

## 2. 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) 令和 2 年業務目的

#### (2) 令和 2 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) 8 ヶ年の成果

- (a) 業務の成果
- (b) 結論ならびに今後の課題
- (c) 引用文献

## (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 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：

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 :

平成 31 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した。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た。

(e) 平成 2 年度業務目的

地殻の構成岩石と温度構造の推定は地震発生層の下限深度を見積もるうえで重要である。本サブサブテーマでは、地殻深部を構成する岩石鉱物の弾性波速度測定実験、地殻深部由来の捕獲岩の多結晶体の焼結実験、多結晶焼結体の高温変形実験に取り組み、基礎的なデータの取得整理を行う。主に東北日本を対象に、地殻構成岩石の視点から地域ごとの特徴についてまとめる。本サブサブテーマで推定した温度構造と脆性塑性境界とサブサブテーマ (2.2.5.2) で得られた地震発生層下限 D90 との比較を行い、震源断層の下限深度の分布について考察する。

**(2)令和 2 年度の成果**

(a) 業務の要約

地殻の構成岩石と温度構造の推定は震源断層の下限深度を見積もるうえで重要である。本サブサブテーマでは、地殻深部を構成する岩石鉱物の弾性波速度測定実験、地殻深部由来の捕獲岩の多結晶体の焼結実験、多結晶焼結体の高温変形実験に取り組み、基礎的なデータの取得整理を行った。本年度は主に東北日本を対象に、地殻構成岩石の視点から地域

ごとの特徴についてまとめた。東北地方の島弧地殻は大きく 3 タイプに区分されることがわかる。最も主要なタイプは、上部地殻が石英を主要構成鉱物とする岩石（花崗岩類）から、下部地殻が苦鉄質岩で構成されるタイプであり、教科書的な典型的な地殻である。二つ目は日本海東縁に見られるタイプであり、上部地殻の主要構成岩石が苦鉄質岩であり、下部地殻を含めて地殻全体が苦鉄質であるというタイプである。三つめは北上山地に見られるタイプであり、上部地殻と下部地殻が石英を主要構成鉱物とする岩石（花崗岩類）で主に構成されるタイプである。また、本サブサブテーマで推定した温度構造と脆性塑性境界とサブサブテーマ（2.2.5.2）で得られた地震発生層下限 D90 との比較を行い、震源断層の下限深度について考察した。その結果、奥羽脊梁山脈周辺や朝日山地周辺で脆性塑性境界深度が浅く、日本海沿岸では深い傾向があり、本サブサブテーマで推定した脆性塑性境界深度とサブサブテーマ（2.2.5.2）で得られた D90 の深さ分布は定性的には類似した傾向を示した。本サブサブテーマで推定した 300°C の深さは、奥羽脊梁山脈周辺で浅く、日本海東縁の中新世リフト活動部位では深いという特徴がある。つまり、日本海東縁の中新世リフト活動部位（日本海沿岸周辺）で D90 が深くなるのは、同地域の地下の温度が低いことが要因の一つであると考えられる。しかし、定量的に比較すると、本サブサブテーマで推定した脆性塑性境界深度を地震発生層下限 D90 と比較すると、奥羽脊梁山脈周辺ではほぼ同じ深さであるが、日本海東縁の中新世リフト活動部位では D90 が脆性塑性境界よりも深くなる傾向がある。地殻構成岩石を考慮すると、中新世リフト活動部位の日本海沿岸周辺では苦鉄質岩石が上部地殻の主要構成岩石であると考えられるので、日本海東縁の中新世リフト活動部位で D90 が深くなる理由は、地下の温度が低いことに加えて、上部地殻・下部地殻とも苦鉄質岩で構成されていることに起因すると考えられる。

## (b) 業務の成果

本研究の目標は、地震波速度  $v_p$  から地殻構成岩石を推定することである。また、地震発生層下限を見積も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 31 年度（令和元年度）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、他のサブテーマ等で得られた地震発生層下限モデル<sup>2)</sup>と比較した。

本サブサブテーマ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 ~ 300 nm 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と上部マントルの主要構成鉱物に着目して焼結実験を行ってきており、本年度は地下深部由来の天然の苦鉄質捕獲岩に着目し、苦鉄質岩多結晶体の焼結実験を新たに行った。図 1 に焼結実験の手順、図 2 に焼結した苦鉄質岩多結晶体の走査電子顕微鏡（以下 SEM と略）による画像を示した。

九州玄海灘ではアルカリ玄武岩中から捕獲岩として下部地殻・上部マントル由来であると考えられる超苦鉄質～苦鉄質岩が産出する<sup>3)</sup>。本サブサブテーマでは、下部地殻由来と考えられる苦鉄質捕獲岩を実験試料とした。苦鉄質捕獲岩試料は、主に粒径数 mm 程度の粗粒な斜長石、単斜輝石、斜方輝石から構成されている。粗粉碎した岩石をメノウ乳鉢で粉碎した後、さらにジルコニアビーズを用いて約 100 ~ 300 nm の極細粒粉末まで微粉碎した。この粉末を一軸圧縮成型し、アルゴン雰囲気下 1,060°C ~ 1,260°C で 4 時間から最大

16 時間で焼成し苦鉄質岩多結晶体試料を作製した。図 2 はアルゴン雰囲気下 1,100°C で 8 時間焼成した粒径数  $\mu\text{m}$  の苦鉄質岩多結晶体の SEM 画像である。出発物質となる苦鉄質捕獲岩と焼結実験で得られた苦鉄質岩多結晶体の鉱物化学分析には、ラマン分光分析装置、X 線回折装置、およびエネルギー分散型 X 線分析装置を用い、焼結体の観察・粒径測定には走査型電子顕微鏡を用いた。

本サブサブテーマにおいて、単一鉱物を出発物質として焼結した鉱物多結晶体の弾性波速度測定を行ってきたが、捕獲岩を出発物質とする複鉱物多結晶体の地殻深部相当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行われていない。本年度で、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压発生装置を用いて、焼結した苦鉄質岩多結晶体（斜長石、単斜輝石および斜方輝石から構成される複鉱物多結晶体）を実験試料として地殻深部相当の高温高压条件でニオブ酸リチウム圧電素子を用いたパルス反射法により P 波速度と S 波速度の同時測定を行った。弾性波速度測定に用いる試料は、直径約 10 mm、試料長約 3 mm の円盤状であり、両端面を鏡面研磨した。

図 3 は苦鉄質岩多結晶体の P 波速度と S 波速度に加えて、横浜国立大学設備の高温高压弾性波速度測定装置を用いて本サブサブテーマなどで測定し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。苦鉄質岩多結晶体の場合、圧力 1.0 GPa における P 波速度は、室温 7.02 km/s から加熱に伴い緩やかに速度低下し 800°C まで加熱時には 6.87 km/s まで低下する。S 波速度は室温から 800°C まで加熱するに伴い 3.80 km/s から 3.71 km/s まで速度低下する。Vp/Vs は加熱に伴いわずかに上昇するが、1.84~1.85 のほぼ一定の値を示した。苦鉄質岩多結晶焼結体の弾性波速度と 3 次元速度構造モデル<sup>1)</sup> から得た九州玄界島周辺の P 波速度を比較すると（図 4）、深さ約 30 km 付近において P 波速度と一致しており、本研究で用いた苦鉄質捕獲岩と同等の岩石が深さ約 30 km 付近に分布していることが示唆される。

透輝石は下部地殻や上部マントルの主要構成鉱物の一つであり、透輝石多結晶体を用いて高温変形実験を本サブサブテーマで行なってきた。実験の結果、数 MPa-数 10 MPa で変形実験を行い応力と歪速度の関係を得ることができた（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、本サブサブテーマ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で測定することが可能となった。先行研究から計算された応力と歪速度の関係と比較すると、本サブサブテーマの歪速度がやや速い、つまり粘性が低いという結果になった。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、平成 31 年度（令和元年度）同様に弾性波速度測定実験を重点的に行った。

先行研究<sup>4)</sup> では捕獲岩試料の弾性波速度測定を地殻深部と同等の温度圧力で測定してきた。捕獲岩に関しては風化の影響を被らずに産出するとは限らず、むしろ、物性実験にそのまま用いることが可能な岩石試料の産出頻度は多くはない。本サブサブテーマでもこれまで捕獲岩試料の弾性波速度測定実験に取り組んできたが、まず一番の困難さは風化の影響をほとんど被っていない試料を見出すことである。これまでは限られた試料について弾性波速度測定を行ってきたが、本年度の成果のように、捕獲岩を粉碎焼結することでこ

