嘉彦²; Goodrich Cyrena A.³; Zolensky michael E.⁴

AOYAGI, Yuya^{1*}; MIKOUCHI, Takashi¹; SUGIYAMA, Kazumasa²; YOKOYAMA, Yoshihiko²; GOODRICH, Cyrena A.³; ZOLENSKY, Michael E.⁴

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 東北大学金属材料研究所, ³ 惑星科学研究所, ⁴ NASA ジョンソン宇宙センター
¹Dept. of Earth & Planet. Sci., Univ. of Tokyo, ²Inst. for Materials Research, Tohoku Univ., ³Planet. Sci. Inst., ⁴NASA-JSC

Ureilites are ultramafic achondrites whose origin and petrogenesis are still controversial. The cooling rate of ureilites estimated from silicates is approximately a few degrees per hour, and it was considered to reflect catastrophic disruption of the ureilite parent body. Ureilites were broken into meter-sized fragments and then formed daughter body(ies) by re-accumulation.

Fe-Ni metal is one of the major components of all types of ureilites. Almahata Sitta, having fallen on the earth in October 2008, was classified as a polymict ureilite and ureilitic fragments from the Almahata Sitta contain abundant Fe-Ni metal. In previous studies, some grain boundary metals in Almahata Sitta ureilites show unique textures, not found in main group ureilites. These textures show characteristic assemblages with various combinations of α -iron (bcc), γ -iron (fcc), cohenite ($[\text{Fe}, \text{Ni}]_3\text{C}$) and schreibersite ($[\text{Fe}, \text{Ni}]_3\text{P}$).

Those metal textures resemble the product by steelmaking process in the earth, for example martensite (α -iron and γ -iron). Generally, these textures require rapid cooling equivalent to quenching by water (>100 °C/s). However, the cooling rate estimated from silicates (ca. several °C/h) is much slower than that in producing the martensite. Thus, these metal textures may record the event separated from the event that recorded in the silicates, that is, disruption of parent body. Therefore, studying these complicated metal textures will contribute to a better understanding of the formation and origin of metal in ureilites with the information about their thermal histories.

Those metal textures were only found in Almahata Sitta fragment #44, in previous studies, but we found similar assemblages composed of iron metal and its compounds in other fragments of Almahata Sitta and Antarctic ureilites. Forms and abundances are variable depending on samples, but it is suggested that those mineral assemblages in Fe-Ni metal are commonly found in ureilites.

To estimate the cooling rate which can form these iron and iron compounds textures, we performed cooling experiments by the electric furnace to heat and quench metal whose compositions correspond to metals showing complex metal phase assemblages in Almahata Sitta ureilite. The results suggest that those metal textures can be achieved in the cooling rate faster than the lowest limit between 10 °C/s and 0.83 °C/s, whose chemical composition is $\text{Fe}_{79.2}\text{Ni}_{3.4}\text{P}_{2.5}\text{Si}_{2.7}\text{C}_{12.2}$. At lower cooling rate (0.83 or 0.04 °C/s) and 10 °C/s of other starting material ($\text{Fe}_{86.4}\text{Ni}_{2.8}\text{P}_{0.7}\text{Si}_{4.1}\text{C}_{6.0}$), interstitial schreibersite among rounded iron was detected and neither cohenite nor γ -iron has been formed. In the carbon-free composition ($\text{Fe}_{91.2}\text{Ni}_{3.9}\text{P}_{0.5}\text{Si}_{4.4}$), similar textures were not generated at all cooling rates. This cooling rate, forming metal textures, is much faster than that estimated from silicates, and thus it is concluded that the event recorded by the silicates and the event formed the metal textures were truly separated.

