

## 口頭講演 | R3: 高圧科学・地球深部

■ 2019年9月22日(日) 9:45 ~ 12:00 | 大講義室 1b 大講義室

## R3: 高圧科学・地球深部

座長:川添 貴章、大藤 弘明

[座長]

川添 貴章: R3-01~R3-05

大藤 弘明: R3-06~R3-09

9:45 ~ 10:00

[R3-01] 圧力スケールの違いが与える核の密度欠損への影響

\*境 毅<sup>1</sup> (1. 愛媛大地球深部研)

10:00 ~ 10:15

[R3-02] 高圧力下における含水非晶質ナトリウム珪酸塩の構造

&lt;font color="#FF7F27"&gt;「発表賞エントリー」&lt;/font&gt;

\*大橋 智典<sup>1</sup>、坂巻 竜也<sup>1</sup>、舟越 賢一<sup>2</sup>、服部 高典<sup>3</sup>、佐野 (古川) 亜沙美<sup>3</sup>、村主 樹<sup>1</sup>、市東 力<sup>4</sup>、池田 理<sup>1</sup>、伊東 義章<sup>1</sup>、柴崎 裕樹<sup>5</sup>、鈴木 昭夫<sup>1</sup> (1. 東北大・院理、2. CROSS、3. 原研、4. 東大・院理、5. 物材研)

10:15 ~ 10:30

[R3-03] Fe-Sコアの固化モードと組成対流

\*浦川 啓<sup>1</sup>、寺崎 英紀<sup>2</sup> (1. 岡山大・自然、2. 大阪大・理)

10:30 ~ 10:45

[R3-04] アルゴンの地球内部循環

\*小野 重明<sup>1</sup> (1. JAMSTEC)

10:45 ~ 11:00

[R3-05] Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>ワズレアイトの高温熱容量測定\*糀谷 浩<sup>1</sup>、恒川 有希<sup>1</sup>、赤荻 正樹<sup>1</sup> (1. 学習院大・理)

11:00 ~ 11:15

[R3-06] 高温高圧下におけるFe<sub>5</sub>O<sub>6</sub>とFe<sub>4</sub>O<sub>5</sub>の安定性彦坂 晃太郎<sup>2</sup>、\*新名 良介<sup>1,2</sup>、廣瀬 敬<sup>2,3</sup>、石井 貴之<sup>4</sup>、大石 泰生<sup>5</sup> (1. 明治大、2. 東大、3. 東工大、4. BGI、5. JASRI)

11:15 ~ 11:30

[R3-07] クロムスピネルを含むケイ酸塩鉱物系の高圧相関係

吉田 和存<sup>1</sup>、糀谷 浩<sup>1</sup>、\*赤荻 正樹<sup>1</sup> (1. 学習院大・理)

11:30 ~ 11:45

[R3-08] δ-(Al,Fe)OOH単結晶の高圧合成

\*川添 貴章<sup>1,2</sup>、大平 格<sup>3,4</sup>、石井 貴之<sup>2</sup>、鈴木 昭夫<sup>3</sup>、大谷 栄治<sup>3</sup> (1. 広大・院理、2. バイロイト大・BGI、3. 東北大・院理、4. カーネギー研究所)

11:45 ~ 12:00

[R3-09] 高温高圧下における無水斜方輝石の転位クリープ

\*坪川 祐美子<sup>1</sup>、大内 智博<sup>1</sup>、肥後 祐司<sup>2</sup>、丹下 慶範<sup>2</sup>、入船 徹男<sup>1</sup> (1. 愛媛大学・GRC、2. JASRI)

# 圧力スケールの違いが与える核の密度欠損への影響

境毅 (愛媛大・GRC) \*

## Effect of the pressure scale problem on the core density deficit

Takeshi Sakai (GRC, Ehime Univ.)\*

Density of iron at the inner core boundary (ICB) condition depends on the pressure scale adopted to determine a pressure of its equation of state. Here we examined the effect of the pressure scale problem on the density deficit (cdd) of Earth's core. The density deficit value differs from 3.4% to 4.7% depending on the choice of pressure scale. I also estimate the possible amount of silicon in the inner core and its several errors come from each of the uncertainty of the ICB temperature, core density, average thermal expansivity, and nickel content. The silicon content variation due to the choice of pressure scale is comparable or larger than the errors come from other uncertainties.

