衝撃を経験した隕石に含まれる高压相

High-pressure polymorphs in shocked meteorites

宮原 正明 (Masaaki MIYAHARA)^{*,**}

Some meteorites experienced transient high-pressure and -temperature conditions on its parent-body. High-pressure polymorphs form in and around shock-melt veins of shocked meteorites. Recent developed Nano-technologies such as TEM and FIB system allow us to scrutinize high-pressure polymorphs in shocked meteorites. We here introduce the occurrences, natures and formation mechanisms of high-pressure polymorph of olivine and silica in shocked meteorites and their implications for planetary science.

Keywords: Shocked meteorite, High-pressure polymorph, Olivine, Silica

I. はじめに

天体の衝突現象は天体の成長・進化の基本要素の1つである。例えば、小惑星「イトカワ」も母天体の小惑星が衝突により砕け、破片の一部が再集積し現在の形となった事 (Nakamura *et al.*, 2011), 回収試料の形状は衝突の影響を受けている事が示唆されている (Nakamura *et al.*, 2012)。隕石に記録された天体の衝突現象の記録は 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) 衝撃熔融脈, 6) 高压相などがある。天体同士が衝突した際, 衝撃波の伝播で引き起こされる高压に加え, 岩石中の割れ目に沿った摩擦や応力の集中で岩石の一部が局所的に高温条件下におかれ熔融する。岩石中のそのような部分は黒色の脈状を呈することが多く“衝撃熔融脈”と呼ばれる (Fig. 1)。衝撃熔融脈の内部とその周囲ではケイ酸塩, リン酸塩鉱物, シリカなどの高密度の多形 (高压相) が生成している。高压相は地球深部に構成する物質であり, 古くからマルチアンビル, ダイヤモンドアンビルセルといった高压発生装置を用いた高温・高压合成実験により, その結晶構造変化, 密度, 弾性波速度, 化学組成や相平衡等の研究が精力的に行われている。高压相の多くは地下数百キロ~数千キロにも及ぶ地球マントル深部に存在すると考えられているが, これらの地球深部物質を直接手に入れることは困難である。宇宙空間では巨大

Fig. 1. Photograph of a shocked meteorite (Dar al Gani 477 L6 ordinary chondrite) with a shock-melt vein.

な質量を持つ天体同士が高速で衝突し, 非常に短時間ではあるが地球深部に相当する高温・高压状態が達成され高压相が生じる。隕石中の高压相の研究はもともと地球深部物質のアナログ物質としての側面が大きかった。しかし, 最近ではそうした視点からだけでなく, 過去に起きた天体衝突の規模 (衝突速度や母天体のサイズ等), 衝突年代, 衝突後の母天体からの放出メカニズムを解明することを目的とした研究が増えつつある。隕石中の高压相は衝撃熔融内部

doi: 10.2465/gkk.131120

(平成 25 年 11 月 20 日受付, 平成 25 年 11 月 29 日受理, 担当編集委員: 赤坂正秀)

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

** 現所属: 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻, 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1

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

** Present address: Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan E-mail: miyahara@hiroshima-u.ac.jp

とその周囲に偏在している。また、その多くがサブミクロンサイズであったため、以前はその観察・分析は困難を極めた。しかし、近年は急速に発達した透過型電子顕微鏡 (TEM) を中心とする局所分析技術 (電子線回折, 元素分析, 集束イオンビーム加工装置, 放射光 X 線回折等) により隕石中の高圧相の研究が容易となり, 地球惑星深部物質や天体衝突のプロセスを理解する為の様々な情報を引き出すことが出来るようになってきた。本稿では近年著者らを取り組んだ研究を中心として, 衝撃を経験した隕石に含まれるオリビンとシリカ高圧相の概要とそこから読み取れる隕石母天体の衝突プロセスや惑星進化史について紹介する。

