隕石中の鉱物：序説

Introduction to Meteorite Mineralogy

木村 眞 (Makoto KIMURA)*

Minerals in meteorites give constraints on the formation history of not only meteorites, but the solar system. Here I introduce some characteristic minerals in meteorites. Enstatite chondrites contain abundant unusual sulfide and metallic minerals that were formed under highly reducing conditions. Refractory inclusions were formed in the earliest stage of the solar system. They typically contain Ca-Al-rich minerals. A new mineral, kushiroite, is one of such minerals, and formed under rapid crystallization conditions. Ultrahigh-pressure minerals are commonly encountered both in chondrites and differentiated meteorites, indicative of pervasive impact processes in the early solar system. An eclogitic mineral assemblage encountered in a CR chondrite suggests the possibility that asteroids were primarily larger than previously estimated.

Keywords: Meteorite, New mineral, Enstatite chondrite, Refractory inclusion, High-pressure mineral

I. はじめに

隕石はわれわれが手にしうる地球外物質の中では最も多量に入手できるものであり、岩石・鉱物学的特徴や起源といった点でも多様性に富んでいる。そのため、月、小惑星、彗星などからの試料が探査機により回収されるようになった現在でも太陽系初期や惑星の進化・内部構造に関する情報を得るために最も重要な試料となっている。

隕石はこのようにさまざまな惑星科学的意義を有する物質であり、化学、物理学、岩石鉱物学などさまざまなアプローチにより研究されてきた。そしてこれらのデータを総合して隕石から太陽系初期の様相が明らかになってきた。一方、隕石も地球の岩石同様、種々の鉱物の集合体であり、各々の構成鉱物は形成環境、形成条件などに関する様々な情報を与えてくれる。また数々の新鉱物も隕石から発見されてきた。このように隕石の研究は鉱物学的にも意義がある。

筆者は長年記載鉱物学的立場から隕石の研究を行ってきた。今回思いがけず、日本鉱物科学会賞を戴いたので、これを機会に筆者及び共同研究者が行った研究をもとに、隕石の鉱物学的意義の一端を紹介していきたい。

II. 隕石の分類と主要鉱物

隕石は始源的隕石(コンドライト)と分化隕石の二種に大別される。両者は化学的、及び岩石鉱物学的な特徴からさらに多くのグループに細分されている。隕石の最新の分類体系については Weisberg *et al.* (2006)を参照されたい。コンドライトは天体上で大規模な溶融・分化作用を経ているものであり、分化隕石は原則としてこれらの作用を経ているもののことである。両者の中間的なものも存在する。コンドライトはさらに熱変成作用や水質変成作用の程度により岩石学的タイプ 1-6 に区分される。

いずれにしても隕石は全て、珪酸塩鉱物、酸化鉱物、元素鉱物、硫化鉱物などからなっている。これらの鉱物に関して初めて総説を発表したのは都城(1966)である。その後、Mason (1967, 1972), 木村(1996), Rubin (1997)によっても総説が公表されている。これらの総説に含まれている隕石鉱物種の数は一途を追うごとに増加の一途をたどっている。都城(1966)は 45 種の鉱物を紹介した。木村(1996)は 200 種の鉱物を報告している。しかし、その数はさらに増加し、著者が調べたところ、2014 年 12 月の時点で 340 種以上の鉱物が報告されている。実際には著者の数え漏れもあり、これ以上の鉱物種が隕石には含まれているものと考えられるが、近年の鉱物種の増加は著しい。これは詳細な

隕石研究が進むと同時に新しい分析機器の導入により多くの細粒鉱物が同定されるようになってきたことによる。一方、後述のように微細鉱物が新鉱物として認められるようになったことも重要な要因となっている。

しかしながら、隕石に含まれる鉱物種は IMA で認められている 5000 近い全鉱物種に比べてみると圧倒的に少ないことがわかる。これは隕石が地球などと異なって、形成以降、長期間にわたる天体内部や表面における分化などの様々な作用を経っていないことに起因する。隕石の火成作用や変成・変質作用はほとんどの場合太陽系初期に終わってしまっている。なお地球や太陽系の進化と鉱物種の変遷との関係については Hazen *et al.* (2008) に興味深い総説があるので参照されたい。

隕石の中でも特にコンドライトは全岩化学組成が太陽系元素存在度に近く、その意味でも始源的で分化していないものである。そのため O, Mg, Si, Fe が主要元素であり、カンラン石、低カルシウム輝石、Fe-Ni 金属が最も主要な鉱物となっている。分化隕石でもカルシウム輝石、斜長石がこれに加わる程度である。このように隕石中の鉱物は種類という点では地球の岩石に比べて多様性に乏しい。

しかしながら、隕石中にはその独特の形成環境を反映する特異な鉱物が産する場合が多々ある。これらの鉱物を研究することによって、それらを含む隕石の形成環境が推定される。以下ではこのような特異な鉱物に絞って概説する。取り上げるものはエンスタタイト・コンドライト中の還元環境を示す鉱物、太陽系最初期に形成された難揮発性包有物中の鉱物、及び衝撃作用などにより生じた高压鉱物である。

このように本総説は隕石鉱物全体の紹介というよりも一部の特徴的なものを紹介するものである。その意味で、「序説」と御理解戴きたい。

III. エンスタタイト・コンドライト中の鉱物

1. エンスタタイト・コンドライト概説

エンスタタイト・コンドライトはコンドライトの中の一グループであるが、普通コンドライトや炭素質コンドライトと比べ発見数は少ない。しかしながら、このグループの隕石は他のコンドライトには見られない 2 つの顕著な特徴がある。まず、珪酸塩鉱物部分の全岩化学組成がノルム・シリカを含み輝石が最も主要な鉱物であることである。つまり他のコンドライトと異なって、カンラン石が化学組成上含まれない。これは母天体への集積以前に起こった化学的分別によると考えられている。2 つめの特徴は非常に還元的な環境下で形成された点である。隕石の多くは Fe-Ni 金属を含み、地球の地殻やマントルより還元的環境下で生じたと考えられているが、カンラン石や輝石は Fe^{2+} 成分を含むことが普通である。一方、エンスタタイト・コンドライト中の輝石はほとんどの場合 Fe^{2+} を含まないエンスタタイト(単斜ないし斜方)である。なおエンスタタイト・

