

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 ヶ年の年次実施計画（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（令和元年度）
 - 8) 令和 2 年度
- (e) 平成 31 年度（令和元年度）業務目的

(2) 平成 31 年度（令和元年度）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) 令和 2 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ヵ年の年次実施計画（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) 平成 31 年度 (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った。主要造岩鉱物の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。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した。地殻構成岩石モデルを更新した。

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 31 年度 (令和元年度) 業務目的

平成 30 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 31 年度 (令和元年度) 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。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した。主に北海道南西部・東北・北陸の日本海沿岸周辺を対象に、岩石弾性波速度の視点から地殻の地殻構成岩石と温度構造を推定した。

(b) 業務の成果

本研究の目標は、地殻マンツルの地震波速度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平成30年度に引続き行うこととした。得られた温度構造をもとに脆性塑性境界の深さを推定し、断層下限（地震発生層下限）モデルを検討した。

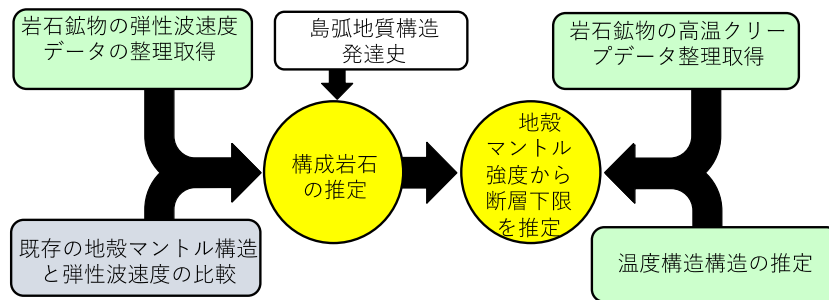


図1 地震発生層下限の推定に向けた研究の手順

本研究プロジェクトでは下部地殻や上部マンツルの主要な構成鉱物に着目し、天然結晶を約100～300nmの極細粒粉末まで微粉碎し、電気炉を用いて鉱物多結晶体の焼結実験を行っている。昨年度までは下部地殻の主要構成鉱物に着目して焼結実験を行ってきており、本年度は上部マンツルの主要な構成鉱物の一つであるかんらん石（フォルステライト）に着目し、かんらん石多結晶体の焼結実験を新たに行った。図2に焼結実験の手順、図3に焼結した多結晶のラマン分光分析とX線回析分析による同定を示した。

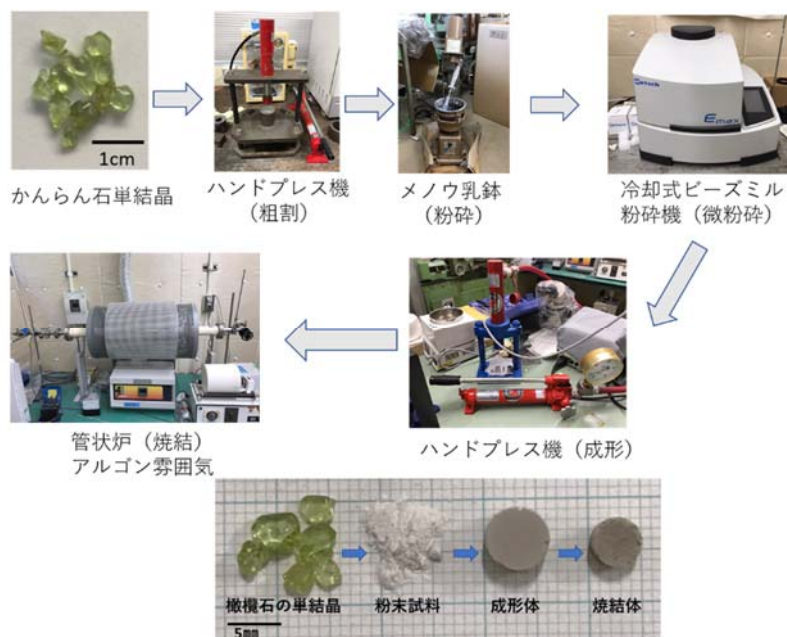


図2 多結晶体の焼結までの手順

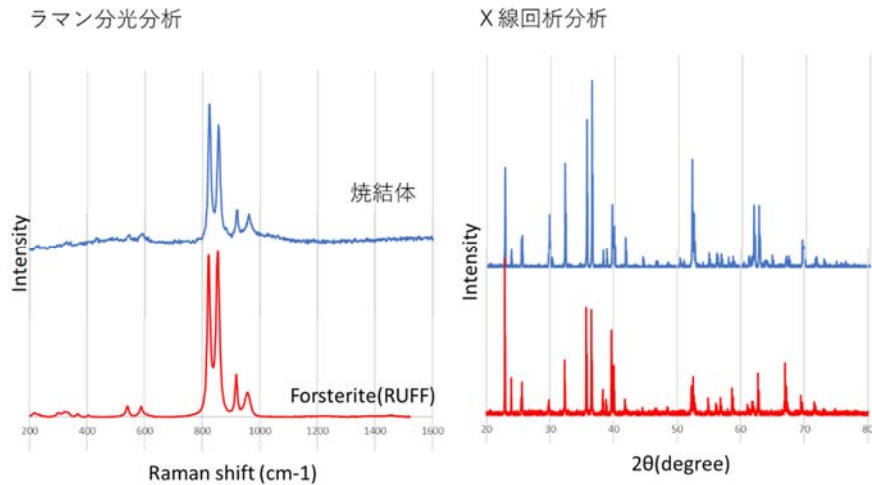


図 3 焼結した多結晶体の同定

かんらん石多結晶体の弾性波速度測定は 8 GPa から 2 GPa の超高压下での実測値は得られているが¹⁾、モホ近傍の最上部マンツルの温度圧力条件での精密な P 波速度と S 波速度の同時測定は十分には行われていない。本研究では、杉田樹紀氏と福長悟氏（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压発生装置を用いて、焼結したかんらん石多結晶体を試料としてモホ近傍相当の高温高压条件で P 波速度と S 波速度の同時測定を行った。図 4 はかんらん石多結晶焼結体の 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鈹物多結晶体の弾性波速度測定結果を示した。かんらん石多結晶体の P 波速度の 100℃あたりの速度低下率はおおよそ $6.5 \times 10^{-4} \text{ km s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ である。なお、最上部マンツルの温度構造の推定は令和 2 年度に行うことを検討している。