の課題をクリアできる方向性を示すことができた。本サブサブテーマにおいて岩石鉱物の常圧下における焼結法を確立できたことは今後の研究を飛躍する上でたいへん重要な位置づけとなると期待される。これにより、将来の地殻構成岩石に関する研究ではこれまで物性実験に用いることができなかった岩石試料も実験対象とすることが可能であり、より高精度な地殻構成岩石の推定が行われると期待される。

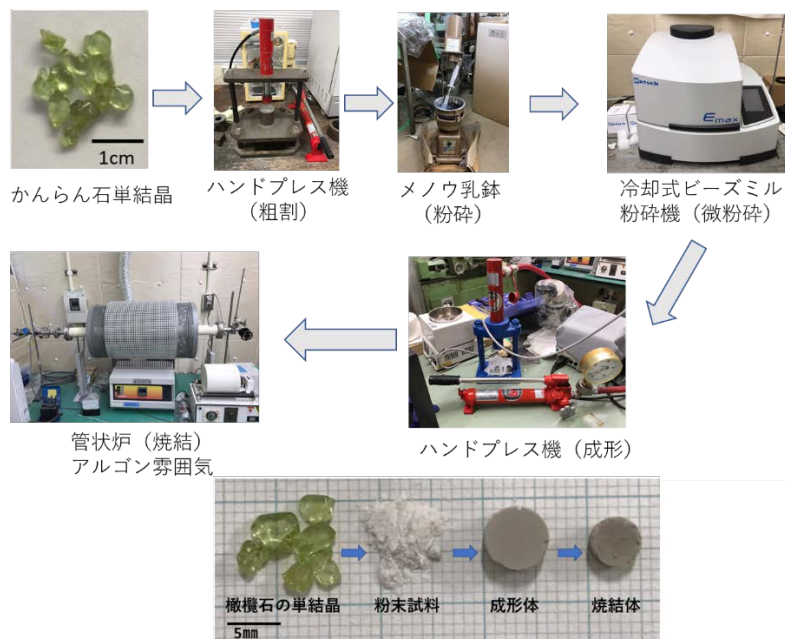


図1 多結晶体の焼結までの手順

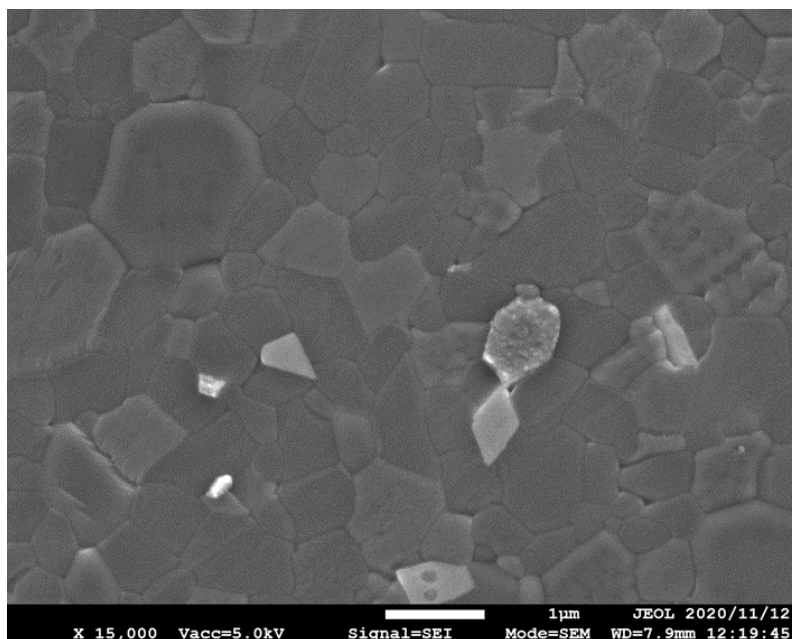


図2 苦鉄質岩多結晶体のSEM画像

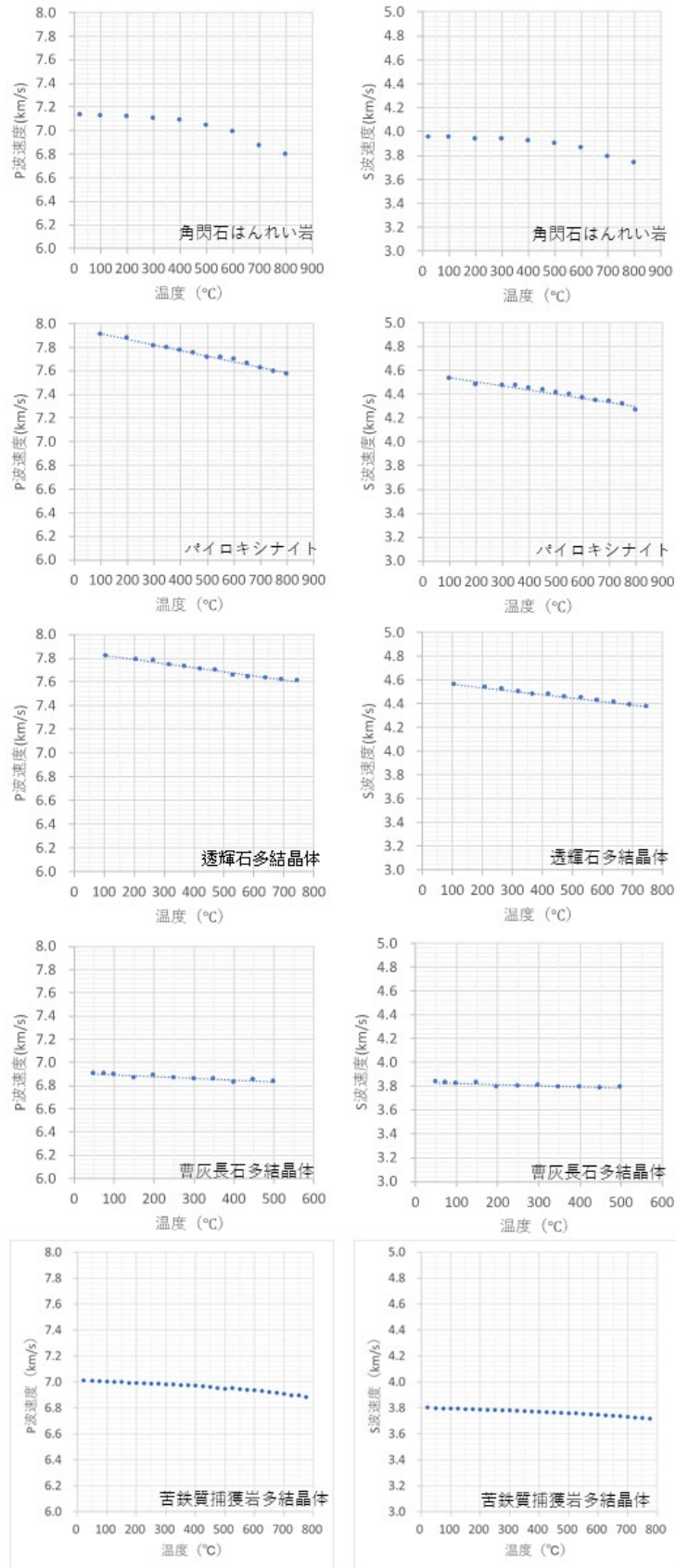


図3 圧力1.0 GPaにおける岩石と鉱物多結晶体のP波速度とS波速度。上から角閃石はんれい岩<sup>4)</sup>、パイロキシナイト、透輝石多結晶体、曹灰長石多結晶体、苦鉄質岩多結晶体。

