

3. 2. 5. 3 構成岩石モデルの構築

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 8か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
 - 1) 平成25年度
 - 2) 平成26年度
 - 3) 平成27年度
 - 4) 平成28年度
 - 5) 平成29年度
 - 6) 平成30年度
 - 7) 平成31年度
 - 8) 平成32年度
- (e) 平成29年度業務目的

(2) 平成29年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 平成30年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

2.5.3 構成岩石モデルの構築

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
横浜国立大学大学院環境情報研究院	教授	石川正弘

(c) 業務の目的

海陸地殻構造探査などの制御震源による速度構造や自然地震による速度構造などと、高温高压下での岩石の弾性波速度の室内計測実験に基づいて、日本海沿岸域から陸域の構成岩石を推定する。推定した構成岩石をもとにレオロジー特性を求め、それによって地震発生層の下限を推定する。

(d) 8か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成25年度：

岩石と鉱物の弾性波速度およびレオロジーに関する既存データを整理した。日本海東縁周辺部の地殻構成岩石に関する初期モデル（プロトタイプ）を作成した。翌年度以降の高温変形実験にむけて万能試験機を導入した。

2) 平成26年度：

岩石と鉱物の弾性波速度およびレオロジーに関する既存データを整理。主要造岩鉱物の多結晶焼結体を作成した。岩石の弾性波速度測定実験を行った。万能試験機による高温変形実験の準備段階として予備実験を行った。

3) 平成27年度：

地殻深部を構成する岩石とその主要造岩鉱物の弾性波速度測定実験を行った。主要造岩鉱物の多結晶体の焼結実験を行った（焼結実験対象については、前年度までの弾性波速度測定実験の進捗状況も踏まえて決定）。多結晶焼結体の高温変形実験を行った。

4) 平成28年度：

引き続き弾性波速度測定実験を実施した。多結晶体の焼結実験を行った。多結晶焼結体の高温変形実験を行った。弾性波速度およびレオロジーに関する既存データを再度整理した。日本海および日本海東縁陸上の地殻構造探査結果を踏まえて地殻構成岩石モデルを更新した。

5) 平成29年度：

地殻深部を構成する岩石の焼結実験を行い、多結晶焼結体を用いて弾性波速度測定実験を行った。地殻構成岩石の推定を行い、地震発生層下限と地殻構成の比較から温度構造を

検討した。地震発生層下限モデルを地殻構成と温度構造を推定するために行った。本震の深さが明瞭で、滑り分布が明らかにされている断層を選別し、地震発生層の下限と地殻構成の関係について比較検討した。

6) 平成30年度：

地殻深部を構成する岩石の弾性波速度測定実験を行う。主要造岩鉱物の多結晶体の焼結実験を行う。多結晶焼結体の高温変形実験を行う。

7) 平成31年度：

地殻深部を構成する岩石の弾性波速度測定実験を行う。主要造岩鉱物の多結晶体の焼結実験を行う。多結晶焼結体の高温変形実験を行う。平成29年度から平成31年度に得られた弾性波速度実験結果を加えて、岩石と鉱物の弾性波速度に関する既存データを再度整理する。地殻構成岩石モデルを更新する。

8) 平成32年度：

平成31年度に引き続き、地殻深部を構成する岩石の弾性波速度測定実験、主要造岩鉱物の多結晶体の焼結実験、多結晶焼結体の高温変形実験を実施する。また、これまで8年間の弾性波速度測定実験で得られた弾性波速度データと、他のサブテーマ等で得られた地殻構造探査結果を踏まえて、東北日本沖と東北日本の沿岸域の地殻－マントルの境界付近の構成岩石モデルをとりまとめる。

(e) 平成29年度業務目的

下部地殻・マントル岩の弾性波速度と地震波速度構造を比較することにより正確に地殻構成岩石を推定する。地殻構成と温度構造を推定するために岩石鉱物の弾性波速度測定実験を行う。本震の深さが明瞭で、滑り分布が明らかにされている断層を選別し、地震発生層の下限と地殻構成の関係について比較検討する。

