

ポスター | R3：高圧科学・地球深部

■ 2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ■ ポスター (336, 340, 341号室)

R3：高圧科学・地球深部

◆ 研究優秀発表賞エントリー

12:30 ~ 14:00

[R3P-01] ホウ酸鉛溶媒を用いた鉄含有試料の落下溶解熱測定における酸素分圧制御

*大田尾 天翔¹、大平 格¹、梶谷 浩¹ (1. 学習院大学・理)

◆ 研究優秀発表賞エントリー

12:30 ~ 14:00

[R3P-02] 放射光X線回折実験と分子動力学シミュレーションによるナトリウムケイ酸塩メルトの高圧構造解析

*三瓶 一冴¹、坂巻 竜也¹、荒木 大和¹、市川 晴貴¹、鈴木 昭夫¹ (1. 東北大学)

12:30 ~ 14:00

[R3P-03] 高温高圧下におけるナトリウムケイ酸塩メルトの弾性波速度測定

*荒木 大和¹、坂巻 竜也¹ (1. 東北大・院理)

12:30 ~ 14:00

[R3P-05] 加圧過程における Al_2O_3 - SiO_2 ガラスの構造、音速、およびポアソン比の変化*大平 格¹、河野 義生²、Gréaux Steeve³、井上 紗綾子³、近藤 望⁴、柿澤 翔⁵、肥後 祐司⁵、辻野 典秀⁵、Hrubiak Rostislav⁶、Shen Guoyin⁶、増野 敦信⁷ (1. 学習院大・理・化学、2. 関西学院大学・理・物理・宇宙、3. 愛媛大学・GRC、4. 岡山大学・IPM、5. JASRI、6. アルゴンヌ国立研究所・XSD・HPCAT、7. 京都大学・院工)

◆ 研究優秀発表賞エントリー

12:30 ~ 14:00

[R3P-06] 初生プチスポットマグマの揮発性元素含有量推定：高温高圧実験からのアプローチ

*山田 遼¹、秋澤 紀克¹、井上 徹¹、江木 祐介¹、DUTTA DRIPTA¹、佐藤 侑人²、清水 健二²、牛久保 孝行²、石川 晃³、町田 嗣樹⁴、平野 直人⁵ (1. 広島大学大学院先進理工系科学研究科、2. JAMSTEC、3. 東京科学大学、4. 千葉工業大学、5. 東北大学)

12:30 ~ 14:00

[R3P-07] 沈み込み帯の高温高圧下における炭化水素の化学反応に対する無機鉱物の影響

*篠崎 彩子¹、永井 隆哉¹、三村 耕一² (1. 北海道大学、2. 名古屋大学)

12:30 ~ 14:00

[R3P-08] 還元的なC-H-O流体共存下におけるFeを含むマグネサイトの高温高圧安定性および分解相のFe含有量

*川村 英彰¹、大藤 弘明²、西原 遊³ (1. 東京大・先端研、2. 東京大、3. 愛媛大・GRC)

◆ 研究優秀発表賞エントリー

12:30 ~ 14:00

[R3P-09] 氷天体内部における H_2O - NH_3 系高圧氷相の安定性と圧縮挙動*竹内 萌々子¹、境 毅¹、門林 宏和²、佐野 亜沙美³、町田 真一⁴ (1. 愛媛大学・GRC、2. JASRI、3. JAEA、4. CROSS)

12:30 ~ 14:00

[R3P-10] ブルーサイトの高温高圧下中性子回折実験と水素同位体効果

*佐野 亜沙美¹ (1. 日本原子力研究開発機構)

12:30 ~ 14:00

[R3P-11] 高速衝突条件下の蛇紋石の構造進展その場観察

*梅田 悠平¹、瀬戸 雄介²、富岡 尚敬³、有馬 寛¹、犬伏 雄一^{5,6}、児玉 了祐^{7,4}、宮西 宏併⁶、中村 浩隆^{7,4}、尾崎 典雅^{7,4}、佐藤 友子⁸、富樫 格^{5,6}、簗内 俊毅^{5,6}、矢橋 牧名^{5,6}、関根 利守⁹、奥地 拓生¹ (1. 京大・複合研、2. 大阪公立大・院理、3. 海洋研究開発機構、4. 阪大・レーザー研、5. 高輝度光科学研究センター、6. 理研・SPRING-8センター、7. 阪大・院工、8. 広大・院理、9. 北京高压科学研究センター)

◆ 研究優秀発表賞エントリー

12:30 ~ 14:00

[R3P-12] 410 km不連続面直上付近でのかんらん石の最大含水量の実験的検討

*渡辺 豊生¹、川添 貴章¹、清水 健二²、牛久保 孝行²、富岡 尚敬²、井上 徹¹ (1. 広島大・院先進理工、2. JAMSTEC)

12:30 ~ 14:00

[R3P-13] Sound velocities of (Mg,Fe)SiO₃ bridgmanite at simultaneous high-pressure and high-temperature

*Steeve Greaux¹, Donghoon Kim², Sho Kakizawa³, Yoshio Kono⁴, Itaru Ohira⁵, Yoshihiro Inoue⁴, Jie-jun Jing¹, Minsu Jang², Gunhee Lee², Ryoichi Nakada⁶, Noriyoshi Tsujino³, Yuji Higo³ (1. Ehime University, 2. Korea University, 3. JASRI, 4. Kwansei University, 5. Gakushuin University, 6. JAMSTEC)

12:30 ~ 14:00

[R3P-14] SPRING-8 BL04B1における高温高压下における弾性波速度測定実験の技術開発とその現状

*柿澤 翔¹、肥後 祐司¹、辻野 典秀¹、Gréaux Steeve²、河野 義生³、大平 格⁴、石井 貴之⁵ (1. 高輝度光科学研究センター、2. 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター、3. 関西学院大学、4. 学習院大学、5. 岡山大学惑星物質研究所)

◆ 研究優秀発表賞エントリー

12:30 ~ 14:00

[R3P-15] かんらん石-Fe-Sメルト混合系の弾性波速度：火星マントル底部のメルト層に関する考察

*塩原 美緒¹、坂巻 竜也¹、柿澤 翔²、肥後 祐司²、鈴木 昭夫¹ (1. 東北大学、2. JASRI)

12:30 ~ 14:00

[R3P-16] 鉄金属液体-ケイ酸塩メルト間における強親鉄元素の分配に軽元素・温度・圧力が与える影響

*近藤 望¹、浅沼 尚²、芳野 極¹ (1. 岡山大学、2. 京都大学)

12:30 ~ 14:00

[R3P-17] GHz超音波干渉法を用いた27 GPaまでのhcp-Feの縦波・横波速度

黒阪 紘志¹、*寺崎 英紀¹、米田 明²、河波 優輔¹、近藤 忠²、石田 遼真²、山崎 大輔³、平尾 直久⁴ (1. 岡山大・院環境生命自然、2. 大阪大・院理、3. 岡山大・惑星研、4. 高輝度光科学研究セ)

◆ 研究優秀発表賞エントリー

12:30 ~ 14:00

[R3P-18] 高温高压下におけるhcp-Feおよびfcc-Niへの炭素の取り込み

*北川 朋玖¹、鍵 裕之¹、高野 将大¹、飯塚 理子²、内海 伶那³、齋藤 寛之³、辻野 典秀⁴、柿澤 翔⁴、肥後 祐司⁴ (1. 東大・院理、2. 早稲田大・教育、3. 量子科学技術研究開発機構、4. 高輝度光科学研究センター)

12:30 ~ 14:00

[R3P-19] 高圧下におけるFe-N系の融解関係

*浦川 啓¹、大西 凜¹、柴崎 裕樹² (1. 岡山大学、2. 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所)

12:30 ~ 14:00

[R3P-20] 高圧下におけるアルカリ土類金属酸化物 (CaO, BaO) の金属化の検証

中村 悟¹、*境 毅¹、福田 脩斗²、中本 有紀²、清水 克哉^{2,1}、門林 宏和³ (1. 愛媛大・GRC、2. 阪大基極セ、3. JASRI)

ポスター | R3: 高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3: 高圧科学・地球深部

◆ 研究優秀発表賞エントリー

12:30 ~ 14:00

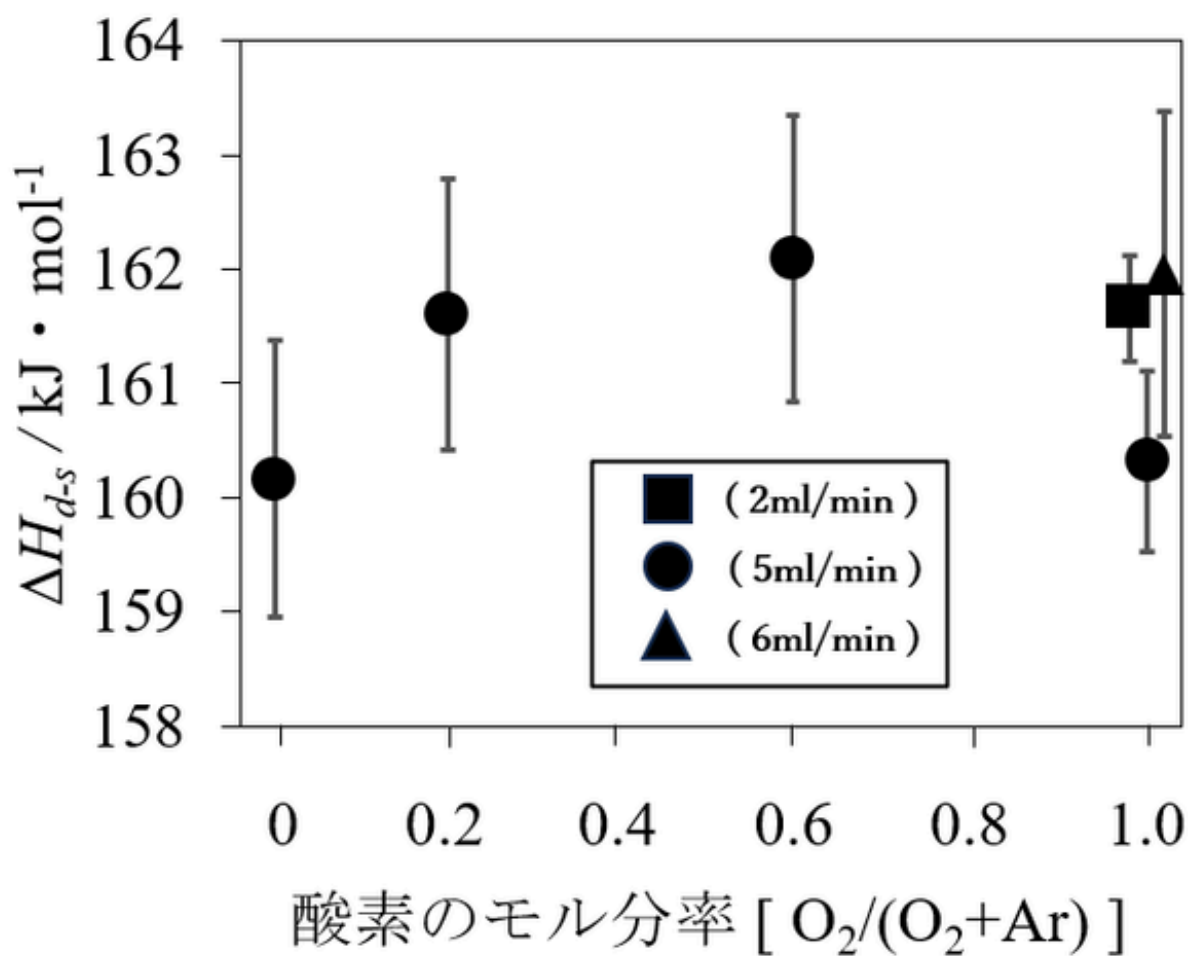
[R3P-01] ホウ酸鉛溶媒を用いた鉄含有試料の落下溶解熱測定における酸素分圧制御