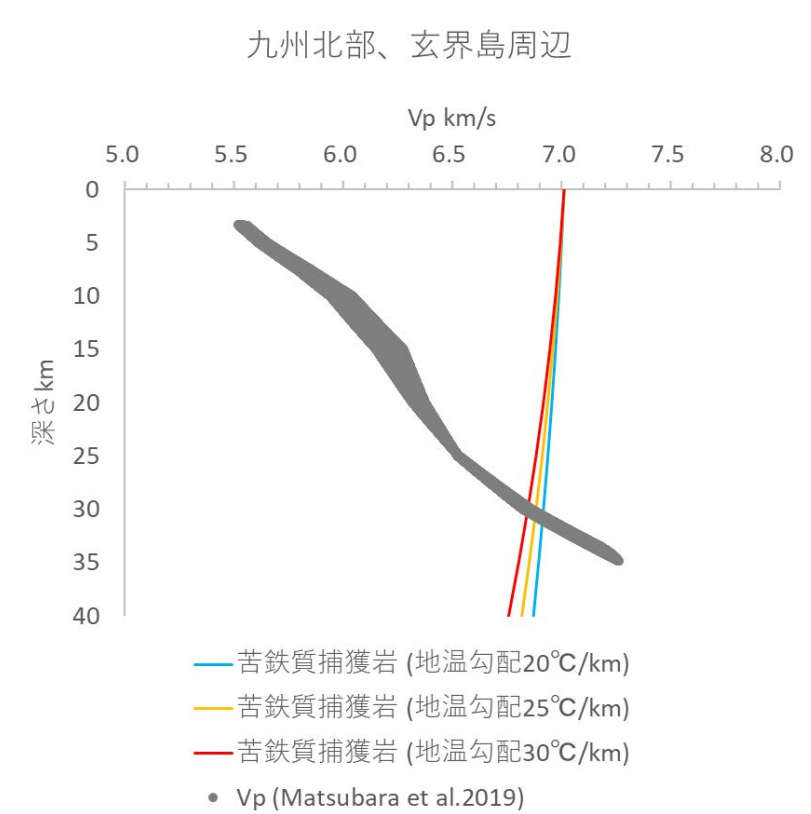


図4 苦鉄質岩多結晶体の弾性波速度と九州北部玄界島周辺の地震波速度構造の比較。防災科学技術研究所の三次元地震波速度構造<sup>1)</sup>の地震波速度データを使用。

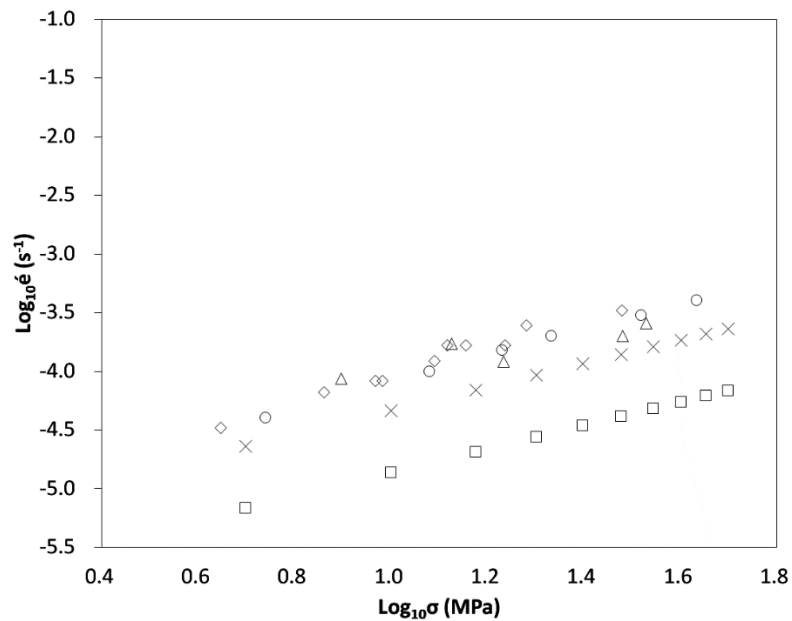


図5 透輝石多結晶体の応力と歪速度の関係。縦軸が歪速度、横軸が応力。○ : 1,080°C、◇ : 1,060°C、△ : 1,050°C (本研究)、× : 1,080°C<sup>5)</sup>、□ : 1,080°C<sup>6)</sup>。



東北地方の下部地殻の構成岩石に関しては、先行研究<sup>4,7)</sup>で報告されている。これらの研究では下部地殻は北上山地を除けば苦鉄質岩石で構成されていることが推定されている。本サブサブテーマでは防災科学技術研究所の三次元地震波速度構造<sup>1)</sup>の地震波速度データを用いて東北地方の地震波速度のから上部地殻の構成岩石を推定した。図 6 から図 10 は北緯 40 度から 38 度の深さ 100 km までの P 波速度断面および  $V_p/V_s$  断面である。深さ 20 km 以浅には青色・水色で示された低  $V_p/V_s$  が広域に分布しており、低  $V_p/V_s$  の石英を主要鉱物とする岩石が上部地殻に広く分布すると推定される。しかし、一部では相対的に高い  $V_p/V_s$  (黄緑色で表示) が分布する。例えば、北緯 40 度の場合、東経 140 度付近の日本海沿岸周辺では深さ 20 km 以浅は黄緑色で示された相対的に高  $V_p/V_s$  で特徴づけられており、上部地殻の主要構成岩石が低  $V_p/V_s$  の石英を主要鉱物とする岩石ではなく、苦鉄質岩石であると推定される。つまり、中新世リフト活動に伴う玄武岩質マグマの影響で地殻全体が苦鉄質になっていると解釈される。同様の相対的に高い  $V_p/V_s$  の上部地殻は東経 140.4 度付近や東経 141.3 度にも分布しており、苦鉄質な上部地殻が分布していると推定される。北緯 39.5 度の場合、同様の相対的に高い  $V_p/V_s$  の上部地殻は日本海側の東経 140~141.5 度や北上低地帯近傍の東経 141.3 度付近にも分布している。同様の相対的に高い  $V_p/V_s$  の上部地殻は、北緯 39 度では庄内平野、北緯 38.5 度では粟島周辺に分布している。特に北緯 38 度の場合、相対的に高い  $V_p/V_s$  の上部地殻は佐渡海峡から新潟平野に広く分布している。このように中新世リフト活動に伴う玄武岩質マグマの影響が日本海東縁に沿って広範囲に及んだことが読み取れる。東北地方の下部地殻の構成岩石に関しては、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。しかし、北上山地では例外的に低  $V_p/V_s$  で特徴付けられ (図 6-10)、また、図 11 の P 波速度プロファイルを見てもわかるように地殻全体の P 波速度が低く、先行研究<sup>4,7)</sup>で報告されているように石英を主要鉱物とする岩石 (花崗岩類) が上部地殻から下部地殻に広く分布すると推定される。東北地方の島弧地殻は大きく 3 タイプに区分されることがわかる。最も主要なタイプは、上部地殻が石英を主要構成鉱物とする岩石 (花崗岩類) から、下部地殻が苦鉄質岩で構成されるタイプであり、教科書的な典型的な地殻である。二つ目は日本海東縁に見られるタイプであり、上部地殻の主要構成岩石が苦鉄質岩であり、下部地殻を含めて地殻全体が苦鉄質であるというタイプである。三つめは北上山地に見られるタイプであり、上部地殻と下部地殻が石英を主要構成鉱物とする岩石 (花崗岩類) で主に構成されるタイプである。