### 1. はじめに

地震学的に観測・決定された地球の核の密度と、核の主要成分である鉄の密度との不一致 ( $\rho_{\text{Fe}} > \rho_{\text{core}}$ ) は、核の密度欠損問題として知られている。核に相当する高温高压下での  $\rho_{\text{Fe}}$  は鉄の状態方程式から見積もられるが、圧力の校正に用いられた圧力スケールの選択によって、その結果は異なる。特に地球の内核に相当する 330-364 GPa の圧力では、スケール間の圧力差は顕著であり、核の密度欠損を考えるうえで圧力スケール問題は不可避の問題である。

### 2. 手法

ここでは、MgO スケール (Keane EoS, Sakai et al., 2016) を基準として、MgO, Pt, NaCl, Fe, Fe-Ni, Fe-Ni-Si の 300 GPa に及ぶ圧縮データ (Sakai et al. 2011, 2012, 2014) を基に核の密度欠損および核の軽元素量を見積もった (ここでは Si のみ考慮)。これに対し、他の圧力スケール (後述) を採用した場合にそれぞれの推定値がどれだけ変化し得るかを計算した。

### 3. 結果と考察

MgO スケールを基準とし、内核境界 (ICB) の温度圧力条件、平均熱膨張率  $\bar{\alpha}$  をそれぞれ 329 GPa, 5000 K,  $\bar{\alpha}=1.0 \times 10^{-5}$  とした場合に、

内核境界における密度欠損は、純鉄の場合 4.7%, Ni=5 at.% の場合は 5.8% となった。純鉄について Dewaele et al (2006) で報告された密度欠損の値は 5.3% であり、下記に述べる種々の誤差の大きさを考えれば、今回の結果 (4.7%) と比較的近い値といえる。一方、Dorogokupets and Oganov (2007), Yokoo et al. (2009), Holmes et al. (1989) の白金圧力スケールを基準とした場合には密度欠損の値はそれぞれ 4.5%, 3.5%, 3.4% となり、後者 2 つについては特に低い値を与える。

Fe-Ni-Si 合金の密度との比較から Si が密度低下に与える効果を算出し、密度欠損 5.8% を説明するのに必要な Si を見積もると 6.4 wt% となった。これに対し、温度誤差  $\pm 1000$  K,  $\bar{\alpha}$  の誤差  $\pm 0.1 \times 10^{-5}$ , ICB での内核密度そのものの誤差  $\pm 2\%$ , Ni 量の誤差  $\pm 5$  at.% を考慮した場合、必要な Si 含有量はそれぞれ  $\pm 1.6$  wt.%,  $\pm 0.6$  wt.%,  $\pm 2.4$  wt.%,  $\pm 1.3$  wt.% だけ変化しうる。これに対し、Yokoo et al. (2009) の白金スケールを用いた場合の密度欠損を説明する Si 量は、2.4% となり、上述の MgO スケールの場合と比べて 4.0 wt% も少ない。密度欠損及び軽元素の推定量に与える圧力スケールの違いによる効果は、その他考えられ得る様々な誤差と比べても同等あるいはやや大きいと言えるだろう。

Keywords: Core density deficit, pressure scale, equation of state, light elements in the core

# 高圧力下における含水非晶質ナトリウム珪酸塩の構造

大橋智典<sup>1\*</sup>、坂巻竜也<sup>1</sup>、舟越賢一<sup>2</sup>、服部高典<sup>3</sup>、佐野(古川)亜沙美<sup>3</sup>、  
村主樹<sup>1</sup>、市東力<sup>4</sup>、池田理<sup>1</sup>、伊東義章<sup>1</sup>、柴崎裕樹<sup>5</sup>、鈴木昭夫<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>東北大院理、<sup>2</sup>CROSS、<sup>3</sup>原研、<sup>4</sup>東大院理、<sup>5</sup>物材研)

## Structures of amorphous hydrous sodium silicates under pressure

Tomonori Ohashi<sup>1\*</sup>, Tatsuya Sakamaki<sup>1</sup>, Ken-ichi Funakoshi<sup>2</sup>, Takanori Hattori<sup>3</sup>, Asami Sano-Furukawa<sup>3</sup>, Miki Muranushi<sup>1</sup>, Chikara Shito<sup>4</sup>, Osamu Ikeda<sup>1</sup>, Yoshiaki Ito<sup>1</sup>, Yuki Shibazaki<sup>5</sup>,  
Akio Suzuki<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Tohoku Univ., Sci., <sup>2</sup>CROSS, <sup>3</sup>JAEA, <sup>4</sup>Univ. Tokyo, Sci., <sup>5</sup>NIMS)

