

平成 27 年度～平成 31 年度 文部科学省科学研究費助成事業
新学術領域研究（研究領域提案型）

核—マントルの相互作用と共進化 ～統合的地球深部科学の創成～

平成 28 年度成果報告会講演要旨集
平成 29 年 3 月 26 日～3 月 28 日

於
国立研究開発法人海洋研究開発機構横浜研究所
三好記念講堂



平成 28 年度文部科学省科研費助成事業新学術領域研究
「核-マンツルの相互作用と共進化」平成28年度成果報告会
会場：海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂
開催日：平成29年3月26日（日）～3月28日（火）
プログラム

3/26

13:00-13:30 総括班・国際支援班 報告

13:30-14:10 特別講演：深尾良夫（海洋研究開発機構）

PREM 誕生 35 年後の下部マンツルモデル

14:10-15:00 休憩・ポスター

15:00-16:30 A01-1

座長：西原遊（愛媛大） タイムキーパー：五味斉（岡山大）

15:00-15:30 芳野 極 平成 28 年度のダイナミクス班の成果の概要

15:30-15:50 今村公裕、久保友明 バイロライトの多相粒成長実験に基づく下部マンツルスラブの粒径進化と粘性変化の検討（20 分）

15:50-16:10 太田健二 核-マンツル境界の熱伝導率推定に関する平成 28 年度の成果

16:10-16:30 尾崎典雅 ハイパワーレーザーを用いた溶融鉄および鉄合金の生成と観測

ポスター

西原 マルチアンビル装置を用いた熱電対起電力の圧力効果の測定

五味 Electrical resistivity of the Earth and planetary cores

岡本 The relationship between creep and grain growth rates in forsterite+periclase polycrystals

土井 コーサイトの高温高压変形実験

西川 レーザー衝撃圧縮下における融解ケイ酸塩化合物の物性計測

16:30-17:00 休憩・ポスター

17:00-18:30 A01-2

座長：鍵 裕之（東大） タイムキーパー：飯塚理子（東大）

17:00-17:20 鈴木昭夫 構造物性班の進捗状況

17:20-17:40 木村友亮、五島賢一、村上元彦 Development of Brillouin and Raman spectroscopy at high pressure and high temperature: Application to planetary interior

17:40-18:00 寺崎英紀 鉄合金融体の弾性への圧力・温度の影響

18:00-18:30 坂巻竜也ほか マルチメガバールでの鉄の音速測定

ポスター

飯塚 高温高压実験による鉄-シリケート中の軽元素の探索と 地球進化過程への応用 ～水素を例に～

下山 高压下における鉄-炭素合金の熱弾性的性質

18:30 1日目散会

3/27

9:00-10:30 A01-3

座長：山崎大輔（岡山大） タイムキーパー：桑原秀治（愛媛大）

9:00- 9:20 入船徹男 技術開発班の進捗状況

9:20- 9:40 境 毅 Internal consistency of pressure scales

9:40-10:05 桑原秀治(PD) マグマオーシャン固化過程におけるハロゲン元素分別

10:05-10:30 西 真之 Experimental investigation of the pyrite-type high-pressure form of FeOOH

ポスター

山崎：焼結ダイヤモンドアンビルを用いた川井型装置による高温高压発生

10:30-11:00 休憩・ポスター

11:00-12:30 A02-1

座長：下田玄（産総研） タイムキーパー：賞雅朝子（JAMSTEC）

11:00-11:20 鈴木勝彦 同位体班の戦略と進捗状況

11:20-11:45 野村龍一 高压実験から制約する核-マントルの化学：経過報告

11:45-12:10 木村純一ほか Origin of geochemical mantle components: Role of spreading ridges and thermal evolution of mantle

12:10-12:30 賞雅朝子 W 同位体から地球の初期進化を制約する試み：経過報告

ポスター

大内 D-DIA 型変形装置を用いた下部マントルの温度圧力条件下におけるその場観察変形実験に向けて

佐野 マントル遷移層構成鉱物間における水素同位体分配実験

新名 従来手法を統合した下部マントルにおける融解現象の理解

12:30-14:00 昼食

14:00-15:30 A02-2

座長：Satish（新潟大） タイムキーパー：阿部都（新潟大）

14:00-14:20 Satish Progress report on light element partitioning and isotope fractionation process in deep Earth

14:20-14:38 小木曾哲 マントルの白金族元素存在度の精密な推定に向けて

14:38-14:58 舘野繁彦 Newly developed internal-resistive heated diamond-anvil cell with boron-doped diamond: Toward deep lower-mantle petrology

14:58-15:15 角野浩史 金属-ケイ酸塩メルト間の希ガス分配係数の決定に向けて

15:15-15:30 鎌田誠司 Partitioning of light elements between mantle and core (

ポスター

秋澤 マントルにおける‘若い’PGE 移動の証拠

阿部 Micro-volume stable isotope measurement system using IRMS MAT-253 for high pressure experiment run products

15:30-16:00 休憩・ポスター

16:00-17:30 A03-1

座長：大滝壽樹（産総研） タイムキーパー：三好崇之（地震研）

16:00-16:20 田中 聡 地震・電磁気班の進捗状況
 16:20-16:45 清水久芳 ローカル地磁気ジャークの電磁場観測とマントル最深部電気伝導度構造
 16:45-17:10 竹内 希 地震波エンベロープで制約された海洋リソスフェア・アセノスフェアの内部減衰
 17:10-17:30 松島政貴 地磁気データで明らかにする核-マントル結合の時空間変動 (FY2016)

ポスター

川勝 Pacific Array of, by and for Global Deep Earth Research
 金嶋 Mid-mantle seismic scatterers beneath Tonga-Fiji
 大滝 外核最下部 (F 層) 不均質の地震学的証拠
 大林 Local strong slow S-wave anomalies at western edge of Pacific LLSVP
 Houser The BEAMS model: Bridgmanite Enriched Ancient Mantle Structure
 三好 震源再計算を考慮したアジョイントトモグラフィー：セントロイド時刻の補正
 Noisagool The successful deployment of 40 broadband seismometers in Thailand, Thai Seismic Array (TSAR)
 Boregeaud Imaging paleoslabs in the D" layer beneath Central America and the Caribbean using seismic waveform inversion
 鈴木 3-D SH velocity structure within the D" layer beneath the Northern Pacific
 Xin Anomalous behavior of core phase PKPbc-df differential travel times from observations of South Sandwich Islands earthquakes by Alaskan and US seismic arrays
 山谷 Redetermination of the source parameters of deep earthquakes and the effect on 3-D earth models obtained by waveform inversion

17:30-17:50 話題提供 Bill McDonough

Defining the deep Earth with the OBK (Ocean Bottom KamLAND) detector)

18:00- 懇親会

3/28

9:00-10:30 A03-2

座長：田中宏幸（東大地震研） タイムキーパー：TBA

9:00- 9:10 田中宏幸 ニュートリノ班の進捗状況
 9:10- 9:25 飯塚 毅 日本の岩石試料分析結果（仮題）
 9:25- 9:40 上木賢太 (PD) ジオニュートリノモデリングに向けた岩石ウラン・トリウム含有量データベースの構築と、化学組成確率分布モデルの構築
 9:40-10:05 榎本三四郎 地震波トモグラフィによる岩相推定を応用したニュートリノフラックスのモデリング法開発（仮題）
 10:05-10:30 渡辺寛子 方向検知型地球ニュートリノ検出器の開発（仮題）

ポスター

山野 誠 日本列島の地下温度構造モデリングへ向けて
 白旗 豊 方向検知型地球ニュートリノ検出器の開発

10:30-11:00 休憩・ポスター

11:00-12:30 A04-1

座長：高橋太（九州大） タイムキーパー：Sebastian Ritterbex（愛媛大）

11:00-11:30 土屋卓久 理論計算班の活動状況
 11:30-11:50 中川貴司 コア-マントル結合熱化学進化モデルの開発—安定成層形成の影響

11:50-12:10 Z. Xiong (PD) Ab initio calculation of K partitioning between silicate and iron melts
12:10-12:30 竹広真一 核マントル境界直下の安定成層の形成および破壊に関する流体力学的研究

ポスター

Hernlund Influence of Lower Mantle Convective Planform Memory on Core-Mantle Evolution

高橋 安定成層のダイナモへの影響について

宮腰 スーパーアースのマントル対流シミュレーション

出倉 下部マントル鉱物の第一原理格子熱伝導率計算の進捗状況

Ritterbex Modeling point defects in iron polymorphs: Vacancy diffusion in Earth's inner core

B01

ポスター

伊藤 二次イオン質量分析法による軽元素（水素・炭素）分析法の開発とその応用例

東 水蒸気雰囲気下におけるフッ素アパタイトの水素拡散実験

武多 ニュートリノ振動を用いた地球科学の実現に向けて

12:30-12:55 講評

12:55-13:00 領域代表挨拶・諸連絡

13:00 成果報告会終了

PREM 誕生 35 年後の下部マントルモデル

深尾良夫 (fukao@jamstec.go.jp)

海洋研究開発機構 (fukao@jamstec.go.jp)

昨年 (2016 年) は AD と DA (Adam Dziewonski and Don Anderson) による 1 次元地球モデル PREM が発表されて 35 年目にあたるが、昨年・一昨年は著名な著者二人が相次いで亡くなった年でもある。ここでは、PREM 以降の地球モデル構築の努力の到達点を特に下部マントルに焦点を当てて概観する。

PREM においては Adams-Williamson 式を満たす単調・均質な世界でしかなかった下部マントルの意外な複雑性・非均質性が近年複数のモデルに共通して見えてきた。特に下部マントル最上部と最下部の異常性が顕著であるが、深さと共に増大する非均質性も見逃せない。これらを説明しようとするシミュレーション研究も含めて、下部マントルモデル研究の一端を (可能な範囲で) 紹介する。

The relationship between creep and grain growth rates in forsterite+periclase polycrystals

Atsuro Okamoto¹, Takehiko Hiraga¹

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo (aokamoto@eri.u-tokyo.ac.jp)

Absence of seismic anisotropy in the earth's lower mantle suggests deformation by diffusion creep mechanism (Karato et al., 1995). The mantle is considered to consist mainly of perovskite and ferropericlase, thus, it is required to understand a mechanism of diffusion creep of a two-phase material. The diffusion creep is significantly sensitive to grain size such that the flow in the lower mantle is likely to be controlled by grain growth (Solomatov, 1996). Both creep and grain growth require diffusion of atoms with a long-distance, which is almost the size of grains. Thus, it is likely that rate-controlling processes for creep and grain growth are identical. To examine this prediction, we conducted creep and grain growth experiments on an analogue material of the lower mantle, which consists of similar elements of the lower mantle minerals, at high-temperature and atmospheric pressure.

We synthesized highly-dense forsterite + periclase (10vol%) polycrystals from a mixture of fine powders of Mg(OH)_2 and SiO_2 (Koizumi et al., 2010). Grain sizes of forsterite and periclase are 0.3 and 0.2 μm , respectively. We performed uni-axial compressional creep experiments on these materials at atmospheric pressure. Prior to the deformation, the sample was annealed at 1420°C for 12h to avoid grain growth during the experiment. We changed loads ranging from 60 to 200 MPa under constant temperatures of 1180°C~1400°C during the experiments. At each stress level, we measured a strain rate where we could assume steady-state creep. We also performed grain growth experiments at different temperatures ranging from 1280°C to 1400°C for 500h using temperature gradient formed outside the central heat zone in the furnace. We observed microstructures of the aggregates after the experiments using scanning electron microscope (SEM).

Based on creep data, we obtained a relationship of $\dot{\epsilon} \propto \sigma^n$ ($n = 1.3\sim 1.6$). We observed monotonic increment of grain sizes of both forsterite and periclase grains with increasing temperature. We calculated grain boundary diffusivities from rates of creep and grain growth using theoretical models for grain growth and for diffusion creep (Coble creep), finding both diffusivities are essentially identical. The diffusivities are compared with previously measured grain boundary diffusivity of Si^{4+} (Fei et al., 2016) and MgO (Gardes & Heinrich, 2011) finding our values are comparable to the diffusivity of Si^{4+} . We will discuss the flow mechanism of the lower mantle based on these results.

Electrical resistivity of the Earth and planetary cores

Hitoshi GOMI¹ • Takashi Yoshino¹

¹ Institute for Planetary Materials Okayama University
(hitoshi.gomi@okayama-u.ac.jp)

金属の熱伝導度は、Wiedemann-Franz の法則 ($k = LT/\rho$, k : 熱伝導度, L : ローレンツ数, ρ : 電気抵抗率) を通じて電気抵抗率から精度よく推定できる (Anderson, 1998; Poirier, 2000)。地球の核の熱伝導度は、内核の年齢や初期の核・マントル境界 (CMB) などの核の熱史を制約する上で重要なパラメータである (e. g. Labrosse 2015)。しかしながら、核の熱伝導度の推定値には大きなばらつきがある (Gomi and Hirose, 2015)。特に近年のダイヤモンドアンビルセルを用いた研究では、核の熱伝導度が高いとするもの (Ohta et al., 2016)、低いとするもの (Konopkova et al., 2016) の両方が同時期に報告されている。これらの研究の問題点として、レーザー過熱を用いたことによる温度の時間的・空間的な変動が大きい事 (Dobson, 2016)、核に存在する軽元素が電気抵抗に大きく影響するにもかかわらず純鉄に対してのみしか実験が行われていないこと (Gomi et al., 2016) などが挙げられる。

本研究では、マルチアンビル装置を用いた高温高圧実験と KKR-CPA 法による第一原理計算の組み合わせから、地球や惑星の核の電気抵抗率の制約を行う。今回は、これらの進捗状況に関して発表する。

パイロライトの多相粒成長実験に基づく下部マントルスラブの粒径進化の検討

今村公裕¹・久保友明²

¹ 九州大学 (imamura.m.063@s.kyushu-u.ac.jp)

² 九州大学

下部マントルにおける沈み込むスラブの粘性率を理解する上で結晶粒径は重要なパラメータである。パイロライトは下部マントル条件では bridgmanite (Brg)、ferropericlasite (Fp)、Ca-perovskite (Capv)、majoritic garnet (Mjgt) の 4 相で構成される(e.g., Irifune 1994)。特に下部マントルスラブではポストスピネル相転移によって一度細粒化されるので、その後の粒径進化は粒成長カインेटクスに大きく左右される。粒成長カインेटクスは $d^n - d_0^n = kt$ (d : 結晶粒径、 d_0 : 初期粒径、 n : 粒成長指数、 k : 速度定数、 t : 時間)と表される。多相系では第一相の粒成長が分散した第二相粒子に妨げられ(Zener pinning)、その粒成長は第二相粒子の Ostwald ripening によって律速される。そのとき第一相粒子と第二相粒子の粒径は $d_I/d_{II} = \beta/f_{II}^z$ (β と z : Zener parameter、 f_{II} : 第二相の体積比)と表される。本研究ではパイロライトを用いた下部マントル条件での粒成長実験を行い、多相粒成長のカインेटクスをもとに下部マントルスラブの粒径進化を検討した。

実験は九州大学および愛媛大学 GRC 設置の川井型マルチアンビル装置を用いて行った。実験条件は圧力 25-27 GPa、温度 1600-1950°C で 6-3000 分保持した。回収試料の微細組織の観察、化学組成分析には FE-SEM を用いた。25 GPa の 4 相領域)における各相の体積比は $f_{Brg} \sim 0.7$ 、 $f_{Fp} \sim 0.15$ 、 $f_{Mjgt} \sim 0.13$ 、 $f_{Capv} \sim 0.02$ であった。共析組織の影響をなくすために、等粒状組織である回収試料の粒径を用いて粒成長カインेटクスを決定した。第二相粒子である Fp と Mjgt は均質に分散し Brg の粒界に存在しており、それらの粒径比はそれぞれ $d_{Brg}/d_{Fp} \sim 1.7$ 、 $d_{Brg}/d_{Mjgt} \sim 1.2$ と一定であった。これらのことから Zener pinning と第二相粒子の Ostwald ripening による粒成長が起きたと示唆される。粒成長指数 $n=4$ (粒界拡散律速, e.g., Ardell 1972) とした時 Brg の活性化エンタルピーは Fp と Mjgt の中間的な値をとることから、Brg の粒成長は Fp と Mjgt の両方にピン止めされていると示唆される。第二相を区別しないとき $f_{II=Fp+Mjgt} \sim 0.3$ 、 $d_{I=Brg}/d_{II=Fp+Mjgt} \sim 1.5$ であり、これらの関係は olivine-enstatite 2 相系における先行研究 (Tasaka and Hiraga, 2013)で見いだされた結果と調和的である。一方 27 GPa (3 相領域)における実験では結晶粒径が 4 相領域よりもやや大きくなった。これは第二相の体積比が減少したことが原因だと考えられる。当日の発表では、これらの結果を基に検討した下部マントルスラブの粒径進化について報告する。

マルチアンビル装置を用いた熱電対起電力の圧力効果の測定

西原遊¹・福家一樹¹・土井峻太¹・柿澤翔¹・肥後祐司²・丹下慶範²・入舩徹男¹¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター (yunishi@sci.ehime-u.ac.jp)² 高輝度光科学研究センター

熱電対は高温高压実験における温度測定法として最も広く用いられているが、圧力によって起電力-温度の関係は変化し、その変化の傾向は熱電対の種類ごとに全く異なることが知られている。このため、各種の熱電対に対し、その圧力効果を決定することが必要とされている。しかし、実験的な困難から熱電対の圧力効果の絶対値の理解は40年以上にわたり4 GPa以下の圧力にとどまってきた。我々は最近、熱電対起電力の圧力効果を決定するための新しい実験手法を開発した (Nishihara et al., 2016)。この手法では川井型マルチアンビル装置を用いることにより従来の圧力を越える高压下で起電力測定を行い、同時に放射光 X 線を用いることにより熱電対線上の圧力経路の定量的測定を実現した。本研究では、この手法に基づいて K 型(クロメル-アルメル)と D 型(W3Re-W25Re)熱電対の圧力効果を測定した。

1 辺 18 mm の(Mg,Co)O 八面体圧力媒体に円筒型グラファイト発熱体を組み込み高温高压実験を行った。測定対象である金属線を発熱体の円筒軸と平行に通し、最高温度部の片側では MgO を、反対側では Al₂O₃ を周囲に配置することによって非対称な温度圧力経路の実現した。このセル中の温度分布は、複数の熱電対を配置した予備実験によって決定した。起電力測定実験は SPring-8, BL04B1 設置の SPEED-1500 装置を用いて行った。単線上の各位置において X 線回折パターンを取得し、得られた格子体積と状態方程式を用いて圧力を算出した。K 型では Ni の、D 型では W の状態方程式 (Campbell et al., 2009; Litasov et al., 2013) を用いた。X 線回折測定の最高温度圧力条件は、K 型では約 7 GPa, 600°C、D 型では約 16 GPa, 900°C である。

得られた単線起電力と温度圧力経路を Nishihara et al. (2016)の方法により解析し各金属の Seebeck 係数の圧力効果 ΔS_p を求めた。クロメル、アルメルの ΔS_p はより低圧での Getting and Kennedy (1970)の結果とよく一致した。また得られた結果を基に計算すると、D 型熱電対では見かけ温度の真の温度からの差は 16 GPa, 900°C において -27°C である。これを外挿すると、温度差は 23 GPa, 1500°C では -70°C にも達することがわかった。D 型熱電対を用いた実験により決定された Mg₂SiO₄ のポストスピネル相境界は、この温度差を考慮して補正すると 0.5–0.7 GPa 高压側に移動し、これは 660 km 不連続面の深さが 12–16 km 深くなることに対応する。

レーザー衝撃圧縮下における融解ケイ酸塩化合物の物性計測

西川豊人¹・尾崎典雅^{1,2}・関根利守³・佐藤友子³・ALBERTAZZI Bruno⁴・
BENUZZI-MOUNAIX Alessandra⁴・BOLIS Riccado⁴・GUARUAGLINI Marco⁴・KOEING
Michel⁴・宮西宏併²・RAVASIO Alessandra⁴・坂和洋一⁵・梅田悠平³・児玉了祐^{1,2,5}

¹ 大阪大学 (tnishikawa@ef.eie.eng.osaka-u.ac.jp)

² 大阪大学光科学センター

³ 広島大学

⁴ エコールポリテクニーク

⁵ 大阪大学レーザー研

岩石型惑星の主要構成物質であるケイ酸塩化合物の超高压下における融解挙動は、地球形成時のマグマオーシャンの化学分離過程、すなわちマントルと中心核の形成過程や、太陽系外惑星のスーパーアースの内部構造などを理解するうえで極めて重要である。中でも、特にマグネシウムを含むケイ酸塩化合物であるエンスタタイト (MgSiO_3) は下部マントルの主要構成鉱物であるペロブスカイトの主成分であり、ケイ酸塩のもう一つの主要組成と言える。地球中心の内核やスーパーアースの深部においては、数百 GPa を超える圧力になっていると考えられており、従来の圧縮実験で到達することは困難であり、そのような高い圧力領域を再現するための手法はレーザー誘起衝撃圧縮に限られる。本研究では、テラパスカルに近い圧力領域をレーザー衝撃圧縮によって実現し、試料の内部をリアルタイムに時間分解して直接観測することで、超高压下におけるエンスタタイトの状態を調べ、高温高压下での物性の変化や、発生している反応プロセスを推察した。