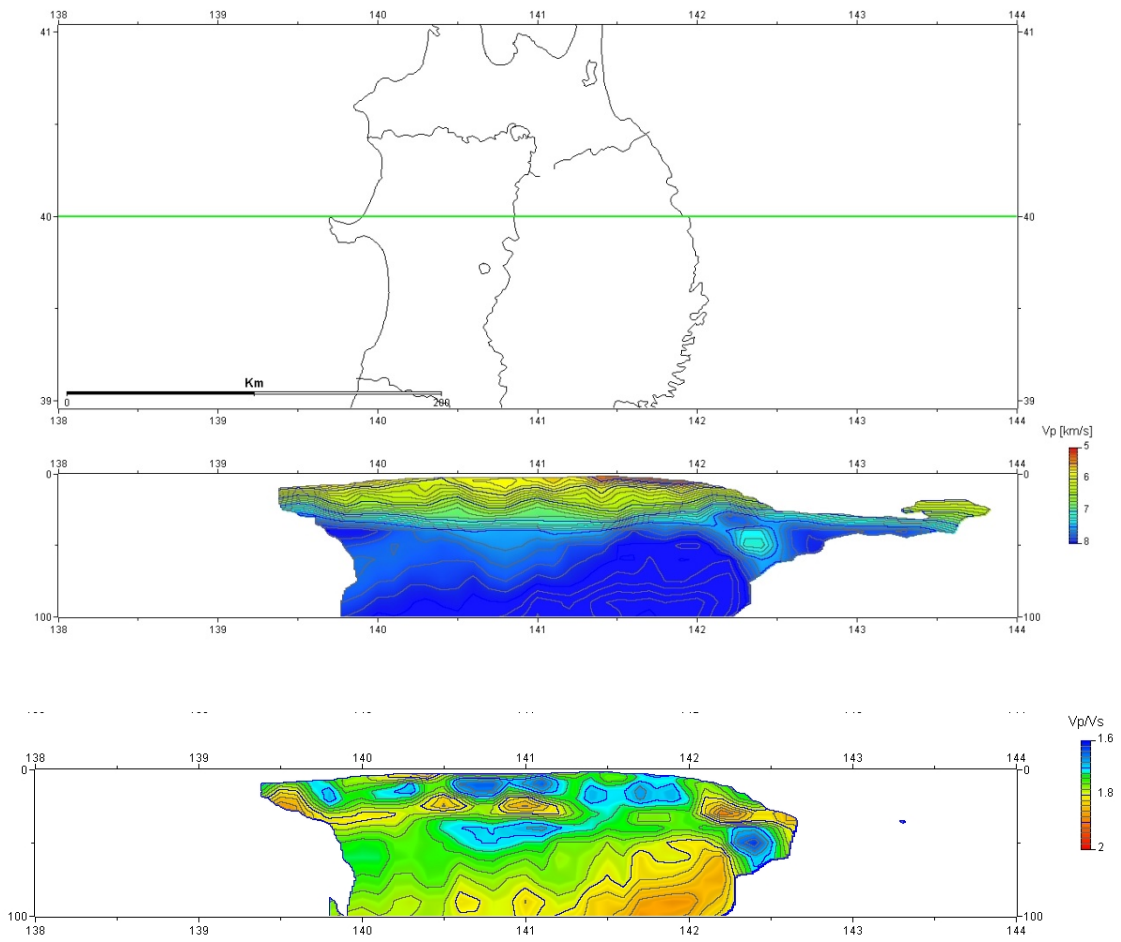


図6 深さ 100 km までの P 波速度と  $V_p/V_s$  (北緯 40 度)。防災科学技術研究所の三次元地震波速度構造<sup>1)</sup>の地震波速度データを使用。

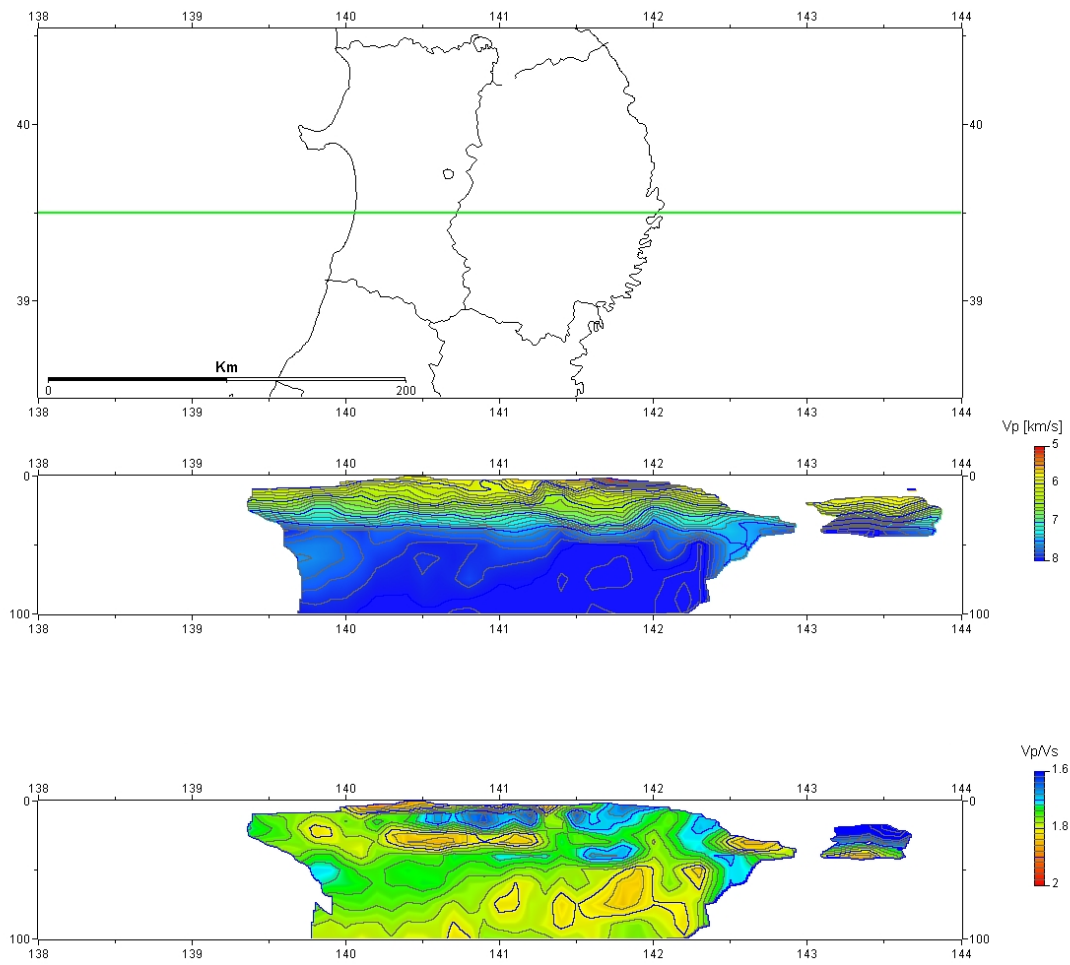


図7 深さ 100 km までの P 波速度と  $V_p/V_s$  (北緯 39.5 度)。防災科学技術研究所の三次元地震波速度構造<sup>1)</sup>の地震波速度データを使用。

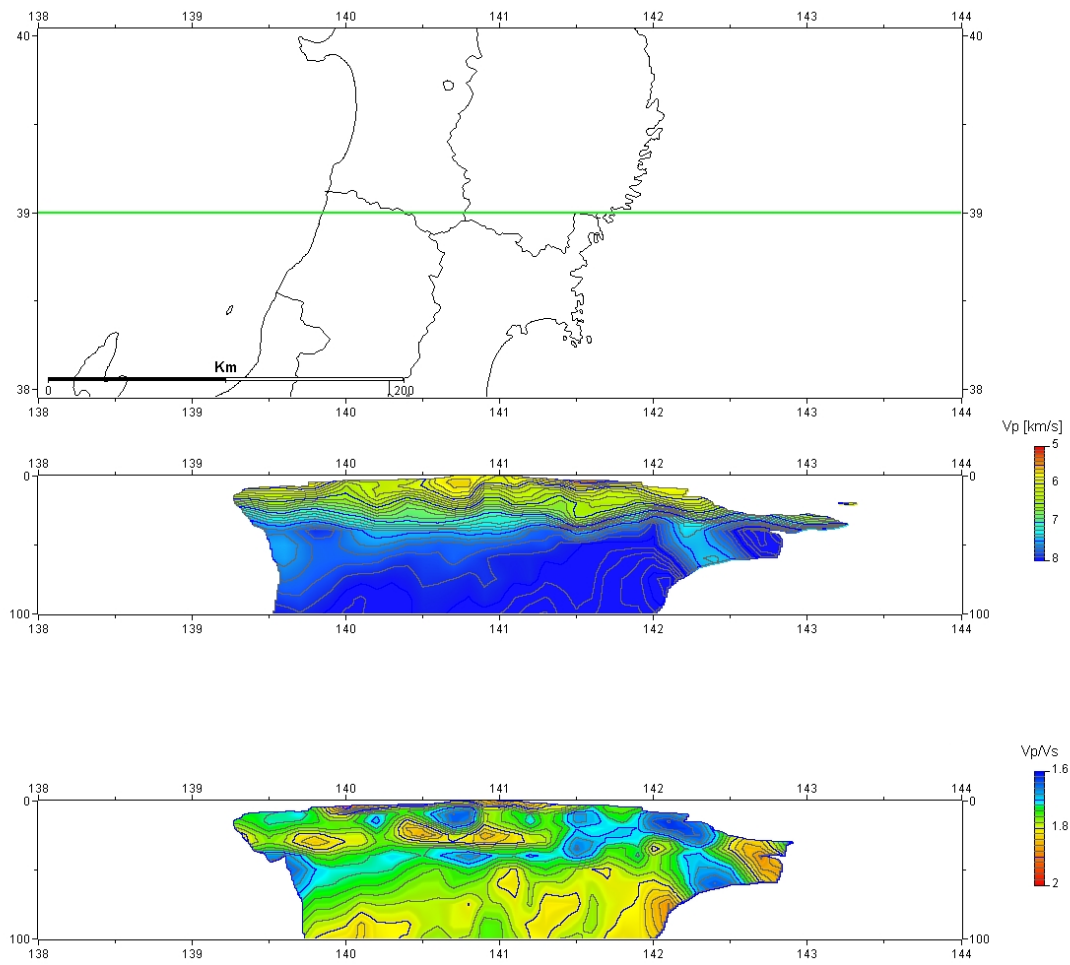


図 8 深さ 100 km までの P 波速度と  $V_p/V_s$  (北緯 39 度)。防災科学技術研究所の三次元地震波速度構造<sup>1)</sup>の地震波速度データを使用。

