

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：32661

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400492

研究課題名(和文)沈み込む海洋地殻中の地震波速度異常のメカニズムの解明：室内実験によるアプローチ

研究課題名(英文)Mechanism of high Vp/Vs anomalies in subducting oceanic crusts

研究代表者

上原 真一 (UEHARA, Shin-ichi)

東邦大学・理学部・准教授

研究者番号：20378813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：海洋地殻の主要な構成岩石の一つであるドレライトを対象に、人工的に内部に亀裂を発生させた岩石試料を用いた室内弾性波速度測定実験を行うことで、岩石のVp/Vs比における応力条件(上載岩圧、間隙圧など)、内部の空隙構造(間隙率、亀裂密度など)の依存性を明らかにし、間隙率がある値以上でないと、プレート沈み込み帯で観測されている高Vp/Vs比異常は説明できないことを示した。本研究の成果は、地震学的な観測結果から沈み込み帯深部での間隙水圧と空隙構造の状態を読み解く上で貢献することが期待される。

研究成果の概要(英文)：We conducted laboratory measurements of P and S wave velocity Vp and Vs under confining pressure, Pc, and Pp (up to 50 MPa) for water-saturated dolerite specimens with various fracture distributions by heating (300, 500 and 700 deg C), in order to investigate the effect of fracture distribution on the relationship between Pp conditions and Vp/Vs. We also observed microstructures of the specimens and obtained fracture densities in order to characterize the fracture distributions in detail. We have demonstrated how Vp/Vs depends on Pp and porosity, and that there is a threshold value of initial porosity, or "critical porosity", around 3% or less, under which Vp/Vs is not close to observed high Vp/Vs anomalies, even if an effective pressure is small (Pp is high and close to Pc). We expect the findings and suggestions of this study to improve interpretations of Pp and void structure conditions in oceanic crusts at subduction zones in deep based on seismic observations.

研究分野：構造地質学，実験岩石力学，岩石物性（力学・水理），断層力学

キーワード：スロースリップ 地震波速度異常 プレート沈み込み帯 地震波速度測定実験 室内岩石実験 Vp/Vs比
亀裂

1. 研究開始当初の背景

沈み込み帯における地下での地震波 (P 波速度 V_p , S 波速度 V_s) 分布の観測結果より, 沈み込む海洋プレートの地殻における高 V_p/V_s 比領域の分布の存在が知られている. この高 V_p/V_s 比の解釈として, 上載岩圧 (地下で岩石が受ける圧力)・間隙圧を制御した室内実験による V_p , V_s 測定実験の結果に基づき, その領域での間隙圧が高い可能性が指摘されている. 沈み込みプレート境界付近における高間隙圧領域の分布は, プレート境界断層のせん断強度やすべり挙動に直接的に関係する. 実際に, 高 V_p/V_s 比の観測される領域と, スロースリップや低周波微動などの発生領域との関連性も示唆されている. これらの非地震性現象は海溝型巨大地震の発生との密接な関係が指摘されており, その発生メカニズムの解明は地球科学の重要な課題のひとつである.

この高 V_p/V_s 比と高間隙圧の関係性の根拠となる実験は, 無垢な岩石を用いて実施された. しかしながら, 沈み込み帯における海洋地殻の岩石中には, 断層変形による亀裂等のダメージ構造が発達していることが予想される. 亀裂分布の様子も V_p/V_s 比に関係することは, 岩石を加熱し内部に亀裂を生成させたもの (熱クラック) についての室内実験等により報告されている.

一方で, この熱クラックを生成した実験は, 主に花崗岩について実施されており, 海洋地殻を想定して, その主要構成成分であるはんれい岩・玄武岩を対象とした例はほとんど報告されていない. また, 断層変形で生成された亀裂の分布は熱クラックのものとは性質が異なることが考えられるが, 天然の断層岩中の亀裂分布を考慮した研究はこれまで行われてこなかった.

