

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02000

研究課題名（和文）マントルウェッジにおける沈み込み由来炭素の探索

研究課題名（英文）Exploring for subduction-derived carbon in mantle wedges

研究代表者

山本 順司（Yamamoto, Junji）

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：60378536

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、マントルウェッジにおける海洋プレート由来炭素の有無を検証することを目指し、マントルウェッジ由来のかんらん岩捕獲岩に見られる流体包有物の炭素および窒素の同位体比を分析した。同位体比の測定法としては、超高真空中で流体包有物のガスを抽出するシステムと質量分析装置を組み合わせた手法に加え、顕微ラマン分光分析による質量分析を採用した。秋田県男鹿市一ノ目淵や極東ロシアなどの沈み込み帯で採取したかんらん岩捕獲岩（合計10個）の炭素及び窒素の同位体比を測定したところ、深層水由来と解釈される同位体的特徴が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、海洋プレートから由来した炭素がマントルウェッジに浸入していることを世界で初めて直接証明することに成功した。これは、沈み込む海洋プレートと火山噴火を出口・入口とする大規模な炭素循環系の存在を示すものであり、社会的にも関心が高い炭素循環系の時空間スケールや炭素流量の探求に極めて大きな影響を及ぼすに違いない。また、マントルに含まれる炭素はマントル鉱物の融点を低下させ、沈み込み帯におけるマグマ生成機構にも影響をもたらすため、本研究の結果は、地球内部と地球表層をつなぐ熱や物質の循環系全体の枠組みに再構築を迫る知見になるとと思われる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we analyzed isotope ratios of carbon and nitrogen in fluid inclusions in mantle wedge-derived peridotite xenoliths to explore the presence of oceanic plate-derived carbon in the mantle wedge. The isotope ratios were measured using a combination of a gas extraction system for fluid inclusions in an ultra-high vacuum and a conventional mass spectrometer, as well as mass spectrometric analysis by micro-Raman spectroscopy. Carbon and nitrogen isotope ratios were measured for a total of 10 peridotite samples collected from subduction zones in the Ichinomegata in Oga, Akita Prefecture, Japan, and in Far Eastern Russia. The resulting isotopic signatures were interpreted to be derived from deep seawater.

研究分野：地球システム化学

キーワード：マントルウェッジ 炭素 流体包有物 同位体比

1. 研究開始当初の背景

沈み込み帯の炭素循環に関する研究は活発であり、最近でも「Subducting carbon」の題名で *Nature* 誌に Review が組まれ (Plank & Manning, 2019 *Nature*), 炭素が地球深部へ沈み込むのかそれとも地表に戻るのかが論じられている。しかし、当該論文に多数引用されている研究成果は火山岩や火山性ガスに含まれる炭素に注目しており、噴出途上に火道地殻の混染を受けている可能性を排除できない。そのため、火山岩や火山性ガスのデータを用いてマントルウェッジにおける沈み込んだ海洋プレート由来炭素の有無を結論づけることは極めて困難である。

マントルウェッジに存在する炭素の起源を高い確度で議論するには、地表地殻物質の影響を受けないマントルウェッジそのものに存在する炭素を対象とした研究が有効であろう。しかし、マントルから直接由来した物質であると見なされているかんらん岩捕獲岩であっても、その同位体比をマントルの値として受け取るには注意が必要である。その一例を挙げる。研究代表者らはこれまでに公表されているかんらん岩捕獲岩の炭素同位体比を整理してみたところ、マントル的な高い値とは明らかに異なり、表層物質的な低い炭素同位体比が目立つことに気付いた。また、沈み込み帯で採取したかんらん岩捕獲岩には CO₂ を主成分とする流体包有物が特徴的に見られることにも気付いた。両者を照らし合わせると、かんらん岩捕獲岩に見られる流体包有物には沈み込んだ海洋プレート由来の炭素が含まれていると考えたくなる。しかし、従来のデータの多くはかんらん岩捕獲岩を酸分解や加熱熔融させて抽出した炭素を分析した値であるため、そのデータ分布には鉱物の表面や割れ目に吸着した周辺物質に含まれる炭素の影響が少なからず及んでいるであろう。そこで本研究では流体包有物に含まれる炭素や窒素の同位体比からマントルウェッジにおける海洋プレート由来炭素の有無を究明することを目指した。

