

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月23日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340160

研究課題名（和文） 海洋地殻マントル物質の高温高压下における弾性波速度測定

研究課題名（英文） Laboratory measurement of elastic velocity of oceanic crustal rocks under high temperatures and pressures

研究代表者

有馬 眞 (ARIMA MAKOTO)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授

研究者番号：10184293

研究成果の概要（和文）：海洋地殻-マントルの地震波速度構造に岩石学的解釈を与えるため、オマーンオフィオライトの地質調査を実施した。採集された岩石について弾性波速度測定実験を行い、弾性波速度と圧縮率変化を求めた。Vp, Vs, Vp/Vs 比およびポアソン比は圧力 P (GPa) に対して次の式で表される。Vp (km/s) = 7.004 + 0.096×P, Vs (km/s) = 3.827 + 0.007×P, Vp/Vs = 1.830 + 0.021×P, ポアソン比 = 0.287 + 0.007×P。本研究で得られた弾性波速度を海洋地殻の地震波速度構造と比較した。

研究成果の概要（英文）：We carried out laboratory measurements of elastic velocity of rocks collected from exposed crust-mantle sections in the Oman ophiolite. The Vp, Vs, Vp/Vs, and Poisson's ratio of an olivine-gabbro are expressed by the following equations. Vp (km/s) = 7.004+0.096×P (GPa), Vs (km/s) = 3.827+0.007×P (GPa), Vp/Vs = 1.830+0.021×P (GPa), and Poisson's ratio = 0.287+0.007×P (GPa). The measured and calculated elastic velocities of Oman rocks are compared with the seismic velocity profiles of the oceanic crust.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2011年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2012年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学，岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：オフィオライト・弾性波速度・地殻・マントル

1. 研究開始当初の背景

海嶺において生成した海洋地殻マントルは海水との接触により変質作用を受け海溝で沈み込みを始める。プレート境界で起こる巨大海溝型地震はプレート間の固着度で特徴づけられる。この特徴を決めているのは、プレート境界に存在する含水鉱物と、その脱水に

よってはき出された水であり、これらが地震発生機構において重要な役割を果たすと考えられている。一方、沈み込むプレート内部で発生するスラブ内地震は、沈み込んだ海洋地殻マントルの脱水反応に伴う脆性化によって引き起こされていると考えられている。しかし、マントルまで到達する深度掘削はこれま

で行われていないため、地殻とマンテルの物質は何であるか、などは未だ詳細には解明されていない。このような背景から、地震学的に観測された地震波速度やポアソン比から、海洋地殻とマンテルに岩石学的な解釈を与える事は、地震発生機構を解明する上で重要であり、岩石・鉱物の詳細な弾性波速度データに基づいて海洋地殻マンテルの岩石学的構造モデルを構築する必要がある。

海洋リソスフェアの断片が露出したと考えられるオフィオライト岩体では、かつての海洋地殻マンテル岩石の産状を直接観察することができる。特に、オマーン国北部に広く分布するオマーンオフィオライト岩体では、海洋地殻マンテル（枕状溶岩・シート状岩脈・層状ハンレイ岩・モホ遷移層・マンテル岩）が大規模に連続して地表に露出している。

本研究では、オマーンオフィオライト岩体を構成する多様な岩石種を主な対象として高温高压条件下での弾性波速度測定を行い、海洋地殻を構成する上位の噴出岩から下位のマンテルカンラン岩までの全体的な弾性波速度変化を岩石学的構造モデルとして構築する事を目標としている。海洋地殻マンテルの岩石学的構造モデルを構築するため、2007年12月および2009年2月にオマーンにおいて予察的な地質調査を実施し（連携研究者・石川正弘）、オマーンオフィオライトを構成する岩石を採取した（約300試料、総重量400kg）。

これまでのオマーンオフィオライトについて行われた高温高压条件下での弾性波速度測定は、P波測定とS波測定をパルス透過法によって個別に行っており、実際の海洋地殻マンテルの構成岩石、間隙率、熱水変質度を推定する上で重要なポアソン比や V_p/V_s 比を精確に決定する試みは行われていない。そこで本研究では、オマーンオフィオライトを構成する各岩石種を主な対象として高温高压条件下での精確な弾性波速度測定を行う。