Before disruption of ureilite parent body, primary metals probably melted and mixed with surrounding materials (graphite, phosphide and other iron compounds) to various extents at high temperature. The iron phase was considered to be uniformly γ -iron. Then, the ureilite parent body was destroyed and silicate minerals obtained cooling rate by quenching. Later, daughter body(ies) formed by accumulation of meter-size fragments. If daughter body(ies) was either shocked while still hot or heated by shock and then disrupted into smaller fragments (cm-size), the formation of iron textures may be achieved by super rapid cooling exceeding 1 °C/s. The metal grains without γ -iron would experience relatively slow cooling due to larger fragment size. Consequently, it is considered that the complex coexistences of iron and iron compounds found in ureilites have recorded temperature change and fragmentation process due to the impacts on the parent body and daughter body(ies).

原始惑星における初期衝突現象：玄武岩質隕石からの事実 Early impact events on differentiated protoplanets: Evidence from basaltic achondrites

山口 亮^{1*}
YAMAGUCHI, Akira^{1*}

¹ 国立極地研究所
¹ National Institute of Polar Research

Impact events are a ubiquitous geological process on planetesimals and protoplanets, evidenced by the presence of shock and brecciated textures in asteroidal meteorites. However, evidence for early impact events were obliterated by overprints of later thermal events such as volcanism and thermal metamorphism. We investigated early impact events in these meteorites on the basis of mineralogical and geochemical data.

At present, there are ~5 eucrites which were derived from distinct protoplanets. An anomalous eucrite, Ibitira, is a strongly recrystallized rock. Low-Ca pyroxene shows homogeneous compositions, indicating that these rocks experienced prolonged thermal metamorphism (~900-1000 C), as did most basaltic eucrites. The presence of unequilibrated pyroxenes related to oxide grains can be explained by short reheating event (and partial melting) and rapid cooling. Normal eucrites, EET 92023 and Y 86763, and a cumulate eucrite Moore County seem to have experienced a similar history. Most likely explanation for this thermal history is that they were excavated by impact from hot interior.

Anomalous cumulate eucrites Dho 700 and EET 92023 are medium-grained granular rocks similar to cumulate eucrites. Anomalous basaltic eucrite, NWA 011 shows a recrystallized texture. These rocks are crystalline (unbrecciated) but contain significant amounts of impactor materials. Dho 700 and EET 90020 contain taenite which is not common in pristine eucrites. The high abundances of siderophile elements are explained by addition of ~1% iron meteorites. Thus, these rocks experienced impact event before or during crystallization and thermal metamorphism.

All anomalous eucrites studied here show crystalline textures, but have evidence for impact melting or brecciation before thermal events. These meteorites record early collisional history possibly during the stage of runaway growth.

火星起源隕石 Tissint の衝撃組織の特徴 Shock features in a Martian meteorite, Tissint

宮原 正明^{1*}; 大谷 栄治²; El Goresy Ahmed³; Gillet Philippe⁴
MIYAHARA, Masaaki^{1*}; OHTANI, Eiji²; EL GORESY, Ahmed³; GILLET, Philippe⁴

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 東北大学理学研究科地学専攻, ³ バイロイト大学, ⁴ スイス連保工科大学 ローザンヌ校

¹DEPSS, Graduate School of Science, Hiroshima Univ., ²Institute of Mineralogy, Petrology and Economic Geology, Graduate School of Science, Tohoku Uni., ³BGI, ⁴EPFL

Tissint is the fifth fall Martian meteorite collected in Morocco on 2011 [1]. The nomination of a fall Martian meteorite is since 1962. Tissint will bring new clues for Martian evolution because it is less contaminated with terrestrial materials. Tissint is a member of shergottite. Many shergottites experienced a heavy shock event on Mars [e.g., Ref. 2]. We expected that Tissint should be also heavily shocked. A high-pressure polymorph is one of clear evidences for such a dynamic event. Accordingly, we described shock features, especially a high-pressure polymorph by FEG-SEM, EMPA, Raman spectroscopy and FIB-TEM techniques to clarify shock history recorded in Tissint.

