

隕石中の高圧相の生成メカニズム

宮 原 正 明*

1. はじめに

天体の衝突現象はその天体の成長・進化の基本要素である。隕石や月の回収試料には衝突の痕跡が残されている。それらに残された衝突の記録は1) 角礫化, 2) 鉱物粒子の扁平化, 3) 鉱物への歪み・欠陥の導入, 4) 長石のマスケリナイト化, 5) 衝撃脈, 6) 高圧相などである。特に高圧相(本稿では地球の上部マントル以深に相当する温度・圧力条件のみで安定な鉱物を「高圧相」として扱う)の存在は衝突による高温・高圧を受けた最も明確な証拠の1つである。地球のクレーターが天体衝突に起因することを決定づけた証拠の1つも高圧相の存在であった(Chao *et al.*, 1960, 1962)。高圧相は隕石中の衝撃脈の内部やその周囲に多く発見されている。隕石中の高圧相の研究は古くから行われているが、近年になって集束イオンビーム(FIB)加工装置や透過型電子顕微鏡(TEM)といったナノ分析技術を応用することで様々なタイプの隕石から次々と高圧相が発見されるようになった。本稿では隕石の主要構成鉱物であるカンラン石、輝石、長石の高圧相についてその産状と生成メカニズムについて紹介する。また、衝突で生じる高温・高圧下での相関係は静的高温・高圧合成実験で得られている相平衡図をもとに議論する。

2. 高圧相の生成メカニズム

2.1. カンラン石

カンラン石の高圧相としては変形スピネル構造をもつワズレアイト(wadsleyite)、スピネル構造を持つリングウッドイト(ringwoodite)がある(Fig. 1)。天然のワズレアイトとリングウッドイトは普通コンド

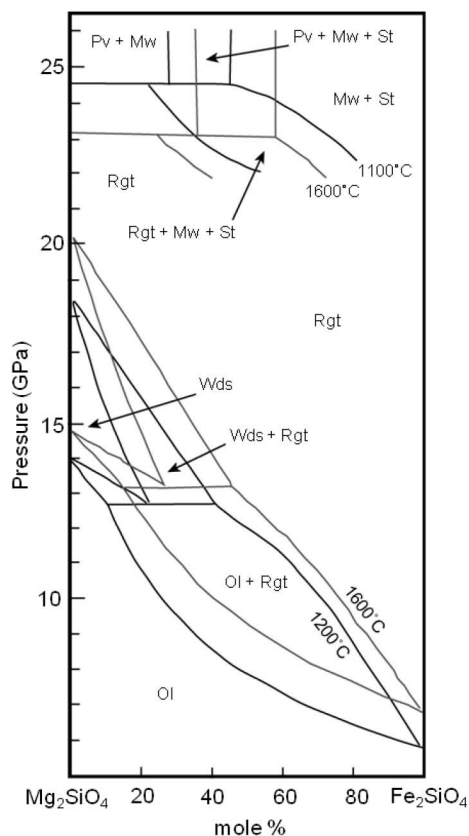


Fig. 1 Phase diagram of Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4 (modified after Presnall, 1995).
Ol = olivine, Wds = wadsleyite, Rgt = ringwoodite, Pv = $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ -perovskite, Mw = magnesiowüstite, St = stishovite.

ライト(L6)の衝撃脈から初めて発見され(Binns *et al.*, 1969; Putnis and Price, 1979; Price *et al.*, 1983), 火星起源隕石, 月起源隕石, 炭素質コンドライトからもその存在が報告されている(Barrat *et al.*, 2005; Fritz and Greshake, 2009; Weisberg and Kimura, 2010; Zhang *et al.*, 2010; Greshake *et al.*, 2011)。カンラン石からワズレアイトに相転移する場

* 東北大学大学院理学研究科地学専攻
〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3

合、ワズレアイトが単独で安定に存在できる温度・圧力領域はリングウッドイトに比べて狭く、ワズレアイトのみが衝撃脈中に生成している例は少ない。普通コンドライト (L6) の場合、衝撃脈のバルク化学組成はコンドライトの全岩化学組成に近くコンドライトが全溶解したものと見なせる。それでも衝撃脈内には溶解を免れた岩片・鉱物片が取り残されていることが多い。ワズレアイトはそのようなカンラン石片を置換してサブミクロン結晶として生成している (Fig. 2a)。ワズレアイトはカンラン石の粒界や割れ目に沿って存在し、両者の間には化学組成差がなく、結晶方位も互いに特別な関係を示さない (このような関係をインコヒーレントと呼ぶ)。これはカンラン石の粒界等に核が生成し、ワズレアイト粒子がその核から成長したことを示唆している (Ozawa *et al.*, 2009)。このような相転移メカニズムはインコヒーレント粒界核生成一界