(2) 平成29年度の成果

(a) 業務の要約

岩石鉱物の弾性波速度の視点から地震波トモグラフィを解釈することで東北本州弧の上部地殻の層厚や地殻構成を推定した。本震の深さや余震分布が明瞭で、滑り分布が明らかにされている断層について、強度プロファイルを計算して、地震発生層の下限と地殻構成の関係について比較検討した。地震発生層下限モデルを検討する上で温度構造の推定が重要であるので、 V_p/V_s トモグラフィから同一岩石種が分布すると推定される領域の V_p パータベーションを抽出することで、東北本州弧の地殻及び最上部マントルの定性的な温度分布を判読した。また、 V_p パータベーションから温度構造を推定する際に岩石の弾性波速度の温度依存性が重要なパラメータなので、本年度は、単斜輝石の多結晶焼結体の弾性波速度測定を行ない、P波速度や V_p/V_s と温度との関係に関する基礎データを得た。

(b) 業務の成果

透輝石は斜方輝石とともに下部地殻や上部マントルの重要な構成鉱物の一つである。その物性は、日本海から日本列島周辺の地殻深部やマントル最上部の構成岩石などを理解する上で重要であるが、地殻深部やマントル最上部相当の温度圧力条件における透輝石の弾性波速度測定は行われていない。本研究では透輝石の極細粒粉末を用いた焼結実験を行った。具体的には、粉碎機を用いて約 100 nm の極細粒粉末を準備し、電気炉を用いて透輝石多結晶体を焼結した。この手法で焼結した透輝石多結晶体を用いて物性評価を行うことが可能になった。本年度は弾性波速度実験に加えて高温変形実験を行ったが、粘性に関するデータを得るまでには至らなかった。これについては次年度も継続する予定であるが、焼結試料作成にかなりの時間を要することと、本プロジェクトにおける議論を踏まえて温度構造の推定が重要となってきたため、弾性波速度測定実験を重点的に行うこととした。

本研究では、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、焼結実験で準備した多結晶透輝石を試料として最大圧力 1.0 GPa で弾性波速度測定実験を行った。弾性波速度実験の結果を図 1 に示す。なお、実験は坪川祐美子氏（横浜国立大学）の協力を得て行われた。室温下において P 波速度 (V_p)、S 波速度 (V_s) は昇圧とともに増加した。1.0 GPa において、P 波速度および S 波速度は温度増加とともに減少した。100°Cあたりの P 波速度の速度低下率は約 0.04 km/s である。一方、 V_p/V_s の温度依存性は非常に小さいことが実験から示された。以上をまとめると、本研究では天然透輝石を極細粒に粉碎し、透輝石多結晶体を焼結した。また、透輝石多結晶体を用いた高温高压下での弾性波速度測定実験を行うことで、透輝石多結晶体の P 波速度および S 波速度の温度依存性を測定した。岩石・鉱物の P 波速度および S 波速度と温度の関係を明らかにすることは、P 波速度パータベーションや S 波速度パータベーションから地下深部の温度構造を推定する際に重要であり、今回得られた実験結果は今後の温度構造の推定に役に立つと期待される。

地震発生層下限モデルを検討する上で、温度構造モデルは重要である。本研究では、本震の深さや余震分布が明瞭で、滑り分布が明らかにされている断層を対象として、断層周辺部の地殻構成モデルとレオロジーモデルから、余震分布や滑り分布の下限を説明する地温勾配を推定することを試みた。本年度は昨年度に引き続き、2000 年鳥取県西部地震を対象とした。図 2 は鳥取県西部地震の震源断層にほぼ直行する方向の V_p/V_s トモグラフィと断層を境にした東西の強度プロファイルの推定の例である。上部地殻に関しては、震源断層の西側では V_p/V_s が低く、震源断層東側では V_p/V_s が高い。震源断層を境に西側の上部地殻は石英を主要構成鉱物とする岩石（地表地質から花崗岩が有力候補）で構成される一方で、震源断層を境に東側の上部地殻は苦鉄質であると考えられる。強度プロファイルの推定には脆性領域は Byerlee's law ¹⁾ で計算し、地震学的に推定されている地殻強度 ²⁾ に相当する 20 MPa を上限強度と仮定した。断層西部は石英質上部地殻、断層東部は閃緑岩質上部地殻であると仮定して石英と閃緑岩のレオロジーパラメータを用いた。下部地殻の流動応力は輝緑岩のレオロジーパラメータを用いた。様々な地温勾配で強度プロファイルを計算した結果、地温勾配が 28.5°C/km のとき、余震分布の下限（深さ約 12 km）³⁾ と滑り分布の下限深度（17 km）³⁾ のギャップを説明することが可能である（図 2）。地温勾配

