

深海底から採取した蛇紋岩の弾性波速度測定：予察

新海優里¹・渡辺 了²・道林克禎¹・針金由美子³・小原泰彦^{4,5}

Preliminary results of elastic wave velocity measurements on a serpentinite obtained from the deep-sea floor

Yuri SHINKAI¹, Tohru WATANABE², Katsuyoshi MICHIBAYASHI¹, Yumiko HARIGANE³ and Yasuhiko OHARA^{4,5}

Abstract Elastic wave velocities were measured on a deep seafloor serpentinite sample at room temperature and confining pressures of up to 180 MPa, using a high-pressure apparatus at University of Toyama. The sample was collected from a dredge site D17 at the Godzilla Megamullion, Parece Vela Rift, Phillipine Sea during the cruise KR07-02 (R/V Kairei). The serpentinite sample has the density of 2.37 g/cm³ and consists mainly of lizardite, chrysotile and magnetite, showing a banded structure with a moderately developed lineation and foliation. Mutually orthogonal axes were set for velocity measurements; the *x*-axis is parallel to the lineation, and the *z*-axis normal to the foliation. Lizardite mainly has a mesh texture, whereas fibrous chrysotile fills veins, most of which are subperpendicular to the lineation. The compressional wave velocity at 180 MPa is the fastest (4.56 km/s) in the *y*-axis direction, the slowest (3.97 km) in the direction parallel to the lineation (*x*-axis direction), and intermediate (4.25 km/s) normal to the foliation (*z*-axis direction). The azimuthal anisotropy is 13.85 % at 180 MPa. The shear wave velocity at 180 MPa is 2.07~2.35 km/s. The shear waves oscillating parallel to the *yz*-plane have the fastest velocity, and that normal to the *yz*-plane the slowest. The polarization anisotropy is thus strong along the *y*- (9.35%) and *z*- (12.24%) axes, whereas weak along the *x*-axis (1.39%). Based on microstructural examinations, observed velocity anisotropy may be mainly controlled by the orientation of chrysotile veins rather than the banded structure.

Key words: serpentinite, elastic wave velocity, seismic anisotropy, Godzilla Megamullion

はじめに

小論では、ゴジラメガムリオンから採取した蛇紋岩化したカンラン岩について、予察的に行った弾性波速度測

定の結果を報告する。ゴジラメガムリオンは、フィリピン海パレスベラ海盆の拡大軸に存在するメガムリオン地形の1つである (Ohara *et al.*, 2001; 2003)。海嶺や海膨などの海洋プレート拡大軸では、主に玄武岩が表層を構

¹ 静岡大学理学部地球科学教室, 〒422-8529 静岡市駿河区大谷 836

¹ Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan

² 富山大学理学部地球科学教室, 〒930-8555 富山市五福 3190

² Department of Earth Sciences, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555 Japan

³ 金沢大学フロンティアサイエンス機構, 〒920-1192 金沢市角間町

³ Frontier Science Organization, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa 920-1192 Japan

⁴ 海上保安庁海洋情報部, 〒104-0045 東京都中央区築地 5-3-1

⁴ Hydrographic and Oceanographic Department of Japan, 5-3-1 Tsukiji, Chuo-ku, Tokyo 104-0045, Japan

⁵ 海洋開発研究機構地球内部ダイナミクス領域, 〒237-0061 横須賀市夏島町 2-15

⁵ Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061 Japan

E-mail: sekmich@ipc.shizuoka.ac.jp (K. M.)