面コントロール成長メカニズムと呼ばれている (例えば Kerschhofer *et al.*, 1998)。

リングウッドイトが単独で存在する温度・圧力領域とワズレアイト+リングウッドイトの2相が安定に存在できる温度・圧力領域は、幅広く様々なタイプの隕石に見られる。普通コンドライト (L6・H6) では衝撃脈内に残り残されたカンラン石片がサブミクロンサイズの粒状リングウッドイトに置換されていることが多い (Chen *et al.*, 1996; Miyahara *et al.*, 2010)。一方、衝撃脈に接するカンラン石では衝撃脈に近い領域だけがリングウッドイトに相転移している。このような領域では特徴的な相転移組織 (リングウッドイトラメラ) が観察される (Ohtani *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2004; Ozawa *et al.*, 2009; Miyahara *et al.*, 2010)。リングウッドイトラメラは衝撃脈に接するカンラン石に生成する厚さ数ミクロンの板状リングウッドイトのこ

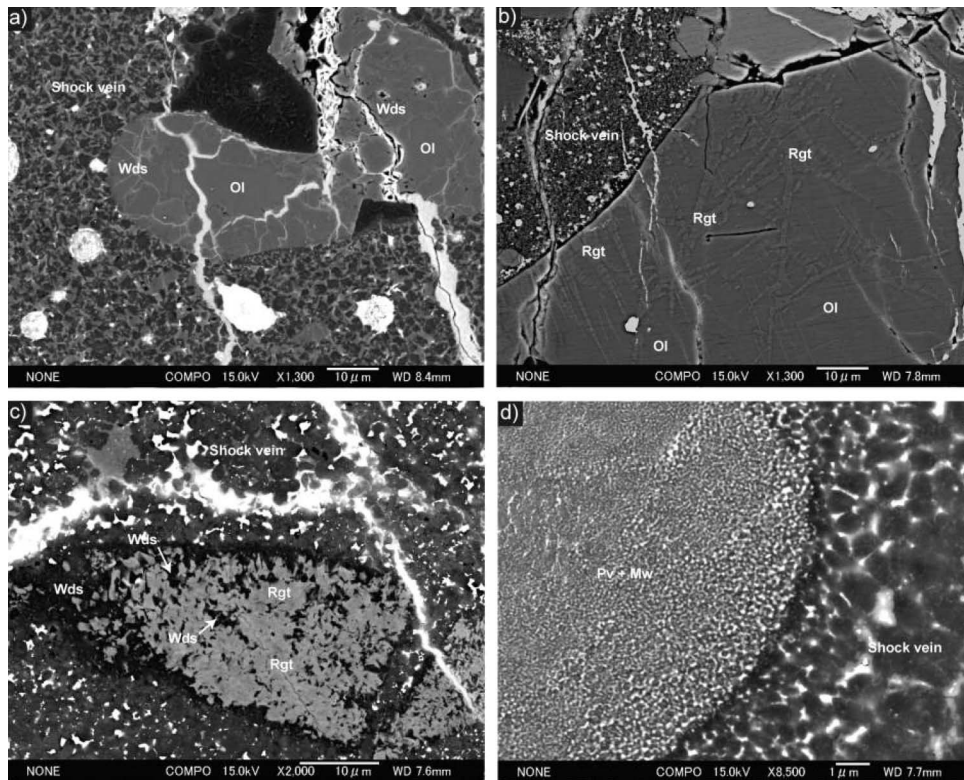


Fig. 2 Back-scattered electron (BSE) images. a) Granular wadsleyite formed in olivine grain entrained in a shock vein (Sahara 98222 L6). b) Ringwoodite lamella formed in olivine grain adjacent to a shock vein (Yamato 791384 L6). c) Wadsleyite-ringwoodite assemblage replacing original olivine grain entrained in a shock vein (Allan Hills 78003 L6). d) Dissociated olivine into (Mg,Fe)SiO₃-perovskite + magnesiowüstite (olivine-phyric shergottite, Dal al Gani 735).

Ol = olivine, Wds = wadsleyite, Rgt = ringwoodite,
Pv = (Mg,Fe)SiO₃-perovskite, Mw = magnesiowüstite.