が $28.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ のとき、断層東側の脆性領域は深さ 17.8 km と計算されるが、断層西側の脆性領域下限は深さ 12 km と計算される。つまり、2000 年鳥取県西部地震の本震の地震分布下限と滑り下限深度が大きく異なるのは、上部地殻の構成岩石が震源断層を境に異なることに起因すると考えられ、地温勾配を $28.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ とすると、深さ 12 km までは断層の両側とも脆性的な地殻が接するために断層は脆性的であるが、深さ $12\text{--}17.8\text{ km}$ の間は断層西側が塑性的であるために滑ったと解釈できる。

上記とは異なる手法で、地震波トモグラフィから温度構造の推定を試みた。高温高压条件における弾性波速度測定実験から、岩石のP波速度やS波速度には温度依存性がある一方で、 V_p/V_s は温度依存性が著しく小さく、岩石種に大きく依存することが判明している⁴⁾。つまり、 V_p/V_s トモグラフィから同一岩石種が分布する領域を抽出することで、 V_p パータベーションを温度の揺らぎとして解釈することが可能である。本研究では、防災科学技術研究所の三次元地震波速度構造¹⁾を用いて、特定範囲の V_p/V_s 域のP波速度構造を抽出することで、同一岩石種が分布すると推定される範囲において、温度のゆらぎを速度構造から定性的に推定することを試みた。図3は東北本州弧の日本海沿岸から太平洋沿岸までの深さ 15 km の地震波トモグラフィ⁵⁾である。日本海沿岸周辺の上部地殻は相対的に高い V_p/V_s で特徴づけられ、中新世リフト活動に伴って形成した玄武岩質地殻であると推定される。それ以外の地域は全般的に V_p/V_s が低く、石英を主要鉱物とする岩石が主要構成岩石であると推定される。地震波速度構造から温度構造を推定するために、まず、 V_p/V_s トモグラフィから石英質岩石が分布すると推定される範囲 ($V_p/V_s < 1.71$) を抽出した。次に、同領域の V_p パータベーションを抽出することによって、定性的な温度のゆらぎ構造として解釈した。図4には深さ 15 km と 25 km で推定された地殻内部の温度構造を、図5には深さ 35 km で推定された最上部マンタルの温度構造を示した。深さ 35 km では東北本州弧中軸部周辺に相対的な高温域が分布することが読み取れ、深さ 15 km と比較して広域的な温度分布傾向が判読された。