2. 研究の目的

本研究は, 海洋地殻の構成岩石を対象に, 人工的に内部に亀裂を発生させた岩石試料を用いた室内弾性波速度測定実験を行い, 岩石の V_p/V_s 比における応力条件 (上載岩圧, 間隙圧, 差応力など), 亀裂分布 (密度および異方性) の依存性を明らかにし, この結果に基づいて沈み込み帯で観測されている高 V_p/V_s 比が何を反映しているのか, 特にどのような応力条件にあるのかを解明することを目的とした.

3. 研究の方法

(1) 加熱によって微小亀裂を生成したドレライトの $V_p \cdot V_s$ 測定

加熱することによって内部に微小亀裂を生成した中国産ドレライト (粗粒玄武岩, 海洋地殻を構成する主要な岩石のひとつ) について, 封圧・間隙圧をかけた状態で $V_p \cdot V_s$ の測定を行った. ドレライト試料は直径, 長さともに約 40mm に整形したものをを用いた. 試料は 300, 500, 700 で 24 時間加熱した

(以下, ここではそれぞれ 300 試料, 500 試料, 700 試料とよぶ). 非加熱, 300 試料, 500 試料, 700 試料の大気圧下での間隙率は, それぞれ 0.5, 2.1, 3.4, 3.5%であった.

$V_p \cdot V_s$ の測定は, 東邦大学の容器内岩石透水性変形試験機を用いて行った. 岩石試料を水で飽和させ試験機にセットし, 封圧 (圧媒体は油), 間隙圧をかけた状態で弾性波速度を測定した. 弾性波の発信・受信は, 岩石の側面の反対側に 1 対の圧電素子を接着しておこなった. 片側の圧電素子に矩形波の電圧信号 (In) を与えて振動させ, 発生した弾性波が岩石内に伝達して, 反対側の圧電素子を振るわせ, それによって電圧信号が生じる (Out). この, In と Out の電圧信号の時間差から, 岩石を透過した弾性波速度を推定した. 圧電素子としては, 接着面に対して垂直方向・平行方向に振動する素子 (それぞれ P 波・S 波用) の両方を用いた. 発信側の圧電素子に与えた電気信号の振幅最大値は 400V だった.

封圧を 50 MPa で一定とし, 間隙水圧を 49 MPa から 0.1 MPa まで減少させ, その後 49 MPa まで戻す, という応力履歴の間のいくつかの段階の応力条件下で測定を行った.

(2) $V_p \cdot V_s$ 測定試料内の亀裂観察および亀裂密度の測定

微小亀裂の分布の様子と $V_p \cdot V_s$ および V_p/V_s 比の関係を評価するために, 実験に用いた試料について, その内部の微小亀裂の観察および亀裂密度の測定を行った. 実験後の試料より薄片を作成し, それについて, 光学顕微鏡 (反射像) で, 内部の亀裂・空隙構造の観察および亀裂密度の測定を行った. 亀裂密度の測定は, 薄片上の, 互いに直交する 2 方向について, それぞれの方向に並行な測線を 2.5 mm 間隔で 5 本ずつ設定し, それぞれの測線を交差する亀裂の本数を数え, それを測線の長さで割ることで求めた. すなわち, ここで求めた密度は, 測線単位長さあたりの値となる.

(3) 一軸荷重と加熱した場合の, 亀裂密度と $V_p \cdot V_s$ の関係の相違点の検討

(1) では, 天然の岩石中の亀裂を, 岩石試料を加熱することで発生する亀裂で模擬している. しかしながら天然の亀裂は加熱することで生成されるわけではない. そこで, 加熱した岩石試料と, 軸方向に荷重をかけることで内部に亀裂を発生させた試料について, $V_p \cdot V_s$ および V_p/V_s 比の測定実験結果を比較し, 亀裂の生成方法が弾性波速度特性に与える影響について調べた.

