

平成21年 5月24日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19540502
 研究課題名（和文） 岩石—水系の高圧高温下における弾性波速度と活断層型地震震源近傍の含水量モデル
 研究課題名（英文） Effect of water on elastic wave velocities of crustal materials: implications for distribution of water in seismogenic crust
 研究代表者
 石川 正弘（ISHIKAWA MASAHIRO）
 横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授
 研究者番号：70232270

研究成果の概要：

兵庫県南部地震などの震源近傍では流体貯留層を示唆する低速度・高ポアソン比異常が発見され、地震発生機構における水の役割が注目されている。地殻内部における H₂O 流体の含水率マッピングは活断層型地震の発生機構を解明する上で重要であると考えられるが、下部地殻～中部地殻における H₂O 流体の地震波速度への影響は高温高圧物性実験の視点から十分に研究が行われているとは言えない。したがって、地殻内の含水率マッピングを行うためには、地殻深部に相当する高温高圧条件で岩石-水系の弾性波速度を測定することが不可欠である。我々は、まず、含水条件において岩石の弾性波速度を測定する装置を開発し、次に、岩石-水系において基礎的な弾性波速度測定実験を最大 0.5GPa, 500°Cでの条件下で行ない、含水率や水が弾性波速度に及ぼす影響について考察した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成19年度	2,200,000	660,000	2,860,000
平成20年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：岩石物性

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：弾性波速度，地殻，水，高温高圧

1. 研究開始当初の背景

日本列島では上盤側プレート内を震源とする内陸直下型地震がしばしば発生する。内陸直下型地震のマグニチュードは7クラスと海溝型の巨大地震よりは小さいが、甚大な被害をもたらす（兵庫県南部地震，新潟中越地震など）。内陸直下型地震の発生機構は、基本的にはプレートとプレートが押し合うためにプレート内部に歪がたまり、それが限界に達すると破壊（地震）という形で開放され

ることによって考えられる。さらに最近では、兵庫県南部地震の震源近傍における低速度・高ポアソン比異常の発見を機に、内陸直下型地震の発生機構における水の役割に関心が高まっている。なぜなら、この低速度・高ポアソン比異常域が地殻内の H₂O 貯留層に相当し、間隙水圧の上昇が内陸直下型地震の引き金となっている可能性が大きいからである（例えば Zhao et al, 1996）。兵庫県南部地震以外の内陸直下型地震でも、震源近傍

における地殻内フルイドの存在を示唆する地震学的データが示されはじめており（例えば Wang & Zhao, 2006）、地殻内部における H₂O 流体の分布を定量的に明らかにすることは内陸直下型地震の発生機構を解明する上で非常に重要であると考えられる。

2. 研究の目的

下部地殻～中部地殻における H₂O 流体の地震波速度への影響は高温高压物性実験の視点から十分に研究が行われているとは言えず、震源近傍の H₂O 量はいまだ正確に見積もられていない。したがって、島弧地殻深部岩石に関して弾性波速度への水の影響を実験的に評価することは、震源近傍の H₂O 量を明らかにする上で重要である。

本研究課題では、地殻深部岩石に関して、H₂O 量と地震波速度の関係を明らかにすることを目的とする。そのためには、島弧地殻深部に相当する高温高压条件で、地殻物質の弾性波速度を含水条件で測定することが不可欠である。具体的な目的は以下の通りである。

- (1) 島弧地殻深部と同等な高温高压条件で、水を含む岩石試料の弾性波速度を測定する装置を開発する。
- (2) 地殻構成物質に関して H₂O 流体が弾性波速度に及ぼす影響を定量的に明らかにする。
- (3) 含水鉱物・無水鉱物に着目し、島弧地殻深部を構成する様々な岩石の弾性波速度データセットを構築する。
- (4) 地震波速度構造との対比を行い、地殻深部の含水鉱物の分布を見積もる。

3. 研究の方法

横浜国立大学設備のピストン-シリンダー型高压発生装置（内径 34mm）は 1.0GPa 以上の圧力を発生可能であり、この高温高压発生装置を含水条件での弾性波速度装置へ改良した。岩石をコアドリルおよび切断機を用いて直径 6mm、長さ 6.0mm の岩石コア試料に成型し、上下面を鏡面研磨する。岩石コア試料（含水または無水）は Pt カプセルに封入し、その側面は BN で覆う。Pt カプセルの片面は Pt バッファースティックと接し、バッファースティックのもう一方の面に鏡面研磨した円盤状のリチウムニオベート振動子を密着させる。圧力媒体はタルクを使用した。