II. 隕石中のオリビン高圧相

オリビンは地球の地殻と上部マントルを構成する主要な鉱物の 1 つである。高温・高圧合成実験装置を用いた研究結果から, オリビンは地球の遷移帯 (地表面下: 410~660 km) に相当する温度・圧力条件下で逆スピネル構造を持つワズレアイト, スピネル構造を持つリングウッドイトに相転移することが予想されている (例えば, Presnall, 1995)。オリビンは隕石を構成する主要な鉱物の 1 つでもある。天然のワズレアイトとリングウッドイトは衝撃を経験した隕石からのみ発見されている。これまでの研究で H6, L6, LL6 タイプの普通コンドライト, 月起源隕石, 火星起源隕石中の衝撃溶融脈 (或はメルトポケット) の内部とその周囲にワズレアイト, リングウッドイト或はその両方に置換されたオリビンが見出されている (Binns *et al.*, 1969; Price *et al.*, 1983; Chen *et al.*, 1996; Kimura *et al.*, 2000; Ohtani *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2004, 2006, 2007; Badjukov *et al.*, 2005; Barrat *et al.*, 2005; Miyahara *et al.*, 2008, 2009, 2010; Fritz and Greshake, 2009; Ozawa *et al.*, 2009; Xie *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010; Feng *et al.*, 2011; Greshake *et al.*, 2013; Baziotis *et al.*, 2013; Acosta-Maeda *et al.*, 2013; Walton, 2013)。

オリビンからワズレアイト或はリングウッドイトへの相転移メカニズムは古くから高温・高圧発生装置で合成された試料を TEM で詳細に観察し, その結果に基づき論じられてきた (例えば, Kerschhofer *et al.*, 1996, 2000)。一方, 天然試料 (隕石) 中でのオリビンからその高圧相への相転移メカニズムはほとんど理解されていなかった。ワズレアイトとリングウッドイトが初めて隕石から発見されたのは 60~80 年代であるが (Binns *et al.*, 1969; Price *et al.*, 1983), その生成メカニズムを解明する手掛かりが得られるようになったのは最近のことである。Ohtani *et al.* (2004) と Chen *et al.* (2004) はほぼ同時期にオリビンからリングウッドイトへの相転移組織であるリングウッドイトラメラを L6 普通コンドライトの衝撃溶融脈周辺のオリビン粒子から見出し (Fig. 2), この相転移組織を用いたリングウッドイト生成メカニズムの解明が始まった。このリングウッドイトラメラを, 当時地球科学分野に導入が進みつつあった

Fig. 2. BSE image of olivine (Ol) grain adjacent to a shock-melt vein in Yamato 791384 ordinary chondrite (L6). Many thin ringwoodite (Rgt) lamellae exist in the olivine grain.

集束イオンビーム (FIB) 加工装置で TEM 用薄膜に加工し, TEM による高分解能像観察や電子線回折を用いた相転移メカニズムの解明が進んだ (Chen *et al.*, 2007; Miyahara *et al.*, 2010)。高温・高圧合成実験の回収試料の TEM 観察結果によれば, オリビンからリングウッドイトへの相転移メカニズムは大きく二つに分けられることが知られていた (例えば, Kerschhofer *et al.*, 1996, 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, オリビンの粒界や三重点に核が形成され, それがリングウッドイトに成長する。この場合は, オリビンと粒状のリングウッドイトの間には特定の結晶方位関係はない (インコヒーレントな相転移)。もう一つのメカニズムは結晶内形成メカニズムで, オリビンの (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ドイトが成長する (Kerschhofer *et al.*, 1998)。この場合オリビンと板状のリングウッド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 (コヒーレントな相転移)。TEM 観察の結果, 隕石中のリングウッドイトではインコヒーレント及びコヒーレント相転移それぞれに相当する証拠が確認されたが, インコヒーレント相転移メカニズムが支配的であった (Miyahara *et al.*, 2010)。これは隕石中のオリビンは割れ目や欠陥が多い為, リングウッドイトの核形成に適する場所が多く, インコヒーレントな相転移が容易に起こり易いためと考えられる。

オリビンからワズレアイトへの相転移組織は Ozawa *et al.* (2009) が L6 普通コンドライトの衝撃溶融脈の中から初めて見出した。ワズレアイト粒子はオリビンの粒界や割れ目に沿って成長し, 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かった。これはオリビンの粒界等に核が生成し, ワズレアイト粒子が成長したことを示唆しており, 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説明が可能である。