*大田尾 天翔¹、大平 格¹、糀谷 浩¹ (1. 学習院大学・理)

キーワード：落下溶解熱測定、酸素分圧、鉄含有化合物、ホウ酸鉛溶媒

鉄は地球の核やマントル、火星表面、さらには隕石中にも広く存在しており、地球・惑星物質を構成する重要な元素である。そのため、鉄含有化合物の熱力学データは、地球・惑星物質の元素分配、結晶構造の安定性、および固溶体の非理想性を議論する上で重要であり、これまで熱量測定が数多く行われてきた。例えば、Akaogi et al.(1989)は鉄の酸化状態を制御するためArガスを溶媒($2\text{PbO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$)中に流した溶解熱測定を報告した。しかし、この方法では溶媒中の酸素が鉄の価数を変化させる可能性がある。そこで、Lilova et al.(2012)は、 O_2 ガスを流すことにより、溶解後の鉄を完全に Fe^{3+} へ酸化する方法を試みた。ところが、高温かつ供給する酸素ガス流量が高い条件では、Pt容器と溶媒中のPbが反応して副反応物が生成する問題が生じたため、正確な熱量値を決定することが困難であることが指摘されていた。そこで本研究では、まずホウ酸鉛溶媒とPt容器を用い、 O_2 とArの混合ガスの混合比および流量を変化させて、副反応物を生成しない酸素分圧を探索し、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の熱量測定から全ての鉄が Fe^{3+} の状態かつ副反応物を生成しない熱量測定条件を決定した。実験試料には $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4(\text{Fa})$ を用い、ペレット状の試料を705°Cに保たれた熱量計内に落下させて、室温から705°Cまでの熱含量と溶解熱の和である落下溶解エンタルピー($\Delta H_{\text{d-s}}$)を測定した。 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4(\text{Fa})$ は、 Fe_2O_3 と SiO_2 の混合物を加熱して合成した。 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4(\text{Fa})$ の熱量測定の際、まず2時間測定を行い試料が完全に溶解する時間を確認した上で熱量測定を行った。エンタルピーの校正は、標準物質に $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ を用いて行った。 O_2 とArの混合気体を溶媒内に通して泡を発生させるバブリング法により、溶媒を攪拌させると同時に O_2 とArの流量比を変えることで測定雰囲気中の酸素分圧を調整した。 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の熱量測定におけるバブリングガス流量は $\text{O}_2/(\text{O}_2+\text{Ar})=1.0$ において2, 5, 6 ml/min, $\text{O}_2/(\text{O}_2+\text{Ar})=0, 0.2, 0.6$ において5 ml/minとした。落下溶解熱測定とは別に、6,7時間熱量計内でバブリングさせた後に回収してガラス状となった溶媒を顕微鏡で観察することにより、副反応物の生成の有無を確認した。副反応の確認のための混合ガス流量はそれぞれ5 ml/min [$\text{O}_2/(\text{Ar}+\text{O}_2)=0.3, 0.7, 0.85, 1.0$]、7 ml/min [$\text{O}_2/(\text{Ar}+\text{O}_2)=0.85$]、8 ml/min [$\text{O}_2/(\text{Ar}+\text{O}_2)=0.94$]であった。バブリングのみを行った溶媒中に、副生成物である黒色の Pb_2PtO_4 は確認されなかった。 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の落下溶解エンタルピー測定結果を図1に示した。全ての $\Delta H_{\text{d-s}}$ が誤差範囲内で一致した。これらの結果は、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の落下溶解熱測定を、酸素分圧および流量のいずれの条件で行っても、PtとPbの副反応物が生成されないことと、 Fe^{3+} が Fe^{2+} に変化しなかったことを示している。Lilova et al. (2012)は、 O_2 ガスのみの5 ml/minバブリングを行った以外に、溶媒の上部に90 ml/minで O_2 ガスを流していた。測定雰囲気を調整する酸素が過剰なためPtとPbの副反応物が生成したと考えられる。本研究による酸素流量の条件では副反応が進行しないことが分かったため、一番酸素分圧と流量が大きい6 ml/min ($\text{O}_2/(\text{O}_2+\text{Ar})=1.0$)で $\text{Fe}_2\text{SiO}_4(\text{Fa})$ の熱量測定を行った。測定値は $\Delta H_{\text{d-s}} = -74.36 \pm 1.11$ kJ/molとなり、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の $\Delta H_{\text{d-s}}$ 、 SiO_2 の $\Delta H_{\text{d-s}}$ (Kojitani et al., 2009), およびRobie and Hemingway (1995)の熱力学データから推定される $\Delta H_{\text{d-s}} = -78.62 \pm 1.46$ kJ/molと約4 kJ/molの違いがみられた。この要因として、ペレット状の試料が落下中に形が崩れ、一部の試料が溶媒内に落下しなかった可能性が考えられる。そのため、今後 Fe_2SiO_4 の焼結体の熱

量測定を行い、信頼性の高い熱量値を取得する予定である。また、 Fe^{3+} 含有試料において、本研究による酸素流量の条件を用いてコランダム固溶体の非理想エンタルピーの測定を行う予定である。引用文献 Akaogi et al. (1989), *Geophys. Res.*, 94, 15671-15685. Lilova et al. (2012), *Mineral.*, 97, 164-175. Kojitani et al. (2009), *Earth Planet. Inter.*, 173, 349-353. Robie and Hemingway (1995), *S. Geol. Surv. Bull.*, 2131.



ポスター | R3: 高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3: 高圧科学・地球深部

◆ 研究優秀発表賞エントリー

12:30 ~ 14:00

[R3P-02] 放射光X線回折実験と分子動力学シミュレーションによるナトリウムケイ酸塩メルトの高圧構造解析

*三瓶 一冴¹、坂巻 竜也¹、荒木 大和¹、市川 晴貴¹、鈴木 昭夫¹ (1. 東北大学)

キーワード：ナトリウムケイ酸塩メルト、その場観察X線回折、分子動力学シミュレーション、動径分布関数、高圧

ケイ酸塩メルト（マグマ）の密度や粘性などのマクロな物理的性質は、その化学組成に大きく依存し、地球内部におけるマグマの移動や進化プロセスを支配している。これらの物性の組成依存性を根本から理解するためには、メルトのミクロな構造が組成によってどのように変化するかを解明することが不可欠である。しかし、長距離秩序を持たない液体構造のモデリングは複雑であり、特に高温高圧下におけるケイ酸塩メルトの構造に対する系統的な知見は限られている。そこで本研究では、メルト構造の組成依存性を明らかにすることを目的に、組成の異なる2種類のモデルケイ酸塩メルト（ $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ および $\text{Na}_{0.94}\text{Al}_{1.06}\text{Si}_2\text{O}_{6.06}$ ）を対象として、高温高圧条件下における構造をX線回折（XRD）実験と古典分子動力学（MD）シミュレーションを用いることで調べた。放射光XRD実験は、高エネルギー加速器研究機構のPF-ARのNE5Cビームラインで実施した。高温高圧条件下において、 $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ メルトおよび $\text{Na}_{0.94}\text{Al}_{1.06}\text{Si}_2\text{O}_{6.06}$ メルトの構造をエネルギー分散型X線回折法で測定した。得られたX線散乱パターンから構造因子 $S(Q)$ を計算し、更にフーリエ変換して二体相関関数 $g(r)$ を求め、平均的な局所構造に関する情報を得た。酸化物ガラスやメルトの $S(Q)$ には、非晶質物質の中距離構造（ネットワーク形成イオンを中心とした多面体ユニットが作る周期構造）を反映しているFSDP（First Sharp Diffraction Peak、第一回折ピーク）が観測されることが知られている。MD計算は、各組成の構成粒子を含む系を対象に、Guillot-Satorポテンシャルなどの適切な経験的二体ポテンシャルを用いてNPTアンサンブルで実施した。発表当日は、 $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_{6.06}$ メルトと $\text{Na}_{0.94}\text{Al}_{1.06}\text{Si}_2\text{O}_{6.06}$ メルトの $S(Q)$ や $g(r)$ の実験結果を比較するとともに、MD計算から得られた配位数、 Q^n 分布、T-O-T（T=Si, Al）結合角分布など、 SiO_4 および AlO_4 の3次元ネットワーク構造の解析結果を示す。これらの結果から、アルミニウムの有無や網目修飾イオン Na^+ の割合の違いがメルト構造に与える影響を明らかにし、ケイ酸塩メルトの構造に対する組成依存性について定量的・ミクロな視点から議論する。

ポスター | R3：高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3：高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3P-03] 高温高圧下におけるナトリウムケイ酸塩メルトの弾性波速度測定

*荒木 大和¹、坂巻 竜也¹ (1. 東北大・院理)

キーワード：弾性波速度、珪酸塩メルト、超音波法、重合度

高温高圧下におけるケイ酸塩メルトの物性は地球内部におけるマグマの挙動や地震波低速度異常を理解する上で重要である。特に弾性波速度の圧力依存性を解明する研究例は限られており、メルト構造や重合度との関係は十分に理解されていない。本研究では、重合度の異なるケイ酸ナトリウムメルト $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ (NS2, NBO/T=1) および $\text{Na}_2\text{Si}_4\text{O}_9$ (NS4, NBO/T=0.5) を対象とし、高温高圧下での縦波速度 (V_p) 測定と分子動力学 (MD) シミュレーションを実施した。高温高圧実験にはSPring-8のBL04B1に設置された川井型マルチアンビル装置SPEED-1500を用いた。超音波法と放射光X線ラジオグラフィーを組み合わせることで、最大5.4 GPa、2100 Kまでの条件でメルトの V_p を決定した。また、MDシミュレーションにより圧力誘起構造変化を原子スケールで解析し、リング構造やネットワークポロジーの変化を評価した。弾性波速度測定の結果、NS2メルトの V_p は圧力の増加に伴い単調に増加した。一方、NS4メルトでは約2 GPa付近で極小を示し、その後再び増加した。この対照的な挙動は、圧力増加に対する構造応答の本質的な違いを反映していると考えられる。比較的低重合なNS2メルトでは単純な緻密化が進行する一方、高重合なNS4メルトでは、本研究の圧力条件下において低圧～中圧領域で大きなケイ酸塩リングの崩壊を含む中距離構造の再編成が生じたことが示唆される。MDシミュレーションでは、弾性波速度の圧力依存性から予想されたネットワークポロジーおよびリング統計の変化が確認された。また、弾性波速度の圧力依存性に極小をもつメルトと単調増加を示すメルトとの境界がNS2とNS4の間の組成・重合度に存在することを示している。本発表では、ケイ酸塩メルトの弾性波速度に対する重合度およびネットワーク構造の影響について議論する。