2. 研究の目的

沈み込み帯に位置する日本列島では地震や火山活動は必然であり、沈み込む海洋地殻マンテル内部における含水率や含水鉱物の分布を定量的に明らかにすることは、島弧における脱水脆性化による地震発生機構、プレート境界型地震、およびマグマ生成機構を解明する上で重要な基礎研究である。含水率や間隙率は地震波低速層やポアソン比異常として現れると予想されるため、本研究では、海洋地殻とマンテル内部の水存在域を地震波速度・ポアソン比・ V_p/V_s 比から区分することを目的の一つとする。そのためには、海洋地

殻マンテルに相当する高温高压条件下で、海洋地殻マンテル起源と考えられる岩石の弾性波速度およびポアソン比を精密に測定することが不可欠である。

本研究では、(1) 従来の装置を改良し、最大500℃・1.0GPaの高温高压下で大型岩石試料コア（長さ30mm、外径30mm）のP波・S波速度を同時に測定し、 V_p/V_s 比やポアソン比を精密に測定可能とする。(2) オフィオライトを構成する上位の噴出岩から下位のマンテルカンラン岩までの全体的な弾性波速度を岩石学的構造モデルとして構築する。(3) 間隙率や含水鉱物生成による変質がP波速度・S波速度・ポアソン比に及ぼす影響を定量的に明らかにする。たとえば、マンテルの蛇紋岩化の程度を岩石物性の視点から区分する指標を構築する。(4) 上記データを用い、地震学的研究で得られた海洋域の地震波速度・地震波速度パータベーション・ポアソン比・ V_p/V_s 比構造との対比を行い、海洋地殻マンテルの岩石学的構造モデルを構築する。

(5) 海洋地殻マンテルにおける水の分布形態や変質鉱物の分布を明らかにする。

本研究の特色と独創性は、水を含む岩石のP波速度・S波速度同時測定を行ない精密に V_p/V_s 比およびポアソン比を決定することである。 V_p および V_s を同時精密測定によって、海洋地殻マンテルの実体を明らかにすることが可能となる。オマーンオフィオライト構成岩石の弾性波速度の測定値から海洋地殻マンテルの構成岩石や含水率を定量的に見積もることが可能となる。つまり、地震波速度分布から島弧に沈み込む海洋リソスフェアの水の分布の見積りをめざす。沈み込み帯における地震発生機構を解明する上で本研究が提示する弾性波速度の基礎データのもつ意義は大きいと思われる。

地殻深部の間隙率・含水率や変質を地震波速度構造から見積もるためには、岩石のP波速度とS波速度の同時測定が必要不可欠である。パルス透過法による速度測定では、P波速度とS波速度の同時測定は技術的に困難である。これまで行われた、高压下における地殻構成岩石の V_p/V_s 比（またはポアソン比）の見積もりは、パルス透過法によって個別に測定されたP波速度とS波速度から見積もられた値であり、より精確な決定法が求められている。申請者は最大1GPaかつ1000℃の高温高压領域での水を含む岩石のP波・S波速度の同時測定装置をすでに開発しており、高压セルと高压シリンダーの改良によって本オマーンオフィオライトから採集した大型岩石試料で弾性波速度測定を行う。

本研究は、「海洋地殻マントル断面」が露出するオマーンオフィオライトというフィールドにおいて地質学的に観察される「地殻、モホ遷移帯、マントル」を、弾性波速度などの岩石物性データから評価することであり、これまで行われていない独創的なものである。本研究では弾性波速度データと地殻深部-最上部マントルの地震学的構造とを融合させ、その岩石学的構造モデルを構築する事を目標としており、マントル掘削計画（モホール計画）を進める上で重要な基礎研究と位置づけられる。