コンドライトの詳細な岩石鉱物学的特徴、同位体組成、形成過程などに関しては Weisberg and Kimura (2012) の総説を参照されたい。

2. 珪酸塩鉱物

エンスタタイト・コンドライト中の主な珪酸塩鉱物はエンスタタイトに加えてシリカ鉱物、斜長石であるが、上述のようにエンスタタイトはほぼ Fe^{2+} を含まず、組成の変動に極めて乏しい。斜長石もアルバイト成分に富み組成はほぼ均一である。このようにエンスタタイト・コンドライトは他の隕石と異なって固溶体をなす珪酸塩鉱物から熱履歴に関する情報を得ることは難しい。

それにかわって重要な知見を与えてくれる珪酸塩鉱物はシリカ鉱物(相)である (Fig. 1)。石英、トリディマイト、クリストバライト、さらにシリカガラスが同定されている (Kimura *et al.*, 2005)。トリディマイト、クリストバライトの存在はエンスタタイト・コンドライトの形成の場が低圧条件下であったことを示唆する。一方、最近エンスタタイト・コンドライトから初めてコーサイトが同定された (Kimura *et al.*, 2014)。この意義については高压鉱物のところでふれる。

いずれにせよ上記のシリカ相の多様性はエンスタタイト・コンドライトの岩石学的タイプと明瞭な相関がある。タイプ 3 が最も始源的なものとされるが、エンスタタイト・コンドライトの場合ではコンドルール中にトリディマイト、クリストバライト、シリカガラスが含まれる。タイプ 3 中のコンドルールの多くも全岩組成の上でノルム・シリカを含み、コンドルール形成の高温条件下でトリディマイト、クリストバライトが晶出する。そして母天体集積後は熱変成作用をほとんど被らなかったことがこれらの相の存在から推定できる。一方、熱変成作用を受けたタイプ 4 以上のエンスタタイト・コンドライトでは石英が含まれる。これらのタイプのものはサブソリダス温度で熱変成作

Fig. 1. A chondrule in A10164 (EH3), consisting of enstatite (En), cristobalite (Cri), and mesostasis glass (Gla). Back-scattered electron (BSE) image.

用を被っているとされるが、石英の存在はそれと一致する。またコンドライトには衝撃作用により溶融したものもあるが、エンスタタイト・コンドライトでは溶融したものにはトリディマイト、クリストバライトが含まれ、ソリダス以上での溶融とそれに引き続く急冷の熱履歴が復元できる。一方、他の種類のコンドライトではシリカ鉱物はまれにしか含まれず、熱変成作用の物理条件などは輝石固溶体などを用いて推定されている。

3. 不透明鉱物

隕石中には不透明鉱物が通常含まれる。Fe-Ni 金属、トロイライト、クロマイトが代表的なものである。一方、エンスタタイト・コンドライトの場合は極端な還元環境を反映して数多くの特異な不透明鉱物が産する。Table 1 は代表的なものを Weisberg and Kimura (2012) から抜き出したものである。ケイ化物、窒化物に加えて、Na, Mg, K, Ca, Cr といった通常親石性を示す元素を含む硫化物もエンスタタイト・コンドライトには産する。これらの鉱物の中には niningerite (MgS) のように地球では未発見の鉱物も含まれている。

上述のように隕石には Fe-Ni 金属は普遍的に産するが、エンスタタイト・コンドライトの場合は Fe-Ni 金属が 0.5–3.5 wt% 程度の Si を含むことが特徴である。これも還元環境を反映している。トロイライトが親石元素である Ti, Cr を含むことも同様に還元環境を示している。Djerfsherite $[(K,Na)_6(Cu,Fe,Ni)_{25}S_{26}Cl]$, caswellsilverite $(NaCrS_2)$ のように Na, K を含む硫化鉱物もしばしば産する (Fig. 2)。他のコンドライトでは普遍的に産するクロマ

イトに代わって、エンスタタイト・コンドライトでは daubreelite $(FeCr_2S_4)$ が産する。

さらにエンスタタイト・コンドライトを代表する鉱物の一つが FeS-MnS-MgS 系の鉱物である (Fig. 3)。この系には keilite, alabandite, niningerite が含まれる。これらの鉱物は互いに固溶体を成し、その組成を解析することにより、エンスタタイト・コンドライトの場合には輝石に代わって、熱履歴の推定を行うことができる。例えば Lin and El Goresy (2002) は母天体で熱変成作用をほぼ被っていないタイプ 3 のエンスタタイト・コンドライト中に正、逆の両方のゾーニングを示す niningerite が存在していることから、様々な熱履歴のものが混合して母天体を形成したことを示唆した。また Kimura *et al.* (2014) は衝撃変成作用時の温度をこの鉱物から推定し、750 °C 以上に達していたことを示した。Keilite は高温で Fe を多く含むように

Fig. 2. A djerfsherite (Dje) grain in ALHA77156 (EH3). This grain is partly subjected to breakdown reaction (Qingzhen reaction). Other opaque minerals are Fe-Ni metal (Met) and troilite (Tro). Width of 350 μ m. Reflected light photomicrograph.

