

令和元年6月10日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04079

研究課題名(和文) マントルウェッジ炭素の起源をさぐる

研究課題名(英文) The origin of mantle wedge carbon

研究代表者

山本 順司 (Yamamoto, Junji)

北海道大学・総合博物館・准教授

研究者番号：60378536

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、革新的な分光学的手法を導入することにより、マントルウェッジに存在する炭素の起源の特定をめざした。マントルウェッジは沈み込んだ海洋プレートからもたらされる流体の通り道として常に議論の舞台となっている。物理的観測によって流体の存在が間接的に推察されつつあるが、その流体の実体や分布、起源などを論じるにはマントルウェッジを直接かつ精細に調べることが有用であろう。そこで本研究では、2 mの焦点距離を持つ分光器を導入し、マントルウェッジ由来の捕獲岩に見られる二酸化炭素を含む流体包有物にも適用できる、高い空間分解能と波数分解能を持つ顕微分光炭素同位体分析法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分光装置を用いた同位体分析法は吸光分析では既に実用化されているが、顕微ラマン分光分析を適用できれば、ナノメートルサイズの物質でも分子振動情報を得ることができる。この特性を利用し、サブミクロンサイズの領域に濃縮固化させた炭素や酸素、硫黄、窒素等の同位体分析にも波及する可能性が考えられる。本研究により、液体二酸化炭素の炭素同位体分析は実用段階に達したが、固体試料や炭素以外の元素への適用には何段階かの工夫が必要である。しかし、この手法の開発に成功すれば、レーザー掘削等で回収した局所物質の同位体分析が可能になるため、環境科学分野全体に浸透していくであろう。

研究成果の概要(英文)：Carbon isotope ratio is an important indicator for examining the origin of a material. Organic matters have subducted into the Earth by plate tectonics, and they could have affected carbon reservoir in the Earth's deep interior. Investigation of carbon isotopic composition of deep-derived materials tells us the material circulation between deep and surface of the Earth.

Carbon has often been observed as CO₂ fluid included in minerals, which is called a fluid inclusion. The rocks entrained by ascending magma from mantle also have CO₂ fluid inclusions. Adopting a spectrometer with 2000 mm focal length, we established the new measurement method for carbon isotope ratios, which has both high spatial resolution and spectral resolution. This method is applicable to a tiny CO₂ fluid inclusion.

研究分野：地球化学

キーワード：炭素 同位体 流体包有物 沈み込み帯 マントルウェッジ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球内部から放出される炭素の最大の噴出場は沈み込み帯だと考えられている。もしその全量がマントル由来であるならば、沈み込んだ海洋プレートに含まれる炭素は地表に戻ることなく地球深部までもたらされることになり、炭素は地球深部と表層を往還する大規模な循環系を形成していることになる。しかし、沈み込み帯で放出される炭素の多くが沈み込んだ海洋プレート由来であるならばこの図の解釈は一変する。沈み込んだ海洋プレート由来の炭素は地球深部までもたらされることなく、マントルウェッジを通して地球表層に戻ることになる。つまり、地球の炭素は火成活動を通して地球内部から脱ガスし、地球表層に蓄積し続ける一方通行の移動過程をたどってきたことになる。当然ながら炭素が単独で動くことは考え難いため、随伴する元素についても同様の考えを適用できるかもしれない。

このように、沈み込み帯における放出炭素の起源の特定は、地球内部と表層間の物質循環系や地球の脱ガス、大気生成など、地球惑星科学の中でも重要な問題を解き明かすための鍵の一つであると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、革新的な分光学的手法を導入することにより、マントルウェッジに存在する炭素の起源の特定につながる分析手法の確立をめざした。

マントルウェッジは沈み込んだ海洋プレートからもたらされる流体の通り道として常に議論の舞台となっている。物理的観測によって流体の存在が間接的に推察されつつあるが、その流体の実体や分布、起源などを論じるにはマントルウェッジを直接かつ精細に調べることが有用であろう。そこで本研究では、マントルウェッジ由来の捕獲岩に見られる二酸化炭素を含む流体包有物に適用できる顕微分光炭素同位体測定法の確立を目指した。

3. 研究の方法

マントルウェッジ由来の捕獲岩を用い、そこに見られる流体包有物一つひとつの炭素同位体比を顕微ラマン分光分析法によって決定できる測定法の開発を目指した。

本研究の技術的な目標は微小流体の炭素同位体比を誤差 1%程度で得ることである。島弧における噴気ガスの炭素同位体比は-3~-6%に集中しているため、マントルウェッジ炭素が似た同位体比を有するか議論するためにはこのレベルの測定精度が必要となる。ラマン分光分析による炭素同位体比測定において精度を向上させる重要な要素は波数分解能である。本研究では分光器の波数分解能を飛躍的に高めることで、誤差 1%程度の分析精度を得ることを目指した。