3. 研究の方法

(1) 既存弾性波速度測定装置の改良弾性波速度測定装置は、ピストンシリンダー型高温高压発生装置、超音波パルス発生器、弾性波発生部、走時測定部から構成される（図1）。

①高温高压発生装置：ピストンシリンダー型高温高压発生装置（横浜国立大学設備）を用いる。本研究では大きな岩石コア試料（長さ30mm、径30mm）を測定するために大口径（内径68mm）の高圧シリンダー（タンガロイ製）を導入した。

②超音波パルス発生器：100MHz・1CH 任意波形発生装置・テクトロニクス製AFG3101（1×400）を新規導入した。AFG3101は周波数可変で正弦波形およびシンク波形パルスが発生可能であり、精確な位相解析による走時決定には必要不可欠な装置である。弾性波発生部：1000℃を超える高温用条件で岩石の弾性波速度を測定できるようにリチウムニオベート振動子をシリンダー内に設置した。

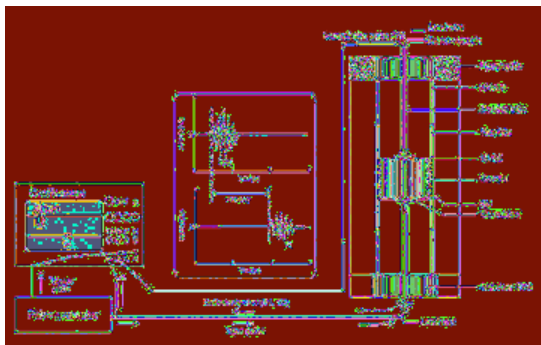


図1 弾性波速度測定の概略図

③走時測定部：1GHz 帯域デジタルオシロスコープアジレント製DS08104A 型 1GHz, 4 Ga/s, 4ch, 15M メモリを導入する。既存の機種と比較し、メモリ長が15メガポイントと十分に長く、大試料を伝搬するP波S波往復走時を記録することが可能である。

(2) 弾性波速度測定

①高温高温弾性波速度測定装置の制作・立ち上げに続き、弾性波速度測定をおこなう。・温度圧力条件：最高温度500℃、最大圧力10kbarまでの範囲を設定した。

②弾性波速度を、高温高压条件下で直接測定し、P波速度、S波速度、ポアソン比を同時に測定する。

(2) 岩石速度と微細組織との比較・弾性波速度と構成鉱物、間隙率、鉱物配列の相関を評価する。大試料岩石のP波およびS波速度を高温高压下で同時に測定する装置を開発し、地殻深部構成岩石の V_p/V_s 比やポアソン比を精密に測定した。また、岩石の間隙率や熱水変質がP波・S波速度やポアソン比などに及ぼす影響を検討する。まず、オマーンオフィオライト構成岩石の地震波速度測定データを用い、オマーンオフィオライトの岩石構造、地震波速度・ポアソン比との対比を行う。次に、海洋域の地震波速度構造との対比を行い、海洋地殻マントルの実体を探る。

(3) 地質調査および岩石試料の収集
測定岩石試料の収集のために地質調査を行なう。オマーンオフィオライトの地質調査地域とし、枕状溶岩、シート状岩脈、層状ハンレイ岩、モホ遷移層、マントル岩の連続サンプリングを実施した。また、日本国内においても下部地殻・マントル岩露出地域の地質調査を行った。

4. 研究成果

(1) 弾性波速度測定実験
海洋地殻-マントルの地震波速度構造に岩石学的解釈を与えるためには、高压実験により得られる岩石の弾性波速度データが重要な制約となる。Christensen & Swearing (1981, JGR) ではオマーンオフィオライト北部から得られた枕状溶岩、ドレイイト、斜長花崗岩、ハンレイ岩、カンラン岩について、海洋地殻-最上部マントルの圧力条件（0.06-0.43GPa）での弾性波速度データを示し、オマーンオフィオライトの地震波速度構造を検討した。しかしながら、比較的低压での地震波速度測定実験では試料中の空隙が閉じておらず、得られた速度は岩石本来の速度（空隙が閉じた状態での速度）とは大きく異なることが指摘されている（例えばChristensen 1974, JGR）。そこで本研究では、オマーンオフィオライト産の地殻岩について、比較的広い圧力条件下（0.2-1.0GPa）での弾性波速度測定実験を行い、弾性波速度を求めた。さらに得られたデータから圧縮率変化を求め、実験試料中の空隙率変化を見積もり、試料中の空隙が V_p/V_s ・ポアソン比に与える影響を定量的に検討した。

