

Poster presentation | R3: High-pressure science and deep Earth's material

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏠 Poster
(Room No. 16)

R3: High-pressure science and deep Earth's material

[R3-P-01]

Examination of measurement atmosphere in drop solution calorimetry using lead borate solvent for iron bearing samples

*Tsubasa Otao¹, Itaru Ohira², Hiroshi Koujitan² (1. Gakushuin Univ. Sci., 2. Gakushuin Univ.)

[R3-P-02]

Consideration of excess heat capacity on the isobaric heat capacity of olivine-type Mn_2SiO_4

*Yuta Asami¹, Itaru Ohira¹, Hiroshi Kojitani¹ (1. Gakushuin Univ. Sci.)

[R3-P-03]

Diamond crystallization from silicate and C-H-O fluid system under high-pressure and high-temperature

*Kento Suzuki¹, Hiroaki Ohfuji¹, Akio Suzuki¹ (1. Tohoku Univ.Sci)

[R3-P-04]

Phase relations and compression behavior of the H_2O-NH_3 system in ice giant interior

*Momoko Takeuchi¹, Takeshi Sakai¹, Hirokazu Kadobayashi² (1. Ehime Univ. GRC., 2. JASRI)

[R3-P-05]

Experimental study of maximum water content in olivine just above the 410 km discontinuity

*Watanabe Toyoki¹, Takaaki Kawazoe¹, Kazutaka Yamaguchi¹, Toru Inoue¹ (1. Hiroshima Uni. Advanced Science and Engineering)

◆ Student Presentation Award Entry

[R3-P-06]

Temperature and coexisting-phase dependence of water solubility in wadsleyite

*Hanae Kaya¹, Toru Inoue¹, Yushi Hamada², Takaaki Kawazoe¹, Goru Takaichi¹ (1. Hiroshima Univ. Adv. Sci. & Eng., 2. Hiroshima Univ. Sci.)

[R3-P-07]

Experimental constraints on the coloration of ringwoodite synthesized at high pressure and high temperature.

*Steeve Greaux¹, Youyue Zhang¹, Hideharu Kuwahara¹, Ryoichi Nakada², Yuji Higo³ (1. Ehime University, 2. JAMSTEC, 3. JASRI)

[R3-P-08]

High-temperature phase relations of hydrous aluminosilicates in the $AlOOH-AlSiO_3OH$ system

*Goru TAKAICHI¹, Masayuki Nishi², Youmo Zhou³, Shinichi Machida⁴, Ginga Kitahara⁵, Akira Yoshiasa⁶, Tetsuo Irifune⁷, Toru Inoue¹ (1. Hiroshima Univ. Adv. Sci. Eng., 2. Osaka Univ. Sci., 3. China Univ. Geosci., 4. CROSS, 5. KEK, 6. Kumamoto Univ., 7. Ehime Univ. GRC)

◆ Student Presentation Award Entry

[R3-P-09]

Stability and solid solution relationship between high-pressure hydrous phases in subducting slabs

*Makoto Bisaiji¹, Toru Inoue¹, Goru Takaichi¹, Takaaki Kawazoe¹, Toru Shinme², Tetsuo Irihune² (1. Hiroshima Univ. Sci., 2. Ehime Univ. GRC)

◆ Student Presentation Award Entry

[R3-P-10]

High-pressure experimental constraints on the partitioning behavior of Ti between Davemaoite and Bridgmanite.

*Yuta Naito¹, Mizuho Sakurahara¹, Yoshihiro Inoue¹, Jiejun Jing¹, Steeve Gréaux¹ (1. Ehime University)

[R3-P-11]

Experimental constrains on the presence of a Fe-enriched molten silicate layer above Mars' core

*Ryota Shimizu¹, Jiejun Jing¹, Yoshihiro Inoue¹, Mizuho Sakurahara¹, Rémy Pierru², Lianje Man², Steeve Gréaux¹ (1. Ehime Univ. GRC, 2. Bayerisches Geoinstitut)

[R3-P-12]

Analysing the characteristics of ZnO piezoelectric oscillators for improving the performance of GHz-DAC ultrasonic

*Akira Yoneda¹, Ryoma Ishida¹, Ryosuke Matsui¹, Shuei Akahosi¹, Tadashi Kondo¹ (1. Osaka Univ.)

[R3-P-13]

Example of using free FEM software for GHz-DAC sound velocity method

*Shuei Akahoshi¹, Akira Yoneda¹ (1. Osaka Univ. Sci.)

[R3-P-14]

Pressure scale cross-evaluation in the multi-megabar region

*Takeshi SAKAI¹, Yuki Nakamoto², Hirokazu Kadobayashi³ (1. GRC, Ehime University, 2. KYOKUGEN, Univ. of Osaka, 3. JASRI)

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏠 Poster
(Room No. 16)

R3: High-pressure science and deep Earth's material

[R3-P-01] Examination of measurement atmosphere in drop solution calorimetry using lead borate solvent for iron bearing samples

*Tsubasa Otao¹, Itaru Ohira², Hiroshi Koujitan² (1. Gakushuin Univ. Sci., 2. Gakushuin Univ.)

Keywords : drop solution calorimetry, oxygen fugacity, Oxidation-reduction of iron, lead borate solvent

大気中で Fe^{2+} を含む化合物の溶解熱量測定を行うと、一部の Fe^{2+} が Fe^{3+} になってしまうため正確な熱量値を得ることが難しい。この問題を解決する手段として、不活性ガスであるArを流すことにより、 Fe^{2+} 含有試料の鉄の価数を変化させない測定雰囲気にする方法がある（例えばAkaogi et al., 1989）。しかし、この方法では溶媒($2\text{PbO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$)中の酸素が鉄の価数を変化させる可能性がある。そこで、 O_2 ガスを流すことにより、溶解後の鉄の状態を完全に Fe^{3+} にする方法がLilova et al.(2012)により試みられた。ところが、高温かつ高い酸素分圧下では、Pt容器と溶媒中のPbが反応して副反応物が生成するという別の問題が生じたため、正確な熱量値を決定することがかなり難しいと指摘されていた。そこで本研究では、Lilova et al.(2012)と同じホウ酸鉛溶媒とPt容器。そして O_2 とArの混合ガスを用いた鉄化合物の熱量測定の最終溶解状態として、全ての鉄が Fe^{3+} の状態かつ副反応物を生成しない酸素分圧を探索することを目的とした。 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ を実験試料とし、Calvet型高温熱量計を用いて落下溶解熱量測定を行った。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測定雰囲気を調整した。 O_2 とArの流量比を変えることで、測定雰囲気の酸素分圧を調整した。落下溶解熱量測定の酸素分圧($\text{O}_2/(\text{O}_2+\text{Ar})$)は0, 0.2, 0.6, 1の4種類とした。 $\text{O}_2/(\text{O}_2+\text{Ar})$ が0, 0.2, 0.6の場合はバブリングのためのガス流量を5ml/minのみ、 $\text{O}_2/(\text{O}_2+\text{Ar})$ が1の場合は2, 5, 6 ml/minの3種類とした。約3 mgの粉末試料を $\phi 1.3$ mmのペレットに成形後、705°Cに保たれた熱量計内に落下させて、室温から705°Cまでの熱含量と溶媒 ($2\text{PbO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$) 中の溶解熱の和である落下溶解エンタルピー(ΔH_{d-s})を測定した。落下溶解熱量測定とは別に、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($\text{O}_2/(\text{Ar}+\text{O}_2)=0.85$)、8 ml($\text{O}_2/(\text{Ar}+\text{O}_2)=0.94$)であった。酸素分圧および流量のいずれの条件でも、副生成物である黒色の Pb_2PtO_4 は確認されなかった。 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の酸素分圧を変化させて行った落下溶解エンタルピー ΔH_{d-s} を図1に示した。全ての落下溶解エンタルピーがおおむね誤差範囲内で一致した。これらの結果は、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の落下溶解熱量測定を高い酸素分圧で行ったとしても、副反応は生じなかったことを示している。Lilova et al.(2012)は、 $\text{O}_2/(\text{Ar}+\text{O}_2)=1$ で5 ml/minでバブリングを行い、90 ml/minという大量の酸素を溶媒上に流していた。測定雰囲気を調整する酸素が過剰なため副反応が進行したと考えられる。一方、本研究による酸素流量の少ない場合では副反応が進行しないことが分かった。そのため、高い酸素分圧かつ副反応が生じ