ポスター | R3: 高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3: 高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3P-05] 加圧過程における Al_2O_3 - SiO_2 ガラスの構造、音速、およびポアソン比の変化

*大平 格¹、河野 義生²、Gréaux Steeve³、井上 紗綾子³、近藤 望⁴、柿澤 翔⁵、肥後 祐司⁵、辻野 典秀⁵、Hrubiak Rostislav⁶、Shen Guoyin⁶、増野 敦信⁷ (1. 学習院大・理・化学、2. 関西学院大学・理・物理・宇宙、3. 愛媛大学・GRC、4. 岡山大学・IPM、5. JASRI、6. アルゴンヌ国立研究所・XSD・HPCAT、7. 京都大学・院工)

キーワード: Al_2O_3 - SiO_2 ガラス、高圧、二体分布関数、音速、ポアソン比

Al_2O_3 - SiO_2 二成分系ガラスは、大気圧下で構成原子が密に充填された酸化物ガラス(Densely packed oxide glass; 以後、DPOガラス)の一つである。この系では、 Si^{4+} と Al^{3+} の電荷の差を補償する一価もしくは二価の陽イオンが存在しないため、ネットワーク修飾イオンとして働く高配位(5, 6配位)のAlイオンが存在し、また AlO_x 多面体は頂点共有だけではなく、稜共有や面共有によっても連結する(e.g., [1])。このような多様な構造要素を内包するDPOガラスの構造は、地球科学分野で精力的に研究されてきたSiに富むケイ酸塩ガラスなどが持つ、 SiO_4 四面体の頂点共有が支配する三次元的ネットワーク構造とは大きく異なる。そのため、DPOガラスとネットワークガラスでは、圧力が誘起する構造変化プロセスも大きく異なる可能性がある。しかし、DPOガラスの高圧構造変化を観察した例は CaAl_2O_4 ガラスに限られ[2]、アルミノケイ酸塩ガラスを対象とした実験的研究はない。

本研究では、5つの $x\text{Al}_2\text{O}_3$ -(100-x) SiO_2 ガラス試料($x = 29, 36, 43, 50, 60$ mol%; 以下、 $x\text{AS}$ と表記)について室温高圧下でXRD測定と音速測定を行い、構造因子 $S(Q)$ と二体分布関数 $g(r)$ 、音速、および音速から計算されるポアソン比の圧力変化を観察した[3]。ガラス試料はレーザ加熱浮遊炉を用いて合成された。なお、この系において中間の3組成(36AS, 43AS, 50AS)は非混和領域に属する[4]。実際に、音速測定から回収した試料についてSTEM-EDS分析を行ったところ、29ASガラスと60ASガラスはナノスケールで均質であった一方、36AS、43AS、および50ASガラスは、Si-rich相およびAl-rich相の二つの相から成るナノスケールの相分離組織を持つことが確認された。本研究では29ASと60ASをそれぞれ化学的に均質なSi-rich端成分相およびAl-rich端成分相とみなし、この二相に対してX線回折測定を行った。

29ASおよび60ASガラスに対する高圧その場XRD測定で得られた $S(Q)$ データから、29ASガラスは、約9 GPaまで緩やかな中距離秩序の変化を経験することがわかった。この漸次的な中距離秩序の変化は、ネットワークガラスの一つである SiO_2 ガラスでも観察されている[5]。一方、60ASガラスは7.4–8.4 GPaの間で急激な中距離秩序の変化を示す。また $g(r)$ のデータから、(Al,Si)-O平均配位数の増加がこの圧力条件で開始することが示唆された。約8 GPaで急激な構造変化を経験するという点において、60ASガラスは CaAl_2O_4 ガラスに類似していると言える[2]。

高圧その場音速測定から得られた音速-圧力曲線をみると、60ASガラスでは CaAl_2O_4 ガラスと同様に8–10 GPaで速度の急激な増加が見られた。一方、29ASガラスの音速-圧力曲線は SiO_2 ガラスに類似しており、約5 GPaで速度の極小を迎えた後、少なくとも22 GPaまで音速はほぼ線形に増加した。60ASガラスで観察された速度の急増は、中間組成の36AS、43AS、50ASガラスの音速-圧力曲線でも観察され、ガラス中の Al_2O_3 量、すなわちAl-rich端成分相の存在比の増加に伴って明瞭になっていった。以上より、DPOガラスの構造的特徴を持つAl-rich端成分相が、約8 GPaで進行する急激な構造物性変化を支配していることが明らかとなった。

ポアソン比の圧力変化をみると、Al-rich相の急激な構造変化が完了する11 GPaより高圧では、組成によらず各ガラス試料のポアソン比の差は小さくなっていき、最終的に20 GPaで約0.32という値に収束する。この値は、大気圧下における一部の金属ガラスの値と同等であった(e.g., [6])。この結果は、 Al_2O_3 - SiO_2 系の二つの端成分ガラスは加圧過程において異なる構造変

化プロセスを経験するものの、20 GPa以上では共に金属ガラスに似た構造的フレームワークを持つようになることを示している。

References

- [1] R. Weber et al. *J. Phys. Chem. B* **112**, 16726–16733, 2008.
- [2] I. Ohira et al. *Phys. Rev. B* **110**, 054115, 2024.
- [3] I. Ohira et al. *Mater. Adv.* **7**, 5561–5568, 2026.
- [4] S. H. Risbud & J. A. Pask. *J. Am. Ceram. Soc.* **60**, 418–424, 1977.
- [5] Y. Kono et al. *Nat. Commun.* **13**, 2292, 2022.
- [6] T. Rouxel. *J. Am. Ceram. Soc.* **90**, 3019–3039, 2007.

ポスター | R3: 高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3: 高圧科学・地球深部

◆ 研究優秀発表賞エントリー

12:30 ~ 14:00

[R3P-06] 初生プチスポットマグマの揮発性元素含有量推定：高温高圧実験からのアプローチ

*山田 遼¹、秋澤 紀克¹、井上 徹¹、江木 祐介¹、DUTTA DRIPTA¹、佐藤 侑人²、清水 健二²、牛久保 孝行²、石川 晃³、町田 嗣樹⁴、平野 直人⁵ (1. 広島大学大学院先進理工系科学研究科、2. JAMSTEC、3. 東京科学大学、4. 千葉工業大学、5. 東北大学)

キーワード：プチスポット、分配係数

火山活動は、地球内部から炭素を放出する重要な役割を果たしている。2000年代にはいって東北沖で発見されたプチスポットという海底火山は、特に炭素に富むマグマで特徴づけられており、全球的な炭素放出に重要な寄与をもたらしていると考えられている。プチスポットマグマは、溶岩の化学組成や捕獲岩の由来深度推定から、アセノスフェア起源であるとされる。急冷ガラスを用いた二酸化炭素含有量の測定と脱ガスモデルから、初生的なプチスポットマグマは他のマグマに比べて二酸化炭素含有量が多いと報告されている (Okumura & Hirano, 2013)。プチスポットは東北沖だけでなく、チリ沖など世界中の沈み込み直前のプレートから報告されており、プチスポットは全球的に分布していると予想される。これらのプチスポットに関する特徴を踏まえると、プチスポットは全球的な炭素循環に対して大きな役割を果たしていると言える。

本研究では、プチスポットの炭素循環に対する寄与を定量的に評価するために、高温高圧実験を実施した。実験には、東北沖のプチスポット Site A で採取された溶岩中で、初生的なマグマ組成を保持していると考えられる単斜輝岩の捕獲岩を使用した。この単斜輝岩の薄片観察、鉱物化学組成分析から、樹枝状の高Mg# (=Mg/(Mg+Fe); ~0.8) 単斜輝石結晶が発達し、その周囲には低Mg# (~0.75) 単斜輝石の細粒結晶集合体、その隙間をAlやNa含有量の高い単斜輝石(Jadeite)が埋めている特徴的な組織が認められた。SEM-EBSD分析結果から、樹枝状の単斜輝石と周囲の単斜輝石の結晶方位が全てそろっていることがわかった。これらの特徴は、冷却方向が揃うリソスフェアアセノスフェア境界で急速にマグマが結晶化した特徴を示していると考えられる。

高温高圧実験条件は、単斜輝岩が形成されたと考えられるリソスフェアアセノスフェア境界付近の温度圧力条件 (3.0 GPa, 1300-1400°C) で行った。また、実験の出発物質は揮発性成分を変化させるために単斜輝岩の粉末に試薬を加え、CO₂とH₂O量の異なる4つの粉末を用意した。2度の実験のうち、3.0 GPa, 1400°Cの条件で行った実験では鉱物は晶出しなかったが、3.0 GPa, 1300°Cの条件で行った実験では鉱物とメルトの平衡状態を達成することに成功した。EPMAによる鉱物主成分元素組成分析の結果から、晶出した鉱物は単斜輝石であることを確認した。平衡状態を達成した3.0 GPa, 1300°C条件で得られた実験生成物の単斜輝石とガラスのそれぞれに含まれるCO₂やH₂Oをはじめとする揮発性成分の含有量を二次イオン質量分析計

(SIMS) で測定した。その測定結果を用いて3.0 GPa-1300°C条件下における単斜輝石-メルト間の炭素における分配係数 $Kd_C = 0.0036 \pm 0.0003$ 、水素における分配係数 $Kd_H = 0.0206 \pm 0.0025$ を計算した。これらの分配係数のうち、 Kd_H は先行研究であるRosenthal et al. (2015)と整合的な値となった一方で、 Kd_C は先行研究よりも一桁大きな値となった。

本研究と先行研究との間で Kd_C の結果に差が生じた要因として、本実験で生成した鉱物の粒径が小さく (~30μm)、SIMS分析の際にイオンビームが周りのメルトに含まれるCO₂も一部分析してしまった可能性が考えられる。また、出発物質作成時に試薬の量を調整してCO₂、H₂O量が異なる4つの実験粉末を作成したが、実験生成物間でのCO₂、H₂O量には違いがほとんど見られなかった。加えて、揮発性成分を含有していないカプセルでもCO₂やH₂Oの含有が確認さ

れた。出発物質の天然単斜輝岩にCO₂が相当量入っていたため（例えば鉱物粒間など）だと考えられる。以上のような鉱物の粒成長や揮発性成分の制御という観点で課題が残る結果となったが、プチスポットマグマの揮発性成分含有量を実験的に制約し、プチスポット火山活動が地球深部から表層への炭素輸送に果たす役割を評価するという、最終目標に向けた今後の実験の方向性を決めるための重要な基礎データを得ることができた。