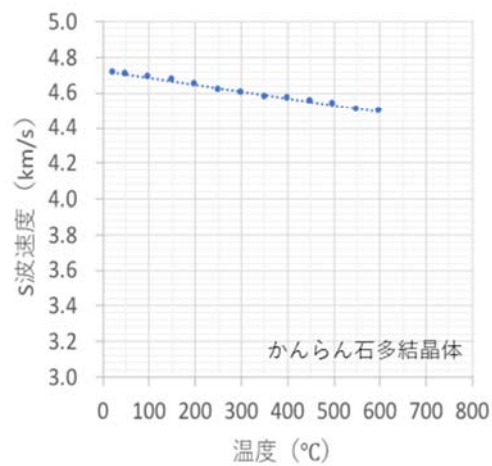
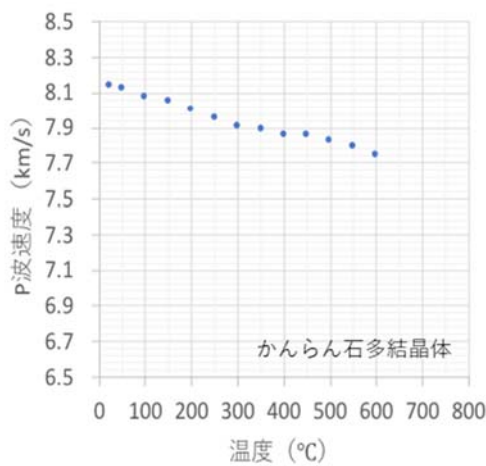
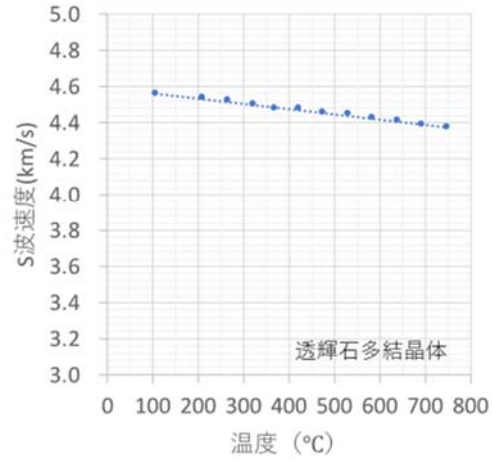
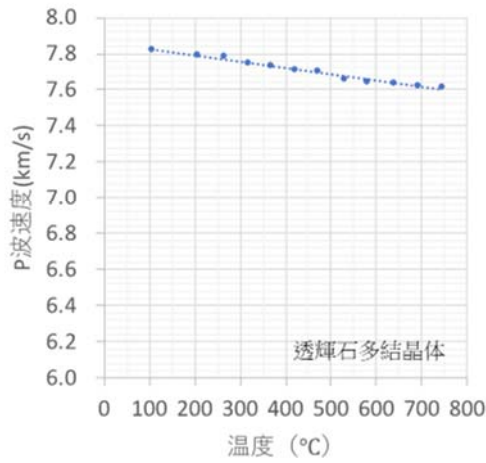
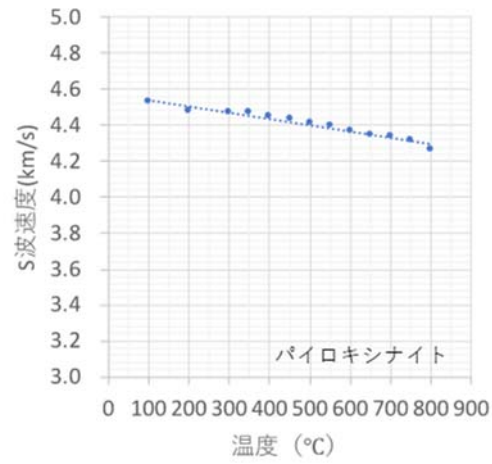
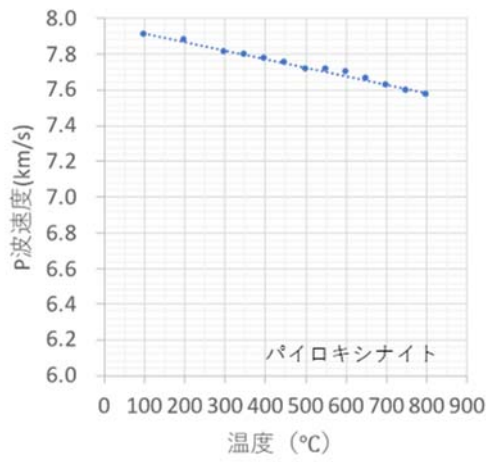
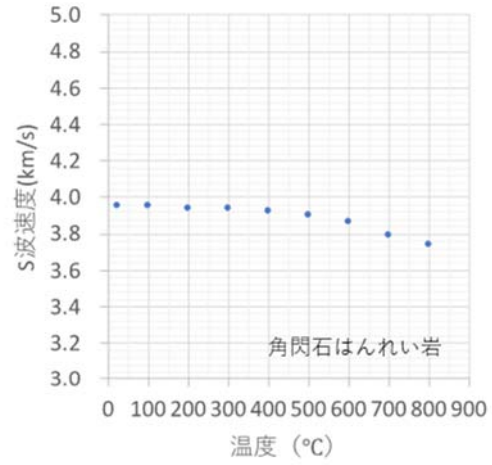
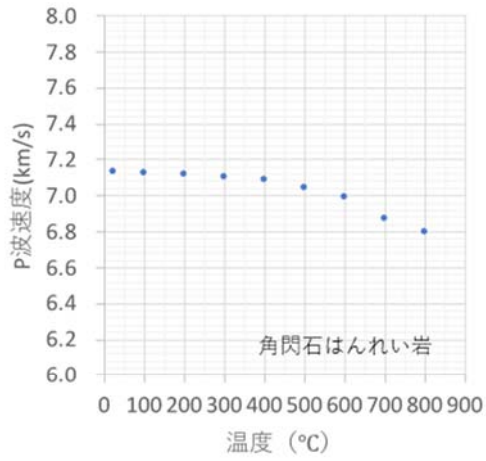


