３．１．２．２　関東下の構成岩石モデルの構築

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

関東下で予想される岩石の高温・高圧下での弾性波速度を測定し、構成岩石モデルを構築する。

(b) 平成２４年度業務目的

海洋性島弧に由来する岩石を対象として弾性波速度測定実験を行い、海洋性島弧地殻深部に由来する岩石の弾性波速度データセットを構築する。また、得られた弾性波速度に関する基礎データセットに基づき、首都圏西部に沈み込むフィリピン海スラブの地殻構成岩石に関する初期モデルを得る。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
横浜国立大学大学院環境情報研究院	教授	石川正弘	

(2) 平成２４年度の成果

(a) 業務の要約

1) 海洋性島弧に由来する岩石を対象として弾性波速度測定実験を行い、海洋性島弧地殻深部に由来する岩石の弾性波速度データセットを構築した。
2) 得られた弾性波速度に関する基礎データセットに基づき、首都圏西部に沈み込むフィリピン海スラブの地殻構成岩石に関する初期モデルを検討した。

(b) 業務の成果

1) 海洋性島弧に由来する岩石を対象とした弾性波速度測定実験

関東地域下では、フィリピン海プレートが陸側プレートの下に沈み込む一方、首都圏西部では衝突付加するという複雑なテクトニクスを起こしている。つまり、伊豆小笠原弧の一部が陸側プレートに衝突付加する一方で、伊豆小笠原弧のほとんどはフィリピン海スラブとして沈み込んでいる。フィリピン海スラブ上面は関東地震震源断層に相当する可能性が高く(Sato *et al.*, 2005[1])、首都圏西部下におけるフィリピン海プレートと陸側プレートの接合部の地殻の構造と構成岩石を推測することは、関東地方下における地殻物性モデルに粘性等の拘束条件を与える上で重要であり、首都直下地震を考察する上でも必要不可欠である。そこで、首都圏西部の伊豆衝突帯域の地殻構成モデルを得るために、海洋性島弧に由来する岩石（丹沢深成岩類等）を対象として弾性波速度測定実験を実施した。

a) 実験対象

ⅰ）丹沢山地の深成岩類

Kawate and Arima(1998)[2]によれば、丹沢山地に産するトーナル岩は幅広いシリカ含有量

を示す。今回の測定実験に用いたトーナル岩試料は $SiO_2$54wt%、56wt%、63wt%、69wt%の4 試料である。これらトーナル岩の主要構成鉱物は石英・斜長石・角閃石である。また、今回の測定実験に用いた斑れい岩試料は丹沢山地から採取した角閃石斑れい岩 3 試料（大棚沢周辺 1 試料、道志周辺 2 試料）である。

丹沢山地は首都圏西部に位置する。フィリピン海プレートは、南海トラフ・駿河トラフ・相模トラフで陸側プレートの下に沈み込んでいくが、伊豆小笠原弧の一部は沈み込むことができず、首都圏西部で伊豆小笠原弧が本州側に衝突によって海洋性島弧地殻を付加している（Taira *et al.*, 1992[3]）。岩石学的研究（Kawate and Arima, 1998[2]）によれば、丹沢山地に分布する丹沢層群と深成岩類はかつての伊豆小笠原弧の火成活動に伴う火山岩・深成岩類であると考えられている。したがって、丹沢山地には、島弧－島弧衝突テクトニクスによって付加した伊豆小笠原弧の地殻構成岩石が広く地表に露出していると解釈されており（Kawate and Arima, 1998[2]; Taira *et al.*, 1992[3]; 石川・他，2004[4]）、丹沢山地に露出する深成岩類の弾性波速度は首都圏西部に沈み込むフィリピン海スラブの地殻構成岩石に関する初期モデルを構築する上で重要な情報である。

ⅱ）中生代海洋性島弧の下部地殻構成岩石

中生代白亜紀の海洋性島弧であるコヒスタン島弧の下部地殻を構成するジジャール岩体から採取したガブロノーライトを実験試料として用いた。主要構成鉱物は斜長石・単斜輝石・斜方輝石・角閃石である。上記の丹沢深成岩類と異なる特徴は輝石類を主要構成鉱物の一つとすることである。コヒスタン島弧地殻マントルセクションはパキスタン・イスラム共和国北部に分布している。主マントル衝上断層（Main mantle thrust）と主力ラコラム衝上断層（Main Karakorum thrust） に挟まれており、ユーラシア大陸とインド亜大陸の境界に位置している（Coward *et al.*, 1982[5]; Coward *et al.*, 1986[6]; Treloar *et al.*, 1996[7]）。テチス海にあった海洋性島弧（コヒスタン島弧）はユーラシア大陸とインド亜大陸の衝突した際に挟み込まれて、その地殻断面が地表露出したものと考えられている。丹沢山地にはトーナル岩や斑れい岩類が分布するが、上記パキスタン地域には丹沢山地に分布していない種類の斑れい岩類が露出しており、それらの岩石の弾性波速度データは海洋性島弧である伊豆小笠原弧が衝突付加・沈み込む関東域の地殻構成岩石を推測する上で貴重な情報を与えると期待される。