実験試料にはオマーンオフィオライト北西部Wadi Bani Umarから採集されたカンラン石ハンレイ岩を用いた。本試料は異方性が見られない均質な岩石（粒径2mm以下）で、斜長石（#An=0.77-0.81、63vol.%）、単斜輝石（#Mg=0.76-0.78、18vol.%）、斜方輝石（#Mg=0.72-0.74、12vol.%）、カンラン石（#Mg=0.70-0.71、4vol.%）、蛇紋石（2vol.%）、磁鉄鉱（1vol.%）から構成されている。

高圧実験には円柱状のコア試料（直径14mm、長さ12mm）を使用した。高圧実験では、クラックをほとんど含まない試料（uncracked sample）と0.5GPaで500℃まで予備加熱を行い、クラックを発達させた試料（cracked sample）、の2試料について弾性波速度測定を行った（図2）。

これらの試料は実験前に120℃の真空乾燥器で24時間乾燥させた。cracked sampleの $V_p \cdot V_s \cdot V_p/V_s$ 比・ポアソン比はuncracked sampleに比べて低圧（<0.6GPa）では系統的に低いのに対し、高圧（>0.6GPa）ではuncracked sampleとほぼ調和的な値を持つ。このことから、低圧条件では閉じなかった試料中のクラックが、 $V_p \cdot V_s \cdot V_p/V_s$ 比・ポアソン比を低下させたと考えられる。一方、uncracked sampleの $V_p \cdot V_s \cdot V_p/V_s$ 比・ポアソン比は、圧力の上昇につれて0.40GPaまで比較的急激に上昇し、0.45GPaより高圧では緩やかに上昇する。

uncracked sampleの圧縮率について圧力変化を検討したところ、圧縮率は0.40GPaまでは圧力の増加とともに急激に減少し、0.45GPaより高圧では緩やかに減少する傾向がみられた。また、0.45GPaより高圧での圧縮率は、試料のモード組成と鉱物化学組成から求めた理論値（Hacker & Abers, 2004 G-cubed）と調和的であった。このことから、uncracked sampleでは0.40GPaまで圧力の上昇に伴い試料中の空隙が小さくなり、0.45GPaより高圧では空隙がほぼ完全に閉じたと考えられる。この結果をもとに、uncracked sampleについて0.45GPaより高圧で求めたデータを直線回帰することにより、 $V_p \cdot V_s \cdot V_p/V_s$ 比・ポアソン比を求めた。これらは圧力P（GPa）に対して次の式で表される。 V_p （km/s）= 7.004 + 0.096 × P, V_s （km/s）= 3.827 + 0.007 × P, V_p/V_s = 1.830 + 0.021 × P, ポアソン比 = 0.287 + 0.007 × P.

$V_p \cdot V_s \cdot V_p/V_s$ 比・ポアソン比と、空隙を含む状態でのデータ（低圧実験でのデータ）を比較し、それぞれの減少率を求めた。さらに圧縮率データの圧力変化から試料の実験中の空隙率を見積もり、空隙率と弾性データ減少率の相関を検討した。その結果、 $V_p \cdot V_s \cdot V_p/V_s$ 比・ポアソン比の減少率が空隙率の増加に対して大きくなる傾向がみられた。例えばcracked sampleの実験結果からは、空隙率

が0.01%の場合、 $V_p \cdot V_s \cdot V_p/V_s$ 比・ポアソン比の減少率はそれぞれ約2%、約1%、約1%、約2%であったのに対し、空隙率が0.02%の場合にはそれぞれ約4%、約2%、約2%、約5%という結果となった。