図4 圧力1.0 GPaにおける岩石と鉱物多結晶体のP波速度とS波速度。上から角閃石はんれい岩²⁾、パイロキシナイト、透輝石多結晶体、かんらん石多結晶体。

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てきた(図5)。先行研究は数10 MPa-数100 MPaの応力下での変形実験であるのに対して、本研究では極細粒な焼結体を準備することで、現実的な地殻応力レベル(数MPa-数10 MPa)で変形実験を行うこと可能となったが、焼結試料作成にかなりの時間を要するために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。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おり、昨年同様に弾性波速度測定実験を重点的に行った。

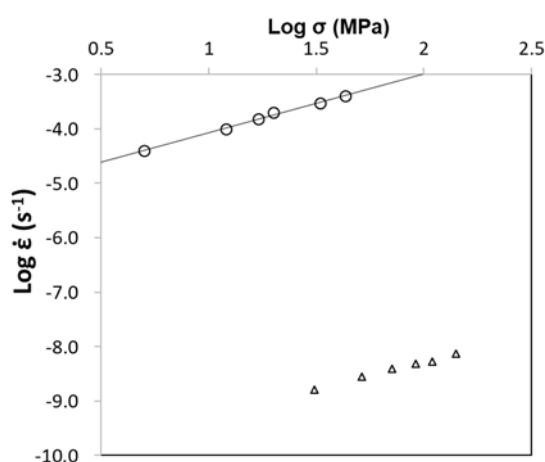


図5 透輝石多結晶体の応力と歪速度の関係。縦軸が歪速度、横軸が応力。○が1,080°C(本研究)、△が1,100°C(先行研究²⁾)。

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(図2)、 V_p/V_s の温度依存性は著しく小さく、 V_p/V_s 値は岩石種に大きく依存する³⁾。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、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⁴⁾の地震波速度データから一定の V_p/V_s 比の領域の速度データを用いることで、地震波速度データから温度成分を抽出し、地下の温度分布、地温勾配、300°Cの深度、脆性塑性境界深度を推定することを試みた(図6)。今回は北海道南西部・東北・北陸にいたる日本海沿岸周辺で温度構造や脆性塑性境界深度の分布の推定を試みることで地震発生層下限の推定について検討した。

東北地方の下部地殻の構成岩石に関しては、先行研究^{3,5)}で報告されているように北上山地では例外的に低 V_p/V_s で特徴付けられ(石英を主要鉱物とする岩石分布すると推定され)ているが、一般的には中程度からやや高い V_p/V_s で特徴付けられ、苦鉄質岩石で構成されていると解釈されている(例えば、平成30年度報告書)。図7と図8は山形周辺において地下20 kmのP波速度と V_p/V_s 比の分布を示している⁴⁾。男鹿半島の一ノ目湯に産する下部地殻由来の苦鉄質捕獲岩の V_p/V_s は1.74-1.80程度であることが岩石の弾性波

速度測定実験から示されている³⁾。東北地方の深さ 20 km の一定の V_p/V_s 比の領域の速度データを抽出することは、任意の苦鉄質岩の分布域の速度データを抽出することになる。図 9 は $V_p/V_s=1.77\sim 1.78$ の範囲の P 波速度を抽出（温度成分を抽出）してクリギング補間した P 波速度分布である。温度構造を推定する上で、東北地域の地温勾配⁶⁾を参考に解析域の地温条件を仮定した（最大地温勾配 33°C 、地表温度 25°C 、深さ 20 km で最高 685°C 、深さ 25 km で最高 850°C ）。まずは、 $V_p/V_s=1.77\sim 1.78$ の範囲で抽出した P 波速度の最低値 6.34 km/s を 685°C と仮定し、次に、男鹿半島の一ノ目潟に産する下部地殻由来の苦鉄質捕獲岩の弾性波速度から得られている高温域の P 波速度の温度微分係数を参考に P 波速度低下率を $1.0\times 10^{-3}\text{ km s}^{-1}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ と仮定し、図 9 の補完した P 波速度の分布から温度分布を推定した（図 10）。なお、今回推定した温度構造や脆性塑性深度は、海域の水深を 0 m と仮定した暫定モデルである。図 10 の山形周辺の深さ 20 km の温度構造が示すように、脊梁周辺や朝日山地周辺に高温域が分布する一方、日本海沿岸には低温域が分布することが推定された。地温勾配を線形と仮定して図 10 の深さ 20 km の温度分布図から地温勾配分布図に変換し（図 11）、さらに 300°C の深さ分布を推定した（図 12）。平成 28 年度報告書同様に地殻の流動応力を石英のレオロジーパラメータを用いて、圧縮場における歪速度を 10^{-7} yr^{-1} と仮定し、図 11 の地温勾配分布を用いて脆性塑性境界の深さ分布を見積もった（図 13）。図 13 に示されるように、脊梁周辺や朝日山地周辺で脆性塑性境界の深さが浅く、日本海沿岸では深い傾向が読み取れ、大局的には D90 の深さ分布と類似した傾向を示した。なお、岩手・宮城内陸地震の震源域では脆性塑性境界が浅く余震の深さ分布と整合的であるが、宮城県北部などでは D90 よりも脆性塑性境界がかなり深く推定されており、今後の検討が必要である。