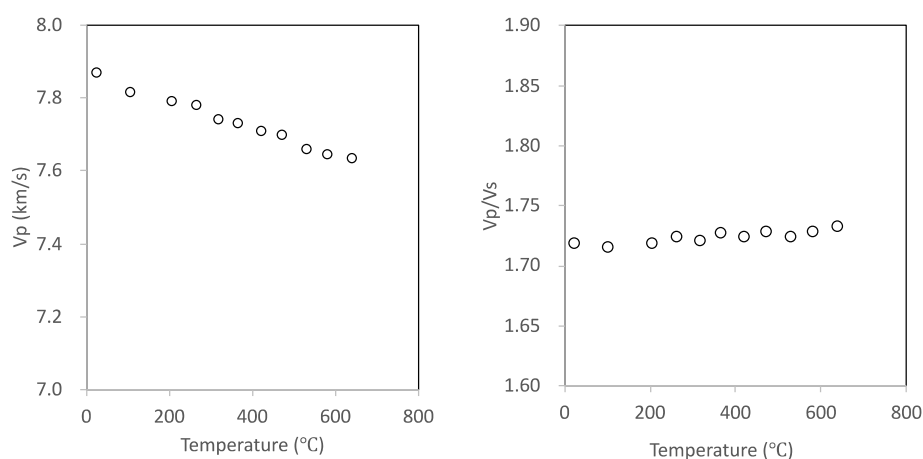


図1 圧力 1.0 GPa における多結晶透輝石のP波速度と V_p/V_s 。

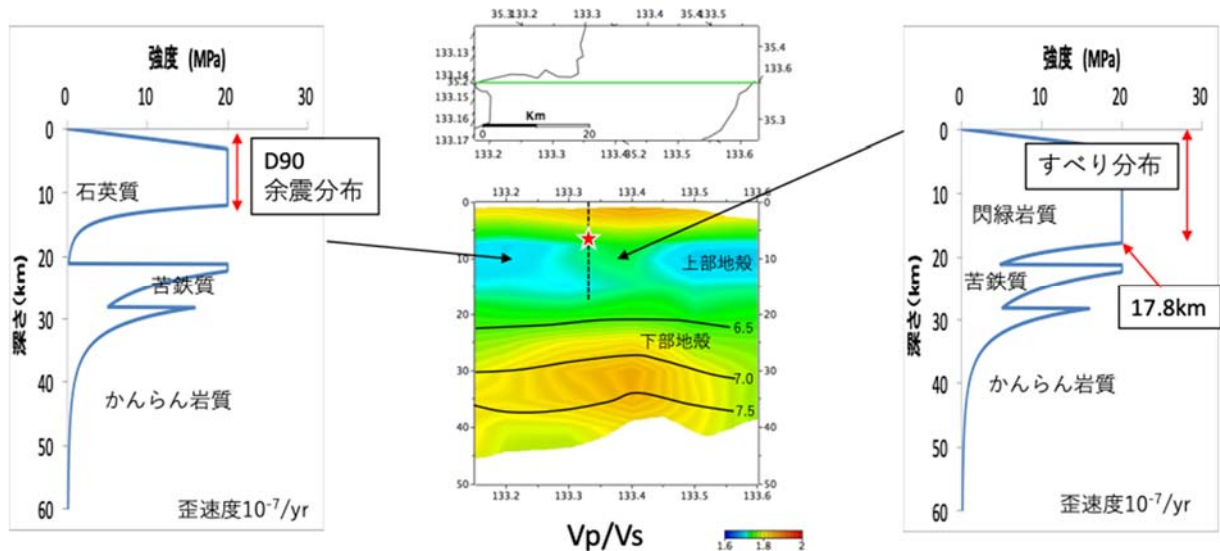


図 2 鳥取県西部の地下強度プロファイルの推定の例。脆性領域は Byerlee's law¹⁾ で計算、上限強度を 20 MPa と仮定、断層西部は石英質上部地殻、断層東部は閃緑岩質上部地殻として計算。歪速度は 10^{-7} /年。地温勾配は $28.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。2000 年鳥取県西部地震の余震分布の下限は約 12 km であるが、滑り分布の下限深度は 17 km と推定されている。