とである (Fig. 2b)。カンラン石からリングウッダイトへの相転移メカニズムは大きく二つに分けられる (例えば, Kerschhofer *et al.*, 1996, 1998 and 2000)。一つはインコヒーレント粒界核生成-界面コントロール成長メカニズムで、カンラン石の結晶粒界にリングウッダイトの核が形成され、それがリングウッダイトに成長する。この場合、カンラン石とリングウッダイトの間には特定の結晶方位関係はない。もう一つのメカニズムは結晶内形成メカニズムで、カンラン石の (100) 面に沿う格子面すべりを起因として積層欠陥が形成され、この (100) 積層欠陥上に薄い板状のリングウッダイトが成長する。この場合、カンラン石と板状のリングウッダイトの間には特定の結晶方位関係; $(100)_{\text{ol}} // [111]_{\text{Rw}}$ が認められる (トボタキシャルな関係或いはコヒーレントな相転移と呼ばれる)。衝撃脈内のカンラン石を置換したリングウッダイトは粒状のサブミクロン結晶集合体であることからインコヒーレント粒界核生成-界面コントロール成長メカニズムで形成したと説明が可能である。リングウッダイトラメラは母相であるカンラン石と特定の結晶方位関係を持たない粒状のサブミクロン結晶の集合体で構成されているものと (Chen *et al.*, 2007), カンラン石とリングウッダイトの間に $(100)_{\text{ol}} // [111]_{\text{Rw}}$ の結晶方位関係を示すものがあり (Miyahara *et al.*, 2010), 前者はインコヒーレント相転移メカニズム, 後者はコヒーレント相転移メカニズムでの説明が可能である。

カンラン石がワズレアイト+リングウッダイトの2相に固相-固相状態で相転移する場合、ワズレアイトとリングウッダイト間で鉄とマグネシウムの相互拡散が起きるが、その拡散速度は非常に遅く (温度条件にも依存するが)、両者の組成差は僅かである。Miyahara *et al.* (2008) 及び Miyahara *et al.* (2009) はカンラン石がワズレアイト+リングウッダイトの2相に相転移したものを普通コンドライト (L6) の衝撃脈内から見出したが、ワズレアイトとリングウッダイトの間にはファヤライト成分で最大32 mol%もの組成差があった (Fig. 2c)。これほど大きな組成差を短時間の衝撃圧縮時に引き起こすのは困難である。Miyahara *et al.* (2008) はこのワズレアイトとリングウッダイトの集合体は衝撃圧縮で生じた高温・高圧状態でカンラン石が融解し、分別結晶化作用で生成したと説明している。同様の例として、共存するカンラン石とリングウッダイトの間に著しい組成差が生じる

例が隕石中から続々と見つかり、その相転移メカニズムについては依然議論が続いている (Feng *et al.*, 2011; Greshake *et al.*, 2011; Walton, 2013)。

カンラン石は23-25 GPaを超える圧力条件下 (組成や温度にも依存するが) におかれるとペロブスカイト構造を持つ $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ (本論文では以後, “ $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ -ペロブスカイト” と呼ぶ) とマグネシオプスタイト $[(\text{Mg,Fe})\text{O}]$ に分解する (Fig. 1)。カンラン石の高圧分解反応は火星起源隕石の衝撃脈から報告されている (Miyahara *et al.*, 2011) (Fig. 2d)。カンラン石の分解組織は低温部で $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ -ペロブスカイトとマグネシオプスタイトがラメラ状となり、高温部で等粒状となっていた。これは温度が低い場合、原子の拡散速度が遅くラメラ状組織となり、温度が高い場合、拡散速度が速く等粒状となる為と考えられる。