参考文献

- ・ Okumura, S & Hirano, N. (2013) Carbon dioxide emission to Earth's surface by deep sea volcanism, *Geology*, v. 41, no, 11, p. 1167-1170
- ・ A. Rosenthal., E.H. Hauri., M.M. Hirschmann. (2015), Experimental determination of C, F, and H partitioning between mantle minerals and carbonated basalt, CO₂/Ba and CO₂/Nb systematics of partial melting, and the CO₂ contents of basaltic source regions, *Earth and Planetary Science Letters*, 412, 77-87

ポスター | R3：高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3：高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3P-07] 沈み込み帯の高温高圧下における炭化水素の化学反応に対する無機鉱物の影響

*篠崎 彩子¹、永井 隆哉¹、三村 耕一² (1. 北海道大学、2. 名古屋大学)

キーワード：カンラン石、蛇紋岩、炭化水素、高温高圧、沈み込み帯

地球表層から地球深部へと炭素が供給される唯一の領域である沈み込み帯は、全地球規模での炭素循環を理解する上で特に重要な領域である。海洋底堆積物に含まれる有機物は、炭酸塩鉱物と並ぶ重要な炭素のリザーバーと考えられるが、沈み込み帯の高温高圧条件における有機物の挙動には未解明の点が多い。本研究では、堆積物有機物の重要な構成要素であり、沈み込み帯での存在が指摘されている複数の炭化水素を対象に、深さ25 km程度に相当する温度圧力条件での高温高圧実験を行い、特に炭化水素の化学反応に対する共存鉱物の影響に着目して、無機鉱物と有機物双方を対象とした化学分析を行った。高温高圧実験には外熱式ピストンシリンダーを用いた。0.5 GPa・300-400°Cにおいて、反応時間を48時間として高温高圧実験を行った。出発物質は炭化水素として、直鎖アルカンの n -ペンタデカン($C_{15}H_{32}$ 以下 n - C_{15})、 n -ペンタコサン($C_{25}H_{52}$ 、以下 n - C_{25})と環状炭化水素のシクロヘキサン(C_6H_{12})、ベンゼン(C_6H_6)を用いた。岩石・鉱物試料としてかんらん石(San Carlos olivine、forsterite)と蛇紋岩を用いた。炭化水素と岩石・鉱物試料をそれぞれ重量比が約1:4の割合で混合して出発物質として用いた。テフロンもしくは金のカプセルに封入した出発物質を高温高圧下で反応させた後、常温常圧へと回収した。シクロロメタン溶媒中でカプセルを開封して溶媒に可溶性成分を抽出したのち、メンブレンフィルターを用いて不溶性物質と分離した。可溶性物質はガスクロマトグラフ質量分析(GC/MS)、無機鉱物を含む不溶性物質はラマン分光分析、粉末X線回折(XRD)測定により評価した。 n - C_{25} を出発物質とする実験では、0.5 GPa、300°C、320°Cにおいて、San Carlos olivine、forsterite、蛇紋岩と共存する条件では顕著な n - C_{25} の減少とglassy carbonの生成が観察された一方で、短鎖アルカンの生成は観察されなかった。C-C結合のクラッキングが進行するより先に n - C_{25} の脱水素反応が進行することを示している。熱クラッキングに先行するglassy carbonの生成は、石英やコランダム共存下では観察されなかった(Shinozaki 2023, Shinozaki et al., 2025)こと、反応後のXRD測定やラマン分光分析からは出発物質以外の鉱物は観察されなかったことから、かんらん石や蛇紋岩構成鉱物の触媒的な作用によって脱水素反応が促進されたと考えられる。San Carlos olivine共存下におけるglassy carbonの生成は、出発物質が n - C_{15} 、 n - C_{25} の直鎖炭化水素の場合では進行しやすい。一方で、環状炭化水素のシクロヘキサン、ベンゼンでは明確なglassy carbonのラマンスペクトルが得られなかったことから、炭化水素の分子構造がglassy carbonの生成に影響を与えと考えられる。以上の結果から、沈み込み帯において、石英やコランダムに富む堆積物起源のスラブでは堆積物有機物の脂肪族成分においてC-C結合の熱クラッキングが進行し、低分子の炭化水素が生成しやすいが、かんらん石や蛇紋岩に富む環境では脂肪族成分での脱水素反応が進行しやすいと考えられる。

ポスター | R3: 高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3: 高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3P-08] 還元的なC-H-O流体共存下におけるFeを含むマグネサイトの高温高压安定性および分解相のFe含有量*川村 英彰¹、大藤 弘明²、西原 遊³ (1. 東京大・先端研、2. 東京大、3. 愛媛大・GRC)

キーワード：炭酸塩、C-H-O流体、含Feマグネサイト、フェロペリクレーヌス、ダイヤモンド

炭酸塩鉱物は海洋地殻に沿って沈み込み、地表から深部マントルに炭素を供給する重要な炭素物質の1つである。特にMg炭酸塩のマグネサイトは、地球深部の幅広い温度圧力下において安定であり、マントル深部への炭素輸送を担う最も重要な炭酸塩であると考えられてきた[e.g., Isshiki *et al.* (2004); Solopoa *et al.* (2015)]。近年我々は、主にCH₄とH₂Oから構成される還元性のC-H-O流体が存在する場合、マグネサイトの安定性が著しく変化することを見出した。本研究では新たにFeを含むマグネサイトを用いて、還元的なC-H-O流体共存下における高温高压安定性の検討および分解相のFe含有量に着目した分析を実施した。

高压実験は愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）に設置されたマルチアンビル高压発生装置を使用し、出発物質としてオーストラリアZillertal産の含Feマグネサイト[(Mg_{0.864}Fe_{0.128}Ca_{0.005}Mn_{0.003})CO₃]とステアリン酸を用いた。ステアリン酸は高压下で熱分解するとH₂OとCH₄を1:4のモル比率で生成する[Yamaoka *et al.* (2002)]ため、試料カプセル中で含Feマグネサイトと還元的なC-H-O流体を共存させることができる。実験は10 GPaおよび17 GPa、温度は800-1000°Cで実施し、回収試料はAr⁺イオンビームを用いたイオン研磨により試料室断面を作成した後、微小部XRD、SEM-EDSによって回収試料の相同定および化学分析を行った。

回収試料分析の結果、含Feマグネサイトは、Feを含まないマグネサイトと同様に無水系と比較して安定性が大きく低下し、10 GPa, 17 GPaいずれの圧力においても分解してFeを含むブルーサイトを生成した。17 GPa 1000°Cの試料では、含Feマグネサイトの一部が溶融したことを示す急冷組織が観察され、未分解の含Feマグネサイト中にはFeとMgの不均質が生じていることも確認された。ブルーサイトのFe濃度には若干の不均質が存在し、急冷組織中のブルーサイトの樹状結晶は出発物質よりも高い値(Fe#~0.14)を示すのに対して、炭酸塩メルトと共存する固相として晶出したブルーサイト結晶では低い値(Fe#~0.08)を示すことが分かった。一方で、10 GPa, 800°Cでは、含Feマグネサイトの溶融は確認されず、分解相のFe濃度は出発物質と比較して高く(Fe#~0.16)になっていた。この結果は、試料カプセル内の温度勾配に基づく、含Feマグネサイトの融解と分解で生じた流体とそれと共存するブルーサイト、さらには急冷時に生成したブルーサイトと分離した流体の間での複雑なFeの分配・濃集を反映しているといえる。まだ慎重に検討を進める必要はあるが、このような含FeマグネサイトとCH₄に富んだ流体の反応によって生じるFeを含むブルーサイトは、最終的に脱水してフェロペリクレーヌスとなると考えられ、天然の超深部起源ダイヤモンドに包有されるフェロペリクレーヌスの幅広いFe含有量[Kaminsky (2012)]を説明する手がかりになる可能性がある。

ポスター | R3: 高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3: 高圧科学・地球深部

◆研究優秀発表賞エントリー

12:30 ~ 14:00

[R3P-09] 氷天体内部における H_2O - NH_3 系高圧氷相の安定性と圧縮挙動

*竹内 萌々子¹、境 毅¹、門林 宏和²、佐野 亜沙美³、町田 真一⁴ (1. 愛媛大学・GRC、2. JASRI、3. JAEA、4. CROSS)

キーワード：氷Ⅶ相、DMA(Disordered molecular alloy)、アンモニア水和物

水とアンモニアは巨大氷惑星や衛星などの氷天体を構成する主要構成成分であり、これまでに H_2O - NH_3 系においてはアンモニア水和物 (AMH)、半水和物 (AHH)、二水和物 (ADH)、三水和物 (ATH) といった定比水和物相が報告されている (Loveday and Nelmes, 2004; Li et al., 2019). さらに最近では16 GPa, 750 Kの高圧高温下で水をより多く含む新規相 ($\text{NH}_3:\text{H}_2\text{O}=1:6$) が新たに報告された (Mondal et al., arXiv). AMHおよびADHの室温圧縮実験では約4 GPa以上でAHH-IIと氷Ⅶ相に分離することが知られている. 一方、低温圧縮実験ではDMA(Disordered molecular alloy) 相と呼ばれる水分子とアンモニア分子が相互置換した固溶体の存在が報告されている (Wilson et al., 2015). このことから定比化合物としての水和物だけでなく、固溶体として連続的な組成変化を理解することは、氷天体の内部構造や進化過程を議論する上で重要であると考えられる. 通常、氷相形成時においてイオンは氷格子に取り込まれず排除される特徴を持つ. しかし、Klotz et al. (2016) の塩 (LiCl , LiBr) 含有氷相の高圧実験では、氷格子内に塩が存在する可能性が示唆された. そこで室温圧縮において分離生成した氷Ⅶ相も同様にアンモニア分子が部分的に“固溶”(DMA化)する可能性に着目した.

本研究では、室温圧縮で分離生成されるAHH-IIおよび氷Ⅶ相の圧縮挙動から、氷Ⅶ相へのアンモニア分子の固溶の有無を検証した. また、 NH_3 aq. (10 wt%) 試料によるDMA単相の形成可否を検証した. NH_3 aq. (28–30 wt%) および ND_3 aq. (25 wt%) を用いた室温圧縮実験には、Diamond anvil cell (DAC) (Run AW14) およびParis–Edinburgh press (Run AW19) を用いた. 一方、 NH_3 aq. および ND_3 aq. (ともに10 wt%) を用いた低温圧縮実験には、DAC (Run AW15) およびMito cell (Run AW20) を用いた. 試料中のアンモニア成分の気化を防ぐため、AW14では約150 K、AW15, 19では約230–240 Kに予冷した溶液およびアンビルを用いて液体状態で試料充填を行った. 一方、AW20では試料のみ冷却し、試料充填を行った. 充填後、AW14, 19では室温下で約20 GPaまで加圧し、AW14では約400 Kで適宜アニーリングを行った. 低温圧縮実験では、AW20では約80–85 K、約4 GPaまで加圧し、AW15では約80 K、約10 GPaまで加圧後、室温下で約30 GPaまで加圧した. 加圧速度に関して、DAC実験では1 GPaあたり数秒程度という急速圧縮を行ったのに対し、Paris–Edinburgh pressやMito cellでは同等の加圧に2~5分を要した. 作成した試料についてSPring-8 BL10XU (Run AW14, 15), J-PARC BL11 (Run AW19, 20)にてX線・中性子線回折測定を行い、格子定数を決定した.