We prepared several petrographic thin sections of Tissint for this study. EMPA analysis show that Tissint studied here consists mainly of olivine (Fa₁₈₋₆₆), pigeonite or augite (En₄₃₋₆₂Fs₂₃₋₃₇Wo₁₀₋₃₄) and labradoritic feldspar (An₆₂₋₆₆Ab₃₄₋₃₇Or₀₋₁). There are many melt-pockets, which is suggestive of a heavy shock event. FEG-SEM and FIB-TEM observations show that olivine grains entrained in the melt-pockets dissociated into silicate-perovskite (now almost amorphous or poorly-crystallized) and magnesiowustite, which is found in a Martian meteorite DaG 735 for the first time [3]. Silicate-perovskite and magnesiowustite show equigranular texture and less than ~100 nm in dimension. We also identified ringwoodite lamella in some olivine grains adjacent to the melt-pockets. TEM images show that ringwoodite has a dimension of less than ~500 nm. Raman spectroscopy analysis indicates that most feldspar now transforms into maskelynite. Jadeite-like crystals appear in some feldspar grain adjacent to the melt-pockets.

Considering the dissociation reaction of olivine into silicate-perovskite and magnesiowustite, shock pressure condition recorded in Tissint is beyond ~23 GPa based on phase diagram deduced from static synthetic experiments [4]. Phase transformation from olivine to ringwoodite also occurs besides the olivine dissociation reaction. Phase transformation from olivine to ringwoodite occurs instead of olivine dissociation reaction with decreasing temperature but under same pressure condition [5], which is due to thermal gradient in the olivine grains adjacent to the melt-pockets although pressure condition should be almost homogeneous. The nucleation and grain growth of a high-pressure polymorph is kinetically controlled. Baziotis et al. (2013)[6] propose that Tissint experienced the largest impact event among known Martian meteorites because ringwoodite appear to be a huge single crystal based on their SEM observations. However, our TEM images clearly depict that ringwoodite is a fine-grained grain assemblage, suggesting that it is unlikely that Tissint experienced the largest impact event.

References

- [1] Chennaoui Aoudjehane H. et al. Tissint Martian Meteorite: A fresh look at the interior, surface, and atmosphere of Mars. *Science* 338, 785-788 (2012).
- [2] El Goresy A. et al. Shock-induced deformation of Shergottites: Shock-pressures and perturbations of magmatic ages on Mars. *Geochim.Cosmochim.Acta* 101, 233-262 (2013).
- [3] Miyahara M. et al. Natural dissociation of olivine to (Mg,Fe)SiO₃ perovskite and magnesiowustite in a shocked Martian meteorite. *Proc.Nat.Acad.Sci.U.S.A.* 108, 5999-6003 (2011).
- [4] Presnall D.C. Phase diagrams of Earth-Forming Minerals. 248-268, in *Mineral Physics & Crystallography, A Handbook of Physical Constants*, T. J. Ahrens ed., AGU, Washington D. C (1995).
- [5] Akaogi M. et al. Low-temperature heat capacities, entropies and enthalpies of Mg₂SiO₄ polymorphs, and a?b?c and post-spinel phase relations at high pressure. *Phys.Chem.Minerals* 34, 169-183 (2007).
- [6] Baziotis I.P. et al. The Tissint Martian meteorite as evidence for the largest impact excavation. *Nat.Commun.*, doi: 10.1038/ncomms2414 (2013).

Keywords: Tissint, Martian meteorite, Shock, High-pressure polymorph

EPMAを用いたアポロ衝撃溶融岩片の全岩組成の推定 Estimation of bulk major element composition for Centimeter-Sized Impact Melt Clasts in Lunar Rocks using EPMA