山形周辺同様の手順で北海道南西部・青森・秋田周辺（図 14、15）、北陸周辺（図 16、17）の 300°C の深さ分布と脆性塑性境界分布を求めた。北海道南西部・青森・秋田周辺や北陸周辺でも脆性塑性境界の深さは大局的には D90 の深さ分布と類似した傾向がみられるが、能登半島北部などでは D90 よりも脆性塑性境界がかなり深く推定されており、今回検討した温度構造や脆性塑性境界深度に関する暫定モデルの見直しが今後必要である。

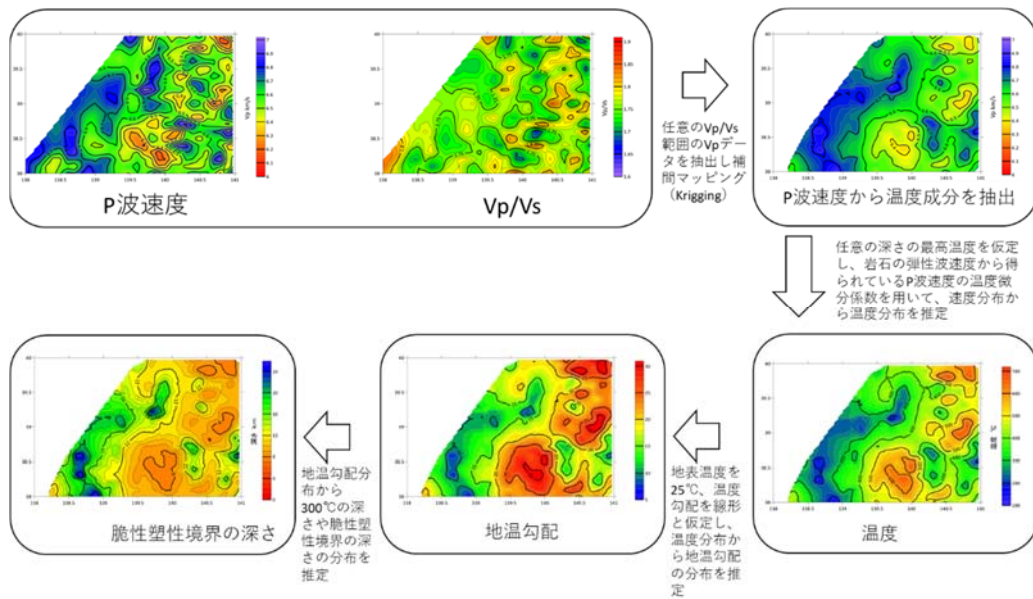


図6 温度構造と地震発生層下限の推定の手順

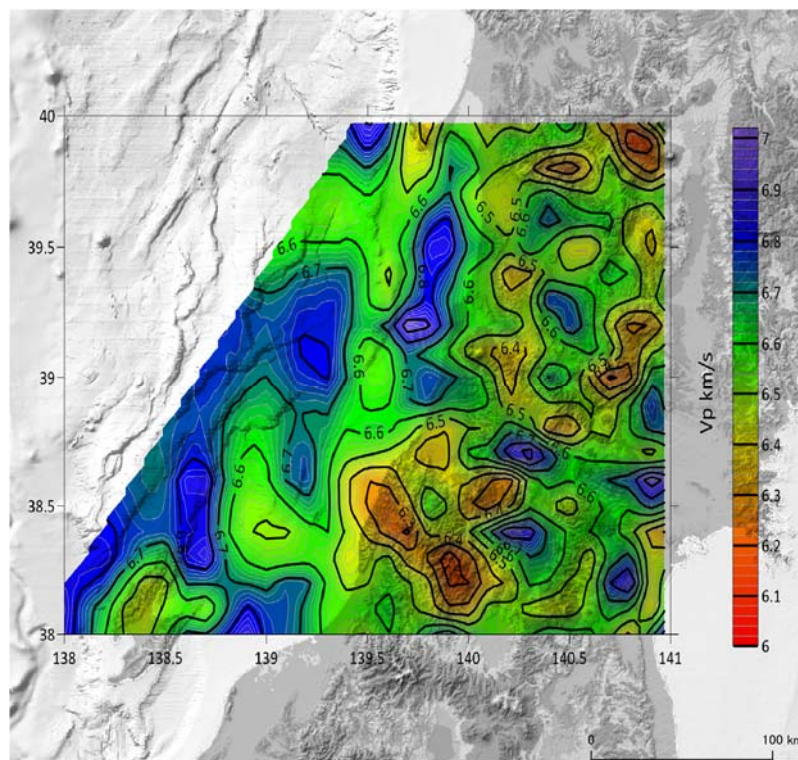


図7 東北（山形周辺）の深さ20 kmのP波速度。防災科学技術研究所の三次元地震波速度構造³⁾の地震波速度データを使用。

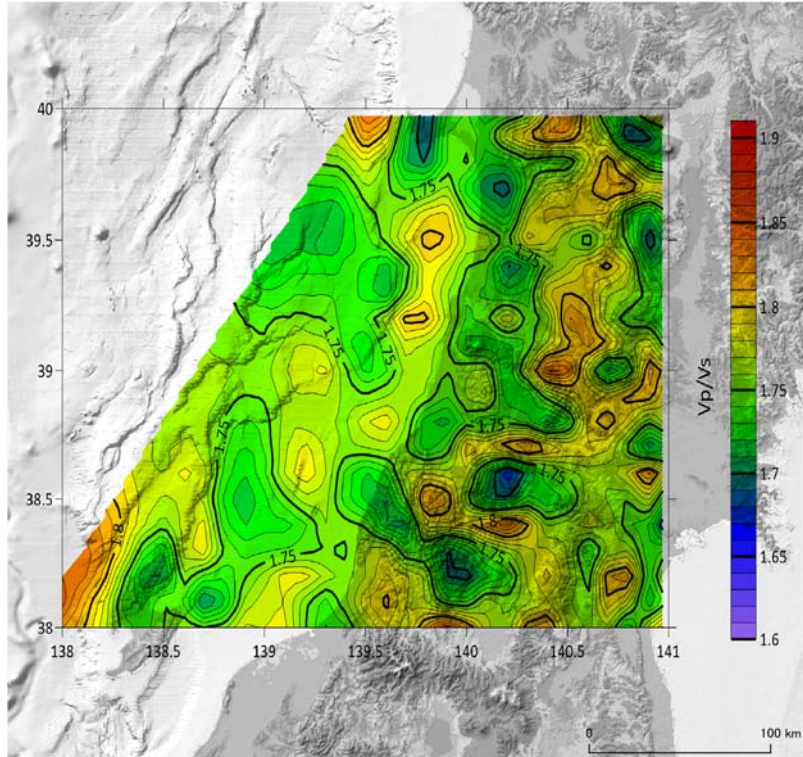


図 8 東北（山形周辺）の深さ 20 km の V_p/V_s 。防災科学技術研究所の三次元地震波速度構造³⁾の地震波速度データを使用。

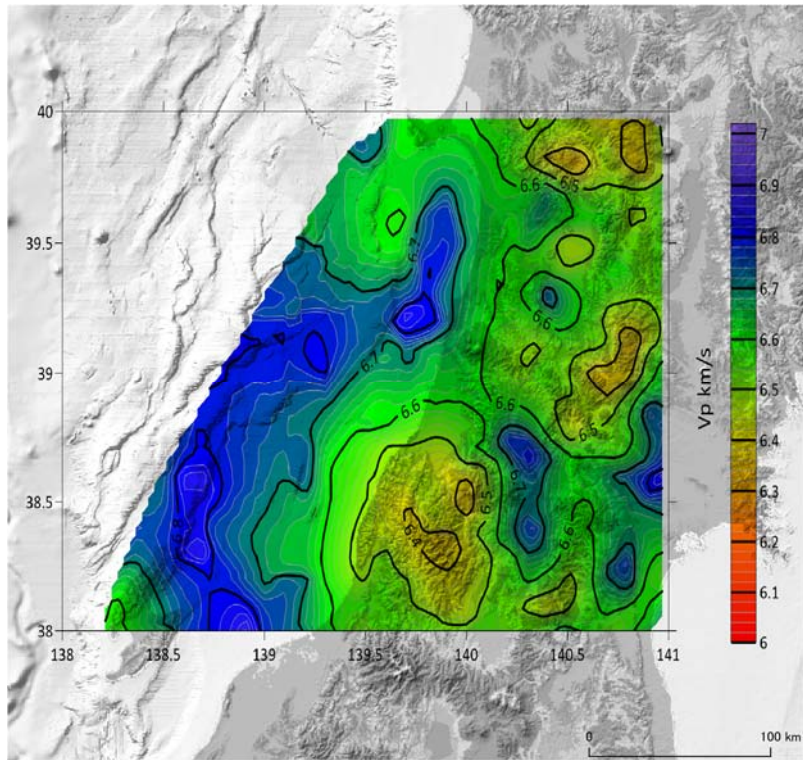