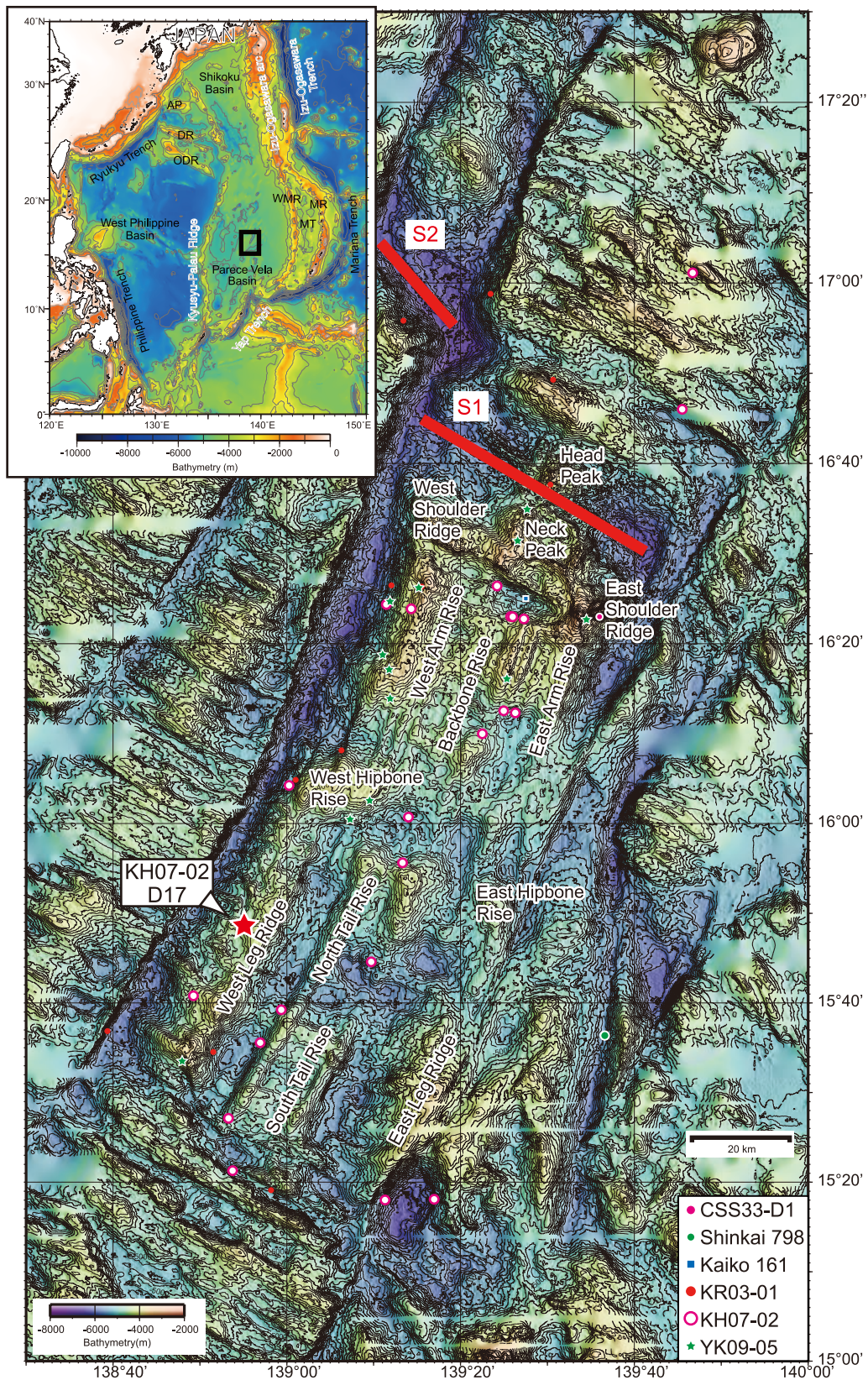


Fig. 1 Bathymetric map of Godzilla Megamullion, Parece Vela Rift, Philippine Sea. The serpentinite used in this study was obtained from the site KH07-02 D17 (Ohara 2007; 針金, 私信).