### 1. 目的

高圧下におけるマグマの振る舞いは、地球深部の物質循環を解明する上でたいへん重要である。マグマの駆動性はマグマの物理化学的な性質によって支配されており、特に水は密度(例えば Sakamaki et al., 2006)や粘度(例えば Suzuki et al., 2011; Poe et al. 2006)といったマグマの物性に多大な影響を及ぼす。加えて、このようなマグマの物性はその構造によって理解・説明できるため、圧力起因の構造変化を調べることは非常に興味深い。そこで、中性子回折(ND)法によって無水ナトリウム珪酸塩ガラスの高圧その場構造解析、および常圧下での含水ナトリウム珪酸塩ガラスの構造解析を行った。また、放射光 X 線回折(XRD)によって含水ナトリウム珪酸塩メルトの高圧高圧その場構造解析を行った。

### 2. 手法

ND の出発試料には、SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 粉末の混合物を融点以下の温度で脱炭酸させた後に熔融、急冷した無水 Na<sub>2</sub>O-8/3SiO<sub>2</sub> (NS8/3) ガラスを用いた。ND 実験による無水 NS8/3 ガラスの構造解析は J-PARC の BL11 PLANET で行い、VX4 型のパリ・エジンバラプレスを用いて室温のもと約 7 GPa まで加圧した。含水 NS8/3 ガラスは、同ビームラインに設置の 6 軸型マルチアンビルプレス圧姫を使い、無水 NS8/3 ガラスに 5, 9, 12 wt% の重水を加えたものを白金容器に密封して

約 2 GPa, 約 1000–1300 °C から回収して得た。放射光 XRD 実験では、無水ガラスに 5 wt% および 9 wt% の蒸留水を加えて出発試料として使った。XRD の試料容器には、ダイヤモンド管に白金で蓋をした複合容器(Yamada et al., 2007)を用いた。実験は高エネルギー加速器研究機構の PF-AR NE5C で実施し、高温高圧発生装置にはキュービックアンビルプレス MAX80 を使った。発生した圧力および温度は 1.5–3.6 GPa, 約 1100–1300 °C であった。

### 3. 結果・考察

試料から得られた全構造因子  $S(Q)$  では、XRD, ND のいずれにおいても圧力増加に伴い第一ピークが高  $Q$  側へシフトしており、珪酸塩ネットワーク構造の収縮を示していた。構造因子のフーリエ逆変換である全二体分布関数  $G(r)$  において、常圧における無水 NS8/3 ガラスに比べ含水 NS8/3 ガラス Si-O 結合長の方が長い原子間距離を示した。また、含水量の違いによって Si-O 結合長の圧縮挙動も異なっていた。例えば、NS8/3-H<sub>2</sub>O (9 wt%) メルトの Si-O 結合長は圧力上昇によって単調に収縮した一方で、NS8/3-H<sub>2</sub>O (5 wt%) メルトの Si-O 結合長はほとんど変化していなかった。この結果は、含水量に依存した珪酸塩融体のネットワーク構造の違い(例えば Zotov and Kepler, 1998)が SiO<sub>4</sub> 四面体の大きさや圧縮挙動に影響を及ぼす可能性を示唆する。

**Keywords:** silicate melt, water, amorphous structure, high pressure and temperature

\*Corresponding author: tomonori.ohashi.s8@dc.tohoku.ac.jp

## Fe-S コアの固化モードと組成対流

浦川 啓(岡山大自然), 寺崎英紀 (大阪大理)

### Compositional convection and solidification modes of the Fe-S core

S. Urakawa\* (Okayama Univ), H. Terasaki (Osaka Univ)

地球以外に、水星とガニメデが金属鉄からなる流体コアのダイナモ作用により生じた磁場を持っている。また、表面の残留磁気は火星と月に固有の磁場がかつて存在したことを示唆している。このような小天体のダイナモを駆動するのは、コアの組成対流であると考えられ、コア上部で析出した固体鉄が沈降する“Fe-snowing”として知られるプロセスが組成対流を起こすという説がある。しかし、どのような圧力・組成条件において、コアが上部から固化するについてはまだよくわかっていない。本発表では Fe-S コアについて、この問題を検討する。

流体鉄合金からなるコアが上部から固化するのか、または下部から固化するのかという違いは、鉄合金の融点（リキダス）の圧力勾配とコアの断熱温度勾配の大小で決まる。リキダスの圧力勾配の方が小さい場合は上部から固化し、逆の場合は下部から固化する。