新原 隆史^{1*}; クリング デービット²
NIIHARA, Takafumi^{1*}; KRING, David A.²

¹ 極地研 / LPI / SSERVI, ²LPI / SSERVI
¹NIPR / LPI / SSERVI, ²LPI / SSERVI

Most of lunar surface rocks are brecciated and mixed with various types of rock fragments and impact melt clasts during multiple impact events. We are testing the Late Stage Heavy Bombardment on the Moon surface [1-3] using Apollo 16 centimeter-sized impact melt clasts in ancient regolith breccias. Bulk composition is a key to understand original (pre-impact) lithologies where the clasts come from [4, 5]. Large-sized impact melt rocks (>5 cm) have been classified into 4 major group (Group 1 to 4) according to Sm and Sc compositions [6]. We compiled major element compositions of the previously classified impact melt rocks [6] and found that we can classify major impact melt groups even when we use major element compositions. However, our samples, centimeter-sized impact melt clasts, are highly restricted on their masses and makes us difficult to obtain bulk composition using conventional techniques (e.g. INAA and XRF). Defocused beam analyses (DBA) with EPMA is used to estimate the bulk compositions for limited mass samples using petrological sections, however, nobody tested accuracy of DBA techniques using certified geochemical standard.

We use a thin section of BCR-2 (fine-grained basalt supplied from USGS) and tested accuracy of DBA method using an EPMA (CAMECA SX-100) at NASA Johnson Space Center. We measured 12 elements (Na, Mg, Si, Al, P, K, Ca, Ti, Fe, Mn, Cr, and Ni) at >250 points with 20 micrometer beam diameter. We corrected density effect following the Warren (1997) method [7]. Averaged SiO₂ and FeO have larger difference from USGS values (+4.4 wt.% for SiO₂, -4.68 Wt.% for FeO) relative to other elements (up to +/- 2.4 wt.%). Although there are major changes in SiO₂ and FeO values after correct the density effect (difference from USGS values are up to -4.1 Wt.% for SiO₂ and up to +4.6 Wt.% for FeO), we suggest the DBA compositions can useable for the fine-grained materials to estimate the bulk major element composition for Apollo 16 impact melt clasts.

We estimated the bulk composition by averaged DBA method for two impact melt clasts in an Apollo 16 ancient regolith breccia 61135 which have optically different 5 regions (Clast1 R1, R2, and R3; and Clast 2 R1 and R2) to reveal the original lithology of the impact melt clasts. Five regions from the two impact melt clasts can be divided into three chemical groups of high-K, low-K and intermediate compositions. Clast 1 R3 has high K (K₂O=0.72 wt.%) and P (P₂O₅=0.35 wt.%), and low Al (Al₂O₃=20.7 wt.%) and Ca (CaO=12.0 wt.%). On the other hand, Clast 1 R1 and R2 have low K (K₂O=0.31-0.27 wt.%) and P (P₂O₅=0.08-0.07 wt.%) with high Al (Al₂O₃=26.1-25.2 wt.%) and Ca (CaO=14.5-14.0 wt.%). Clast 2, in both dark and bright regions, has an intermediate composition between high-K and low-K melts (e.g. K₂O=0.46, P₂O₅=0.16 wt.%, Al₂O₃=22.9 wt.%, CaO=12.8 wt.%). The bulk Mg# of the 5 regions are similar (Mg#=80-78).

If the melts in the two clasts are related, there are two possible origins: (1) A single impact event hit a complex lithological target and incompletely mixed the melts, to produce high-K, intermediate-K, and low-K melt fractions. (2) An impact produced either a high- or low-K melt. A second impact produced a melt at the other end of the K spectrum. The melts in Clast 1 represent those two end member melts. If the second impact melt digested older fragments of the first impact melt, then that may have produced the intermediate compositions of Clast 2. Alternatively, the melts are not related and require three or more impact events.

Reference: [1] Papanastassiou D.A. and Wasserburg G.J. 1971. EPSL 11. 37-62. [2] Turner G. et al., 1973. Proc. LPSC 4, 1889-1914. [3] Tera F. et al., 1974. EPSL 22, 1-21. [4] Niihara, T. and Kring, D. A., 2012. LPSC. #1229. [5] Niihara, T. et al., 2013. LPSC. #2083. [6] Korotev, R.L. 1994. GCA 58, 3931-3969. [7] Warren, P.H., 1997. LPSC28, #1406.