本実験は大阪大学レーザーエネルギー研究センターの激光 XII 号 HIPER レーザーを利用した。レーザーの波長・スポット径は 527nm・1mm、時間波形は半値幅 2.5ns の矩形波である。

計測には VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) を用いて衝撃波速度 (U_s) と反射率 (R) の、SOP (Streaked Optical Pyrometer) を用いて自発光強度から推定される高精度な衝撃圧縮下の温度 (T) の測定を行った。

300 GPa より高い圧力域について比較的高品質なデータを得ることに成功した。先行研究で報告されている同圧力域での解析データとの比較、および過去実験で報告されているガス銃による低圧のデータとの比較を行い、体積変化の定量的な評価を行う予定である。これにより得られることが期待される詳細なユゴニオおよび輻射データは、ケイ酸塩の不一致結晶化現象を理解する上で不可欠である。

核—マントル境界の熱伝導率推定に関する平成 28 年度の成果

太田健二¹¹ 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系 (k-ohita@geo.titech.ac.jp)

核—マントル境界を貫く全地球内部の熱輸送現象の理解には核とマントルを構成する物質の熱物性に関する知識が必要である。分担者の研究グループでは高温高压実験を手法として、核を構成する鉄合金および下部マントルを構成する鉱物の熱伝導率推定を行っている。今年度の研究成果として以下の話題を紹介する。

1) 核の主成分である純鉄の熱伝導率

コアは地球内部で最も高温の領域であり、そこを流れる熱流は地球磁場の生成・維持や内核の成長速度と密接に関係している。我々はレーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルを用いて純鉄の電気抵抗率を最高圧力 212 GPa, 最高温度 4500 K までの条件で測定を行った。その結果、純鉄の電気抵抗率の温度依存性が高温条件において弱くなる抵抗飽和現象を確認し、純鉄の電気抵抗率の上昇が抑制された結果として、純鉄の熱伝導率は核—マントル条件で 226 W/m/K と高い値を示すことを明らかにした (Ohta et al., 2016 Nature)。この結果はコア内部の熱流量が非常に高く、初期地球において外核は熱対流のみで磁場を維持していたことや、内核の年齢が 10 億歳以下であったことを示唆する。

2) 下部マントル構成鉱物の熱伝導率

コアの熱流は核—マントル境界における熱伝導によってマントルへ輸送される。核—マントル境界に存在する熱境界層の構造はマントル深部物質の熱伝導率に支配されているため、下部マントル構成物質の熱伝導率の決定は非常に重要であるといえる。我々は下部マントルの主要構成鉱物であると考えられる (Mg,Fe)(Al,Si)O₃ ブリッジマナイト及び (Mg,Fe)O フェロペリクレスの熱伝導率測定を高圧条件下で行った。鉄を含まない系で行われた先行研究では、MgO の熱伝導率は MgSiO₃ ブリッジマナイトのそれよりも 1 桁近く高いことがわかっていた (Ohta et al., 2012 EPSL; Dalton et al., 2013 Sci. Rep.)。しかし、本研究によって MgO-FeO 系の熱伝導率には非常に強い固溶体効果があることがわかり、鉄を含む系ではブリッジマナイトの方がよい熱伝導体として振る舞うことを明らかにした (Ohta et al., 2017 EPSL; Okuda et al., under review)。

コーサイトの高温高压変形実験

土居峻太¹・西原遊¹・後藤弘匡²・飯塚理子³・鈴木昭夫⁴・亀卦川卓美⁵

¹ 愛媛大学 GRC (shunta-d@sci.ehime-u.ac.jp)

² 東京大学 ISSP

³ 東京大学 GCRC

⁴ 東北大学理学部地球科学系

⁵ KEK 物質構造科学研究所

大陸地殻は上部マントルと比較して SiO₂ や放射性元素に富み、深部への運搬量は地球内部での化学組成や熱史に大きな影響を与える可能性がある。コーサイトは深さ 90~270 km の温度圧力領域で安定な SiO₂ 鉱物であり、その深さまで沈み込んだ大陸地殻の変形挙動を支配すると予想されている。しかし、コーサイトの粘性率に関する研究は Renner et al. (2001) による深さ 120 km より低い圧力領域の研究に限られている。またコーサイトの変形機構に関する先行研究では (Renner et al. 2001, Idrissi et al. 2008, Zhang et al. 2013)、主要なすべり系に関して一致した見解が得られていない。本研究ではコーサイトに対して二種類の高温高压変形実験を行った。一つ目は流動則決定を目的としたその場観察一軸圧縮実験、二つ目は変形組織から変形機構に迫ることを目的とした変形回収実験である。

D-DIA 型高压変形装置 (D-CAP, MAX III) を用いたその場観察一軸圧縮実験を高エネルギー加速器研究機構の PF-AR、NE7A で行った。出発試料及び回収試料の含水量測定と組織観察はフーリエ変換型赤外分光分析装置と走査型電子顕微鏡を用いてそれぞれ行った。出発物質はランダムな結晶方位を持つコーサイト多結晶体である。一辺 7 mm の立方体 (Mg, Co) 0 圧力媒体を切り欠き辺長 5 mm の WC と cBN のアンビルで圧縮した。高压下で一時間焼きなまし、初期応力を取り除いてから一定ひずみ速度の一軸圧縮変形を行い、50 keV の単色 X 線を用いて試料のひずみと応力をその場観察した。変形条件は温度 800~1100°C、圧力 3~4 GPa、ひずみ速度 $6.7 \times 10^{-6} \sim 1.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ である。また、同じ出発試料及び愛媛大学の D-DIA 型高压変形装置 MADONNA を用いて温度 1000~1200°C、圧力 3~6 GPa、ひずみ速度 $2.1 \times 10^{-5} \sim 4.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の変形条件で変形回収実験を行った。ひずみは試料中または試料上下に配置した白金箔から算出した。また、回収試料内の粒子の結晶方位を FE-SEM を用いた EBSD 分析により決定し試料の選択配向を決定した。

その場観察一軸圧縮実験において、定常クリープが達成された条件で定常応力を求めた。結果から粘性率を算出すると、800°C で行った変形を除いた全てで Renner et

al. (2001)とよく一致した。結果に流動則構成方程式をフィットすると、応力指数 n は 1.72 ± 0.38 、活性化エンタルピー H^* は 99.5 ± 27.7 kJ/mol と求まった。一方、Renner et al. (2001)では $n=2.9 \pm 0.5$ 、 $H^*=261 \pm 45$ kJ/mol であるが、この不一致は本研究と Renner et al. (2001)双方の応力値が大きな誤差を持つことによる可能性がある。変形回収実験では温度 1000°C、圧力 3.7 GPa で一軸圧縮形とせん断変形を行った。一軸圧縮実験では圧縮軸方向に $\langle 010 \rangle$ 、圧縮軸垂直方向に $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 001 \rangle$ が集中した。またせん断変形実験ではせん断面法線方向に $\langle 010 \rangle$ 、せん断方向に $\langle 100 \rangle$ が集中した。この結果はコーサイトが $\{010\}\langle 100 \rangle$ すべりの転位クリープで変形したことを示唆し、同様の条件でせん断変形実験を行った Zhang et al. (2013)と調和的である。

Ichikawa et al. (2013)は Renner et al. (2001)の流動則パラメータを用いた数値シミュレーションにより、毎年 2.2 km^3 の大陸地殻が深さ 270 km まで運搬されると報告した。本研究の流動則は n 値が低いため、天然で達成される 10^{-12} s^{-1} 以下のひずみ速度では Renner et al. (2001)と比較して低粘性となり、大陸地殻の運搬量はより少なく見積もられることが予想される。

平成 28 年度のダイナミクス班の成果の概要

芳野 極¹¹ 岡山大学・惑星物質研究所 (tyoshino@misasa.okayama-u.ac.jp)

ダイナミクス班では、マントル及び核、核-マントル境界におけるレオロジー・熱物質輸送過程といった物質の動的挙動に関する高温高压実験による研究を行なっている。平成 28 年度には、当班に関連した研究から 2 本の論文が *Nature* 誌に公表された。太田らは DAC を用いて鉄の電気伝導度を高温高压下で測定し、従来の推定よりも高い電気伝導度を有することから内核の年齢はかなり若い可能性があるという重要な知見を得た。辻野らは大容量 D-DIA プレスを用いて下部マントル条件下で、剪断応力下のブリッジマナイトの結晶選択配向を初めて実験的に決定し、下部マントルの流動パターンに制約を与えることに成功した。本年度は以下の研究を推進しており、予察的な結果が得られ始めている。

1、既設 D111 型変形装置の試験・D111 型ガイドブロックの PF への導入

今年度は下部マントル条件における変形実験を行うために、D111 型ガイドブロックを放射光施設の高エネルギー研究所の PF-AR のビームライン NE7A に既設の DIA 型プレス MAX-III に 3 月に導入した。これに先立ち、既に同タイプのプレスを導入している University College London の Dobson 教授の研究室を訪問し、導入予定のガイドブロックのデザインの改善、実験技術の習得を目的として試験的な実験を行った。最近開発されたバインダレス超硬アンビルを用いることにより、下部マントル条件における高压変形実験に成功した。

2、核-マントル境界における物質移動の研究

核-マントル境界を模擬的に高压実験セル内に再現することにより、核-マントル境界における化学的な相互作用に関する研究を推進している。鉄合金を下部マントルの主要鉱物であるブリッジマナイトとフェロペリクレースで挟み、鉄合金を融解させることにより、界面張力及び形態学的不安定性により鉄合金の浸透が起きるかを仮想核-マントル境界物質であるブリッジマナイトが安定である 25GPa で調査した。その結果、鉄合金はフェロペリクレースの粒界に浸透しているのに対し、ブリッジマナイト側ではほぼ鉄合金の浸透は観察されなかった。このことは、浸透による珪酸塩マントルの化学的な相互作用はほぼ起きないことが推察できる。さらに、親鉄元素の粒界拡散実験においても、親鉄元素の酸化が起きない限り、拡散距離が非常に短いことから、核形成後において核とマントル間における化学的相互作用は地球化学的にほとんど寄与しないものと結論される。

高圧下における鉄-炭素合金の熱弾性的性質

下山 裕太¹・寺崎 英紀²・田窪 勇作³・浦川 啓⁴・近藤 忠⁵¹ 大阪大学 (y-shimoyama@ess. sci. osaka-u. ac. jp)² 大阪大学³ 岡山大学⁴ 大阪大学

地球型惑星の外核は 10 %ほどの軽元素(H,C,O,Si,S など)を含む鉄合金融体で構成されているとされ、その組成や構造を解明するためには鉄融体の物性に与える軽元素の影響を定量的に評価することが必要である。近年、鉄-軽元素系合金の密度-音速同時測定が行われ、元素の種類に応じて密度-音速が変化することが分かっている(たとえば Mao et al., 2012)。そして Fe-C 系の同時測定は Fe₃C や高圧相である Fe₇C₃ において調べられている。このように固体条件での測定が多く行われているが、液体条件における Fe-C 系の同時測定は行われていない。本研究では液体条件での Fe-C 系密度-音速同時測定を行い、炭素の熔融鉄密度-音速へ与える効果を調べた。

高圧発生には 180ton キュービックアンビルプレス(SMAP-180, BL22XU 設置)を用いて行った。アンビル先端部の長さ(TEL)は 6 mm を使用した。単色 X 線(35 keV)を試料部に導入し、入射 X 線と透過 X 線の強度をイオンチャンバーを用いて測定した。このときプレスを X 線から直行(Y 軸)方向に動かすことにより試料の吸収プロファイルを得ている。得られた吸収プロファイルをランベルト・ベールの式を用いてフィッティングすることにより試料の密度を求めた。音速測定は BL22XU ビームラインに音速測定システムを新たに導入し、測定手法は超音波法(パルスエコーオーバーラップ法)を採用した。測定に用いた周波数帯域は 35-37 MHz である。試料の加熱には円筒形グラファイト抵抗ヒーターを使用した。また、MgO と h-BN の粉末を体積比 1:1 で混合したものを圧力マーカーとして用い、イメージングプレートより収集した X 線回折パターンから圧力-温度を求めた。

Fe-C 系の密度-音速同時測定を 1.1-3.3 GPa、1650-1850 K の圧力-温度条件で測定を行った。音速の温度変化をみた場合、温度上昇と共に音速値は減少しその減少量は 1.2 m/sK であった。対して Fe-S 系の音速変化は小さい。この違いは弾性率の温度特性が軽元素により異なることに起因している。また、Fe-C 系の密度-音速の関係と純鉄の傾向とを比較した結果、炭素の効果は高圧側につれて小さくなることが明らかとなった。

鉄合金融体の弾性への圧力・温度の影響

寺崎英紀¹・下山裕太¹・西田圭佑²・黒川冬華¹・真木まゆみ¹・田窪勇作¹・浦川啓³・
柴崎裕樹⁴・坂巻竜也⁴・肥後祐司⁵・町田晃彦⁶

¹ 大阪大学大学院理学研究科 (terasaki@ess.sci.osaka-u.ac.jp)

² 東京大学大学院理学研究科、³ 岡山大学大学院自然科学研究科、

⁴ 東北大学大学院理学研究科、⁵ 高輝度光科学研究センター、

⁶ 量子科学技術研究開発機構

地球型惑星の中心核の組成と構造を理解するために、我々は高温高压下における鉄合金融体の音速と密度測定を行っている。本発表ではこれまでに得られた Fe-Ni-S 融体の音速と密度に与える圧力と温度の効果について報告する。実験は SPring-8 BL22XU および BL04B1 ビームラインのマルチアンビルプレスを用いて行い、音速は超音波法、密度はX線吸収法により測定した。その結果、得られた Fe-Ni-S 融体の音速は、温度の影響は非常に小さく測定温度範囲で音速はほぼ一定であった。また圧力増加により音速は増加するがその増加率は圧力と共に小さくなることが確認できた。得られた音速の圧力依存性から体積弾性率を求め、そこから計算した密度値は、実測した密度値とよい一致を示した。

音速の圧力依存性から体積弾性率を見積もる場合、一気圧における密度（および音速）データが必要となる。しかし我々が対象とする組成の融体においては、常圧下での弾性定数データでさえも十分整備されているとは言い難い。そこで常圧下における弾性定数測定を目的とし物性（密度・音速）測定用の雰囲気制御炉の開発も行っている。発表では12月に設置されたこの物性測定用電気炉についても紹介する。

高温高压実験による鉄-シリケート中の軽元素の探索と 地球進化過程への応用 ～水素を例に～

飯塚理子^{1*}・八木健彦¹・後藤弘匡²・奥地拓生³・服部高典⁴・佐野亜沙美⁴・鍵裕之¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設 (*riizuka@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp)

² 東京大学物性研究所

³ 岡山大学惑星物質研究所

⁴ 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター

地球中心核の主成分である鉄には、軽元素 (S, Si, O, C, H など) が溶け込んでいると考えられており、どの軽元素がどの程度存在するのかという疑問に対して、これまで数多くの実験的研究がなされてきた。このうち有力候補の1つである水素は、X線などの従来の実験手法では検出できないこと、高压下でしか有意に鉄に溶け込まず脱圧時に鉄から抜けてしまうこと、などの実験上の制約から、その振る舞いや鉄への固容量については依然よく分かっていなかった。

近年我々のグループは、水素の振る舞いを直接観察できる中性子回折法という手法を用いて鉄-シリケート-水系の高温高压下その場観察を行い、高温高压下で含水鉱物が脱水してできた水と固体の鉄とが反応して、鉄水素化物が生成する様子をリアルタイムでとらえることに成功した。その結果、高压下で温度が上昇し含水鉱物の脱水が起きて水が存在すれば、1000K 程度の比較的低温下で固体の鉄にも水素が溶け込むことが明らかになった。このことから、原始地球では始源物質が集積していく初期段階で、水素はすでに鉄へと溶け込み始めていたことが示唆される。したがって、現在の地球核に含まれると考えられる軽元素の中でも、水素が地球進化の初期過程において他の軽元素に先駆けて固体鉄に溶け込んでいき、その後に核-マントル分離や他の軽元素の熔融鉄への溶解が起きた可能性が極めて高いだろう。地球核に取り込まれた軽元素の問題に対する今後の展望として、これまで種々の実験が行われてきた純鉄とケイ酸塩の系だけではなく、水素化した鉄とケイ酸塩間での軽元素の分配を調べるのが重要だと考えられる。

本研究では、レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル(LHDAC)を用いて、より高い温度圧力領域での鉄-ケイ酸塩-多軽元素系の高温高压実験を行っている。出発試料 Fe-SiO₂-Mg(OD)₂ (または MgO) の混合粉末に対して圧力媒体を変えつつ、10 GPa, 1500K 以上の条件下での反応過程を追っている。本発表ではこれまでに得られた研究結果を踏まえ、鉄水素化物と他の軽元素の分配について議論したい。

Development of Brillouin and Raman spectroscopies at high pressure and high temperature: Application to planetary interior

Tomoaki Kimura¹ • Kenichi Goto¹ • Motohiko Murakami¹

¹ Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science,
Tohoku University (tomoaki.kimura.c1@tohoku.ac.jp)

Investigating the melting behaviors of planetary materials at high pressure is important to understand the thermal evolution and structure in the planetary interior. Quantum molecular dynamics (QMD) calculations predicted the melting temperature of H₂O higher than 4000 K at 100 GPa, suggesting the stability of the solid H₂O in the deep interior of Neptune and Uranus¹. Numerical dynamo simulations suggested that the solid H₂O in the planetary interior forms the stably stratified region above 100 GPa and the geometry including the stable layer produces the non-dipolar magnetic fields in the planets observed by astrophysical surveys². However, static high-pressure experiments using diamond anvil cells coupled with X-ray diffraction or Raman spectroscopy show the melting temperatures significantly lower than that of the calculations³. Such inconsistency of the melting curves is likely due to a technical problem for the melting criteria used in the LHDAC experiments, which are unclear to detect the melting since the criteria are based on the disappearance of the weak signals derived from the solid. Indeed, a recent QMD calculation suggest that Raman spectroscopy cannot allow us to distinguish between the solid and liquid H₂O under the high pressure⁴.

We developed *in situ* Brillouin and Raman scattering measurement system coupled with the CO₂ laser heated diamond anvil cell and demonstrated that the Brillouin spectroscopy is effective and reliable to determine the melting temperatures of H₂O under high pressure, by observing the appearance of the clear peak derived from the sound velocity of the liquid. Temperature was determined from the relationship between the intensities of the Stokes and anti-Stokes lines in the Raman spectrum. The melting temperatures determined in this study are in very good agreement with the well-constrained melting curve up to 12 GPa.

References

1. M. French et al., Phys. Rev. B **79**, 054107 (2009).
2. S. Stanley and J. Bloxham, Nature, **428**, 151 (2004).
3. L. Dubrovinsky and N. Dubrovinskaia, GSASP, **421**, 105 (2007).
4. J. Hernandez and R. Caracas, Phys. Rev. Lett., **117**, 135503 (2016).