Fe-FeS 系の融点勾配については、Buono & Walker (2011)と我々の実験から 10GPa までデータがある。一方、断熱温度勾配は、我々の密度測定値から決めた高圧下の熱膨張率を

用いて見積もった。10 GPa までの圧力範囲において、 $S < 10 \text{ at\%}$ ではリキダスの圧力勾配は断熱温度勾配よりやや大きいと同程度である。 $S > 10 \text{ at\%}$ を超えると、リキダス勾配の方が小さい状態が共融点まで続く。共融点より  $S$  に富む組成では、リキダス勾配と断熱温度勾配は拮抗するが、リキダス勾配の方がやや小さい傾向が見える。

この結果から、コアの圧力が 10 GPa までの範囲では、Fe-S コアの固化モードは次のようになる。 $S < 10 \text{ at\%}$ の組成では、コアは下部から Fe 結晶が析出し固体内核が成長する。このため、内核直上の流体核は低密度となり上昇し組成対流を起こす。一方、 $S > 10 \text{ at\%}$ ではコア上部から固化が始まる。共融点より Fe に富む領域では、析出した鉄が沈降するうちに再溶融する。また、共融点より  $S$  に富む領域では、析出した FeS が浮上して CMB 直下に溜まる。このように、コア上部で固化が始まる場合は、いずれも流体コア上部に Fe に富む高密度流体の領域が形成されて密度不安定が生じ、組成対流が駆動される。

Keywords: Planetary core, Fe-S liquid, planetary magnetism, compositional convection

\*Corresponding author: urakawa@okayama-u.ac.jp

## アルゴンの地球内部循環

小野 重明 (国立研究開発法人海洋研究開発機構)

### Argon cycle in Earth's interior

Shigeaki Ono\* (JASTEC)

The high-pressure study of physical properties of argon (Ar) has been performed by high-pressure experiments and first-principles calculations. An equation of state, melting curve, and some thermoelastic properties of Ar have been investigated to 400 GPa and 3000 K. The estimated density of Ar is smaller than that of the PREM mantle, which indicates that the density crossover does not occur at the bottom of the lower mantle. The melting temperature of Ar has a significant pressure dependence. In the case of cold slab, solid Ar can be carried down into the deep mantle. Melting of solid Ar in the upwelling mantle plume occurs at the bottom of the transition zone.

希ガス、特にその同位体比は、地球表層から地球深部へいたる物質の大循環を解明するためのトレーサーとして極めて有用である。希ガスの中でアルゴンに関しては、火山岩中に保有されるマントル由来のアルゴンの分析から、海水由来であることが示唆されている。つまり、大気中のアルゴンが海水に溶解し、その海水中的アルゴンが何らかのメカニズムで沈み込むスラブに取り込まれ、長い時間をかけてマントル中を循環し、最終的に中央海嶺やホットスポットから地表へ放出されているはずである。しかしながら、アルゴンがスラブに取り込まれるメカニズムについては理解されていない。そのため、アルゴンの地球内部での振る舞いを知る手掛かりとして、種々の物性を知ることが不可欠である。本研究では、地球マントルに相当する高温高压条件下での、アルゴンの物性を見積もることを目的とした。本発表では、見積もった物性の中で、密度と融解温度に注目して、その結果とそれから予想されるアルゴンの振る舞いを報告する。

本研究では高压実験と数値計算の2つの手法を組み合わせた。高压実験では、ダイヤモンドアンビルセル高压発生装置を用い、試料の測定は放射光施設を利用して粉末 X 線回折データを取得した。数値実験では、第一原理分子動力学法を用い、計算結果の統計的平均値から種々の熱物性を推定した。高压実験によって室温での圧縮曲線を決定し、数値計算から高温条件下での物性を見積もった。

本研究での温度圧力条件は、最高で 400GPa、3000K である。

常温常圧で気体であるアルゴンは、常温高压下では固体の状態が安定であるため、固体アルゴンの状態方程式を決定した。そして、固体アルゴンとマントルの平均的な密度 (PREM) を比較したところ、マントル条件下ではアルゴンは常にマントル物質より密度が小さいことが明らかになった。先行研究では、マントル最下部で密度逆転が起こることが予想されていたが、密度逆転の予想は誤りであることが明らかになった。数値計算結果からアルゴンの融解曲線を見積もったところ、大きな圧力依存性を持っていることが予想された。遷移層で 2000K を超え、下部マントルでは 3000K をはるかに超える融解温度を持つことが判明した。このことは、下部マントル中では、アルゴンは固体として安定であることを意味する。また、上部マントルおよび遷移層中でも、沈み込むスラブのような低温の領域では、アルゴンは固体で存在する。一方、アルゴンの融解曲線とマントルの地温勾配は遷移層最下部で交差する。このことから、マントル上昇流とともに運ばれる固体アルゴンは、遷移層最下部で融解を開始することが予想される。これらの研究結果から、地球内部でのアルゴンの循環メカニズムを解明する上で、固体アルゴンの融解温度の圧力依存性が鍵であることが明らかになった。

