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)　令和元年度
8)　令和２年度
(e) 平成３０年度業務目的

(2)　平成３０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、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

(3)　令和元年度業務計画案

(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、高温高圧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した。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（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、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。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東北日本の地殻構成岩石を推定した。岩石鉱物の弾性波速度の視点から東北日本の地殻内部の温度構造を検討した。地殻深部を構成する岩石の岩石物性に関する基礎データを整理・取得した。

7) 令和元年度：

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 年度から令和元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) 令和２年度：

令和元年度に引き続き、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３０年度業務目的

平成 29 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。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。

(2) 平成３０年度の成果

(a) 業務の要約

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した。東北日本の下部地殻・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し、岩石弾性波速度の視点から下部地殻の温度構造を定性的に推定した。本震の深さと滑り分布

が明らかにされている平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震の震源断層域や東北日本について地震発生層の下限と温度構造の関係について比較検討した。

(b) 業務の成果

本研究の目標は、地殻マントルの地震波速度[1)]から構成岩石を推定し、断層下限（地震発生層下限）を推定することである（図1)。断層下限（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必要であり、当初の各年度の研究計画になかった温度構造の推定を行うこととした。

本研究プロジェクトでは下部地殻や上部マントルの主要な構成鉱物に着目し、天然結晶を約100 nmの極細粒粉末まで微粉砕し、電気炉を用いて鉱物多結晶体の焼結実験を行っている。本年度は地殻の主要な構成鉱物の一つであるに着目し、曹灰長石組成の斜長石多結晶体の焼結実験を行った。曹灰長石組成の斜長石の弾性波速度は、地震波トモグラフィを用いて地殻構成や温度構造を推定する上で重要であるが、地殻深部相当の温度圧力条件における弾性波速度測定は行われていない。本研究では、本多聡子氏（横浜国立大学）の協力を得て、ピストンシリンダー型高温高圧発生装置を用いて、曹灰長石組成の斜長石多結晶透輝石を試料として高温高圧下で弾性波速度測定実験を行った。図2は曹灰長石多結晶焼結体のP波速度とS波速度に加えて、同一装置にてこれまで測定された天然岩石や鉱物多結晶体の弾性波速度測定結果を示した。P波速度の100℃あたりの速度低下率は角閃石はんれい岩で7.5 x 10^{-4} km s^{-1} $℃^{-1}$ (400℃以上)、パイロキシナイトで低下率 4.8 x 10^{-4} km s^{-1} $℃^{-1}$、透輝石多結晶焼結体で3.5 x 10^{-4} km s^{-1} $℃^{-1}$、曹灰長石多結晶焼結体で1.53 x 10^{-4} km s^{-1} $℃^{-1}$である。曹灰長石多結晶焼結体の速度低下率が比較的小さい値を示した。

また、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透輝石に関してその多結晶体を用いて変形実験を行なったが（図3)、粘性に関するデータを十分に得るまでには至らなかった。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ており、弾性波速度測定実験を重点的に行った。

岩石鉱物の弾性波速度の視点から防災科学技術研究所の三次元地震波速度構造[1)]を解釈することで東北地方の地殻構成と温度構造を推定する（図4)。北緯40度を東西に横断する東北日本のP波速度パータベーション断面とVp/Vs断面を図5に示す。東北地方の上部地殻は、低Vp/Vsで特徴付けられる上部地殻（石英を主要鉱物とする上部地殻）が広く分布し、中程度のVp/Vsで特徴付けられる上部地殻（苦鉄質上部地殻）が日本海側陸域に分布する。東北地方の下部地殻は、中程度からやや高いVp/Vsで特徴付けられる下部地殻（苦鉄質岩石で構成されると推定）が東西に広く分布している。先行研究[4)]で報告されているように北上山地の下部地殻のみ低Vp/Vsで特徴付けられる下部地殻（石英を主要鉱物とする下部地殻）が存在する。