4. 研究成果

(1) H₂O 流体が弾性波速度に及ぼす影響

本研究の特色としては、従来まで行ってきたドライな岩石系に加え、岩石-H₂O 系で弾性波速度同時測定を行なうことである。今回は、横浜国立大学設置のピストンシリンダー型高温高压発生装置を用いて（図 1）、最大 1.5wt%の含水状態の岩石試料を島弧地殻深

部に相当する温度圧力条件での弾性波速度測定を実施し、0.6GPa・500°Cまでの温度圧力条件において良質な P 波シグナルを得ることに成功した。一方、S 波は含水率 0.02wt%以下において良質なシグナルを得ることができた。

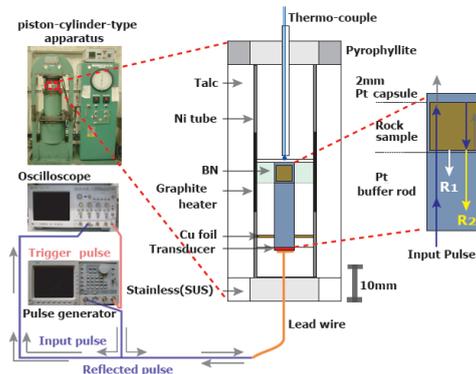


図 1 弾性波測定システム概略図

特に、代表的な島弧地殻構成鉱物である石英に着目し、多結晶石英岩-H₂O 系における速度低下率と H₂O 量との相関を明らかにした（図 2, 3）。

圧力 0.5GPa において温度を 20-400°C 変化させた際、無水条件での P 波速度 (V_p) は 6.2-6.0 km/s で、温度依存性 ($\partial V_p / \partial T$) は $-5.2 \text{ km s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ であった。水の量を 0.03, 0.17, 0.37, 0.45, 0.98, 1.48 wt% と変化させた試料の P 波速度は 20-500°C でそれぞれ、6.11 (20°C), 6.2-5.8, 6.0-5.8, 6.0-5.8, 5.9-5.8, 5.6-5.2 km/s で、直線のかつ緩やかな P 波速度減少を示した。また 0.5GPa, 20-500°C の範囲で含水条件における P 波速度の温度依存性は、 $-7.3 \text{ km s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (0.17 wt% H₂O), $-4.9 \text{ km s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (0.37 wt% H₂O), $-4.1 \text{ km s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (0.45 wt% H₂O), $-2.8 \text{ km s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (0.98 wt% H₂O), $-8.6 \text{ km s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (1.48 wt% H₂O) であった。含水条件における P 波速度低下率 ($100 \times (1 - V_p / V_{p, \text{dry}})$) の平均はそれぞれ、1.2%, 0.3%, 2.8%, 2.4%, 3.8%, 10.5% であった。0.98 wt% H₂O までの温度変化における P 波速度低下は、直線的で温度依存性はあまり変わらなかった。一方 1.48 wt% H₂O では温度上昇に伴い P 波速度低下が高くなり (9.78-11.88%) 温度依存性が強くなった。また圧力 0.5GPa, 温度上昇において 0.98wt% H₂O から 1.48wt% H₂O で急激な P 波速度比 ($V_p / V_{p, \text{dry}}$) および P 波速度低下 (-6.75%) が確認された。

これらの結果は、弾性波速度の測定値から地殻内部における H₂O 量を定量的に見積もる上で重要な基礎データとなり、地殻内部の水の分布を探る上で本研究の意義は大きい。