本研究で示したように、比較的低压条件（<約0.6GPa）での実験では試料中に空隙が完全に閉じずに弾性波速度や V_p/V_s 比・ポアソン比に大きな影響を与えてしまう場合がある。海洋地殻岩の弾性波速度データを求め、空隙が与える影響について検討するためには、広い圧力条件（0.2-1.0GPa）で弾性波速度測定実験を行う必要がある。

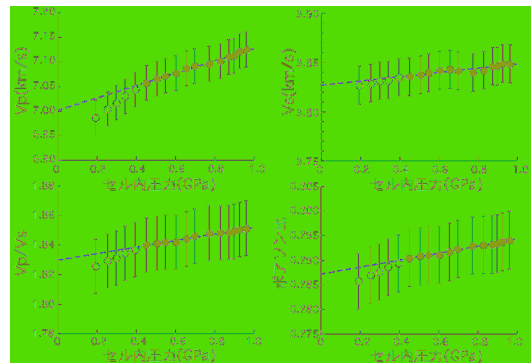


図2 オマーンオフィオライト構成岩石のP波速度と密度

(2) オマーンオフィオライトの地震波速度

地震やマグマ発生などの沈み込み帯の活動は、海洋リソスフェアの沈み込みがその引き金となっている。従って、海洋リソスフェアの岩石学的な実体を明らかにすることは、これらの沈み込み帯の活動を理解する上で重要である。そこで本研究では、海洋地殻～上部マントルが露出したものと考えられているオマーンオフィオライトの構成岩石についてその地震波速度を求め、特に海洋地殻の岩石構造について検討を行った。

岩石試料の地震波速度は、試料の構成鉱物体積比と鉱物化学組成からHacker & Abers(2004, G-cubed)のExcel macroを用いて算出した。試料の構成鉱物体積比は、まず試料の全岩化学組成と構成鉱物の化学組成からマスバランス計算により重量比を求め、構成鉱物の密度から体積比に換算した（図3、4）。また蛇紋石化の影響を除くため、蛇紋石を除外してマスバランス計算と地震波速度計算を行った。地震波速度は地温勾配20℃/kmと地圧勾配25MPa/kmを仮定して、0～200MPa・0～160℃の温度圧力範囲で算出した。

本研究で求めた試料のP波速度をWhite et al. (1992, JGR)による海洋地殻のP波速度構造と比較すると、枕状溶岩とドレライトのP波速度は第2層から第3層の速度に、斑れい岩類のP波速度は第3層の速度にそれぞれ相当する。一方、海洋地殻の第2層と第3層

はそれぞれ深度方向に対する高い速度勾配（第2層：約 $1 \text{ kms}^{-1}\text{km}^{-1}$ ）と低い速度勾配（第3層： $0\sim 0.1 \text{ kms}^{-1}\text{km}^{-1}$ ）で特徴づけられるが（Carlson & Miller 2004, JGR）、各試料について求めたP波速度は小さな負の圧力依存性をもつ（ $-0.005\sim -0.001 \text{ kms}^{-1}\text{km}^{-1}$ ）。

高速拡大域の海洋地殻第2層は溶岩層とシート状岩脈群を主体とすることが知られているが、オマーンオフィオライトの枕状溶岩とドレイクのP波速度計算値は海洋地殻第2層に比べてやや大きく、速度勾配は非常に小さい。本研究で求めたP波速度は試料に空隙が含まれない状態での速度に相当すると考えられるため、海洋地殻第2層の速度構造は地殻内の空隙の分布を反映している可能性がある。一方、斑れい岩類は、かんらん石などの有色鉱物の割合の増加に従い速度が上昇する傾向がみられたことから、第3層内のゆるやかなP波速度の上昇は、有色鉱物量比の増加によるものと考えられる。