**Keywords:** Argon, Equation of state, Melting temperature

\*Corresponding author: sono@jamstec.go.jp

# Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> ワズレアイトの高温熱容量測定

糺谷浩\*、恒川有希、赤荻正樹(学習院大・理)

## High-temperature heat capacity measurement of Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> wadsleyite

Hiroshi Kojitani\*, Yuki Tsunekawa, Masaki Akaogi (Gakushuin Univ.)

Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> ワズレアイト(Wd) は、マントル遷移層における主要構成鉱物の一つと考えられている。Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> リングウッドタイトの定圧熱容量(C<sub>p</sub>)が、従来の値よりも大きいことが Kojitani et al. (2012) により明らかにされたため、その低圧相である Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> Wd との相対的なギブスエネルギー関係が調和的ではなくなっていた。このため、Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> Wd の高温 C<sub>p</sub> を再決定する必要性が生じていた。そこで、本研究では、Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> Wd について DSC 法による高温熱容量測定を行った。また、実測された C<sub>p</sub> を適用して熱弾性パラメータの再評価を行い、格子振動モデル計算により高温外挿を行った。

熱容量測定用の Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> Wd は、学習院大学設置の川井型マルチアンビル高圧発生装置を用いて、出発物質の Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> フォルステライトを 15 GPa, 1573 K で 2 時間保持後、急冷回収することにより高圧合成した。回収試料は、微小部 X 線回折測定および顕微ラマン分光測定により Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> Wd 単相であることを確認した。高温熱容量測定は、入力補償型の DSC 装置を用いることにより 300–820 K の温度範囲において 10 K の温度間隔かつ 10 K/min のスキャン速度でデータを取得した。なお、DSC 測定には粉末状の Wd 試料を用い、その重量は 16.978 mg であった。

本研究では、0.6%以下の測定精度で高温 C<sub>p</sub> が決定された。先行研究の Watanabe (1982) や Ashida et al. (1987) によるデータと比較すると、本研究の測定値は 2–5% 大きい。このことから、従来用いられてきた Wd の高温 C<sub>p</sub> は、過小評価されていたことが実験的に示された。さらに、デバイの関係式  $\alpha = \gamma_{th} C_V / (K_T V)$  を用いた熱膨張率の計算と、Katsura et al. (2009) による P–V–T データへの Birch–Murnaghan 状態方程式の最小二乗フィットを組み合わせることにより、熱弾性パラメータの最適化を行った。得られた熱弾性パラメータを適用した格子振動モデル計算による C<sub>p</sub> は、本研究で測定された高温 C<sub>p</sub> データと非常によく一致しており、さらなる高温側への外挿値として妥当であることが示唆される。

### References

- Ashida et al. (1987) High-pressure research in mineral physics, Terra Scientific Publishing, pp 269-274.
- Katsura et al. (2009) Geophys. Res. Lett., 36, L11307.
- Kojitani et al. (2012) Am. Mineral., 97, 1314–1319.
- Watanabe (1982) High-pressure research in geophysics, Center for Academic Publications, pp 441-464.

Keywords: wadsleyite, heat capacity, DSC, thermoelastic parameter, lattice vibrational model calculation

\*Corresponding author: hiroshi.kojitani@gakushuin.ac.jp

## 高温高圧下における $\text{Fe}_5\text{O}_6$ と $\text{Fe}_4\text{O}_5$ の安定性

彦坂晃太郎(東大), 新名良介 (東大/明治大), 廣瀬敬 (東大/東工大), 石井貴之 (BGI), 大石泰生(JASRI)

### **The stability of $\text{Fe}_5\text{O}_6$ and $\text{Fe}_4\text{O}_5$ at high pressure and temperature**

Koutaro Hikosaka\* (U. Tokyo), Ryosuke Sinmyo (U. Tokyo/Meiji U.), Kei Hirose (U. Tokyo/Tokyo Tech.), Takayuki Ishii (BGI), Yasuo Ohishi (JASRI)