b）実験手法

弾性波速度測定には横浜国立大学設置のピストンシリンダー高圧発生装置を用いた（図1、P.89）。本装置は高圧実験としては比較的大容量の試料(直径 14～6mm、長さ 12～6mmのコア試料)を測定対象として最大圧力 1.0GPa 下で弾性波速度測定を測定可能である。圧力媒体としてタルクとパイロフィライトを使用した。丹沢深成岩類の岩石試料の実験は先行研究（Kitamura *et al.*, 2003[8]）が行われているが、高温条件での測定に問題を残しているために伊豆弧の P 波速度構造と岩石の P 波速度の直接対比が行えていない。そこで本業務では、丹沢深成岩類等の弾性波速度を高温高圧条件で測定した。実験中の温度は高圧セル中心部に設置した熱電対により測定した。500℃以上の高温での実験では岩石試料を金属

カプセルに封入した。弾性波発生用の圧電素子にはニオブ酸リチウムを用いた。試料中の弾性波の伝播時間はパルス透過法および反射法で決定し（Ishikawa and Arima, 2009 [9]）、弾性波速度を求めた。また、本業務では弾性波速度測定制御部を一部自動化するように改良した（図 1、P.89）。

c）実験結果

本業務で得られたトーナル岩類や斑れい岩類の弾性波速度データセットは高温高圧（最大圧力 1.0GPa、最高温度 800℃）で測定されたものであり、伊豆小笠原弧や首都圏西部の地殻構成岩石を推測する上で重要な基礎データとなる。丹沢山地に産するトーナル岩は一般的に SiO_2 含有量（重量%）の幅が広く、主要構成鉱物である斜長石、石英、角閃石の鉱物モード比も多様である。トーナル岩質な地殻の物性を考察する上では、その平均化学組成（SiO_2 含有量）や鉱物モード比は重要な情報であるので、本調査研究で得られたトーナル岩類の P 波速度と SiO_2 含有量（重量%）および石英の含有量（体積%）との関係は、伊豆小笠原弧の首都圏西部の地殻構成岩石をより精度良く推測する上で重要な基礎データとなる。

ⅰ）トーナル岩の弾性波速度

丹沢山地に産するトーナル岩の P 波速度を最大圧力 1.0GPa、最高温度 500℃で測定した。図 2(P.90)には室温で測定した丹沢トーナル岩類の P 波速度と圧力の関係を示した。測定実験の結果、全試料において P 波速度は約 0.4GPa まで急激に上昇し、0.4GPa 以上の圧力においてほぼ線形的に速度が増加する特徴が見られた。0.4～1.0GPa 以上の圧力において P 波速度の圧力依存性は 0.5～0.3km/s/GPa の範囲内である。図 3(P.90)には丹沢トーナル岩の P 波速度と温度の関係を示した。P 波速度の温度依存性については、約-2.0×10^{-4}km/s/℃の温度依存性が見られた。図 4(P.91)は丹沢山地に産するトーナル岩の P 波速度と SiO_2 含有量（重量%）の関係、およびトーナル岩の P 波速度と石英の含有量（体積%）との関係を示している。

ⅱ）角閃石斑れい岩の弾性波速度

丹沢山地に産する角閃石斑れい岩の P 波速度と S 波速度を最大圧力 1.0GPa、最高温度 800℃で測定した．図 5(P.91)には角閃石斑れい岩の P 波速度および S 波速度と温度の関係を示した。実験の結果、例えば室温 1.0GPa では 3 試料の P 波速度は約 7.1km/s～7.0km/s、S 波速度は 4.0km/s～3.8km/s であった。また、700℃までの温度上昇に伴う弾性波速度の低下は P 波・S 波とも約 0.3～0.4km/s であった。

ⅲ）ガブロノーライトの弾性波速度

パキスタン北部に産するガブロノーライトの P 波速度と S 波速度を最大圧力 1.0GPa、最高温度 800℃で測定した。図 6(P.92)にはガブロノーライトの P 波速度と温度の関係を示した。測定実験で得られた P 波速度は圧力 1.0GPa・室温で約 7.15km/s であり、800℃までの温度上昇に伴い P 波速度は約 4%低下した。