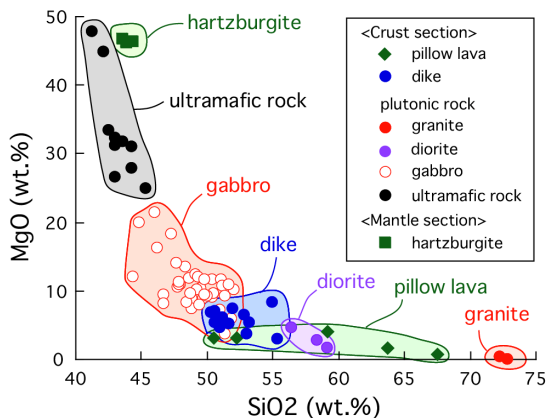


図3 試料の全岩化学組成

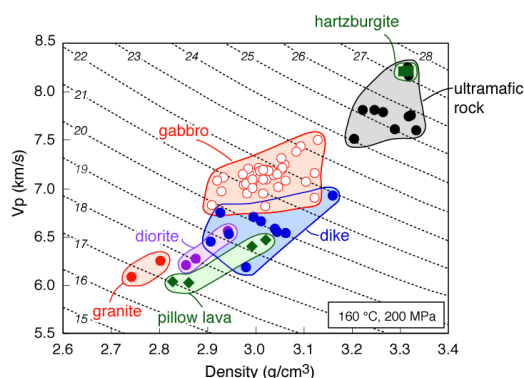


図4 オマーンオフィオライト構成岩石のP波速度と密度

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計13件）

① Mazumder, R, Van Loon, A. J., Mallik, L.,

Reddy, S. M., Arima, M., Altermann, W, Eriksson, P. G, and De, S. Mesoarchaeoan-Palaeoproterozoic Stratigraphic Record of the Singhbhum Crustal Province, Eastern India: a synthesis, In Palaeoproterozoic of India, Eds. R. Mazumder and D. Saha, Geological Society London, Special Publications, 365, 29-47.

<http://dx.doi.org/10.1144/SP365.3>, The Geological Society of London, 2012. 査読有.

② Saito, S., Arima, M., Nakajima, T., Tani, K., Miyazaki, T., Senda, R., Chang, Q., Takahashi, T., Hirahara, Y., Kimura, J., Petrogenesis of the Kaikomagateke granitoid pluton in the Izu Collision Zone, central Japan: implications for transformation. Contributions to Mineralogy and Petrology. 163:611-629. DOI 10.1007/s00410-011-0689-1, 2012. 査読有.

③ Prakash, D., Chandra Singh, P., Arima, M., Singh, T., P-T history and geochemical characteristics of mafic granulites and charnockites from west of Periyar, North Kerala, southern India. Journal of Asian Earth Sciences, 61, 102-115, 2012. Doi:10.1016/j.jseaes.2012.08.02310. 査読有.

④ Bose, S., Dunkley, D. J., Dasgupta, S., Das, K., and Arima, M., India-Antarctica-Australia-Laurentia connection in the Paleo-Mesoproterozoic revisited: Evidence from new zircon U-Pb SHRIMP and monazite chemical age data from the Eastern Ghats Belt, India. Geological Society of America Bulletin. 123, 2031-2049, doi: 10.1130/B30336.1, 2011. 査読有.

⑤ Mallik, L., Mazumder, R., Mazumder, B. S., Arima, M., P. Chatterjee, Tidal Rhythmites in Offshore Shale: a case study from the Palaeoproterozoic Chaibasa shale, eastern India and implications, Journal of Marine and Petroleum Geology, 30, 43-49, 2012. doi:10.1016/j.marpetgeo.2011.10.005. 査読有.

⑥ Matsumoto, Y., Ishikawa, M., Terabayashi, M. & Arima, M., Simultaneous measurements of compressional wave and shear wave velocities, Poisson's ratio, V_p/V_s under deep crustal pressure and temperature conditions: Example of silicified pelitic schist from Ryoke belt,

SW Japan. The Island Arc, vol. 19. p. 30-39, 2010. 査読有.