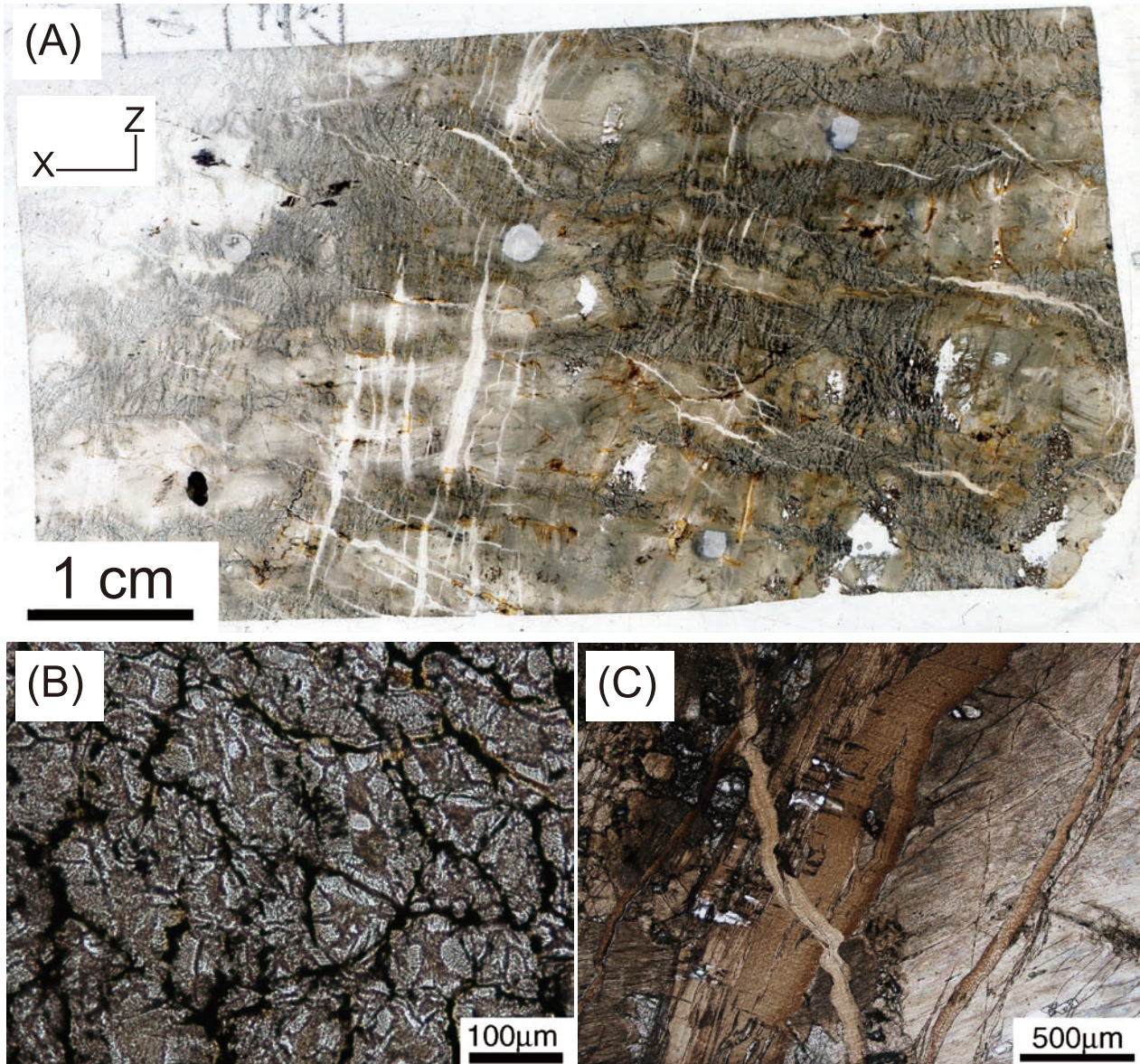


Fig. 2 Photomicrographs of serpentinite. (A) The whole thin section. Open polar. x -axis is horizontal and z -axis is vertical. (B) A close-up view of mesh texture consisting of lizardite and magnetite. (C) A close-up view of veinlets consisting of chrysotile.

成しているのに対して、メガマリオン地形では海洋地殻深部物質であるハンレイ岩と蛇紋岩化したカンラン岩が表層から採取されており、その構造が典型的な海洋プレート構造とは異なると考えられている (Ohara *et al.*, 2001, 2003; Harigane *et al.*, 2008; Harigane 2009MS). 小論で報告する蛇紋岩の弾性波速度測定は、海洋底の地震波探査から得られる地震波速度構造断面の解釈に有効な情報を与えることが期待される。

蛇紋岩試料

測定した蛇紋岩は、ゴジラメガマリオンの West Leg Ridge に位置するドレッジサイト KH07-02-D17 地点 (Fig. 1) から採取された岩石試料のうち最大のもの (試料番

号: KH07-02-D17-1) である (Ohara, 2007). 本試料はほぼ完全に蛇紋岩化しており、肉眼では面構造と線構造が確認される。この試料は、banded type として記載された (針金ほか, 2010; 針金, 私信). 試料の薄片写真を Figure 2A に示す。主な構成鉱物は、リザダイト、クリソタイル、マグネタイトであり、少量のスピネルが残存しているが、カンラン石や輝石はすべて蛇紋石に置換されている (針金, 私信).

全体としてリザダイトのメッシュ状組織 (Fig. 2B) が発達し、粗粒な結晶は輝石が蛇紋石 (リザダイト) 化したバスタイトである。さらにいくつものクリソタイルの脈が全体の構造を切っている (Fig. 2A, C). このクリソタイル脈は、線構造にほぼ直交するものが多いが、面構造にほぼ平行なものもみられる (Fig. 2A, C).

弾性波速度測定の方法

弾性波速度の測定は、鏡味・渡辺（2009）と同じ手法を用い、富山大学理学部地球科学教室で行った。蛇紋岩試料から辺長約3cmの直方体を切り出し、1個の測定試料をつくった。直方体の面は、岩石試料の面構造と線構造に平行または垂直である。さらに、線構造に平行な方向を x 軸、面構造の法線方向を z 軸とした。整形した試料の各辺長と重量を測定して求めた密度は 2.37g/cm^3 であった。

P波は直交する3方向の速度を、S波は1つの進行方向に対して互いに直交する方向に振動する2つの波の速度を、それぞれ測定した。弾性波速度測定には、パルス透過法を採用した。ファンクションジェネレータ（Hewlett Packard, 33120A）によりPZT圧電素子（富士セラミックス、中心周波数2MHz）に電圧パルスを印加して弾性波を発生させた（Fig. 3）。試料を透過した弾性波を他方の圧電素子で受信して電圧信号に変換し、デジタル・オシロスコープ（Agilent, 54621A）によりデジタル化した。試料の辺長と弾性波の走時から速度が求められた。S/N比を大きくするため、128回繰り返し測定した電圧信号を平均した。電圧信号の分解能は12bitである。また、サ