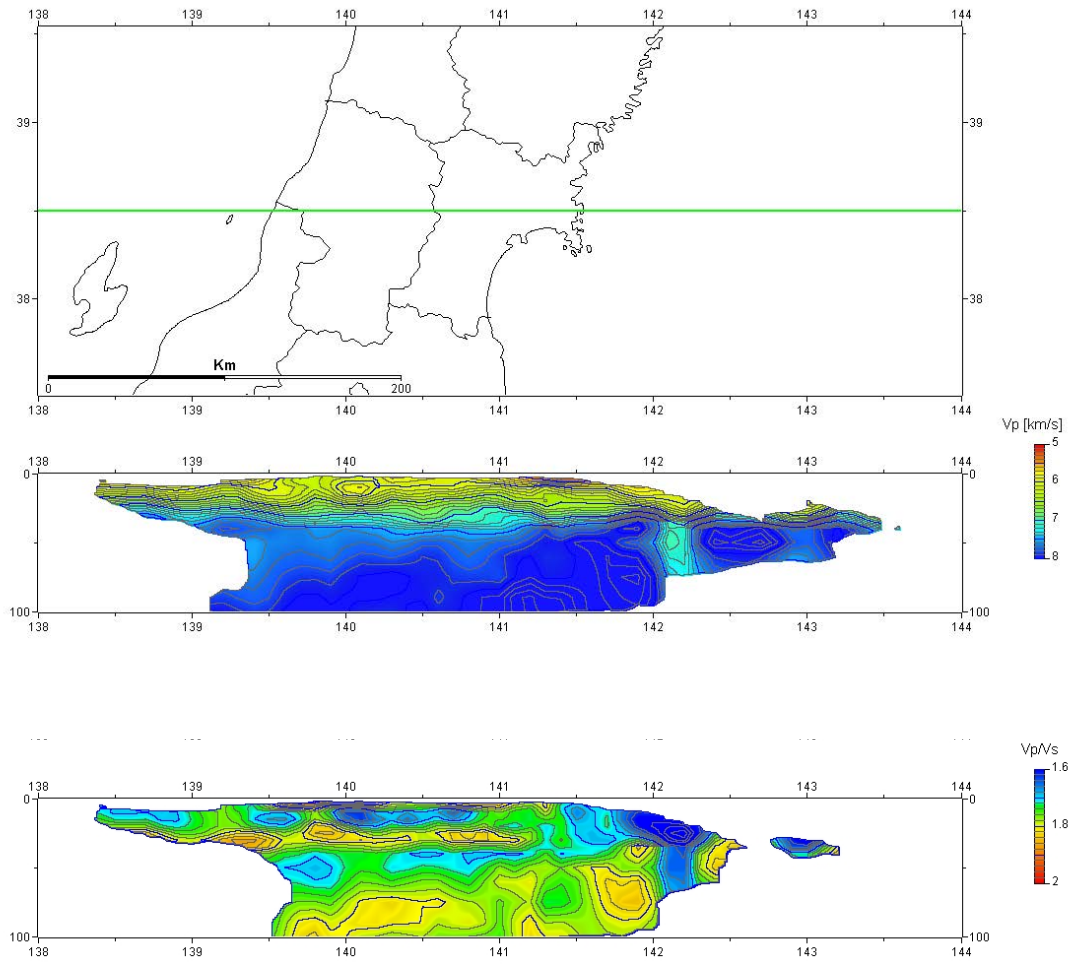


図9 深さ 100 km までの P 波速度と  $V_p/V_s$  (北緯 38.5 度)。防災科学技術研究所の三次元地震波速度構造<sup>1)</sup>の地震波速度データを使用。

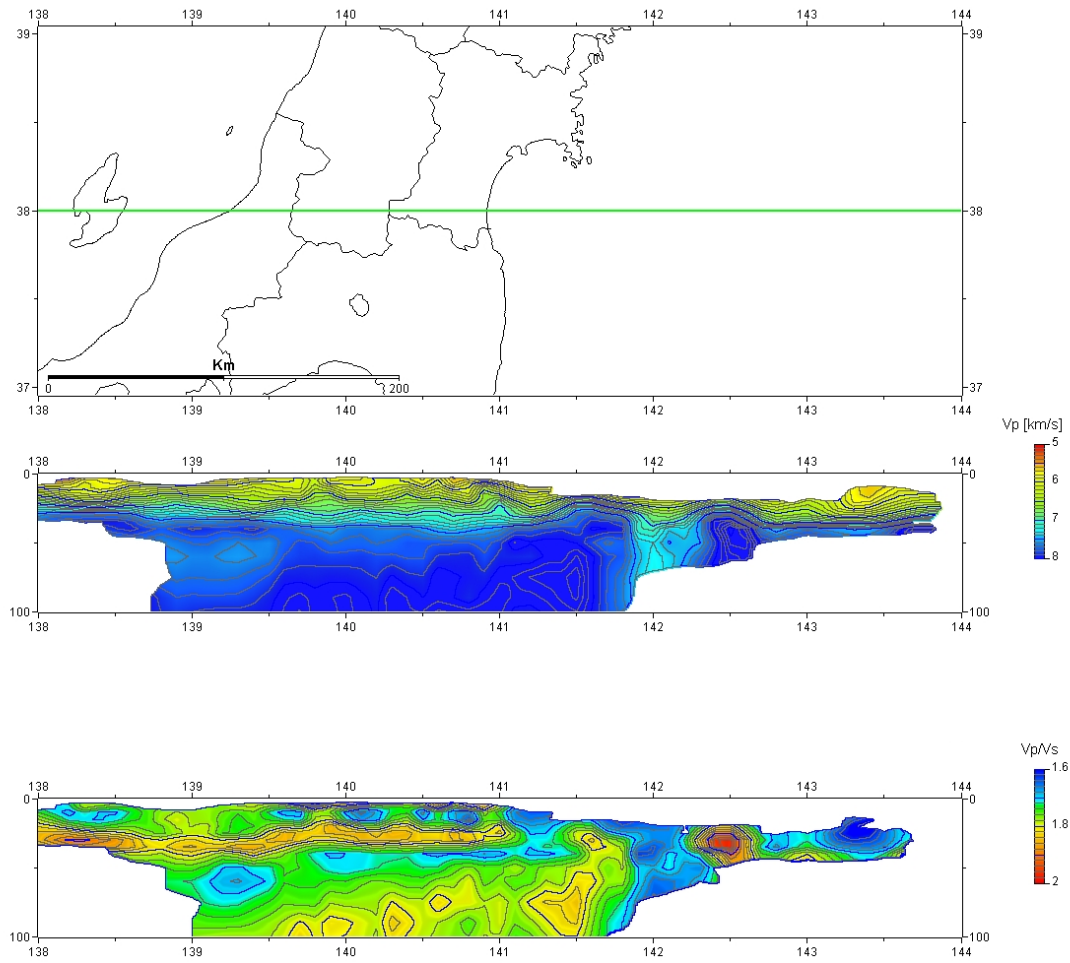
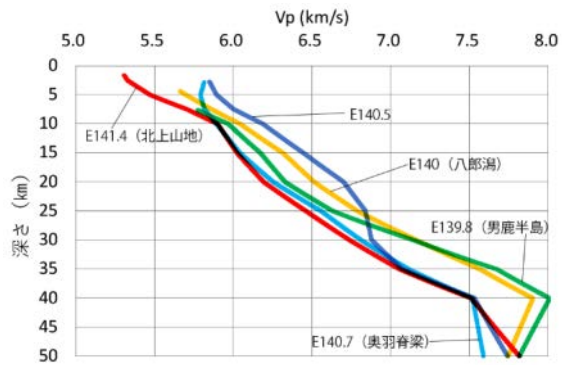
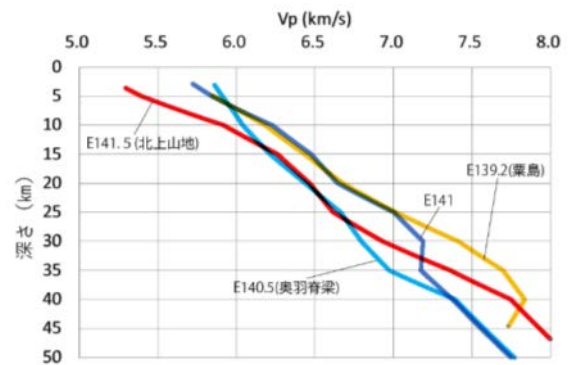