2. 研究の目的

本研究は、沈み込んだ海洋プレート由来の炭素がマントルウェッジを本当に通過しているのか見極めることを目的としている。上述したように、従来の研究の問題点は、地表地殻の混入が避けられない火山岩や火山性ガスを用いていたことや、かんらん岩捕獲岩を用いた場合であっても、サンプル表面の地表物質が混入する抽出方法を採用していたことである。そのため、地表物質の値に似た炭素同位体比が得られても、沈み込み由来炭素を検出したのか火道地殻の炭素が混入したのか判別できない状況に陥っていた。

そこで本研究では、マントルウェッジ由来の捕獲岩に存在する流体包有物の炭素や窒素の同位体比を直接測ることで、マントルウェッジにおけるリサイクル炭素の有無を査定することを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、海洋プレート由来の炭素がマントルウェッジに存在するの否かを明らかにするため、マントルウェッジ由来のかんらん岩捕獲岩に見られる流体包有物の炭素および窒素の同位体比を分析することを目指した。同位体比の測定手法としては、超高真空中で流体包有物のガスを抽出するシステムと質量分析装置を組み合わせた手法に加え、顕微ラマン分光分析による質量分析も採用した。

測定に用いた試料としては、計画通り秋田県男鹿市一ノ目潟で採取したかんらん岩捕獲岩に加え、極東ロシアで採取したかんらん岩捕獲岩を用いた。

以下に、本研究で施した主な工夫3点を記す。

(3-1) マントルウェッジ由来岩石を直接調べる

海洋プレート由来流体がマントルウェッジに存在するのであれば、島弧の火山岩や火山性ガス、温泉水の化学分析によってその化学的側面に迫ることは原理的に可能であるが、噴出途上の火道に存在する表層地殻物質の影響によって、海洋プレート由来流体の有無の議論に決着を付けることができなくなっている。現状、この隘路を克服するにはマグマによってマントルから運び上げられたかんらん岩捕獲岩を用いるしかない。そこで本研究では、日本や極東ロシアのかんらん岩捕獲岩を調べることにした。しかし、かんらん岩捕獲岩であってもマントル由来とは限らない。例えば、地殻内のマグマ溜まりで形成された沈積岩である可能性も考えられる。そこで捕獲岩中の流体包有物が持つ残留圧力から捕獲岩がマントルウェッジ由来か判断する。かんらん岩捕獲岩に見られる CO₂ 包有物が持つ CO₂ 密度はマントルに存在していた時と

同じであるため、捕獲岩が捕獲される前の温度を輝石温度計等で推定し、CO₂の状態方程式に照らし合わせれば、CO₂流体が元々持っていた圧力、つまり捕獲岩が元々存在していた深さを決定することができる。CO₂の密度は顕微ラマン分光分析によって決めることができる。この顕微分光 CO₂ 密度測定法を利用した由来深度測定法は研究代表者が長年培ってきた地質圧力計であり（例えば、Yamamoto et al., 2002; 2007; 2023 *EPSL*; 2014 *Geology*）、現在は、世界最高精度となる 100 m オーダーで捕獲岩の由来深度を決定できる段階に達している。

(3-2) かんらん岩捕獲岩への表層地殻炭素の影響を排除する工夫

地表で採取した試料には表層地殻物質の混染が少なからず影響を及ぼしている。そのため、酸分解法や加熱法は避け、破碎法や顕微ラマン分光分析法を用い、かんらん岩捕獲岩中に流体包有物として存在する流体の同位体比を直接分析することによってマントルウェッジにおける海洋プレート由来炭素の有無を調べた。

(3-3) 沈み込んだ海洋プレート由来の成分を識別できる指標を用いる

海洋プレートの地殻部分には炭素に関する3つの端成分（中央海嶺玄武岩・有機堆積物・炭酸塩土壌）が存在する。3成分の寄与を炭素同位体比だけで識別することは不可能であるため同位体指標をもう一つ増やす必要がある。その同位体指標の必要条件は、海洋プレート由来流体が特徴的な値を持つことに加え、炭素と似た挙動を持つ元素であること、安定同位体質量分析装置で分析可能な同位体であることである。これらの条件を満たすのは希ガスと窒素の同位体である。³He/⁴He や ⁴⁰Ar/³⁶Ar などの希ガス同位体比については、放射壊変起源核種（⁴He や ⁴⁰Ar）の蓄積によって同位体比が進化してしまうため、安定同位体比である窒素同位体比が優れている。そこで研究代表者らは、本研究の初期段階において海洋プレート由来流体の窒素同位体比を推定した（Yamamoto et al., 2020 *EPSL*）。そして、この窒素同位体比と炭素同位体比を組み合わせることにより、かんらん岩捕獲岩に海洋プレート由来炭素が存在するか否かを見極めることにした。