AW14, NH_3 aq. (28–30 wt%) の室温圧縮実験では2相分離が確認され、かつ、氷Ⅶ相が約4.5 %体積膨張し、約10 mol%のアンモニア分子の固溶が確認された. 一方、AW19では体積差は約0.18 (2) %であり、十分な固溶は確認されなかった. 室温圧縮にてゆっくり加圧した場合は分子が十分に再配列し、熱力学的に安定な相が形成される. 一方、急速加圧では分子の再配列が追いつかず、準安定相が形成される可能性がある. このため、室温では加圧速度によって生成相が変化すると考えられ、加圧速度がアンモニア含有氷の形成に起因する可能性が考えられた. NH_3 aq. および ND_3 aq. (ともに10 wt%) を用いた低温圧縮実験では、AW15において体積が10 mol%理想体積線と一致し、10 wt%試料でもDMA単相が形成可能であることが示された.

AW20では低温下約2.5 GPaの氷Ⅷ相安定領域にて氷Ⅶ相を確認した. 本来安定ではない温度圧力下で氷Ⅶ相が確認されたのは、アンモニアが氷格子内に入ることによって局所的な構造変化が起きたと考えられる. 低温下では分子拡散が抑制されるため、加圧速度よりも分子移動の遅さが相転移を支配する. その結果、加圧速度による生成相の違いが生じにくくなると考えられる.

DMA単相の形成過程において、低温下ではアンモニア成分が氷格子内に固溶することで、Ice VII相が準安定的に保持された可能性が考えられる。

ポスター | R3：高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3：高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3P-10] ブルーサイトの高温高圧下中性子回折実験と水素同位体効果

*佐野 亜沙美¹ (1. 日本原子力研究開発機構)

キーワード：ブルーサイト、中性子回折、高温高圧

層状水酸化物のブルーサイト ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) は、沈み込む海洋プレートにおける含水鉱物のアナログ物質として広く研究対象となってきた。先行研究では、ブルーサイトと水の間の同位体分配係数に圧力効果が存在することが報告されており、これは $\text{Mg}(\text{OH})_2$ と $\text{Mg}(\text{OD})_2$ の単位格子体積の差が圧力とともに増大することと関連づけて議論されてきた (Horita et al., 1999, 2010)。しかし、これまでのブルーサイトの水素位置を含む結晶構造に関する研究は常温高圧下や低温常圧下での実験に基づいており、実際の地球内部条件における同位体効果とその原因を議論するためには、温度と圧力の両パラメータを考慮したその場観察が必要である。本研究では、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ と $\text{Mg}(\text{OD})_2$ の結晶構造を直接比較することを目的として、高温高圧条件下におけるブルーサイトの中性子回折実験を行った。また、両者の体積差から換算分配係数を導出し、水素同位体分配係数の温度・圧力依存性を評価することで、地球深部の水循環に伴う水素同位体組成の不均一が生じるかを検討した。

実験はJ-PARC MLFの超高圧中性子回折装置PLANET (BL11) にて行った。試料には水熱合成した $\text{Mg}(\text{OH})_2$ または $\text{Mg}(\text{OD})_2$ を用い、6軸型マルチアンビル装置を用いて最大12 GPa、1000 Kまでの高温高圧条件下で中性子回折パターンを取得した。試料はMA6-6セル内の白金カプセルに密封し、圧力はPtの格子定数を用いて求めた。得られた回折データに対してリートベルト解析を行い、原子位置の精密化を行うとともに、降温・減圧過程での測定を通じて等温圧縮曲線を取得し、格子体積に与える同位体効果を調べた。実験では加圧に伴い回折パターンは著しくブロードニングしたが、高圧下における加熱によりシャープになる様子が観測された。常温における格子体積の差は圧力とともに小さくなる傾向にあり、それに伴い換算分配係数の圧力依存性も小さくなることが示唆される結果となった。

ポスター | R3：高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3：高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3P-11] 高速衝突条件下の蛇紋石の構造進展その場観察

*梅田 悠平¹、瀬戸 雄介²、富岡 尚敬³、有馬 寛¹、犬伏 雄一^{5,6}、児玉 了祐^{7,4}、宮西 宏併⁶、中村 浩隆^{7,4}、尾崎 典雅^{7,4}、佐藤 友子⁸、富樫 格^{5,6}、藪内 俊毅^{5,6}、矢橋 牧名^{5,6}、関根 利守⁹、奥地 拓生¹ (1. 京大・複合研、2. 大阪公立大・院理、3. 海洋研究開発機構、4. 阪大・レーザー研、5. 高輝度光科学研究センター、6. 理研・SPRING-8センター、7. 阪大・院工、8. 広大・院理、9. 北京高圧科学研究センター)

キーワード：蛇紋石、衝撃圧縮、非晶質化

蛇紋石は含水小惑星に普遍的に存在する主要な含水鉱物であり、その結晶構造中に10 wt%を超えるH₂Oを水酸基として保持している。これらの小惑星は衝突による衝撃圧縮と圧力解放過程を繰り返し経験してきたことから、衝突過程における蛇紋石の構造変化を理解することは、惑星形成過程における水の保持や脱水、および再分配の素過程を考察する上で重要である。さらに、RyuguやBennuに代表される含水小惑星からのリターンサンプルについて、過去に経験した衝突による物質進化や衝撃強度（衝突速度・衝撃圧力）を読み解くための鉱物学的指標としても必要不可欠である。本研究では、蛇紋石グループの一種であるアンチゴライトを対象として、衝撃圧縮および減圧過程における結晶構造変化のその場観察を行った。実験はSpring-8, SACLA施設のBL3EH5において、ナノ秒レーザーによる衝撃圧縮とX線自由電子レーザーによる時間分解X線回折を組み合わせて実施した。また、衝撃波速度を同時計測することにより、各ショットにおける衝撃圧力を決定した。本実験における衝撃圧力は最大106 GPaであった。実験の結果、衝撃圧縮中のアンチゴライトは44 GPa（衝突速度はおよそ4.7 km/sに相当）までは結晶性を保持する一方、66 GPa（6.4 km/s）以上では非晶質化することが分かった。この非晶質化は衝撃圧縮下で数ナノ秒以内起こり、その後の10ナノ秒程度の減圧過程においても非晶質状態のままであった。衝撃回収実験で報告されている無水鉱物（MgSiO₃やMg₂SiO₄）の結晶化は観察されなかった（Sekine et al., 2015; Tomioka et al., 2007）。したがって、少なくとも本実験の時間スケールにおいては、アンチゴライトの主要な衝撃応答は、非晶質化であることが明らかとなった。さらに、圧力解放曲線の計算結果、ピーク衝撃圧力が60 GPaからの減圧時の圧力温度経路はMgSiO₃やMg₂SiO₄高压相の安定領域を横切ることが示された。このことは、衝撃により生成した非晶質物質が、衝撃持続時間や冷却速度などの条件によっては、減圧過程で高压相として結晶化する可能性を示している。一方で、ピーク衝撃圧力が80 GPa以上の場合は、常圧付近まで液相線より高温側を通ることが示された。本研究によって、衝撃圧力と蛇紋石の構造進化の関係を明らかにした。この結果は、RyuguやBennuなどの含水小惑星のリターンサンプルに記録された衝撃変成組織の形成条件を理解し、衝突強度や熱履歴を読み解くための指標となることが期待される。さらに、蛇紋石に富む含水小惑星が高速衝突を受けた際、構造水はナノ秒程度の時間内では単純に脱水・散逸するだけではなく、非晶質化、融解、減圧過程での結晶化を通じてガラスなどへ再分配される可能性があることを示唆している。

ポスター | R3: 高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3: 高圧科学・地球深部

◆研究優秀発表賞エントリー

12:30 ~ 14:00

[R3P-12] 410 km不連続面直上付近でのかんらん石の最大含水量の実験的検討

*渡辺 豊生¹、川添 貴章¹、清水 健二²、牛久保 孝行²、富岡 尚敬²、井上 徹¹ (1. 広島大・院先進理工、2. JAMSTEC)

キーワード：かんらん石、上部マントル、含水量、マルチアンビル

【はじめに】

かんらん石は地球内部の深さ約410 kmまでの上部マントルの主要構成鉱物である。一方、地球内部の深さ約410~660 kmの領域はマントル遷移層と呼ばれ、多量の水を保持し得る。これらの上部マントルとマントル遷移層の境界は、410 km不連続面である。その直上付近には地震波速度の低速領域が見つかっており、部分熔融層であると解釈されている (Yang & Faccenda, 2022)。この部分熔融層は、水を含んだマントル遷移層の岩石が上部マントルへ上昇し、岩石中の水がかんらん石に溶解しきれないために形成されたとする含水熔融モデルが提唱されている。そのため、上部マントル深部に相当する高温高压下においてかんらん石の最大含水量を正確に決定することは、地球内部のマグマ生成と水の運搬におけるかんらん石の役割を明らかにするうえで非常に重要である。高温高压下におけるかんらん石の含水量は、これまでに複数の先行研究で報告されているが (例えば、Kohlstedt et al. 1996, Smyth et al. 2006)、その値は同じ温度圧力条件でも大きく異なり、最大含水量は約0.89 wt%と報告されている。本研究では、そのばらつきの原因を明らかにし、かんらん石の最大含水量を精密に決定することを目的として、実験的研究を行った。