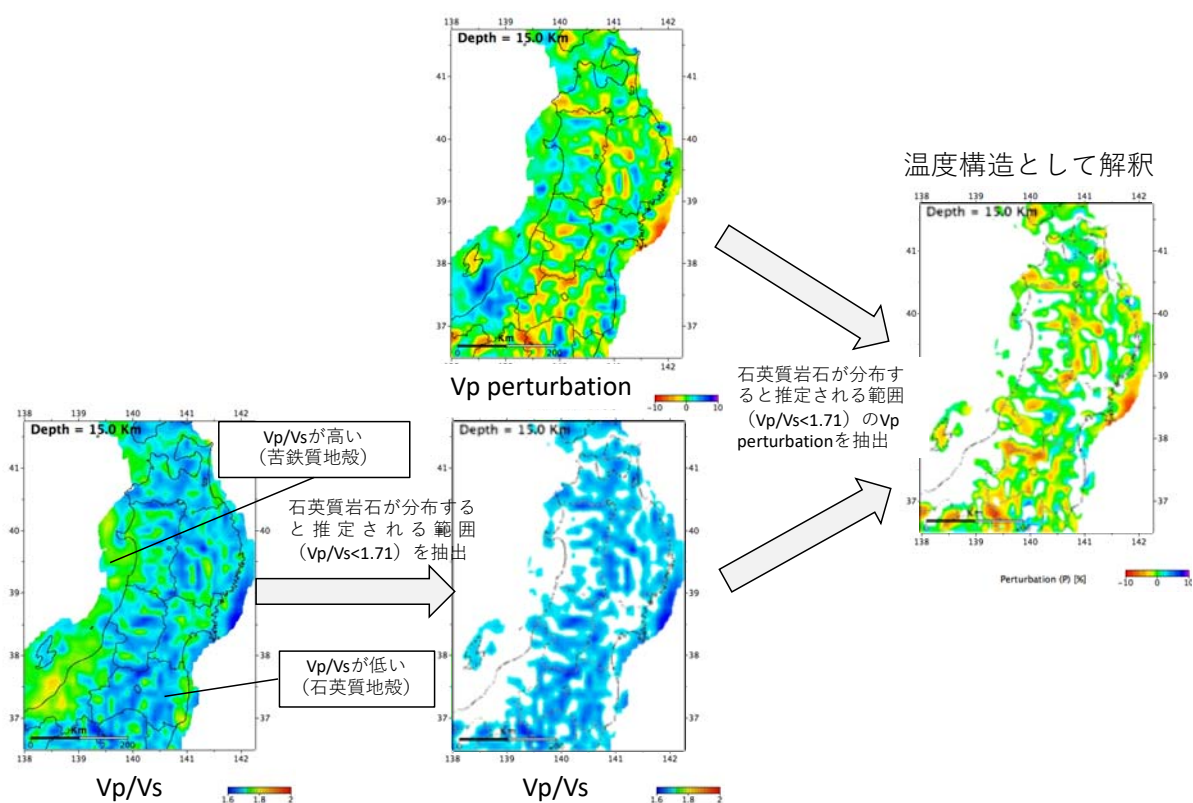


図 3 地震波速度構造から温度構造を推定する手順。

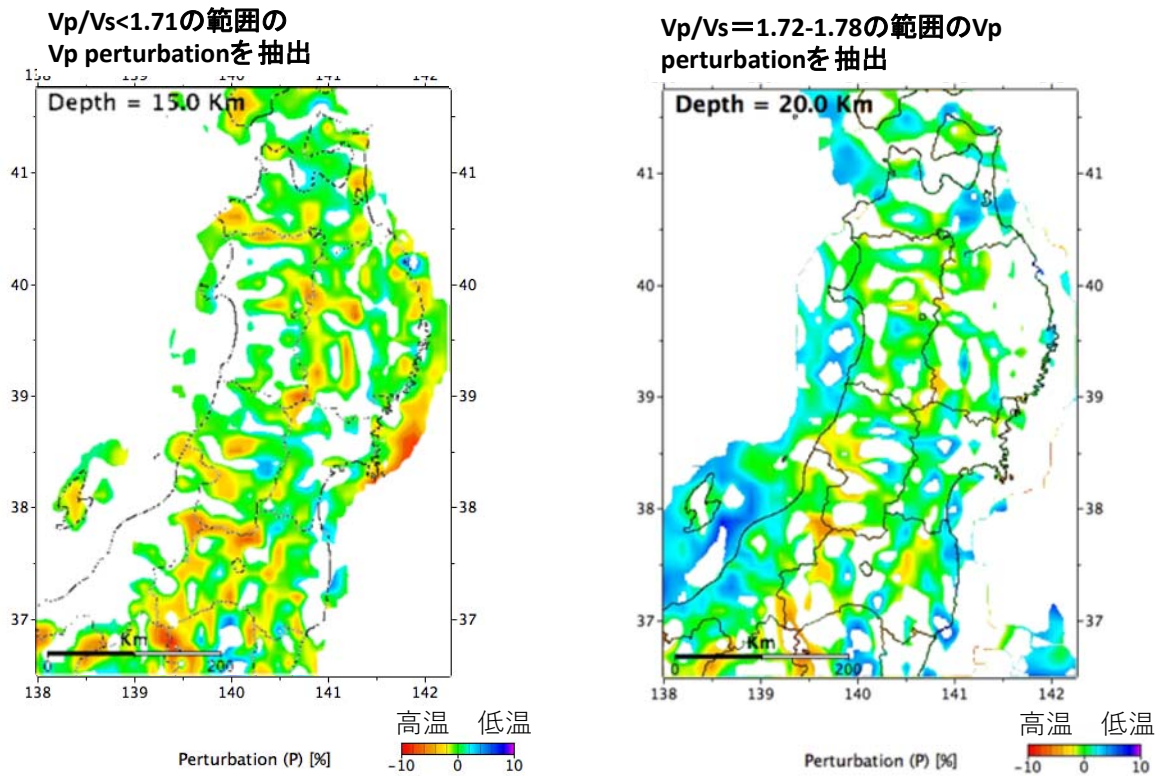


図 4 地震波速度構造から推定される地殻内部の定性的な温度構造。(左) 深さ 15 km、(右) 25 km。

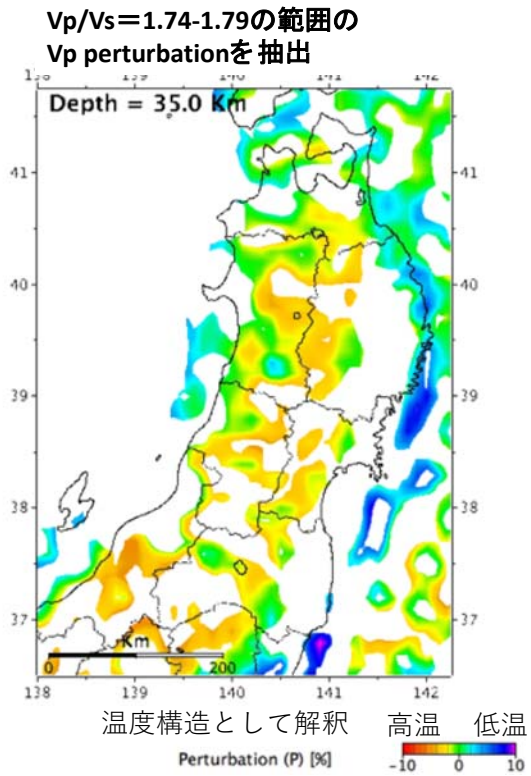


図 5 地震波速度構造から推定される最上部マントルの定性的な温度構造。深さ 35 km。

(c) 結論ならびに今後の課題

本震の深さや余震分布が明瞭で、滑り分布が明らかにされている断層について、地下の地温勾配を変化させながら、地下強度プロファイルを計算して、地震発生層の下限と地殻構成の関係について比較検討した。今年度の計算では、強度プロファイルの推定には脆性領域は Byerlee's law¹⁾ で計算し、その上限強度を 20 MPa と仮定した。2000 年鳥取県西部地震域に関しては、地温勾配を約 28.5°C/km と仮定すると、余震分布の下限（深さ約 12 km）と滑り分布の下限深度（17 km）を説明することが可能である。今後は、本震の深さが明瞭で、滑り分布が明らかにされている他の断層について、地震発生層の下限と地殻構成の関係について比較検討を計画している。地殻構成岩石モデルは、提唱した断層下限深度を定量的に見積もる際には欠かせないので、次年度以降も継続して、地殻構成岩石モデルを更新する。