オリビン組成や温度にも依存するが、23–25 GPa を超える圧力条件下におかれると $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ -ペロブスカイトとマグネシオプスタイト $[(\text{Mg,Fe})\text{O}]$ (+スティショバイト) に分解する。オリビンの分解反応は上部と下部マントルを分ける物質境界を作り出すと予想されており重要な反応の 1 つである。故に多くの研究者が天然試料中にオリビンの高圧分解反応の証拠を探したが発見には至っていなかった。一方、オリビンは火星を構成する主要な鉱物の 1 つでもある。火星起源隕石は火星表層上で或は火星から放出される際にオリビンの安定な圧力領域を大幅に超える 25–80 GPa 相当の衝撃圧縮が記録されているとの見積りがある (例えば, Stöfler *et al.*, 1986)。そこで Miyahara *et al.* (2011) は衝撃溶融脈に接するオリビンを FIB で切り出し TEM を用いて詳細に調べたところ、オリビンが $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ -ペロブスカイト (脱圧時の残留熱によりほぼ非晶質化) とマグネシオプスタイトに分解した証拠を発見した (Fig. 3)。衝撃溶融脈に接するオリビンではオリビンが 1) 等粒状 $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ -ペロブスカイト + マグネシオプスタイト, 2) ラメラ状 $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ -ペロブスカイト + マグネシオプスタイトに分解していた。分解組織の違いはオリビン結晶内の温度勾配に対応している。すなわち、等粒状組織は高温側、ラメラ状組織は低温側で卓越し、この傾向は高温・高圧合成実験で得られた試料の組織観察結果とも一致する (e.g., Kubo *et al.*, 2002; Sakai *et al.*, 2009)。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るのに対し、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。

隕石中のオリビン高圧相の研究が進むにつれて、高温・高圧合成実験では観察されたことのない相転移様式が見出

されるようになってくる。Miyahara *et al.* (2008, 2009) は L6 普通コンドライトの衝撃溶融脈内部に存在するオリビン中からファヤライト成分で最大 32 mol% もの組成差を示す等粒状のワズレアイトとリングウッドイトの集合体を FIB と TEM を用いた観察によって見出した。オリビンがワズレアイト + リングウッドイトに固相-固相状態で相転移する場合、ワズレアイトとリングウッドイトの間では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、これほど大きな組成差を衝撃圧縮で引き起こすには非現実的な規模の衝突を考えなければならない (例えば、数千 km を超える巨大な隕石母天体の衝突)。Miyahara *et al.* (2008) はこのワズレアイトとリングウッドイトの集合体は衝撃圧縮で生じた高温・高圧状態でオリビンが融解し、高圧状態のままで温度が低下することにより、まずマグネシウムに富むワズレアイトが晶出し、さらに温度が低下して鉄に富むリングウッドイトが生成したと説明している。

ワズレアイトやリングウッドイトを含めた高圧相の核形成と粒成長はカイネティクスに依存している。ランキン・ユゴニオの式から、物体同士が衝突した際の高圧の持続時間は物体の大きさに依存する。高圧相の粒子サイズを TEM 等で測定し、任意のサイズの高圧相が成長するのに必要な高圧 (及び高温) の持続時間を計算し、衝突天体のサイズを見積もる試みも始まっている (Ohtani *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2007; Xie *et al.*, 2006; Xie and Sharp, 2007; Miyahara *et al.*, 2010; Baziotis *et al.*, 2013)。例えば、L6 普通コンドライトに含まれるリングウッドイトの粒径から、衝突天体のサイズは 10 km 以上であったと見積もっている (Ohtani *et al.*, 2004; Miyahara *et al.*, 2010)。