ンプリング間隔はP波、S波について、それぞれ5ns、および10nsである。

岩石試料に含まれる微小クラックの影響を取り除くために、最大180MPaの封圧を加えた。圧媒体はシリコンオイル（信越化学工業、KF-96-100cs）である。なお、圧電素子を貼った岩石試料は、シリコンオイルの岩石試料への侵入を防ぐためにシリコンゴム（信越化学工業、KE45T）でシールした。すべての測定は室温で行った。圧力容器（理研精機、PV-2M-S6C）から取り出しているリードの数が12本のため、1回の加圧で測定できる弾性波速度の数は6方向である。そのため、1回目の加圧で x 、 y 軸方向、2回目に z 軸方向の速度を測定した。

弾性波速度測定の結果

弾性波速度の封圧依存性

蛇紋岩試料の封圧に対するP波およびS波速度の測定結果をTable 1とTable 2とFigure 4に示す。

P波速度は、10MPaで大きく増加したが、その後の封圧依存性は弱く最大封圧の180MPaまではほとんど変化しなかった（Fig. 4A）。3方向のP波速度を比較すると、線構造に平行な x 軸方向で最も遅く（ 3.97km/s at 180MPa）、

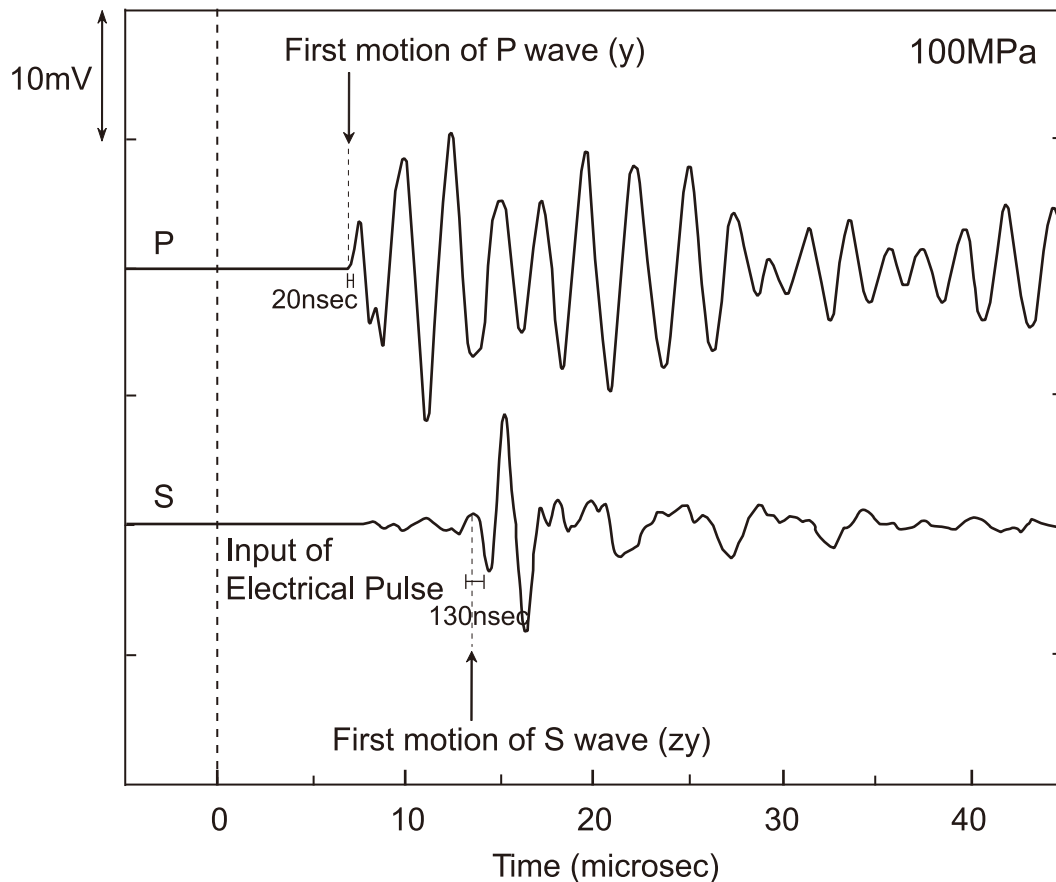


Fig. 3 An example of waveform data under the confining pressure of 100 MPa.

Table 1 Compressional wave velocities and azimuthal anisotropies.