構造物性班の進捗状況

鈴木昭夫¹・鍵 裕之²・井上 徹³・舟越賢一⁴・寺崎英紀⁵・村上元彦¹

¹ 東北大院理 (a-suzuki@m.tohoku.ac.jp, motohiko@m.tohoku.ac.jp)

² 東大院理 (kagi@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp)

³ 愛媛大 GRC (inoue@sci.ehime-u.ac.jp)

⁴ 総合科学研究機構(CROSS)中性子科学センター (k_funakoshi@cross.or.jp)

⁵ 大阪大院理 (terasaki@ess.sci.osaka-u.ac.jp)

構造物性班では、地球内部の物質循環を解明するための基礎データとなるような、地球深部物質の物性を調べ、またその構造を解くことで高圧力下での物性を本質的に理解することを目指している。まず、マントル物質の熔融実験については、ダイヤモンドアンビルセル(DAC)と CO₂ レーザー加熱技術開発を組み合わせ、下部マントル物質として最も重要な MgO (periclase) -MgSiO₃ (bridgmanite) 2 成分系の熔融関係を 115 万気圧下まで明らかにした。メルト物性については、KEK の放射光ビームライン NE5C と NE7A において X 線吸収法による測定システムを立ち上げ、高温高圧力下での密度測定に着手した。今後は本研究で明らかにされた組成の地球深部メルトについて測定を行う。また、メルトの構造解析については J-PARC MLF での高圧中性子回折実験を行うためのセラミクス加工室を立ち上げ、高圧セル部品加工のための 3D 加工機や実験試料合成のための超高温真空雰囲気加熱装置を整備した。ケイ酸塩ガラスを使った中性子回折実験を開始し、来年度からは含水ケイ酸塩融体の実験から高圧構造を解析する予定である。

揮発性元素循環に関しては、特に水素と窒素の地球深部での存在状態と挙動を探る研究を進めている。レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセル(LHDAC)を用いて、ケイ酸塩-軽元素系の高温高圧実験を進めている。水素に関しては金属鉄も系に加え、水素化した鉄が分配に与える影響や中性子回折による反応追跡を進める。窒素に関しては含水 Bridgmanite への取り込み挙動を調べ、全地球における窒素の budget に関する議論を進める予定である。

地球深部物質の弾性波速度測定については、Al に富んだ含水及び無水ブリッジマナイトの弾性特性を、マルチアンビル型高圧発生装置と焼結ダイヤモンドアンビルを用いた 60 万気圧までの高温下での圧縮実験、及び He 圧媒体による DAC 室温での圧縮実験、さらには超硬アンビルによる 25 万気圧までの弾性波速度測定実験により明らかにしてきている。さらに、弾性波測定と結晶構造の情報を同時に得るため、

A01-2

EMCCD 搭載および 75cm 焦点距離を有する分光器 CCD を用いたダイヤモンドアンビルセル中の高圧状態の試料からのラマン散乱分光測定を行うシステムを立ち上げている。

地球中心核を構成する鉄合金の物性については、鉄合金融体の常圧下における弾性特性測定を目的とし、物性（密度・音速）測定用の雰囲気制御炉を設置した。この炉を用いて、1600℃までの急速加熱を実施し、鉄合金試料の溶融を観察した。現在は、CCD 等の計測機器の調整を実施している。

以上のように、この 2 年間は主に新たな実験システムの構築に取り組んできた。いずれも概ね予定通りに立ち上がっており、これから実験成果が蓄積されることが期待できる。

マルチメガバールでの鉄の音速測定

坂巻竜也¹・福井宏之²・大谷栄治¹・田中遼介¹・バロンアルフレッド³¹ 東北大学 (sakamaki@m.tohoku.ac.jp)² 兵庫県立大学³ 理化学研究所

地球最深部に位置する内核を理解する上で、核条件下での鉄の物性測定は有効なアプローチの1つである。特に密度や音速などの物性値は地震波観測データと直接比較できるため、特に重要度が高い。そのため、X線回折を利用した密度測定は300GPaを超える内核条件下で実施されており、既に多くの成果を上げている。一方、高圧下での音速測定は大きく遅れているのが現状である。

物質の音速は様々なテクニックで測定されているが、我々はX線非弾性散乱(IXS: Inelastic X-ray Scattering)を利用した音速測定を進めている。レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルを組み合わせることで、圧力163GPa・温度3000Kまでの条件下で音速測定に成功しているが、まだ内核条件には程遠い。そこで我々はIXSによる鉄の音速測定をマルチメガバール条件下で実施すること、そして最終的には内核条件下での測定を目指している。

マルチメガバールIXS実験はSPring-8のBL43LXUにおいて、キュレットサイズ40~50 μm のダイヤモンドアンビルを用いて進めた。試料からの散乱強度を稼ぐために、試料室(ϕ 15~20 μm)には試料(鉄粉)のみを封入して測定を行った。

圧力180GPaまでは、ビームラインの通常セットアップのままで試料由来のピークを確認し、音速を決定することができた。しかしながら、それ以上の圧力条件ではダイヤモンドアンビル由来のピークと重なり、試料のピーク位置の決定が困難になった。そこでダイヤモンドアンビルセルの下流側にコリメータを導入することで試料からの散乱のみを収集できるように試みた。このセットアップは効果的に働き、180GPa以上の圧力でも試料からのピークを判別できるようになり、現在は圧力250GPaまでの条件下で測定に成功している。また、得られた音速-密度の結果からこの圧力まではバーチ則が保たれていることを確認した。

今後は断熱材(圧媒体)を入れて、高温高圧下での測定を目指す。加えて、ベリリウムガasketと大きな横窓が開いたダイヤモンドアンビルセルを利用することで、ガasketに平行方向からX線を入れたIXS実験も予定している。高圧ほどダイヤモンドの音速(横波速度)に鉄・鉄合金の音速(縦波速度)が近づいていくため、いかにダイヤモンドの散乱の影響を減らすかが課題である。

Internal consistency of pressure scales

境毅¹¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター (sakai@sci.ehime-u.ac.jp)

圧力スケールとは、高圧実験において実験圧力を決定するために用いられる物質あるいはその物質の状態方程式のことをいう。圧力スケールにおいては、状態方程式が与える圧力値の絶対値としての確からしさと、2つの独立した実験において異なる圧力スケール物質が用いられた場合には、それぞれの圧力スケールが示す圧力値の整合性が重要となる。特に後者の整合性については、2つの独立した実験で得られた結果を比較検討する際に必須となるため内部整合的 (Internal consistent) である状態方程式群を構築することは重要である。前者の絶対値としての確からしさに関する一つの回答としては、圧力スケールフリー統合解析 (SFUA) による MgO 圧力スケールが提案されている (Tange et al., 2009)。この圧力スケールは Pt, Au, NaCl (B2), Ne などの圧力スケールに対する 1 次圧力標準として用いられ、内部整合性を持つ圧力スケール群が構築された (Dorfman et al. 2012)。一方で、SFUA で用いられた実験データの最高圧が 200 GPa であったこと、その後の 2 次校正の実験も 200 GPa 前後の圧力であったことから、地球の内核に相当する 329-364 GPa に適用するにはやや大きな外挿を伴うために不確定性が増すという問題点があった。

このため、レーザー衝撃圧縮実験による 500 GPa までの実験データを含め、かつ、高圧縮状態を物理的・熱力学的により厳密に表現できる Keane 状態方程式を採用した、MgO の新しい 1 次圧力スケールが提案されている (Tange et al. in prep.; Sakai et al. 2016)。この新しい MgO スケールを基準として、MgO-Pt および Pt-NaCl の 300 GPa までの体積同時測定データから、これらの物質に関して内部整合性のある状態方程式群を構築した (Sakai et al. in prep.)。これをもとに、これまで報告されている純鉄及び鉄合金系の状態方程式 (Fe , $\text{Fe}_{90}\text{Ni}_{10}$ (Sakai et al. 2014), $\text{Fe}_{88.1}\text{Ni}_{9.1}\text{S}_{2.8}$ (Sakai et al. 2012), $\text{Fe}_{93.5}\text{Si}_{6.5}$, $\text{Fe}_{83.3}\text{Ni}_{9.0}\text{Si}_{7.7}$ (Asanuma et al. 2011)) を、同じ圧力スケールに基づいて再校正することで、密度に与える組成の効果を議論することができる。本発表では、これらの状態方程式の比較から推定される地球の内核の組成について議論する。

マグマオーシャン固化過程におけるハロゲン元素分別

桑原秀治¹・小川展弘²・山口飛鳥²・鹿児島渉悟²・佐野有司²・入船徹男¹¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター (kuwahara@sci.ehime-u.ac.jp)² 東京大学大気海洋研究所

筆者らは現在、技術開発班の入船徹男教授のもとで開発されてきた高圧発生技術と同位体班の佐野有司教授のもとで開発されてきた局所微量元素分析技術を利用して地球形成期における揮発性元素分配に関する実験的研究を行っている。本発表では一昨年度から行っている超コンドライト的な地球表層の F/Cl 比の起源への実験的制約について主に紹介する。

これまで筆者らの研究によってフッ素や塩素は核に取り込まれた可能性が低く、核形成によって地球表層の超コンドライト的な F/Cl 比が形成された可能性は低いことが示唆されている [Mungall and Brenan, 2003; Sharp and Draper, 2013; Kuwahara et al., in revision]。こうした実験結果は塩素を含むハロゲン元素の大部分が核形成期においてマントルや原始大気海洋に分配されたことを示唆している。そこで本研究では核形成後のマグマオーシャン固化過程において鉍物とケイ酸塩メルトとの間の分配反応を実験的に調べることで地球の超コンドライト的な F/Cl 比の成因についてさらなる制約を与えることを目的としている。

実験は愛媛大学に設置されたマルチアンビル装置によってマントル遷移層・下部マントル圧力条件下で行い、実験後に回収した試料中の鉍物とケイ酸塩メルト中のハロゲン元素の定量は東京大学大気海洋研究所に設置されている二次イオン質量分析装置 (NanoSIMS) を用いて行った。

実験で合成した MgSiO_3 Majorite に対するフッ素と塩素の溶解度はそれぞれ約 100ppm と約 10ppm でフッ素の溶解度は塩素と比較して約一桁高いことが明らかとなった。先行研究では Majorite に対して OH が約 1000ppm 溶けることが示唆されており [Katayama et al., 2003]、イオン半径が大きくなるにつれて固相への揮発性元素の取り込みが限定的になる傾向が見られた。こうした結果はマグマオーシャンが固化していく過程で水やフッ素がいくらかマントルに分配される一方で塩素などのイオン半径の大きな揮発性元素は表層に分配された可能性を示している。こうした結果は原始大気海洋散逸後に地球内部からの脱ガスによって現在の地球大気海洋が形成されたとするモデル [e.g., Shcheka and Keppler, 2012] と比較的調和的である。また、本発表の最後には今後の展望についても簡単に述べる予定である。

焼結ダイヤモンドアンビルを用いた川井型装置による高温高压発生

山崎大輔

岡山大学惑星物質研究所 (dy@misasa.okayama-u.ac.jp)

川井型マルチアンビルは、ダイヤモンドアンビルセルとともに、高压地球科学の研究で広く利用されてきている。特に、川井型マルチアンビルは、広い試料空間の確保が可能なことと、高温発生の安定性が高く圧力・温度分布の均質性に優れていることから、多相系試料を用いた実験や精密な物性測定に有効な手段である。しかし、発生可能な圧力領域が、ダイヤモンドアンビルセルに比較して、格段に低いという欠点が挙げられる。今まで一般に用いられてきている超硬材料を2段目アンビルに用いた実験では、到達圧力は30 GPa程度に過ぎなかった。また、最近開発された高硬度の超硬アンビルを用いた場合でも、その発生圧力は、50-60 GPaである[1]。圧力領域を大きく拡大すべく焼結ダイヤモンドが2段目アンビルに用いられてきている。バインダー量の少ない焼結ダイヤモンドを利用することにより、113 GPaの発生に成功している[2]。本研究では、下部マントルの最下部のD''層を研究するために、またポストペロフスカイトを研究するために、発生可能圧力領域のさらなる拡大を試みた。

圧力発生試験は、SPRING-8のBL04B1で、大型プレスSPEED-Mk.IIで行った。一辺14 mmのテーパ加工を施した焼結ダイヤモンドアンビルに1 mmの切り欠きを行い、Cr₂O₃がドーピングされたMgOの圧力媒体を圧縮した。抵抗加熱のためにTiB₂+BNを発熱体として用いた。試料はあらかじめ合成焼結したAl₂O₃を含む(Mg,Fe)SiO₃ブリッジマントと金の混合物である。金は圧力標準物質[3]として用いた。ガスケットには熱処理を施したパイロフィライトを用いた。

実験に際しては、昇圧中5-10 GPaおきに、800-1100 Kまで試料を加熱した。これは、応力緩和を目的としており、ブローアウトの軽減と、明瞭な回折線の取得に貢献する。最終的に13 MNの荷重まで加圧することができ、120 GPaの発生を確認した。圧力としてはD''層に到達したことになる。この荷重での昇温において、~800 Kの段階では120 GPaを保持していたが、~1700 Kでは108 GPa程度まで圧力が低下した。結果として、試料のブリッジマナイトからポストペロフスカイトへの相転移の観察には至らなかった。今後、ポストペロフスカイトへの相転移を観察するためには、川井セルの断熱性を高め加熱による圧力低下を防ぐ必要がある。

[1] Kunitomo et al. (2016) High Press. Res. 36, 1-8. [2] Yamazaki et al. (2014) Phys. Earth Planet. Inter. 228, 262-267. [3] Tsuchiya (2003) J. Geophys. Res. 108, 2462.

Experimental investigation of the pyrite-type high-pressure form of FeOOH

西真之¹

¹ 愛媛大学 GRC (nishi@sci.ehime-u.ac.jp)

我々の研究グループでは、焼結ダイヤモンドをアンビル材として活用したマルチアンビル装置実験により、最下部マントルから核領域に至る超高压・高温下での精密実験技術の開発を主要な研究目的としている。現在までに下部マントル中部に対応する 60 万気圧までの安定加熱と試料の放射光 X 線観察が可能となっており、さらなる条件拡張を目指すと共に、既に達成した温度圧力下でのマントル物質の相平衡実験を進めている。今回は上記手法により観察に成功した含水鉱物の鉄のスピン転移に伴う体積変化と、レーザー加熱式ダイヤモンドアンビル装置を用いた、より高い圧力で観察した FeOOH のパイライト型構造への相転移を報告する。

地球の地表付近に存在する水の一部は、プレートの沈み込みにより含水鉱物として地球深部にもたらされる。特に FeOOH は沈み込む地殻物質内の成分の 1 つというだけでなく、過去の地球において海底に堆積した縞状鉄鉱層の主要成分でもある。最近の研究では、地球深部に沈み込んだ FeOOH は下部マントル中部で脱水分解し、それが地球史における地球全体の水素と酸素の循環に影響したと考察された[1]。対照的に我々の理論計算と高压実験の結果は FeOOH が下部マントル中部の温度圧力条件において水素を含みつつパイライト型構造へ相転移することを示唆している[2]。パイライト型 FeOOH は少なくとも 140 万気圧まで安定に存在することが確認されたため、FeOOH は核・マントル境界まで水を輸送する可能性が考えられる。提案された上記 2 つの異なる水循環モデルを詳しく検証するには、現実的な含水多成分系の相関係を解明する必要があり、マルチアンビル装置による全マントル領域に至る超高压・高温下での精密実験技術の開発が急務である。

[1] Hu, Q. et al., Nature **534**, 241-245 (2016).

[2] Nishi et al. under review

技術開発班の進捗状況

入船徹男¹・境毅¹・西真之¹・野村龍一¹・國本健広¹・有本岳史¹・新名亨¹・

桑原秀治¹・山崎大輔²・小松一生³・石松直樹⁴

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター(irifune@dpc.ehime-u.ac.jp)

² 岡山大学惑星物質研究所

³ 東京大学理学研究科附属地殻化学実験施設

⁴ 広島大学理学研究科

本計画研究では、①超合金 (WC)、②焼結ダイヤモンド (SD)、③ナノ多結晶ダイヤモンド (NPD = ヒメダイヤ) をアンビル材として用い、マントル～核領域における精密な相関係・融解関係・各種物性測定を目指した新たな技術開発を、重要な研究課題と位置付けている。本年度は特に、SD アンビルを用いた川井型マルチアンビル装置 (KMA) における発生可能圧力・温度領域の拡大、及び NPD アンビルのダイヤモンドアンビル装置 (DAC) への多様な応用に主眼を置いた技術開発を行った。

SD の KMA への応用に関しては、比較的低温ながらマントル最下部にせまる 120GPa 領域の発生に成功した。また、下部マントル中部に対応する 60-70GPa 領域においては、マントル地温に対応する 2000℃領域の高温の安定的発生が可能になった。これらの技術を用いて MgSiO_3 - FeSiO_3 系や FeOOH 等の、下部マントル深部における相関係の精密決定などが行われている。

NPD の KMA の応用に関しては、約 90GPa の圧力発生を達成した。これは SD アンビルを用いて同じセルで発生可能な圧力 (約 60GPa) をはるかに上回っている。また、純粋な炭素からなる NPD は、SD に比べて高い X 線透過性を有しており、アンビルを通した X 線イメージングや回折実験も可能なことが示された。

NPD の DAC への応用に関しては、2 段 DAC を用いた 430GPa (圧力スケールによっては 630GPa) 程度の圧力発生が確認された。また同位体班のメンバーとの共同により、NPD を用いた回転 DAC の開発がすすめられ、130GPa 領域での変形実験が可能になっている。一方で、大型 DAC への応用や、高圧下 X 線吸収実験への応用などに関する技術開発も進められ、成果があがりつつある。

地球深部ダイナミクス研究センターで独自に開発され、試料提供されている NPD は、炭素同位体測定の標準試料としての有用性も確かめられるなど、技術開発班のみならず、領域内の他の班の研究においても活用されている。また技術開発班では、来年度からは同位体班と共同で新たに研究員を雇用する予定であるなど、計画研究の間での垣根を越えた共同研究を積極的にすすめている。

マントル遷移層構成鉱物間における水素同位体分配実験

佐野亜沙美¹・伊藤正一²・東 佳徳²・井上徹³¹ 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター (sanoasa@post.j-parc.jp)² 京都大学大学院 理学研究科, ³ 愛媛大学 地球深部ダイナミクスセンター

同位体比は温度等の環境変化の影響を受けて変動するため、岩石や鉱物の由来を議論する上で重要な指標として用いられる。例えば海水の D/H 比と彗星や炭素質コンドライトの値を比較することにより、地球の”水”はよりコンドライト的であるという議論がなされている。一方、深部由来の無水鉱物やメルトインクルージョンには低い D/H 比を示すものが報告されており[1, 2]、マントル深部には地表とは異なる同位体組成を持つリザーバーが存在するとの指摘もある。そのため、地表からマントル深部に渡る水の循環の中で、水素結合の強さの異なる高压相への相転移や、温度圧力等の環境パラメーターの変化に応じて、水素同位体がどのように分配、固定されるのかを実験的に明らかにすることは重要な課題である。しかしその変動幅は数十‰のオーダーであり、高压実験により回収される試料の小ささとそれを分析する技術の難しさから、地球深部条件における研究は進んでいないのが現状である。

本研究は、上部マントル～遷移層における水素同位体不均質を探るため、高温高压実験によりオリビン-ワズレアイト、ワズレアイト-リングウッドアイト間の D/H 同位体分配係数を決定することを目的としている。オリビンの OH 振動数は 3600 cm^{-1} 付近であるのに対し、ワズレアイトでは 3300 cm^{-1} 付近、リングウッドアイトではさらに高波数側にピークが広がり水素結合の強さがそれぞれ異なるため、水素同位体の分配に差が生じる可能性がある。

出発物質は 1.0wt.%相当の水を含む酸化物混合体であり、SIMS における分析の際の統計精度を稼ぐために、天然よりも D に富む条件で行っている。重水素は D 化したブルーサイトの形で加えた。Au カプセルに出発物質を封入し、川井型マルチアンビルプレスで 12.5 ～ 13 GPa、1300 度で保持することにより、オリビンとワズレアイトが共存する試料を得た。これについて京都大学設置の SIMS を用いて分析し、含水量および D/H 比を決定した。

保持時間が 1 時間の試料の分析においては、オリビン、ワズレアイトとも粒径と含水量、D/H 比に相関が見られ、平衡に達していないことが示唆された。今後平衡に到達する条件を探り分配係数の決定を行っていく予定である。

[1] Bell and Ihinger (2000) *Geochim. Cosmochim. Acta* 64, 2109. [2] Hallis et al. (2015) *Science* 350, 795.