⑦ Rakotonandrasana, N.O.T., Arima, M., Miyawaki, R., and R. A. Rabeloson. Widespread occurrences of hōgbomite (2N2S) in UHT metapelites from the Betroka belt, southern Madagascar: Implications on melt/fluid activity during regional metamorphism. 51, 869-895, Journal of Petrology doi:10.1093/petrology/egq004), March 2010. 査読有.

⑧ Tamura, Y., Ishizuka, O., Richard, F., Aoi, K., Kawate, S., Chang, Q., Saito, S., Tatsumi, Y., Arima, M., Takahashi, M., Kanamaru, T., and Kodaira, S., Missing Oligocene crust of the Izu-Bonin arc: Consumed or rejuvenated during collision?, Journal of Petrology, 51, 823-846, doi:10.1093/petrology/egq002, 2010. 査読有.

⑨ 森慎一, 藤岡換太郎, 有馬眞, 相模トラフ北部の海底地形と断層系の形成-5 系統の断層発達史-, 地学雑誌. 119, 585-614, 2010. 査読有.

⑩ Fujimoto, Y., Kono, Y., Hirajima, T., Kanagawa, K., Ishikawa, M., and Arima, M., P-wave velocity and anisotropy of lawsonite and epidote blueschists: Constraints on water transportation along subducting oceanic crust. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 183, 219-228, 2010. 査読有.

[学会発表] (計 20 件)

① S. Saito, M. Ishikawa, S. Shibata, R. Akizuki, M. Arima, Y. Tatsumi and S. Arai, Seismic wave velocity of rocks in the Oman ophiolite: constraints for petrological structure of oceanic crust. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 12 月, 2010.

② M. Ishikawa, S. Saito, M. Arima, and Y. Tatsumi, Influence of pore-spaces on the elastic properties of crustal rocks. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 12 月, 2010.

③ 齊藤哲, 石川正弘, 柴田聡, 秋月龍之介, 有馬眞, 巽好幸, 荒井章司, オマーンオフィオライト構成岩石の地震波速度. 日本地質学会, 富山, 9 月, 2010.

④ 齊藤哲, 石川正弘, 柴田聡, 秋月龍之介, 有馬眞, 巽好幸, 荒井章司, オマーンオフィオライト構成岩石の地震波速度に基づく 海洋

地殻の岩石構造. 日本鉱物科学会, 松江, 9 月, 2010.

⑤ 齊藤哲, 石川正弘, 有馬眞, 巽好幸. 空隙を含むハンレイ岩の 1.0GPa までの弾性波速度測定: 乾燥空隙が岩石の Vp/Vs 比に与える影響について. Elastic velocity measurements of a pore-space-bearing gabbro up to 1.0 GPa: Roles of dry pore-spaces on Vp/Vs of rocks. 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張, 5 月, 2010.

⑥ 齊藤哲, 石川正弘, 有馬眞, 巽好幸. オマーンオフィオライト産地殻岩の「空隙フリー」弾性波速度測定: 海洋域地震波速度構造の岩石学的解釈にむけて. Measurement of 'pore-space-free' elastic velocities of crustal rocks of the Oman Ophiolite. 日本地球惑星科学連合 2010 年大会. 幕張, 5 月, 2010.

[図書] (計 2 件)

① 有馬眞, 神奈川流域圏の多角的アプローチ. 2. 地球科学の視点から: 地質の成り立ちと地球化学的リスク. 竹内和彦・佐土原聡編. 持続可能性とリスクマネジメント: 地球環境・防災を融合したアプローチ. UNU レクチャー・シリーズ 6. 91-104 頁. 国際書院, 東京, 2012.

② 有馬眞・石川正弘, 神奈川拡大流域圏の地質・水循環と水源地の地球科学的リスク, 佐土原聡編『時空間情報プラットフォーム—流域圏環境への適用』第 6 章, 58-73 頁, 東大出版会, 7 月, 2010.

[その他]

ホームページ等

http://www.eis.ynu.ac.jp/natural_frame.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有馬眞 (ARIMA MAKOTO)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授
研究者番号: 10184293

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

石川正弘 (ISHIKAWA MASAHIRO)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授
研究者番号: 70232270