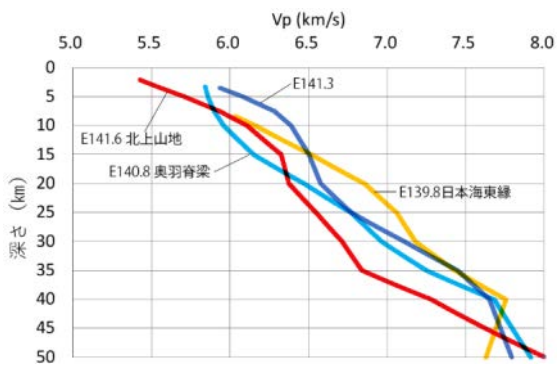
図 10 深さ 100 km までの P 波速度と  $V_p/V_s$  (北緯 38 度)。防災科学技術研究所の三次元地震波速度構造<sup>1)</sup>の地震波速度データを使用。



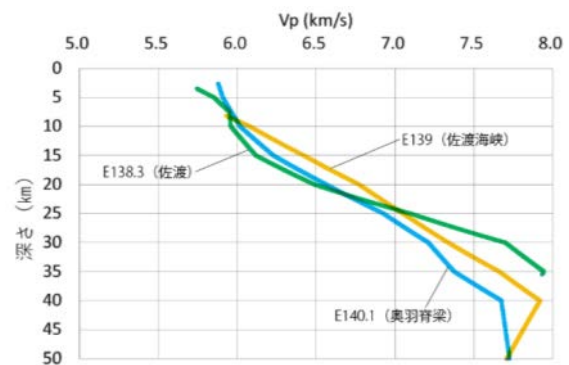
北緯 40 度



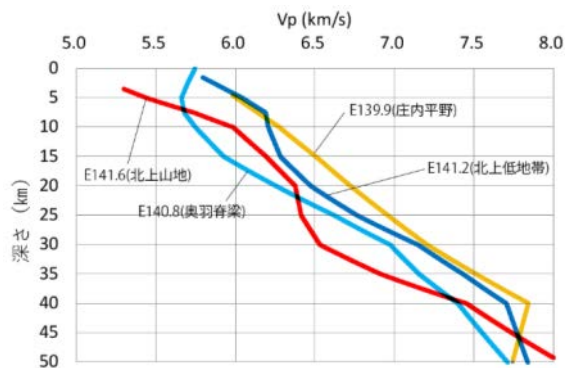
北緯 38.5 度



北緯 39.5 度



北緯 38 度



北緯 39 度

図 11 P 波速度プロファイル。防災科学技術研究所の三次元地震波速度構造<sup>1)</sup>の地震波速度データを使用。

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3）、 $V_p/V_s$ 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。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<sup>1)</sup>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℃の深度、脆性塑性境界深度を推定することを試みてきた（図12）<sup>8)</sup>。これらの手順については平成31年度（令和元年度）「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書（構成岩石モデルの構築）<sup>8)</sup>に記述しているので省略する。ここでは北海道南西部・東北・北陸にいたる日本海沿岸周辺で推定された温度構造や脆性塑性境界深度と他のサブテーマ等で得られた地震発生層下限<sup>2)</sup>を比較考察した。

図12と図13は山形周辺において推定された脆性塑性境界の深さとサブサブテーマ（2.2.5.2）で得られた地震発生層下限D90<sup>2)</sup>の分布を示している。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す。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。北海道南西部・青森・秋田周辺（図14、15）と北陸周辺（図16、17）に関しても脆性塑性境界分布と地震発生層下限D90<sup>2)</sup>の分布を比較した。北海道南西部・東北北西部に関しては、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、日本海東縁部分ではD90が本研究で推定された脆性塑性境界よりも深くなる傾向がある。北陸周辺に関しては、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、日本海東縁の中新世リフト活動部位ではD90が本研究で推定された脆性塑性境界よりも深くなる傾向がある。図18では本サブサブテーマで推定された深さ20kmの温度と300℃の深さを示した。奥羽脊梁山脈周辺で深さ20kmの温度が低く300℃の深さが浅いという特徴がある。つまり、日本海沿岸周辺でD90が深くなるという特徴は同地域の地下の温度が低いことに起因すると考えられる。図19では本研究で推定された脆性塑性境界の深さとD90を比較した。奥羽脊梁山脈周辺では類似した深さ分布を示すが、日本海沿岸周辺ではD90よりも推定した脆性塑性境界が浅く推定されている。本サブサブテーマでは脆性塑性境界の深さは石英の流動パラメーターで近似して見積もっているが、日本海東縁の中新世リフト活動域は苦鉄質岩石が上部地殻を含む地殻全体に分布することが推定されている。つまり、日本海東縁の中新世リフト活動部位でD90が深くなる理由は、地下の温度が低いことに加えて、上部地殻・下部地殻とも苦鉄質岩で構成されていることによると結論される。