【手法】

含水かんらん石の高温高压合成実験は、川井型マルチアンビル高圧発生装置MAPLE600を用いて行った。実験条件は、12 GPa、1100~1400 °C、保持時間30分~6時間とした。出発物質には、 Mg_2SiO_4 に H_2O を5 wt%含むように $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 MgO 、 SiO_2 の粉末を混合して調製した粉末混合体を用いた。出発試料はAuPdカプセルに封入し、1つのセルアセンブリ内に2つのカプセルを封入した。回収した2つのカプセルのうち、1つは鏡面研磨を行った後、走査型電子顕微鏡 (SEM) による組織観察およびEPMAによる化学組成分析を行った。このEPMA分析済みの試料は、今後、二次イオン質量分析法 (SIMS) 分析に用いる予定である。もう1つの試料は、フーリエ変換赤外分光法 (FTIR) 分析に用いた。含水量は、EPMA測定におけるトータル欠損値およびFTIR分析により推定した。EPMAでは、本研究が揮発性成分として H_2O のみを含む閉鎖系実験であることから、かんらん石のトータル欠損値は H_2O 成分に由来すると仮定した。そのため、得られたトータル欠損値に対して、 H_2O による特性X線の吸収を考慮したEPMA吸収補正 (ZAF補正) を施した。FTIR分析では、3100~3700 cm^{-1} 付近の赤外吸収バンドを用いて H_2O 量を評価した。スペクトルはOH吸収バンドの外側を基準にスプラインベースライン補正を行い、得られた吸収面積を試料厚さで規格化した。含水量の計算にはPaterson (1982) の較正式を用い、非偏光測定であるため配向係数 $\xi = 1/3$ を仮定した。ただし、かんらん石のFTIR含水量は用いる較正式によって大きく変化する。Bell et al. (2003) の較正式を用いた場合、Paterson (1982) の較正式に比べて含水量が約3.5倍高く見積もられることが報告されている。さらに、Koga et al. (2003) では、SIMSによる含水量がBell et al. (2003) の較正式で求めたFTIR値に近いことが示されている。そのため本研究では、まずPaterson (1982) 式により含水量を算出し、先行研究との比較ではその値を3.5倍したBell et al. (2003) 相当値を用いた。なお、図中のKohlstedt et al. (1996) の含水量はPaterson (1982) の較正式に基づくため、3.5倍した値を示した。一方、Smyth et al. (2006) の含水量はBell et al. (2003) の較正式に基づく値である。

【結果と考察】

本研究の最大含水量は、12 GPa、1250 °C、30分保持の試料で検出された0.67 wt%であった。

本研究では、先行研究と同様に、1250 °Cから1400 °Cへの温度上昇に伴ってかんらん石中の含水量が低下した（図）。図では、本研究のFTIR値をBell et al. (2003) 相当値として示し、Kohlstedt et al. (1996) およびSmyth et al. (2006) の値と比較した。一方で、本研究の含水量は、先行研究より全体的に低い値を示した。先行研究では主に偏光赤外分光法に基づく較正式を用いて含水量が決定されているのに対し、本研究ではEPMAのトータル欠損値に基づく推定に加え、FTIR分析による含水量評価も行った。EPMAのトータル欠損法はH₂Oを直接測定しないため、補正条件や微小な不均質性の影響を受ける可能性がある。また、FTIRによる含水量も、使用する較正式や測定条件、バックグラウンドの引き方によって値が変化するため、先行研究との絶対値の比較には注意が必要である。本研究と先行研究の差については、先行研究で測定された試料中に含水鉱物や流体の微小包有物が存在していた可能性なども考えられる。今後は、SIMS分析により水素量をより直接的かつ定量的に測定し、EPMAおよびFTIRによって得られた含水量と比較することで、本研究における含水量評価の妥当性を検討する予定である。

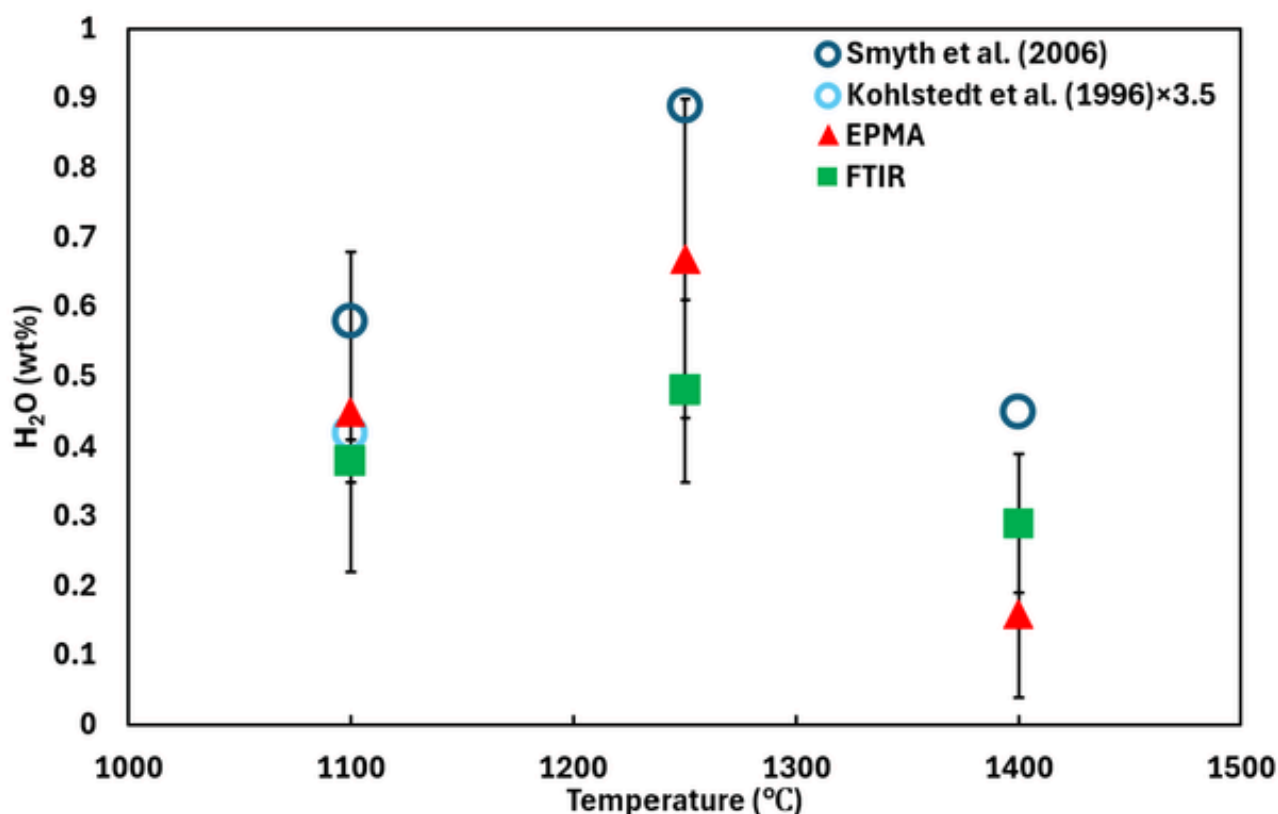


図 かんらん石の含水量の温度依存性および本研究と先行研究との比較

ポスター | R3：高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3：高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3P-13] Sound velocities of (Mg,Fe)SiO₃ bridgmanite at simultaneous high-pressure and high-temperature

*Steeve Greaux¹, Donghoon Kim², Sho Kakizawa³, Yoshio Kono⁴, Itaru Ohira⁵, Yoshihiro Inoue⁴, Jie-jun Jing¹, Minsu Jang², Gunhee Lee², Ryoichi Nakada⁶, Noriyoshi Tsujino³, Yuji Higo³ (1. Ehime University, 2. Korea University, 3. JASRI, 4. Kwansei University, 5. Gakushuin University, 6. JAMSTEC)

キーワード：High pressure and High temperature、Bridgmanite、Iron speciation、Elastic Wave Velocities、Lower Mantle

Bridgmanite (Brg) is the most predominant mineral of the Earth's lower mantle. A precise knowledge of the elasticity of Brg at the pressure and temperature conditions of the Earth's lower mantle is therefore essential for interpreting seismic models at depth, which would in turn give important clues about chemical composition and internal structure of our planet's deep interior. Regardless of the bulk silicate Earth (BSE) model, (Mg,Fe)SiO₃ Brg accounts, with (Mg,Fe)O ferropericlase, for the main deposit of Fe in the lower mantle. While previous studies agree that incorporating a few wt.% FeO decreases Brg's adiabatic bulk modulus (K_S) (Chantel+ 2012, Fu+ 2018, Mashino+ 2020), its effect on the shear modulus (G) remains debated. Some literature suggests G decreases with Fe incorporation, whereas others conclude it is mostly unaffected (Chantel+ 2012, Fu+ 2018, Criniti+ 2021). Disagreements between previous studies likely stem from the fact that bridgmanite specimens with varying chemical compositions and Fe speciation (e.g. $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$) were investigated using different techniques, each carrying its own experimental uncertainties and technical limitations. Ultimately, due to these inconsistencies and a scarcity of simultaneous high-pressure and high-temperature data, the influence of iron on seismic velocities remains poorly constrained. Here we present elastic wave velocities measurements on (Mg_{1-x},Fe_x)SiO₃ bridgmanite aggregates ($x=0.00, 0.04, 0.12$) with a $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}=0.25(1)$, by a combination of in situ ultrasonic interferometry, X-ray radiography and diffraction techniques at high pressure and high temperature in the 1500-ton multianvil press apparatus SPEED1500 at the beamline BL04B1 in SPring-8 (Japan). Results showed V_P and V_S are generally consistent with previous studies with $x=0.00-0.05$ (Criniti+ 2021, Fu+ 2018, Chantel+ 2012). New shear velocity data for $x=0.12$ stands in between those of Brg single crystals with $x=0.09$ and $x=0.18$ (Mashino+ 2020) with differences that may be explained by a varying Fe speciation. Based on our results we will discuss the oxidation state of the lower mantle and propose a thermodynamic model to estimate its bulk Mg/Si composition based on a comparison of seismic models and high-temperature elastic wave velocity measurements.

ポスター | R3：高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3：高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3P-14] SPring-8 BL04B1における高温高圧下における弾性波速度測定実験の技術開発とその現状

*柿澤 翔¹、肥後 祐司¹、辻野 典秀¹、Gréaux Steeve²、河野 義生³、大平 格⁴、石井 貴之⁵ (1. 高輝度光科学研究センター、2. 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター、3. 関西学院大学、4. 学習院大学、5. 岡山大学惑星物質研究所)

キーワード：高圧、弾性波速度、SPring-8 BL04B1

放射光X線その場観察と超音波パルス法を組み合わせた高温高圧下における弾性波速度測定は、地球内部物質の物理特性を決定するための主要な手法である。測定された速度データは、地震波観測データと直接比較することが可能であり、地球深部の化学組成や不連続面の原因物質を特定するための重要な物性制約を与える。特に、大型放射光施設SPring-8のビームラインBL04B1に設置された大容量マルチアンビル高圧装置（SPEED-1500）を用いた測定システムは、これまでもmajorite garnetの測定を通じたマントル遷移層の主要物質構成の決定（Irifune et al., 2008, Nature）や、下部マントル条件におけるdavemaoiteの弾性波速度測定に基づいた玄武岩質地殻の深部存在示唆（Gréaux et al., 2019, Nature）など、地球深部物質科学の進展において多くの成果を上げてきた。