2）首都圏西部に沈み込むフィリピン海スラブの地殻構成岩石に関する初期モデル

地震学的に得られた地殻構造モデル（地震波速度構造、反射構造、地震波トモグラフィー）と岩石の弾性波速度を対比することは地殻構成岩石にとその代表的な化学組成（SiO_2含有量）や構成鉱物を推測する上で重要である。フィリピン海プレート東縁に分布する伊豆小笠原弧は首都圏西部の伊豆衝突帯およびその下に沈み込むフィリピン海スラブの地殻構成岩石を推測する上で非常に重要な地域である（Kitamura and Ishikawa, 1998[10]）。先行研究（Kitamura *et al.*, 2003[8]）では丹沢深成岩のP波速度測定を高圧条件下で行い、伊豆弧地殻深部構造の岩石学的モデルを推定しているが、高温条件での岩石のP波速度測定に成功していないため、伊豆小笠原弧北部における物理構造探査で得られたP波速度構造（Suyehiro *et al.*, 1996[11]; Takahashi *et al.*, 1998[12]）との直接の比較を行うことができていない(岩石のP波速度に関する平均的温度微分係数を用いて補正を行った上で比較している)。温度補正の問題を解決するために本業務では、まず、島弧地下深部と同等の高温高圧条件で測定した丹沢深成岩等の弾性波速度を伊豆小笠原弧のP波速度構造と直接比較することにより信頼性の高い地殻構成岩石モデルを推測して、つぎに、首都圏西部の伊豆衝突帯およびその下に沈み込むフィリピン海スラブの地殻構成岩石を推測した。

図 7(P.92)では弾性波速度測定実験から得られたトーナル岩のP波速度と伊豆小笠原弧のP波速度（Suyehiro *et al.*, 1996[11]）を直接比較している。トーナル岩のP波速度は伊豆小笠原弧中部地殻のP波速度（6.1～6.2km/s、深度約7～12km）と同程度であり、トーナル岩が伊豆小笠原弧中部地殻の主要構成岩石であると推測される。また、本業務の弾性波速度測定により得られた角閃石斑れい岩とガブロノーライトのP波速度と伊豆小笠原弧で得られたP波速度（Kawate and Arima, 1998[2]）と比較すると、下部地殻上層（P波速度6.7～6.8km/s）の主要構成岩石として角閃石斑れい岩を、また、下部地殻（P波速度7.1～7.3km/s）の主要構成岩石として角閃石輝石斑糲岩やガブロノーライトが推測された。

伊豆衝突帯の反射構造(Sato *et al.*, 2005[1])と伊豆小笠原弧のP波速度構造（Suyehiro *et al.*, 1996[11]）との比較から、丹沢地塊は伊豆小笠原弧の上部地殻及び中部地殻上部に相当し、衝突の過程で地殻下部から剥離したものと解釈されている(Sato *et al.*, 2005[1])。本業務における弾性波速度測定実験から伊豆小笠原弧の中部地殻と下部地殻上層（P波速度＝6.7～6.8km/s）の間が伊豆衝突帯の反射構造(Sato *et al.*, 2005[1])で観測された関東地震震源断層に相当すると推測され、今回推測した地殻構成岩石モデルは反射法地震探査から推定した伊豆衝突帯下のフィリピン海スラブの結果(Sato *et al.*, 2005[1])と整合的である。

伊豆小笠原弧の岩石学的構造モデルと丹沢深成岩の露出プロセスを総合すると、伊豆小笠原弧の6.1-6.3km/s層に相当するトーナル岩や6.7-6.8km/s層に相当する角閃石斑れい岩の一部は島弧衝突によって地下深部から捲れあがり丹沢山地に露出する一方で、下部地殻（角閃石斑糲岩等の苦鉄質岩石）のほとんどは中部地殻下底から剥がれ、沈み込んでいると推測される。弾性波速度測定の結果、トーナル岩と角閃石斑れい岩の音響的インピーダンスのギャップは大きいので、その境界が強い反射面に相当すると予想される。先行研究(Sato *et al.*, 2005[1]) によって明らかにされたフィリピン海スラブ上面の反射面はこのトーナル岩と角閃石斑れい岩の境界であると推測される。

(c) 結論ならびに今後の課題

首都圏下のフィリピン海プレートは、関東南東部で陸側プレート下に単純に沈み込む一方で、南西部の伊豆衝突帯では島弧－島弧衝突によって複雑な形状を示す。フィリピン海プレートの地殻構成を明らかにすることは、フィリピン海スラブ内や陸側プレートとの境界部で発生する地震活動を理解する上で重要であり、岩石の弾性波速度測定による調査を行ってきた。

弾性波速度測定実験結果から、海洋性島弧を代表すると思われる中部地殻・下部地殻由来の岩石の弾性波速度およびその構成鉱物割合との対応や化学組成依存性が明らかになり、地震波速度構造から伊豆衝突帯の地殻構成岩石や化学組成を地殻構成要素ごとに推定した。

高温領域の地殻深部の構成岩石を推定することを目的として、これまで得られている室温高圧下の海洋性島弧由来の丹沢深成岩類の弾性波速度（Kitamura *et al*., 2003[8)]）に加えて、高温高圧下での海洋性島弧由来の岩石の弾性波速度を測定した。こうして高温高圧下の弾性波速度測定実験によって新しく求められた海洋性島弧由来の岩石（丹沢深成岩類とパキスタン産の苦鉄質岩類）の弾性波速度と地震波速度構造を温度補正なしで比較し、伊豆小笠原弧の中部地殻および下部地殻の構成岩石種を推測した。その結果、伊豆衝突帯下から沈み込む伊豆小笠原弧下部地殻は角閃石斑れい岩を主要な構成岩石とすることを見いだし、それが伊豆衝突帯下の関東地震震源断層下を構成するモデルを提示した。また、伊豆衝突帯で陸側に付加する伊豆小笠原弧の中部地殻はトーナル岩を主要な構成岩石とすることを見いだし、それが伊豆衝突帯下の関東地震震源断層上を構成するモデルを提示した。トーナル岩の P 波速度と全岩化学組成や鉱物モードとの関係を実験から求め、そのトーナル岩の平均化学組成（SiO_2＝60wt%）と構成鉱物割合（石英 25vol%、斜長石 50vol%、角閃石等の有色鉱物 25vol%）を初期モデルとして提示した（図 8、P.93）。