4. 研究成果

(1) 200 cm の焦点距離を持つ分光器の立ち上げに成功

本研究の肝となるのは高い波数分解能を持つラマン分光分析システムを開発することであった。なぜなら本研究で行う炭素同位体分析はラマン分光分析で得られる $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ピークと近接する $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ピークとの強度比を利用するためである。この手法によって地球化学的に意味のある炭素同位体比精度を得るには分光器に様々な改良をほどこす必要がある。我々は、本研究に着手する前からリソスフェアに広く分布する CO_2 流体の流体密度を分光スペクトルから精密に測定する手法を開発してきた。この分光密度測定法はこれまで密度測定が極めて困難であった直径 $1\ \mu\text{m}$ 以下および超高密度 ($> 1.18\ \text{g/cm}^3$) の CO_2 流体包有物にも適用でき、測定に要する時間も数分程度と短い。このような特徴を流体包有物の炭素同位体比測定にも活かすことを目指した。

本研究では、これまで 75 cm であった分光装置内の焦点距離を 200 cm まで大幅に延ばすことにより、取得スペクトル幅を $43\ \text{cm}^{-1}$ まで狭め、従来と比べて 3 倍以上高い波数分解能 ($< 0.07\ \text{cm}^{-1}$) を持つ装置に仕上げた。この措置はピーク強度の誤差を低減させるため、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ の測定精度を向上させ、誤差 1%程度での炭素同位体比測定を可能にする。

(2) 同位体標準 CO_2 の合成 (人工流体包有物の作成)

CO_2 流体の $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ および $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ピークから炭素同位体比を分析するにあたり、炭素同位体比既知の CO_2 流体を合成しなければならない。我々は液体 CO_2 を加圧する設備を有しているため、そのシステムに炭酸塩物質を酸分解できるユニットをつなげることで、炭素同位体比既知の高密度 CO_2 流体をセル内に生成することができる。つまり炭素同位体比既知の人工流体包有物を作成することが可能となる。

そこで炭素同位体比既知の二酸化炭素ガスを生成できるガラスラインを作製し、標準炭酸塩をリン酸分解することで二酸化炭素ガスを補集できるシステムを構築した。

(3) 捕獲岩の採取

本研究では、マントルウェッジ由来捕獲岩の炭素同位体比測定をめざしている。そのため、日本国内に産するマントル捕獲岩の採取に取り組み、島根県隠岐の島町や秋田県男鹿市において捕獲岩を採取した。

(4) 微小流体の炭素同位体比測定

炭素同位体比既知の人工二酸化炭素流体を、サファイア窓を備えた加圧セルに導入し、高密度二酸化炭素流体のラマン分光分析を行った。室温や電源の安定性に影響を受けたが、最も良い精度としては目標通り1%を下回る分析精度で炭素同位体比を得ることができた。この手法は顕微分光法でもあるため、極めて微小な流体にも適用できる。そのため、マントル捕獲岩中の流体包有物は当然のこと、冷却等で局所に濃集させたドライアイスや他の成分にも適用を拡張していくことができるであろう。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

(1) Shitaoka Y., Saito T., Yamamoto J., Miyoshi M., Ishibashi H. and Soda T. (2019)
Eruption age of Kannabe volcano using multi-dating: implications for age determination of young basaltic lava flow. *Geochronometria* 46, 49–56. (査読あり)

(2) Nakamura Y., Ishibashi H., Yasuda A., Hokanishi N. and Yamamoto J. (2019)
Ultra-magnesian olivine-bearing ultramafic lava blocks within Cenozoic accretionary sediments at Shizuoka, Japan: Implications for young, hot plume activity beneath the western Pacific Plate. *Lithos* 324–325, 315–324. (査読あり)
DOI:10.1016/j.lithos.2018.11.009

(3) Yamamoto J., Yoshino T., Yamazaki D., Higo Y., Tange Y. and Torimoto J. (2018)
Thermal expansion of natural mantle spinel using in situ synchrotron X-ray powder diffraction. *Journal of Materials Science* 54, 139–148. (査読あり)
DOI:10.1007/s10853-018-2848-5

(4) Hagiwara Y., Takahata K., Torimoto J. and Yamamoto J. (2018)
CO₂ Raman thermometer improvement: comparing hot band and Stokes and anti-Stokes Raman scattering thermometers. *Journal of Raman Spectroscopy* 49, 1776–1781. (査読あり)
DOI:10.1002/jrs.5461