Pressure (MPa)	$Vp(x)$ (km/s)	$Vp(y)$ (km/s)	$Vp(z)$ (km/s)	Vp^{mean} (km/s)	k_p (%)
0	3.33	3.53	3.73	3.53	11.05
10	3.75	4.30	3.80	3.95	13.96
20	3.77	4.35	3.95	4.02	14.47
30	3.76	4.35	4.02	4.04	14.62
40	3.82	4.43	4.07	4.12	14.87
50	3.82	4.44	4.10	4.12	15.00
75	3.83	4.49	4.14	4.15	16.03
100	3.90	4.47	4.19	4.19	13.63
125	3.95	4.53	4.20	4.23	13.57
150	3.97	4.55	4.22	4.25	13.50
180	3.97	4.56	4.25	4.26	13.95

$Vp(i)$ is the velocity of a compressional wave propagating in the direction of i -axis.

Vp^{mean} is the arithmetic mean of three compressional wave velocities.

k_p is defined by Eq. (1).

Table 2 Shear wave velocities and polarization anisotropies.

Pressure (MPa)	$Vs(yx)$ (km/s)	$Vs(zx)$ (km/s)	A_x (%)	$Vs(zy)$ (km/s)	$Vs(xy)$ (km/s)	A_y (%)	$Vs(xz)$ (km/s)	$Vs(yz)$ (km/s)	A_z (%)	V_s^{mean} (km/s)
0	-	2.02	-	2.05	2.09	1.89	1.96	1.96	0	-
10	-	2.03	-	2.18	2.10	4.06	1.99	2.07	3.97	-
20	2.05	2.04	0.81	2.26	2.10	7.34	2.03	2.17	6.85	2.12
30	2.07	2.05	1.16	2.29	2.10	8.75	2.03	2.20	8.28	2.12
40	2.08	2.05	1.50	2.31	2.11	9.46	2.03	2.28	11.93	2.14
50	2.12	2.07	2.36	2.32	2.11	9.69	2.04	2.30	12.01	2.16
75	2.13	2.07	2.78	2.35	2.12	10.22	2.04	2.32	12.77	2.17
100	2.15	2.08	3.00	2.35	2.14	9.52	2.04	2.32	12.77	2.18
125	2.16	2.10	2.67	2.35	2.14	9.52	2.07	2.34	12.19	2.20
150	2.16	2.12	1.77	2.35	2.14	9.52	2.07	2.34	12.19	2.20
180	2.18	2.15	1.72	2.35	2.14	9.52	2.07	2.34	12.19	2.21

$Vs(ij)$ is the velocity of a shear wave propagating in the direction of j -axis and oscillating in the i -axis.

A_i is defined by Eq. (2).

V_s^{mean} is the arithmetic mean of six shear velocities.

線構造に垂直で面構造に平行な y 軸方向で最も速く (4.56 km/s at 180 MPa), 面構造に垂直な z 軸方向が中間の速度であった (4.25 km/s at 180 MPa).

S波速度は, 方向によって封圧依存性が異なる (Fig. 4B). y 軸方向に伝播し z 軸方向に振動する S_{zy} 波と z 軸方向に伝播し y 軸方向に振動する S_{yz} 波の速度は封圧が 50

MPa まで増加するに従って 2.05 km/s から 2.30 km/s まで増加した. その他の 4 方向では封圧依存性がほとんど見られず, 速度は 2.00 km/s から 2.10 km/s であった.