今年度、提唱した首都圏西部の地殻構成岩石モデルについては、関東地域の地殻物性を定量的に見積もる際には、欠かせない初期モデルであり、今後、これらの地殻構成岩石モデルを活用した調査が重要な課題である。

また、首都圏東部に沈み込むフィリピン海スラブの地殻構成岩石については、海洋地殻に由来する岩石の弾性波速度に関する基礎データも収集されておらず、今後、早急にデータを収集する必要がある。

(d) 引用文献

1) Sato, H., Hirata, N., Koketsu,K. Okaya, D., Abe, S., Kobayashi, R., Matsubara, M., Iwasaki, T., Ito, T., Ikawa, T., Kawanaka, T., Kasahara, K., and Harder, S.: Earthquake Source Fault Beneath Tokyo, Science 309, 462-464, 2005.
2) Kawate, S. and Arima, M.: Tanzawa plutonic complex, central Japan: Exposed felsic middle crust of Izu arc, The Island Arc, 7: 342-358, 1998.
3) Taira, A., Pickering, K. T., Windley, B. F., Soh, W.: Accretion of Japanese island arcs and implications for the origin of Archean greenstone belts, Tectonics, 11, 1224-1244, 1992.
4) 石川正弘，田山良一，有馬眞:丹沢山地に露出する伊豆弧地殻断面，伊藤慎，小竹信宏

編集，日本地質学会第 111 年学術大会見学旅行案内書，57-70，日本地質学会 2004.
5) Coward MP, Jan MQ, Rex D, Tarney J, Thirlwall MF, Windley BF.: Geo-tectonic framework of the Himalaya of N Pakistan, Journal of the Geological Society, London, 139, 299-308, 1982.
6) Coward MP, Windley BF, Broughton RD, Luff IW, Petterson MG.: Collision tectonics in the NW Himalayas. In: Coward MP, Ries AC, editors. Collision Tectonics. Geological Society, London, Special Pubications. 19, 203-219, 1986.
7) Treloar PJ, Petterson MG, Jan MQ, Sullivan MA.: A re-evaluation of the stratigraphy and evolution of the Kohistan arc sequence, Pakistan Himalaya: Implications for magmatic and tectonic arc-building processes. Journal of the Geological Society, London, 153, 681-693, 1996.
8) Kitamura, K., Ishikawa, M., and Arima, M.: Petrological model of the northern Izu–Bonin–Mariana arc crust: constraints from high-pressure measurements of elastic wave velocities of the Tanzawa plutonic rocks, central Japan, Tectonophysics, 371, 213-221, 2003.
9) Ishikawa, M., Arima, M.: Laboratory measurements of ultrasonic wave velocities of crustal rocks at high pressures and temperatures: Petrological structure of Izu-Bonin-Mariana arc crust, Alok K. Gupta, Somnath Dasgupta editors, Physics and Chemistry of the Earth's Interior. Crust, Mantle and Core, 143-152, Springer-Verlag, 2009.
10) Kitamura, K. and Ishikawa, M.: Rock Velocities at Atmospheric Pressure and Room Temperature in Tanzawa Plutonic Rocks from Central Japan, Memoirs of National Institute of Polar Research, Special issue, 53, 192-202, 1998
11) Suyehiro,K., Takahashi,N., Ariie,Y., Yokoi,Y., Hino,R., Shinohara, M., Kanazawa,T., Hirata,T., Tokuyama.H. and Taira,A.: Continental crust, crustal underplating, and low-Q upper mantle beneath an oceanic island arc. Science, 272, 390-392, 1996.
12) Takahashi, N., Suyehiro, K. and Shinohara, M.: Implications from the seismic crustal structure on the northern Izu-Bonin arc. The Island Arc, 7, 383-394, 1998.
13) 石川正弘：伊豆衝突帯の岩石学的地殻構造モデルと地震テクトニクス，月刊地球，号外57，166-172, 2007.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所（学会等名）	発表時期	国際・国内の別
Stepwise Changes in Vp, Vs and Vp/Vs in Gabbroic Rocks（ポスター）	Ishikawa, M.	Moscone Convention Center, San Francisco, CA, USA（American Geophysical Union）	平成24年12月6日	国際

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願，ソフトウエア開発，仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3)平成２５年度業務計画案