III. 隕石中のシリカ高圧相

これまでに天然で発見されたシリカ高圧相としてはコーサイト、スティショバイト、 $\alpha\text{-PbO}_2$ 型構造を持つザイフェルタイトがある (Chao *et al.*, 1960, 1962; Sharp *et al.*, 1999; El Goresy *et al.*, 2008)。コーサイトとスティショバイトは地球上でも見出される数少ない高圧相で、クレーター周囲の岩石中やキンバーライトの捕獲岩 (Chao *et al.*, 1960, 1962; Smyth and Hatton, 1977; Stähle *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2010) などから発見されている。El Goresy *et al.* (2000) は火星起源隕石中からバデアイト (ZrO_2) に似た結晶構造を持つシリカ高圧相の存在を指摘しているが、その結晶学的なデータが不十分で新たなシリカ高圧相としては認められていない。ダイヤモンドアンビルセルを用いた高温・高圧合成実験では CaCl_2 型と黄鉄鉱型構造をもつシリカ高圧相が合成されている (Tuchida and Yagi, 1989; Kuwayama *et al.*, 2005)、天然試料からの発見の報告はまだない。シリカ高圧相の生成メカニズムや安定圧領域等には未だに未解明な点が多い (例えば, Lakshmanan *et al.*, 2007)。シリカ高圧相は下部マントル最下部に存在す

Fig. 3. Bright-field TEM image of decomposed olivine grain adjacent to a shock-melt vein in Martian meteorite, Dar al Gani 735. Two different decomposition textures are recognized; i.e., Left portion consists of lamellar $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ -perovskite (Pv) and magnesiowüstite (Mw). Right portion consists of granular Pv and Mw.

Fig. 4. Bright-field TEM image of seifertite (Sei) in silica grain of lunar meteorite, Northwest Africa 4734. Amorphous or poorly-crystallized silica (SiO_2 -glass) exists between seifertite grains.

ると予測されており、隕石中のシリカ高圧相の研究は地球深部物質を理解する新たな手掛かりともなり得る。

シリカは隕石を構成する鉱物の割合としては決して大きくはないが、火星起源隕石、月起源隕石、炭素質コンドライトからシリカ高圧相が発見されている (Sharp *et al.*, 1999; Barrat *et al.*, 2002; El Goresy *et al.*, 2000, 2013; Weisberg and Kimura, 2010; Ohtani *et al.*, 2011; Bläß, 2013; Miyahara *et al.*, 2013a)。特に近年、著者らはこれまでほとんど報告がなかった月起源隕石から次々とシリカ高圧相を発見した。月には無数のクレーターがあり、月の表層はレゴリスと呼ばれる破碎された岩石からなる層が厚く堆積している。無数のクレーターと厚いレゴリス層の存在は月でかつて激しい天体衝突が起きていたことを示唆している。しかし、月には激しい天体衝突の痕跡があるにも関わらずこれまでほとんど高圧相は発見されていなかった。著者らは月起源隕石に含まれるシリカを FIB、TEM や強力な放射光による X 線回折法で調べることによってコーサイト、スティショバイト、ザイフェルタイト (Fig. 4) を次々と発見した (Ohtani *et al.*, 2011; Miyahara *et al.*, 2013a)。また、月起源隕石の K (Ar)–Ar 放射年代に基づき、これらのシリカ高圧相が後期隕石重爆撃期 (38–41 億年前) とそれに引き続く天体衝突で生成したことも明らかにした。

IV. おわりに

天体衝突が地球・惑星進化にとって重要な要素だと認識され始めたのは比較的最近のことであり、隕石に記録された衝撃変成に着目した研究が盛んになりつつある (例えば, Beck *et al.*, 2005; Tschauner *et al.*, 2009; Baziotis *et al.*, 2013; Miyahara *et al.*, 2013a)。物質科学的証拠に基づいて天体衝突現象を読み解いていく試みは始まったばかりである。衝突現象の定量化の試みには多くの不確定要素が含まれ、様々な仮定をおいての議論が中心で、“天体衝突現象”