2.2. 輝石

輝石の高圧相転移はその組成や温度・圧力条件に依存しカンラン石に比べて複雑である。エンスタタイトの高圧相としてはガーネット構造のメージャライト (majorite) (Mason *et al.*, 1968; Smith *et al.*, 1970), イルメナイト構造のアキモトアイト (akimotoite) (Tomioka and Fujino, 1999), ペロブスカイト構造の MgSiO_3 がある (本論文では以後, “ MgSiO_3 -ペロブスカイト” と呼ぶ) (Fig. 3)。エンスタタイトは圧力15-18 GPaにおいて高温領域ではメージャライト, 低温領域ではアキモトアイトに相転移し、圧力約22 GPaで MgSiO_3 -ペロブスカイトとなる。Fig. 3の相平衡図を見ると、低温領域ではエンスタタイトがスティショバイト+ワズレアイト或いはリングウッダイトに分解する領域が存在することが示されているが、隕石中でこの分解反応が報告された例はまだ無い。メージャライトとアキモトアイトは普通コンドライト (L6・H6) の衝撃脈内部に取り込まれた輝石を置換していたり、衝撃脈のマトリクスに微粒子として生成していたりする。しかし、それ以外の隕石種では稀で、一部の火星起源隕石から報告されているのみである (Langenhorst and Poirier, 2000; Imae and Ikeda, 2010; Baziotis *et al.*, 2013)。衝撃脈のマトリクスに微粒子として生成しているメージャライトとアキモトアイトは高温・高圧条件下でコンドライトメルトから直接生成したと考えられている。大部分のメージャライトは端成分として存在するよりパイロープ ($\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) との固溶体として生成している。メージャ

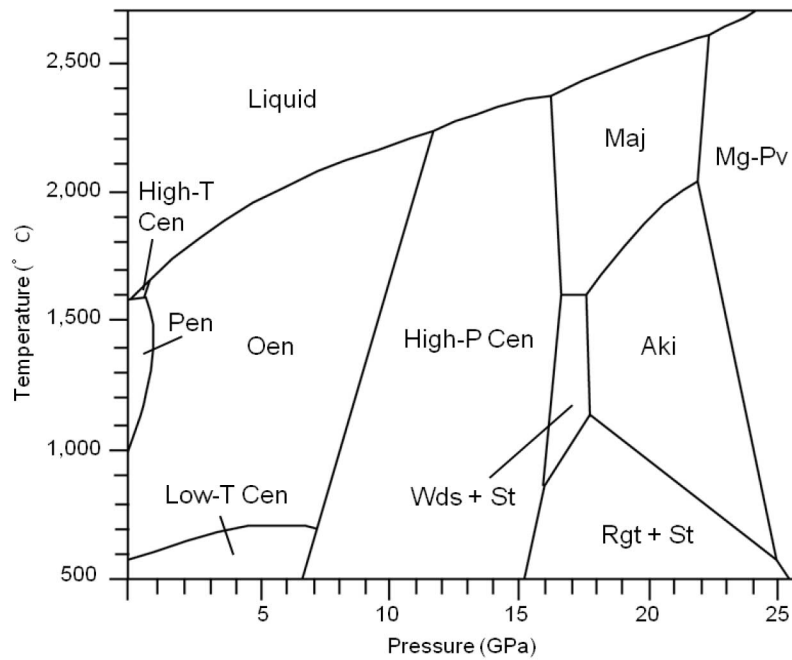


Fig. 3 Phase diagram of MgSiO_3 (modified after Presnall, 1995).

Low-T Cen = low-temperature clinoenstatite, Oen = orthoenstatite, Pen = protoenstatite, High-T Cen = high-temperature clinoenstatite, High-P Cen = high-pressure clinoenstatite, Maj = majorite, Aki = akimotoite, Mg-Pv = MgSiO_3 -perovskite, Wds = wadsleyite, Rgt = ringwoodite, St = stishovite.

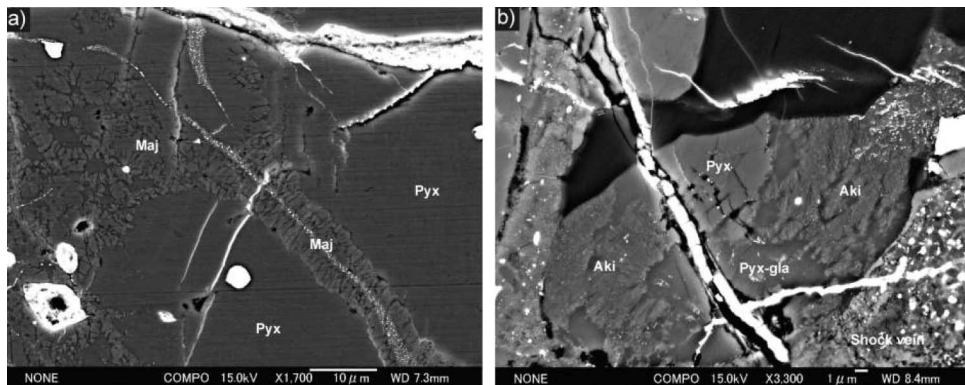


Fig. 4 BSE images. a) Granular majorite formed in low-Ca pyroxene grain entrained in a shock vein (Yamato 74445 L6). b) Granular akimotoite and MgSiO_3 glass replacing low-Ca pyroxene adjacent to a shock vein (Yamato 791384 L6).