岩石鉱物の弾性波速度測定実験から、P波速度やS波速度には明瞭な温度依存性が認められるが、Vp/Vsの温度依存性は著しく小さく、Vp/Vs値は岩石種に大きく依存することが判明している[2)]。つまり、Vp/Vs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、P波速度構造またはS波速度構造を温度構造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、任意の範囲のVp/Vs

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推定することを試みた。具体的には、東北日本の三次元地震波速度構造から深度 20 km の下部地殻の温度構造を推定した（図 6、7）。

図 6 は北緯 41 ～38°、東経 140.5～141° の範囲において地下 20 km の地震波速度構造から Vp/Vs=1.75～1.77 の範囲の P 波速度を抽出し、P 波速度の南北変化を示した。P 波速度には北緯 39.8°周辺と北緯 39.1°周辺が低速であり、秋田駒ケ岳・岩手山・八幡平の活火山の分布域の下部地殻と平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震の震源域下の下部地殻が最も高温であると推定される。二つの低速度域の間の北緯 39.7～39.3°には相対的な高速域が見られることから、相対的に下部地殻が低温であると推定される。先行研究[5] の微小地震の深さ分布と本研究で地震波トモグラフィから推定した南北方向の温度構造を対比すると、本研究で推定された高温域ほど微小地震の深さは浅い傾向があり、逆に低温域ほど微小地震の深さは深い傾向があった。先行研究[6] で報告されている微小地震の深さから求められている温度構造の南北変化と調和的な結果である。

図 7A は北緯 39.75 ～40°の東北地方において地下 20 km の地震波速度構造から Vp/Vs=1.75～1.77 の範囲の P 波速度と S 波速度を抽出した。P 波速度と S 波速度の東西変化は地下 20 km の定性的な温度の違いと解釈される。P 波速度と S 波速度ともに奥羽脊梁山脈周辺が最も低速度であり、奥羽脊梁山脈周辺の下部地殻が最も高温であると推定される。P 波速度と S 波速度は東経 141° 付近の北上低地帯と東経 140° 付近の八郎潟に向かって速くなり、男鹿半島から日本海で高速（奥羽脊梁山脈からの速度差は約 0.3 km/s）となる。つまり、脊梁から東西両側に向かって温度が低下し、男鹿半島から日本海で最も低温になると推定される。なお、北上山地でデータが欠落している理由は、北上山地の下部地殻が東北地方の中で特異な下部地殻であるために[2,4]、Vp/Vs=1.75～1.77 の範囲の岩石が存在しないことによる。

図 7B は北緯 39.05 ～39.15°の東北地方において地下 20 km の地震波速度構造から Vp/Vs=1.75～1.77 の範囲の P 波速度と S 波速度を抽出し、P 波速度と S 波速度の東西変化を示した。P 波速度と S 波速度ともに最も低速度な奥羽脊梁山脈の下部地殻が最も高温であると推定される。S 波速度は比較的単調に西に向かって速くなるが、P 波速度は僅かに増減を繰り返しながら西に向かって速くなる。P 波速度と S 波速度ともに日本海で最も高速（脊梁からの速度差は約 0.5 km/s）となる。つまり、脊梁から東西両側に向かって下部地殻の温度が低下し、日本海で最も低温になっていると解釈される。なお、平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震は地下の温度が比較的高温な場所で発生したと解釈できる。

図 7C は北緯 37.75 ～38°の東北地方において地下 20 km の地震波速度構造から Vp/Vs=1.75～1.77 の範囲の P 波速度と S 波速度を抽出した。これらの東西変化は地下 20 km の定性的な温度変化であると解釈される。P 波速度と S 波速度ともに東経 139.7°周辺が最も低速度であり、飯豊山地周辺の下部地殻が最も高温であると推定される。P 波速度と S 波速度は 139.7°周辺から東西方向に向かって速くなり、太平洋で最も高速（東経 139.7°からの速度差は約 0.4 km/s）となる。つまり、下部地殻は飯豊山地から東西両側に向かって温度が低下し、太平洋の東部が最も低温になっていると推定される。