海洋地殻に由来する岩石を対象として弾性波速度測定実験を行い、海洋地殻起源岩石の弾性波速度データセットを構築する。また、得られた弾性波速度に関する基礎データセットに基づき、首都圏東部に沈み込むフィリピン海スラブの地殻構成岩石に関する初期モデルを得る。

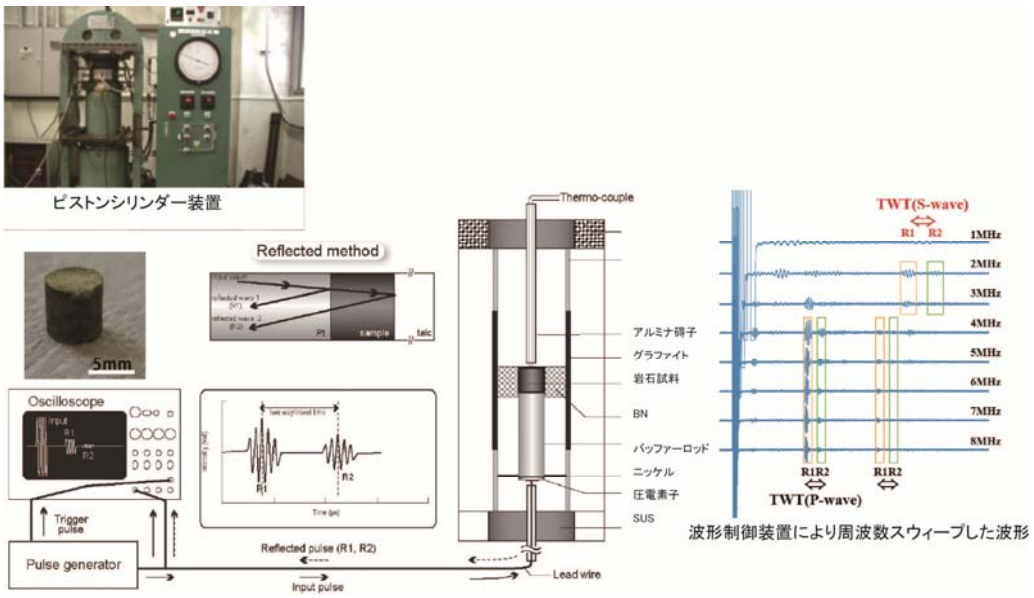

図１　高温高圧下での岩石の弾性波速度実験