本研究では、同ビームラインにおける弾性波速度測定実験のさらなる高圧・高温化、および測定精度の向上と実験の効率化、測定操作に伴うヒューマンエラーの排除を目的として、以下の技術開発を行ってきた。第一に、高圧力下での測定のため、テーパー付きアンビルを導入した（Ishii et al., 2016）。アンビル側面のギャップ形状を工夫したテーパー設計を採用したことにより、加圧時における圧力発生効率の改善が達成され、従来よりも高圧下での弾性波速度測定が可能となった。第二に、高温実験時における測定の安定化を達成するため、圧電素子の冷却システムを新たに導入した。試料部の加熱に伴いアンビルを伝わってアンビル後端に接着された圧電素子へと熱が伝導する。この熱的影響に対し、外部から冷却空気を直接圧電素子周辺へと吹き付ける冷却機構を設けることで、圧電素子の過熱を防ぎ、超音波シグナル強度の減衰を防止した。第三に、高解像度のカメラシステムを開発した（Kondo et al., 2024）。本システムでは、X線透過画像を用いた試料寸法測定の精度を高めるため、プレス装置本体の直後に設置可能な専用ステージを開発し、撮影倍率の向上を図った。さらに、取得された画像データから実際の試料長を正確に解析するため、ピクセルキャリブレーション方法を構築し、試料長の決定精度の向上をした。第四に、実験におけるヒューマンエラーの防止と測定作業効率の向上のため、測定の自動化を目的としたシーケンシャルソフトを開発した。従来は個別に手動で実行されていた試料の密度の決定と圧力の決定を目的としたX線回折測定、試料長を測定するためのX線透過像測定、およびトラベルタイムを決定する超音波測定について、これら一連の異なる測定プロセスを統合し、事前に設定したシーケンスに従って自動で順次実行するプログラムを作成した。これにより、測定者の手動操作に起因する設定ミスや測定データの保存漏れといったヒューマンエラーを排除し、安定したデータ収集スキームを確立した。第五に、実験後に得られる多様かつ膨大なデータの解析効率を向上させるため、超音波の波形データとX線画像データなどをそれぞれ解析するソフトウェアを新たに整備した。これにより、解析作業の標準化と迅速化が達成された。

これらのシステム開発および整備の結果、現在では、室温では40 GPa、高温下においては30 GPaに達する高温高圧条件下において、bridgmaniteをはじめとするケイ酸塩鉱物の弾性波速度の測定が可能となっている。本発表では、これらの技術開発の具体的なシステム構成と現在の稼働状況、および実験の結果について報告する。

ポスター | R3: 高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3: 高圧科学・地球深部

◆ 研究優秀発表賞エントリー

12:30 ~ 14:00

[R3P-15] かんらん石-Fe-Sメルト混合系の弾性波速度：火星マントル底部のメルト層に関する考察

*塩原 美緒¹、坂巻 竜也¹、柿澤 翔²、肥後 祐司²、鈴木 昭夫¹ (1. 東北大学、2. JASRI)

キーワード：弾性波速度、火星核-マントル境界、かんらん石-Fe-Sメルト混合系

NASAのInSightミッションによる火星地震観測により、火星内部構造が推定され、核-マントル境界（Core-Mantle Boundary: CMB）直上には周囲より地震波速度の低い層が存在することが示唆された。この低速度層は溶融層である可能性が高いと考えられているが、その組成や状態、成因については未だ十分に理解されていない。火星の外核は主に液体のFe-Sであると考えられており、本研究では、コア由来のFe-Sメルトとマントルの混合層が火星マントル底部低速度層の候補となり得るかを検討する。本研究では、かんらん石-Fe-Sメルト混合系を対象として、高温高圧下における縦波速度（ V_p ）の測定を行い、Fe-Sメルト量が弾性波速度に及ぼす影響を評価するとともに、火星マントル底部に存在すると推定される低速度層への適用可能性を検討した。試料には、かんらん石粉末とFe-S粉末を所定の割合で混合した出発試料を用いた。高温高圧実験は、大型放射光施設SPring-8のBL04B1ビームラインに設置された川井型マルチアンビル高圧発生装置SPEED-1500で実施した。約2.6 GPaの圧力条件下で試料を溶融・保持し、パルスエコーオーバーラップ超音波法により、 V_p を測定した。その結果、 V_p はFe-Sメルト量の増加に伴って非線形に低下することが示された。さらに、実験で得られた V_p -メルト量の関係を火星CMB条件へ外挿し、InSightによる地震波観測および密度モデルと比較した結果、火星マントル底部の低速度層は、ケイ酸塩鉱物とFe-Sメルトが共存する高メルト率の混合層によって説明できる可能性が示された。

ポスター | R3: 高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3: 高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3P-16] 鉄金属液体－ケイ酸塩メルト間における強親鉄元素の分配に軽元素・温度・圧力が与える影響*近藤 望¹、浅沼 尚²、芳野 極¹ (1. 岡山大学、2. 京都大学)

キーワード：強親鉄元素、Late Veneer、核－マントル分離、川井型マルチアンビルプレス

強親鉄元素 (Highly siderophile elements, HSE) は白金族元素 (Os, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd) と Re, Au から構成され、ケイ酸塩相と金属相が共存する際、大部分が金属相に分配される。この特徴から、強親鉄元素は岩石惑星の核－マントル分離や、その後の核－マントル相互作用の強力なトレーサーとして取り扱われてきた。地球については、コンドライト隕石や未分化上部マントルの HSE 組成分析を行った研究 (例えば、Fischer-Godde et al., 2010; Becker et al., 2006) や、鉄金属液体－ケイ酸塩メルト間における強親鉄元素分配を高温高圧実験で調べた研究 (例えば、Mann et al., 2012) などから、「マントルにおける HSE の過剰」が長きにわたる未解決問題となってきた。この「マントルにおける HSE の過剰」の重要な点として、未分化上部マントルの HSE 濃度が、高圧実験により求められた分配係数から推定された、核分離後マントルの HSE 濃度よりも高くなること、さらに、HSE それぞれの相対濃度比が、未分化上部マントルとコンドライト隕石で似た値を示すことが挙げられる。そして、「マントルにおける HSE の過剰」を説明する説として、核－マントル分離後にコンドライト隕石と同様の HSE 組成を持った物質が地球に降り積もったとする、「Late Veneer」仮説が長年支持されてきた。一方で、先行研究で決定された鉄金属液体－ケイ酸塩メルト間における HSE の分配係数それ自体が不確定要素を孕んでいる。先行研究では HSE を過剰に添加した (wt.% オーダー) 条件で分配係数を決定しており (Mann et al., 2012)、こうした条件ではヘンリーの法則に則った分配係数が得られないことが示唆されている (Zhang & Li, 2021)。我々のこれまでの研究では、HSE 濃度を wt.% オーダーから ppm オーダーまで変化させ、6-21 GPa の圧力で鉄金属液体－ケイ酸塩メルト間における HSE の分配係数を決定した。この研究から、HSE 濃度が低い条件において、HSE 分配係数は互いに似た値を持つことが判った。この分配経緯数から核分離後の地球マントルにおける HSE 組成を計算すると、HSE の相対濃度比はコンドライト的となった。一方で、未分化上部マントルの HSE 濃度と比べると、核分離後マントルの HSE 濃度は一桁ほど低かった。この差が埋まるかどうかを検証するため、本研究では、HSE 分配への圧力・温度・軽元素の影響を高温高圧実験によって調べた。出発物質には、各 HSE を 1000 ppm 添加した鉄－HSE 合金と、コンドライト組成から核の金属成分を除いたマントル組成 (Andrault et al., 2018) の粉末を合成した。高温高圧実験には岡山大学惑星物質研究所の川井型マルチアンビル装置を用いた。回収試料の分析には、岡山大学惑星物質研究所の FE-EPMA と京都大学人間・環境学研究科の LA-ICP-MS を使用した。予察的結果として、硫黄 (S) を入れた系と入れていない系では、硫黄の量に関わらず分配係数への影響は少ないことが判った。また、300°C 以上の上昇によって、HSE の親石性が一桁程度上がることが判明した。圧力については、高圧ほど親石性が抑えられる可能性が示唆されている。本発表では、HSE 分配について軽元素・温度・圧力の影響を詳細に述べるとともに、地球や月、火星における Late Veneer についても議論する。

ポスター | R3：高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3：高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3P-17] GHz超音波干渉法を用いた27 GPaまでのhcp-Feの縦波・横波速度

黒阪 紘志¹、*寺崎 英紀¹、米田 明²、河波 優輔¹、近藤 忠²、石田 遼真²、山崎 大輔³、平尾 直久⁴ (1. 岡山大・院環境生命自然、2. 大阪大・院理、3. 岡山大・惑星研、4. 高輝度光科学研究セ)

キーワード：hcp-Fe、縦波速度、横波速度、超音波干渉法、ダイヤモンドアンビルセル

GHz超音波干渉法は、ダイヤモンドアンビルセル(DAC)中の高圧下の金属試料の縦波・横波速度 (V_P , V_S)両方を直接測定することのできる数少ない手法の一つである(e.g., Spetzler et al. 1993, Yoneda et al. 2025)。本研究では、GHz超音波干渉法を用いて惑星固体コアの主要相と考えられるhcp構造を持つFe ϵ 相(hcp-Fe)の縦波、横波速度を、27 GPaの圧力条件まで測定した。速度測定は、岡大理学部設置のGHz測定装置を用い実施した。試料密度は、SPRING-8 BL10XUにてその場X線回折により測定した。

18–27 GPaにおける測定の結果、hcp-Feの速度は縦波速度=6.80(17)–7.19(34) km/s, 横波速度=3.75(16)–3.81(18) km/sが得られた。本結果を先行研究の結果と比較したところ、縦波速度が非弾性X線散乱法(e.g., Ikuta et al. 2022)やピコ・セカンド法(Decremps et al. 2014)による測定結果と2–8%の差で一致した。また横波速度については、核共鳴非弾性X線散乱法で得られたデバイ音速とデバイモデルを用いて算出された横波速度(Murphy et al. 2013)と1–3%の差で一致した。本研究で特筆すべきは、hcp-Feの横波速度を直接測定した点である。また得られたhcp-Feの縦波・横波速度と密度からhcp-Feの弾性定数を見積もった。18–27 GPaの測定圧力条件において、断熱体積弾性率 K_S =248–301 GPaと剛性率 μ =127–136 GPaが得られた。

ポスター | R3: 高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3: 高圧科学・地球深部

◆ 研究優秀発表賞エントリー

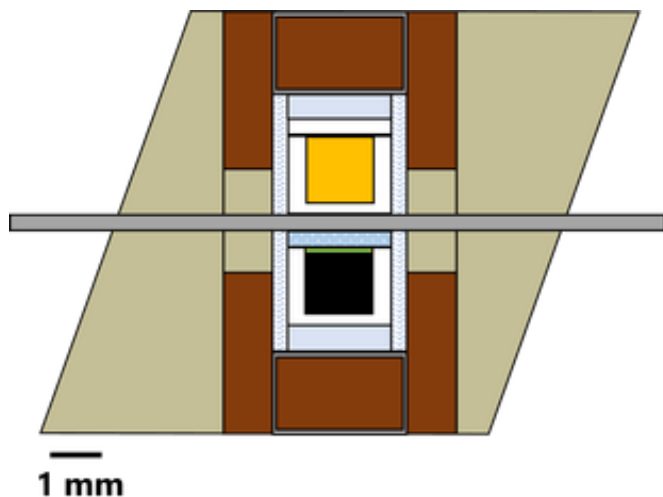
12:30 ~ 14:00

[R3P-18] 高温高圧下におけるhcp-Feおよびfcc-Niへの炭素の取り込み

*北川 朋玖¹、鍵 裕之¹、高野 将大¹、飯塚 理子²、内海 伶那³、齋藤 寛之³、辻野 典秀⁴、柿澤 翔⁴、肥後 祐司⁴
(1. 東大・院理、2. 早稲田大・教育、3. 量子科学技術研究開発機構、4. 高輝度光科学研究センター)