断層下限を説明する最も妥当な岩石の粘性パラメータを検討するために、岩石と鉱物に関する既存の粘性パラメータから最も妥当なものを選別する作業を進めていく必要がある。当初計画では焼結多結晶体を対象に変形実験を行う計画であった。岩石の粘性パラメータを求めるためには、幾度となく変形実験を実施することになる。これは粘性を確度高く求めるためであり、また実験自体が極めて繊細なものであり失敗することも少なくないからである。変形実験および弾性波速度計測に用いる焼結多結晶体試料の作成は容易ではなく、限られた期間の中で、十分量の試料を準備することが出来なかった。このため変形実験を十分に実施することが出来ず、岩石の粘性パラメータを確定することが出来なかった。この点は引き続き次年度の課題として取り組んでいくことを考えている。

地震発生層下限モデルを検討する上で温度構造の推定が本質的に重要な課題となっており、本年度は東北本州弧の地震波速度構造から定性的な温度構造の推定を試みた。Vp/Vs トモグラフィから同一岩石種が分布すると推定される領域の Vp パータベーションを抽出することで、地殻内部の定性的な温度分布を判読した。例えば、深さ 25 km では東北本州弧中軸部周辺に相対的な高温域が分布することが推定された。今後の課題としては、より広範囲において温度構造を推定することと、半定量的に地殻内部の温度分布を推定することが挙げられる。

本年度は、地殻深部条件相当の温度圧力条件の既存データが乏しい透輝石を対象として弾性波速度測定を行った。地殻構成岩石モデルを改善するために、また、温度構造を推定するために、引き続き不十分な岩石・鉱物について弾性波速度測定実験を行う必要がある。

(d) 引用文献

- 1) Byerlee J. D.: Friction of rocks. Pure and Applied Geophysics, Vol.116, pp.615–626, 1978.
- 2) 飯尾能久, 松澤暢: 東北地方太平洋沖地震の発生過程: なぜ M9 が発生したのか?, 地質学雑誌, 118 巻, 248-277, 2012.
- 3) Shibutani, T., Katao, H. & Group for the dense aftershock observations of the 2000 Western Tottori Earthquake Earth Planet Sp, Vol.57: 825. Doi : 10.1186/BF03351861, 2005.
- 4) Nishimoto, S., Ishikawa, M., Arima, M. and Yoshida, T.: Laboratory measurement

of P-wave velocity in crustal and upper mantle xenoliths from Ichino-megata, NE Japan: ultrabasic hydrous lower crust beneath the NE Honshu arc. Tectonophysics, Vol.396, pp.245-259, 2005.

- 5) Matsubara, M., Obara, K. and Kasahara, K.: Three-dimensional P- and S-wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, Tectonophysics, Vol.454, pp.86-103, 2008.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
石川正弘	岩石の弾性波速度に基づく島弧地殻深部及び最上部マントルの構成岩石の推定：伊豆弧と東北本州弧（論文発表）	地質学雑誌, 123 巻, 355-364 頁	平成 29 年 6 月
石川正弘	地殻構成岩石と活断層のすべり下限及び余震分布の関係：鳥取県西部地震、能登半島地震、新潟中越沖地震の例（ポスター発表）	日本地質学会第 124 年学術大会（松山市）	平成 29 年 9 月 18 日
石川正弘	地殻構成岩石と断層すべり下限：日本海沿岸および周辺の例（ポスター発表）	地殻ダイナミクス全体集会（米子市）	平成 29 年 9 月 24 日-26 日

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

下部地殻・マントル岩の弾性波速度と地震波速度構造を比較することで地殻構成岩石と上部地殻・下部地殻境界を推定する。断層について地震発生層の下限と地殻構成の関係について比較検討する。岩石物性の視点から地震発生層の下限モデルを検討する。本震の深さが明瞭で、滑り分布が明らかにされている断層を選別し、平成 30 年度以降の研究対象地域を検討する。地殻深部を構成する岩石の弾性波速度測定実験、主要造岩鉱物の多結晶体の焼結実験、多結晶焼結体の高温変形実験を行い、岩石物性に関する基礎データを得る。