なかつた流量で Fe^{2+} 含有試料の落下溶解熱測定を行い、溶解状態の Fe^{2+} が完全に Fe^{3+} になるか探索する必要がある。

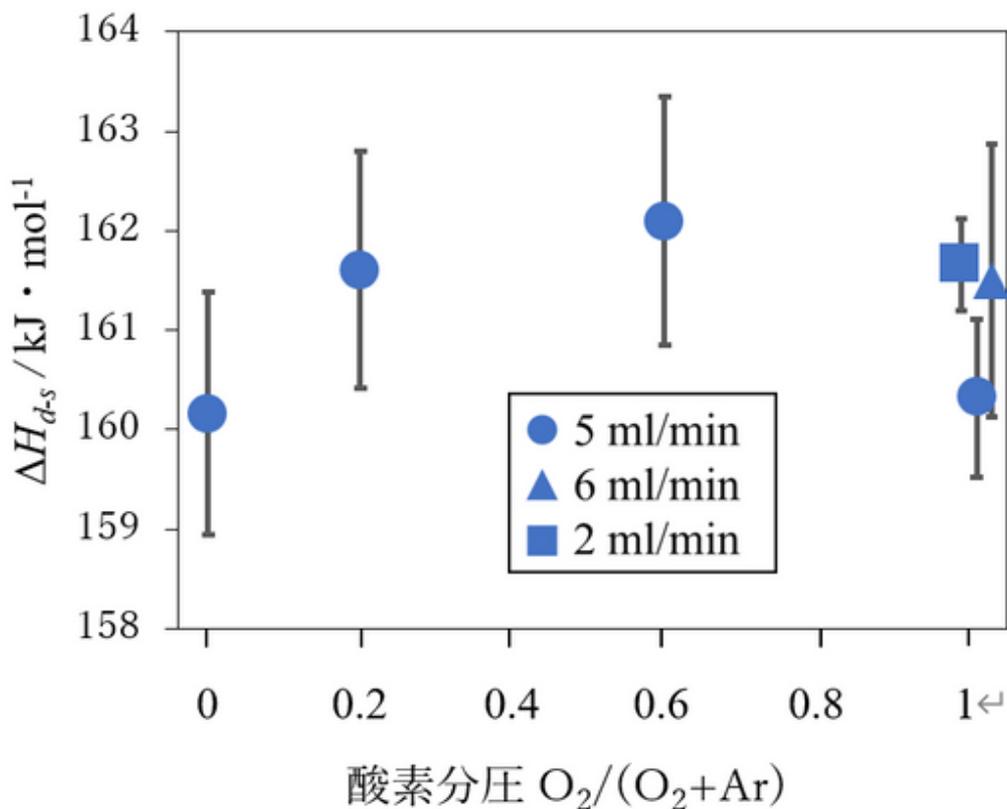


図 1 酸素分圧を変化させたときの $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の落下溶解エンタルピー ΔH_{d-s}

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏠 Poster
(Room No. 16)

R3: High-pressure science and deep Earth's material

[R3-P-02] Consideration of excess heat capacity on the isobaric heat capacity of olivine-type Mn_2SiO_4

*Yuta Asami¹, Itaru Ohira¹, Hiroshi Kojitani¹ (1. Gakushuin Univ. Sci.)

Keywords : Olivine-type Mn_2SiO_4 、Excess heat capacity、Kieffer model calculation

地球の上部マントルの主要鉱物であるオリビン型(Mg,Fe) $_2SiO_4$ を熱力学的に取り扱うためには、その端成分である Mg_2SiO_4 および Fe_2SiO_4 の熱力学パラメータが必要となる。このうち、オリビン型 Fe_2SiO_4 の定圧熱容量は、格子振動のみの定圧熱容量を上回る過剰の熱容量があることをBenisek et al.(2012)が指摘している。この過剰熱容量は Fe^{2+} の場合、結晶場分裂に起因するショットキー異常が原因であると考えられている(Aronson et al. 2007)。この過剰熱容量の大きさは、d電子数の違いで異なることが予想される。そのため、3d電子が熱容量に与える影響を系統的に理解するには、様々な数の3d電子を持つ遷移金属イオンを含んだオリビンについて過剰熱容量を比較することが求められる。本研究では、オリビン型 Mn_2SiO_4 において、格子振動寄与による定圧熱容量を格子振動モデル計算により推定し、実測値との比較から過剰熱容量の大きさを検討した。

Kiefferモデルを用いた格子振動モデル計算では、Sumino (1979)による弾性波速度(V_p, V_s)から音響モードを、格子力学計算(GULP)を用いた振動モード解析による分散関係を参考に光学モードをモデル化した。200 K以下の低温領域では非調和効果が小さいため、定圧熱容量(C_p)と定積熱容量(C_v)は等しいとみなし、この低温領域の実測 C_p データを再現するように、光学モードの振動状態密度モデル(VDoS)を微調整して C_v を算出した。 C_p は、格子振動モデル計算から得られた C_v に非調和効果を表す熱膨張率(α)、体積弾性率(K_T)、体積(V)、温度(T)を用いた $\alpha^2 K_T V T$ 項を加えて計算した。 K_T は128 GPa(Sumino, 1979)を使用した。 α は $\alpha = \gamma_{th} C_v / K_T V$ を用いて、繰り返し計算により求めた。なお、熱的グリューナイゼン定数(γ_{th})は1.06 (Sumino, 1979)とした。

繰り返し計算の結果、 α は $2.876 \times 10^{-5} + 8.620 \times 10^{-9} T + 1.572 \times 10^{-3} T^{-1} - 0.9387 T^{-2}$ と最適化された。図1に、オリビン型 Mn_2SiO_4 の熱容量測定結果と、Kiefferモデルにより計算された C_v および C_p を示した。300–830 Kの C_p データは本研究でDSC測定により取得したものの、5–380 KはRobie et al.(1982)の C_p データである。実測値とKiefferモデルで計算された C_p は、約650 K付近までは誤差の範囲内で一致しており、650 K以下の Mn_2SiO_4 の熱容量は、格子振動のみによる寄与で説明できる。一方、650 K以上では実測値が計算値よりわずかながら大きくなり、過剰熱容量が認められる。この過剰熱容量の大きさは、800 KにおいてBenisek et al.(2012)のオリビン型 Fe_2SiO_4 の熱容量の約23%である。 $Fe^{2+}(3d^6)$ の場合、基底状態の 5D が分裂するためショットキー熱容量の効果は大きい。一方、 $Mn^{2+}(3d^5)$ の場合は基底状態の 6S は分裂しないが、650 K以上の過剰熱容量は 6S から 4G への遷移で説明可能である。