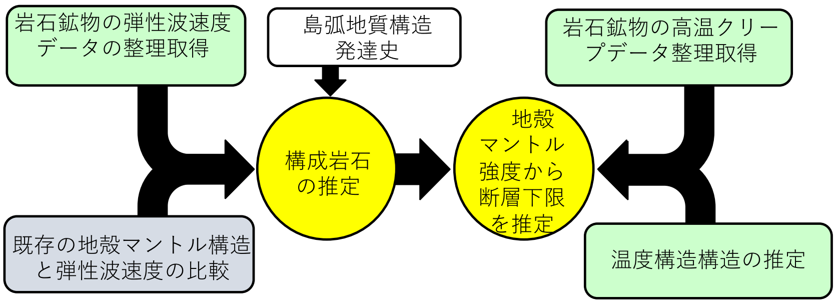

図１　地震発生層下限の推定に向けた研究の手順

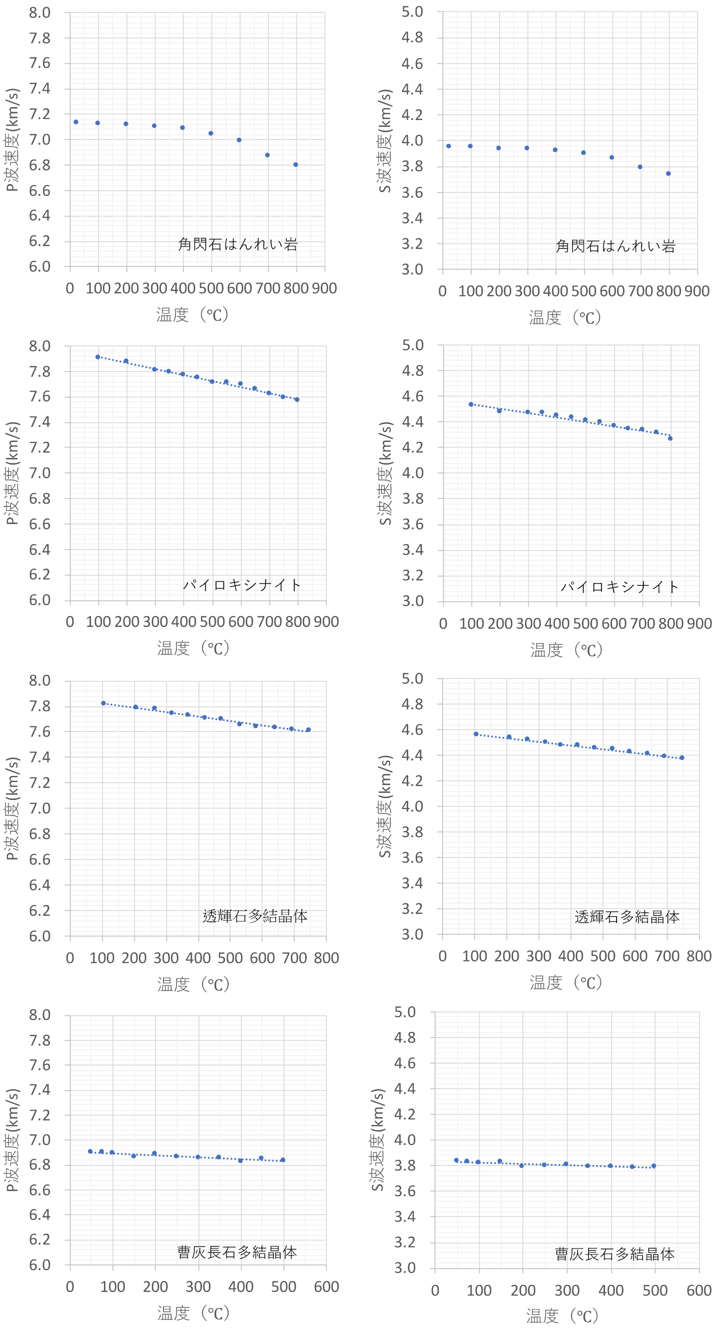

図2　圧力1.0 GPaにおける岩石と鉱物多結晶体のP波速度とS波速度。上から角閃石はんれい岩[2]、パイロキシナイト、透輝石多結晶体、曹灰長石多結晶体。

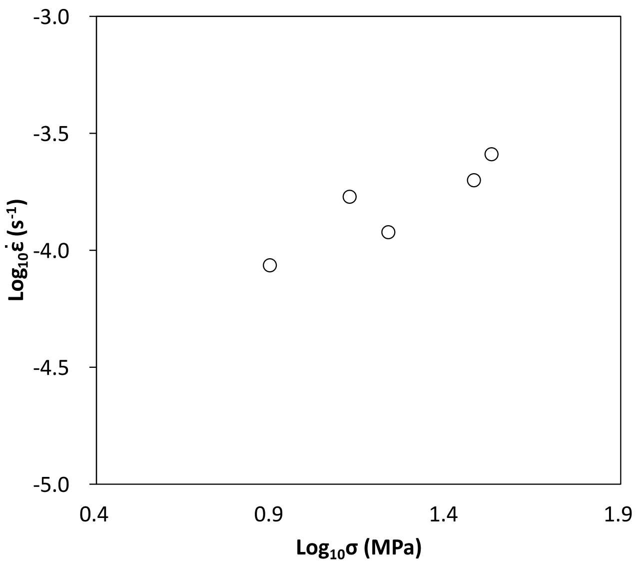