キーワード: EPMA, 全岩組成, アポロ 16 号, 衝撃溶融岩片
Keywords: EPMA, Bulk composition, Apollo 16, Impact melt clast

月隕石におけるシリカ多形の形成過程の解明 Formation processes of silica polymorphs in lunar meteorites

鹿山 雅裕^{1*}; 富岡 尚敬²; 関根 利守¹; Götze Jens³; 西戸 裕嗣⁵; 大谷 栄治⁴; 宮原 正明¹; 小澤 信⁴
KAYAMA, Masahiro^{1*}; TOMIOKA, Naotaka²; SEKINE, Toshimori¹; Götze, Jens³; NISHIDO, Hirotugu⁵; OHTANI,
Eiji⁴; MIYAHARA, Masaaki¹; OZAWA, Shin⁴

¹ 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 岡山大学地球物質科学研究センター, ³ Department of Mineralogy, TU Bergakademie Freiberg, ⁴ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ⁵ 岡山理科大学生物地球学部生物地球学科

¹ Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, ² Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, ³ Department of Mineralogy, TU Bergakademie Freiberg, ⁴ Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, ⁵ Department of Biosphere-Geosphere Science, Okayama University of Science

月面に広く分布する大小様々なクレーターやレゴリスは、隕石や微惑星が月や地球にこれまでに幾度と無く衝突した痕跡であり、このような天体衝突が月や地球の進化、例えばジャイアント・インパクトによる初期地球や月の形成、さらには後期重爆撃期における大量の隕石群の衝突と生命の誕生に寄与したことが知られている。通常、天体衝突の際に発生した高温高圧条件により、惑星から放出された隕石には種々の高圧鉱物が存在する。しかし、月のような大気の無い天体の場合、高圧鉱物が隕石中に残存することは難しいと考えられてきた (Papike 1998; Lucey et al., 2006)。しかし、最近では月隕石である Asuka-881757 や NWA4734 からコーサイトやスティショバイト、ザイフェルタイトなどのシリカ鉱物の高圧相が発見されており、高圧相の生成条件から月面における天体衝突過程の詳細が明らかとなってきた (Ohtani et al. 2011; Miyahara et al. 2013)。

天体衝突時の変成条件は、衝撃銃を用いた動的圧縮実験とマルチアンビルプレスやダイヤモンドアンビルセル (DAC) による静的圧縮実験をもとに決定されている。シリカ鉱物の場合、石英やシリカガラスを出発試料とした高圧実験については数多くの研究がなされているものの、月面に存在すると考えられているクリストバライトやトリディマイトなどのシリカ多形については報告例が少ない。高圧相への転移圧力や温度は出発試料の結晶構造に依存することから (Kubo et al. 2012; Bläß 2013)、月面における衝突過程の詳細を明らかにするためには種々のシリカ多形に対する高圧実験が必須である。

本研究では、産状を異にする月隕石 (斜長岩質礫岩、玄武岩および、斑れい岩質礫岩) を対象としたラマン分光分析、透過型および走査型電子顕微鏡観察ならびに X 線回折分析からシリカ鉱物の同定ならびに記載を行い、高圧実験の結果と比較することで、月面におけるシリカ鉱物の形成過程の解明ならびに各隕石が被った衝撃変成作用の圧力および温度条件の推定を行う。

キーワード: 月隕石, シリカ多形, 高圧鉱物, 天体衝突, 衝突実験, 静的圧縮実験

Keywords: Lunar meteorite, Silica polymorph, High-pressure mineral, Collision, Shock experiment, Static compression experiment

Discovery of stishovite in an Apollo 15 sample and impact record on the Moon Discovery of stishovite in an Apollo 15 sample and impact record on the Moon

金子 詳平¹; 大谷 栄治^{1*}; 宮原 正明²; 小沢 信¹; 荒井 朋子³
KANEKO, Shohei¹; OHTANI, Eiji^{1*}; MIYAHARA, Masaaki²; OZAWA, Shin¹; ARAI, Tomoko³