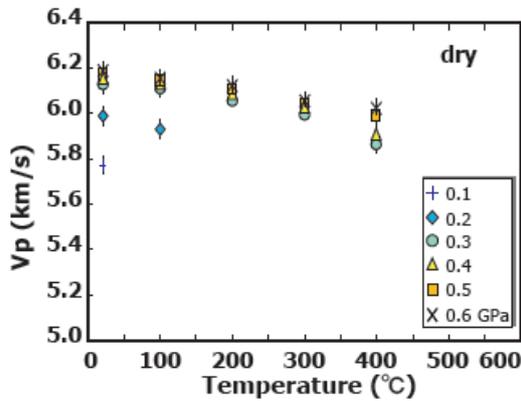


図2 無水条件における多結晶石英岩のP波速度と温度の関係

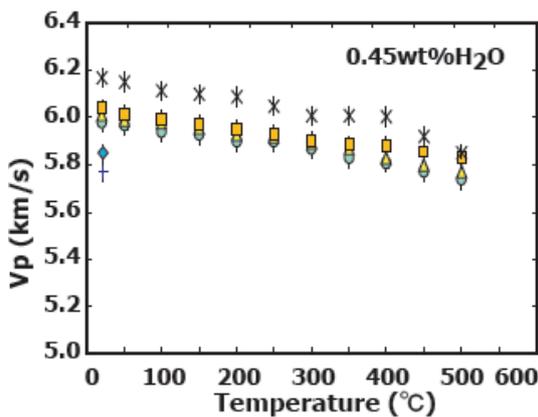


図3 含水条件における多結晶石英岩のP波速度と温度の関係

(2) 含水下部地殻と無水下部地殻

大陸地殻深部の構成岩石は地震波速度構造と高压条件下における岩石の弾性波速度を対比することにより推定されてきた。一方、島弧地殻深部に相当する高温高压条件下で岩石速度の測定が十分には行われていないことから、島弧地殻深部の構成岩石を推定する際には、低温域で決定された温度微分係数を高温域へ適応しているのが現状であった（例えば Kitamura et al, 2003）。しかし、ガブロンライトや苦鉄質グラニュライトの弾性波速度の温度微分係数が 400°C 付近を境に大きく異なる例が報告され（Kono et al., 2004），岩石の弾性波速度を島弧地殻深部相当の高压高温条件下で測定することが求められている。

本研究では丹沢山地に産する角閃石ハンレイ岩およびパキスタン産コヒスタン島弧下部地殻起源のガブロンライトのP波速度 (V_p) およびS波速度 (V_s) を最大 1.0 GPa, 800°C の高温高压条件下において、パルス反射法により同時に測定した。

1.0 GPa 25°C における大柵沢地域産の角閃石ハンレイ岩の測定結果を図4に、コヒスタ

ン島弧下部地殻起源のガブロンライトの測定結果を図5に示した。岩石の弾性波速度を地震波速度構造と直接対比した結果、伊豆弧の低速度下部地殻は角閃石ハンレイ岩で、高速度下部地殻の上部は角閃石輝石ハンレイ岩で、高速度下部地殻の下部 ($V_p=7.3\text{ km/s}$) はノーラートで構成されていることが推定された。