図3　1050℃における透輝石多結晶体の変形実験から得られた応力と歪速度の関係

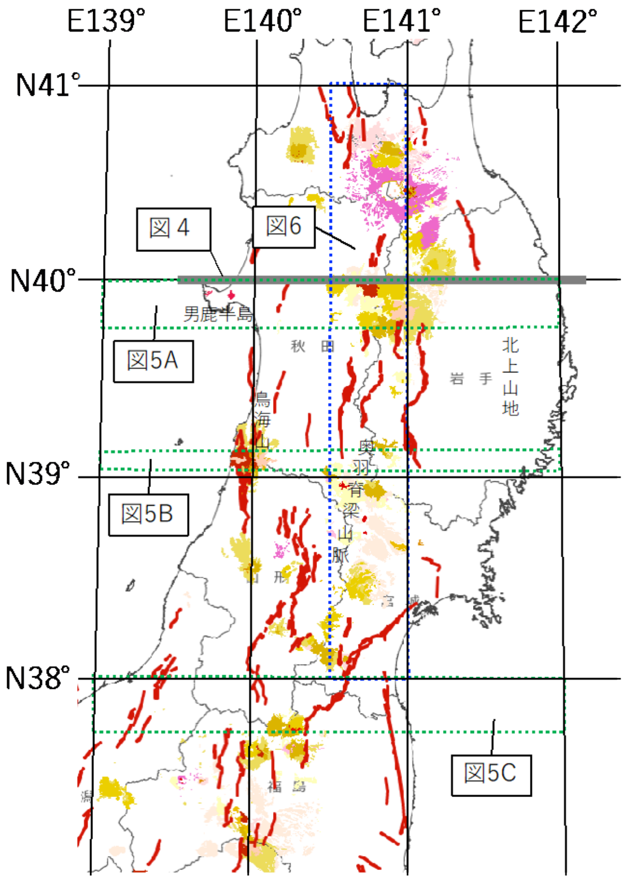

図 4　地殻構成岩石および温度構造の推定範囲。灰色太線は図 4 の地殻構成岩石を推定範囲、緑色の点線は図 5 の東西方向の定性的な温度構造の推定範囲、青色の点線は図 6 の南北方向の定性的な温度構造の推定範囲。背景には 20 万分の 1 日本シームレス地質図 3) を使用し、第四紀火山岩類（有色部）と活断層（赤線）の分布を示した。