の真の姿が描けるのはまだまだ先のことである。それでも例えば、月への天体衝突史が明らかになることで、地球への天体衝突史の解明にもつながることが期待される。月—地球系への天体衝突は水や生命起源物質の運搬、生命の誕生・絶滅に多大な影響を与えた可能性がある。本稿では割愛したが、隕石中の輝石、長石、炭素など様々な高圧相の研究も近年急速に進みつつある (例えば, Tomioka and Fujino, 1997; Gillet *et al.*, 2000; Tomioka and Kimura, 2003; Sekine *et al.*, 2006; Ferroir *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010; Miyahara *et al.*, 2013b; Nakamuta and Toh, 2013)。これまでに膨大な数の隕石が回収されており、まだまだ未知の鉱物や現象が数多く残されており、取り組むべき課題は多い。FIB や TEM が一般化した現在、隕石中の高圧相を取り扱うことは以前と比べてそのハードルは低くなっている。本稿を期に合成された高圧相だけでなく、天然の高圧相にも興味を持っていただければ幸いである。

謝 辞 隕石中の高圧鉱物の記載と衝撃変成過程の議論において、本研究奨励賞に推薦して頂いた東北大学理学研究科の大谷栄治教授をはじめ、木村 眞教授, Ahmed El Goresy 教授, Philippe Gillet 教授, Yangting Lin 教授, 富岡尚敬准教授, 長瀬敏郎准教授, 西嶋雅彦准教授, 三河内岳准教授, 久保友明准教授, 荒井朋子博士, 山口 亮博士, 小澤 信博士, 境 毅博士, 平尾直久博士, 金子詳平氏から数多くの有益な助言と技術的支援を頂きました。ここに紹介した研究は東北大学グローバル COE プログラム「変動地球惑星学の統合教育研究拠点」及び「文部科学省先端研究施設共用イノベーション創出事業：東北大学ナノテク融合技術支援センター」の支援を受けて行われたもので感謝いたします。最後に、本稿を執筆する機会を与えて下さった日本鉱物科学会に感謝を申し上げます。

引用文献

- Acosta-Maeda, T.E., Scott, E.R.D., Sharma, S.K. and Misra, A.K. (2013): The pressures and temperatures of meteorite impact: Evidence from micro-Raman mapping of mineral phases in the strongly shocked Taiban ordinary chondrite. *Amer. Mineral.*, **98**, 859–869.
- Badjukov, D.D., Brandstaetter, F., Kurat, G., Libowitzky, E. and Raitala, J. (2005): Ringwoodite–olivine assemblages in Dhofar 922 L6 melt veins. *Lunar and Planetary Science XXXVI*, 1684. pdf.
- 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). *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 5597–5609.
- Barrat, J.A., Gillet, Ph., Sautter, V., Jambon, A., Javoy, M., Göpel, C., Lesourd, M., Keller, F. and Petit, E. (2002): Petrology and chemistry of the basaltic shergottite North West Africa 480. *Meteorit. Planet. Sci.*, **37**, 487–499.
- Baziotis, I.P., Liu, Y., DeCarli, P.S., Melosh, H.J., McSween, H.Y., Bodnar, R.J. and Taylor, L.A. (2013): The Tissint Mar-