The oxygen fugacity in the interior of the Earth is largely controlled by iron-bearing minerals. Recent studies have reported a variety of iron oxides with chemical compositions between  $\text{FeO}$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  above  $\sim 10$  GPa. However, the stabilities of these high-pressure iron oxides remain mostly uninvestigated. In this study, we performed in-situ X-ray diffraction (XRD) measurements in a laser-heated diamond-anvil cell (DAC) to determine the phase relations in both  $\text{Fe}_5\text{O}_6$  and  $\text{Fe}_4\text{O}_5$  bulk compositions to 61 GPa and to 2720 K. The results show that  $\text{Fe}_5\text{O}_6$  is a high-temperature phase stable above 1600 K and  $\sim 10$  GPa, while  $\text{FeO} + \text{Fe}_4\text{O}_5$  are formed at relatively low temperatures. We observed the decomposition of  $\text{Fe}_5\text{O}_6$  into  $2\text{FeO} + \text{Fe}_3\text{O}_4$  above 38 GPa and the decomposition of  $\text{Fe}_4\text{O}_5$  into  $\text{FeO} + \text{h-Fe}_3\text{O}_4$  at a similar pressure range. The coexistence of  $\text{FeO}$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  indicates that none of the recently discovered compounds between  $\text{FeO}$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (i.e.,  $\text{Fe}_5\text{O}_6$ ,  $\text{Fe}_9\text{O}_{11}$ ,  $\text{Fe}_4\text{O}_5$ , and  $\text{Fe}_7\text{O}_9$ ) are formed beyond  $\sim 40$  GPa at 1800 K, corresponding to conditions in the shallow lower mantle. Additionally, as some superdeep diamonds have genetic links with these high-pressure iron oxides, our results give constraints on pressure and temperature conditions of their formation.

Key words: iron oxide, diamond-anvil cell, high pressure,  $\text{Fe}_4\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_5\text{O}_6$

\*Corresponding author. (E-mail: [hikosaka@g.ecc.u-tokyo.ac.jp](mailto:hikosaka@g.ecc.u-tokyo.ac.jp))

# クロムスピネルを含むケイ酸塩鉱物系の高圧相関係

<sup>1</sup>吉田和存, <sup>1</sup>糀谷浩, <sup>1</sup>赤荻正樹\* (<sup>1</sup>学習院大理)

## High-pressure phase relations in chromite spinel-bearing systems

<sup>1</sup>Kazuaki Yoshida, <sup>1</sup>Hiroshi Kojitani, <sup>1</sup>Masaki Akaogi\*  
(\*Fac. Sci., Gakushuin Univ.)

クロミタイトは Cr-spinel(Ch)と olivine(Ol)を主要構成鉱物とする岩石である。その中で、diopside(Di)の離溶組織や diamond を含む Ch を持つ“超高压クロミタイト”はマントル深部を循環したと考えられ、その成因が広く議論されている。しかし、その基礎となる高圧相関係の研究はまだ十分にされていない。本研究では、Ch と Ol の主成分系である  $MgCr_2O_4$ - $Mg_2SiO_4$  系と、Di-Ch の主成分系である  $CaMgSi_2O_6$ - $MgCr_2O_4$  系の高圧相関係を詳細に明らかにし、超高压クロミタイトが経験した圧力条件を考察した。

マルチアンビル装置を用い、これらの系の 28GPa まで 1200~1600°C での相平衡実験を行い、回収試料の微小領域 X 線回折データと組成分析により相関係を決定した。

$MgCr_2O_4$ - $Mg_2SiO_4$  系では、1600°C と 1400°C (図 1) のどちらの温度でも、約 13GPa 以上では Ol と Ch が反応し、wadsleyite(Wd)、anhydrous phase B (Anh-B)、modified ludwigite (mLd)、garnet(Gt)のいずれかを含む 2~3 相に変化し、20-23GPa で ringwoodite (Rw) + calcium titanate (CT)が安定になり、25-26GPa 以上で bridgmanite (Brg) + periclase (Pe) + CT が安定になった。各相の分析値からマスバランス計算により鉱物量比を求め、密度を計算