Table 1. Characteristic minerals in enstatite chondrites

Name	Formula
Alabandite	MnS
Caswellsilverite	$NaCrS_2$
Daubreelite	$FeCr_2S_4$
Djerfsherite	$(K,Na)_6(Cu,Fe,Ni)_{25}S_{26}Cl$
Fluorophlogopite	$KMg_3AlSi_3O_{10}F_2$
Fluorrichterite	$Na_2CaMg_5Si_8O_{22}F_2$
Graphite	C
Heideite	$(Fe,Cr)_{1+x}(Ti,Fe)_2S_4$
Keilite	$(Fe,Mg,Mn)S$
Nierite	Si_3N_4
Niningerite	MgS
Oldhamite	CaS
Osbornite	TiN
Perryite	$(Ni,Fe)_8(Si,P)_3$
Roedderite	$(K,Na)_2Mg_5Si_{12}O_{30}$
Rudashevskyite	$(Fe,Zn)S$
Schreibersite	$(Fe,Ni)_3P$
Sinoite	Si_2N_2O
Sphalerite	$(Zn,Fe)S$
Wassonite	TiS

Fig. 3. An opaque nodule in A10164 (EH3), consisting of niningerite (Nin), Fe-Ni metal (Met), and troilite (Tro). Fine spherules within niningerite are schreibersite. BSE image.

なった鉱物であるが、これらは主に、衝撃溶融過程を経たエンスタタイト・コンドライトから発見されている(Keil, 2007)。

いずれにせよこれらの鉱物は還元環境(加えて硫黄分圧も高かった)で生成したものである。Fogel (1997)による定量的見積もりによると、IW と Si-SiO₂ の中間付近の酸素分圧であったとされる。

IV. 難揮発性包有物中の鉱物

1. 難揮発性包有物概説

コンドライトはその名の由来となったコンドルールに加えて、マトリックス、鉱物片からなる一種の礫岩であるが、多くの炭素質コンドライトにはさらに難揮発性包有物と呼ばれる特異な構成物質が含まれる(Fig. 4)。これは他の種類のコンドライトにもわずかに含まれることがあるが(Lin *et al.*, 2006)、炭素質コンドライトに特徴的に含まれる(Weisberg *et al.*, 2006)。なお炭素質コンドライトの代表例がAllende隕石であるが、その構成物質などについては木村・野口(2013)などを参照されたい。

さて難揮発性包有物はその名のとおりにCa, Al, Ti, Zr, REE, 白金族元素などの難揮発性元素に富む構成物質である。これらは太陽系元素存在度組成のガスからの凝縮温度が最も高い一群の元素である。一方、凝縮温度が相対的に低いSiには乏しい。難揮発性包有物で特にCa, Alなどの元素に富むものはCa-Al-rich inclusion (CAI)とも呼ばれている。ただし難揮発性包有物の中にはカンラン石に富むものもあり、全てがCAIと言うわけでは無い。

いずれにせよ主要構成鉱物は上記の化学組成を反映してスピネル、メリライト、ペロプスカイト、Ca-Al輝石、アノーサイト等である。さらに包有物によってはヒボナイト、グロッサイト、コランダム、白金族元素鉱物などが含まれる。これらの構成鉱物の量比はさまざまで、それによりいくつかの種類に分類されている(MacPherson, 2005)。

Fig. 4. A refractory inclusion in Y-82094 (Ungrouped carbonaceous chondrite), consisting of melilite (Mel), Ca-rich pyroxene (Cpx), and spinel (Spi). BSE image.

これらの鉱物は平衡凝縮説によれば太陽系元素存在度のガスから最初期かつ最高温段階で凝縮する鉱物と考えられている(Ebel, 2006)。つまり難揮発性包有物はまさに太陽系最初期の物質とすることになるが、この点は年代測定の結果からも支持される(Kita *et al.*, 2005)。

こうして難揮発性包有物を構成する鉱物は太陽系最初期に関する貴重な情報をもたらすことが期待されると同時に、化学組成的にも独特のことが多い。特に近年、多くの鉱物種が発見されている。これは難揮発性包有物が上記のような意義を有することから多くの研究者によって集中的に調べられてきたことに加えて、最近ではミクロン(あるいはナノ)スケールの微少鉱物がさまざまな技術や装置の進歩により同定されるようになったことが大きな理由である。また、これらの微少鉱物の中には新鉱物として認められるようになったものも多い。その代表的なものをTable 2に示す。これらの鉱物もCa, Al, Ti, Sc, Zrなどの難揮発性元素を主要成分としているものである。

2. クシロアイト

われわれも難揮発性包有物から重要な新鉱物を発見しているので、それを紹介しよう(Kimura *et al.*, 2009)。Figure 5は炭素質コンドライトのCHグループに属するALH 85085中の一つの難揮発性包有物を示す。グロッサイト(CaAl₄O₇)を取り囲んでいる鉱物は分析によれば、~30 wt %, SiO₂; ~40%, Al₂O₃; 1-2%, MgO; ~25%, CaO からなり、既知のどの鉱物とも一致しない組成を示す。しかし、この組成は輝石の仮想成分であるCa-tschermak (CaAlAlSiO₆)成分とほぼ一致するものである。また、この鉱物を電子線後方散乱回折法(EBSD)で分析したとこ

Table 2. Representative new minerals in refractory inclusion

Name	Formula	References
Hutcheonite	Ca ₃ Ti ₂ (SiAl ₂)O ₁₂	(1)
Panguite	(Ti ⁴⁺ , Al, Sc, Mg, Zr, Ca, □) ₂ O ₃	(2)
Eringite	Ca ₃ (Sc, Y, Ti) ₂ Si ₃ O ₁₂	(2)
Kangite	(Sc, Ti, Al, Zr, Mg, Ca, □) ₂ O ₃	(2)
Brearleyite	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₂ Cl ₂	(3)
Lakargiite	CaZrO ₃	(3)
Krotite	CaAl ₂ O ₄	(3)
Kushiroite	CaAlAlSiO ₆	(4)
Grossmanite	CaTi ³⁺ AlSiO ₆	(5)
Davisite	CaScAlSiO ₆	(5)
Dmitryivanovite	CaAl ₂ O ₄	(6)
Allendeite	Sc ₄ Zr ₃ O ₁₂	(7)