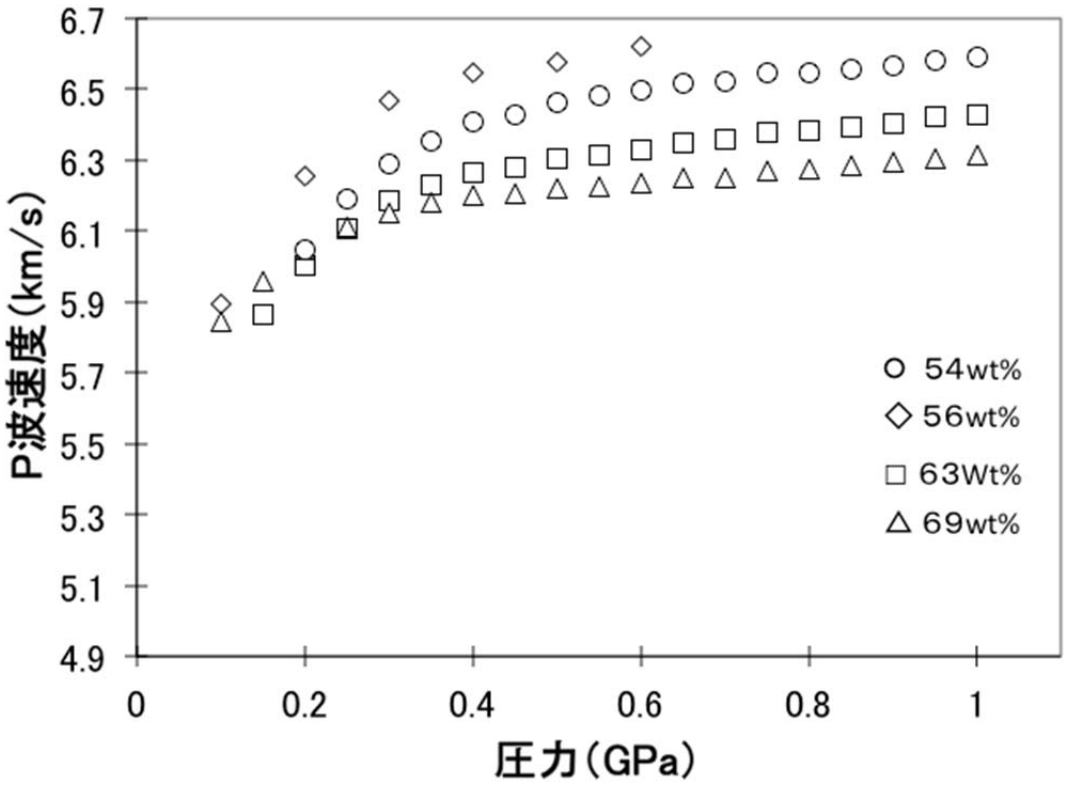

図 2　弾性波速度測定実験結果（室温）。トーナル岩 4 試料の P 波速度と圧力の関係。

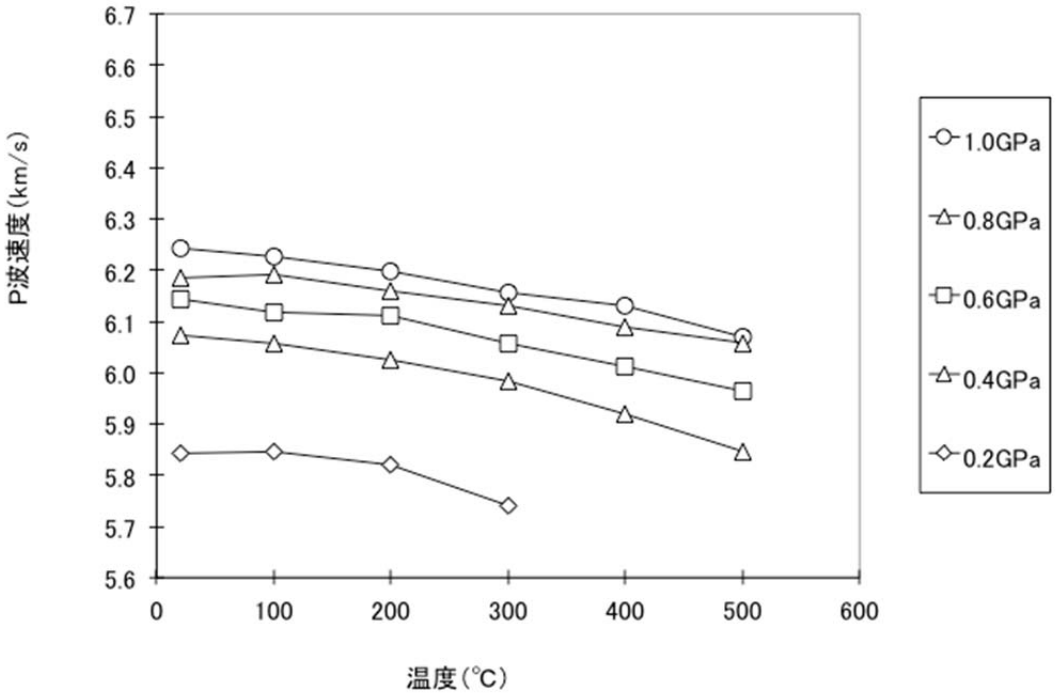

図 3　弾性波速度測定実験結果。トーナル岩（SiO_2=69wt%）の P 波速度と温度・圧力の関係。

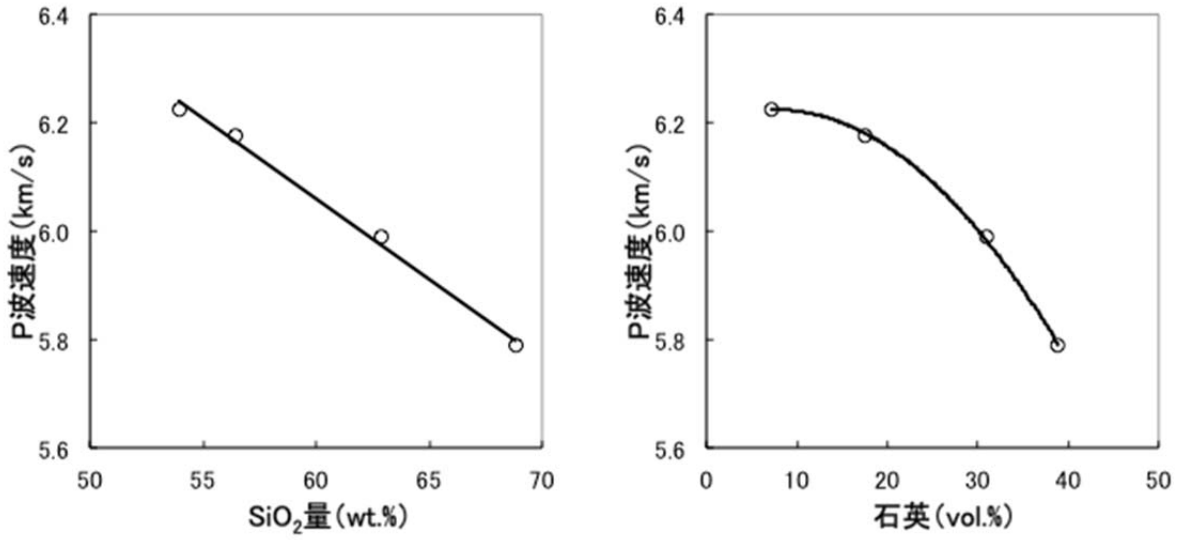