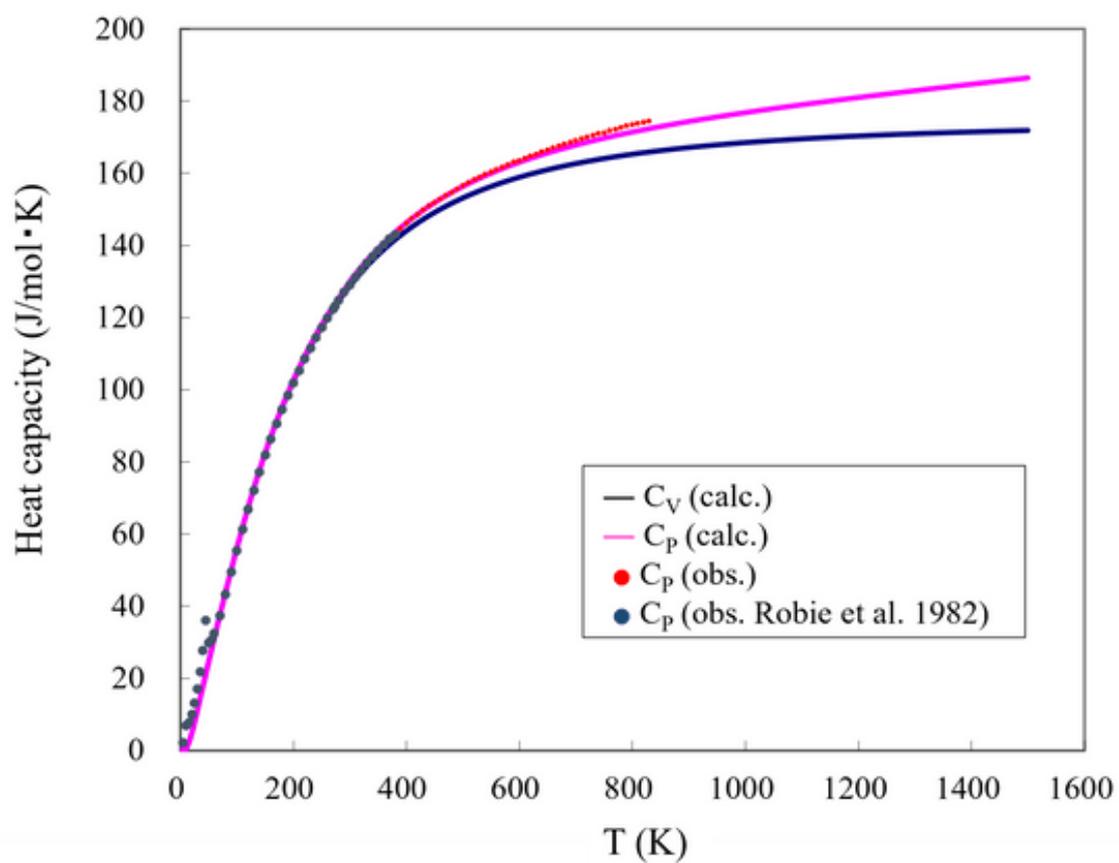


図1. オリビン型 Mn_2SiO_4 の熱容量実測値とKiefferモデル計算結果との比較

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏠 Poster
(Room No. 16)

R3: High-pressure science and deep Earth's material

[R3-P-03] Diamond crystallization from silicate and C-H-O fluid system under high-pressure and high-temperature

*Kento Suzuki¹, Hiroaki Ohfuji¹, Akio Suzuki¹ (1. Tohoku Univ.Sci)

Keywords : Spontaneous nucleation、Diamond、Olivine、Stearic acid、Oxalic acid

はじめに

近年の内部包有物の研究により、ダイヤモンドの多くは古い大陸地殻の下にある厚いリソスフェアにおいて、マントル物質と地殻物質の交代反応の結果形成されることが明らかになってきた。しかし、黒色塊状集合体のカーボナードや球晶状のバラスなどの特徴的な多結晶組織を有するダイヤモンドの起源や形成環境については、未だ不明な部分も多い。結晶成長の観点から見ると、そのような多結晶ダイヤモンドは非常に大きな成長駆動力下で、多核形成に端を発して生成されたと予想される。最近の我々の研究より、CH₄に富んだ還元的なC-H-O流体がダイヤモンドの自発的核形成を促進することが明らかになり、多結晶ダイヤモンドはそのような極めて流体に飽和した環境で形成される可能性が高い。そこで、本研究ではC-H-O流体とケイ酸塩（出発物質：オリビン）共存系において、どのような条件でダイヤモンドの自発核形成が促進され、成長条件が形態・組織へどのように影響するのかを明らかにすることを目的とし、高温高圧実験を行った。

実験方法

出発試料として、米サンカルロス産のオリビンの粉末、シュウ酸（C₂H₂O₄）、ステアリン酸（C₁₈H₃₆O₂）をペレット状に成型し、オリビンシュウ酸、ステアリン酸のいずれかと重ね、またはシュウ酸とステアリン酸で挟み、Ptカプセルに封入し用いた。シュウ酸は実験条件で分解しCO₂流体を、ステアリン酸は分解しCH₄とH₂Oの混合流体を（Yamaoka et al., 2002）生じると期待される。カプセル周囲に酸素フガシティのバッファー材としてMoを配置し、10 GPa、1000~1500 °Cの条件で高温高圧実験を行った。目的圧力へ到達後加熱し、目的温度で1時間保持した後急冷、減圧回収した。回収試料の生成相の同定と組織観察・化学分析にはSEM-EDSを用いた。

結果と考察

1000 °Cで加熱した実験において、ステアリン酸とオリビン封入系では、オリビン側に大きな変化はなく、ステアリン酸側に径50~400 nm程度のグラファイトの板状結晶が生じていた。一方、シュウ酸とオリビン封入系では、固体相はエンスタタイトとマグネサイト（MgCO₃）の混合よりなり、シュウ酸の分解により生じたCO₂流体とオリビンの反応によって生じたと推測される。もともとシュウ酸のあった部分は空隙となり、径70~200 nm程度のグラファイトの板状結晶が塊状をなしていた。1500 °Cで加熱した実験では、ステアリン酸とオリビン封入系で部分熔融組織が観察され、ソリダス相としてエンスタタイト（50~100 μm）が、メルトからの急冷相としてエンスタタイトとフォルステライトのデンドライトが認められた。ソリダス相のエンスタタイト中やメルト急冷相中には自形のダイヤモンド（~2 μm）の生成が認められ、板状のグラファイト（5 μm）も共存していた。一方、シュウ酸とオリビン封入系の実験では、マグネサイトとエンスタタイトからなるデ

ンドライトとその外縁をフォルステライトが被覆する様子が認められた。これはシュウ酸の分解で生じたCO₂と出発オリビンの反応で生じたエンスタタイトとマグネサイトの共融メルトの急冷と、メルトから分離したCO₂流体に溶けていたフォルステライト成分の析出の結果と解釈される。一方、試料室にはシュウ酸の分解残さと考えられる板状グラファイト (2~10 μm) の集合体が観察され、その内部にも少量の自形ダイヤモンド (~4 μm) が散在していた。また、オリビンをシュウ酸とステアリン酸で挟んだ実験でも同様に、マグネサイトとエンスタタイトからなるデンドライト組織とその外縁を被覆するフォルステライトの析出が観察されたが、ダイヤモンド生成はどちらか片方の流体ソースを用いた実験と比較して明らかに多く、粒径も最大で20 μmと大きなものも認められた。なお、もともとステアリン酸のあった場所にはグラファイトが生じていた。高温高圧下でのシュウ酸の分解によって生じる流体はCO₂+H₂であるという報告 (Wang & Zheng, 2011) があるが、分解の結果準安定グラファイトが生じていることを踏まえると、実際にはCO₂とH₂Oの混合流体が生じたと考えられる。そのような酸化的な流体共存下では高温条件でもダイヤモンドの生成は限定的であった。ステアリン酸由来のCH₄とH₂Oを含む還元的な流体存在下ではダイヤモンドの生成量は増えたが、準安定的に生じたグラファイトもまだ多く共存していた。一方、シュウ酸とステアリン酸を用いた実験ではダイヤモンド生成量、サイズが明らかに増加しており、これはCO₂とCH₄の反応により炭素に高過飽和な状態がつけられダイヤモンドの自発核形成が促進されたものと解釈される。

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏠 Poster
(Room No. 16)

R3: High-pressure science and deep Earth's material

[R3-P-04] Phase relations and compression behavior of the H₂O-NH₃ system in ice giant interior

*Momoko Takeuchi¹, Takeshi Sakai¹, Hirokazu Kadobayashi² (1. Ehime Univ. GRC., 2. JASRI)

Keywords : Ammonia dihydrate、Disordered molecular alloy、Ice VII、Directed hydrogen bonding

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成分であると考えられており、内部ではアンモニア一水和物(Ammonia monohydrate(AMH), NH₃:H₂O=1 : 1), アンモニア半水和物(Ammonia hemihydrate(AHH), NH₃:H₂O =2 : 1), アンモニア二水和物(Ammonia dihydrate(ADH), NH₃:H₂O =1 : 2)の3つが様々な組成およびP-T条件下で安定化する(Liu et al.,2017). さらに巨大氷惑星は磁場中心が大きくずれている特徴を持ち、H₂O-NH₃を含む混合物が電気伝導度の高い超イオン氷として存在し磁場を形成している可能性が示唆されている(Bethkenhagen et al.,2015). このことからH₂O-NH₃系における相関係を知ることは、氷天体の内部を理解するのに重要である。H₂O-NH₃を含む混合物の高圧特性は、超イオン相、対称相などの多形の存在が報告されているが10 GPaを超える相関係はまだ明らかになっていない点が多い。アンモニア一水和物の中でH₂O-NH₃の太陽系元素存在比に近いとされる、ADHの室温での圧縮実験ではAHHと氷VII相に分離することが分かっている(Mondal et al.,2023). 一方で、低温下での圧縮では無秩序分子合金 (Disordered molecular alloy(DMA)) と呼ばれる水分子とアンモニア分子が相互置換した結晶相の存在が報告されている。このことから室温下の圧縮で分離した氷VII相においても部分的なアンモニア分子の“固溶”が起こらないのかという疑問が生じる。