- (1) Ma and Krot, 2014
- (2) Ma *et al.*, 2012
- (3) Ma *et al.*, 2011
- (4) Kimura *et al.*, 2009
- (5) Ma and Rossman, 2009
- (6) Mikouchi *et al.*, 2009
- (7) Ma *et al.*, 2014

ろ、合成 Ca-tschermak 相 (C2/c) のパターンと一致した。

この Ca-tschermak 成分は輝石の仮想成分の中では最も重要なものの一つとして以前から知られていたものであるが、鉱物としては同定されていなかった。われわれが発見したものは写真に示すように細粒で、光学特性などの物性を明らかにすることは困難であったが、久城育夫先生のご理解を得て、クシロアイトとして IMA に申請したところ新鉱物として認められた。この命名は Kushiro (1962) によりこの成分の岩石鉱物学上の重要性が指摘されていたことや、久城先生の岩石鉱物学に対する多大な貢献に因んでいる。なお Table 2 に示したように、他の輝石グループの新鉱物も難揮発性包有物から発見されている。

この新鉱物の発見は輝石の分類学という点でも重要であると考えている。一般に diopside には Al が固溶し、Al の多い輝石は伝統的にファッサイトと呼ばれてきた。しかし、この名称は不適であることが Morimoto *et al.* (1988) により指摘され、代わって aluminian diopside と呼ぶことが提唱されていた。しかし、クシロアイトが発見されたことにより、 CaAlAlSiO_6 成分が 50% を越えるものはクシロアイトと呼ぶべきであることとなった。この鉱物は現時点では炭素質コンドライトのみから発見されているが、今後他の惑星物質からも発見が期待される。

一方、この鉱物の発見は難揮発性包有物の形成過程にも制約を与えるものである。 CaAlAlSiO_6 成分は常圧では不安定であることが知られている (Hays, 1966)。しかしながら、クシロアイトを含んだ難揮発性包有物は高压環境を経た形跡が認められない。一方、冷却実験によればこの成分を多く含んだ相が晶出することが知られていた (Beckett and Stolper, 1994)。この点を考慮すると、クシロアイトは溶融・急冷過程を経た難揮発性包有物中で生成したものと思われる。またその化学組成と共生鉱物 (グロッサイト) からこの難揮発性包有物の生成の場は Ca, Al などに富み、Si に乏しい環境であったことになる。これは上記の難揮

発性包有物中の鉱物形成の場とも一致する。このようにこの新鉱物の発見は単に輝石の重要な成分を含んだものの発見という意義にとどまらず、隕石の形成条件を明らかにするためにも重要である。このことは他の(新)鉱物についても同様である。

V. 高压 鉱 物

1. 概要

火星や月起源の少数のものを除くと、ほとんどの隕石は小惑星に由来すると考えられている。後述のように小惑星はサイズが小さく、内部は高压には達していない。しかしながら、隕石には高压条件下で生成したと思われる鉱物がしばしば認められる。ここではこれらの鉱物を紹介する。

2. 衝撃作用に伴う超高压鉱物

コンドライトにはしばしば衝撃ベインと呼ばれる一般にミリメートル以下の幅の暗色の脈状組織が認められる (Fig. 6)。またコンドライトや分化隕石には不規則形から楕円形のメルトポケットと呼ばれるものが含まれることがある。このような部分からしばしば超高压鉱物が認められる。リングウッドイト、ワズレアイト、メジャーライト、ジェーダイトなどである (Fig. 7)。Table 3 はそのような鉱物の代表的なものを示す。なおこれらの鉱物の産状や結晶学的特徴、形成過程に関しては富岡・木村 (2011) や宮原・富岡 (2012)、Gillet and El Goresy (2013) の総説を参照されたい。また森 (1994) はこれらの超高压鉱物に関して重要な先駆的研究を行っている。

これらの鉱物の多くは超高压下で安定なものであり、超高压実験により地球の遷移層や下部マントルに存在が予想されていたものである。ダイヤモンド中の包有物を除くと、地球深部起源の鉱物が採集されていないわけであり、隕石から実際の超高压鉱物が発見されたことは重要な意義を持っている。隕石中のベインにおいてこれらの鉱物は相平衡図で予想される鉱物組合せで産することが多くの場合認められる。そのため生成時の圧力としては相平衡図を用

Fig. 5. Kushiroite (Kus), encountered with grossite (Gro) in a refractory inclusion of ALH 85085 (CH). BSE image.

Fig. 6. Shock vein in NWA 4719 (L6), shown by white arrows. Width of 9 mm. Transmitted light photomicrograph.

Fig. 7. Shock vein in NWA 4719 (L6), consisting of ringwoodite (Rw), akimotoite (Aki), lingunite (Lin), and pyroxene glass (PxGl), among fine-grained matrix (mostly majorite garnet). The host comprises ortho pyroxene (Opx) and olivine (Ol). Pyroxene glass was decomposed phase from bridgmanite. BSE image.