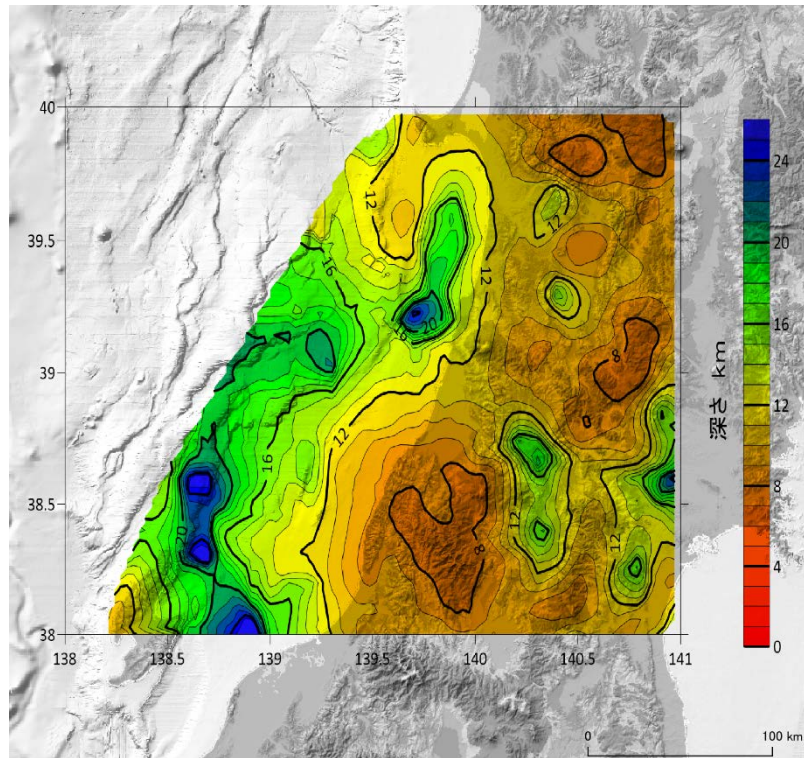


図 12 脆性塑性境界の深さの推定

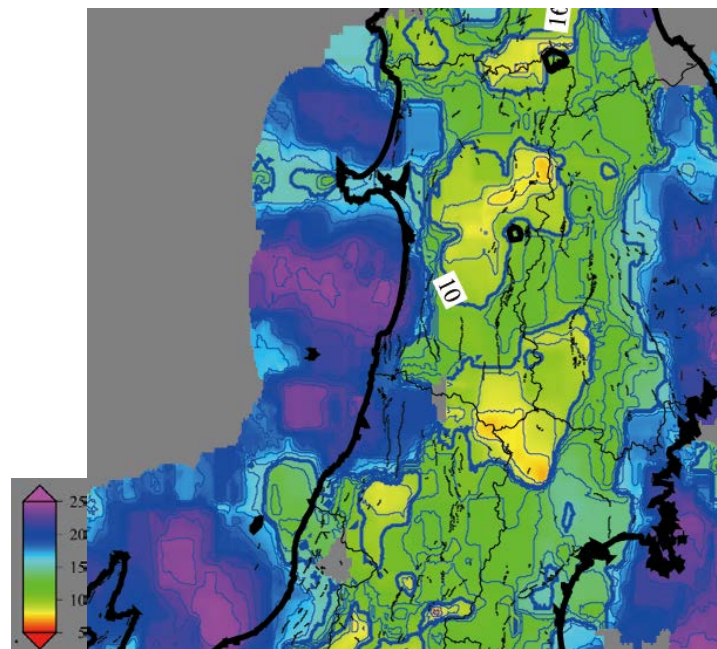


図 13 地震発生層下限 D90<sup>2)</sup>

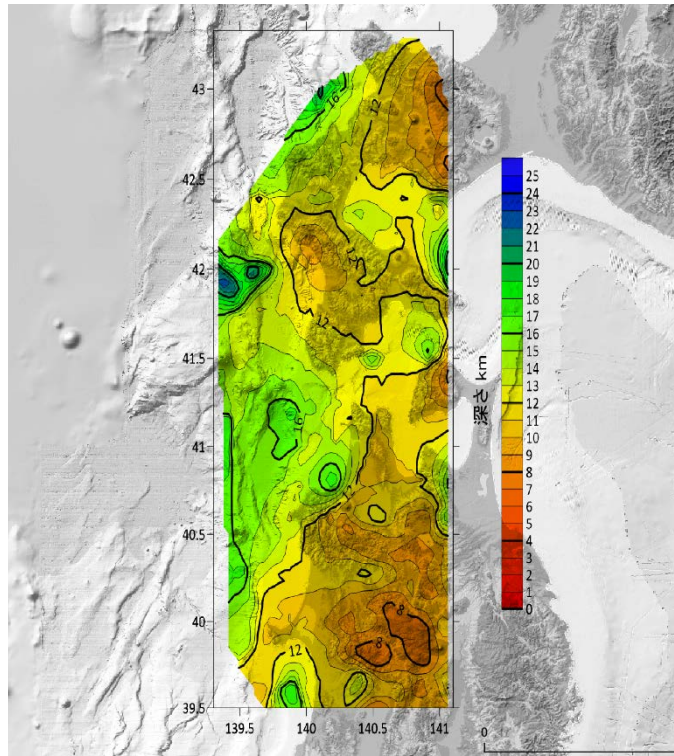


図 14 脆性塑性境界の深さの推定

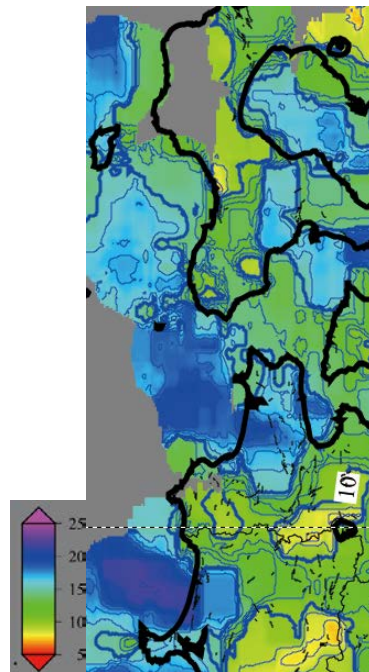


図 15 地震発生層下限 D90<sup>2)</sup>

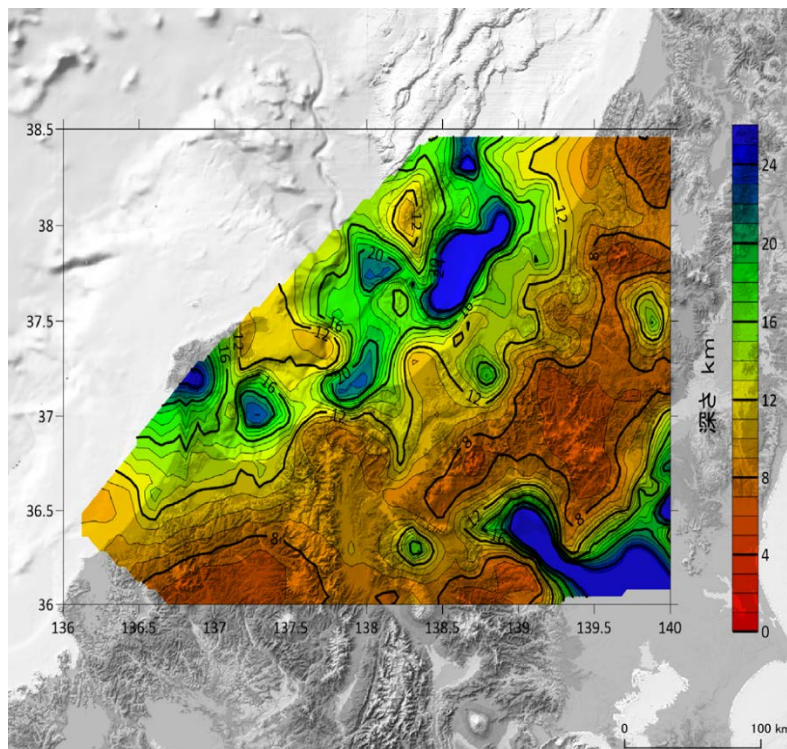


図 16 脆性塑性境界の深さの推定

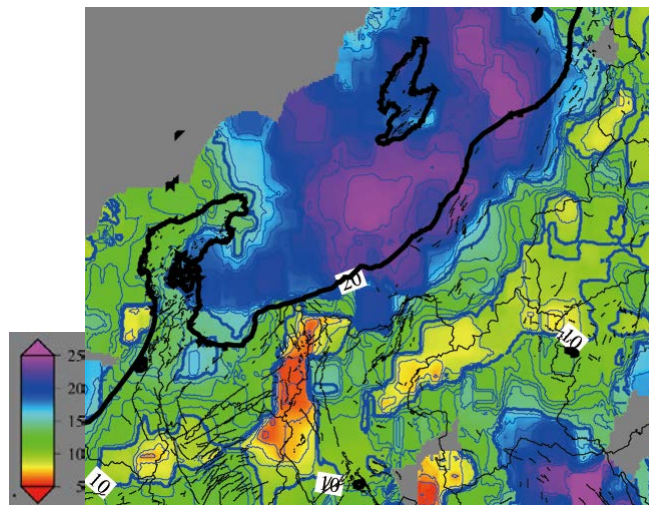


図 17 地震発生層下限 D90%)