そこで本研究では、室温下におけるH₂O-NH₃系の相関係とH₂O氷の圧縮挙動を明らかにすることを目標として、ADHの組成比に比較的近いアンモニア水(25 Wt%および28 Wt%)を用いて、約80 GPaまでダイヤモンドアンビルセル(DAC)による圧縮実験を行った。また、非静水圧性の緩和のために約500 Kにて適宜アニーリングを行った。

実験結果より、加圧過程で氷VII相が分離生成されたが、その後の約80 GPaまでの加圧過程にて、純水において約40 GPa~60 GPaにて観察される氷X相への相転移(氷VII相中の水素結合を形成する酸素間の中心に、水素が位置するという水素結合の対称化(Kamb and Davis.,1964))は確認されなかった。アニーリング後のXRDプロファイルより、約13 GPaでの氷VII相の111ピークはシャープであることが確認された。その一方で、110ピークと200ピークでは室温での加圧および加圧途中でアニーリングを行った実験の双方で約10 GPaからスプリットが確認された。アニーリングによって非静水圧性の効果による歪は取り除けていると仮定すれば、110ピークと200ピークのスプリットは、cubicである氷VII相がtetragonal的に歪んでいることに起因していると考えられる。

また、金の一軸応力解析を行い歪によるピーク分離への影響についてガンマプロット法を用いて確認した。アニーリングを行う前の応力は0.1~0.4 GPa, アニーリング後は0.06~0.25 GPaとアニーリング後の方が値のばらつきが少なく、一軸応力は小さいことが確認できた。以上のことから圧縮によって分離した氷VII相は純粋な氷ではなく、アンモニア成分が氷

格子内に存在することで、ピークのスプリットや水素結合対称化の阻害に影響しているのではないかと考えた。Bove et al. (2015) では、塩分 (LiCl) を含む氷VII相は、氷格子内のイオンの存在により、水分子の配向が制限され、水素結合の対称化を妨げ氷X相への相転移圧力が上昇すると示されている。従ってアンモニア成分でも同様の効果があることが期待され、氷天体内部では純粋なH₂O氷ではなくアンモニア成分との共存下での物性がより重要となる。

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏠 Poster
(Room No. 16)

R3: High-pressure science and deep Earth's material

[R3-P-05] Experimental study of maximum water content in olivine just above the 410 km discontinuity

*Watanabe Toyoki¹, Takaaki Kawazoe¹, Kazutaka Yamaguchi¹, Toru Inoue¹ (1. Hiroshima Uni. Advanced Science and Engineering)

Keywords : Olivine、Upper Mantle、Water Content、Multi-anvil

【はじめに】地球内部の深さ約410km~660kmの領域はマントル遷移層と呼ばれ、多くの水を含むことができる。この領域への水の運搬は大部分が沈み込むスラブ中の含水鉱物が担っていると考えられている。一方、かんらん石は地球マントルの深さ410kmまでの約70%を占めており、かつ沈み込むスラブの主要構成鉱物であるため、かんらん石の最大含水量を正確に決定することは水の運搬におけるその役割を明らかにするために重要である。加えて、鉱物の含水化により、相転移境界 (Inoue et al. 2010) や相転移機構 (Ando, Tomioka et al. 2006) が変化することが分かっている。このため、かんらん石の含水量の変化は、現在用いられている含水系の相図を変化させ、地球内部の鉱物分布にも影響を与える可能性がある。かんらん石の含水量については既に先行研究においていくつかの報告があるが (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、最大含水量が~0.89wt%までの範囲で変化している。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に、実験的研究を行った。

【手法】含水かんらん石の高温高圧合成実験は、川井型マルチアンビル高圧発生装置 MAPLE600を使用して行った。実験条件は、12 GPa, 1100~1400°C, 保持時間30分~3時間とした。出発物質はMg₂SiO₄ にH₂Oを5 wt%含むようにMg(OH)₂, MgO, SiO₂の粉末を混合して準備した粉末混合体を使用した。試料はAuPdカプセルに封入した。回収した2つのカプセルのうち1つの試料は鏡面研磨を行った後、SEMで組織観察し、EPMAで化学組成を測定した。また、もう1つのカプセルはFTIRやSIMSにより分析する予定である。含水量はEPMA測定のトータル欠損値から推定した。今回の実験の場合、揮発性成分はH₂O成分のみの閉鎖系実験であるため、含水かんらん石のトータル欠損値は、H₂O成分の寄与のみであると考えられる。このためこのトータル欠損値についても、H₂O EPMA吸収補正 (ZAF補正) (H₂Oの吸収を考慮した補正) を施し、含水量を推定した。【結果と考察】本研究で得られた最大の含水量は、圧力12 GPa, 1250°C, 30分保持の試料で検出された0.67 wt%であった。尚、今回保持時間30分と1時間で比較したが、後者の方が含水量が低くなった。この結果は30分保持では平衡状態に達していない可能性を示しており、今後保持時間を変化させ、その傾向を更に観察する予定である。本研究でも温度依存性についてはSmyth et al. (2006) と同じような傾向を示したが、含水量はSmyth et al. (2006) と比較して全体的に低い値を示した。この理由として、Smyth et al. (2006) では含水量の決定にFTIRを用い、本研究ではEPMAのトータル欠損を用いたことが考えられる。FTIR測定では含水量を導出するcalibration factorに問題がある可能性があると共に、試料中に存在する含水鉱物包有物の存在が高含水量を示した可能性があり、これらの問題点を今後明らかにしていく予定である。その手法については、先行研究と同様のFTIR測定および含水量を定量的に測定可能なSIMS測定により含水量を決定し、比較・検討する予定である。尚、含水量の温度変化の傾向については、1100°Cでは回収試

料中に高圧含水相Phase Eが存在したため、一方1300°C以上では温度上昇に伴いメルトに水が分配されたため減少したと考えられる。

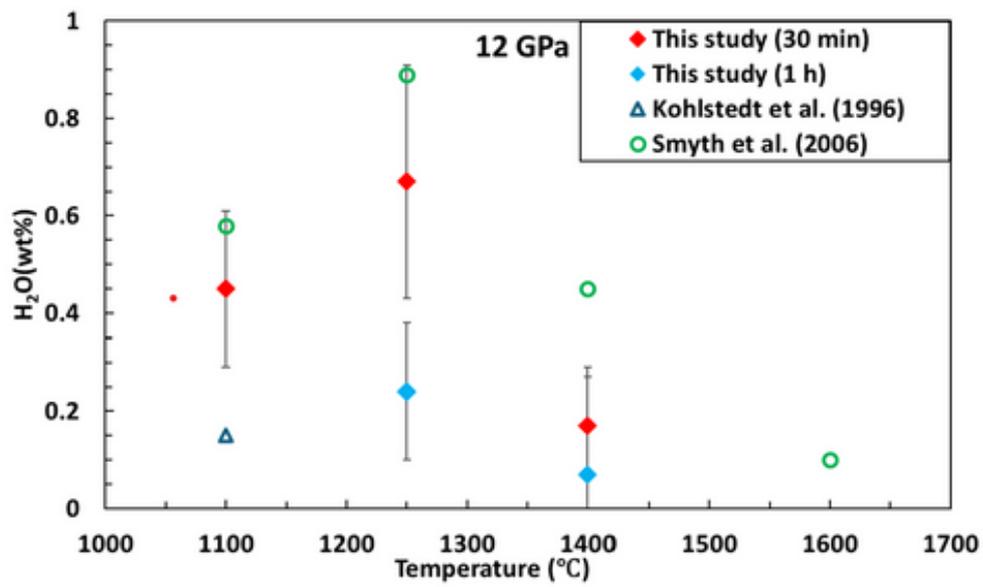


図 かんらん石の最大含水量の温度依存性および本研究と先行研究との比較

Poster presentation | R3: High-pressure science and deep Earth's material

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏛️ Poster
(Room No. 16)**R3: High-pressure science and deep Earth's material**

◆ Student Presentation Award Entry

[R3-P-06] Temperature and coexisting-phase dependence of water solubility in wadsleyite

*Hanae Kaya¹, Toru Inoue¹, Yushi Hamada², Takaaki Kawazoe¹, Goru Takaichi¹ (1. Hiroshima Univ. Adv. Sci. & Eng., 2. Hiroshima Univ. Sci.)