Table 3. Representative high-pressure minerals in meteorites

Low-P phases	High-P phases	Representative references
Olivine	Wadsleyite	Price et al (1983)
	Ringwoodite	Binns et al. (1969)
	Ahrens site	Tschauner et al. (2014)
Low-Ca Pyroxene	Majorite (ss)	Smith & Mason (1970)
	Akimotoite	Tomioka & Fujino
	Bridgmanite	Tschauner et al. (2014)
Diopside	Magnesiowüstite	Chen et al. (1996)
	Majorite + Ca-Perovskite	Tomioka & Kimura (2003)
Plagioclase	Jadeite	Kimura et al. (2000)
	Lingunite	Gillet et al. (2000)
Quartz/ Tridymite/ Cristobalite	Coesite	Weisberg & Kimura (2010)
	Stishovite	Ohtani et al. (2010)
	Seifertite	El Goresy et al. (2000)
Chromite	Xieite	Chen et al. (2003)
Whitlockite	Tuite	Xie et al. (2003)

いて 18–23 GPa 程度と推定されている (Ohtani *et al.*, 2004 など)。

しかしながら、平衡過程では説明できないものもある。例えば、普通コンドライトでは Ab_{80-90} 程度の斜長石がジェーダイトに転移していることがしばしば認められるが、共存するはずのシリカ相が確認されない (Kimura *et al.*, 2000)。この問題は Kubo *et al.* (2010) により解決された。彼らはアルバイトを出発物質として超高圧条件下で晶出する相を時間、温度、圧力を変えて実験した。その結

果、ジェーダイトに比べてシリカ相ははるかに形成に時間がかかることが明らかとなった。このためベイン内ではアルバイト組成相からジェーダイトのみの晶出しが認められないことになる。このことは後に Miyahara *et al.* (2013) により実際の試料でも確認された。以上の結果はベインの形成の解明には平衡過程と速度論の両方が必要であることを示唆している。

いずれにせよ、ベイン中の超高圧鉱物は高い圧力条件下で生じるが、隕石の母天体の直径は 100–200 km 程度と推定されている (Bennett and McSween, 1996 など)。実際、現在知られている最大の小惑星でも直径が約 950 km である。従って、ベイン中の超高圧鉱物は、小惑星あるいは隕石母天体内の静水圧条件下では決して形成されなかったと考えられる。一方、隕石が地球表面に落下するときに大きな衝撃圧力が発生することが期待される。実際、コーサイト、スティショバイトが地球の隕石クレーターから発見されている。しかしながら、Kimura *et al.* (2004) はベインが溶融皮殻 (隕石が大気圏通過時に溶融して生じたもの) により切断されている部分を観察し、溶融皮殻付近のみで超高圧鉱物が低圧鉱物に転移していることを発見した。大気圏通過時に低圧条件下で高温にさらされて、この転移が起こったものである。従って、ベイン中の超高圧鉱物がもとも地球大気圏突入以前に形成されていたことは明らかである。以上により、超高圧鉱物が形成されたのは天体同士の高速度衝突によると結論される。Ohtani *et al.* (2004) はリングウッドイト・ラメラの成長から 10 km 以上の天体が 2 km/s 程度の高速度で衝突した際に、20 GPa 程度の圧力が 4 秒ほど持続し、この間に超高圧鉱物が生じたことを指摘した。このように隕石中の超高圧鉱物は激しい天体衝突の結果によるものである。

ところで、Table 4 はこれまでに発見された超高圧鉱物がどのような隕石に認められたかを示している。多くの分化隕石や代表的コンドライト・グループのすべてが含まれている。上述のエンスタタイト・コンドライトから初めて発見されたコーサイトもこのような衝撃変成作用の結果生じたものである。隕石は太陽系内の様々な場所で生じたと考えられており、超高圧鉱物の広い産出は天体同士の高速度衝突が太陽系で普遍的に起こっていたことを強く示唆している。その時期は太陽系初期と考えられているが、明確な年代測定結果はまだ無い。この問題は太陽系初期の天体進化や星雲ガスの散逸の問題とも関係しており、極めて重要な課題と考えられる。今後の解明が待たれる。

3. エクロジャイト的クラスト

以上紹介した「超高圧鉱物」は天体衝突という隕石特有の現象により生じたものであるが、一般に隕石には地球の広域変成岩のような「高圧鉱物」は含まれない。これは天体のサイズが小さく、内部の圧力が低かったことを反映している (水などの揮発性成分の含有量も隕石は一般に地球の岩石よりはるかに少ないことも関係するが)。従って、

Table 4. Occurrence of representative high-pressure minerals in meteorites

High-P phases	Chondrites			Differentiated meteorites			
	Enstatite	Ordinary	Carbonaceous	HED	Moon	Mars	Iron
	EH	H / L / LL	CB				
Wadsleyite		+	+		+	+	
Ringwoodite		+			+	+	
Ahrensite		+				+	
Majorite (ss)		+	+			+	
Akimotoite		+				+	
Bridgmanite		+					
Magnesiowüstite		+				+	
Ca-Perovskite		+				+	
Jadeite		+					
Lingunite		+					
Coesite	+		+	+	+		
Stishovite				+	+	+	+
Seifertite					+	+	
Representative references	Kimura et al.(2014)	Chen et al. (1996); Ohtani et al. (2004); Miyahara et al. (2008)	Weisberg and Kimura (2010)	Miyahara et al. (2014)	Ohtani et al. (2010)	El Goresy et al. (2013)	Holtstam et al. (2003)

そのような変成鉱物の存在は予想もされなかったわけであるが、それを一変させるような発見を最近われわれが行ったので、それについても紹介する (Kimura *et al.*, 2013)。

Figure 8 は NWA 801 という CR グループに属する炭素質コンドライト中に含まれているクラスト(岩片)である。このクラストの最も主要な構成鉱物はカンラン石、斜方輝石であるが、さらにザクロ石、オンファサイトが含まれる。ザクロ石はパイロプ-アルマンディン系のものである。オンファサイトはエンスタタイト-フェロシライト成分を含むが、ジェーダイト-ディオブサイドの中間組成のもので、EBSD 分析によれば C2/c の空間群を示す高温多形のものと同定された。こうしてこのクラストの鉱物組合せはエクロジャイト的なものということになるが、このような組合せは全隕石種の中でも初めての発見であった。

このクラストの構成鉱物に地質温度圧力計を適用したところ、950–1100 °C で 3–4 GPa の条件が得られた。この圧力はクラストに含まれるグラファイトの存在とも一致する。これ以上の圧力ではダイヤモンドが生じるからである。さて問題はこの圧力である。すぐ思いつくのは衝撃作用である。ただ、粒径が 40 μm にも達しており、衝撃ベイン中のものとは比べものにならない程度の大きさである。鉱物の産状もベインのものとは全く異なっている。また最近の Hiyaogon *et al.* (公表準備中) の研究では鉱物組成と酸素同位体組成の変動を満足するためには秒単位ではなく、年単位の高圧、高温持続時間が必要であることが推定されている。従って、衝撃作用と言うよりは、大きな天体内部で形成された可能性が高い。ただこの推定圧力を実現するためには半径が ~ 1500 km にもなるような大きな天体を必要とする。上述したように現在の小惑星帯にはこのような天体は存在しない。従って、もし大きな天体内部で生

Fig. 8. An eclogitic clast in NWA801 (CR). The boundary between the clast and matrix and chondrules is shown by white arrows. BSE image.