図 9 東北（山形周辺）の $V_p/V_s=1.77\sim 1.78$ の領域の速度データを抽出し、クリギング補間した P 波速度分布

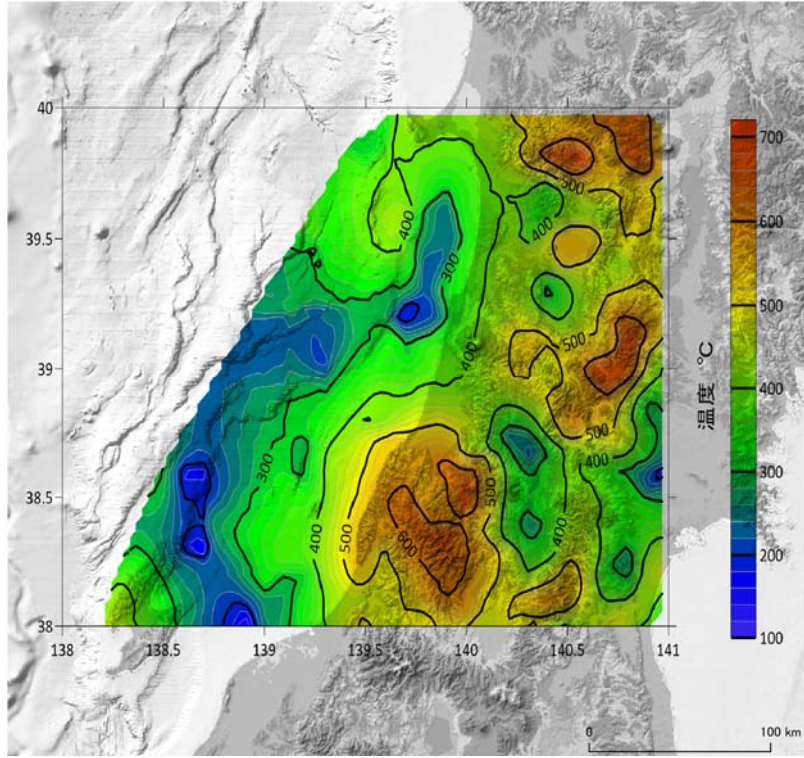


図 10 東北（山形周辺）の深さ 20 km の温度の推定（検討中）

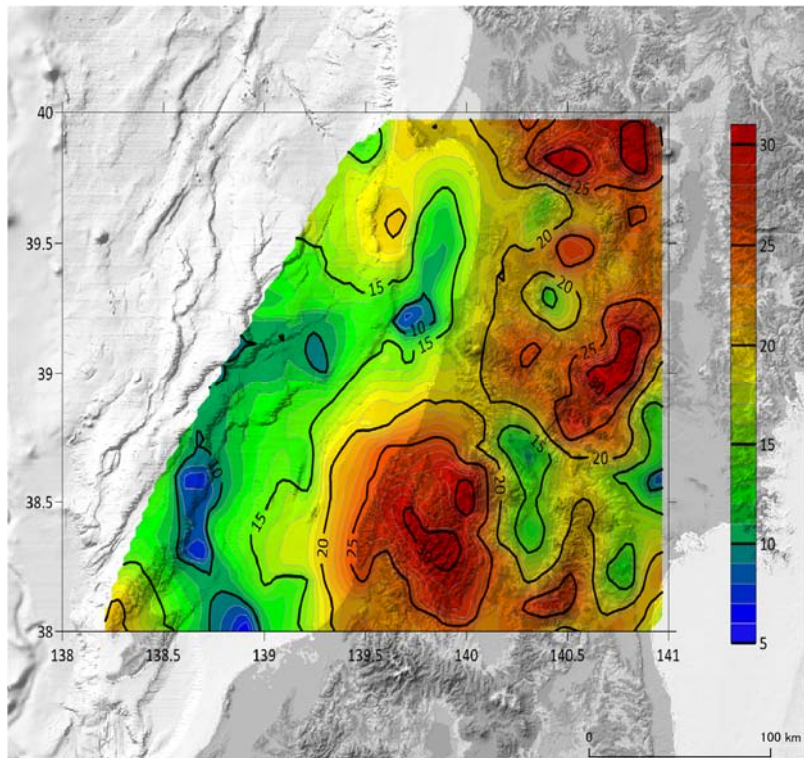


図 11 東北（山形周辺）の深さ 20 km の地温勾配（°C/km）の推定（検討中）

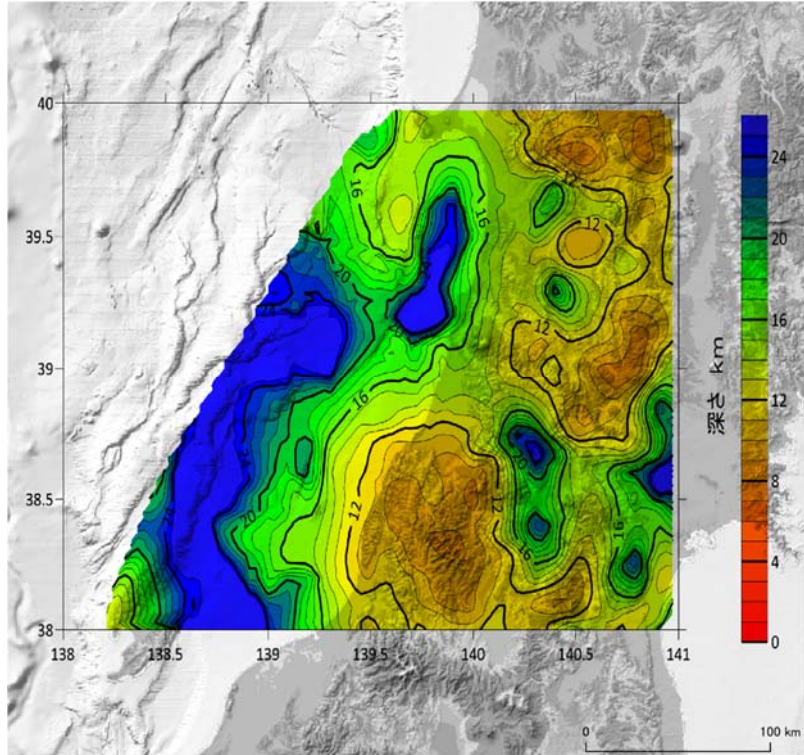


図 12 東北（山形周辺）の 300°C の深さの推定（検討中）

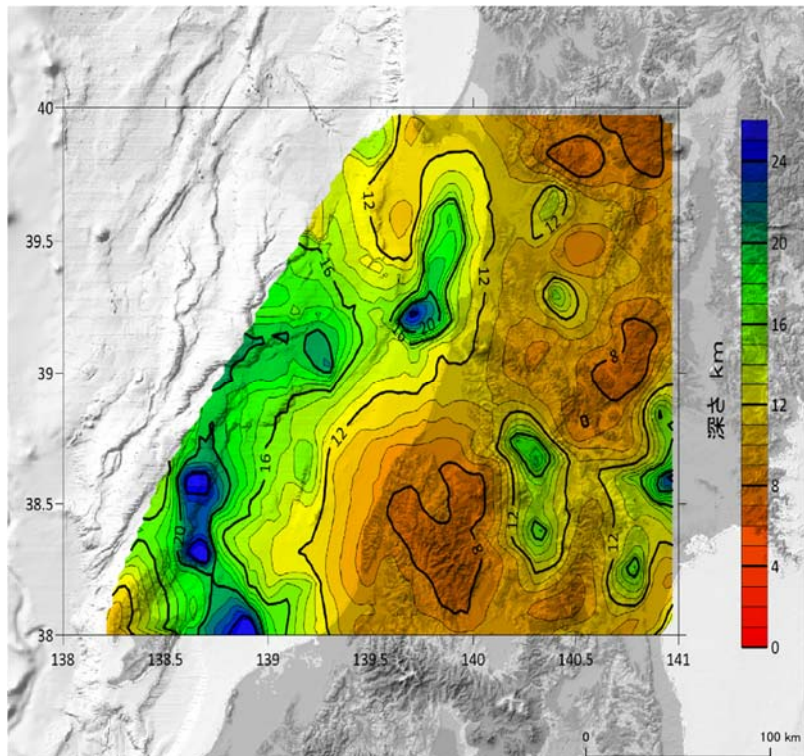


図 13 東北（山形周辺）の脆性塑性境界の深さの推定（検討中）

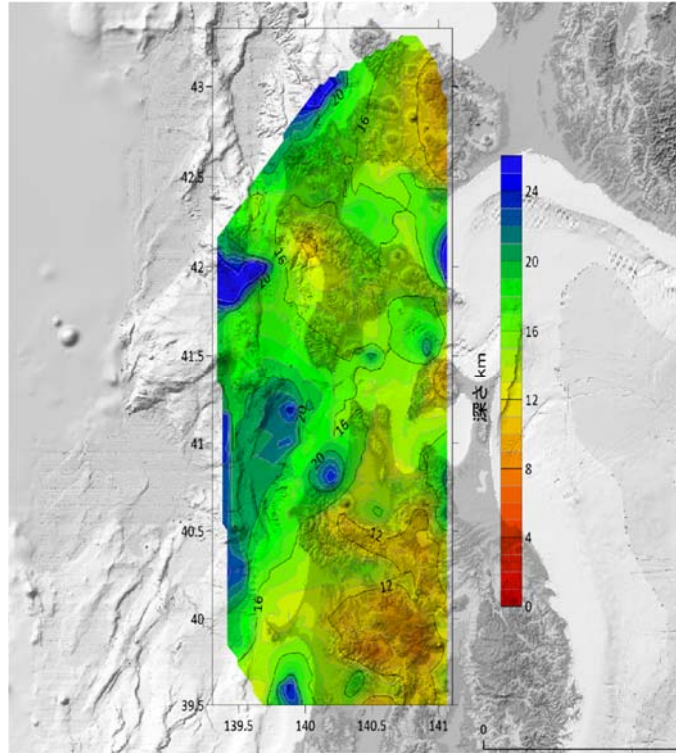


図 14 北海道南西部および東北（青森・秋田周辺）の 300℃の深さの推定（検討中）

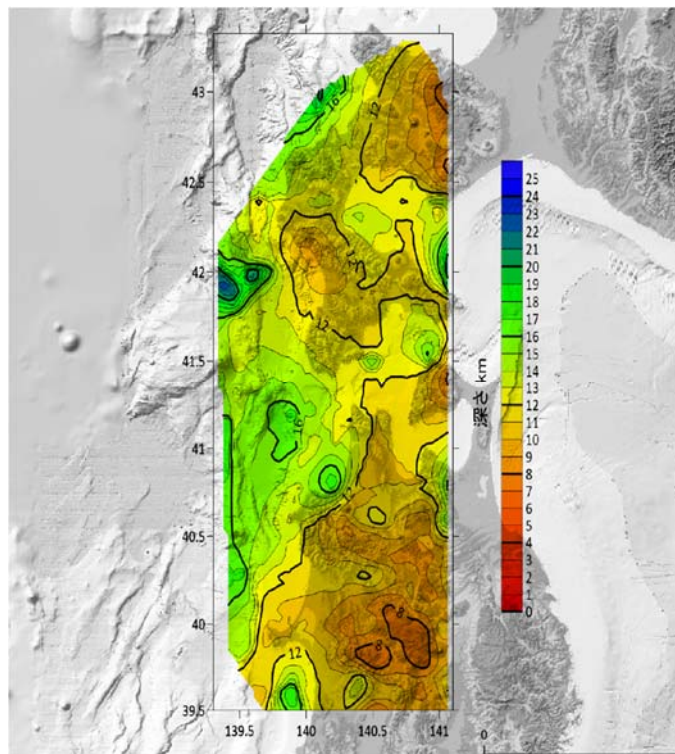