4. 研究成果

本研究で得た代表的な成果を3点記す。

(4-1) 流体包有物に適用できる炭素同位体比測定法の開発

本研究では、マントル捕獲岩に見られる流体包有物一つ一つの同位体比を分析する技術の開発を行った。かんらん岩捕獲岩の流体包有物は二酸化炭素を主成分とすることが多いため、炭素または酸素の同位体比が測定候補となる。そこで、顕微ラマン分光分析によって二酸化炭素流体の炭素同位体比に起因するラマンピークを測定したところ、その強度比や面積比から炭素同位体比を8パーミルの精度で得られることが分かった（Yokokura et al., 2020 *Journal of Raman Spectroscopy*）。当該手法による炭素同位体比測定精度は、これまで20パーミルであったため（Arakawa et al., 2007 *Applied Spectroscopy*）、天然試料に適用可能な精度へ発展させることができた。

(4-2) 流体包有物に適用できる酸素同位体比測定法の開発

同位体比によって流体包有物の起源を探るには、炭素同位体比だけでは不可能である。そこで二酸化炭素に含まれるもう一つの元素である酸素に起因するラマンピークを用い、二酸化炭素流体の酸素同位体比の測定にも挑戦した。その結果、20パーミルを超える誤差であったが、世界で初めてラマン分光分析による二酸化炭素の酸素同位体比分析に成功した（Inoue et al., 2023 *Geochemical Journal*）。