じたとするならば、太陽系の最初期には従来予想されていたものよりもはるかに大きな天体が生じ、短時間で破碎されるような現象があったことを示すわけで、惑星科学的にも大変重要な問題を含んでいると思われる。このようなクラストや鉱物組合せのものが他の隕石には含まれないかどうか、今後の研究が待たれる。

VI. おわりに

以上のように隕石中の鉱物は隕石の形成過程や生成環境の理解にとって必須の情報を与えてくれる。無論、今回示したものはほんの一例であることは言うまでも無い。いずれにせよ、今後さらに微細鉱物を含め多くの鉱物が記載、研究され隕石に関する情報、ひいては太陽系初期の過程の理解が進むことを期待している。しかしながら、この目的

のためには鉱物学的研究のデータのみでは当然不十分である。化学組成や同位体組成などのデータも隕石の研究には不可欠で、両者の情報を統合して隕石の持つ惑星科学的意義が検討できよう。しかし現在では一人の研究者が全ての結果を出すことは不可能である。これに関しては共同研究として遂行することが必須である。このような研究例として Ushikubo *et al.* (2012), Miura *et al.* (2014) をあげておきたい。

謝 辞 日本鉱物科学会賞の受賞に当たっては永原裕子氏、粗稿に関しては野口高明氏、中村美千彦氏に大変お世話になった。また筆者がこれまで研究を続けられてきたこと、及び今回受賞させて戴いたことは国内外の多くの方々との共同研究の賜物と思っている。以下にお名前を記させて頂き、謝辞とさせて戴きたい(敬称略、順不同): 八木健三、大沼晃助、池田幸雄、野口高明、山口 亮、小島秀康、今榮直也、大谷栄治、鈴木昭夫、小澤 信、中村智樹、中嶋大輔、三河内岳、杉浦直治、比屋根肇、三浦弥生、宮原正明、土山 明、平島崇男、岡崎隆司、久保友明、富岡尚敬、牛久保孝行、赤坂正秀、中島春菜、物井 晶、海老原充、中村 昇、吉田龍生、矢内桂三、福岡孝昭、下田 玄、井上睦夫、A. El Goresy, H. Palme, B. Spettel, E. Jagoutz, J.-A. Barrat, M.K. Weisberg, R.N. Clayton, J.N. Grossman, M.E. Zolensky, J.M. Friedrich, E. Zinner, M. Prinz, M.I. Petaev, T.J. Tenner, C. Floss, N.T. Kita, 林揚挺, 陳鳴, 王道德, 管雲彬, 繆秉魁

南極隕石の写真は国立極地研究所及び Johnson Space Center, NASA 所有の隕石試料を用いて撮影した。NWA 801 隕石の薄片写真は杉浦直治氏所有の試料で撮影した。また本稿執筆に当たっては、科研費補助金(26400510)を使用した。