W 同位体から地球の初期進化を制約する試み：経過報告

賞雅朝子¹・鈴木勝彦¹¹ JAMSTEC (atakamasa@jamstec.go.jp)

地球初期進化の中で、¹⁸²W 同位体は重要なトレーサーとして地球化学分野で研究されてきた。¹⁸²W の 5 つある同位体のうち ¹⁸²W は ¹⁸²Hf から放射壊変(半減期 890 万年)で生じる同位体である。親核種の Hf は親石性元素(液相濃集元素)で、W は親鉄性元素(超液相濃集元素)である。また両元素とも難揮発性元素であり、地球初期の進化では変動しないという点と ¹⁸²Hf が消滅核種で地球初期のイベント以降 ¹⁸²W 同位体の変動がないという点から、特にケイ酸塩(マントル)と金属(コア)の分化時期の決定や、コア・マントルの相互作用などのトレーサーとして注目されてきた。

本研究では、コアとマントルに関する地球初期イベントに制約を与える目的で ¹⁸²W/¹⁸⁴W 同位体比の高精度同位体比測定を開発を行っている。

海洋開発研究機構設置の MC-ICP-MS で、W 標準溶液(SRM 3163)の W 同位体比を測定した結果、安定して±5ppm の精度で測定可能であることを確認した。ただし、試料導入系の Aridus II が不安定になると±10ppm 程度になった。分析後の補正は ¹⁸⁶W/¹⁸⁴W=0.92767 (Krein et al., 2004) の値を用いた。OIB・キンバライト・MORB・LIPs の岩石から W を分離するために、試料を 6M HCl+ HNO₃ + HF で分解後、HNO₃ および 6M HCl で溶解し、1M HF および 0.1M HF で上澄み液を回収する方法(Berton et al., 2014)を採用した。次に陰イオン交換樹脂による分離を行い、HCl+HF の混酸とメソイソブチルケトンによる Ta および Nb の分離を行い、二回目の陰イオン交換樹脂分離を行った。分析溶液には Mo が含まれているが、W の標準溶液に Mo を添加し、同位体変動を観察したところ、W 濃度の 10 倍程度までは±5ppm に収まる範囲で測定できることを確認した。ただし Mo の濃度によっては、試料導入系でのバックグラウンドが上がりやすくなった。

試料はハワイ、インド洋 MORB、南アフリカキンバライト、オントンジャワ海台試料を測定した。発表では今までに得られた同位体比の結果を報告する。

今後、全岩試料の測定を進めつつ、特定鉱物へ応用する予定である。

従来手法を統合した下部マントルにおける融解現象の理解

新名良介¹・廣瀬敬¹・大石泰生²¹ 東京工業大学 地球生命研究所 (ryosuke.sinmyo@elsi.jp)² 高輝度光科学研究センター JASRI SPring-8

下部マントルは地球最大層であり、かつ核と接する領域である。そのため下部マントルにおける融解現象はマントル自身だけでなく、核の化学組成や構造の進化にも大きな影響を与える。しかしながら下部マントルにおける構成物質の融点は未だによく制約されていない。特に主要構成相であるブリッジマナイトの融解曲線はその結果に大きな不確かさがある。レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルを用いた先駆的な研究結果は CMB 圧力において 5000 度程度融点が異なっている (Heinz and Jeanloz 1987, Zerr and Boehler 1993)。この様な不一致は、融点の判定に様々な基準が用いられているために生じている可能性があり、従来の判定手法を比較統合した研究が必要である。

高温高压発生にはレーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルを用いた。出発物質にはマルチアンビルセルによってあらかじめ合成した Al, Fe を含むブリッジマナイトを用い、圧媒体には NaCl, KBr やアルゴンを用いた。温度決定のために輻射分光測定を、圧力決定のためにダイヤモンドアンビルのラマン散乱測定を行った。高温高压下その場 X 線回折測定は SPring-8, BL10XU において行った。加熱レーザーの出力と温度測定用の分光器を同期制御するシステムを新たに構築し、出力—温度関係の曲線を比較的短時間で効率的に得ることができた。

得られた出力—温度関係は、ある出力において傾きが変化する点が存在することを示し、その点は圧力とともに高温となった。今後、回収試料の分析、X 線回折線の生成消滅などの手法と比較し、得られる融点の違いを検証し、先行研究における不一致の原因を明らかにすることで、信頼性の高い融点決定法を検討していくことを目指している。

D-DIA 型変形装置を用いた下部マントルの温度圧力条件下における その場観察変形実験に向けて

大内智博¹・八木健彦²

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター (ohuchi@sci.ehime-u.ac.jp)

² 東京大学大学院理学研究科地殻化学実験施設

ブリッジマナイトをはじめとした下部マントルの構成鉱物のレオロジー物性は、下部マントルにおいて発達した地震波速度異方性や粘性構造を理解する上で重要である。高圧鉱物の流動特性や結晶方位定向配列パターンを実験的に明らかにすることを目的として、2000 年以降は D-DIA 型変形装置 (Wang et al., 2003) や回転ドリッカマー型変形装置 (RDA: Yamazaki and Karato, 2001) の 2 つの装置が開発され、高圧下における鉱物の変形実験に用いられてきた。従来より用いられてきた Griggs 型変形装置の発生圧力限界は 4GPa 程度である一方で (Rybacki et al., 1998)、近年では D-DIA や RDA の実験可能な圧力上限は 18GPa にまで拡張されてきた (Miyagi et al., 2013; Kawazoe et al., 2016)。さらには、Girard ら (2015) や Tsujino ら (2016) がそれぞれ RDA 及び KATD (Nishihara et al., 2008) を用いることによって、下部マントルの温度圧力条件下においてブリッジマナイトの変形実験に成功した。このような RDA 及び KATD の技術的発展の一方で、その場観察実験での D-DIA では、マントル遷移層下部の温度圧力条件下における変形実験が現時点での限界となっている (Kawazoe et al., 2016)。これは、X 線を透過する cBN 製の 2 段目アンビルの耐荷重強度が超硬アンビルと比べて大幅に低い (<0.6MN) ために、それを超える高荷重での変形実験が行えないことが挙げられる。更には、DIA 型用の超硬アンビルを用いた場合でも、その耐荷重強度の問題では下部マントルの温度圧力条件下での変形実験は現状では難しい。ただし精密に変形用の上下アンビルを駆動させることができる特徴や、温度測定が熱電対を用いることで可能であるといった特徴を考慮すれば、D-DIA を用いた更なる高圧力下での変形実験を実現することは意義が大きい。そのため本研究では、2 段目アンビルの超硬をジャケット材で補強したアンビル (山田ほか, 2016) やガasket を始めとしたセルの最適化 (Kawazoe et al., 2010) を行うことで、D-DIA での変形実験可能な圧力領域の拡張を試みた。その結果、D-DIA を用いて室温では 24GPa の発生に成功したほか、高温下では 20GPa 程度の圧力発生に成功した。今後もこれらの技術開発を継続することにより、下部マントルの温度圧力条件下における変形実験は可能になるかもしれない。

Origin of geochemical mantle components: Role of spreading ridges and thermal evolution of mantle

Jun-Ichi Kimura¹, James B Gill², Peter E van Keken³, Hiroshi Kawabata⁴, Susanne Skora⁵

¹ Department of Solid Earth Geochemistry, JAMSTEC

² Department of Earth and Planetary Sciences, Univ. California Santa Cruz

³ Department of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution for Science

⁴ Research and Education Faculty, Kochi University

⁵ Institute of Geochemistry and Petrology, Earth Sciences, ETH Zürich

We explore the element redistribution at mid-ocean ridges (MOR) using a numerical model to evaluate the role of decompression melting of the mantle in Earth's geochemical cycle, with focus on the formation of the depleted mantle component. Our model uses a trace element mass balance based on an internally consistent thermodynamic-petrologic computation to explain the composition of MOR basalt (MORB) and residual peridotite. Model results for MORB-like basalts from 3.5 to 0 Ga indicate a high mantle potential temperature (T_p) of 1650–1500°C during 3.5–1.5 Ga before decreasing gradually to ~1300°C today. The source mantle composition changed from primitive (PM) to depleted as T_p decreased, but this source mantle is variable with an early depleted reservoir (EDR) mantle periodically present. We examine a two-stage Sr-Nd-Hf-Pb isotopic evolution of mantle residues from melting of PM or EDR at MORs. At high- T_p (3.5–1.5 Ga), the MOR process formed extremely depleted DMM. This coincided with formation of the majority of the continental crust, the sub-continental lithospheric mantle, and the enriched mantle components formed at subduction zones and now found in OIB. During cooler mantle conditions (1.5–0 Ga), the MOR process formed most of the modern ocean basin DMM. Changes in the mode of mantle convection from vigorous deep mantle recharge before ~1.5 Ga to less vigorous afterwards is suggested to explain the thermochemical mantle evolution.

高圧実験から制約する核-マンツルの化学：経過報告

野村 龍一¹・桑原 秀治¹・國本 健広¹・東 真太郎²¹ 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター (nomura@sci.ehime-u.ac.jp)² 九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

計画研究・化学分析班 A02 では、核-マンツルの化学的相互作用をダイヤモンドアンビル装置やマルチアンビル装置を使った高圧高温実験で再現し、本計画研究で開発が進んでいる微小試料化学分析技術を利用することで分析・理解することを大きな目的の一つとしている。

化学分析班(同位体班、元素分配班)では毎年度合同で研究集会を開催し、(目的の一つとして)このような高圧実験研究でターゲットとすべき元素・同位体について議論がなされている。その一つとしてヘリウムを含む希ガスの地球化学的挙動の重要性が再確認され、公募研究代表者である角野氏(東大)と本領域高圧実験グループが連携し、希ガスの金属鉄-ケイ酸塩分配実験研究が開始されている(本発表会で角野氏講演)。

このような課題解決型のサイエンスを展開する一方で、新しいサイエンスを開拓するためには課題発見型の研究も重要である。そこで発表者を含む高圧実験グループにて、核-マンツル境界へ沈み込むスラブが引き起こしうる Peridotite-MORB 界面の反応融解現象や、マンツル最下部に存在する熱境界層内の大きな温度勾配が引き起こしうる元素・同位体分別といった、マンツル最下部で潜在的に起こりうる化学現象について、マルチアンビル装置、及びダイヤモンドアンビル装置を組み合わせた実験的研究で検証を始めている。特に後者については理論計算班が取り組んでいる核-マンツル境界の熱構造モデルを取り込み研究を推進していく予定である。

また本領域の技術開発班とも連携し、ナノ多結晶ダイヤモンドアンビルを用いた回転式ダイヤモンドアンビルセルの技術開発にも取り組んでいる。その成果として現在までに、核-マンツル境界圧力までの変形実験が可能になりつつある。

本発表ではこれらの研究の経過・成果について報告する。

同位体班の戦略と進捗状況

鈴木勝彦¹¹ 海洋研究開発機構 (katz@jamstec.go.jp)

核とマントルは、地球を構成する物質のほとんどを占め、地球の化学進化を主導してきた。ところが、核とマントルの相互作用や核、マントルの、特に初期の化学進化に関しては、いまだに不明なことが多い。これは、これらのプロセスが地球の深いところで起きているために、直接物理学的データを得るのが容易ではなく、さらには、核とマントルが直接相互作用したことを記録した物質を手に入れることが非常に困難であるからである。

科研費新学術「核-マントル相互作用」での同位体班の役割は、物質の同位体組成というツールを用いて、核-マントルの物質的な相互作用の検出を試み、さらには、核やマントルの形成などの地球の初期進化を明らかにし、地球史を通じた地球の進化、物質循環を明らかにすることである。

マントル対流は物質循環の原動力である。この対流様式に関して、地球物理的描像と物質科学的描像が異なる。地震波によるマントルトモグラフィー（例えば, Fukao et al., 2003; 2009）や、シミュレーションモデル（例えば, Yuen et al., 2007）の結果はマントルの単一相大循環を支持している。一方、高圧実験では下部マントルを構成する主な鉱物は perovskite であり、物質的には上部マントルと異なると考えられている（Murakami et al., 2012; Ricolleau et al., 2009）。地球化学的には、中央海嶺玄武岩（MORB）や海洋島玄武岩（OIB）の同位体比データから、マントルには枯渇マントル（DMM）、肥沃マントル（EM1 および EM2）、HIMU マントル（high- μ ）、原始的マントル（Primitive Mantle: PM）などの複数の貯蔵庫（レザーバ）が存在し、マントルは不均質だと捉えられている（例えば Hofmann, 2003 など）。分担者である下田らは、このマントルの不均質の形成を様々な玄武岩の同位体組成と分配実験のデータを用いて、統一的に説明するモデルを提案している。木村らは、拡大する海嶺の役割が重要であることを指摘し、岩石学的モデリングによって、地球の化学進化、熱史を制約している。佐野亜沙美らは、地球深部で起きている軽元素の同位体分配や化学反応から地球深部構造の制約を行っている。これらの研究が進展し、さらには、物理データとの関連性を明らかにすることで、マントルの不均質の形成プロセスや地球の化学進化に制約を与え、マントルの地球物理学的描像と物質科学的描像を統合した対流モデルの提案を目指している。

核-マントル間で物質的な相互作用が起きているかどうかを明らかにするには、

メタルと珪酸塩系の高圧実験が有効である。野村らは様々な技術的なハードルを取り除き、核への様々な元素分配を明らかにしてきた。今後の研究期間中に、核-マントル境界での実験によって得られた元素分配データによって、核、マントルの同位体進化を規制することを計画している。希ガスの同位体は、Sr, Nd, Pbなどの元素と異なった挙動をとるため、マントルの希ガスと金属元素同位体の統合的なモデルの提唱には至っていない。角野らが試みているメタル-ケイ酸塩メルト間の希ガスの分配実験は重要な知見を提供しつつある。また、核に濃集していると考えられている強親鉄元素に属する白金族元素の核-マントル境界での挙動や、マントル内での循環が有効な情報になると考えられている。石川らは、大規模火成活動による玄武岩など、地球深部起源岩石の白金族元素データによる制約を試みている。賞雅らが取り組んでいる地球深部起源火山岩の ^{182}W 同位体の異常も核-マントル相互作用が引き起こす可能性が指摘されている。

もうひとつ同位体班の取り組む大きな課題として、いまだ十分に制約されていない地球の初期進化の問題が挙げられる。地球史の初期には、様々なイベントが起きている。物質の初期集積によって前駆地球が形成された後、巨大衝突が起きて月が形成される。その際、核の分離が完了する。この核の分離後、コンドライト質物質が地表に供給され、それがマントルの化学組成に影響を与える。この供給については、レイトベニア(late veneer)イベントと呼ばれる。そして、その後プレートテクトニクスが始まる。地球形成後に起きたこれらのイベントは、地球の化学組成、同位体組成を決めるのに重要なイベントであるが、そのタイミング、規模はもちろんのこと、レイトベニアなど、実際に起きたかどうかについても議論が多いイベントもある。これらの問題解決には、放射壊変系の同位体が有効と期待される。賞雅らは核の分離によって生じると考えられる ^{182}W 同位体の異常を地球初期の岩石中に見出すべく、超高精度のW同位体分析手法を確立した。

同位体班のロードマップには初年度と2年目で分析方法の開発が重要な課題として掲げられている。上述の火山岩から核-マントル相互作用や地球初期の情報を引き出すには、微小な試料の超高精度同位体分析が必要になる。また、超高圧実験生成物は非常に小さく、高感度の微小領域分析が必須である。佐野有司らはNano-SIMSを用いて微小領域の同位体、元素組成分析手法の開発を進めている。伊藤も同様に、SIMSとイオン注入法の融合による微量水素定量法を開発を行っている。

3年度目以後は、同位体班を含んだ化学班での実験、分析、モデリングをさらに充実させて知見を広げるとともに、従来の分野を超えて物質科学的データ、地球物理的観測、あるいは、計算による制約など、従来の分野の枠を超えた統合的な理解を目指す。

Progress report on light element partitioning and isotope fractionation process in deep Earth

M. Satish-Kumar¹ and Miyako Abe²

¹ Faculty of Science, Niigata University, 2-8520 Ikarashi, Nishi-ku, Niigata, 950-2181
(satish@geo.sc.niigata-u.ac.jp)

² Graduate School of Science and Technology, Niigata University

The distribution of light element isotopes between silicates and metal during the early Earth differentiation and accretion process have governed the present day elemental and isotopic composition of the bulk silicate Earth. However, little is known till date about the factors that control these processes in the deep Earth, especially in the core-mantle boundary. Especially, the role of light elements in the melting phase relations of mantle rocks, metal-silicate partitioning, and mass transfer between core and mantle are key in understanding the processes going on in deep Earth. Stable isotopic composition is widely and efficiently used tool to understand the mobility of light elements in the deep Earth environments. Here we present a progress report on the experimental set up used for the light element isotope studies at high-pressure and high-temperature conditions.

A review of the previous experimental studies in the Fe-C and Mg-Si-C-O systems suggests that large carbon isotope fractionation occur between graphite/diamond and iron carbide melt. The results indicate that the iron carbide melt will preferentially gather ¹²C than ¹³C, with strong temperature dependence. Fractionation is also observed between graphite/diamond and carbonate melt at temperatures and pressures corresponding to upper mantle conditions. The pressure dependence on carbon isotope fractionation is also being tested at high-pressure conditions. In order to understand the fractionation process in detail, it is essential to have accurate measurement of isotopic composition for the run products at high-pressures. The difficulty arises from the smaller volume of samples, separation of phases and confirmation of equilibration between the phases. Ongoing studies on micro-volume isotope measurements using laser ablation and curie point pyrolyser gave encouraging results with good accuracy. It is anticipated that the combined high-pressure and high-temperature dependent fractionation of light element isotopes in the deep Earth is an effective mechanism that can create a “lighter core” with large scale differences in the distribution of the isotopes between the metallic core and bulk silicate Earth. Our findings also have implications on the light element cycling at the core-mantle interface.

Micro-volume stable isotope measurement system using IRMS MAT-253 for high pressure experiment run products

Miyako Abe¹ • M. Satsh-Kumar²

¹Graduate school of Science and Technology, Niigata
University(f16n002a@mail.cc.niigata-u.ac.jp)

²Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University

Carbon, sulfur, oxygen and hydrogen are considered as potential light elements candidates in the core. Based on geophysical consideration and high pressure experimental results, the core composition and its evolution have been the focus of several previous studies. However, recent studies have predicted that there is a possibility of isotope fractionation at high temperature and high pressure conditions, especially in magma ocean environment and core segregation (e.g. Satish-Kumar et al., 2011; Labidi et al., 2016). In order to understand the light element isotope fractionation processes in the deep earth, it is necessary to measure isotope composition accurately in micro to nano scales from high pressure experimental run products.

At Niigata University, MAT-253 mass spectrometer (Thermo Fisher Science) was installed by the MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas. The carbon and oxygen isotope is measured using CO₂ and sulfur isotope measurement carried out using SF₆ gas. We have evaluated the precision of carbon and oxygen isotope using the normal bellows sample reservoir. In the measurement using CO₂, standard gas in normal bellow showed a drift in both carbon and oxygen isotope. For six hours of continuous measurements the drift observed was about -0.172 ‰ (δ¹³C) and -0.366 ‰ (δ¹⁸O). Therefore, we increased the volume of standard gas and obtained a better precession for the same sample duration. Internal carbon isotope standard sample of graphite (SP1 graphite powder), gave a precession of 0.045 ‰ (n = 10). A new micro-volume inlet system was also installed and fundamental parameters such as pressure effect and capillary flow effect were tested. Using the new micro-volume, the minimum volume required for each analysis is 1 micro mole of CO₂ gas, and the precession of carbon isotope is 0.1 ‰ (n = 3). It is necessary to improve the system relating to the precession of micro-volume for the analysis of further smaller volume of samples.

金属－ケイ酸塩メルト間の希ガス分配係数の決定に向けて

角野浩史¹・貴志智¹・Colin Jackson²・野村龍一³・三部賢治⁴・舘野繁彦⁵・鍵裕之⁶

¹ 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 (sumino@igcl.c.u-tokyo.ac.jp)

² カーネギー地球物理学研究所

³ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

⁴ 東京大学地震研究所

⁵ 岡山大学惑星物質研究所

⁶ 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設

海洋島玄武岩などの分析により、高い³He/⁴He比や低い⁴⁰Ar/³⁶Ar比で特徴付けられる始源的な希ガス成分が地球深部に存在することが明らかになっている。しかしその在りかについては議論が続いており、44億年以前よりマントル対流と隔離されているマントル最深部(Mukhopadhyay, *Nature* 2012)や、核(Trieffoff & Kunz, *Phys. Earth Planet. Inter.* 2005)が提案されている。核が始源的希ガスのリザーバーとなり得るかは、その形成時に希ガスがどの程度取り込まれ得るかに大きく依存している。そこで我々は、高温高压下における金属とケイ酸塩メルトの間での希ガスの分配実験を進めている。希ガスの中でもArのみに注目した実験では、鉄とケイ酸塩を入れ冷却した試料カプセルに液体Arを加えて封じ、ピストンシリンダーを用いて1700°C、1 GPaの条件でArを分配させた。またより高い圧力で実験を行うために、希ガス(Ne, Ar, Kr, Xe)をドーブしたケイ酸塩ガラスと鉄をダイヤモンドアンビルセル中で30 GPaの高压にし、レーザー加熱により熔融させて希ガスを分配させた。それぞれの実験で得られた試料の10~200 μm程度の領域を、紫外レーザーを用いて真空中で蒸発させて希ガスを抽出し、希ガス質量分析計を用いて定量した。分析後の試料に開いたレーザーピットの体積はレーザー顕微鏡により求めた。

現在までに得られている予察的な結果からは、(金属相中の濃度) / (ケイ酸塩相中の濃度) で定義される分配係数はArについて10⁻⁴程度であり、従来考えられてきた値(Matsuda *et al.*, *Science* 1993)より3桁も低い。また金属相中の見かけの希ガス濃度は分析ごとに大きく変動し、ケイ酸塩や希ガスの気泡などの微小包有物の影響によると考えられる。ダイヤモンドアンビルセルを用いた実験では金属相を未だ回収・分析できていないが、ケイ酸塩相には十分な量の希ガスが含まれており、想定した量の希ガスが系内に導入されていることが確認できた。希ガスの分配実験から濃度測定までの一連の手法はほぼ確立したため、今後は温度圧力範囲を拡げつつ、金属相中の包有物の影響を除いた、より信頼性の高い分配係数を求めていく予定である。

Partitioning of light elements between mantle and core

Seiji Kamada^{1,2} · Keitaro Watanabe² · Shin Ozawa² · Akio Suzuki² · Jay D. Bass³

¹ Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku Univ
(sejikmd@m.tohoku.ac.jp)

² Department of Earth Science, Tohoku Univ.