Keywords : wadsleyite、 maximum water content、 hydrous melt、 hydrous phase、 mantle transition zone

Wadsleyite (Wd) is a major constituent mineral of the mantle transition zone (corresponding to 410–660 km depth). Although Wd is nominally anhydrous mineral (NAM), it has been shown that water can be present in the crystal structure at several wt% levels (e.g. Inoue et al., 1995; Kudoh et al., 1996). The water contents of Wd are observed to have temperature dependence (e.g. Ohtani et al., 2001; Litasov and Ohtani, 2003). Though the water contents under high-temperature conditions are becoming approximately constrained, the water contents under low-temperature conditions have still discrepancy between the previous studies (e.g., Demouchy et al., 2005; Ishii and Ohtani, 2021). The average mantle temperature is around 1500°C (Ito and Katsura, 1989), but the temperature of subducting slabs is estimated to be 500–900°C (Kirby et al., 1996). Thus, the constraint on water contents under low-temperature conditions is also important for understanding deep Earth dynamics. Therefore, we conducted high-pressure experiments to investigate the maximum water solubility in Wd, especially under low temperature conditions.

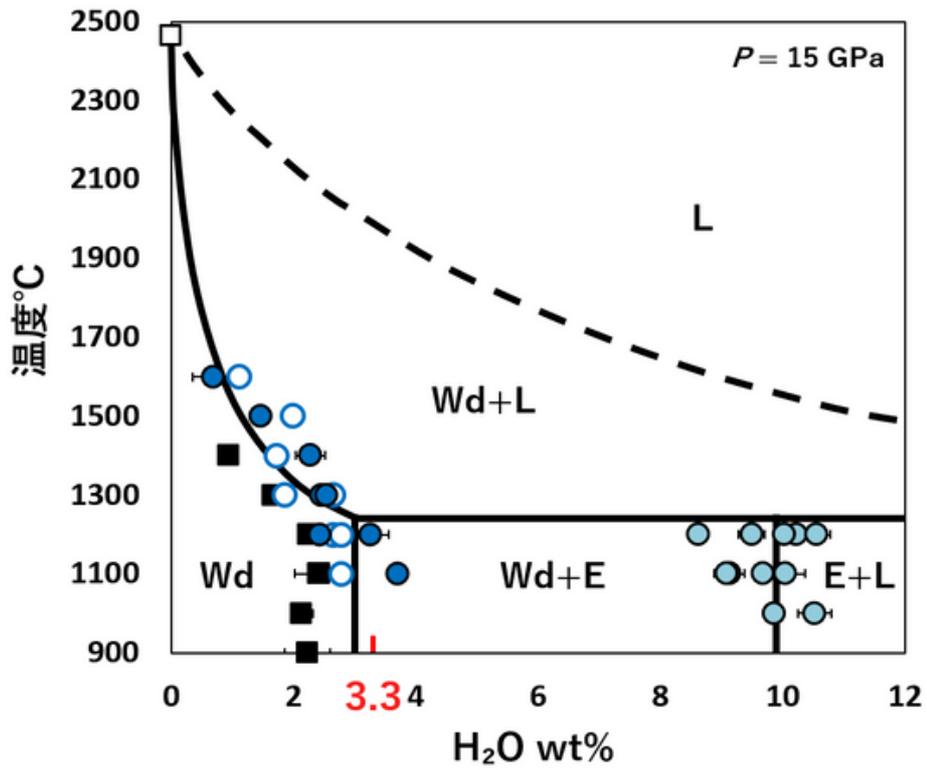


図1 Fe-free Wd中の含水量の温度依存性

● This study ○ This study (含水置換; Inoue et al., (1995))
 ■ Demouchy et al. (2005) SIMS □ Ohtani and Kumazawa (1981) 融点

Poster presentation | R3: High-pressure science and deep Earth's material

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏛️ Poster
(Room No. 16)

R3: High-pressure science and deep Earth's material

[R3-P-07] Experimental constraints on the coloration of ringwoodite synthesized at high pressure and high temperature.

*Steeve Greaux¹, Youyue Zhang¹, Hideharu Kuwahara¹, Ryoichi Nakada², Yuji Higo³ (1. Ehime University, 2. JAMSTEC, 3. JASRI)

Keywords : High pressure and High temperature、Ringwoodite、Iron speciation、Mantle transition zone、Seismic velocities

Ringwoodite (Rw) is a high-pressure polymorph of olivine with a spinel structure that forms at the high P and T conditions of the lowermost part of the Earth's mantle transition zone (MTZ) (Ringwood, 1958). Fe-bearing Rw is an important constituent mineral of the MTZ, where it represents about 60 vol.% to 80 vol.% of the pyrolitic mantle and subducted harzburgitic crust (Irifune & Ringwood 1987, Ringwood 1991). Rw crystals have a peculiar deep blue color, which contrast with colorless Mg_2SiO_4 Rw synthesized in the laboratory. The cause of the blue color in Rw has been extensively discussed by meteoritic studies, but its origin is still mostly unknown. Former studies proposed blue color originates from light scattering effect at grain boundaries (Nagy+ 2011) or due to glassy material found around Rw crystals in meteorites (Price 1979; Lingemann & Stöffler 1998) but it was later ruled out by transmission electron microscopy on Rw aggregates (Taran+ 2009) and synthesis of Rw single crystals arboring a deep blue color (Thompson+ 2021). Iron content has also been ruled out because there is no correlation between Rw's color and iron-content in meteorites (Lingemann & Stöffler, 1998; Taran+ 2009). Alternatively, it was proposed that the blue color is related to the incorporation of water, which may push Fe to be surrounded by 4 oxygen ions rather than the usual 6 oxygens (Dobson 2019). Here we present electron probe, Raman spectroscopy, X-ray diffraction and XANES measurements at Fe L_3 -edge on hydrous and dry Fe-bearing Rw with green, blue and brown colors, synthesized at 20 GPa and varying T and oxygen fugacity (fO_2) conditions. We found color of Rw does not depend on grain size, bulk Fe- and H_2O contents. Instead we found color change depends on synthesis temperature and fO_2 conditions although Fe^{3+}/Fe_{total} in all Rw only varies by less than $\pm 10\%$. These results suggest color of Rw depends not only on Fe speciation but also cation order-disorder in the spinel structure. The occurrence of cation order-disorder in Rw could have important implications for the seismic characteristics of the 520' discontinuity (Muir+ 2025). Nevertheless, our results gives some critical constraints to infer the fO_2 and temperature conditions at which Rw crystals found as inclusion in deep diamonds or in meteorites were formed, based on their color.

Poster presentation | R3: High-pressure science and deep Earth's material

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏛️ Poster
(Room No. 16)

R3: High-pressure science and deep Earth's material

[R3-P-08] High-temperature phase relations of hydrous aluminosilicates in the $\text{AlOOH-AlSiO}_3\text{OH}$ system

*Goru TAKAICHI¹, Masayuki Nishi², Youmo Zhou³, Shinichi Machida⁴, Ginga Kitahara⁵, Akira Yoshiasa⁶, Tetsuo Irifune⁷, Toru Inoue¹ (1. Hiroshima Univ. Adv. Sci. Eng., 2. Osaka Univ. Sci., 3. China Univ. Geosci., 4. CROSS, 5. KEK, 6. Kumamoto Univ., 7. Ehime Univ. GRC)

Keywords : Hydrous aluminosilicates, Deep water cycle, Multi-anvil apparatus

The slabs that subduct from the trench into the Earth's interior are composed by sediments, basalts, and peridotite. Each rock layer is thought to contain hydrous minerals of various compositions. Hydrous magnesium silicates (DHMSs) are stable over a wide pressure range in the low-temperature part of peridotite layer. In basalt layer, Al-rich DHMS and Fe-Ti oxyhydroxides are the major water carriers. In sediment layer, hydrous aluminosilicates can retain water at higher temperatures than DHMS. In particular, phase Egg, one of the hydrous aluminosilicates, was found naturally as a diamond inclusion [1]. Therefore, it is important to investigate the high-temperature phase relations of hydrous aluminosilicates for understanding the water cycle in the Earth's deep mantle. In this study, the phase relations of hydrous aluminosilicates in the $\text{AlOOH-AlSiO}_3\text{OH}$ system were investigated at 22 GPa and 1400–2275 K using a multi-anvil apparatus. Based on the X-ray diffraction measurements and composition analysis of the recovered samples, we found that the AlSiO_4H phase egg forms a solid solution with $\delta\text{-AlOOH}$ above 1500 K. Additionally, at temperatures above 1800 K, two unknown hydrous aluminosilicates with compositions $\text{Al}_{2.03}\text{Si}_{0.97}\text{O}_6\text{H}_{2.03}$ (Phase I) and $\text{Al}_{2.11}\text{Si}_{0.88}\text{O}_6\text{H}_{2.11}$ (Phase II) appeared, depending on the bulk composition of the starting materials. Although the crystal structure has not been determined, both phases are not consistent with Aluminous phase D [2] or the recently reported Phase Psi [3], based on X-ray diffraction patterns. These phases can host large amount of water at least up to 2275 K, exceeding the typical mantle geotherm. Thus, the extreme thermal stability of hydrous aluminosilicates suggests that subducted sediments could be a possible water reservoir from the mantle transition zone to uppermost lower mantle. In the presentation, we will also introduce recent work on the phase relations of hydrous aluminosilicates.