引用文献

- Beckett, J. R. and Stolper, E. (1994): The stability of hibonite, melilite and other aluminous phases in silicate melts: Implications for the origin of hibonite-bearing inclusions from carbonaceous chondrites. *Meteoritics*, **29**, 41–64.
- Bennett, M., III and McSween, H. Y., Jr. (1996): Revised model calculations for the thermal histories of ordinary chondrite parent bodies. *Meteorit. Planet. Sci.*, **31**, 783–792.
- Binns, R. A., Davis, R. J. and Reed, S. J. B. (1969): Ringwoodite, natural (Mg, Fe)₂SiO₄ spinel in the Tenham meteorite. *Nature*, **221**, 943–944.
- Chen, M., Sharp, T. G., El Goresy, A., Wopenka, B. and Xie, X. (1996): The majorite-pyrope+magnesiowüstite assemblage: Constraints on the history of shock veins in chondrites. *Science*, **271**, 1570–1573.
- Chen, M., Shu, J., Mao, H., Xie, X. and Hemley, R. J. (2003): Natural occurrence and synthesis of two new postspinel polymorphs of chromite. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **100**, 14651–14654.
- Ebel, D. (2006): Condensation of rocky material in astrophysical environments. In *Meteorites and the Early Solar System II* (Lauretta, D. S. and McSween, H. Y. Jr., Eds.). Univ. Arizona Press, Tucson, 253–277.
- El Goresy, A., Dubrovinsky, L., Sharp, T. G., Saxena, S. K. and Chen, M. (2000): A monoclinic post-stishovite polymorph of silica in the Shergotty meteorite. *Science*, **288**, 1632–1634.
- El Goresy, A., Gillet, P., Miyahara, M., Ohtani, E., Ozawa, S., Beck, P. and Montagnac, G. (2013): Shock-induced deformation of Shergottites: Shock-pressures and perturbations of magmatic ages on Mars. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **101**, 233–262.
- Fogel, R. A. (1997): On the significance of diopside and oldhamite in enstatite chondrites and aubrites. *Meteorit. Planet. Sci.*, **32**, 577–591.
- Gillet, P., Chen, M., Dubrovinsky, L. and El Goresy, A. (2000): Natural NaAlSi₃O₈-hollandite in the shocked Sixiangkou meteorite. *Science*, **287**, 1633–1636.
- Gillet, P. and El Goresy, A. (2013): Shock events in the solar system: The message from minerals in terrestrial planets and asteroids. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **41**, 257–285.
- Hays, J. F. (1966): Stability and properties of the synthetic pyroxene CaAl₂SiO₆. *Amer. Mineral.*, **51**, 1524–1529.
- Hazen, R. M., Papineau, D., Bleeker, W., Downs, R. T., Ferry, J. M., McCoy, T. J., Sverjensky, D. A. and Yang, H. (2008): Mineral evolution. *Amer. Mineral.*, **93**, 1693–1720.
- Holtstam, D., Broman, C., Söderhielm, J. and Zetterqvist, A. (2003): First discovery of stishovite in an iron meteorite. *Meteorit. Planet. Sci.*, **38**, 1579–1583.
- Keil, K. (2007): Occurrence and origin of keilite, (Fe>0.5, Mg<0.5): S, in enstatite chondrite impact-melt rocks and impact-melt breccias. *Chemie der Erde*, **67**, 37–54.
- 木村 眞 (1996): 隕石鉱物。鉱物雑, **25**, 49–60.
- Kimura, M., Chen, M., Yoshida, T., El Goresy, A. and Ohtani, E. (2004): Back-transformation of high-pressure phases in a shock melt vein of an H-chondrite during atmospheric passage: Implications for the survival of high-pressure phases after decompression. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **217**, 141–150.
- Kimura, M., Mikouchi, T., Suzuki, A., Miyahara, M., Ohtani, E. and El Goresy, A. (2009): Kushiroite, CaAlAlSiO₆: A new mineral of the pyroxene group from the ALH 85085 CH chondrite, and its genetic significance in refractory inclusions. *Amer. Mineral.*, **94**, 1479–1482.
- 木村 眞, 野口高明 (2013): エボックメイキングな隕石たち(その1): Allende 隕石。遊・星・人, **22**, 252–254.
- Kimura, M., Sugiura, N., Mikouchi, T., Hirajima, T., Hiyagon, H. and Takehana, Y. (2013): Eclogitic clasts with omphacite and pyrope-rich garnet in the NWA 801 CR2 chondrite. *Amer. Mineral.*, **98**, 387–393.
- Kimura, M., Suzuki, A., Kondo, T., Ohtani, E. and El Goresy, A. (2000): Natural occurrence of high-pressure phases, jadeite, hollandite, wadsleyite and majorite-pyrope garnet, in an H-chondrite, Y75100 (abstract). *Meteorit. Planet. Sci.*, **35**, A87–A88.
- Kimura, M., Weisberg, M. K., Lin, Y., Suzuki, A., Ohtani, E. and Okazaki, R. (2005): Thermal history of the enstatite chondrites from silica polymorphs. *Meteorit. Planet. Sci.*, **40**, 855–868.
- Kimura, M., Yamaguchi, A., Miyahara, M. and L. Pittarello (2014): Shock vein in an enstatite chondrite, Asuka 10164. *Abst. 77th Ann. Meteorit. Soc. Meet.* (#5100).
- Kita, N. T., Huss, G. R., Tachibana, S., Amelin, Y., Nyquist, L. E., and Hutcheon, I. D. (2005): Constraints on the origin of chondrules and CAIs from short-lived and long-lived radionuclides. *ASP Confer. Ser.*, **341**, 558–587.