図 4　弾性波速度測定実験結果。トーナル岩の P 波速度と SiO_2 含有量および石英の含有量との関係。圧力は 0.2GPa。

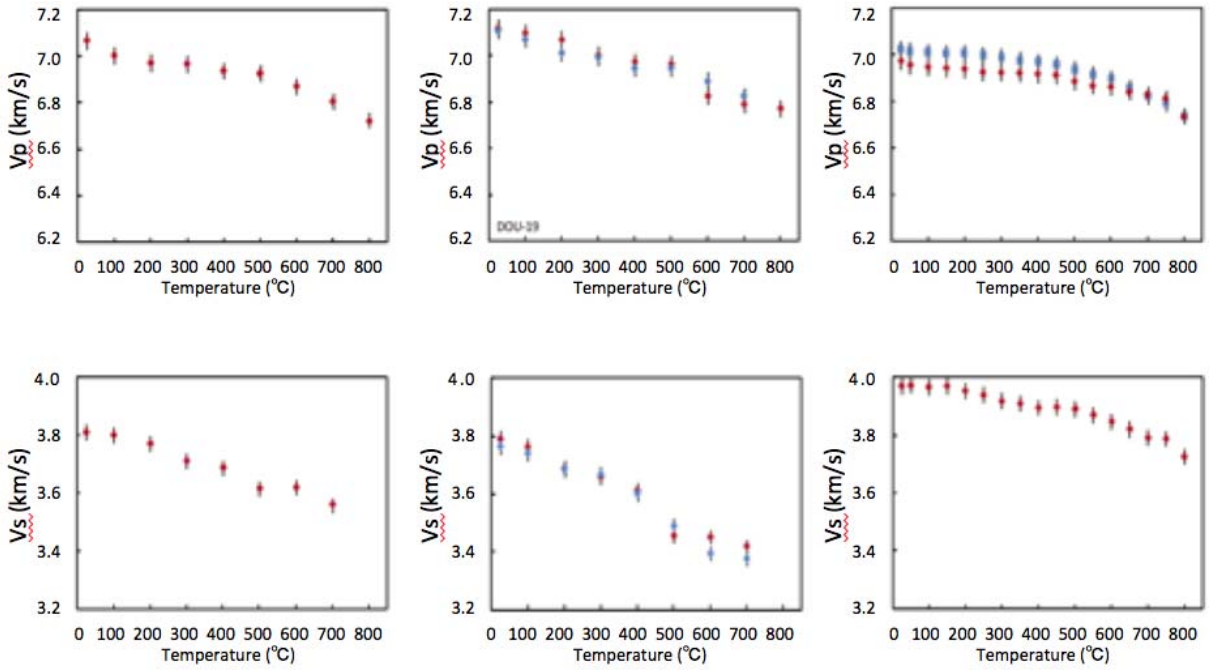

図 5　弾性波速度測定実験結果。角閃石はんれい岩 3 試料の P 波速度（Vp）および S 波速度(Vs)（赤：加熱時、青：冷却時の実験)。産地は大棚沢周辺（左）と道志周辺（中央、右)。