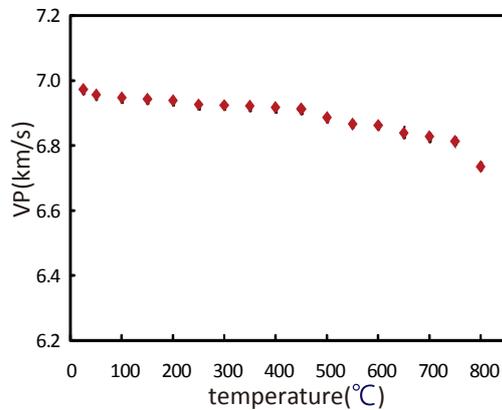


図4 角閃石ハンレイ岩のP波速度と温度の関係

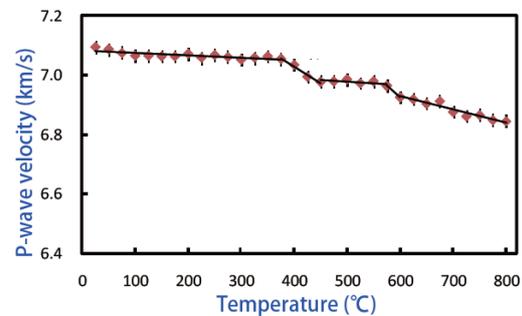


図5 ガブロンライトのP波速度と温度の関係

(3) 伊豆衝突帯の構造と地震テクトニクス

丹沢山地は伊豆小笠原弧が本州弧への衝突することにより隆起し、北部伊豆小笠原弧の中部地殻に相当する丹沢深成岩体が東西 25 km 南北 7 km の範囲にわたり分布している（図6）。本研究では、丹沢山地に産するトーナル岩類の流体包有物の観察および流体包有物マイクロサーモメトリーから伊豆弧中部地殻の付加・上昇プロセスを検討した。その結果、丹沢トーナル岩は南北方向の断層に沿って西部がより深部から上昇してきたことを明らかとした（図7）。一方、伊豆衝突帯直下の震源分布から、山梨県東部まで沈み込んでいる伊豆弧下部地殻（フィリピン海スラブの最上部層）は南北方向に断裂しており、丹沢山地西部直下のスラブ深度は丹沢山地東部直下のスラブ深度より数～5 km ほど深くなっていると推測されている（石川, 2007）。つまり、丹沢山地西部では伊豆弧

下部地殻はすでに中部地殻から分離（デラミネーション）している為に浮力によって西部のトータル岩がより深部から上昇してきたと解釈される。

トータル岩形成時に捕獲されたと考えられる流体包有物について、流体包有物マイクロサーモメトリーから求めたアイソコアから見積もった残留圧力は、畦ヶ丸岩体の東部よりも西部のほうが高い値を示し、圧力の不連続は東沢東部の剪断帯付近であることが明らかとなった。ホルンブレンド地質圧力計およびホルンブレンド-斜長石地質温度計を適用して見積もった圧力も東沢で低く、西沢以西で高くなるという結果を示し、東沢と西沢の間に位置する中川川を境に不連続が生じている。この不連続は畦ヶ丸岩体東部に位置する南北方向の剪断帯にほぼ一致することが明らかとなった。この剪断帯は、下部地殻深度の震源分布から推測されたスラブ断裂構造（スラブは東部が浅く、西部が深い）のほぼ直上に位置しており、トータル岩の東西における上昇過程の差異は、フィリピン海スラブ（伊豆弧下部地殻）の断裂構造と関連していると考えられる。つまり、丹沢山地西部では伊豆弧下部地殻はすでに中部地殻から分離している為に浮力によって西部のトータル岩がより深部から上昇してきたというテクトニックモデルが考えられる。

丹沢山地東部は関東地震のアスペリティ近傍であり(Sato et al., 2005)、関東地震の震源断層の形状を規制している点で重要である。1923年関東地震の発生によって、丹沢山地東部が大きく沈降した現象は、丹沢山地の東西でのスラブ上面の岩石学的構造とテクトニクスの違いを反映していると思われる。

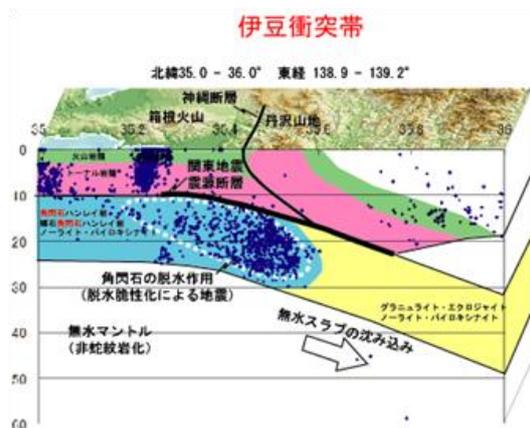


図6 伊豆衝突帯の岩石学的構造と地震テクトニクス

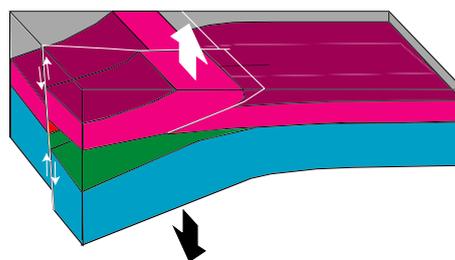


図7 伊豆衝突帯西部のフィリピン海スラブ（伊豆弧下部地殻）の断裂構造と丹沢トータル岩類の上昇テクトニクス

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 5件)