[1] R. Wirth et al., *EPSL* 259 (2007) 384-399.

[2] MG. Pamato et al., *Nat. Geosci.* 8 (2015) 75-79.

[3] B. Wang et al., *Nat. Commun.* 16 (2025) 1038

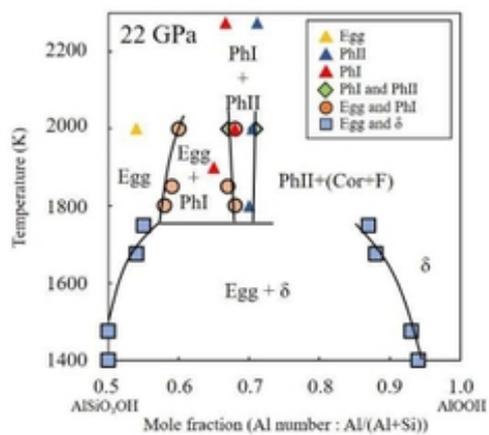


Figure 1. Phase relations in the $\text{AlSiO}_3\text{OH}-\text{AlOOH}$ system at 22 GPa. Abbreviations: Egg = phase Egg; δ = δ - AlOOH ; PhI = unknown phase I; PhII = unknown phase II; Cor, = corundum; F = fluid.

Poster presentation | R3: High-pressure science and deep Earth's material

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏛️ Poster
(Room No. 16)

R3: High-pressure science and deep Earth's material

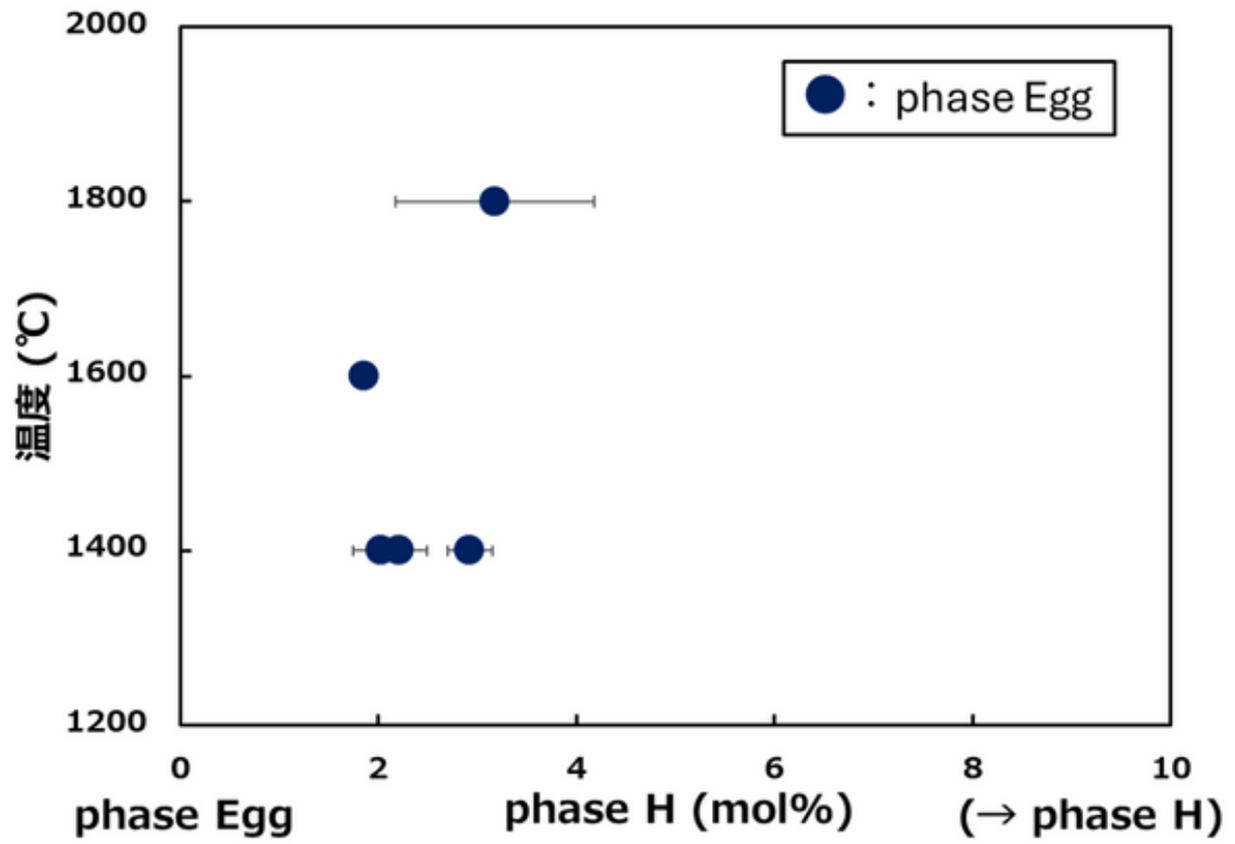
📌 Student Presentation Award Entry

[R3-P-09] Stability and solid solution relationship between high-pressure hydrous phases in subducting slabs

*Makoto Bisaiji¹, Toru Inoue¹, Goru Takaichi¹, Takaaki Kawazoe¹, Toru Shinme², Tetsuo Irihune² (1. Hiroshima Univ. Sci., 2. Ehime Univ. GRC)

Keywords : subducting slab、 high-pressure hydrous phase、 phase Egg、 phase H、 mantle-crustal material reaction

The transport of water into the Earth's interior is facilitated by subduction of slabs. Phase Egg (AlSiO₄H) is a high-pressure hydrous phase derived from sedimentary rocks (continental crust materials) that forms under the pressure conditions of the mantle transition zone and is thermally stable up to 1700C (Ono, 1988; Sano et al., 2004; Fukuyama et al., 2017). This phase Egg has been discovered as an inclusion in diamond (Wirth et al., 2007) and is regarded as evidence that both continental crust materials and H₂O components subduct down to the mantle transition zone. Recently, it was shown through experiments at 24GPa and 1400C that phase H (MgSiO₄H₂), a high-pressure hydrous magnesium silicate stable in the lower mantle, can dissolve into phase Egg (Al_{0.65}Mg_{0.35}SiO₄H_{1.35} phase Egg: Bindi et al., 2023). This finding suggests the importance of water-mediated crust-mantle material reactions occurring between the mantle transition zone and the uppermost lower mantle. However, systematic studies to clarify this solid solution relationship have not yet been conducted. This study aims to experimentally investigate the solid solution relationship of phase H components into phase Egg under conditions corresponding to the mantle transition zone to the uppermost lower mantle.



Poster presentation | R3: High-pressure science and deep Earth's material

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏛️ Poster
(Room No. 16)

R3: High-pressure science and deep Earth's material

📌 Student Presentation Award Entry

[R3-P-10] High-pressure experimental constraints on the partitioning behavior of Ti between Davemaoite and Bridgmanite.