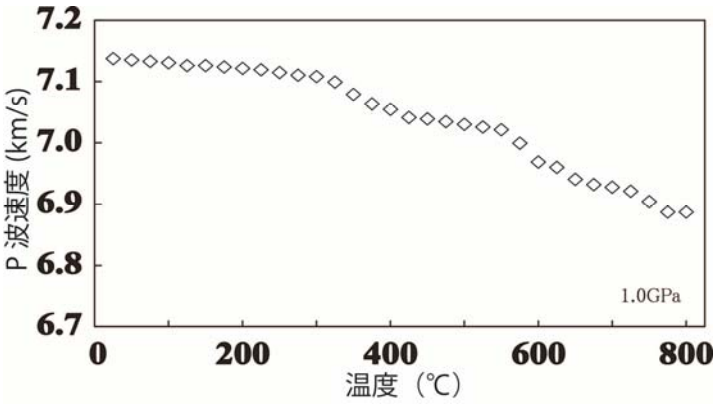

図 6　弾性波速度測定実験結果。ガブロノーライトの P 波速度（Vp）。

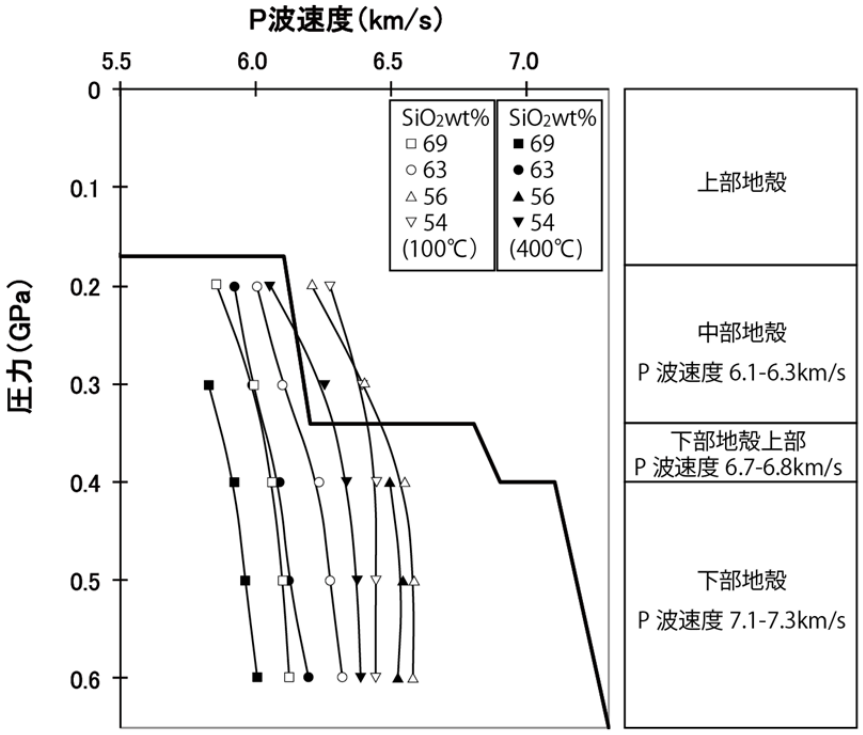

図 7　丹沢山地に産するトーナル岩の P 波速度を伊豆小笠原弧の P 波速度構造と直接比較。

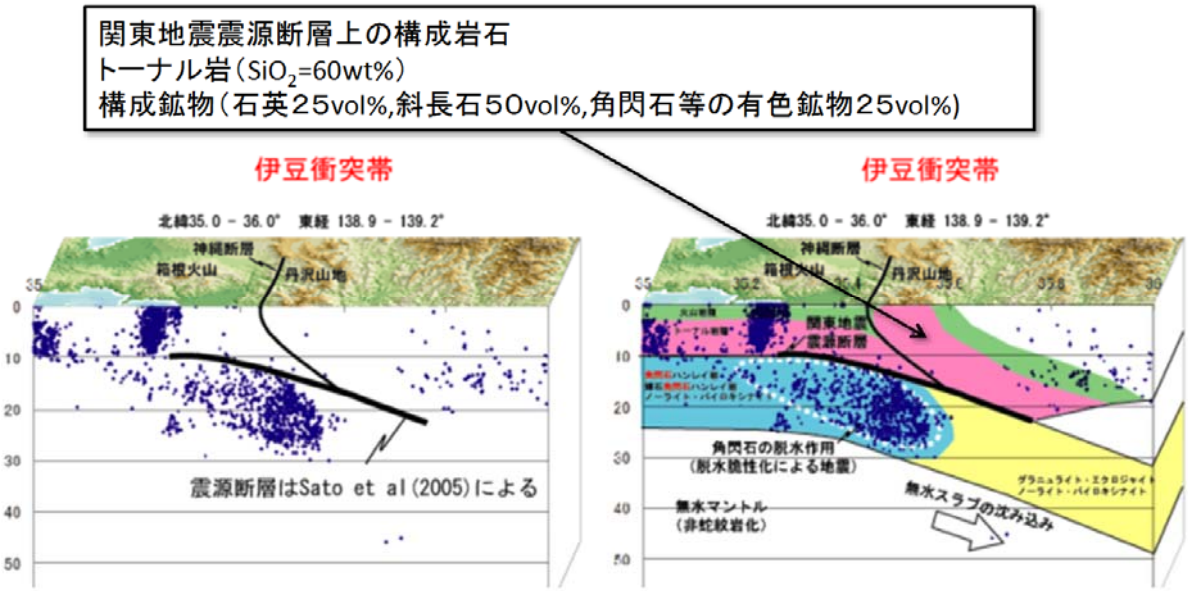

図 8　伊豆小笠原弧の地震波速度構造（Suyehiro *et al.*, 1996[11]）は、首都圏西部の地殻構成を考えるうえで重要な拘束条件を与える。伊豆小笠原弧は厚さ約 20km の島弧地殻を有し、中部地殻に最大層厚 8km に達する 6.1－6.3km/s 層(P 波速度)が発達している。中部地殻は島弧地殻全体の約 30%の体積を占め、火山フロントから島弧中央部で厚く発達している。伊豆弧の地震波速度構造と丹沢深成岩類の弾性波速度を比較した。その結果、中部地殻（6.1－6.3km/s 層）はトーナル岩、下部地殻上層（6.8－6.9km/s 層）は角閃石と斜長石を主要構成鉱物とする角閃石斑れい岩から構成されることが推測された。図 4 に示した結果から、伊豆小笠原弧の中部地殻構成岩石は SiO_2=60wt%のトーナル岩で、その構成鉱物は石英 25vol%、斜長石 50vol%、角閃石等の有色鉱物 25vol%であると推測される。この岩石が伊豆衝突帯における関東地震震源断層上の構成岩石と推測される。伊豆衝突帯下から沈み込むフィリピン海スラブは角閃石斑れい岩を主要な構成岩石と推測され、それが伊豆衝突帯下の関東地震震源断層下を構成すると推測される。