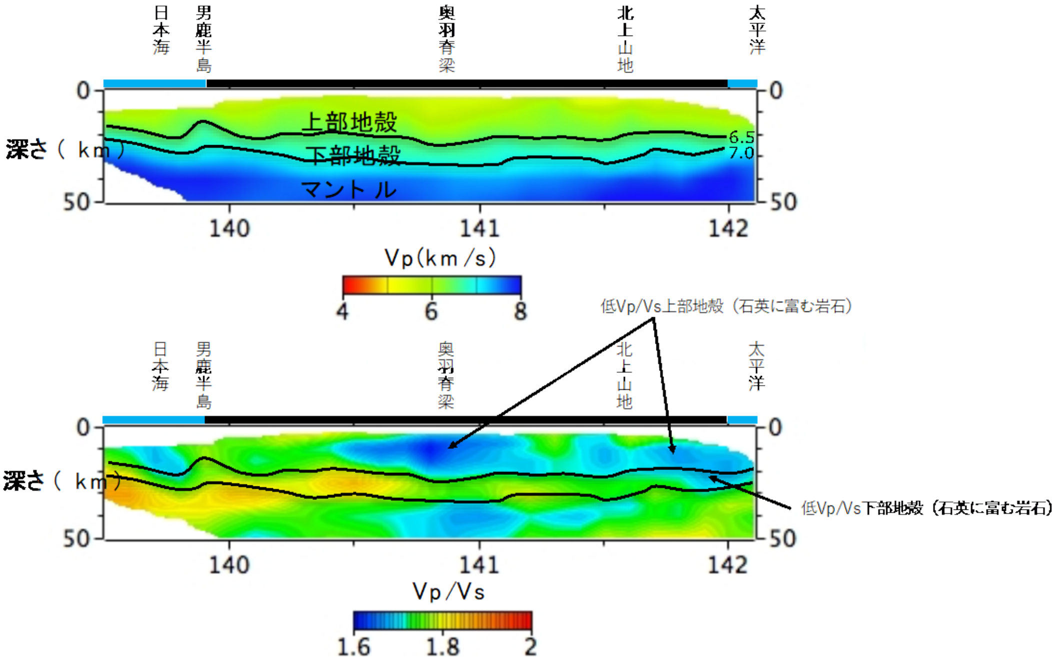

図 5　北緯 40℃における東西断面

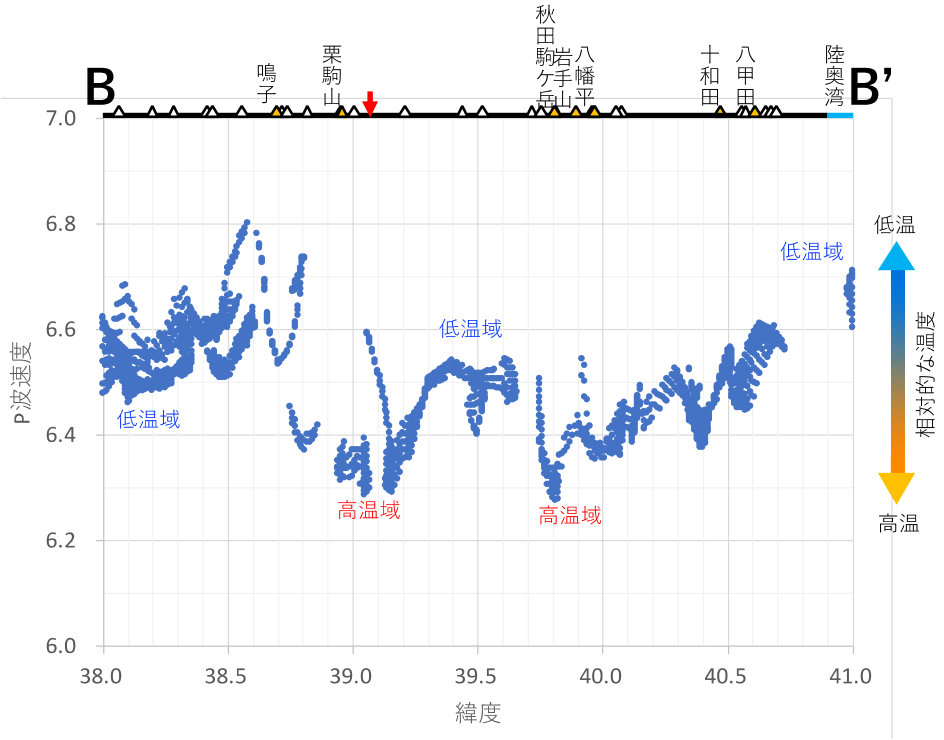

図 6　P 波速度構造から推定される東北本州弧における南北方向の定性的な温度構造。三角は第四紀火山、オレンジ色の三角は活火山の位置。赤矢印は平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震の震央位置。