³ University of Illinois at Urbana-Champaign

The compositions of Earth's core are important to understand the Earth's deep interior. Seismological observations provided density and sound velocity data of the Earth's interior. Comparing with experimental studies on density of Fe under the core conditions, the observed Earth's core densities are smaller than those of pure Fe. These results implied an existence of light elements in the core and the species and amount of light elements have remained still unknown. The layered structure of the Earth was thought to be made in the early stage, due to magma ocean. During the core separation from the magma ocean, elements are assumed to be partitioned between molten iron and silicates melts at the base of the magma ocean. Therefore, clarification of partitioning behavior of the Earth materials at high pressure and temperature is important for understanding characteristics of the Earth's core.

In this study, partitioning experiments between silicate (garnet) melts and metallic liquids (Fe-8wt%Sulfur) were conducted by using a diamond anvil cell combined with a fiber laser heating system. The experimental conditions were in the pressure and temperature ranges between 52 and 76 GPa and between 3140 and 5140 K. Recovered samples were cut and polished by FIB for chemical observation by FE-SEM/EDS. The metal/silicate partitioning coefficients (D_{Si}) and exchange partitioning coefficients (K_D) of silicon were determined.

The results demonstrated a strong oxygen fugacity dependence of D_{Si} to be negative and a positive temperature dependency of $K_{D\text{Si}}$. In this study, Si was less partitioned in the metal phase than previous studies of partitioning using Sulfur-free iron as a metal, suggesting less Si in the metal phase which S is included in. The present result suggests that the existence of S in the metal phase might affect the partitioning behavior of Si during the magma ocean. Assuming the values of Si content in the core and oxygen fugacity from geochemical constraints, 2.3~6.1wt% of S in the core can explain the partition between the core and mantle at 4200 K. When the estimated temperature of the bottom of the magma ocean was lower, the abundance of S would be smaller.

Newly developed internal-resistive heated diamond-anvil cell with boron-doped diamond: Toward deep lower-mantle petrology

Shigehiko Tateno^{1,*}, Haruka Ozawa^{1,2}, Longjian Xie¹, Yoichi Nakajima³, Akira Yoneda¹

¹ Institute for Planetary Materials, Okayama University (shigehiko.tateno@okayama-u.ac.jp)

² Laboratory for Advanced Nuclear Energy, Tokyo Institute of Technology

³ Priority Organization for Innovation and Excellence, Kumamoto University

The development of the diamond-anvil cell (DAC) technique combined with laser heating enabled easy access to the entire lower-mantle pressure and temperature regime at laboratory. However, a number of major issues remain highly controversial, including the location of the post-perovskite phase boundary, solid–liquid iron partitioning, Fe–Mg partitioning among mantle minerals, and melting temperatures of mantle rocks. Although the discrepancies between previous experimental studies on these issues have likely arisen from multiple sources, they could more or less have originated from possible problems in the laser-heated diamond-anvil cell (LHDAC) experiment; inherited temperature gradient in the heated area and temperature fluctuation during heating.

In this study, we developed an internal-resistive heated diamond-anvil cell with a new resistance heater—boron-doped diamond (BDD)—along with an optimized design of the cell assembly, including a composite gasket. We find this heating technique to demonstrate clear advantages over the conventional LHDAC technique, such as (1) ultrahigh temperature generation (>3500 K), (2) long-term stability (>1 h at 2500 K), (3) uniform radial temperature distribution (± 35 K at 2500 K across a 40- μm area), (4) chemical inertness (no boron diffusion into the silicate sample), and (5) weak X-ray diffraction intensity from the BDD heater. This newly developed IHDAC with a BDD heater can determine the phase diagrams of silicate/oxide materials with high precision and can be used in deep lower-mantle petrology.

マントルにおける‘若い’PGE移動の証拠

秋澤 紀克¹・石川 晃²・鈴木 勝彦³・小木曾 哲¹¹ 京都大学 大学院人間環境学研究科 (akizawa.norikatsu.2x@kyoto-u.ac.jp)² 東京大学 大学院総合文化研究科³ 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)

白金族元素 (PGE : Os, Ir, Ru, Rh, Pt and Pd) は強親鉄性であるため、金属相に入りやすい性質を持つ。そのため核-マントル分離時には、多くの PGE は核に分配されたと考えられている (Brenan et al., 2016)。しかし、これまで得られてきたマントルかんらん岩の研究成果から、核-マントル分離時の物質収支を考慮して求められた初期マントルでは説明できない程、マントルはPGEに富んでいることが明らかにされてきた (Mann et al., 2012)。その PGE 組成はコンドライトのものに似ているため、PGE 過剰の要因を地球外からもたらされる隕石爆撃に求め、広く受け入れられてきた (Late veneer 説 : Kimura et al., 1974)。ところが、ここ数十年間蓄積されてきたマントルかんらん岩の全岩 PGE 組成や硫化鉱物の PGE 組成の分析結果から、‘若い’メタソマティックな (二次的な変成・変質作用に伴う) PGE の付け足しがマントル中で広く起こっていることが示唆された (例えば, Luguët et al., 2003; Lorand et al., 2004)。メタソマティックな PGE の移動メカニズムは、初生的な上部マントル (PUM=全マントルを平均する仮想物質) の PGE 含有量をマントルかんらん岩から正確に推定するという観点において、詳細に解明されることが必要である。しかし、これまでメタソマティックなPGE移動性の直接証拠が発見されてこなかったため、その解明は実現されてこなかった。

本発表では、タヒチ産かんらん岩捕獲岩中の単斜輝石に包有される炭素質ガラス包有物の列に伴う sub- μm サイズの硫化鉱物を詳細に解析 (放射光 X 線や TEM を用いた分析手法を使用) することで、カーボナタイト質メルト (CO_2 に富んだメルト) によるメタソマティズムによる PGE 移動の直接証拠を示す。さらに、その岩石学的特徴の記載と共に化学組成を詳細に分析することで、メタソマティックなPGEの移動メカニズムを解明する。

1. Brenan, J.M., Bennett, N.R. & Zajacz, Z. *Rev. Mineral. Geochem.* **81**, 1–87 (2016).
2. Kimura, K., Lewis, R.S. & Anders, E. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **38**, 683–701 (1974).
3. Lorand, J.-P., Delpech, G., Grégoire, M., Moine, B., O'Reilly, S.Y., Cottin, J.-Y. *Chem. Geol.* **208**, 195–215 (2004).
4. Luguët, A., Lorand, J.-P. & Seyler, M. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **67**, 1553–1570 (2003).
5. Mann, U., Frost, D.J., Rubie, D.C., Becker, H. & Audétat, A. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **84**, 593–613 (2012).

マンタルの白金族元素存在度の精密な推定に向けて

小木曾 哲¹・秋澤 紀克¹¹ 京都大学大学院人間・環境学研究科相関環境学専攻

(kogiso@gaia.h.kyoto-u.ac.jp)

強親鉄性元素である白金族元素のマンタル中における存在度は、地球形成時の核-マンタル分離過程ならびにその後の核-マンタル間の化学的相互作用の実態解明に重要な制約を与える指標である。マンタル中の白金族元素存在度は、天然のカンラン岩の白金族元素濃度を基に推定されてきたが、その推定には大きな不確かさがある。我々が手に出来るカンラン岩の大半は、過去に部分融解を被ったものであるため、始原的マンタルにおける白金族元素濃度を推定するには、部分融解時の白金族元素の挙動を正しく理解する必要がある。これまでに行われて来た高圧実験および天然のカンラン岩の分析から、白金族元素の部分融解時の挙動は、温度・圧力だけでなく酸素・硫黄フガシティーにも大きく影響されることが分かって来た。一方、カンラン岩の白金族元素濃度は、部分融解だけでなく、マンタルから地表まで運ばれてくる途中でのいわゆる「メタソマティズム」によっても影響される。しかし、これまでの研究では、メタソマティズムによって白金族元素が移動したことを示す直接的な証拠はほとんど示されていなかっただけでなく、メタソマティズム自体の実態についても理解は進んでいなかった。我々は、カンラン岩サンプルの詳細な岩石記載と、放射光X線およびFIB-TEM-EDSを用いた白金族元素含有鉱物の微小領域観察により、メタソマティズムがカーボナタイト質メルトによって引き起こされ、それによって白金族元素が移動したことを示す直接的な証拠を見いだした（秋澤ほか、ポスター）。この観察事実は、CO₂を含むメルトあるいは流体によって、カンラン岩中の白金族元素濃度が大きく変動することを示している。CO₂がマンタル浅部に普遍的存在しているという最近の見方が正しければ、マンタル浅部ではCO₂を含む液体相の移動によってカンラン岩中の白金族元素濃度が大きく乱されている可能性がある。CO₂の存在は、部分融解時の酸素・硫黄フガシティーにも影響を与える。したがって、カンラン岩サンプルを用いてマンタル中の白金族元素存在度をより精密に推定するためには、マンタル中のCO₂の存在とその影響についての理解を進めることが重要である。

Partitioning experiments of sulfur using basaltic magma and Fe-FeS melt

Yoshiki Horioka^{1,*}, Seiji Kamada^{1,2}, Shin Ozawa¹, Fumiya Maeda¹,
Madhusoodhan Satish-Kumar³, Akio Suzuki¹

¹ Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University

² Frontier Research Institute for Interdisciplinary Science, Tohoku University

³ Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University

*yoshiki.horioka.r6@dc.tohoku.ac.jp

Abstract

Geophysical and geochemical studies have proved that Earth's core is mainly composed of iron with light elements such as H, C, O, S, and Si. This is because the density of the core is smaller than that of pure iron under the core conditions. The present day Earth's structure was considered to have formed during the differentiation of magma ocean in the early stages of formation of Earth. During magma ocean, a metallic liquid sank to the bottom of magma ocean by gravitation and reacted with a magma, then partitioning of elements between silicate mantle and metal core occurred under high pressure and temperature condition.

Since sulfur is depleted in the mantle compared to C1 chondrites (e.g., Murthy and Hall, 1970) and sulfides are found in meteorites, sulfur is one of the most plausible candidates in the Earth's core. From this, the study on partitioning using Fe-S system provides us some significant information about magma ocean and core formation. In addition, sulfur distribution and isotope fractionation are affected by these parameters (T , P , f_{O_2} etc.). Therefore, research on sulfur distribution under high pressure and temperature condition leads to understanding the process of the differentiation between core and mantle in early Earth.

In this study, partitioning experiments between silicate (basaltic composition) and metal (Fe-14 wt%S alloy) were performed using a Kawai-type 3000 ton multi-anvil press at Tohoku University. These were carried out at pressures ranging from 1 to 7 GPa and heated to temperatures of 1400 °C to 1800 °C. Chemical compositions of the samples were analyzed using SEM-EDS.

The experimental results show that correlations between distribution coefficients of sulfur (D_S) and temperature changed at different pressures. D_S at 3 GPa decreased with increasing temperature. Conversely those at 5 GPa increased with increasing temperature. Correlations between D_S and pressure were also changed at different temperatures. D_S at

1650 °C increased with increasing pressure, on the other hand, those at 1800 °C decreased with increasing pressure. As a whole trend, it was observed that they had a negative relation between distribution coefficient and temperature, and a positive relation between distribution coefficient and pressure.

Using the average D_S in this study of 76 ± 36 and the total abundance of sulfur in Earth of 6530 ppm reported by McDonough (2003), we estimated that the amount of sulfur in Earth's mantle was 82 ± 7 ppm. This abundance is less than expected previously (e.g., Palme and O'Neill, 2001; McDonough, 2003). However, it is actually expected to be higher content of sulfur in Earth's mantle because magma ocean experienced higher temperature condition than this study, with higher lithophile nature. Oxygen fugacity is also an important parameter when considering distribution because that value influences partitioning. Under reducing condition, sulfur tends to be distributed to a silicate phase than in oxidizing conditions (Rose-Weston et al., 2009). The ΔIW (oxygen fugacity to Iron-Wüstite buffer) of these experiments were in the range of -1.16 and -1.44. Assuming more reductive condition like ΔIW between -2.0 and -2.4 (Chabot et al., 2005; McDonough and Sun, 1995) in magma ocean, the content of sulfur in Earth's mantle might have increased and correspond to the present day Earth.

Imaging paleoslabs in the D'' layer beneath Central America and the Caribbean using seismic waveform inversion

Anselme F. E. Borgeaud¹, Kenji Kawai¹, Kensuke Konishi², Robert J. Geller¹

¹ University of Tokyo (anselme@eps.s.u-tokyo.ac.jp)

² Academia Sinica

D'', the lowermost layer of the Earth's mantle, is the thermal boundary layer (TBL) of mantle convection immediately above the Earth's liquid outer core. As the origin of upwelling of hot material and the destination of paleoslabs (downwelling cold slab remnants), D'' plays a major role in the Earth's evolution. D'' beneath Central America and the Caribbean is of particular geodynamical interest, since the paleo- and present Pacific plates have been subducting beneath the western margin of Pangaea since ~250 Ma, which implies that paleoslabs could have reached the lowermost mantle. We conduct waveform inversion using a dataset of ~7,700 transverse component records to infer the detailed three-dimensional (3-D) S-velocity structure in the lowermost 400 km of the mantle in the study region, so that we can investigate how cold paleoslabs interact with the hot TBL above the core-mantle boundary (CMB). We can obtain high-resolution images because the lowermost mantle here is densely sampled by seismic waves due to the full deployment of the USArray broadband seismic stations during 2004-2015. We find two distinct strong high-velocity anomalies, which we interpret as paleoslabs, just above the CMB beneath Central America and Venezuela, respectively, surrounded by low-velocity regions. Strong low-velocity anomalies concentrated in the lowermost 100 km of the mantle suggest the existence of chemically distinct denser material connected to low velocity anomalies in the lower mantle inferred by previous studies, suggesting that plate tectonics on the Earth's surface might control the modality of convection in the lower mantle.

The BEAMS model: Bridgmanite Enriched Ancient Mantle Structure

C. Houser¹, M.D. Ballmer^{1,2}, J.W. Hernlund¹, R.M. Wentzcovitch^{1,3}, and K. Hirose¹

¹ Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology (chouser@elsi.jp)

² ETH Zurich

³ University of Minnesota

The Bridgmanite Enriched Ancient Mantle Structures (BEAMS) hypothesis explores the end-member scenario in which the Earth's ancient lower mantle had an Mg/Si ratio close to that for the sun, rather than the higher Mg/Si observed in upper mantle peridotites. We explore the possibility that the lower mantle has retained relative Si enrichment through time, and due to the higher relative viscosity of Si rich materials, would resist erosion into the convecting mantle. Harzburgite is the olivine rich rock that makes up most of the cold subducting oceanic lithosphere or slabs that enter the mantle in subduction zones and travel through the mantle eventually reaching the core-mantle boundary, CMB. Harzburgite contains around 20% ferropericlasite, (Mg,Fe)O, which is two orders of magnitude less viscous than bridgmanite. Thus, as more slab material descends into the lower mantle, it eventually forms channels that allow subducted material to flow more freely. This material is then heated by the core and its positive buoyancy leads to the formation of upwelling channels away from subduction zones. Once this plan form is in place, it remains stable over geologic time.

The BEAMS model explains: 1) The observed change in the dominant tectonics from the surface to the CMB. 2) The discrepancy between geochemical data that indicate the mantle is not fully mixed with seismology and dynamics models which indicate vigorous, full mantle convection. 3) The decreased seismic signal from slab material in the mid mantle. The harzburgite is more sensitive to the iron spin transition and cold slabs have less of a velocity contrast with the higher velocity bridgmanite. 4) The long-term stability of Large Low Shear Velocity Provinces (LLSVP) over geologic time. It has been difficult to explain how this seismically slow, hence soft material could control lower mantle dynamics. We suggest the LLSVP are stable because the BEAMS ambient mantle is strong.

**The successful deployment of 40 broadband seismometers in Thailand,
Thai Seismic Array (TSAR)**

Sutthipong Noisagool¹, Satoru Tanaka², Hitoshi Kawakatsu¹, Nozomu Takeuchi¹, Weerachai Siripunvaraporn³, Songkhun Boonchaisuk⁴, Taewoon Kim², Yasushi Ishihara², Koji Miyakawa¹, Kenji Kawai⁵, and Yuki Suzuki⁵

¹ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Japan (snoisagool@gmail.com)

² Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan

³ Department of Physics, Faculty of Science, Mahidol University, Thailand

⁴ Geoscience Program, Kanchanaburi Campus, Mahidol University, Thailand

⁵ Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, Japan

The Thai Seismic Array (TSAR) observation is conducted under the project “Seismic and geo-electromagnetic observation for core and mantle, A03-1”. Data from this project will be used for the study of the earth structure ranging from the crust to the innermost core, and especially will help to explore a new area in the deep earth structure such as the core-mantle boundary or outer and inner cores. In addition, TSAR will also improve the spatial resolution of regional seismic tomography for the crust and mantle beneath Thailand. In 2015 fiscal year, we surveyed candidate locations for 40 broadband seismic stations that cover all the parts of Thailand (Tanaka et al., 2016, JpGU). Two pilot stations (using CMG-3T) have been installed and operated till present day (Noisagool et al., 2016, SSJ). After several months, our pilot stations still work very well. They can survive from hot weather in summer and heavy rain in a rainy season. In this fiscal year, we started the deployment of 38 broadband stations (using 32 CMG-3T and 6 STS-2) in November 2016. We divided the schedule into 4 trips between November 2016 and February 2017. Due to heaviest flood in the last 50 years in the southern Thailand, we had to abandon nine candidate sites in the southern peninsula of Thailand, and replace them with locations in the central and northern Thailand instead. The deployment of all the stations has been completed in February 2017. We plan to collect data every 6 months during spring and winter. The first data collection will be held in late April 2017 for all the stations.

Anomalous behavior of core phase PKPbc-df differential travel times from observations of South Sandwich Islands earthquakes by Alaskan and US seismic arrays

Long Xin¹, Hitoshi Kakwakatsu¹, Nozomu Takeuchi¹

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, Japan
(longxin@eri.u-tokyo.ac.jp)

We report anomalous behavior of core phase PKPbc-df differential travel times recorded by stations of the Alaska regional network and current USArray for several South Sandwich Islands (SSI) earthquakes. The data sample the inner- and outer-core for the polar paths, as well as the lowermost mantle beneath eastern Alaska. Our major observations are: (1) the fractional travel time residuals of PKPbc-df (residual divided by PKPdf travel time in the inner-core) increase rapidly from 147° to 149° (up to 0.01, corresponding to travel time of ~1s), and keep almost constant after 149°. (2) From southwest to northeast, there is a decrease in fractional residual at distance larger than 150°. (3) A clear shift of PKPbc-df residuals could be seen for two earthquakes between which the distance is about 3°. (4) Decrease of PKPdf/PKPbc amplitude ratios around 149° is observed. Either a rapid velocity change in the uppermost inner core or existence of a large lateral velocity variation at lowermost mantle, which is seen in a recently tomography model (Young, Tkalčić, Bodin, & Sambridge, 2013), may explain the change in travel time. The preliminary analysis indicates that modeling for discontinuities with different velocity jump in the upper inner-core does not seem to reproduce the observed steep increase of fractional residuals and its shift, so it may suggest a probable complexity at lowermost mantle. One possible interpretation is that PKPbc and PKPdf sample different portions of the heterogeneity at larger distance, which results in the sudden increase of the fractional residuals, and the boundary of the fast heterogeneity may locate at ~141.5° at CMB from the earthquakes. The large residuals observed from the polar path data for SSI events are usually explained by strong anisotropy in the uppermost inner-core, which might have been misinterpreted if it's affected by some structure at the lowest mantle. Further work including waveform modeling is needed to resolve what causes the anomalous behavior of our observation.

Mid-mantle seismic scatterers beneath Tonga-FijiSatoshi Kaneshima¹

¹ Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, Fukuoka, Japan
(kane@geo.kyushu-u.ac.jp)

We analyze deep and intermediate-depth earthquakes at the Tonga-Fiji region in order to reveal the distribution of scattering objects in the mid-lower mantle. By array processing waveform data recorded at regional seismograph stations in the US, Alaska, and Japan, we investigate S-to-P scattering waves in P coda, which arise from kilometer-scale chemically distinct objects in the mid-lower mantle beneath Tonga-Fiji.

We have found 23 mid-lower mantle scatterers that are located below 900 km depth. Scatterers deeper than 1900 km have not been identified. The number of strong S-to-P scattering observations decreases for the scatterers below 1600 km depth, i.e., the deeper objects are mostly weak. Strong mid-lower mantle S-to-P scattering most frequently occurs at the scatterers located within a depth range between 1400 km and 1600 km. Most of the scatterers are located at north of 18° S. Very large signals associated with mid-mantle scatterers are observed but only for a small portion of the entire earthquake-array pairs. Event-to-event differences in the scattering intensity for each scatterer are very large. Therefore the strong arrivals approximately represent ray theoretical S-to-P converted waves at objects with a plane geometry. The plane portions of the strong scatterers usually dip steeply, with the size exceeding 100 km. Locations of the strongest scattering objects in the middle of the study area near 1500 km depth shift laterally by about 300 km depending on the epicenter locations. Consequently the angles of rays incident on the scattering points remain approximately the same for different lateral locations of the scatterers.