(5) Yamamoto J., Kawano T., Takahata N. and Sano Y. (2018)
Noble gas and carbon isotopic compositions of petit-spot lavas from southeast of Marcus Island. *Earth and Planetary Science Letters* 497, 139–148. (査読あり)
DOI:10.1016/j.epsl.2018.06.020

(6) Hagiwara Y., Sogo Y., Takahata K. and Yamamoto J. (2018)
Temperature dependence of CO₂ densimetry using micro-Raman Spectrometry at laboratory conditions. *Geochemical Journal* 52, 379–383. (査読あり)
DOI: 10.2343/geochemj.2.0523

(7) Sato Y., Hirano N., Machida S., Yamamoto J., Nakanishi M., Ishii T., Taki A., Yasukawa K., and Kato Y. (2018)
Direct ascent to the surface of asthenospheric magma in a region of convex lithospheric flexure. *International Geology Review* 60, 1231–1243. (査読あり)
DOI:10.1080/00206814.2017.1379912

(8) Ono K., Harada Y., Yoneda A., Yamamoto J. and Watanabe T. (2018)
Determination of elastic constants of single crystal chromian spinel by resonant ultrasound spectroscopy and implications for fluid inclusion geobarometry. *Physics and Chemistry of Minerals* 45, 237–247. (査読あり)
DOI:10.1007/s00269-017-0912-3

(9) Shibano Y., Takahata K., Kawano J., Watanabe T., Enomoto D., Kagi H., Kamiya N. and Yamamoto J. (2017)

Raman spectroscopic determination of Sr/Ca ratios of calcite samples. *Journal of Raman Spectroscopy* 48, 1755–1761. (査読あり)
DOI:10.1002/jrs.5235

(10) Yamamoto J., Ishibashi H. and Nishimura K. (2017)
Cooling rate responsiveness of pyroxene geothermometry. *Geochemical Journal* 51, 457–467. (査読あり)
DOI:10.2343/geochemj.2.0477

(11) Akziawa N., Tamura A., Yamamoto J., Mizukami T., Fukushi K., Python M. and Arai S. (2016)
High-temperature hydrothermal activity around suboceanic Moho beneath the first-spreading ridge: an example from diopside and anorthosite in Wadi Fizh, Oman ophiolite. *Lithos* 263, 66–87. (査読あり)

(12) Shitaoka Y., Moriwaki H., Akai F., Nakamura N., Miyoshi M. and Yamamoto J. (2016)
Eruption age of Sakurajima-Satsuma tephra using thermoluminescence dating. *Bulletin of Geo-Environmental Science* 18, 29–35. (査読あり)

[学会発表] (計 6 件)

(1) Yamamoto J.
Boundary depth of layered mantle. 質量分析学会同位体比部会, 2018 年 11 月 9 日, 大韓民国太田市 (Yousung Hotel)

(2) Yamamoto J., Kawano T., Takahata N. and Sano Y.
Noble Gas and Carbon Isotopic Compositions of Petit-Spot Lavas from Southeast of Marcus Island. Goldschmidt conference, 2018 年 8 月 14 日, Boston, USA

(3) 山本順司, 石橋秀巳, 萩原雄貴, 横倉伶奈, 新井田清信
世界最大のかんらん石. 日本地球化学会年会, 2017 年 9 月 13 日, 東京都目黒区 (東京工業大学)

(4) Yamamoto J.
Noble gas isotopic constraint on depth of layered mantle boundary. International Symposium
“Advances in High-pressure Research - III: Towards Geodynamic Implications-2016”, 2016 年 8 月 30 日, Novosibirsk University, Novosibirsk, Russia

(5) Yamamoto J.
Fluid inclusions: a probe for depth origin of mantle minerals. GeoHP Summer School, 2016 年 8 月 29 日, Novosibirsk University, Novosibirsk, Russia

(6) 山本順司, 石橋秀巳, 高畑幸平
流体包有物を用いたマンタルの Redox 推定. 日本地球化学会年会, 2016 年 9 月 16 日, 大阪府大阪市 (大阪市立大学)

[図書] (計 1 件)

惑星地球の時空間 (山本順司著), 2017 年, 中西出版, 84 ページ.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.museum.hokudai.ac.jp/jyama/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：石橋 秀巳

ローマ字氏名：Ishibashi Hidemi

所属研究機関名：静岡大学

部局名：理学部

職名：准教授

研究者番号（8桁）：70456854

(2) 研究分担者

研究分担者氏名：鍵 裕之

ローマ字氏名：Kagi Hiroyuki

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院理学系研究科（理学部）

職名：教授

研究者番号（8桁）：70233666

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。