- tian meteorite as evidence for the largest impact excavation. *Nat. Commun.*, doi: 10.1038/ncomms2414.
- Beck, P., Gillet, Ph., El Goresy, A. and Mostefaoui, S. (2005): Timescales of shock processes in chondritic and martian meteorites. *Nature*, **435**, 1071–1074.
- 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.
- Bläß, U.W. (2013): Shock-induced formation mechanism of seifertite in shergottites. *Phys. Chem. Minerals*, **40**, 425–437.
- 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. *J. Geophys. Res.*, **67**, 419–421.
- Chao, E.C.T., Shoemaker, E.M. and Madsen, B.M. (1960): First natural occurrence of coesite. *Science* **132**, 220–222.
- 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 Planet. Sci. Lett.*, **264**, 277–283.
- Chen, M., El Goresy, A. and Gillet, Ph. (2004): Ringwoodite lamellae in olivine: clue to olivine–ringwoodite phase transition mechanisms in shocked meteorites and subducting slabs. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, **101**, 15033–15037.
- Chen, M., Li, H., El Goresy, A., Liu, J. and Xie, X. (2006): Fracture-related intracrystalline transformation of olivine to ringwoodite in the shocked Sixiangkou meteorite. *Meteorit. Planet. Sci.*, **41**, 731–737.
- Chen, M., Sharp, T.G., El Goresy, A., Wopenka, B. and Xie, X. (1996): The majorite–pyrope + magnesiowüstite assemblage: constrains on the history of shock veins in chondrites. *Science*, **271**, 1570–1573.
- Chen, M., Xiao, W. and Xie, X. (2010): Coesite and quartz characteristic of crystallization from shock-produced silica melt in the Xiuyan crater. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **297**, 306–314.
- El Goresy, A., Dera, P., Sharp, T.G., Prewitt, C., Chen, M., Dubrovinsky, L., Wopenka, B., Boctor, N.Z. and Hemley, R.J. (2008): Seifertite, a dense orthorhombic polymorph of silica from the Martian meteorites Shergotty and Zagami. *Eur. J. Mineral.*, **20**, 523–528.
- 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, Ph., 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.
- 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. *Amer. Mineral.*, **96**, 1480–1489.
- Ferroir, T., Dubrovinsky, L., El Goresy, A., Simionovici, A., Nakamura, T. and Gillet, Ph. (2010): Carbon polymorphism in shocked meteorites: Evidence for new natural ultrahard phases. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **290**, 150–154.
- Fritz, J. and Greshake, A. (2009): High-pressure phases in an ultramafic rock from Mars. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **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., Böttger, U. and Goran, D. (2013): Shear-induced ringwoodite formation in the Martian shergottite Dar alGani 670. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **375**, 383–394.
- 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. *Mineral. Mag.*, **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. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **121**, 59–76.
- 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.
- 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. *Meteorit. Planet. Sci.*, **35**, A87–A88.
- Kubo, T., Ohtani, E., Kato, T., Urakawa, S., Suzuki, A., Kanbe, Y., Funakoshi, K., Utsumi, W., Kikegawa, T. and Fujino K. (2002): Mechanisms and kinetics of the post–spinel transformation in Mg_2SiO_4 . *Phys. Earth Planet. Inter.*, **129**, 153–171.
- Kuwayama, Y., Hirose, K., Sata, N. and Ohishi, Y. (2005): The pyrite-type high-pressure form of silica. *Science*, **309**, 923–925.
- Lakshatanov, D.L., Sinogeikin, S.V., Litasov, K.D., Prakapenka, V.B., Hellwig, H., Wang, J., Sanches-Valle, C., Perrillat, J.-P., Chen, B., Somayazulu, M., Li, J., Ohtani, E. and Bass, J.D. (2007): The post–stishovite phase transition in hydrous alumina-bearing SiO_2 in the lower mantle of the earth. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, **104**, 13588–13590.
- 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. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **177**, 116–121.
- 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. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, **105**, 8542–8547.
- Miyahara, M., Kaneko, S., Ohtani, E., Sakai, T., Nagase, T., Kayama, M., Nishido, H. and Hirao, N. (2013a): Discovery of seifertite in a shocked lunar meteorite. *Nat. Commun.*, doi: 10.1038/ncomms2733.
- Miyahara, M., Ohtani, E., Kimura, M., El Goresy, A., Ozawa, S., Nagase, T., Nishijima, M. and Hiraga, K. (2010): Coherent and subsequent incoherent ringwoodite growth in olivine of shocked L6 chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **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 $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$ perovskite and magnesiowüstite in a shocked Martian meteorite. *Proc. Nat. Acad. Sci. 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. (2013b): Jadeite formation in shocked ordinary chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **373**, 102–108.
- Nakamura, E., Makishima, A., Moriguti, T., Kobayashi, K., Tanaka, R., Kunihiro, T., Tsujimori, T., Sakaguchi, C., Kitagawa, H., Ota, T., Yachi, Y., Yada, T., Abe, M., Fujimura, A., Ueno, M., Mukai, T., Yoshikawa, M. and Kawaguchi, J. (2012): Space environment of an asteroid preserved on micrograins returned by the Hayabusa spacecraft. *Proc. Nat.*