(4-3) 流体包有物の窒素同位体比測定

海洋プレートの地殻部分には3つの端成分（中央海嶺玄武岩・有機堆積物・炭酸塩土壌）が存在するため、流体包有物の起源を探る指標としては炭素同位体比の他にもう一つの同位体比を取り入れる必要がある。そこで本研究では、炭素同位体比の他に窒素同位体比の測定を目標とした。流体包有物中のガスの抽出方法としては真空破碎法を採用し、抽出したガスを質量分析装置に導入して、その窒素同位体比およびアルゴン濃度を測定した。最終的に、当初の計画通りに一ノ目湯や極東ロシア等の沈み込み帯で採取したマントル捕獲岩（合計10個）の窒素同位体比測定を完遂させることができ、現在、炭素同位体比や酸素同位体比、希ガス同位体比との関係を解析している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hagiwara Yuuki, Yoshida Kenta, Yoneda Akira, Torimoto Junji, Yamamoto Junji	4. 巻 559
2. 論文標題 Experimental variable effects on laser heating of inclusions during Raman spectroscopic analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 119928 ~ 119928
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2020.119928	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Toyama Chiaki, Sumino Hirochika, Okabe Nobuaki, Ishikawa Akira, Yamamoto Junji, Kaneoka Ichiro, Muramatsu Yasuyuki	4. 巻 106
2. 論文標題 Halogen heterogeneity in the subcontinental lithospheric mantle revealed by I/Br ratios in kimberlites and their mantle xenoliths from South Africa, Greenland, China, Siberia, Canada, and Brazil	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1890 ~ 1899
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2021-7332	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hagiwara Yuuki, Kawano Tetsuma, Takahata Kohei, Torimoto Junji, Yamamoto Junji	4. 巻 52
2. 論文標題 Temperature dependence of a Raman CO ₂ densimeter from 23 °C to 200 °C and 7.2 to 248.7 MPa: Evaluation of density underestimation by laser heating	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Raman Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 1744 ~ 1757
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jrs.6188	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamamoto Junji, Ishibashi Hidemi, Hagiwara Yuuki, Yokokura Lena, Niida Kiyooki	4. 巻 56
2. 論文標題 Raman spectroscopic identification of continuity of a channel olivine in a peridotite specimen	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 GEOCHEMICAL JOURNAL	6. 最初と最後の頁 31 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2343/geochemj.GJ22003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sano Yuji, Kagoshima Takanori, Takahata Naoto, Shirai Kotaro, Park Jin-Oh, Snyder Glen T., Shibata Tomo, Yamamoto Junji, Nishio Yoshiro, Chen Ai-Ti, Xu Sheng, Zhao Dapeng, Pintti Daniele L.	4. 巻 8
2. 論文標題 Groundwater Anomaly Related to CCS-CO2 Injection and the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 611010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2020.611010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hanyu Takeshi, Yamamoto Junji, Kimoto Katsunori, Shimizu Kenji, Ushikubo Takayuki	4. 巻 557
2. 論文標題 Determination of total CO2 in melt inclusions with shrinkage bubbles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 119855 ~ 119855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2020.119855	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Junji, Hirano Naoto, Kurz Mark D.	4. 巻 552
2. 論文標題 Noble gas isotopic compositions of seamount lavas from the central Chile trench: Implications for petit-spot volcanism and the lithosphere asthenosphere boundary	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 116611 ~ 116611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2020.116611	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yokokura Lena, Hagiwara Yuuki, Yamamoto Junji	4. 巻 51
2. 論文標題 Pressure dependence of micro Raman mass spectrometry for carbon isotopic composition of carbon dioxide fluid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Raman Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 997 ~ 1002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jrs.5864	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hagiwara Yuuki, Torimoto Junji, Yamamoto Junji	4. 巻 51
2. 論文標題 Pressure measurement and detection of small H ₂ O amounts in high pressure H ₂ O-CO ₂ fluid up to 141 MPa using Fermi diad splits and bandwidths of CO ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Raman Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 1003 ~ 1018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jrs.5865	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto J., Takahata N., Sano Y., Yanagita M., Arai S., Prikhod'ko V.S.	4. 巻 534
2. 論文標題 Nitrogen and noble gas isotopic compositions of mantle xenoliths from Far Eastern Russia: Implications for nitrogen isotopic characteristics of mantle wedge fluid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 116109 ~ 116109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2020.116109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamamoto Junji, Kurz Mark D.	4. 巻 327
2. 論文標題 Mantle noble gas abundance ratios inferred from oceanic basalts and model estimates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of the Earth and Planetary Interiors	6. 最初と最後の頁 106875 ~ 106875
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pepi.2022.106875	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamamoto Junji, Hagiwara Yuuki	4. 巻 3
2. 論文標題 Precision evaluation of nitrogen isotope ratios by Raman spectrometry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Analytical Science Advances	6. 最初と最後の頁 269 ~ 277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ansa.202200020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mikuni Kazuto, Hirano Naoto, Akizawa Norikatsu, Yamamoto Junji, Machida Shiki, Tamura Akihiro, Hagiwara Yuuki, Morishita Tomoaki	4. 巻 9
2. 論文標題 Lithological structure of western Pacific lithosphere reconstructed from mantle xenoliths in a petit-spot volcano	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-022-00518-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hagiwara Yuuki, Angel Ross J., Yamamoto Junji, Alvaro Matteo	4. 巻 177
2. 論文標題 Equation of state of spinel (MgAl ₂ O ₄): constraints on self-consistent thermodynamic parameters and implications for elastic geobarometry of peridotites and chromitites	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Contributions to Mineralogy and Petrology	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00410-022-01975-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamamoto Junji, Kurz Mark D.	4. 巻 603
2. 論文標題 Noble gas isotopic compositions and abundance ratios of mantle xenoliths from Honolulu series volcanism, Oahu, Hawaii	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 117979 ~ 117979
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2022.117979	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Inoue Yuki, Okiyama Reo, Hagiwara Yuuki, Yamamoto Junji	4. 巻 57
2. 論文標題 Raman spectroscopic evaluation of precision of oxygen isotope ratio of carbon dioxide	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 GEOCHEMICAL JOURNAL	6. 最初と最後の頁 92 ~ 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2343/geochemj.GJ23007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山本順司, 平野直人, Mark D. Kurz
2. 発表標題 プチスポット溶岩の希ガス同位体比から海洋プレート直下マグマの起源を探る
3. 学会等名 日本質量分析学会同位体比部会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本順司
2. 発表標題 ラマン分光質量分析法は使いものになるか
3. 学会等名 日本質量分析学会同位体比部会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	吉村 俊平 (Yoshimura Shunpei) (20706436)	北海道大学・理学研究院・助教 (10101)	
研究分担者	馬上 謙一 (Bajo Kenichi) (70624758)	北海道大学・理学研究院・助教 (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------