Pyx = low-Ca pyroxene, Maj = majorite, Aki = akimotoite, Pyx-gla = MgSiO_3 glass.

ライトーパイロップ固溶体は自形の粒状結晶として衝撃脈のマトリクスを埋めている (Ozawa *et al.*, 2009)。アキモトアイトは長さ数ミクロンの長柱状粒子として存在していることが多い (Sharp *et al.*, 1997)。一方、衝撃脈内部に取り込まれた輝石に生成

するメージャライトやアキモトアイトは輝石から固相一固相で相転移したものである (Fig. 4a)。Ozawa *et al.* (2009) は輝石の粒界や割れ目に沿って核形成が起こり、その核からメージャライトが成長したと述べている。Tomioka and Fujino (1997) は母相である

単斜エンスタタイトとアキモトアイトの間にトボタキシャルな結晶方位関係; $(100)_{\text{Cen}} // (0001)_{\text{Ak}}$, $(010)_{\text{Cen}} // (10-10)_{\text{Ak}}$ (Cen: 単斜エンスタタイト, Ak: アキモトアイト) を TEM による電子線回折により見出した。これは輝石からアキモトアイトへの相転移が母相の輝石格子の剪断変形に伴う陽イオンのわずかな変位によるメカニズム (shear mechanism) により進行したことを示唆している (Tomioka, 2007)。普通コンドライト (L6・H6) の衝撃脈にはしばしば MgSiO_3 組成のガラスが含まれている (Fig. 4b)。これは元々高温・高圧状態では MgSiO_3 -ペロプスカイトであったものが脱圧時の残留熱でガラス化したものと考えられている (Sharp *et al.*, 1997)。Tomioka and Fujino (1997) は完全なガラス化を免れた MgSiO_3 -ペロプスカイトの電子線回折パターンの取得に成功している。しかし、 MgSiO_3 -ペロプスカイトの結晶学的データは未だに不十分で、国際鉱物学連合はこの高圧相を新鉱物として承認していない。

隕石中の輝石は実際にはフェロシナイト (FeSiO_3) やウォラストナイト (CaSiO_3) 成分を含むものが多いが、その相転移様式はエンスタタイトの場合とあまり変わらない。ただし、ウォラストナイト (CaSiO_3) 成分に富む輝石の高圧相転移は他とは異なる。 $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ 輝石は圧力 18 GPa 程度でペロプスカイト構造を持つ CaSiO_3 (本論文では以後、“ CaSiO_3 -ペロプスカイト”と呼ぶ) が出現する。 CaSiO_3 -ペロプスカイトにはメージャライトやアキモトアイトが伴い、圧力 23 GPa 程度で CaSiO_3 -ペロプスカイト + MgSiO_3 -ペロプスカイトになる。Tomioka and Kimura (2003) と Xie and Sharp (2007) は普通コンドライト中の $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ 輝石の高圧分解相として Ca を含むメージャライトと CaSiO_3 -ペロプスカイト (非晶質化していた) を見出している。

2.3. 長石

長石の高圧相転移も輝石同様に複雑である。ここでは普通コンドライト (L6・H6) に一般的で最も詳しく研究されているアルバイト ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) について紹介する。アルバイトは圧力の上昇に伴い、ヒスイ輝石 ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$) + 石英, ヒスイ輝石 + コーサイト, ヒスイ輝石 + スティショバイトに分解, その後 20 GPa 付近でホランダイト型 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 一相に戻った後、カルシウムフェライト (CaFe_2O_4) 型 NaAlSiO_4 とスティショバイトに再び分解する (Liu, 1978)。普通コンドライト (L6・H6) の衝撃脈内部とその周囲

に存在するアルバイト粒子にはヒスイ輝石が生成しているが、不思議なことにシリカ相を伴わない (Kimura *et al.*, 2000)。これはヒスイ輝石に比べてシリカ相は核の生成速度が数桁遅く、衝撃変成のような短時間のイベントではヒスイ輝石のみが生成するためと推測されている (Ozawa *et al.*, 2009; Kubo *et al.*, 2010; Miyahara *et al.*, 2013a)。ホランダイト型 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ はリングンアイト (lingunite) と呼ばれ、普通コンドライト (L6・H6) の衝撃脈内に取り残されたアルバイト片やと衝撃脈に接するアルバイトを置換して生成する (Gillet *et al.*, 2000; Tomioka *et al.*, 2000; Liu and El Goresy, 2007)。リングンアイトの生成メカニズムは母相であるアルバイトからの固相状態で相転移した (Tomioka *et al.*, 2000), 或いはアルバイトが一旦溶融しそのメルトから生成したとする説がある (Gillet *et al.*, 2000)。アルバイトからヒスイ輝石 + シリカ相への反応にも固相-固相説 (Miyahara *et al.*, 2013a), 液相からの結晶化説 (El Goresy *et al.*, 2013) があり、長石組成の高圧相の成因には未解明の部分が多い。