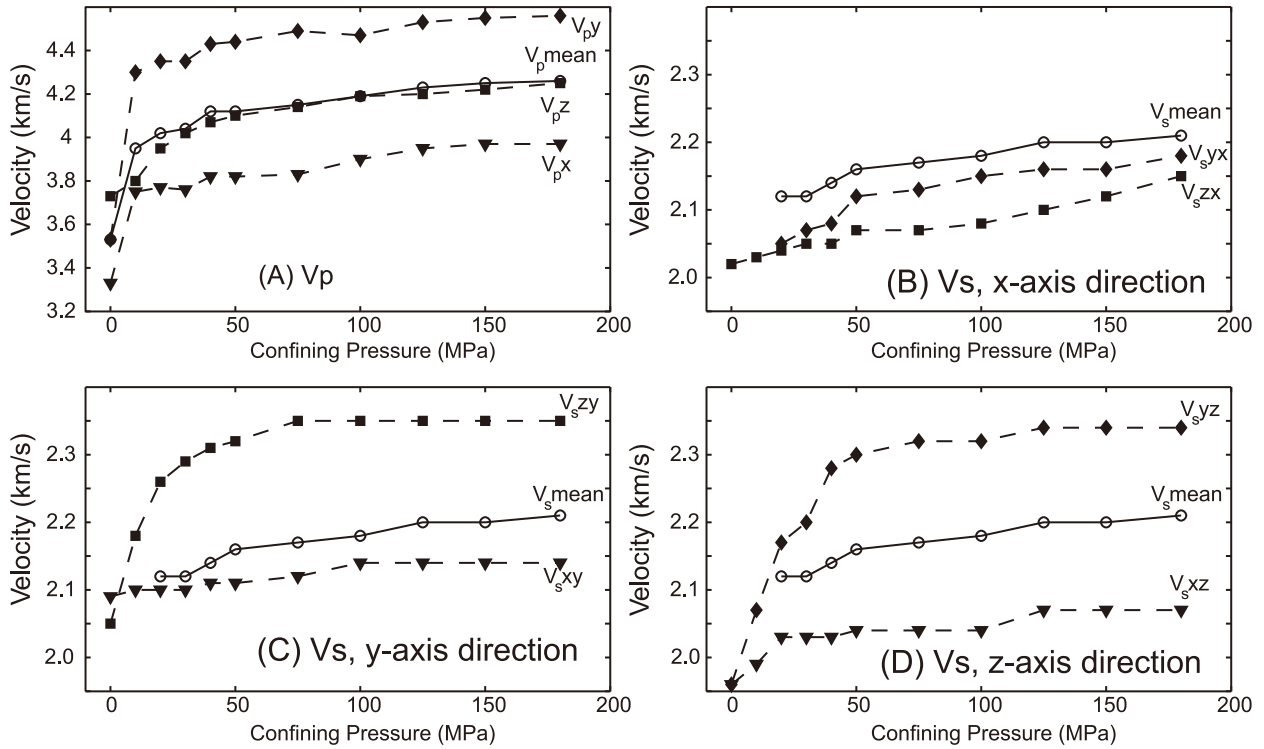


Fig. 4 (A) The compressional wave velocities in the three axes. V_{pi} is the velocity of a compressional wave propagating in the direction of i -axis. V_p^{mean} is the arithmetic mean of three compressional wave velocities. (B-D) The shear wave velocities in the three propagation directions. V_{sij} is the velocity of a shear wave propagating in the direction of j -axis and oscillating in the i -axis. V_s^{mean} is the arithmetic mean of six shear velocities.

弾性波速度の異方性

P波速度の方位異方性の大きさを、異方性係数

$$k_p = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{mean}} \quad (1)$$

によって特徴づける (Birch, 1961). ここで、 V_{max} および V_{min} は直交する3方向におけるP波速度の最大値および最小値、 V_{mean} は3方向の速度の算術平均である。封圧増加にともなう方位異方性係数の変化をFigure 5に示す。

S波速度の偏向異方性の大きさを異方性係数

$$A_h = \frac{|V_s^{ih} - V_s^{jh}|}{\frac{1}{2}(V_s^{ih} + V_s^{jh})} \quad (2)$$

によって特徴づける。ここで、 h はS波の伝播方向を表し、 i および j は振動方向を表す。 V_s^{ih} は i 軸方向に振動しながら h 軸方向に伝播するS波速度である。分子は互いに直交する振動方向をもつ2つのS波の速度差、分母は2つの速度の算術平均である。偏向異方性係数を封圧の関数としてFigure 5に示す。

考察

弾性波速度

本研究で測定した蛇紋岩の弾性波速度の結果として、

常圧から180 MPaまで3方向の平均P波速度が3.73 km/s から4.26 km/sに変化した (Table 1). 6方向の平均S波速度が2.12 km/sから2.21 km/sであった (Table 2). 封圧依存性は、一部のS波速度では50 MPaまで見られたが、高压側ではP波速度、S波速度ともにほとんどみられない (Fig. 4).

これまでに測定された蛇紋岩の弾性波速度と密度の関係コンパイルしたWatanabe *et al.* (2007) は、P波、S波ともリザダイト、クリソタイルを含む低温型蛇紋岩とアンチゴライトを含む高温型蛇紋岩とが異なる関係をもつことを示した。本研究で測定した試料は、密度が蛇紋石の密度 (2.5 g/cm³) よりも小さいが、P波、S波ともにWatanabe *et al.* (2007) が示した低温型蛇紋岩のトレンドに乗っている (Fig. 6). この理由を究明するためには、密度を小さくする微小クラックや鉱物の同定など今後のさらなる分析が必要である。

異方性

測定した蛇紋岩試料のP波速度は、 y 軸方向が最も速く、 x 軸方向が最も遅い結果であった。異方性係数 (k_p) は全ての封圧で10%以上と大きかった。試料は面構造と線構造を同定できたが、元のかんらん岩の構造は蛇紋岩によってほぼ消失している。一方、現在の蛇紋岩の構造は静的蛇紋岩化作用のためにクリソタイル脈を除くと異方性は見られない。そのためFigure 5の方位異方性は、