震源再計算を考慮したアジョイントトモグラフィー： セントロイド時刻の補正

三好崇之¹

¹ 東京大学地震研究所 (tmiyoshi@eri.u-tokyo.ac.jp)

アジョイントトモグラフィーによる地球内部構造の波形インバージョンは、ローカルスケール（例えば, Tape et al. 2009）からグローバルスケール（Bozdag et al. 2016）まで実施されるようになった。どのスケールでも震源パラメータの設定は重要だが、三次元構造が初期モデルの場合、震源インバージョンを実施してこれらのパラメータを得ることは、構造インバージョンと同程度の計算コストを要するなど問題となる（例えば, Chen et al. 2015）。本研究では、セントロイド時刻を補正したアジョイントトモグラフィーを開発し、その有効性が確認できたことを報告する。

セントロイド時刻の補正は次のように行った。観測波形と初期構造モデルを用いて計算した理論波形について、P 波部分を切り出し波形相関を求めた。相関係数 0.8 以上を有する観測点について、最も高い相関係数を示すラグタイムを求めた。それらの平均値を地震ごとに求めて、発震時にラグタイムを加えた時刻をセントロイド時刻とした。この方法を関東地域の地殻・上部マントル構造推定に適用した。インバージョンでは、スペクトル要素法（Peter et al. 2011）による理論波形計算、防災科学技術研究所 F-net の広帯域観測波形を使用し、初期構造モデルは走時トモグラフィーモデル（Matsubara and Obara 2011）、初期震源は F-net のモーメントテンソル解を用いた。このカタログを用いる場合、セントロイド時刻の補正が特に重要である。

関東地域で発生した 158 地震について、5-30 秒の帯域で観測波形と理論波形とを比較したところ、理論波形は系統的に速く到達していた。このずれを震源破壊とみなし、セントロイド時刻を発震時からずらした。補正值の平均は 0.75 秒で、CMT 解析で得られた時刻差（松村・他 2006）と調和的である。この結果を用いて大規模計算を要するアジョイントトモグラフィーを実施した。セントロイド時刻補正なしの場合、明瞭な関東盆地構造が推定できなかったが、セントロイド時刻を補正した初期震源を用いたインバージョンでは、盆地に相当する低速度領域が推定されるなど地質情報との良好な対応がみられ、理論波形と観測波形の一致も改善された。セントロイド時刻の補正を行ったことで、適切な構造推定が可能となったと考えられる。今後、震源深さの推定に関しても検討し、震源パラメータの理論波形への影響を調査したい。

謝辞：観測波形は防災科学技術研究所の広帯域地震観測網 F-net、波形計算は SPEC3D Cartesian を用いた。記して感謝いたします。

**Redetermination of the source parameters of deep earthquakes
and the effect on 3-D earth models obtained by waveform inversion.**

Lina Yamaya¹, Anselme F. E. Borgeaud², Kenji Kawai², Robert Geller², and Kensuke
Konishi³

¹ Univ. Tokyo (lina@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)

² Univ. Tokyo

³ Academia Sinica, Taiwan

In our group's previous 3-D waveform inversion studies, the source parameters were fixed to the Global Centroid-Moment-Tensor (GCMT) Project solutions, which are determined using not only body- but also surface- and mantle-waves, using data in a different frequency range from that used in our waveform inversion studies. In this study we redetermine the CMT solutions using only body wave data in the same frequency range as used in our waveform inversion studies. We then use the new CMT solutions in new inversions for the 3-D seismic velocity structure of the D'' layer beneath central America. The variance reduction for models inferred using our new CMT solutions is better than that for models inferred using the GCMT solutions. Also, although this is somewhat subjective, the new 3-D models (Box 5, below) appear to provide sharper images.

地磁気データで明らかにする核－マントル結合の時空間変動 (FY2016)

松島政貴¹

¹ 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系 (mmatsush@geo.titech.ac.jp)

地磁気を生成・維持しているダイナモ作用は外核内の流れで起きている。核－マントル境界における下降流および内核境界における上昇流の空間的組み合わせは外核内の流れのスケールやパターンを決める。流れのパターンは磁場生成過程に影響するので、地磁気の分布や永年変化にその影響が現れる。つまり、核－マントル結合の時空間変動の情報は、外核内の流れの時空間変動に含まれている。そして、外核内の流れの情報は地磁気データに含まれている。そこで、Matsushima (2015) で使われている地衡流という制約を緩和して磁気地衡流という制約のもとで外核内の流れを求める。そして、推定された外核内の流れの空間分布および時間変動から核－マントル結合の時空間変動を明らかにする。本年度は以下を実施した。

1. 地磁気モデル

外核内の流れを推定するための地磁気モデルとして、地球磁場観測衛星のデータを取り入れている POMME-9、CHAOS-5、GRIMM-3 を整備した。これらのうち POMME-9 ではガウス係数の表現方法が流れ場推定には適さないことがわかったので使用することを避けた。CHAOS-5 では球面調和関数の展開次数として $L=20$ まで、GRIMM-3 では $L=18$ まで扱えるが、高次の磁場を核－マントル表面まで下方接続すると短波長成分が過度に強調されてしまうことがわかった。結局、 $L=14$ までの展開での地磁気モデルを使用することとした。この展開次数は COV-OBS. x1 と同じである。

2. 流れ場の推定方法の改良

Matsushima (2015) の手法では、地磁気永年変化に対して核－マントル境界の粘性境界層内部における磁気拡散の影響を取り入れている。粘性境界層の下部では流れの水平成分が地衡流であるという非常に強い制約が課されている。より精度の高い流れを推定するためには、この制約を緩める必要がある。そこで、コリオリ力だけでなく、ローレンツ力の影響も取り入れて、流れの推定方法を改良した。

3. 流れ場の推定

地磁気モデルを使用して外核内の流れを計算した。今後はこれを基礎として、核－マントル結合の時空間変動を調べていく。

**Electrical conductivity heterogeneity at the CMB inferred from
electromagnetic observation of a local geomagnetic jerk**
(ローカル地磁気ジャークの電磁場観測とマントル最深部電気伝
導度構造)

Hisayoshi Shimizu¹ and Hisashi Utada¹

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo
(shimizu@eri.u-tokyo.ac.jp)

Sudden changes of geomagnetic secular variation (first time derivative of geomagnetic main field) have been observed several times since the last century and the changes are called geomagnetic jerks. Among the geomagnetic jerks, that occurred at the beginning of 2007 was identified regionally in the Atlantic and Indian Ocean. On the other hand, geoelectric field observed in the northwestern Pacific using long submarine cables showed a jerk-like sudden change in its secular variation near the end of 2005. In this presentation, we show results of numerical experiment on the local geomagnetic jerk supposing that the field variations are due to a toroidal magnetic field variation at the CMB and influence of laterally heterogeneous electrical conductivity in the D'' layer. It is confirmed that high conductivity heterogeneity in the D'' layer can cause secondary magnetic field that can be observed at the Earth's surface. Very high conductivity heterogeneity, of order 10^3 - 10^4 S/m, is necessary to explain the observed amplitudes and appearance time difference of geomagnetic and geoelectric jerks. However, preferable location of high conductivity region does not correspond to that of LLSVP, otherwise the polarity of magnetic field variations at M'Bour and Ascension Island, where the local geomagnetic jerk was identified, cannot be reproduced by electromagnetic induction simulation. This would imply that a simple conversion from the SH-wave velocity to electrical conductivity does not hold. The results also suggest that observation of geoelectric field due to local geomagnetic jerks has potential to constrain the electrical conductivity structure at the bottom of the mantle.

Pacific Array of, by and for Global Deep Earth ResearchHitoshi Kawakatsu¹¹ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo (hitosi@eri.u-tokyo.ac.jp)

Recent advances in ocean bottom geophysical observations, together with advances in the analysis methodology, have now enabled us to resolve the regional 1-D structure of the entire lithosphere-asthenosphere system (LAS), from the surface to a depth of ~200km, including seismic anisotropy (azimuthal), with deployments of ~10-15 BBOBSs & OBEMs each for a year or so (Takeo et al, 2013, 2016; Baba et al., 2013; Lin et al. 2016). Thus the in-situ characterization of the physical properties of the entire oceanic LAS without a priori assumption for the shallow-most structure, the assumption often made for global studies, has become possible. We are now at an exciting stage that a large scale array experiment in the ocean (e.g., Pacific Array: <http://eri-ndc.eri.u-tokyo.ac.jp/PacificArray/>) has become approachable: having ~10-15 BBOBSs/OBEMs as an array unit for a 1-2-year deployment, and repeating such deployments in a leap-frog way or concurrently (an array of arrays) for a decade or so would enable us to cover a large portion of the Pacific basin. Such array observations not only by giving regional constraints on the 1-D structure (including seismic anisotropy), but also by sharing waveform data for global scale waveform tomography (e.g., Fichtner et al. 2010; French et al. 2013; Zhu & Tromp 2013), would drastically increase our knowledge of how plate tectonics works beneath oceanic basins, as well as of the large scale picture of the interior of the Earth. For such an array of arrays to be realized, international collaboration seems essential. If three or four countries collaborate together, it may be achieved within a 10-year time frame that makes this concept attractive. It is also essential that global seismology, geodynamics, and deep earth (GSGD) communities work closely with the ocean science community for Pacific Array to be realized, as they would get most benefit from it. While unit array deployments may have their own scientific goals, it is important that they are planned to fit within a larger international Pacific Array structure. The GSGD community should take a lead in providing such an umbrella, as well as proposing some of individual array deployments employing existing international instrument pools.

外核最下部（F 層）不均質の地震学的証拠

大滝壽樹¹・金嶋聡²・市川浩樹³・土屋卓久³¹ 産業技術総合研究所地質情報研究部門 (t-ohtaki@aist.go.jp)² 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門³ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

本研究では、オーストラリア下の外核最下部（F 層）の地震波速度を詳細に解析し、昨年度行った北東太平洋下の結果と比較する．解析に用いるのは、南サンドイッチ諸島で起きた地震を日本の Hi-net で観測した上下動成分記録である．解析には、北東太平洋下と同じく Ohtaki and Kaneshima (2015) で開発した方法を用いた．この方法は F 層に特に感度の高い 2 つの観測——F 層内に最深点を持つ波の走時の周波数依存性の観測，この波と内核表面での反射波の時間差の観測——を組み合わせたものである．前者は F 層内の速度勾配に敏感であり，後者は F 層内の速度の大きさに敏感である．前者の観測はこの地域で F 層最下部の速度勾配が小さいことを示し，後者の観測は F 層の速度の大きさが PREM に近いことを示している．これら二つの観測をともに満足するためには，F 層内で PREM より速度を大きくし，F 層最下部に速度勾配の小さい層をおくことが必要となる．

この速度モデルは北東太平洋下のモデルとは異なっている．北東太平洋下をサンプリングする観測は，その地域で F 層が PREM よりやや遅く速度勾配もやや小さいことを示しているからだ．外核の地震波速度は温度によらない (Ichikawa et al., 2014) ため，この速度の違いは F 層内の組成の違いを反映していると考えられる．

Local strong slow S-wave anomalies at western edge of Pacific LLSVPMasayuki Obayashi¹, Fenglin Niu², and Junko Yoshimitsu¹¹ D-EARTH, JAMSTEC (obayashi@jamstec.go.jp)² Rice University

Seismic tomography studies have revealed two broad slow shear-wave speed anomalies regions beneath the Pacific and Africa called as LLSVPs (Large Low Seismic Velocity Provinces). There are geographic correlations between the LLSVPs and hotspots, and the LLSVPs could probably play an important role for convection throughout the mantle and thermal structure and evolution of the earth. The LLSVPs have been considered to be heterogeneous in composition since the boundaries between the normal mantle are sharp. To investigate the details of the sharp LLSVP edge we measure ScS–S and SKS–S differential traveltimes in the hypocentral distance of about 60 – 90° using Japanese and Chinese seismic networks.

We found anomalously large (more than 5 sec) ScS – S travel times accompanying normal SKS – S travel times, suggesting local strong slow region in the vicinity of the ScS bounce points (red circles in Figure 1). Such ScS bounce points locate to the northeast of New Guinea Island extending over 20 degrees in NE-SW direction. However below New Guinea Island, both ScS – S and SKS – S travel times are normal (green circles in Figure 1), indicating abrupt end of the local strong slow anomalies.

地震波エンベロープで制約された海洋リソスフェア・アセノスフェアの内部減衰 (Attenuation Structure of Oceanic Lithosphere and Asthenosphere Revealed by Seismogram Envelopes)

Nozomu Takeuchi¹ • NoMAN Project Team

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo
(takeuchi@eri.u-tokyo.ac.jp)

It is widely accepted that the oceanic lithosphere and asthenosphere have high-Q and low-Q, respectively, however, it is not very clear to which extent such attenuations are affected by seismic wave scattering (e.g., Shito et al. 2015, JGR; Kennett and Furumura 2013, GJI). To distinguish the intrinsic and scattering attenuations, analyzing seismogram envelopes is known to be effective. We deployed broadband ocean bottom seismometers on the old Pacific seafloor between 2010–2014 (NoMan Project, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/yesman/>). We had quite large number of aftershocks of 2011 Great Tohoku Earthquake and succeeded in obtaining envelopes of Po/So and T-phase at various distances. The data purely sample the old ocean, which should provide unique opportunities to quantitatively constrain the attenuations in the oceanic regions. We applied our envelope simulation method (Takeuchi 2016, JGR) and obtained the attenuation model by grid-searching the best structural parameters to explain the observations.

One of the most unique features of Po/So is that spatial attenuation (i.e., energy loss rate per unit propagating distance) is independent from wave type (P- or S-wave) and frequency (Butler 1987, JGR). Several previous studies (e.g., Sereno & Orcutt 1987, JGR; Mallick & Frazer 1990, GJI) explained such features by slightly ad-hoc attenuation models (strong frequency dependency; larger P attenuations than S). In contrast, we tried to explain the observations without such assumptions and succeeded in explaining most of the observed features. The results suggest that the saturation of backscattering coefficients at higher wavenumbers is primarily responsible for the constant spatial attenuation.

地震・電磁気観測班の進捗状況

田中 聡¹¹ 海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野 (stan@jamstec.go.jp)

平成 28 年度における A03-1 地震・電磁気観測班の進捗状況を報告する。

まず、40 ヶ所の観測点を擁する広帯域地震観測網(Thai Seismic Array: TSAR)の構築を完了させた。平成 28 年 11 月から平成 29 年 2 月にかけて、洪水被害の深刻なタイ南部(マレー半島)を除く地域に、地震・電磁気観測班のメンバーとタイ・マヒドン大学の共同研究者が現地赶赴いて、広帯域地震計を地中に埋め、ソーラーパネルとバッテリーを電力源とするデータ収録器を設置した。詳しくは Noisagool et al. によるポスター発表をご覧いただきたい。

その他にも、研究代表者、研究分担者による個別課題が進行しているが、本講演では、研究代表者が取り組んでいる下部マントルにおける方位異方性検出の試みを中心に報告する。

ScS-S 走時差は、これまでに下部マントル S 波速度不均質性の解明に貢献してきたが、地震と観測点数が必ずしも十分ではないので、走時差の方位変化についてはあまり議論が行われていなかった。ここでは以前より観測網が充実している東アジアに注目した。フィリピン直下に ScS 波の反射点を持つような地震波形データを収集して ScS-S 走時差を測定し、PREM から予想される走時差からの残差をとった。南北方向に伝わる場合に比べて東西方向に伝わる場合、走時差残差が小さくなる傾向が見て取れる。 $\cos 2\theta$ 曲線を当てはめてみると、平均からの振幅幅は ± 1.4 s、最小残差の位は 103° であった。しかし、下部マントルの S 波速度不均質の影響が取り除かれていないので走時差残差のばらつきが大きく、既存の 3 次元 S 波速度構造モデルを使って補正しても改善されなかった。これは下部マントル最上部付近の空間分解能不足、特にスラブの影響が大きいことが考えられる。そこで、東アジア地域における空間分解能が高い 3 次元 P 波速度モデル GAP-P4(Obayashi et al., 2013)を基に、Karato(1993)が提案する変換係数 $R(=\ln V_s/\ln V_p)=1.7$ を用いて補正すると、残差のばらつきが約半分になった。補正された走時差残差に $\cos 2\theta$ 曲線を当てはめると、平均からの振幅幅は ± 0.4 s まで減少したが、最小残差の位は 105° と補正なしの場合とほぼ同じであった。今後は走時差だけでなく、S 波スプリッティングなどのより詳細な波形解析などによって下部マントルの方位異方性を検証していく。

3-D SH velocity structure within the D'' layer beneath the Northern Pacific

Yuki Suzuki¹ • Kenji Kawai¹ • Robert J. Geller¹ • Anselme F. E. Borgeaud¹ • Kensuke Konishi²

¹ The University of Tokyo (yuki.s@eps.s.u-tokyo.ac.jp)

² Academia Sinica

We conduct waveform inversion (Kawai et al. 2014, GJI) to infer the 3-D SH-velocity structure in the lowermost mantle beneath the Northern Pacific, using about 20,000 transverse components of broadband body-wave seismograms. We use S, ScS and other phases that arrive between them. The 3-D SH-velocity models obtained by our inversion show three prominent features: (i) horizontal high-velocity anomalies up to about 3 per cent faster than the Preliminary Reference Earth Model (PREM) with a thickness of a few hundred km and a lower boundary which is at most about 150 km above the core-mantle boundary (CMB), (ii) low-velocity anomalies about 2.5 per cent slower than PREM beneath the high-velocity anomalies at the base of the lower mantle, (iii) a thin (about 200 km) low-velocity structure continuous from the base of the low-velocity zone to at least 400 km above the CMB. We interpret these features respectively as: (i) remnants of slab material where the Mg-perovskite to Mg-post-perovskite phase transition could have occurred within the slab, (ii,iii) large amounts of hot and less dense materials beneath the cold paleoslab remnants just above the CMB which ascend and form a passive plume upwelling at the edge of the slab remnants (Suzuki et al. 2016, EPS).