3. おわりに

紙面の都合上割愛したが衝撃を経験した隕石にはシリカ, リン酸塩鉱物, 炭素や酸化物等の高圧相も含まれている (例えば Chen *et al.*, 2003; Ohtani *et al.*, 2011; Miyahara *et al.*, 2013b)。多くの場合、隕石中の高圧相は数ミクロンの領域にサブミクロン粒子として存在する。隕石中の数ミクロンの特定領域を取り出し、放射光や電子線を用いて詳しく調べることが出来るようになったのは比較的最近のことである。高圧相の生成メカニズムやカイネティクス, 放射年代学, クレーター年代学を組み合わせる天体衝突の規模, 年代, 場所を推定する試みも始まっている。今後、高圧相は惑星の進化を紐解く上で重要な手掛かりの1つとなっていくと期待される。

謝 辞

隕石中の高圧相の記載と衝撃変成過程の議論において Ahmed El Goresy 氏, 大谷栄治氏, 富岡尚敬氏, 木村真氏, 小澤信氏, Philippe Gillet 氏, Lin Yang-Ting 氏, 荒井朋子氏, 山口亮氏から数多くの助言と技術的支援を頂きました。高橋嘉夫氏には本稿を執筆する機会を与えて頂き、関根利守氏には初稿を読んで頂いた。ここに皆様に深く感謝の意を表します。