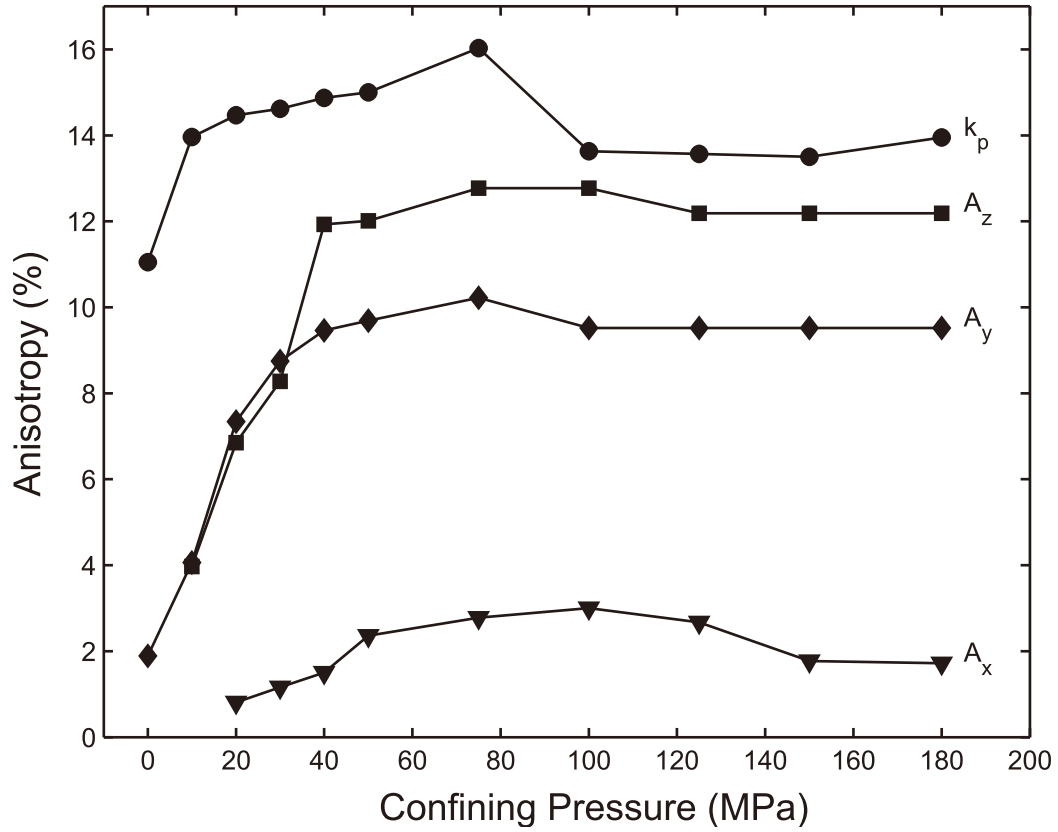


Fig. 5 Velocity anisotropy coefficient as a function of the confining pressure. k_p : the azimuthal anisotropy coefficient of the compressional wave velocity. A_i : the polarization anisotropy of the shear wave velocity propagating in the direction of i -axis.