図 15 北海道南西部および東北（青森・秋田周辺）の脆性塑性境界の深さの推定（検討中）

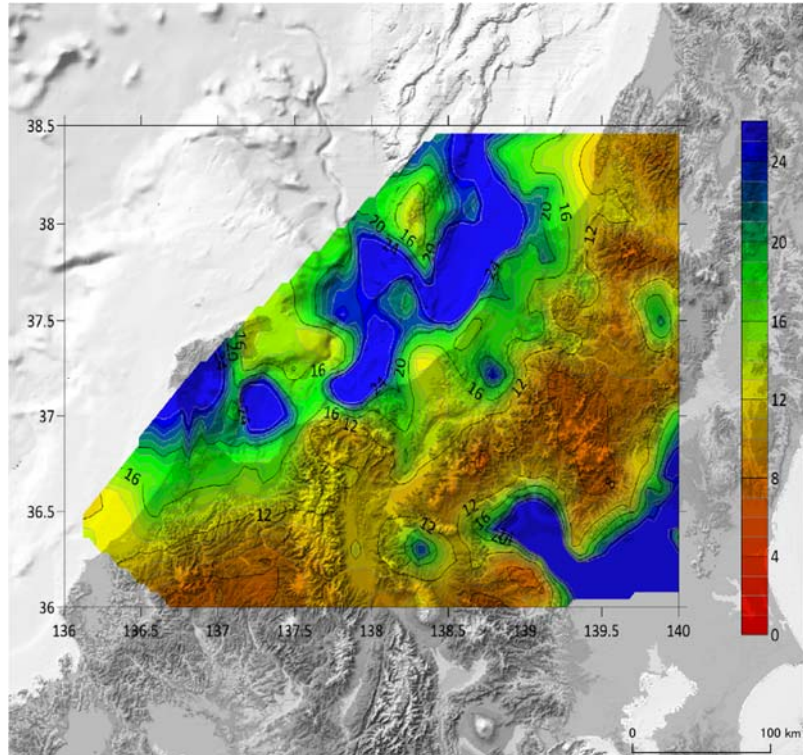


図 16 北陸周辺の 300°C の深さの推定 (検討中)

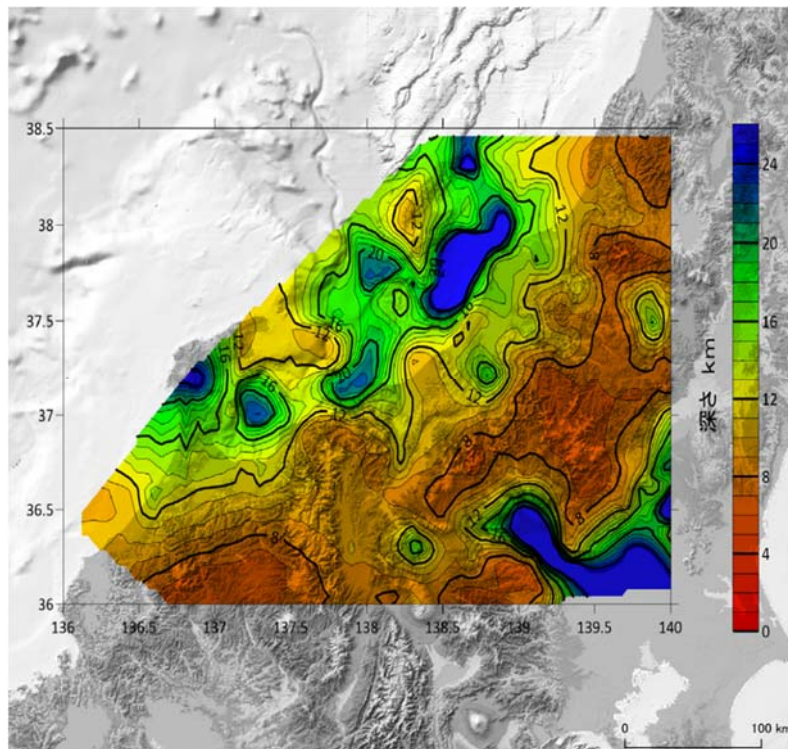


図 17 北陸周辺の脆性塑性境界の深さの推定 (検討中)

(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、日本海沿岸周辺の地殻の温度構造と脆性塑性境界の深さに関する暫定モデルを検討した。その結果、深さ 20 km の地震波トモグラフィからは、脊梁周辺などには高温域が分布し脆性塑性境界が浅い一方で、日本海沿岸には低温域が分布し脆性塑性境界が深いことが推定された。脆性塑性境界の深さは大局的には D90 の深さ分布と類似した傾向がみられるが、局所的には D90 よりも脆性塑性境界がかなり深く推定されており、今後の検討が必要である。今後は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引き続き行い、推定した温度構造および構成岩石モデルを用いて断層下限(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) Liu, W., Kung, J. and Li, B.: Elasticity of San Carlos olivine to 8 GPa and 10 Letters73 K. Geophysical Research, Vol.32, L16301, doi:10.1029/2005GL023453, 2005.
- 2) Dimanov, A., Lavie, M., Dresen, P. G., Ingrin, J. and Jaoul O.: Creep of polycrystalline anorthite and diopside. Journal of Geophysical Research, Vol.108, No.B1, 2061, doi:10.1029/2002JB001815, 2003.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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ツ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.
- 6) Kushiro, I.: A petrological model of the mantle wedge and lower crust in the Japanese island arcs. In Magmatic processes: physicochemical principles. 1, 165-181, 1987.

(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	東北本州弧の熱構造：地震波トモグラフィからの推定 (ポスター発表)	日本地質学会 2019年大会（山口）	令和元年 9 月 22 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) 令和2年度業務計画案

構成岩石モデルを推定するための弾性波速度などの岩石・鉱物の岩石物性の基礎データを取得・整理する。断層モデルの構築（2-5-1）および地震活動の情報（2-5-2）、の成果とともに、岩石物性の視点から地殻構成岩石モデルと地震発生層の下限についての検討を行う。