¹ 東北大学, ² 広島大学, ³ 千葉工業大学

¹Tohoku University, ²Hiroshima University, ³Chiba Institute of Technology

Thick regolith layers and many craters on the Moon indicate that the Moon has been heavily bombarded after the lunar formation. Short time intervals of high-pressure and high-temperature occurred on the lunar surface during the collision of asteroids on the Moon, and the constituent minerals of the Moon and asteroids transformed into high-pressure polymorphs during the high-pressure and high-temperature conditions. Although many brecciated lunar rocks have been recovered by the Apollo missions, any high-pressure polymorph has not been observed in Apollo samples so far. Silica is one of constituent minerals of terrestrial planets and asteroid. We investigated a lunar regolith collected by the Apollo 15 mission with a special interest on silica, because high-pressure polymorphs of silica are recently reported from shocked lunar meteorites (Ohtani et al., 2011; Miyahara et al., 2013). Here, we show stark evidence for stishovite from a sample collected by the Apollo 15 mission. X-ray diffraction analysis and transmission electron microscopic observations clearly confirmed the existence of a high-pressure polymorph of silica, stishovite, in the Apollo sample, which suggests that the lunar regolith preserves records of early shock events. Considering radio-isotope ages, lithologies, and shock features, stishovite was formed by an impact event in the near side Moon ca. 3.8-4.1 Ga ago.

キーワード: スイテイシヨバイト, アポロミッション, 衝突, 高温高圧, 月試料

Keywords: Stishovite, Apollo mission, Impact, High pressure and temperature, Lunar sample

高圧下でのシリカおよび斜長石の非平衡相転移に基づく隕石の衝撃条件の制約 Experimental constraints on shock conditions of meteorites based on non-equilibrium behaviors of silica and plagioclase

久保 友明^{1*}; 河野 真利¹; 加藤 工¹
KUBO, Tomoaki^{1*}; KONO, Mari¹; KATO, Takumi¹

¹九州大理地球惑星

¹Dept. Earth Plant. Sci., Kyushu Univ.

Recent studies on shocked meteorites have revealed non-equilibrium behaviors of silica and plagioclase at high pressures. We focus on the following three points observed in meteorites to deduce the P-T-t shock conditions from high-pressure kinetic experiments. 1) The formation of seifertite as a high-pressure polymorph of silica, 2) The occurrence of jadeite from plagioclase that does not contain stishovite, 3) The formation of lingunite as a high-pressure polymorph of albite-rich plagioclase.

Seifertite is a polymorph of silica with alpha-PbO₂ type structure that was found in shocked Martian and lunar meteorites (e.g., Sharp et al., Science1999; Miyahara et al., PNAS2013). Although this phase is thermodynamically stable at more than 90 GPa corresponding to the base of the lower mantle (Murakami et al., GRL2003), it has also been known that it metastably appears from cristobalite at around more than 40 GPa and room temperature (Dubrovinsky et al., CPL2001). We have carried out high-pressure and high-temperature in-situ XRD experiments of cristobalite using a Kawai-type multi-anvil (KMA) apparatus, and determined the formation kinetics of metastable seifertite and the following stable phase of stishovite. Because the activation energy for the seifertite formation is very low (~10 kJ/mol), which is consistent with the recently proposed formation mechanism (Blab, PCM2013), it can metastably appear at low T conditions beyond the negative PT boundary from ~10 GPa and 400C to ~30 GPa and room T. We found the clear difference in the formation kinetics between seifertite and stishovite, which enables to estimate the P-T-t shock conditions from the coexistence of these phases in various ratios in meteorites.

The occurrence of jadeite from plagioclase that does not contain stishovite has been often reported in shocked meteorites (e.g., Kimura et al., MAPS2000). In-situ XRD study using KMA apparatus have revealed that jadeite forms first from (amorphous) plagioclase, whereas the nucleation of other minerals such as stishovite or garnet is significantly delayed (Kubo et al., NGE02010). The missing stishovite problem can be explained owing to the differences in crystallization kinetics of high-pressure phases from plagioclase. The hybrid shock indicator combining these non-equilibrium behaviors of silica and plagioclase mentioned above consistently and strongly constrains the P-T-t shock conditions of Martian meteorites.