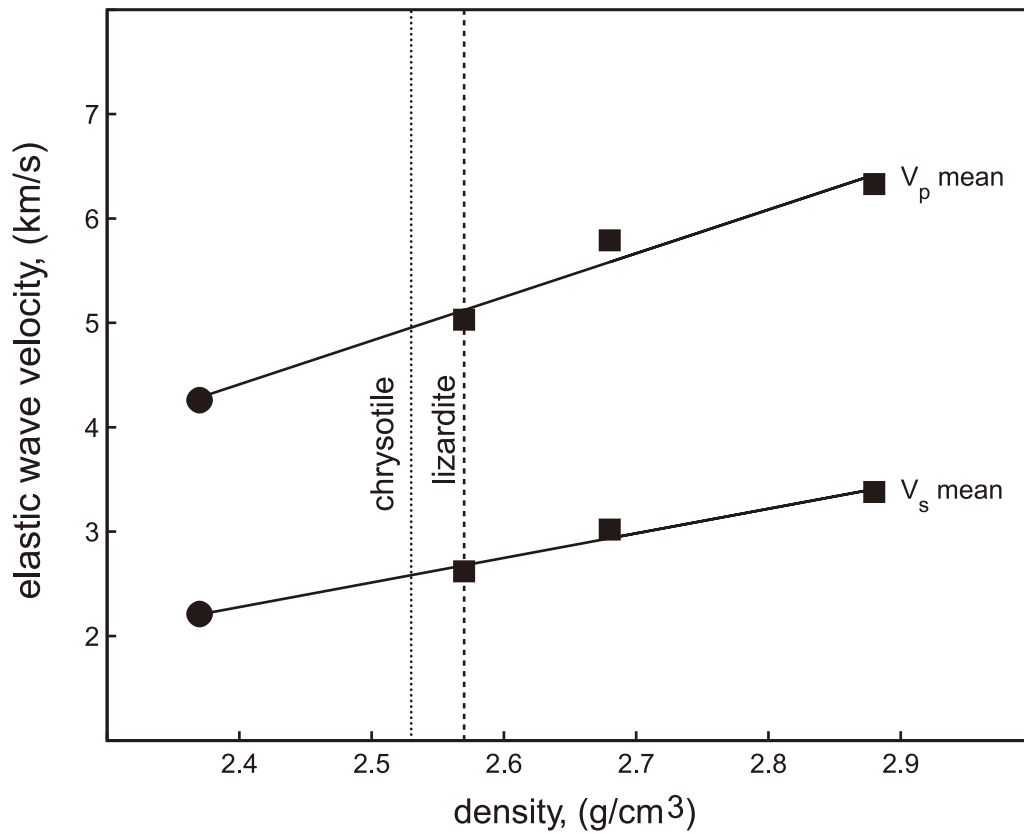


Fig. 6 Mean compressional (V_p) and shear wave velocities (V_s) measured at 180 MPa as a function of the density (open circles). Those at 200 MPa reported by Watanabe *et al.* (1997) are also shown as open squares. Solid lines are obtained by the least-square method for V_p and V_s , respectively. The densities of chrysotile and lizardite are shown as broken lines, respectively.

クリソタイル脈に関係する可能性がもっとも高い。測定試料には、線構造にほぼ直交するクリソタイル脈が多数存在する (Fig. 2A, C)。さらに、面構造にやや平行なクリソタイル脈も多い (Fig. 2A, C)。線構造にほぼ直交するクリソタイル脈は、最も幅広く数も多く発達しているため、この法線方向である x 軸方向の P 波が最も遅くなったのかもしれない。偏向異方性も P 波と同様にクリソタイル脈で説明される。基本的に、 y 軸方向に振動する S 波速度が速く、 x 軸方向に振動する S 波は遅い傾向がある (Fig. 3B)。さらに z 方向に伝播して y 軸方向に振動する S 波が最も速く、 x 方向に振動する S 波が最も遅い結果は、P 波と同様に線構造にほぼ垂直なクリソタイル脈が大きな影響を与えている可能性が考えられる。これらの考察を検証するためには、クリソタイル脈を除いた部分の弾性評価とそれに対するクリソタイル脈の影響評価が必要である (例えば、Dewandel *et al.*, 2003)。

謝辞

本研究は、静岡大学理学部の理数学生応援プロジェクト「主体性を伸ばす理数特別カリキュラムによる科学者養成プログラム」の一環として企画された「武者修行国内留学制度」によって支援された研究をまとめたものである。富山大学理学部地球科学教室渡辺研究室の白杉勇人氏には弾性波速度測定の補助をしていただいた。静岡大学理学部地球科学教室のサティッシュ・クマール准教授と生田領野博士には原稿を読んでいただいた。

引用文献

Birch F. (1961), The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part 2. *Journal of Geophysical Research*, **66**, 2199–2224.

Dewandel B., Boudier F., Kern H., Warsi W. & Mainprice D. (2003), Seismic wave velocity and anisotropy of serpentinized peridotite in the Oman ophiolite. *Tec-*

tonophysics, **370**, 77–94.

- Harigane Y. (2009MS), Structural evolution of the Godzilla Mullion, the Parece Vela Basin, Philippine Sea. Ph. D thesis, Shizuoka University, Shizuoka, Japan, 272 p.
- Harigane Y., Michibayashi K. & Ohara Y. (2008), Shearing within lower crust during progressive retrogression: Structural analysis of gabbroic rocks from the Godzilla Megamullion, an oceanic core complex in the Parece Vela backarc basin. *Tectonophysics*, **457**, 183–196.
- 針金由美子・道林克禎・小原泰彦 (2010), ゴジラムリオンの構造発達—かんらん岩の変形微細構造と蛇紋岩化作用—. *地球*, **32**, 196–200.
- 鏡味芳宏・渡辺 了 (2009), 弾性波速度測定に基づく跡津川断層周辺浅部地殻物質の推定. *地震*, **61**, 99–111.
- Ohara Y. (2007), JAMSTEC Cruise Report R/V Hakuho KH07-2-Leg 2 and Leg 4 Cruise: Oceanic core complexes in the Parece Vela Basin as window for probing structure and composition of fast/intermediate spreading backarc basin lithosphere: an IODP site survey. 405p.
- Ohara Y., Yoshida T. & Kasuga S. (2001), Giant megamullion in the Parece Vela Backarc basin. *Marine Geophysical Research*, **22**, 47–61.
- Ohara Y., Fujioka K., Ishii T. & Yurimoto H. (2003), Peridotites and gabbros from the Parece Vela backarc basin: Unique tectonic window in an extinct backarc spreading ridge. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **4**, 1029, doi: 10.1029/2002GC000469.
- Watanabe T., Kasami H. & Ohshima S. (2007), Compressional and shear wave velocities of serpentinized peridotites up to 200 MPa. *Earth, Planets and Space*, **59**, 233–244.