- Acad. Sci. U.S.A.*, **109**, E624–E629.
- Nakamura, T., Noguchi, T., Tanaka, M., Zolensky, M.E., Kimura, M., Tsuchiyama, A., Nakato, A., Ogami, T., Ishida, H., Uesugi, M., Yada, T., Shirai, K., Fujimura, A., Okazaki, R., Sandford, S.A., Ishibashi, Y., Abe, M., Okada, T., Ueno, M., Mukai, T., Yoshikawa, M. and Kawaguchi, J. (2011): Itokawa dust particles: A direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites. *Science*, **333**, 1113–1116.
- Nakamura, Y. and Toh, S. (2013): Transformation of graphite to lonsdaleite and diamond in the Goalpara ureilite directly observed by TEM. *Amer. Mineral.*, **98**, 574–581.
- 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. (2011): Coesite and Stishovite in a shocked lunar meteorite, Asuka-881757, and impact events in lunar surface. *Proc. Nat. Acad. Sci. 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. *Meteorit. Planet. Sci.*, **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.). AGU, 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, *Can. Mineral.*, **21**, 29–53.
- Sakai, T., Ohtani, E., Terasaki, H., Sawada, N., Kobayashi, Y., Miyahara, M., Nishijima, M., Hirao, N., Ohishi, Y. and Kikegawa, T. (2009): Fe–Mg partitioning between perovskite and ferropericlase at the lower mantle. *Amer. Mineral.*, **94**, 921–925.
- Sekine, T., He, H., Kobayashi, T. and Shibata, K. (2006): Sinoite (Si₂N₂O) shocked at pressures of 28 to 64 GPa. *Amer. Mineral.*, **91**, 463–466.
- Stähle, V., Altherr, R., Koch, M. and Nasdala, L. (2008): Shock-induced growth and metastability of stishovite and coesite in lithic clasts from suevite of the Rise impact crater (Germany). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **155**, 457–472.
- Stöffler, D., Ostertag, R., Jammes, C., Pfannschmidt, G., Sen Gupta, P.R., Simon, S.B., Papike, J.J. and Beauchamp, R.H. (1986): Shock metamorphism and petrography of the Shergotty achondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 889–903.
- Sharp, T.G., El Goresy, A., Wopenka, B. and Chen, M. (1999): A post-stishovite SiO₂ polymorph in the meteorite Shergotty: Implications for impact events. *Science*, **284**, 1511–1513.
- Smyth, J.R. and Hatton, C.J. (1977): A coesite–sanidine grosspydrite from the Roberts victor kimberlite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **34**, 284–290.
- 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.
- Tschauner, O., Asimow, P.D., Kostandova, N., Ahrens, T.J., Ma, C., Sinogeikin, S., Liu, Z., Fakra, S. and Tamura, N. (2009): Ultrafast growth of wadsleyite in shock-produced melts and its implications for early solar system impact processes. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, **106**, 13691–13695.
- Tsuchida, Y. and Yagi, T. (1989): A new, post-stishovite high-pressure polymorph of silica. *Nature*, **340**, 217–220.
- 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.
- 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. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **107**, 299–315.
- Xie, Z., Li, X., Sharp, T.G. and De Carli, P.S. (2010): Ringwoodite rims around olivine cores in shock-induced melt veins of an Antarctic chondrite: Mechanisms of transformation and Fe–Mg diffusion. *Meteorit. Planet. Sci.*, **45**, A219.
- Xie, Z. and Sharp, T.G. (2007): Host rock solid–state transformation in a shock-induced melt vein of Tenham L6 chondrite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **254**, 433–445.
- Xie, Z., Sharp, T.G. and DeCarli, P.S. (2006): High-pressure phases in a shock-induced melt vein of the Tenham L6 chondrite: Constraints on shock pressure and duration. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 504–515.
- Zhang, A.-C., Hsu, W.-B., Li, X.-H., Ming, H.-L., Li, Q.-L., Liu, Y. and Tang, G.-Q. (2010): Impact melting of lunar meteorite Dhofar 458: Evidence from polycrystalline texture and decomposition of zircon. *Meteorit. Planet. Sci.*, **46**, 103–115.