ここでは, 岩石試料として, 直径約 20 mm, 長さ約 40 mm (一軸変形用) および約 20 mm (加熱用) の円柱状の庵治花崗岩を試料として用いた. 一軸荷重には市販の軸荷重ピストンを用い, 荷重変換器および試料側面に貼った歪ゲージにより荷重・歪を測定しながら荷重を行うことで, 破壊直前までのさまざまな状態の試料を用意した. 加熱試料は, 200

から 500 まで 100 刻みで加熱したものを用意した。それぞれについて $V_p \cdot V_s$ を測定した。また、実験後の試料を軸に平行に半割、研磨した断面の亀裂密度を反射顕微鏡により測定した。その際、亀裂を見やすくするために、染色浸透探傷剤を用いた。反射顕微鏡の像に十字の線を引き、その線を交差する亀裂の数を数え、それを測線の長さで割ったものを亀裂密度とした。この作業を、ひとつの試料内の数箇所で行い、亀裂密度を推定した。

(4) 四万十帯中の変成玄武岩の鉱物脈密度測定

本研究で用いた試料が、どの程度天然の岩石の亀裂状態を再現できているかを評価することを目的に、天然の岩石中の鉱物脈密度の測定を行った。測定を行った岩石は、高知県芸西村の海岸に露出する四万十帯付加体中の変成玄武岩である。この玄武岩は、沈み込みプレート境界の地震発生領域において底付け付加された、すなわちかつては地震発生領域に分布していたと考えられる。そのためこの岩石の鉱物脈は、その領域での状態を反映している可能性がある。

この地点で採取された変成玄武岩試料について、肉眼観察および顕微鏡による薄片観察により、脈の方位ならびに脈の密度を測定した。脈の密度は、(1)のドレライト実験試料の場合と同様に、薄片に設定した一定間隔の測線を交差する脈の本数を、測線の長さ(ただし、交差する脈の厚さは除く)で割ることで測定した。

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 応力条件下での $V_p \cdot V_s$ 測定実験の結果、どの岩石試料においても、間隙水圧が高いほど弾性波速度は小さくなり、 V_p/V_s 比は大きくなる傾向がみられた。また、加熱温度が高くなるほど弾性波速度は小さくなり、 V_p/V_s 比は大きくなった。加熱温度の違いは、間隙水圧の変化に伴う $V_p \cdot V_s$ および V_p/V_s の変化にも見られ、非加熱、300 試料に対し、500 試料、700 試料はその変化が大きかった。

実際の沈み込み帯で観測されている V_p/V_s 比の目安として 2 という値を考えると、700 試料、500 試料の場合、封圧と間隙圧の差(差応力)がそれぞれ 13 から 33、4 から 25MPa 程度よりも小さい時にこの値を超えることがわかった。一方、未加熱、300 試料については、差応力が 0.1MPa まで小さくなくても、 V_p/V_s 比が 2 を超えなかった。こういった、弾性波速度の応力依存性の、岩石試料による違いは、試料の空隙構造の違いを反映していると推測される。

ここで、試料の大気圧下での間隙率(初期間隙率)と、 V_p/V_s 比が 2 を超えるときの差応力条件の関係をみると、 V_p/V_s 比が 2 を超えるには、間隙率がある値(臨界間隙率)以上であ

る必要があることが指摘される。一方で、700 試料と 500 試料は初期間隙率に差がないにもかかわらず、 V_p/V_s 比が 2 を超えるときの差応力条件に差が見られたことから、この条件には単純に初期間隙率だけでなく、空隙構造の特徴が関係していることが推察される。

(2) 弾性波速度測定実験に用いた試料について内部亀裂の密度を測定したところ、未加熱、300 試料、500 試料、700 試料でそれぞれ 1.56、1.94、2.89、2.84 本/mm という結果となり、全体的に加熱温度が高いほど密度が高くなる傾向がみられた。ただし、構成する鉱物ごとに亀裂密度の温度依存性は異なった。斜長石や基質部分の亀裂密度は加熱温度と正の相関が見られたのに対し、カンラン石や輝石に関しては温度とはあまり相関性は見られなかった。したがって、全体の亀裂密度には各鉱物の含まれる割合にも依存する可能性が指摘される。