不定性評価付きニュートリノフラックスモデルの構築

榎本三四郎¹¹ University of Washington (sanshiro@uw.edu), 東京大学カブリ IPMU

岐阜県飛騨市の神岡鉱山内に設置されている低エネルギーニュートリノ検出器 KamLAND は、地球内部のウラン・トリウム崩壊により生成される反ニュートリノ（地球ニュートリノ）に感度をもち、その観測データは地球内部組成や熱収支に関するユニークな情報をもたらす。KamLAND は 2001 年より観測を開始し、2005 年の地球ニュートリノ初観測の論文発表以降、その観測精度を高めながら複数の論文を発表してきた。

観測精度の向上とは、観測における不定性の減少を意味する。不定性を考えない中心値だけであればどんな実験でも数値を出すことができる。観測された中心値がもつ情報の量は、不定性によって規定され、当然のことながら不定性が小さいほど中心値のもつ意味は大きい。一方で、観測と比較される地球モデルの側は、不定性評価を伴ったものは皆無と言ってよい状況で、観測の側の精度向上が地球科学側で生かされていない。本研究においては、KamLAND における観測に基づく地球深部の放射性熱生成量の評価を目標の一つとしているが、そのためには、日本列島の地殻に含まれるウラン・トリウム量を、不定性付きで見積もる必要がある。

地球科学において不定性見積もりが広く行われていない理由の一つが、それを行うことの困難さと、方法論の欠如であると思われる。我々のグループでは、一貫したベイズ確率モデルに基づいて地震学と地球化学を融合し、地球組成を確率分布モデルとして推定する新たな手法を開発している。（地震波観測による 3 次元岩相推定（竹内）、地質学および岩石学による事前確率モデル（飯塚）、確率を保存できる新たな岩石組成モデル（上木）など。）この一連の新しい方法論の最後のステップが、分散確率場（放射性元素の分布など）から観測可能量（ニュートリノフラックスや地表熱流量など）を計算する部分である。ここでは、数万以上の膨大な数の確率変数を相関を考慮しながら積算する必要がある。

現状では、この相関のモデル化および数値計算上の取り扱いに苦慮しており、今後数年の主要な研究テーマとなっている。その一方で、とりあえず保守的な立場に立ち、最大相関を仮定して確率変数の積算を行って、ニュートリノフラックスの計算を行った。現状では、最大相関の仮定のために、不定性は 60～70% と極めて大きくなっているが、とりあえずは新手法によって最終点まで接続した。また、これは、確率論的な不定性評価を伴った初めてのフラックス計算である。

日本列島の地下温度構造モデリングへ向けて

山野 誠¹・田中明子²・濱元栄起³・松本拓己⁴¹ 東京大学地震研究所 (yamano@eri.u-tokyo.ac.jp)² 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門³ 埼玉県環境科学国際センター⁴ 防災科学技術研究所

ニュートリノ班の研究において、日本列島の地下温度構造を求めることの必要性は、地震波速度構造から地殻の岩石組成を推定する際に、温度構造が不確定要素となる点にある。岩石の地震波速度は組成とともに温度によっても変化するため、地下 40 km 程度までの温度構造を、ある程度の精度で知ることが重要である。一方、温度構造を推定するにも、地殻内の放射性発熱量分布、すなわち岩石組成についての情報が必要であり、相互の連携・フィードバックが求められる。

地下温度構造に関する最も基礎的なデータは、地表面における熱流量の値である。しかし、陸域で熱流量値を得るには、深い孔井内での地温勾配の測定が必要であり、データの分布はどうしても偏ったものになる。さらに上記の放射性発熱量の問題もあることから、地表面熱流量に加えて、地下の温度構造を反映する他の観測データも合わせて解析することが有効と考えられる。温度構造と密接に関係する情報には、地殻内地震の下限深度や、磁気異常から求められる磁化層の下限がある。これらと地表面熱流量には明らかな相関が認められるが、その関係は単純ではない。組成や流体分布を含めた地殻構造の地域性や不均質性も考慮し、解析を進めていきたい。

地表面熱流量のデータを格段に充実させる方法として、地震観測網 Hi-net の観測井における温度測定値の活用がある。この温度データから熱流量を求めることは既に行われており、沈み込みの熱モデル計算との比較に使用した研究例もある。既存の熱流量データに比べ、はるかに密に、かつ均質に全国をカバーするのが大きな利点であるが、大部分の孔井が深さ 70~200m と浅く、地表付近のさまざまな擾乱を受けやすいことが問題である。そこで我々は、個々の温度測定データを見直し、過去の地表面温度変動や地下水流動の影響を解析することにした。中部・関東地方のデータから作業を始めており、地表面温度変動についての解析例をポスターに示す。このような解析によって、各点での熱流量値を求め直し、精度の評価も行うことで、温度構造推定や他の観測量との比較に有用なデータセットが得られると期待される。

ジオニュートリノモデリングに向けた岩石ウラン・トリウム含有量データベースの構築と、化学組成確率分布モデルの構築

上木 賢太¹・Project Team KamLAND Simulation

¹ 東京大学地震研究所附属高エネルギー素粒子地球物理学研究センター
(kenta-ueki@eri.u-tokyo.ac.jp)

我々の研究グループは、K a m L A N Dで得られる地球ニュートリノデータを用いて、核-マントル中に含まれる放射性元素の量を世界最高精度で決定することを目標として、地震波速度構造や地質学的情報を用いた島弧地殻の岩相モデリングを行っている。地震波速度構造から推定された岩相分布を用いて日本島弧地殻のウラン・トリウム (U-Th) 濃度を推定するために、約100の論文や報告書のデータからなる、日本列島を構成する岩石の化学組成データベースを構築した。さらに、特にデータ数が少ない下部地殻起源の岩石に関して、隠岐島後や目潟などで採取された下部地殻捕獲岩の分析を行った。マントル岩に関しては、ウェブデータベースを活用して、捕獲岩の組成を収集した。

日本列島を構成する岩石の U-Th 含有量のバリエーションは、溶融や結晶分化などのメルトプロセス、海洋底での変質による U 添加、地表での U 減少で説明できる。また、日本列島で産出する下部地殻に相当する岩石は、大陸地殻での推定よりもやや枯渇したものとなった。

コンパイルされた組成データを用いて、地殻の U-Th 分布、そしてニュートリノフラックスの計算を行うために、確率分布を用いて岩種毎の U-Th 含有量のモデル化を行った。先行研究では一般的に対数正規分布や正規分布が広く適用されてきたが、組成をモデル化するための確率分布として、本研究では新たに、“ガンマ分布”を用いた。ガンマ分布は2パラメーターの確率分布である。マイナスの値を持たない、対称及び非対称、両方の分布に対応可能である、化学組成のモデリングに広く用いられているという点で、岩石組成のモデリングに適している。また、ガンマ分布は、パラメーター推定に用いた標本の平均を保存するという、地殻組成の推定やニュートリノフラックスの計算の際に非常に有利となる性質を持つ。ガンマ分布のパラメーター推定に関しては、検出限界を考慮した新たなデータフィッティングの方法を開発し、適用した。

確率密度関数化された岩種毎の組成分布を使用することで、より現実的な日本島弧地殻 U-Th 濃度の推定、ひいては地殻由来のニュートリノフラックスのより現実的な推定が可能となった。

方向検知型地球ニュートリノ検出器の開発

渡辺寛子¹¹ 東北大学ニュートリノ科学研究センター (hiroko@awa.tohoku.ac.jp)

ニュートリノの素粒子としての性質が徐々に明らかにされ、近年ではその高い透過性を利用した不可視の天体内部を調べる道具として用いることが実現してきた。地球内部に存在するウランやトリウムといった放射性物質はその崩壊時に熱を放出すると共に、反電子ニュートリノ（地球ニュートリノ）を放出する。容易に地表まで到達する地球内部で生成されたニュートリノを観測することで、地球内部の放射性物質・分布を直接観測することができ、地球理解の新たなツールと言える。

岐阜県飛騨市の神岡鉱山内、地下 1000m に位置する世界最大の液体シンチレーター検出器 KamLAND は、2005 年の地球ニュートリノ世界初観測に続き、放射性物質起源の熱量が地球の熱量の約半分を占めることを観測で示す等、成果を挙げている。しかし、現存する液体シンチレーターを用いたニュートリノ検出器は、その到来方向を観測することはできず、地殻・マントルの各成分を分けることや、最大のノイズ事象である原子炉ニュートリノを分離して観測精度を向上させることはできない。その原理的不可能を可能にする新技術「ニュートリノ到来方向観測技術」の確立に向け、基礎研究が進められている。

ニュートリノの到来方向観測には、発光位置を高精度で分離測定するイメージング検出器と、 ${}^6\text{Li}$ を含有した特殊な液体シンチレーターを組み合わせる必要がある。独自に設計・製作したイメージング検出器の性能評価を終え、放射性線源を用いた発光位置の観測による位置分解能の評価や、発光位置を三次元再構成するための解析方法の確立が行なわれている。本発表では、開発が進む到来方向検出器の現状について報告する。

方向検知型地球ニュートリノ検出器の開発

白旗 豊, 井上邦雄, 三井唯夫, 渡辺寛子,
石徹白晃治, 池田晴雄, 相馬圭吾, 大塚 竣太
東北大学 RCNS (yutaka@awa.tohoku.ac.jp)

ニュートリノとは素粒子の一種であり、近年その性質がよく知られるようになってきている。液体シンチレータ型検出器による逆 β 崩壊反応を利用した電子型反ニュートリノの観測では、陽電子と中性子の遅延同時計測によって、大幅にバックグラウンド事象を低減することが出来る。それによって、地球ニュートリノのような低エネルギーの電子型反ニュートリノの観測が可能となっている。

その反面、現在の検出器では水チェレンコフ検出器のように、ニュートリノの到来方向を知ることが出来ない。大型の液体シンチレータ検出器(e. g. KamLAND ~1kt size)でニュートリノの到来方向の測定が可能になれば、原子炉の運転状況に依存しない原子炉ニュートリノバックグラウンド事象の低減、地球内部の放射性物質の分布測定の高精度化などが可能となり、小型検出器では方向検出の原理検証、原子炉の非破壊診断に応用出来るなどのメリットがある。

ニュートリノの到来方向測定を可能にするためには、逆 β 崩壊反応により発生した陽電子の発光点と中性子捕獲点をニュートリノの到来方向情報が失われる前に精度良く決定する必要がある。そのために、中性子が到来方向情報を失う前に中性子捕獲原子核に捕獲され、捕獲点の特定が可能な ${}^6\text{Li}$ を含有した液体シンチレータを開発した。

また、もう一つの重要な開発要素として陽電子の発光点と中性子捕獲点を特定するための高い位置分解能をもった光学系の開発が必須である。

本発表では、到来方向測定のために独自に設計した反射型光学系の評価と実機を用いた発光位置の再構成について報告する。

U and Th abundances of crustal rocks in the Japan Arc: Towards better constraints on the geoneutrino flux from the mantle

Tsuyoshi IIZUKA¹, KamLAND Team²

¹ University of Tokyo (iizuka@eps.s.u-tokyo.ac.jp)

² KamLAND Team

It has been widely assumed that the bulk silicate Earth (BSE) has chondritic relative abundances of refractory-lithophile elements. The validity of this long-standing paradigm can be potentially addressed using electron antineutrinos produced within the Earth, the so-called geoneutrinos. The geoneutrinos have been measured with two liquid scintillator detectors at KamLAND in Japan and Borexino in Italy. Once the crustal contribution to the measured total geoneutrino fluxes are well established by determining U and Th distributions around the detectors, the data allow us to determine the absolute U and Th abundances in the mantle with sufficient precision to evaluate the chondritic BSE model, in particular whether highly incompatible refractory-lithophile elements are significantly (~50%) depleted as inferred from an impact-erosion model. Yet, the U and Th distributions in the Japan Arc crust, in particular deep crust, are still poorly constrained.

For better understanding of U-Th distributions in the Japan Arc, we have compiled previously reported U-Th abundance data for crustal rocks in the Japan Arc and further conducted petrology and geochemistry on mafic-ultramafic xenoliths from Oki Dogo, Shimane Prefecture. Thin section observation and whole rock main/trace element analyses of 90 xenoliths were conducted. The equilibrium temperatures of two-pyroxenes were determined to be 800–1100 °C, corresponding to depth of 25–35 km under the assumption of the typical geothermal gradient. By combining the compiled data and newly obtained data, we found that the relative abundances of U and Th of the Japanese deep crust are distinctive from those of the deep crust in cratonic regions. Considering that the chemical behavior of U relative to Th changes with redox state, the discrepancy may reflect that the Japan Arc crust was formed under more oxidized conditions as compared to the cratonic deep crust. In the presentation, we will further discuss about a methodology for combining these rock data with seismic data to estimate the U and Th distributions within the deep crust over the wide area.

Influence of Lower Mantle Convective Planform Memory on Core-Mantle Evolution

J.W. Hernlund¹ and C. Houser¹

¹ Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology (chouser@elsi.jp)

There are generally 2 divergent views of the lower mantle, which can be distinguished on the basis of convective planform (pattern) memory. The first kind of model imagines that the lower mantle has no independent planform memory, but instead envisions downwelling subducted slabs sinking vertically down as Stokes-like bodies immersed in a simple viscous medium. In this view, lower mantle structure is dominated by the history of plate motions (and past centers of subduction), and each “blue blob” in seismic tomography models corresponds to an ancient slab that was once subducted from a location directly above it. Unfortunately, this view is imprecise if one accounts for the larger scale “mantle wind” that is induced in the surrounding mantle as slabs descend to the core mantle boundary (CMB), which inevitably causes significant lateral flow and displacement of slabs as they sink. Models that fully couple the induced viscous return flow in the surrounding mantle and account for this mantle wind in a self-consistent way must be more realistic, however, model limitations mean that they can only study very simplistic rheologies. A serious side effect of the assumption of a simple linear viscous rheology necessitated by these models is a relatively short time scale for mixing of mantle compositional heterogeneities (~100 Myr), putting them at odds with geochemical inferences (a classic debate). Such models also have a difficult time to explain stagnant slabs, the possible fixity of deep-seated upwelling mantle plumes, and some have argued that the observed seismic heterogeneity is not compatible with a lower mantle that is simply a slave or dashpot for plate tectonics. Fluid tank experiments have been able to establish stable lower mantle planforms when combined with dense chemical layers and strongly temperature-dependent viscosity, however, it isn’t clear that this regime can be produced or maintained in the Earth itself. We recently proposed that more viscous material could stabilize and organize convection in the lower mantle owing to enrichment in SiO₂, which promotes a larger modal abundance of the strong bridgmanite phase and hence higher viscosity. This BEAMS model is the first that shows a simple mechanism for producing long-term planform memory in the lower mantle, maintaining primordial reservoirs, fixed mantle plumes, stagnant slabs, and a seismic heterogeneity spectrum that is distinct from the upper mantle pattern that is dominated by plate tectonics (as long argued by Dziewonski and

A04-1

others). However, even this model may be overly simplistic, since the rheology it invokes also implies the possibility for strain weakening behavior owing to complex evolution of rock fabrics during deformation. Strain weakening in the lower mantle could allow for the production of stable long-lived localized rheological shear zones, much like we see in the character of plate tectonics in the lithosphere. In a strain-weakening dominated lower mantle, viscous entrainment and mixing would be strongly suppressed, thus allowing for long-lived isolated geochemical heterogeneities. Most importantly, lower mantle planform memory would be very strong, resulting from rheological behavior. Of course, this rheological behavior will cause and become correlated with compositional heterogeneity over time, and could even provide another mechanism to explain the formation and longevity of BEAMS.

Here I will discuss the rise of planform memory-dominant models of the lower mantle, and how it affects core-mantle evolution. The pattern of convection and heat flow would be relatively stationary, although specific locations would exhibit temporally variable heat flux owing to the non-steady supply of subducted material from above. This would affect arguments that have been advanced (e.g., by Olson and others) regarding changes in lower mantle heat flow patterns influencing the pattern or reversal frequency of the geomagnetic field, since the overall pattern would not change significantly. It would also lead to a “tectonic regime” at the lower mantle that has been spatially fixed for billions of years, where chemical layers are relatively quiet and do not break up and merge under changing conditions. It might also explain why some parts of the D” layer seem to be consistent with ponding of subducted slabs, or with reservoirs of dense materials, even though there is no known recent subduction or LIP event above.

Modeling point defects in iron polymorphs: vacancy diffusion in Earth's inner core

Sebastian Ritterbex^a and Taku Tsuchiya^b

^aritterbex.sebastian_arthur_willem.us@ehime-u.ac.jp

^btsuchiya.taku.mg@ehime-u.ac.jp

Crystalline iron is the main constituent of the Earth's inner core¹. The thermomechanical properties of solid iron at high pressure and temperature therefore mainly control the dynamics and evolution of the inner core. One of those properties is atomic diffusion which plays an important role in solid-state plastic deformation. However, the role of plastic deformation^{2,3,4} as one of the candidates responsible for the observed seismic anisotropy of Earth's inner core^{5,6} remains unclear. Atomic-scale self-diffusion mechanisms in iron polymorphs at inner core conditions provide a link between plastic deformation and elastic anisotropy of the inner core. Therefore, a thorough understanding of atomic diffusion in iron polymorphs is essential to constrain insight into the evolution of Earth's inner core.

Since experiments are extremely difficult to perform at pressure and temperature conditions of the inner core, computational mineral physics provides an alternative to study atomic diffusion in iron under those conditions. In this work, the effect of pressure on vacancy diffusion is investigated by means of defect energetics as it largely determines the rate of vacancy diffusion. First principles simulations have been performed to calculate activation enthalpies for self-diffusion in FCC- and BCC- and HCP-iron at a pressure range up to the conditions of the Earth's inner core. Our results show that pressure significantly increases defect energetics and in particular is responsible for suppressing defect concentration substantially in iron at inner core conditions. Intrinsic vacancy concentration plays an important role in metals since it largely determines effective vacancy diffusion. Consequently the rate of vacancy diffusion will be strongly inhibited. The question then arises whether other mechanisms allow to enhance vacancy concentration in iron under inner core conditions. If not, the latter will have direct consequences for the interpretation of the seismologically

observed inner core anisotropy in terms of intracrystalline plasticity.

[1] Birch, F. (1952) Elasticity and Constitution of the Earth's Interior. *Journal of Geophysical Research*, 57(2), 227-286. [2] Wookey, J., Helffrich, G. (2008) Inner-core shear-wave anisotropy and texture from an observations of PKJKP waves. [3] Karato, S.-I. (1999) Seismic anisotropy of the Earth's inner core resulting from flow induced by Maxwell stresses. *Nature*, 402, 871-873. [4] Buffett, B.A., Wenk, H.-R. (2001) Texturing of the Earth's inner core by Maxwell stresses. *Nature*, 413, 60-63. [5] Tanaka, S., Hamaguchi, H. (1997) Degree on heterogeneity and hemispherical variation of anisotropy in the inner core from PKP(BC)-PKP(DF) times. *Journal of Geophysical Research*, 102, 2925-2938. [6] Creager, K.C. (1999) Large-scale variations in inner core anisotropy. *Journal of Geophysical Research*, 104, 23127-23139.

Ab initio prediction of potassium partitioning into the Earth's core

Zhihua Xiong¹, Taku Tsuchiya¹, and Takashi Taniuchi¹

¹Geodynamics Research Center, Ehime University (xiong.zhihua.us@ehime-u.ac.jp)

Silicate earth is depleted in potassium compared with chondrites [Wasserburg et al., 1964, Science]. Barely varying ratios of potassium isotope in chondrite, lunar and earth samples suggesting evaporation cannot be responsible for the missing of potassium [Humayun and Clayton, 1995, GCA]. The finding of a change in electronic structure of potassium from alkaline- to transition metal-like at high pressure highlighted the possibility of its incorporation into the core [Parker, 1996, Science]. If potassium is present, even ~ppm, the radiogenic heat produced by ⁴⁰K could be an important energy source for geodynamics [Labrosse, 2001, EPSL]. The potassium content in the core is determined by its partitioning behavior between silicate and metal system, which could be affected by many factors such as temperature, pressure, compositions of the metal (the type and content of light elements) and silicate systems (nbo/t: the ratio of non-bridging oxygen to tetrahedral cations) [Bouhifd et al., 2007, EPSL; Muthy et al., 2002, Nature]. However, previous experimental studies provided contradictory results of potassium incorporation into Fe-alloys, leaving its concentration in the core uncertain.

Ab-initio free energy simulations based on thermodynamics integration molecular dynamics [Taniuchi, 2014] are performed to investigate whether and how much potassium can enter the metal system. Potassium partition coefficient ($D_k = \text{Kwt}\%_{\text{metal}} / \text{Kwt}\%_{\text{silicate}}$) is determined as a function of pressure, temperature and composition by calculating the Gibbs free energy changes of its exchange reactions in different conditions. Helmholtz free energy is estimated with “thermodynamic integration” by computing the difference between two systems with different potential energy functions ($F_1 - F_0 = \int_0^1 < U_1 - U_0 >_\lambda d\lambda$) [Kirkwood, JCP, 1990].

Calculations performed from 3000 K to 5000 K suggest that temperature has no distinct effect in potassium incorporation into Fe-alloys. Results of D_k obtained from 20 GPa to 135 GPa at constant temperature and composition reveal that potassium partitioning behavior has a negligible pressure dependence. Besides, the potassium partial density of states (pDOS) shows its electronic structure remains to be alkaline metallic even at 135 GPa.

Influences of the light elements (S and O) proposed to be responsible for the density deficits of the core to potassium partitioning are also investigated in this study. Potassium solubility seems unchanged when the S content of the metal system increases. Simulations with oxygen free metal composition suggest that potassium will completely sequester into silicate system. However, with the presence of oxygen in metal, potassium will start its incorporation into metal system. Our results suggest that effects of temperature, pressure and S content are insignificant, while oxygen controls potassium partitioning between silicate and metal system.