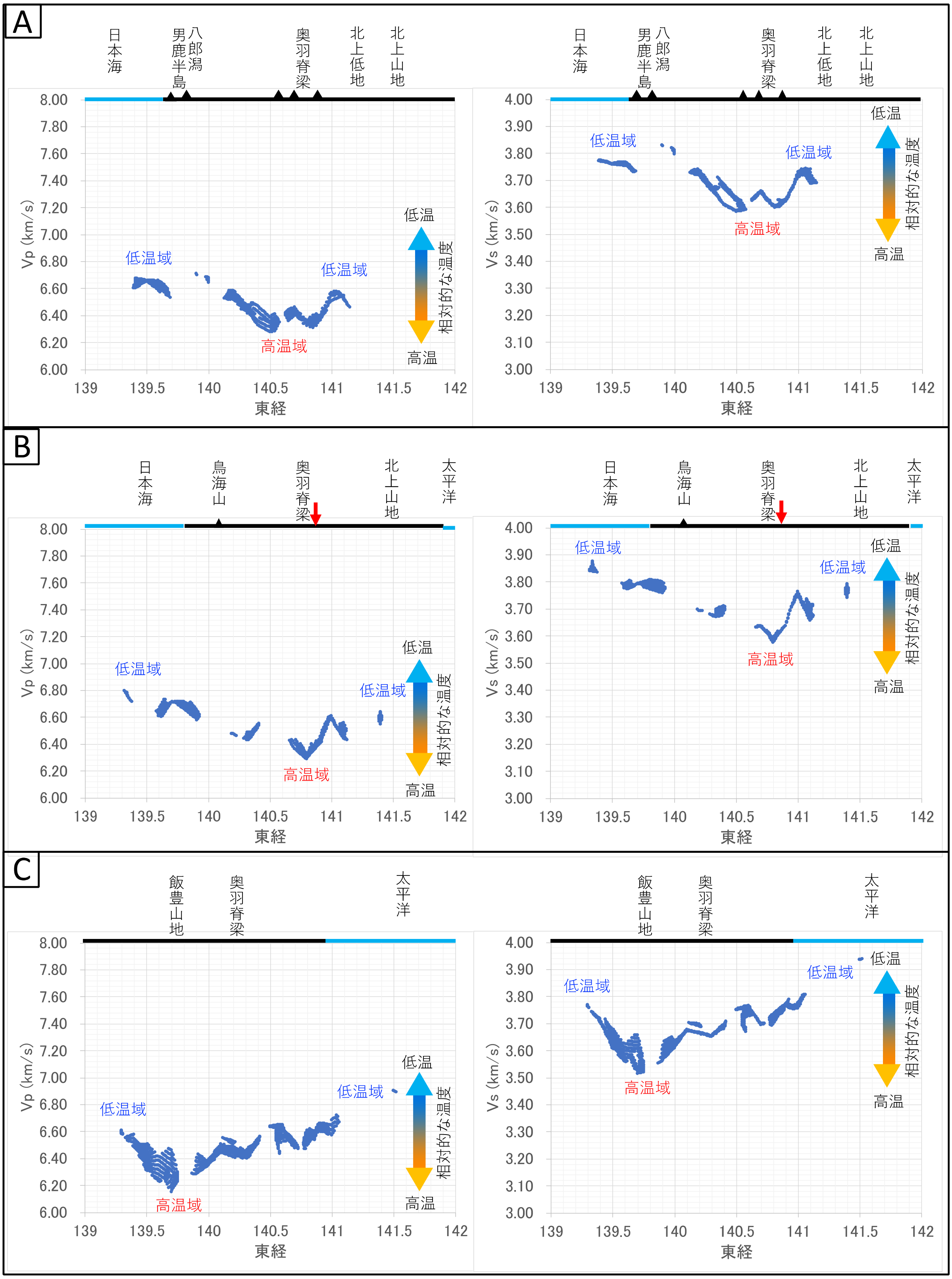

図 7　P 波速度構造と S 波速度構造から推定される東北本州弧における東西方向の定性的な温度構造。(A)北緯 39.75 ～40°、（B）北緯 39.05 ～39.15°、（C）北緯 37.75 ～38°。赤矢印は平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震の震央位置。

(c) 結論ならびに今後の課題

岩石鉱物の弾性波速度の視点から防災科学技術研究所の三次元地震波速度構造を解釈することによって、東北地方の地殻内部の定性的な温度構造を推定することができた。その結果、深さ 20 km の地震波トモグラフィからは、脊梁周辺に相対的な高温域が分布する一方で、日本海側および太平洋側に向かって相対的な低温域が分布することが推定された。ただし、北緯 37.75 ～38°では脊梁付近ではなく新潟県と福島県の県境付近に相対的な高温域が分布することが推定された。今後は温度構造と発生層下限との関係を検討することが課題となる。また、温度構造を定量的に推定する上で岩石鉱物の弾性波速度の温度係数は重要なので、実験データの取得および整理を行う。推定した温度構造および構成岩石モデルを用いて、本プロジェクトの研究対象とする断層について、断層下限（地震発生層下限）を推定することが課題となる。

(d) 引用文献

1) 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.
2) 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.
3) 産業技術総合研究所地質調査総合センター：産業技術総合研究所地質調査総合センター（編）20 万分の 1 日本シームレス地質図 2015 年 5 月 29 日版, 2015.
4) 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. 地質学雑誌, Vol.123, pp.355-364, 2017.
5) Omuralieva, A. M., Hasegawa, A., Matsuzawa, T., Nakajima, J., Okada, T.: Lateral variation of the cutoff depth of shallow earthquakes beneath the Japan Islands and its implications for seismogenesis. Tectonophysics, Volume 518, pp. 93-105, 2012.
6) Hasegawa, A., Yamamoto, A., Umino, N., Miura, S., Horiuchi, S., Zhao, D., Sato, H.: Seismic activity and deformation process of the overriding plate in the northeastern Japan subduction zone. Tectonophysics, Volume 319, pp. 225-239, 2000.

(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	本州弧の地殻深部及び最上部マントルの構成岩石の推定（口頭発表）	日本地球惑星連合学会 2018 年大会（千葉市）	平成 30 年 5 月 22 日

(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) 令和元年度業務計画案

地殻深部を構成する岩石の岩石物性に関する基礎データを整理・取得する。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日本の地殻構成岩石モデルを検討する。岩石鉱物の弾性波速度の視点から日本の地殻内部の温度構造モデルを検討する。地震発生層下限モデルについて検討する。関連して地殻深部を構成する岩石の岩石物性に関する基礎データを整理・取得する。