- ① Ishikawa, M. & Arima, M. (2009) Laboratory measurements of ultrasonic wave velocities of crustal rocks at high pressures and temperatures: Petrological structure of Izu-Bonin-Mariana arc crust. In Gupta & Dasgupta (eds). *Physics and Chemistry of the Earth's Interior: Crust, Mantle and Core*, 143–152. Springer-Verlag. (査読無)
- ② Kono, Y., Ishikawa, M., Harigane, Y., Michibayashi, K., Arima, M. (2009) P- and S-wave velocities of the lowermost crustal rocks from the Kohistan arc: Implications for seismic Moho discontinuity attributed to abundant garnet. *Tectonophysics*, **467**, 44-54. (査読有)
- ③ Ishikawa, M., Shingai, E. & Arima, M. (2008) Elastic properties of high-grade metamorphosed igneous rocks from Enderby Land and eastern Dronning Maud Land, Antarctica: evidence for biotite-bearing mafic lower crust. In Satish-Kumar et al. (eds). *Geodynamic Evolution of East Antarctica: A Key to the East-West Gondwana Connection. Geological Society London, Special Publications*, **308**, 183 - 194. DOI: 10.1144/SP308.9. (査読有)
- ④ Nishimoto, S., Ishikawa, M., Arima, M., Yoshida, T., Nakajima, J. (2008) Simultaneous high P-T measurements of ultrasonic compressional and shear wave velocities in Ichino-megata mafic xenoliths: Their bearings on seismic velocity perturbations in lower crust of northeast Japan arc. *Journal of Geophysical Research*, **113**, B12212, doi:10.1029/2008JB005587. (査読有)

- ⑤ Kono, Y., Miyake, A., Ishikawa, M., Arima, M. (2008) Temperature derivatives of elastic wave velocities in plagioclase (An_{51±1}) above and below the order-disorder transition temperature. *American Mineralogist*, **93**, 558-564. (査読有)

〔学会発表〕(計12件)

- ① Masahiro ISHIKAWA, Plate strength through time: role of water in Gondwana assembly, Pangea breakup and Asia assembly, Madagascar Earth Science Symposium, 2008年10月, アントナナリボ
- ② 松本有希, 高温高压条件下での多結晶石英の弾性波速度への水の影響, 日本地質学会, 2008年9月, 秋田
- ③ 石川正弘, 伊豆衝突帯の構造とテクトニクス: 丹沢トータル岩類の流体包有物マイクロサーモメトリーからの推定, 日本地質学会, 2008年9月, 秋田
- ④ 勝根郷, 丹沢山地に産する角閃石ハンレイ岩の最大 1.0GPa 800°Cにおける弾性波速度測定, 日本地球惑星科学連合, 2008年5月, 幕張
- ⑤ Kojo, S., Elastic wave velocities and Poisson's ratios of amphibolite up to 900 °C at 1.0 GPa: Effect of dehydration melting on Poisson's ratio of mid- to lower crustal rock, American Geophysical Union Fall meeting, 2007年12月, San Francisco
- ⑥ 石川正弘, 地殻マントル物質の弾性波速度測定: 海洋地殻・モホの実体解明にむけて, 日本地質学会, 2007年9月, 札幌
- ⑦ 石川正弘, H₂O 流体が岩石の弾性波速度へ及ぼす影響, 日本地質学会, 2007年9月, 札幌
- ⑧ 小城志保子, 丹沢角閃岩・緑色片岩の高温高压条件下における弾性波速度とポアソン比, 日本地質学会, 2007年9月, 札幌
- ⑨ 佐々木聡子, 丹沢深成岩類中の流体包有物に関する研究, 日本地質学会 2007年9月, 札幌
- ⑩ 勝根郷, 丹沢山地に産する角閃石ハンレイ岩の高温高压下における弾性波速度測定, 日本地質学会, 2007年9月, 札幌
- ⑪ 石川正弘, 高温高压条件下における多結晶石英のP波速度に及ぼす水の影響, 日本地球惑星科学連合大会, 2007年5月, 幕張
- ⑫ 小城志保子, 角閃岩の熔融が弾性波速度とポアソン比に与える影響, 日本地球惑

星科学連合大会, 2007年5月, 幕張

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 正弘 (ISHIKAWA MASAHIRO)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授

研究者番号: 70232270

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者