700 試料と 500 試料は亀裂密度には明確な違いは見られなかったが、亀裂分布の様子に違いがみられた。700 試料では、500 試料に比べ、複数の鉱物を貫く亀裂がより目立った。また、700 試料では、基質部分に網目状の細かい空撃構造が見られた。こういった空隙構造の特徴の違いが、これらの試料の測定結果の差に影響している可能性が考えられる。

(3) 空隙が微小亀裂からなる弾性体に関する既存の理論モデル(O'Connell & Budiansky, 1974)と今回の測定結果を比較した。300 試料、500 試料については、実験結果は理論モデルでよく説明できた。一方、700 試料については、理論モデルとやや外れる結果が得られた。この理由としては、結果(2)でみられた網目状のような亀裂モデルでは表現できない空隙構造を持つ、または外部と連結していない空隙が発達し空隙の間隙水の飽和率が 1 以下である、などの可能性が考えられる。

(4) 四万十帯中の変成玄武岩の内部の脈の密度を測定したところ、測定面および測線の方角にも依存するが、0.6 から 2.6 本/mm の範囲の値を示した。これは、室内実験試料の亀裂密度の範囲と重なっている。このことは、室内実験の試料が天然の岩石の内部構造を再現できており、今回の結果で得られた V_p 、 V_s 、 V_p/V_s 比の応力状態依存性は、天然の岩石にも適応できる可能性を示唆する。

(5) 一軸荷重の載荷および加熱によって内部亀裂を生成した試料について亀裂密度と V_p 、 V_s の関係を比較したところ、同じ亀裂密度でも、加熱試料の方が弾性波速度が大きい傾向があることが分かった。これは、今回測定した亀裂密度に関しては、弾性波速度との関係は一意ではなく、亀裂生成方法に依存すること示す。一方で、間隙率と弾性波速度の関係をみたところ、荷重載荷および加熱試料の結果はひとつの曲線でうまく説明できるとが

分かった。この結果から結果(1)について考察すると、弾性波速度自体は測定した状態における間隙率に大きく影響するが、その応力依存性は亀裂の分布に依存する可能性が考えられる。

<引用文献>

O'Connell, R., Budiansky, B. 1974. Seismic velocities in dry and saturated rocks. J. Geophys. Res. 79, 5412-5426.

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0件)

[学会発表](計5件)

西村佳也, 上原真一, 溝口一生. 岩石の弾性波速度に対する間隙圧および亀裂分布の影響: スロースリップ発生領域で見られる高 V_p/V_s 比の解釈. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市). Kaya Nishimura, Shin-ichi Uehara, Kazuo Mizoguchi. Dependences of pore pressure on elastic wave velocities and V_p/V_s ratio for thermally cracked gabbro, AGU Fall meeting, December, 2015, San Francisco (USA).

西村佳也, 上原真一, 溝口一生. 亀裂を含んだ斑レイ岩の弾性波速度および V_p/V_s 比の間隙圧依存性. 日本地震学会 2015 年度秋季大会年大会, 2015 年 10 月, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市).

西村佳也, 上原真一, 溝口一生. 熱クラッキングを含んだ斑レイ岩の弾性波速度および V_p/V_s 比の間隙圧依存性. 日本地球惑星科学 2015 年大会, 2015 年 5 月, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市).

西村佳也, 上原真一, 溝口一生. 玄武岩、斑レイ岩および花崗岩の弾性波速度およびポアソン比の封圧・間隙圧依存性. 日本地震学会 2014 年度秋季大会年大会, 2014 年 11 月, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟県新潟市).

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

上原 真一 (UEHARA, Shin-ichi)

東邦大学・理学部・准教授

研究者番号: 20378813

(2)研究分担者

無し

(3)連携研究者

無し

(4)研究協力者

溝口 一生 (MIZOGUCHI, Kazuo)

西村 佳也 (NISHIMURA, Kaya)

河島 憲司 (KAWASHIMA, Kenji)

下森 葉月 (SHITAMORI, Hazuki)

有賀 英恵 (ARIGA, Hanae)