スーパーアースのマントル対流シミュレーション

宮腰剛広¹・亀山真典²・小河正基³¹ 海洋研究開発機構(miyagoshi@jamstec.go.jp)² 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター(kameyama@sci.ehime-u.ac.jp)³ 東京大学大学院総合文化研究科(cmaogawa@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp)

マントル対流はプレート運動や惑星表層環境に深く関わり、その惑星のハビタビリティに深く関与していると考えられる。近年、続々と系外惑星スーパーアース（質量が地球質量程度から10倍地球質量程度までの岩石惑星）が発見されているが、そのような惑星のマントル対流がどのようなになっているかは、これらの惑星のハビタビリティを考える上でも興味深い問題である。

我々は、スーパーアースで想定される、強い断熱圧縮による温度変化がある場合に着目し、マントル対流がどのようなになるかを数値シミュレーションにより調べている。この変化の指標となる無次元パラメータ散逸数（dissipation number）は、地球のマントル対流シミュレーションでよく用いられるブシネスク近似では0となるが、我々は10倍地球質量スーパーアースで想定される、表面で5という値を採用した。また惑星サイズが大きくなる事を考慮し、従来よりも高いレイリー数領域（ 10^{10} ）まで調べた。また強い温度依存粘性、及び熱膨張率の圧力依存性も考慮している。計算手法にはACuTE法（Kameyama et al., 2005）を用いている。

シミュレーションの結果、惑星表面からのコールドプルーム活動は活発なのに対して、コア-マントル境界から上昇するホットプルーム活動は顕著に弱められる事が分かった。これは、断熱圧縮による温度変化の大きさは物質自体の温度に比例するためと考えられる。また圧縮性を想定しない（ブシネスク近似）場合に比べて対流の熱輸送効率がかなり低くなる事、また対流のレジームダイアグラムもブシネスク近似の場合とは異なる事が分かった（Miyagoshi et al., 2014, 2015）。

さらに、スーパーアースで想定される、上部マントルが定常状態よりも少し熱い状態から出発した場合、定常状態に至るまでに非常に長い（10Gyr程度の）時間がかかり、その間のtransientな対流状態は2層に分かれた対流状態となる事が分かった（Miyagoshi et al., 2017, submitted）。

ポスターでは主に以上の結果について説明し、紙面に余裕があれば、惑星サイズを地球サイズから地球の10倍まで段階的に変化させた場合にどうなるかについても触れる予定である。

安定成層のダイナモへの影響について

高橋 太¹¹ 九州大学理学研究院 (takahashi.futoshi.386@m.kyushu-u.ac.jp)

Seismic and geomagnetic field observations have revealed the presence of a stably stratified layer below the core-mantle boundary (CMB). Chemical or thermal origin of the stable stratification is suggested (Helffrich and Kaneshima, 2010; Buffett and Seagle, 2010; Pozzo et al. 2012; Ohta et al. 2016). The geomagnetic field is generated by thermally and chemically driven convection through dynamo action. Supposing the turbulent diffusivity in the core, the co-density approach has been preferred for modeling thermo-chemically driven dynamo. However, the origin of stable stratification is indistinguishable with the co-density formulation. Therefore, thermal-compositional buoyancy must be treated separately. In this study effects of a stable layer of either origin below the CMB on the geomagnetic field morphology are examined, adopting thermochemical double diffusive convection. We have found in a suite of runs that the morphology of dynamos is strongly affected by a stably stratified layer of ~400 km thickness, which is given according to seismic observations, regardless its origin. Then, we focus on the effects of a thinner stable layer, of which thickness is about 150 km close to that detected by geomagnetic observations. We will show results of our dynamo modeling with a thin stably stratified layer of either origin, and discuss its effects on the observed magnetic field and implications for the origin of the stable layer.

下部マントル鉱物の第一原理格子熱伝導率計算の進捗状況

出倉春彦^{1*}・土屋卓久¹¹愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター[\(dekura.haruhiko.mf@ehime-u.ac.jp\)](mailto:dekura.haruhiko.mf@ehime-u.ac.jp)

地球の核-マントル境界では核から下部マントルへと熱が輸送されている。最下部マントルの格子熱伝導率(κ)を知ればその熱輸送量を強く制約でき、地球の熱進化に関する知見を得ることができる。本研究プロジェクトは下部マントル構成鉱物の κ を量子力学に基づく第一原理計算法により決定し、最下部マントルの熱輸送特性を定量的に評価することを目指している。H28年度はMgSiO₃ perovskite (Mg-Pv), MgSiO₃ post-perovskite (Mg-PPv), MgOの三つの鉱物を対象として κ の第一原理計算を行った。 κ を決定するためには、フォノン物性値(フォノン振動数, フォノン比熱 C_v , フォノン群速度ベクトル V_g)や熱状態方程式([1])に加えて、フォノン-フォノン散乱によるフォノン寿命(τ)を計算する必要がある。本研究ではまず密度汎関数摂動論に基づく第一原理フォノン振動数・固有ベクトル計算を行い、各々のフォノンモードに依存する C_v および V_g を決定した。次に、実空間差分法に基づく第一原理非調和格子動力学法により非調和格子動力学テンソルの大規模計算を実施し、高温・高圧下における τ をフォノンモード依存性も含めて決定した。本プロジェクトでは格子動力学計算でしばしば用いられる緩和時間近似(RTA)を κ の計算に適用せず、その代わりにフォノン分布関数に対するボルツマン輸送方程式(BTE)を設定し、それを数値的に厳密に解くことで κ の高精度決定を目指した。これらの方法に基づき、全下部マントル条件を包有する温度・圧力条件下(0-4000 K, 0-150 GPa)でMgO, Mg-Pv および Mg-PPv の κ を第一原理的に決定することができた。本研究の特色としては、(1)理論的に堅牢な輸送方程式である BTE を解いてマントル鉱物の κ を第一原理的に決める研究例はこれまでになく、RTA を用いた結果と比べると特に MgO で計算精度が飛躍的に改善されることを世界で初めて見いだしたこと[2], ならびに、(2)最下部マントルその場条件下における Mg-PPv の κ についての第一原理計算・実験報告例がない中、本研究プロジェクトで世界に先駆けてそれを決定したこと[3], の 2 点が挙げられる。発表では H28 年度で得られた成果の詳細について報告する。

参考文献

- [1] T. Sakai, H. Dekura, and N. Hirao, Scientific Reports **6**, 22652 (2016).
- [2] H. Dekura and T. Tsuchiya, *under review*.
- [3] H. Dekura and T. Tsuchiya, *in prep*.

地球外核の上部安定成層に対する組成対流の貫入問題再考

竹広真一¹・佐々木洋平²¹ 京都大学数理解析研究所 (takepiro@kurims.kyoto-u.ac.jp)² 京都大学大学院理学研究科数学教室

近年の第一原理計算ならびに高圧実験から、惑星中心核条件下での熱伝導率が、これまでに議論されていた値よりも大きいことが示唆されている (Pozzo et al. 2012, 2014; Gomi et al. 2013). この新しい熱伝導率を用いた 1 次元熱バランスモデルを用いて、外核内での安定成層の生成が議論されている (Gomi et al. 2013, Labrosse 2015). そこでは、核マントル境界(CMB)における熱流量 Q_{cmb} が小さい場合に安定成層が数 1000 km の厚さに及ぶ結果が示されている.

かれらは安定成層の存在を判定するのに熱フラックスが下向きであることを用いている. この条件は、外核内の流体運動が熱によってのみ引き起こされている場合には適切であるが、内核の成長に伴い外核下部に放出される軽成分の浮力により駆動される、いわゆる組成対流も同時に生じている状況では正しくない. 組成対流が熱的な安定性に打ち勝てる程度に激しければ熱的に生成された安定成層は混合され、中立状態になってしまうだろう.

熱組成対流がどこで発生できるかを定量的に判断するひとつの基準として、われわれは熱的および組成のどちらにも起因する浮力による仕事率 (運動エネルギー生成) を提案する. 仕事率は熱フラックスに比例する項と組成フラックスに比例する項から成っている. 仕事率が正である領域は浮力により運動エネルギーが生成できるので対流が発生可能であると判断できる. 逆に仕事率が負の領域では運動エネルギーが生成できないため、安定成層が形成される可能性があるかと判断できる.

新しい熱伝導率を用いた地球外核の 1 次元熱および組成収支モデルを構築し、仕事率の動径分布をさまざまな Q_{cmb} に対して計算したところ、 $Q_{\text{cmb}} > 9.3$ TW の場合には安定成層が形成されず全層対流が発生する結果となった. 一方 $Q_{\text{cmb}} < 4.8$ TW の場合には、CMB 直下に数 100km 程度の安定成層ができることが示された.

参考文献

Pozzo, M., Davies, C., Gubbins, D., and D. Alfe, 2012. Nature 485, 355--358.

Gomi, H., Ohta, K., Hirose, K., Labrosse, S., Caracas, R., Verstraete, M. J., Hernlund, J. W., 2013. Phys. Earth Planet. Inter., 224, 88--103.

Pozzo, M., Davies, C., Gubbins, D., and D. Alfe, 2014. Earth Planet. Sci. Lett., 393, 159--164.

On the development of a coupled core-mantle thermo-chemical evolution model: Formation on a stably stratified region

Takashi Nakagawa¹

¹ Department of Mathematical Science and Advanced Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokohama 236-0001, Japan
(ntakashi@jamstec.go.jp)

I report the current progress on developing of a coupled core-mantle thermo-chemical evolution model in numerical thermo-chemical mantle convection simulations and simple semi-theoretical computations. Two different diffusion processes of oxygen from mantle to core (chemical diffusion and baro-diffusion) caused by core-mantle chemical reaction system [Buffett and Seagle, 2010; Gubbins and Davies, 2012] are included in thermal evolution model of Earth's core. Those diffusion processes seem to be found for 'a stably stratified region' beneath the core-mantle boundary (CMB). In addition, I include a thermal effect on the formation of stable region known as a sub-isentropic shell when the CMB heat flow is smaller than the isentropic heat flow [Labrosse, 1997; Lister and Buffett, 1998]. With simple semi-analytical computations on thermo-chemical evolution of Earth's core, several important results are obtained: 1. A stable region may work for a buffer of heat transfer across the core, 2. A sub-isentropic shell can rapidly replace the chemically stable region if the heat transfer condition across an interface of stable region changes from super-isentropic to sub-isentropic condition and 3. Thickness of stable region seems to be found as 150 km to 250 km, which is consistent with an inference of thickness of stable region from geomagnetic secular variations [Buffett et al., 2016] but dependent on chemical diffusivity [Buffett and Seagle, 2010]. I also incorporate such semi-theoretical formulation of thermo-chemical evolution model into a bottom thermo-chemical boundary condition of numerical mantle convection simulations and more results will be presented as well as future development on a dissolution of light elements driving early geodynamo actions [e.g. Hirose et al., 2017].

理論計算班の活動状況

土屋卓久

愛媛大 GRC (tsuchiya.taku.mg@ehime-u.ac.jp)

平成28年度、理論計算班では(1)新たな高温高压物性、特に熱伝導率や原子拡散係数などの輸送特性の第一原理計算手法開発、(2)熱源元素をはじめとした同位体や希ガスの元素分配の第一原理計算手法開発、(3)種々の岩石モデルの密度モデルの作成とそれに基づくマントル不均質形成進化及び熱進化シミュレーションの実施、(4)第一原理計算や高压実験などから得られる定量物性データを用いた核の化学・熱進化シミュレーションの実施等を行った。

(1)に関しては、手法開発が順調に進み非調和格子動力学理論に基づく格子熱伝導シミュレーションが実用段階となった。下部マントル主要鉱物についてマントル全域の温度圧力条件で熱伝導率を求めたのち、現在は内部無撞着 LDA+U 法と組み合わせ鉄固溶効果についての計算に移行しつつある。(2)については、前年度までに開発した第一原理熱力学積分分子動力学シミュレーションプログラムを、ケイ酸塩-鉄メルト間のカリウム分配や希ガスの分配などに適用した。その結果、核の軽元素の種類によってはカリウムも鉄メルトに溶解込める可能性を見出した。その他元素分配班や同位体班と連携し、低压-高压鉱物間の H/D 分配や炭化鉄-炭素間の同位体分配など、地球内部の化学組成や進化に対して重要な知見を与え得る元素挙動に関するシミュレーションを開始した。(3)については第一原理計算や高压実験から得られた岩石物性を用いたマントル流動シミュレーションや、金属の熱伝導率を用いた核-マントル結合系の熱進化シミュレーションを行い、地球形成初期から現在の地球を再現するために必要となる制約条件をいくつか得た。(4)地震・電磁気班により観測されている核内の不均質構造について、熱進化シミュレーションやダイナモシミュレーションを実行して形成・安定化メカニズムについて調べ、軽元素成層の安定性について知見を得た。これらに第一原理計算から得られた熱物性データを組み合わせ、地震学的に観測される速度異常の物理・化学的解釈を試みている。

二次イオン質量分析法による軽元素（水素・炭素）分析法の開発とその応用例

伊藤正一¹・東佳徳¹・佐野亜佐美²・M. Satish Kumar³・坂口勲⁴

¹ 京都大学 (sitoh@kueps.kyoto-u.ac.jp)

² 日本原子力研究開発機構

³ 新潟大学

⁴ 物質・材料研究機構

マンツルの状態や対流に大きな影響を与える「水」を含む揮発性物質の循環を明らかにすることは固体地球のダイナミクスと進化の理解に不可欠である。しかし、揮発性であるが故に分析困難であった固体試料中の定量分析は、未踏の分析領域であった。本公募研究では、高温高压実験生成物や天然マンツル試料のあらゆる鉱物及びガラスに対応したイオン注入法による標準試料作成と二次イオン質量分析計による水素定量分析及び同位体分析法を融合し、構造物性班、同位体班、元素分配班の実験試料、天然試料の微量水素定量分析を行い、軽元素地球深部物質循環の解明に新展開をもたらす事を目指している。本発表では、京都大学大学院理学研究科設置の Cameca ims-4f-E7 SIMS を応用した軽元素に特化した分析体制の紹介と共同研究の可能性について議論していきたい。

平成28年度は、水蒸気雰囲気下及び Ar/D₂ 雰囲気下における水素拡散実験炉を導入し、天然試料や合成試料の鉱物における水素拡散挙動を明らかにする評価法の開発を行った（東他、本ポスター発表）。また、地球や地球外の惑星に普遍的に含まれるアパタイト結晶の水蒸気雰囲気下の水素拡散挙動を明らかにし、初期地球、月、火星、小惑星等の水の起源を推定することに応用されているアパタイト結晶の水素同位体組成に対して、結晶化後の熱水を伴う変成作用により値が変化する可能性を示した (Higashi et al., 2017)。

また、二次イオン質量分析法を応用したイオン注入法との融合による高压合成試料の水素定量分析法の開発、高压合成試料の水素分配実験の評価法及び水素同位体分析法の開発、ダイヤモンド合成試料の局所炭素同位体分析法の開発、結像光学系同位体イメージングによる定量分析法の開発といった共同研究の紹介を行い、各領域班がシームレスに連携できるような軽元素分析拠点の一つとして利用できるような B01 班としての連携体制についても議論できる事を期待している。

References:

Higashi et al. (2017) Hydrogen diffusion in the apatite-water system: Fluorapatite parallel to the c-axis., *Geochemical journal*, **51**, 115-122.

水蒸気雰囲気下におけるフッ素アパタイトの水素拡散実験

東 佳徳¹・伊藤 正一¹・坂口 勲²¹ 京都大学大学院理学研究科 (yhigashi@kueps.kyoto-u.ac.jp)² 国立研究開発法人物質・材料研究機構

近年、月や火星のアパタイトの D/H 比に基づいて、その天体の水の起源や進化を
探る研究が盛んになされている (e.g., Greenwood et al., 2011; Usui et al., 2015). しか
し、その D/H 比が結晶時のマグマの値を反映しているのか、あるいは結晶化後の拡
散によって二次的に変化した値であるかは不明瞭である. アパタイト中の水素拡散
挙動を理解することは、その D/H 比の起源を明らかにすることにつながる. 最近に
なつて、結晶軸の c 軸方向に対するアパタイト中の水素拡散係数が初めて報告された
(Higashi et al., 2017). 本研究では、アパタイト中の水素拡散挙動をより詳細に理解す
るため、結晶異方性と含水量依存性の二点に注目した水素拡散実験を行った.

実験試料には、含水量の異なる二種類の天然フッ素アパタイトの単結晶 (Durango
産: ~500 ppm H₂O Greenwood et al. (2011), Morocco 産: ~4000 ppm H₂O McCubbin et al.
(2015)) を用い、Durango 産の結晶は、c 軸に対して二通りの方向に切り出した. これ
らの試料を用いて、重水の水蒸気を拡散源としたトレーサー拡散実験を、500-700°C
の温度範囲で行った. 二次イオン質量分析計 (CAMECA ims 4f-E7 @Kyoto Univ.) に
よる拡散プロファイルから、水素拡散がシンプルな水素同位体の交換反応により進
むことが明らかになった. 各試料の拡散プロファイルからそれぞれ拡散係数を決定
し、500-700°C における水素拡散のアレニウス則を求めた.

Durango 産アパタイトの c 軸に対して鉛直方向の水素拡散係数は、平行方向に比べ
て、およそ 5 倍速かった. 含水量の異なる Morocco 産の結果からは、水素拡散に OH
の量が大きく影響しないことが示唆された. アパタイトの水素拡散の活性化エネル
ギーは、含水鉱物の水素拡散の活性化エネルギーと同程度であることから、類似の
拡散メカニズムを持つことが示唆された. 含水鉱物中の水素拡散は、結晶中で水素
が酸素との結合を切り替えながら輸送される "Grotthuss mechanism" と呼ばれる水素輸
送機構に従うと考えられている (e.g., Marion et al., 2001). このメカニズムによる水素
拡散は、アパタイト結晶中の他の元素の拡散と比較して、桁違いに速く、活性化エ
ネルギーも小さいことが明らかになった. 本研究の結果から、アパタイト結晶の
D/H 比が、結晶化後に水成分との反応によって、含水量に影響を与えることなく変
化することが示された. 水素拡散は、地球外におけるアパタイト結晶の D/H 比の決
定に重要な役割を果たした可能性がある.

ニュートリノ振動を用いた地球科学の実現に向けて

武多昭道¹・Carsten Rott²・保科琴代¹¹ 東京大学地震研究所 (taketa@eri.u-tokyo.ac.jp)² SungKungKwan University

近年、下部マントルはこれまで想定されていたよりも多くの水を含みうることが報告された。また、外核中に含まれる軽元素として、水素が着目されている。しかし、下部マントルや外核のサンプリングすることは現状では困難であることから、地球深部の水素量についての情報を直接得ることはできない。

我々は、これまで、大気ニュートリノを用いた外核の組成測定についての研究を行ってきた。この研究は下部マントル中の水分量の測定にも応用可能である。また、太陽ニュートリノを用いることで、さらに感度を向上させることが可能であることを新たに発見した。

ニュートリノは、ニュートリノ振動という、他の素粒子に無い特異な性質を持っている。ニュートリノ振動とは、ニュートリノの種類が時間と共に別の種類のニュートリノに変化する現象のことを指す。例えば、生成された際はミュー型ニュートリノであったものが、電子型ニュートリノとして検出される、等である。変化する確率は、ニュートリノの混合角、質量、そして周囲の電子数密度によって一意に決まり、混合角や質量は他の実験から測定できるため、ニュートリノ振動を精度よく測定することによって、物体の電子数密度を測定することができる。

従って、大気中や太陽中で生成され、地球を貫通したニュートリノを測定することで、地球深部の電子数密度分布を測定することが可能となる。地球内部の物質密度は、地震波や地球の自由振動の測定等から、精度よく決まっている。物質密度と電子数密度の比は、質量数と原子番号の比(Z/A)に等しいため、ニュートリノ振動の測定から、地球深部の平均化学組成を得ることができる。岩石の Z/A はおよそ 0.5、鉄の Z/A はおよそ 0.47 であるのに対し、水素の Z/A は 1 であるため、ニュートリノ振動は特に水素に感度が高い。この性質を用いて、地球深部での水素の探索を行うことが可能である。

今年度は、ニュートリノ振動を用いた地球深部の化学組成の実現のために必要な、大型ニュートリノ観測装置の開発研究、および太陽ニュートリノを用いた地球深部の化学組成測定についての研究を行った。本公演ではそれらについて報告する。

Defining the deep Earth with the OBK detector

William F McDonough¹

¹ Earth Science and the Research Center for Neutrino Science, Tohoku University, 6-3
Aramaki-aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-8578, Japan (wfm@tohoku.ac.jp)

The global surface heat flow reflects the combine contributions of primordial and radiogenic heat, with the former comprised of accretion and core formation sources. The continental crust contributes 7 TW of radiogenic power and a sub-MOHO flux of 10 to 30 mW/m² for a total surface flux of 65 mW/m². The continents contribute about 1/3 of the total power lost from the Earth. At its present spreading rate, the oceans contribute 2/3 of this flux, but we do not know how much of this flux is primordial versus radiogenic contributions. Earth models collectively allow up to a factor of 30 in the spread of estimates of the present-day mantle's radiogenic power. Moreover, the surface heat flux is likely to be a relative constant over the continents, whereas in the oceans it is unlikely to remain a constant over the last few billion years given variations in spreading rates. Our understanding of the Earth's thermal evolution history is intimately linked to knowing the total radiogenic power of the mantle.

OBK (Ocean Bottom KamLAND) is the next generation underwater geoneutrino detector designed to measure the Earth's abundance and distribution of Th and U inside the mantle. We have shown that such a detector is capable of identifying and mapping out large deep Earth structures (e.g., LLSVP), where they have enrichments in these elements relative to the ambient mantle.

Following on from the successes of the existing detectors in Japan and Italy, we propose an international effort, with Japanese geoscientists and particle physicists leading, to construct and deploy an ocean-going detector (OBK) to (1) map out structures in the mantle, (2) constraint the cooling history of the planet, (3) distinguish continental and mantle Th/U ratios, which documents the Earth's biological imprint on the mantle, and (4) define the power driving plate tectonics. Beyond these goals in Earth Sciences, this instrument will have spinoffs for particle physics and astroparticle physics. This field of science has been richly acknowledged by Nobel prizes; the science proposed here has the potential to continue this great tradition.