Keywords: high-pressure, UHP-chromitite

\*Correspond. author: masaki.akaogi@gakushuin.ac.jp

し、圧力による相組合せの変化と共に密度が増加することを確認した。

$CaMgSi_2O_6$ - $MgCr_2O_4$  系では、Ch と Gt が約 10GPa 以上で六方晶(NAL)相(Hp)を生成し、圧力増加と共に Hp と共存する相が変化し、26GPa 以上では  $CaSiO_3$  perovskite (CaPv)と CT を含む相組合せになることが示された。また、10GPa 以下では Gt と共存する Ch に Ca が含まれないことが示された。

超高压クロミタイトには、Ch と Ol が反応して形成される相や Hp 相が見い出されていないことから、超高压クロミタイトが経験した圧力は最大でも 10~13GPa であり、上部マントル内の圧力条件下で循環したと推定される。

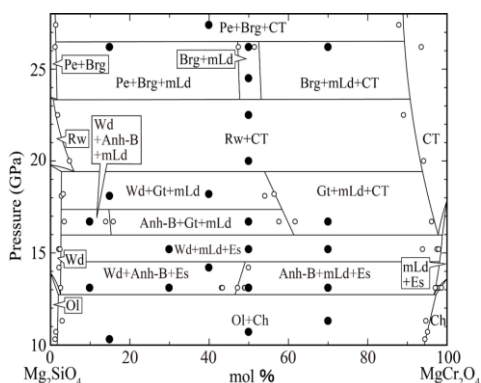


図 1.  $MgCr_2O_4$ - $Mg_2SiO_4$  系の相図(1400°C)

## $\delta$ -(Al,Fe)OOH 単結晶の高圧合成

川添貴章\*、大平格、石井貴之、鈴木昭夫、大谷栄治

(広大・理、バイロイト大・BGI、東北大・理、カーネギー研究所)

### Single crystal synthesis of $\delta$ -(Al,Fe)OOH

Takaaki Kawazoe\*, Itaru Ohira, Takayuki Ishii, Akio Suzuki, Eiji Ohtani

(Hiroshima Univ., Univ. Bayreuth BGI, Tohoku Univ., Carnegie Institution of Washington)

<はじめに>

$\delta$ -(Al,Fe)OOH は、地球深部における水循環を解明する上で重要な相である。この相は ~17 wt% の水を含み、マントル最下部まで水をもたらす可能性がある。このため、この相の物性を明らかにする必要がある。

大型単結晶は、精密加工により試料の形状・結晶方位を制御し、様々な物性が測定されている。近年では、ダイヤモンドアンビルセル (DAC) を用いた高圧実験の出発物質として活用されている [1]。

これらのため、本研究では  $\delta$ -(Al,Fe)OOH 大型単結晶の高圧合成に取り組んだ [2]。

<実験方法>

出発物質には  $\text{Al}(\text{OH})_3$  試薬粉末もしくは  $\text{Al}(\text{OH})_3$  と  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  の混合粉末を用いた。出発物質は  $\text{Au}_{80}\text{Pd}_{20}$  カプセルに封入した。

高圧合成実験は、川井型マルチアンビル装置を用いて行った。実験圧力・温度は 21 GPa、1470 K であり、4 h 保持し急冷した。

回収試料は、偏光顕微鏡、単結晶 X 線回折装置、電子プローブマイクロアナライザー

を用いて分析した。

<結果と議論>

$\delta$ -AlOOH・ $\delta$ -(Al,Fe)OOH 大型単結晶の合成に成功した (図 1)。単結晶の大きさは、0.4-0.6 mm 以下であった。 $\delta$ -(Al,Fe)OOH の  $\text{Fe}/(\text{Al}+\text{Fe})$  は、0.0469(8) と 0.122(3) であった。

合成した  $\delta$ -(Al,Fe)OOH は、DAC を用いた圧縮挙動とスピン状態の研究に活用している (Ohira et al. *Am Mineral* 印刷中)。

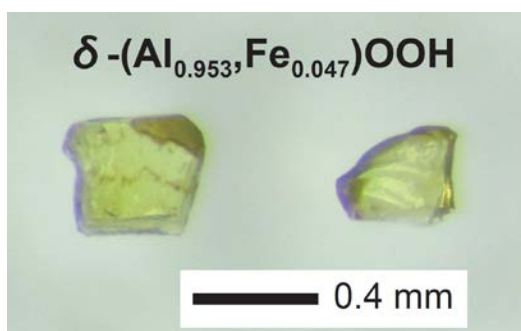


図 1.  $\delta$ -(Al<sub>0.953</sub>,Fe<sub>0.047</sub>)OOH 大型単結晶の写真。

[1] J Buchen et al. (2018), *EPSL* 498, 77-87.