引用文献

- Barrat, J. A., Chaussidon, M., Bohn, M., Gillet, Ph., Göpel, C. and Lesourd, M. (2005) Lithium behavior during cooling of a dry basalt: An ion-microprobe study of the lunar meteorite Northwest Africa 479 (NWA 479). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **69**, 5597–5609.
- Baziotis, I. P., Liu, Y., DeCarli, P. S., Melosh, H. J., McSween, H. Y., Bodnar, R. J. and Taylor, L. A. (2013) The Tissint Martian meteorite as evidence for the largest impact excavation. *Nature Communications*, **4**, 1404, doi: 10.1038/ncomms 2414.
- Binns, R. A., Davis, R. J. and Reed, S. J. B. (1969) Ringwoodite, natural $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ spinel in the Tenham meteorite. *Nature*, **221**, 943–944.
- Chao, E. C. T., Shoemaker, E. M. and Madsen, B. M. (1960) First natural occurrence of coesite. *Science*, **132**, 220–222.
- Chao, E. C. T., Fahey, J. J., Littler, J. and Milton, D. J. (1962) Stishovite, SiO_2 , a very high pressure new mineral from Meteor Crater, Arizona. *Journal of Geophysical Research*, **67**, 419–421.
- Chen, M., Sharp, T. G., El Goresy, A., Wopenka, B. and Xie, X. (1996) The majorite-pyrope + magnesio-wüstite assemblage: constraints on the history of shock veins in chondrites. *Science*, **271**, 1570–1573.
- Chen, M., Shu, J., Mao, H. -K., Xie, X. and Hemley, R. J. (2003) Natural occurrence and synthesis of two new post-spinel polymorphs of chromite. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, **100**, 14651–14654.
- Chen, M., El Goresy, A. and Gillet, Ph. (2004) Ringwoodite lamellae in olivine: Clues to olivine-ringwoodite phase transition mechanisms in shocked meteorites and subducting slabs. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, **101**, 15033–15037.
- Chen, M., Chen, J., Xie, X. and Xu, J. (2007) A microstructural investigation of natural lamellar ringwoodite in olivine of the shocked Sixiangkou chondrite. *Earth and Planetary Science Letters*, **264**, 277–283.
- El Goresy, A., Gillet, Ph., Miyahara, M., Ohtani, E., Ozawa, S., Lin, Y., Feng, L. and Escerig, S. (2013) Multiple shock events and diamond formation on Mars. *44th Lunar and Planetary Science*, 1037.pdf.
- Feng, L., Lin, Y., Hu, S., Xu, L. and Miao, B. (2011) Estimating compositions of natural ringwoodite in the heavily shocked Grove Mountains 052049 meteorite from Raman spectra. *American Mineralogist*, **96**, 1480–1489.
- Fritz, J. and Greshake, A. (2009) High-pressure phases in an ultramafic rock from Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, **288**, 619–623.
- Gillet, Ph., Chen, M., Dubrovinsky, L. and El Goresy, A. (2000) Natural $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ -hollandite in the shocked Sixiangkou meteorite. *Science*, **287**, 1633–1636.
- Greshake, A., Fritz, J. and Böttger, U. (2011) Ringwoodite in the Martian Shergottite Dar al Gani 670: The Role of Shearing. *42nd Lunar and Planetary Science*, 1092.pdf.
- Imae, N. and Ikeda, Y. (2010) High-pressure polymorphs of magnesian orthopyroxene from a shock vein in the Yamato-000047 lherzolitic shergottite. *Meteoritics and Planetary Science*, **45**, 43–54.
- Kerschhofer, L., Sharp, T. G. and Rubie, D. C. (1996) Intracrystalline transformation of olivine to wadsleyite and ringwoodite under subduction zone conditions. *Science*, **274**, 79–81.
- Kerschhofer, L., Dupas, C., Liu, M., Sharp, T. G., Durham, W. B. and Rubie, D. C. (1998) Polymorphic transformations between olivine, wadsleyite and ringwoodite: mechanisms of intracrystalline nucleation and the role of elastic strain. *Mineralogical Magazine*, **62**, 617–638.
- Kerschhofer, L., Rubie, D. C., Sharp, T. G., McConnell, J. D. C. and Dupas-Bruzek, C. (2000) Kinetics of intracrystalline olivine-ringwoodite transformation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **121**, 59–76.
- 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, Yamato 75100. *Meteoritics and Planetary Science*, **35**, A87–A88.
- 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 Geoscience*, **3**, 41–45.
- Langenhorst, F. and Poirier, J. P. (2000) Anatomy of black veins in Zagami: clues to the formation of high-pressure phases. *Earth and Planetary Science Letters*, **184**, 37–55.
- Liu, L. -G. (1978) High-pressure phase transformations of albite, jadeite and nepheline. *Earth and Planetary Science Letters*, **37**, 438–444.
- Liu, L. and El Goresy, A. (2007) High-pressure phase transitions of the feldspars, and further characterization of lingunite. *International Geology Review*, **49**, 854–860.
- Mason, B., Nelen, J. and White, J. S. Jr. (1968) Olivine-garnet transformation in a meteorite. *Science*, **160**, 66–67.
- Miyahara, M., El Goresy, A., Ohtani, E., Nagase, T., Nishijima, M., Vashaei, Z., Ferroir, T., Gillet, Ph., Dubrovinsky, L. and Simionovici, A. (2008) Evidence for fractional crystallization of wadsleyite and ringwoodite from olivine melts in chondrules entrained in shock-melt veins. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, **105**, 8542–8547.
- Miyahara, M., El Goresy, A., Ohtani, E., Kimura, M., Ozawa, S., Nagase, T. and Nishijima, M. (2009) Fractional crystallization of olivine melt inclusion in shock-induced chondritic melt vein. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **177**, 116–121.
- Miyahara, M., Ohtani, E., Kimura, M., El Goresy, A., Ozawa, S., Nagase, T., Nishijima, M. and Hiraga, K. (2010) Co-