- Kubo, T., Kimura, M., Kato, T., Nishi, M., Tominaga, A., Kikegawa, T. and Funakoshi, K. (2010): Plagioclase breakdown as an indicator for shock conditions of meteorites. *Nature Geosci.*, **3**, 41–45.
- Kushiro, I. (1962): Clino pyroxene solid solutions. Part I. The $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$ component. *Japan. J. Geol. Geogr.*, **33**, 213–220.
- Lin, Y. and El Goresy, A. (2002): A comparative study of opaque phases in Qingzhen (EH3): and MAC 88136 (EL3): Representatives of EH And EL parent bodies. *Meteorit. Planet. Sci.*, **37**, 577–600.
- Lin, Y., Kimura, M., Miao, B., Dai, D. and Monoi, A. (2006): Petrographic comparison of refractory inclusions from different chemical groups of chondrites. *Meteorit. Planet. Sci.*, **41**, 67–81.
- Ma, C., Beckett, J.R. and Rossman, G. R. (2014): Allendeite ($\text{Sc}_4\text{Zr}_3\text{O}_{12}$) and hexamolybdenum (Mo, Ru, Fe), two new minerals from an ultrarefractory inclusion from the Allende meteorite. *Amer. Mineral.*, **99**, 654–666.
- Ma, M., Connolly, H. C., Jr., Beckett, J. R., Tschauner, O., Rossman, G. R., Kampf, A. R., Zega, T. J., Sweeney Smith, S., A., and Schrader, D. L. (2011): Brearleyite, $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{32}\text{Cl}_2$, a new alteration mineral from the NWA 1934 meteorite. *Amer. Mineral.*, **96**, 1199–1206.
- Ma, C. and Krot, A. N. (2014): Hutcheonite, $\text{Ca}_3\text{Ti}_2(\text{SiAl}_2)_2\text{O}_{12}$, a new garnet mineral from the Allende meteorite: An alteration phase in a Ca–Al-rich inclusion. *Amer. Mineral.*, **99**, 667–670.
- Ma, C. and Rossman, G. R. (2009): Grossmanite, $\text{CaTi}^{3+}\text{AlSiO}_6$, a new pyroxene from the Allende meteorite. *Amer. Mineral.*, **94**, 1491–1494.
- Ma, C., Tschauner, O., Beckett, J. R., Rossman, G. R. and Liu, W. (2012): Panguite, $(\text{Ti}^{4+}, \text{Sc}, \text{Al}, \text{Mg}, \text{Zr}, \text{Ca})_{1.8}\text{O}_3$, a new ultra-refractory titania mineral from the Allende meteorite: Synchrotron micro-diffraction and EBSD. *Amer. Mineral.*, **97**, 1219–1225.
- MacPherson, G. (2005): Calcium–Aluminum–rich Inclusions in Chondritic Meteorites. In *Meteorites, Comets, and Planets: Treatise on Geochemistry 1* (Davis, A. M. Ed.). Elsevier, Amsterdam, 201–246.
- Mason, B. (1967): Extraterrestrial mineralogy. *Amer. Mineral.*, **52**, 307–325.
- Mason, B. (1972): The mineralogy of meteorites. *Meteoritics*, **7**, 309–326.
- Mikouchi, T., Zolensky, M., Ivanova, M., Tachikawa, O., Komatsu, M., Le, L. and Gounelle, M. (2009): Dmitryivanovite: A new high-pressure calcium aluminum oxide from the Northwest Africa 470 CH₃ chondrite characterized using electron backscatter diffraction analysis. *Amer. Mineral.*, **94**, 746–750.
- Miura, Y. N., Nagao, K. and Kimura, M. (2014): Noble gases in individual chondrules of the Allende CV3 chondrite. *Meteorit. Planet. Sci.*, **49**, 1037–1056.
- Miyahara, M., El Goresy, A., Ohtani, E., Nagase, T., Nishijima, M., Vashaei, Z., Ferroir, T., Gillet, P., Dubrovinsky, L. and Simionovici, A. (2008): Evidence for fractional crystallization of wadsleyite and ringwoodite from olivine melts in chondrules entrained in shock-melt veins. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **105**, 8542–8547.
- Miyahara, M., Ohtani, E., Yamaguchi, A., Ozawa, S., Sakai, T. and Hirao, N. (2014): Discovery of coesite and stishovite in eucrite. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **111**, 10939–42.
- Miyahara, M., Ozawa, S., Ohtani, E., Kimura, M., Kubo, T., Sakai, T., Nagase, T., Nishijima, M. and Hirao, N. (2013): Jadeite formation in shocked ordinary chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **373**, 102–108.
- 宮原正明, 富岡尚敬 (2012): 地球惑星物質中の高圧鉱物. 岩石鉱物科学, **41**, 87–100.
- 森 寛志 (1994): 地球惑星物質の衝撃誘起相転移. 鉱物雑, **23**, 171–178.
- 都城秋穂 (1966): 隕石鉱物の話. 鉱物雑, **8**, 49–59.
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A. K., Ginzburu, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J., Aoki, K. and Gottardi, G. (1988): Nomenclature of pyroxenes. *Amer. Mineral.*, **73**, 1123–1133.
- Ohtani, E., Kimura, Y., Kimura, M., Takata, T., Kondo, T. and Kubo, T. (2004): Formation of high-pressure minerals in shocked L6 chondrite Yamato 791384: constraints on shock conditions and parent body size. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **227**, 505–515.
- Ohtani, E., Ozawa, S., Miyahara, M., Ito, Y., Mikouchi, T., Kimura, M., Arai, T., Sato, K. and Hiraga, K. (2010): Coesite and stishovite in a shocked lunar meteorite, Asuka-881757 and impact events in lunar surface. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **100**, 14651–14654.
- Price, G. D., Putnis, A., Agrell, S.O. and Smith, D. G. W. (1983): Wadsleyite, natural b-(Mg, Fe)₂SiO₄, from the Peace River meteorite. *Can. Mineral.*, **21**, 29–35.
- Rubin, A. E. (1997): Mineralogy of meteorite groups. *Meteorit. Planet. Sci.*, **32**, 231–247.
- Smith, J. V. and Mason, B. (1970): Pyroxene–garnet transformation in Coorara meteorite. *Science*, **168**, 832–833.
- Tomioka, N. and Fujino, K. (1997): Natural (Mg, Fe)SiO₃–ilmenite and –perovskite in the Tenham meteorite. *Science*, **277**, 1084–1086.
- Tomioka, N. and Kimura, M. (2003): The breakdown of diopside to Ca-rich majorite and glass in a shocked H chondrite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **208**, 271–278.
- 富岡尚敬, 木村 眞 (2011): 天体衝突におけるケイ酸塩鉱物の高圧相転移. 結晶学会誌, **53**, 76–80.
- Tschauner, O., Ma, C., Beckett, J. R., Prescher, C., Prakapenka, V., B. and Rossman, G. R. (2014): Discovery of bridgmanite, the most abundant mineral in Earth, in a shocked meteorite. *Science*, **346**, 1100–1102.
- Ushikubo, T., Kimura, M., Kita, N. T. and Valley, J. W. (2012): Primordial oxygen isotope reservoirs of the solar nebula recorded in chondrules in Acfer 094 carbonaceous chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **90**, 242–264.
- Weisberg, M. K. and Kimura, M. (2010): Petrology and Raman spectroscopy of high pressure phases in the Gujba CB chondrite and the shock history of the CB parent body. *Meteorit. Planet. Sci.*, **45**, 873–884.
- Weisberg, M. K. and Kimura, M. (2012): The unequilibrated enstatite chondrites. *Chemie der Erde*, **72**, 101–115.
- Weisberg, M. K., McCoy, T. J., and Krot, A. N. (2006): Systematics and evaluation of meteorite classification. In *Meteorites and the Early Solar System II* (Lauretta, D. S. and McSween, H. Y. Jr., Eds.). Univ. Arizona Press, Tucson, 19–52.
- Xie, X., Miniti, M. E., Chen, M., Mao, H., Wang, D., Shu, J. and Fei, Y. (2003): Tuite, $\text{g-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: a new mineral from the Suizhou L6 chondrite. *Eur. J. Mineral.*, **15**, 1001–1005.