[2] T Kawazoe et al. (2017), *Am Mineral* 102, 1953-1956.

Keywords:  $\delta$ -AlOOH,  $\delta$ -(Al,Fe)OOH, water, single crystal, multi-anvil apparatus

\*Corresponding author: kawazoe@hiroshima-u.ac.jp

# 高温高圧下における無水斜方輝石の転位クリープ

坪川祐美子<sup>1</sup>・大内智博<sup>1</sup>・肥後祐司<sup>2</sup>・  
丹下慶範<sup>2</sup>・入船徹男<sup>1</sup> (<sup>1</sup>愛媛大・GRC、<sup>2</sup>JASRI)

## Dislocation creep of dry orthopyroxene aggregates under high P-T conditions

Yumiko Tsubokawa<sup>\*1</sup>・Tomohiro Ohuchi<sup>1</sup>・Yuji Higo<sup>2</sup>・  
Yoshinori Tange<sup>2</sup>・Tetsuo Irifune<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Ehime Univ. <sup>2</sup>JASRI)

地球においてプレートテクトニクスが起きるために必要なプレートの理論強度は 150 MPa 以下と考えられているが[1]、プレートの最主要鉱物であるカンラン石の強度は 500-600 MPa 程度と強すぎる[2]。つまり地球では何らかの理由においてプレート強度が「弱化」している必要がある。

斜方輝石はプレートで 2 番目に多い鉱物であり、カンラン石より低い強度を持ちうるということが実験的に指摘されている[3]。しかしながらこれは単結晶試料を用いた最も容易なすべり系による評価であり、天然のような多数のすべり系が競合した中で強度検討を行うことは重要である。そこで本研究では、多結晶の斜方輝石を用いた変形実験から、プレート強度の「弱化」に及ぼす斜方輝石の影響を評価することを試みた。

本研究では、沈み込むプレート内の条件下(圧力 1.4-6.8 GPa、温度 1273-1473 K)における無水の斜方輝石多結晶体のその場観察一軸圧縮実験を行った。出発物質は川井型マルチアンビル高圧発生装置を用いて焼結した。回収試料は雰囲気炉で加熱処理することで、溶存する水の除去を行った。変形実験には SPring-8 の BL04B1 に設置の D-DIA 型変形装置 (SPEED-Mk. II) を用いた。変形中の試料歪および差応力の決定は、X 線ラジオグラフィおよび二次元 X 線回折パターンをそれぞれ用いて行った。変形後の回収試料については TEM による転位の組織観察を行った。

実験で得られた応力-歪曲線から、各実験において試料歪が 4%以上で定常クリープ領域(応力 200-1200 MPa)に至ることを確認し

た。この定常クリープ状態において、斜方輝石の転位クリープの流動則の応力指数は  $n = 2.8$  となった。また活性化エネルギー ( $Q$ ) および活性化体積 ( $V^*$ ) はそれぞれ  $\sim 180$  kJ/mol と  $\sim 11$  cm<sup>3</sup>/mol が求められた。得られた応力指数の値および回収試料中に多数存在する転位から、斜方輝石多結晶では転位クリープによる変形が進行したと考えられる。試料中には少なくとも (100) 面および (010) 面の 2 つのすべり面が観察され、転位のバーガースベクトルは [001] または [0kl] であることが分かった。これらの結果は全て、斜方輝石で報告されている 2 つの主要なすべり系 ((100)[001]および(010)[001]) による変形と調和的である。

本研究で得られた無水斜方輝石の転位クリープ強度は、沈み込むプレートに対応する温度圧力条件において無水カンラン石のもの[4]より顕著に低い値であった。また本実験結果を用いて沈み込むプレートの強度(約 30%の斜方輝石が存在すると仮定した場合)を推察すると、その強度は 150 MPa 以下となりうるということが明らかになった。以上のことから、無水斜方輝石の転位クリープが地球型惑星におけるプレートテクトニクスの可否を決定づけているものと考えられる。

- [1] Richards et al. (2001) *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2, 2000G000115.
- [2] Hirth and Kohlstedt (1995) *J. Geophys. Res.*, 100 (B8), 15441-15449.
- [3] Ohuchi et al. (2011) *Contrib. Mineral. Petrol.*, 161, 961-975.
- [4] Karato and Jung (2003) *Philos. Mag.*, 83, 401-414.

Keywords: Orthopyroxene, Deformation experiment, Dislocation creep, Upper mantle

\*Corresponding author: tsubokawa@sci.ehime-u.ac.jp