- herent and subsequent incoherent ringwoodite growth in olivine of shocked L6 chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, **295**, 321–327.
- Miyahara, M., Ohtani, E., Ozawa, S., Kimura, M., El Goresy, A., Sakai, T., Nagase, T., Hiraga, K., Hirao, N. and Ohishi, Y. (2011) Natural dissociation of olivine to (Mg, Fe)SiO₃perovskite and magnesiowüstite in a shocked Martian meteorite. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, **108**, 5999–6003.
- Miyahara, M., Ozawa, S., Ohtani, E., Kimura, M., Kubo, T., Sakai, T., Nagase, T., Nishijima, M. and Hirao, N. (2013a) Extraterrestrial jadeite in a shocked meteorite. *Earth and Planetary Science Letters*, in press.
- Miyahara, M., Kaneko, S., Ohtani, E., Sakai, T., Nagase, T., Kayama, M., Nishido, H. and Hirao, N. (2013b) Discovery of seifertite in a shocked lunar meteorite. *Nature Communications*, doi: 10.1038/ncomms 2733.
- 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 and Planetary Science Letters*, **227**, 505–515.
- Ohtani, E., Ozawa, S., Miyahara, M., Ito, Y., Mikouchi, T., Kimura, M., Arai, T., Sato, K. and Hiraga, K. (2011) Coesite and stishovite in a shocked lunar meteorite, Asuka-881757, and impact events in lunar surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, **108**, 463–466.
- Ozawa, S., Ohtani, E., Miyahara, M., Suzuki, A., Kimura, M. and Ito, Y. (2009) Transformation textures, mechanisms of formation of high-pressure minerals in shock melt veins of L6 chondrites, and pressure-temperature conditions of the shock events. *Meteoritics and Planetary Science*, **44**, 1771–1786.
- Presnall, D. C. (1995) Phase diagrams of Earth-Forming Minerals. In: *Mineral Physics & Crystallography, A Handbook of Physical Constants* (Ahrens, T. J. Ed.). pp. 354, American Geophysical Union, Washington D.C., 248–268.
- Price, G. D., Putnis, A., Agrell, S. O. and Smith, D. G. W. (1983) Wadsleyite, natural beta-(Mg,Fe)₂SiO₄ from the Peace River meteorite. *Canadian Mineralogist*, **21**, 29–53.
- Putnis, A. and Price, G. D. (1979) High-pressure (Mg,Fe)₂SiO₄ phases in the Tenham chondritic meteorite. *Nature*, **280**, 217–218.
- Sharp, T. G., Lingemann, C. M., Dupas, C. and Stöffler, D. (1997) Natural occurrence of MgSiO₃-ilmenite and evidence for MgSiO₃-perovskite in a shocked L chondrite. *Science*, **277**, 352–355.
- Smith, J. V. and Mason, B. (1970) Pyroxene-Garnet transformation in Coorara meteorite. *Science*, **168**, 832–833.
- Tomioka, N. (2007) A model for the shear mechanism in the enstatite-akimotoite phase transition. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **102**, 226–232.
- Tomioka, N. and Fujino, K. (1997) Natural (Mg,Fe)SiO₃-ilmenite and -perovskite in the Tenham meteorite. *Science*, **277**, 1084–1086.
- Tomioka, N. and Fujino, K. (1999) Akimotoite, (Mg,Fe)SiO₃, a new silicate mineral of the ilmenite group in the Tenham chondrite. *American Mineralogist*, **84**, 267–271.
- Tomioka, N. and Kimura, M. (2003) The breakdown of diopside to Ca-rich majorite and glass in a shocked H chondrite. *Earth and Planetary Science Letters*, **208**, 271–278.
- Tomioka, N., Mori, H. and Fujino, K. (2000) Shock-induced transition of NaAlSi₃O₈ feldspar into a hollandite structure in a L6 chondrite. *Geophysical Research Letters*, **27**, 3997–4000.
- Walton, E. L. (2013) Shock metamorphism of Elephant Moraine A79001: Implications for olivine-ringwoodite transformation and the complex thermal history of heavily shocked Martian meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **107**, 299–315.
- 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. *Meteoritics and Planetary Science*, **45**, 873–884.
- Xie, Z. and Sharp, T. G. (2007) Host rock solid-state transformation in a shock-induced melt vein of Tenham L6 chondrite. *Earth and Planetary Science Letters*, **254**, 433–445.
- Zhang, A. -C., Hsu, W. -B., Floss, C., Li, X. -H., Li, Q. -L., Liu, Y. and Taylor, L. A. (2010) Petrogenesis of lunar meteorite Northwest Africa 2977: Constrains from in situ microprobe results. *Meteoritics and Planetary Science*, **45**, 1929–1947.

Formation mechanisms of high-pressure polymorphs in shocked meteorites

Masaaki MIYAHARA*

* Institute of Mineralogy, Petrology and Economic geology,
Graduate School of Science, Tohoku University
6-3 Aramaki Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

The existence of high-pressure polymorphs in meteorite is a stark evidence for the fact that its parent-body has gone through dynamic events. Now, many kinds of high-pressure polymorphs are found from various shocked meteorites. Olivine, pyroxene and feldspar are the major constituent minerals of meteorite. Here we introduce the occurrences, natures and formation mechanisms for their high-pressure polymorphs formed under pressure condition several GPa at least in shocked meteorites.

Key words: High-pressure polymorph, Formation mechanism, Shocked meteorite