*Yuta Naito¹, Mizuho Sakurahara¹, Yoshihiro Inoue¹, Jiejun Jing¹, Steeve Gréaux¹ (1. Ehime University)

Keywords : high-pressure、 Ti partitioning、 silicate perovskite、 multi-anvil apparatus、 lower mantle

Compared to mantle minerals, oceanic lithologies transported in subducting slabs are enriched in Ca, Al and Fe, but also minor elements such as Ti, Mn, Ni, etc ... Among them, titanium has been of particular interest, because it can incorporate the crystal structure of both bridgmanite (Brg) and davemaoite (Dvm), two of the major constituent minerals of the pyrolitic lower mantle and subducted basaltic crust. Furthermore, studies of diamond inclusions have reported significant amounts of Ti in the form of $\text{Ca}(\text{Si},\text{Ti})\text{O}_3$ inclusions (Nestola+2018), giving clues that substantial amount of Ti may be present in deep mantle minerals. Petrological studies have shown that Ti can influence the chemical composition and crystal structure of Brg and Dvm, which in turn may change mineralogical models of the deep Earth. For example, it was reported that the presence of Ti could stabilize Brg at lower P than that of the 660-km discontinuity (Matrosova+ 2020). It is also known that Ti favors structural distortions in Dvm, which has been proposed to explain low seismic velocity regions in the Earth's lower mantle (Thomson+ 2019). Therefore, understanding which phases Ti preferentially partitions into is essential for interpreting the composition and structure of the Earth's mantle. Here we present the results of high pressure and high temperature phase equilibrium experiments in MgO-CaO-SiO_2 aggregates mixed with TiO_2 , Al_2O_3 and/or FeO components, at 27 GPa and 1800 °C for approximately 10 hours using Kawai-type multi-anvil press (ORANGE3000) at the Geodynamics Research Center (GRC, Ehime). The recovered samples were analyzed by electron microprobe and X-ray diffraction. Preliminary data at 27 GPa showed that in a simplified system, without Al and Fe, Ti preferentially partitioned into Dvm (up to 16 wt.% TiO_2) rather than Brg (~0.3 wt.% TiO_2). In contrast, in experiments containing Al and Fe, Ti incorporation into Dvm seems to be inhibited (~10 wt.% TiO_2) while amount of Ti in Brg is found ~6 times larger (up to 1.8 wt.% TiO_2) than in the experiments without Al and Fe. These results suggest $\text{Ca}(\text{Si},\text{Ti})\text{O}_3$ found as inclusions in diamond may not originate from the lower mantle. On the other hand, we found Brg may host a substantial amount of Ti along with Al and Fe, which could have some implications for seismic structures beneath subduction zones.

Poster presentation | R3: High-pressure science and deep Earth's material

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏠 Poster
(Room No. 16)

R3: High-pressure science and deep Earth's material

[R3-P-11] Experimental constraints on the presence of a Fe-enriched molten silicate layer above Mars' core

*Ryota Shimizu¹, Jiejun Jing¹, Yoshihiro Inoue¹, Mizuho Sakurahara¹, Rémy Pierru², Lianje Man², Steeve Gréaux¹ (1. Ehime Univ. GRC, 2. Bayerisches Geoinstitut)

Keywords : high-pressure, partial melting, multi-anvil apparatus, Martian mantle, basal magma layer

NASA's InSight mission on Mars was launched in 2018 and from early 2019 its SEIS broadband seismometer has continuously recorded the planet's seismic activity, operating until late 2022. These unprecedented data have shed new lights on the planet's internal composition and structure. Among the many discoveries, the presence of a thick layer of basal magma existing on top of the Martian core (Khan+ 2023, Samuel+ 2023) is intriguing the science community. The Martian mantle is thought to be richer in Fe (Taylor, 2013) but colder than Earth's mantle (Huang+ 2022). Current solidus models suggest mantle melting at the P and T conditions of the top of the Martian core may be difficult (Duncan+ 2018), and only partial melting may not be sufficient to form of a thick melt layer atop the core. The presence of a gravitationally stable basal melt layer would thus require other factors, such as a chemically distinct melt composition and/or higher T and oxygen fugacity (fO_2) at the core-mantle boundary. However, most experimental work on the Martian mantle solidus has been conducted under relatively reducing conditions, leaving the effects of more oxidizing conditions largely unaddressed. Here we present high P and high T melting experiments on a Martian mantle aggregate at 20 GPa and 2000 °C using the Kawai-type multianvil press (ORANGE2000) at the Geodynamics Research Center (Ehime Univ.). High-P experiments were conducted using a double capsule technique, with the sample placed in either metallic (Mo, Re or Pt) or graphite inner capsule while fine-grained oxides (MoO_2 , ReO_2 or Fe_2O_3/Fe_3O_4) was placed in the outer capsule to influence different fO_2 . The fO_2 was determined from analyzing Fe-content of a Pt ball (Medard+ 2008) placed in a nearby identical double capsule. Electron microprobe and X-ray diffraction analyses showed the recovered samples consisted of Ringwoodite, Majorite, Magnesiowüstite, Stishovite, and a silicate melt containing 20.3 to 29.7 wt.% FeO. The melt proportions determined by mass balance calculations however showed only up to 29.3 vol.% melt would be generated at FMQ -2, which is about the fO_2 expected in the Martian mantle (Nicklas+ 2021). These results suggest more Fe-enriched mantle and basal magma compositions are required to explain the characteristics of the melt layer atop Mars' core.

Poster presentation | R3: High-pressure science and deep Earth's material

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏠 Poster
(Room No. 16)

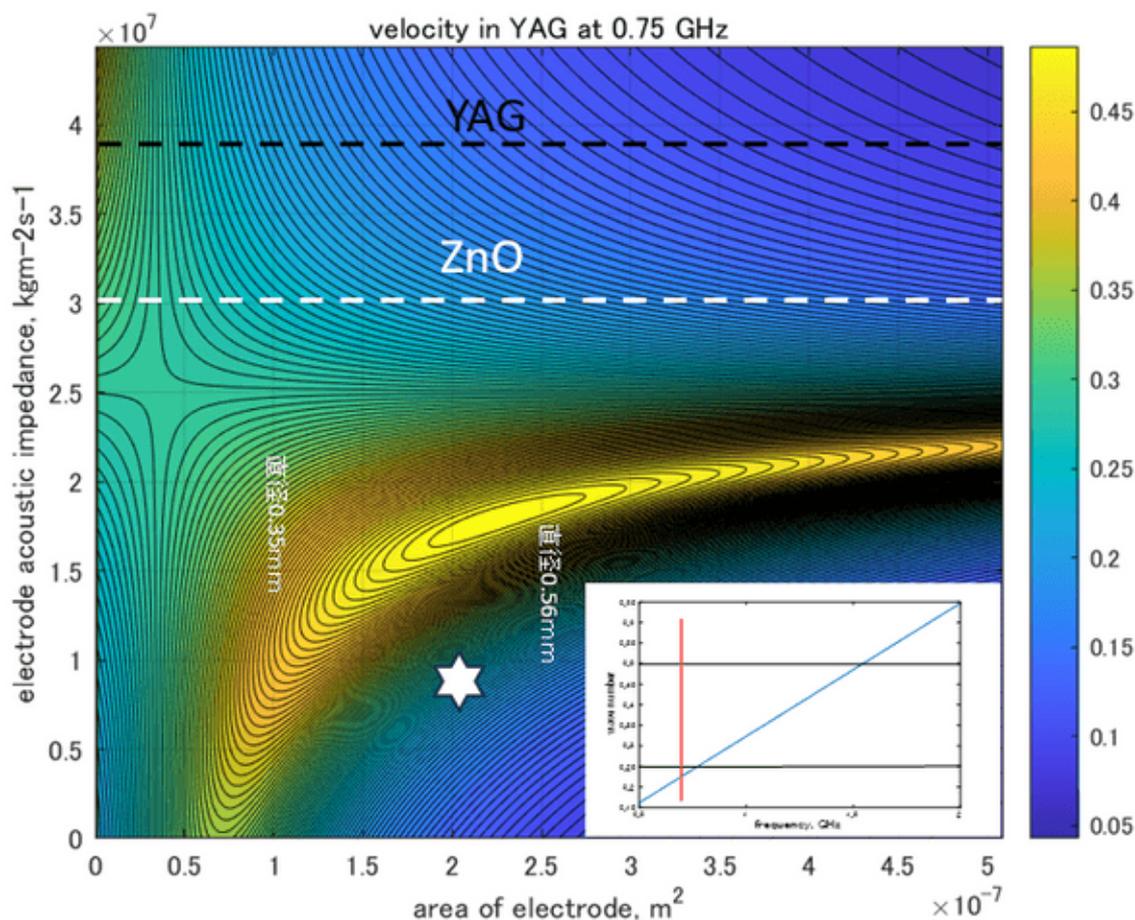
R3: High-pressure science and deep Earth's material

[R3-P-12] Analysing the characteristics of ZnO piezoelectric oscillators for improving the performance of GHz-DAC ultrasonic

*Akira Yoneda¹, Ryoma Ishida¹, Ryosuke Matsui¹, Shuei Akahosi¹, Tadashi Kondo¹ (1. Osaka Univ.)