キーワード：高温高圧実験、X線回折、地球核、軽元素、炭素

地球核は鉄を主成分とするが、その密度は核の温度圧力条件下における純鉄の密度より有意に低く、この密度欠損は軽元素の取り込みによるものと考えられている。太陽系での存在度が最も高い水素は、高圧下で鉄の結晶構造中に侵入し単位胞体積を大きく膨張させ密度を低下させる(e.g., Machida et al, 2019)ことから、軽元素の有力な候補の一つとされている。さらに、Fe-X-H(X=Ni, Si)三元系では、X原子が水素による鉄の単位胞体積の膨張の効果を増大させることが報告されている(Shito et al., 2023; Mori et al., 2024)。先行研究では、高温高圧下で炭素を固溶させた鉄試料を出発物質として高温高圧実験を行い、水素と同様に炭素もhcp鉄の結晶格子中に侵入し、単位胞体積を膨張させることが報告された(Yang et al., 2019; Huang et al., 2022; Lai et al., 2025)。しかし、体積膨張の程度にばらつきがある点や常温の測定に限られている点など、炭素がhcp鉄の単位胞体積に与える効果は不確定な点が多い。本研究では、高圧下で水素による鉄の単位胞体積の膨張に炭素が与える効果を探ることを目標とし、高温高圧下でのFe-C二元系における炭素の挙動を調べた。本研究では、3種類の異なる出発試料（① Fe+1.5 wt.% graphite混合粉末、② Ni+1.1 wt.% graphite混合粉末、③ Fe+1.5 wt.% graphite混合粉末をアーク溶融した後に急冷して得たペレット）を用いた。アーク溶融はfcc鉄の固溶限界以下の炭素量で行った。高温高圧下X線その場観察は、SPring-8のBL04B1およびKEKのPF-AR, NE7Aで行った。圧力発生には、DIA型ガイドブロックシステムを備えた川井型マルチアンビル装置を用い、X線回折は $2\theta=6^\circ$ でのエネルギー分散法で測定した。炭素を含む試料と含まない試料を、同一セル内の別々の試料カプセル内に封入し（図1）、同一温度圧力条件下における単位胞体積の比較を行った。6-15 GPa, 300-1000 Kで、炭素の取り込みが単位胞体積へ与える影響の温度・圧力依存性を調べた。実験の結果、①と②を出発物質として用いた実験では、純粋な鉄およびニッケルと比較して有意な単位胞体積の膨張は見られず、結晶格子中の炭素取り込みは認められなかった。③のアーク溶融試料は、SEM-EDS（走査型電子顕微鏡－エネルギー分散型X線分光法）による観察により炭素が均質に分布している様子が観察されたが、X線回折の結果からはFe+Fe₃Cの2相が共存していた。これは、常圧下における鉄中の炭素の拡散係数が大きく、メルトからの急冷過程で炭化物が生成したためと考えられる。なお、③を出発物質として用いた実験においても、炭素の導入による鉄の単位胞体積の変化は確認されず、高圧下でFe + Fe₃C → Fe-Cの反応による炭素の取り込みは認められなかった。本研究では150 mm程度の比較的大きな粒径の鉄およびニッケル試料を用いたため、粒子中への炭素拡散に時間を要し、実験時間内に炭素の取り込みが十分に進行しなかった可能性がある。一方、高圧下では鉄中の炭素の拡散係数が低下することが知られており、クエンチ時の原子拡散が抑制され、炭化物の生成を伴わずに、炭素が準安定的に固溶した状態で試料を回収できることが期待される。今後は、粒径5 mm程度の鉄微粒子を用いることで炭素拡散に要する時間を短縮し、高温高圧下で炭素を固溶させて鉄試料を作製することを予定している。



- 熱電対 (W97%Re3% - W75%Re25%)
- 圧媒体 (Cr_2O_3 - doped MgO)
- 断熱材 (LaCrO_3)
- ヒーター (TiB_2 + BN composite)
- 圧力マーカー (NaCl + MgO)
- カプセル (hBN)
- スペーサー (MgO)
- セパレーター (hBN)
- 炭素を含まない試料
- 炭素を含む試料

ポスター | R3: 高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3: 高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3P-19] 高圧下におけるFe-N系の融解関係

*浦川 啓¹、大西 凜¹、柴崎 裕樹² (1. 岡山大学、2. 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所)

キーワード: 軽元素、窒素、惑星核、鉄メルト、鉄窒化物

地球の軽元素存在度の見積もりから窒素は他の軽元素に比べ地球全体で枯渇していることが提案されてきた (e.g., Marty, 2012)。これは“missing nitrogen”問題と呼ばれ、地球深部の窒素リザーバーの存在が示唆されている。高圧下で還元的な条件において窒素は親鉄元素としてふるまうことから、形成期の核マントル分離過程でコアに分配されることが期待される。このような観点から鉄-窒素系の高圧相関係の解明は重要な課題となっている。Fe₃NやFe₇N₃組成の鉄窒化物単体については融解曲線が100 GPa以上の圧力まで調べられているが (e.g. Kusakabe+, 2019), Fe-N系の融解関係に関する実験の報告1気圧でさえない。これは揮発性の高い窒素が高温で脱ガスするからである。われわれはマルチアンビル装置を用いた試料回収法実験と放射光X線その場観察から5 GPa付近でのFe-N系の相平衡関係を調べた。試料回収法の実験は岡山大学理学部の川井型マルチアンビル装置を用いて行い、回収試料の組織観察とEPMAによる化学分析から5 GPaにおけるFe-N系の融解関係を明らかにした。X線その場観察ではPFのキュービック型マルチアンビル装置を用いて7 GPa・1400 Kまでの条件でサブソリダス相の構造を調べた。出発試料にはα-Fe、とγ'-Fe₄N、ε'-Fe₃N_xの粉末混合物を用いた。X線その場観察から、N濃度10 at.%以下ではfcc構造のγ-FeN_x固溶体がサブソリダス相であり、15 at.%以上ではhcp構造のε-Fe₃N_x固溶体がサブソリダス相であると考えられる。いずれの相も窒素は鉄格子間の6配位空隙に存在する侵入型の固溶体である。ε-Fe₃N_x固溶体は低温では窒素の長距離秩序構造による超格子反射が認められるが、高温では確認されなかった。試料回収法からは5 GPa・1800 Kでγ-FeN_xとFe-Nメルトの共存が、1730 Kでε-Fe₃N_xとFe-Nメルトの共存が確認された。ソリダス-リキダスループは狭く、特にε-Fe₃N_x側では固相と液相の組成差はほぼなかった。Speelmanns+ (2018) は炭素を含む鉄合金メルトに溶ける窒素の最大溶解度を9 GPaまでの圧力で報告している。我々の実験で得られたε-Fe₃N_xと共存するFe-Nメルトの窒素濃度は彼らの報告する最大溶解度とほぼ同じである。一方、我々の回収試料には彼らの実験で認められた窒素流体が抜けた穴は観察されていない。純粋な鉄メルトの窒素最大溶解度はSpeelmanns+ (2018) の報告値よりも大きいと考えられる。

ポスター | R3: 高圧科学・地球深部

2026年9月25日(金) 12:30 ~ 14:00 | ポスター (336, 340, 341号室)

R3: 高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3P-20] 高圧下におけるアルカリ土類金属酸化物 (CaO, BaO) の金属化の検証

中村 悟¹、*境 毅¹、福田 脩斗²、中本 有紀²、清水 克哉^{2,1}、門林 宏和³ (1. 愛媛大・GRC、2. 阪大基極セ、3. JASRI)

キーワード：スーパーアース、トロイダル型ダイヤモンドアンビルセル、状態方程式、金属化

系外惑星のなかで地球の数倍から10倍程度の質量をもつ岩石型惑星はスーパーアースと呼ばれており、地球に類似した内部構造を仮定すると質量5倍の場合に核-マントル境界の圧力が650 GPaになると予想される(Seager et al., 2007). そのような地球よりも高い温度圧力環境に存在するマントル構成物質は地球マントルでは見られない化学組成、結晶構造を示すことが予想されている. 例えば, CaSiO_3 は地球マントルの温度圧力領域ではペロブスカイト構造が安定であるが, 600 GPa, 3000 Kでパイライト型 SiO_2 とB2構造の酸化カルシウム(CaO)に分解する. ここでCaO(B2)は400 GPa以上では金属化することが予想されている(Tsuchiya and Tsuchiya, 2011). CaOの金属化予想圧力を実験で発生することは困難であるが, 同じアルカリ土類金属酸化物である酸化バリウム(BaO)の金属化予想圧力は230 GPaとなり, より低圧力で金属化すると予想されている(Uludoğan et al., 2001). CaOでは理論計算の先行研究で110 GPa, 実験で135 GPaまで圧縮挙動が調べられており, 60 GPa付近でB1構造からB2構造に相転移することが報告されている(Vyas et al, 2023; Richet et al., 1988). また, BaOでは理論計算の先行研究で150 GPa, 実験で60 GPaまで圧縮挙動が調べられているが, CaOとBaOともに金属化予想圧力までの圧縮実験は行われておらず, 金属化の確認も行われていない.

本研究ではCaOとBaOについて金属化予想圧力付近までの状態方程式を決定するとともに, 試料の光学的応答や電気抵抗の変化による金属化の検証を行うことを目的として圧縮実験を行った. 圧力発生にはダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用い, SPring-8 BL10XUにおいてX線回折測定を行い圧力と試料の格子体積を決定した. CaOの状態方程式を決定する実験ではキュレット径10 μm のトロイダル形状のダイヤモンドアンビルを用いて350 GPaまで加圧し, 状態方程式を決定した. BaOについては状態方程式決定の実験と高圧下での電気抵抗測定実験を246 GPaまで, 光学的観察を305 GPaまで行った.

物質のバンドギャップのエネルギーが小さくなると透明から不透明になる光学的な変化があると考えられるが, CaOでは350 GPaにおいても透明であった. 一方BaOにおいては246 GPaまでの電気抵抗測定では金属化した際におこると考えられる抵抗値の低下は確認されなかったものの, 237 GPaから不透明化することを確認した. 最高圧力での305 GPaでも金属光沢は確認されておらず, バンドギャップが完全に閉じて金属化するには少なくとも305 GPa以上の圧力が必要であることが明らかとなった. アルカリ土類金属酸化物の金属化には理論予測よりも高い圧力が必要であるが, 金属化の兆候を示す黒色化について本研究により初めて実験的に検出することができた.