The formation of lingunite (albite-rich hollandite) in shocked meteorites (e.g., Gillet et al., Science2000; Tomioka et al., GRL2000) has remained unsolved. This phase appears in laser-heated diamond anvil cell (LHDAC) experiments as a minor phase at around ~20-24 GPa and ~1000C (Liu, PEPI1978) and ~2000C (Tutti, PEPI07). However, KMA experiments indicate that the maximum solubility of NaAlSi₃O₈ component in hollandite structure is limited to ~50 mol% (Yagi et al., 1994, Liu, 2006). This clear contradiction may be due to the non-equilibrium origin. It has been suggested that the rapid T quenching in LHDAC experiments is important for the survival of lingunite metastably to the ambient condition. Our previous in-situ XRD study using KMA apparatus have indicated that lingunite is not formed at least ~1200C at these pressure conditions (Kubo et al., NGE02010). We are also preliminarily conducting some LHDAC experiments, however we have not observed lingunite at least ~1400C. Further studies on the formation process of lingunite are needed to solve this problem, which may lead to construct another P-T-t shock indicator.

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¹; 中村 昭子^{1*}; 鈴木 絢子²; 長谷川 直²
NAGAOKA, Hiroki¹; NAKAMURA, Akiko^{1*}; SUZUKI, Ayako²; HASEGAWA, Sunao²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Institute 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熔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。弾丸破片の熔融は、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^{1*}; 寺田 健太郎¹; 日高 洋²; 木村 光佑²; Skublov Sergey³
KAMIOKA, Moe^{1*}; TERADA, Kentaro¹; HIDAKA, Hiroshi²; KIMURA, Kosuke²; SKUBLOV, Sergey³

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

¹Osaka University, Department of Earth and Space Science, ²Graduate school of Science, Hiroshima University, ³Institute 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¹; 野口 高明^{1*}; 木村 眞¹; 山口 亮²
TAKAGI, Yasunari¹; NOGUUCHI, Takaaki^{1*}; KIMURA, Makoto¹; YAMAGUCHI, Akira²

¹茨城大学, ²国立極地研究所

¹Ibaraki University, ²National 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 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 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 Fe³⁺ 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¹; 木村 眞^{1*}; 野口 高明¹
KAWASAKI, Takehiro¹; KIMURA, Makoto^{1*}; NOGUCHI, Takaaki¹

¹ 茨城大学理学部
¹ 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 μm 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^{1*}; 日高 洋¹; 米田 成一²
SERA, Kohei^{1*}; HIDAKA, Hiroshi¹; YONEDA, Shigekazu²

¹ 広島大学大学院地球惑星システム学専攻, ² 国立科学博物館理工学研究部

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, ²National 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¹³⁸Ce, ¹⁴²Nd, ¹⁴³Nd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¹⁴⁹Sm-¹⁵⁰Smおよび¹⁵⁷Gd-¹⁵⁸Gd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⁸⁷Rb-⁸⁷Sr, ¹³⁵Cs-¹³⁵Ba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。¹³⁸Ce同位体比では4つ、¹⁴²Nd, ¹⁴³Nd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。⁸⁷Rb-⁸⁷Sr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¹³⁵Ba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¹³⁵Cs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⁸⁷Rb-⁸⁷Sr壊変系に基づく年代学的データと¹³⁸La-¹³⁸Ce, ¹⁴⁶Sm-¹⁴²Nd, ¹⁴⁷Sm-¹⁴³Nd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^{1*}; 久保 友明¹; 加藤 工¹; 近藤 忠²
KONO, Mari^{1*}; KUBO, Tomoaki¹; KATO, Takumi¹; KONDO, Tadashi²

¹九州大学・理, ²大阪大学・理

¹Kyushu Univ., ²Osaka 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 (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 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