Keywords : GHz-DAC ultrasonics、ZnO piezoelectric element、Indium electrode

GHz-DAC音速法において超音波振動はZnO圧電素子により励起される。この励起効率の改善はGHz-DAC音速法の性能向上に直結する。今回、我々はZnO圧電素子に対する最適電極の探索を行った。その結果が参考図である。ZnO圧電素子はYAG結晶上にスパッタ成膜される。その境界に基盤電極としてPtが成膜されるがごく薄いので今回の解析では無視している。現在、ZnO膜の上面からインジウム電極を押し当てているが、インジウムよりも音響インピーダンスの高い電極の方が音波発生効率が高いことが分かった。音響インピーダンスを上げる方策として、インジウムと錫、鉛等の合金を検討した。現在、インジウム-錫合金で良好な結果が得られている。今回の解析の詳細、新電極探索法、その結果の詳細などを報告する。



Poster presentation | R3: High-pressure science and deep Earth's material

📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏠 Poster
(Room No. 16)

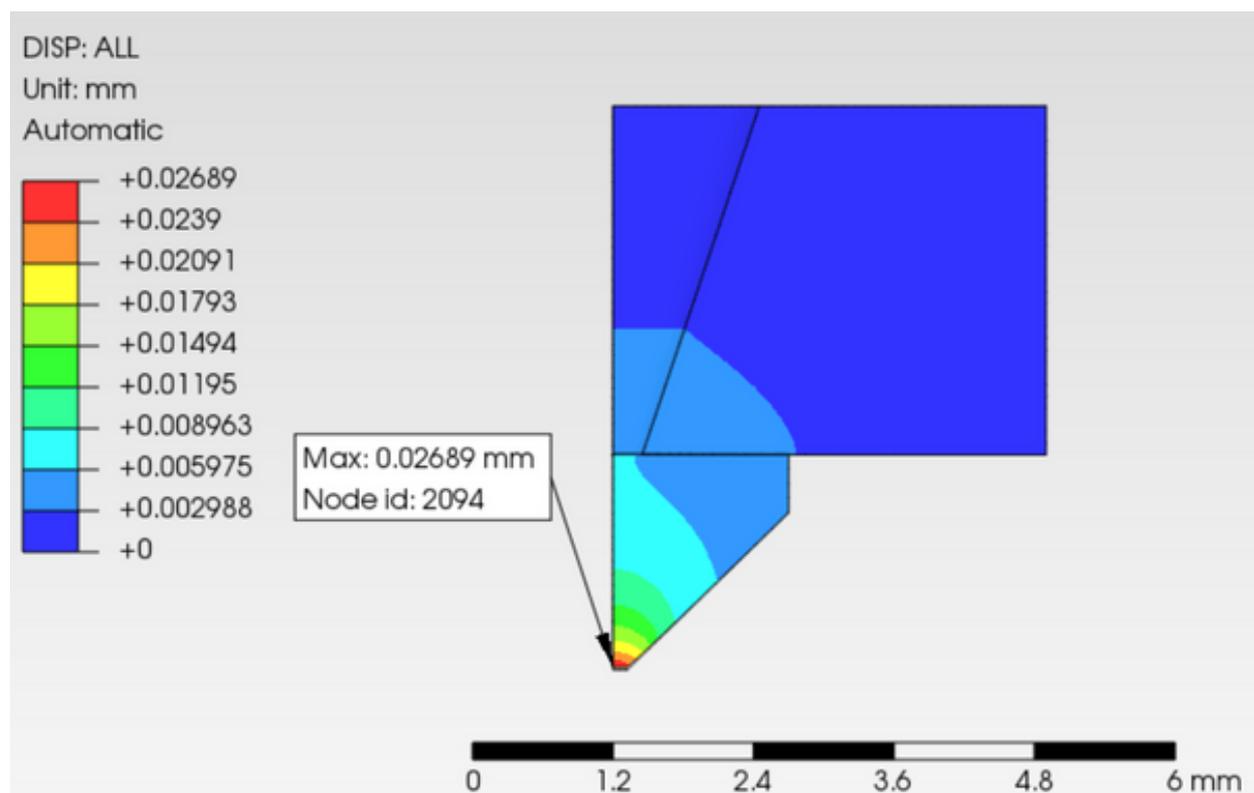
R3: High-pressure science and deep Earth's material

[R3-P-13] Example of using free FEM software for GHz-DAC sound velocity method

*Shuei Akahoshi¹, Akira Yoneda¹ (1. Osaka Univ. Sci.)

Keywords : Finite Element Method Analysis

GHz-DAC法では、有限要素法(FEM)ソフトを用いて高圧下でのダイヤモンドアンビルセル(DAC)の変形量を解析する必要がある。従来、これには有料FEMソフトであるCOMSOLが用いられていた。しかし、COMSOLの導入には数十万の費用がかかる。そこで今回は、無料FEMソフトであるPrePomaxを使った構造解析の事例を紹介する。無料FEMソフトの導入は研究費の節約に寄与し、限られた予算内での研究の効率化と継続性の確保に貢献する。



📅 Wed. Sep 10, 2025 12:30 PM - 2:00 PM JST | Wed. Sep 10, 2025 3:30 AM - 5:00 AM UTC 🏠 Poster
(Room No. 16)

R3: High-pressure science and deep Earth's material

[R3-P-14] Pressure scale cross-evaluation in the multi-megabar region

*Takeshi SAKAI¹, Yuki Nakamoto², Hirokazu Kadobayashi³ (1. GRC, Ehime University, 2. KYOKUGEN, Univ. of Osaka, 3. JASRI)

Keywords : Pressure scale、Toroidal type DAC、Equation of state

地球よりも大きな質量をもつ系外惑星が多数発見されるようになり、惑星深部科学の研究圧力領域は地球中心圧力を超える範囲まで拡がりを見せている。このような大きな惑星の深部を理解するためには極限圧力環境を実験的に再現する必要がある。ダイヤモンドアンビルセル (DAC) は地球中心に及ぶ広範な圧力条件を実現できる静的圧縮実験手段として広く利用されてきたが、従来のDACでは400 GPa超の圧力発生は困難であった。これを可能にする手法として2段式DAC(ds-DAC)(Dubrovinsky et al. 2012)とトロイダル型DAC(t-DAC)(Dewaele et al. 2018)が注目されている。これまでにそれぞれの手法について多くの追試 (ds-DAC, Dubrovinsky et al. 2015; Dubrovinskaia et al. 2018; Sakai et al. 2015, 2018, 2020) (t-DAC, Jenei et al. 2018; Zurkowski et al. 2024; Sakai et al. 2025) が行われている一方、これらの研究における実験発生圧力はそれぞれ異なる圧力スケールにより決定されていることも多く、絶対的な値としての信頼性に加えて、相対的な関係、すなわち実際にはどちらの実験の方が圧力が高いのか?といったことでさえはっきりしないのが問題であった。そこで我々は2つの圧力スケール物質を同時圧縮することで圧力スケールの相対的な関係性を把握する実験を行った(Sakai et al. 2025)。具体的には鉄、銅、モリブデン、タングステン、レニウム、白金、金、酸化マグネシウムについて異なる7種の組み合わせで、最大で430 GPaまでの圧縮実験を行った。特に高い圧力の実験にはキュレット径16~20 μmのt-DACを用いた。高圧下の試料の格子体積はSPring-8 BL10XUおよびBL37XUにおいてX線回折実験を行い測定した。本研究の結果に加えて多くの先行研究の圧縮データを組み込み、上記物質に塩化ナトリウムを加えた9つの物質の体積-体積関係を明らかにした。この体積-体積関係は圧力スケールとは独立した実験測定結果であり、既存圧力スケールの相互比較が可能となると同時に、任意の一次圧力スケールに対して内部整合的な状態方程式群を提供する。圧力スケールの相互比較の例としては、近年報告されたRamp compressionに基づくCu, Au, Pt, Feの状態方程式(Fratanduono et al. 2020; 2021; Smith et al. 2018)について相互比較すると、Cu, Au, Feは3%の誤差範囲内で一致するが、Ptは400 GPa領域で7%程高い圧力を与える傾向にあることが分かった。また上述のt-DACを用いた報告は最初600 GPaの発生を報告したDewaele et al. (2018)によるただ一つの実験を除いて、他全ての実験は500 GPaに到達していないことが明らかとなった。t-DACは地球中心圧力を超える圧力発生を可能とする手法として有用ではあるが、500 GPa以上の圧力領域への適用を確実なものとするにはさらなる技術開発が必要である。