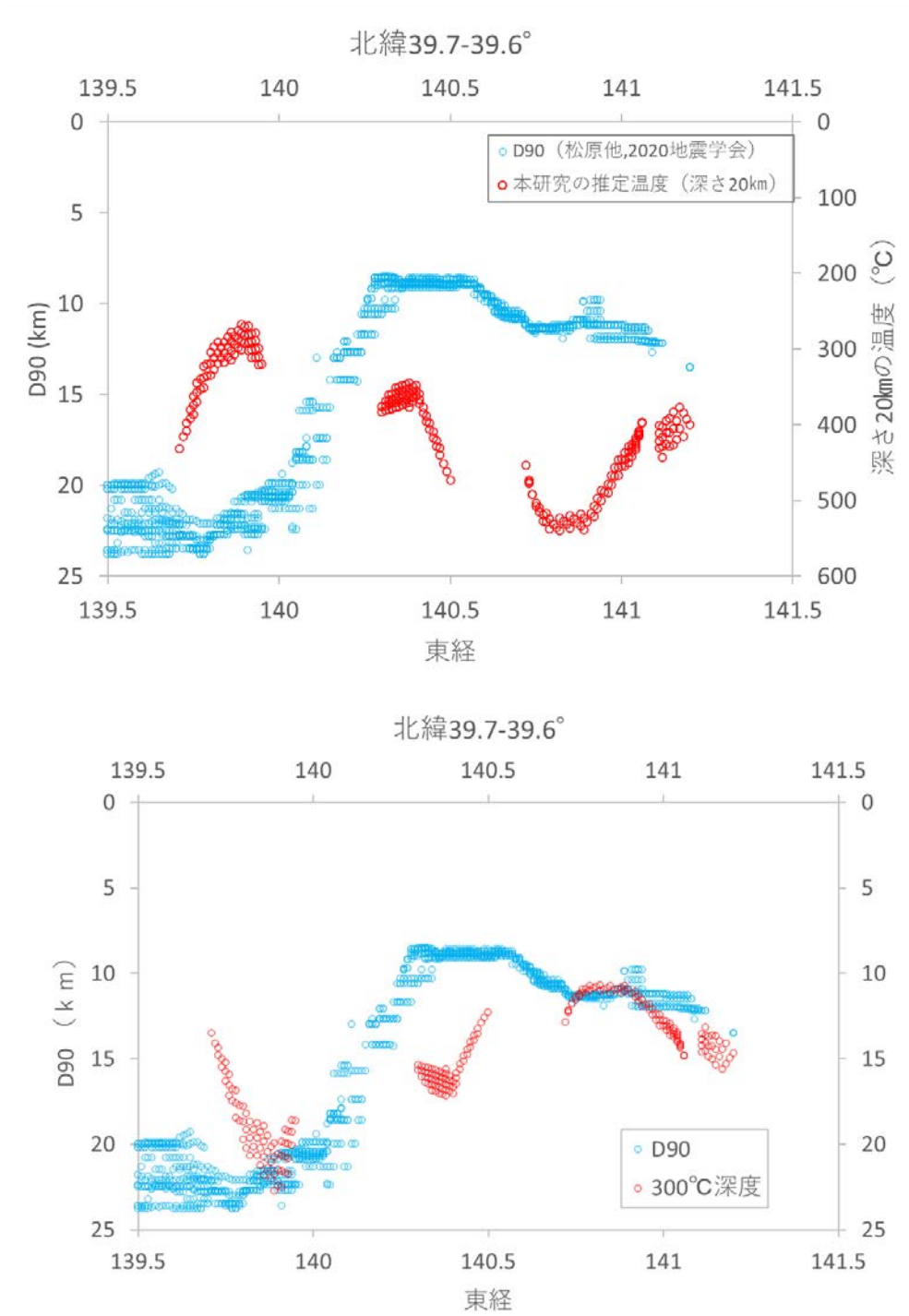


図 18 東北日本、推定された深さ 20 km の温度および 300°C の深さ。地震発生層下限 D90<sup>2)</sup>との比較。

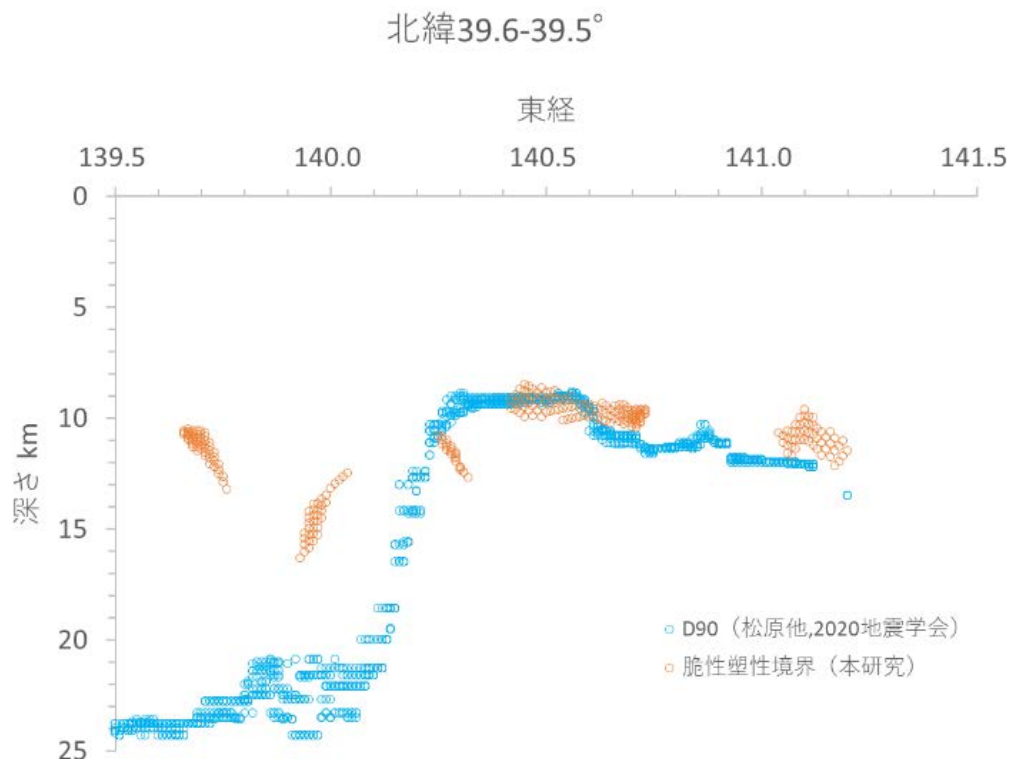
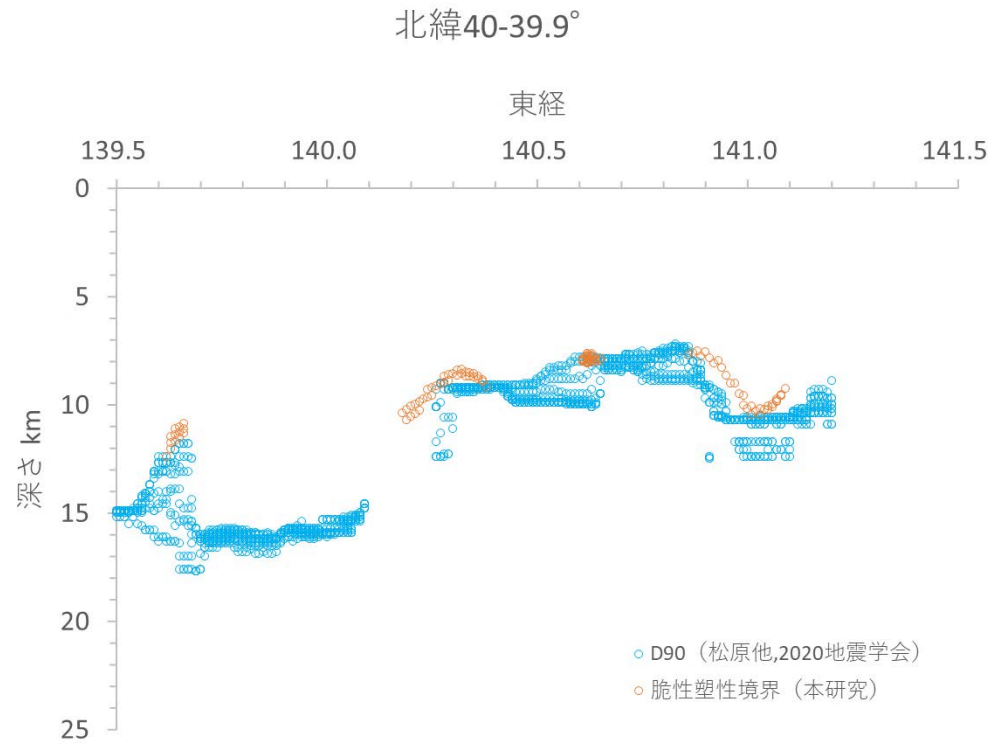


図 19 東北日本、推定された脆性塑性境界と地震発生層下限 D90<sup>2)</sup>

### (c) 結論ならびに今後の課題

岩石鉍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構成岩石、温度構造そして脆性塑性境界の深さを検討した。地殻構成岩石を推定した結果、東北地方の島弧地殻は大きく3タイプに区分されることがわかった。最も主要なタイプは、上部地殻が石英を主要構成鉍物とする岩石（花崗岩類）から、下部地殻が苦鉄質岩で構成されるタイプであり、教科書的な典型的な地殻である。二つ目は日本海東縁に見られるタイプであり、上部地殻の主要構成岩石が苦鉄質岩であり、下部地殻を含めて地殻全体が苦鉄質であるというタイプである。三つめは北上山地に見られるタイプであり、上部地殻と下部地殻が石英を主要構成鉍物とする岩石（花崗岩類）で主に構成されるタイプである。地震波トモグラフィから温度構造と脆性塑性境界の深さを推定した結果、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示された。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、日本海東縁の中新世リフト地殻では推定した脆性塑性境界よりもD90がかなり深く推定されている。地殻構成岩石モデルによれば、中新世リフト地殻は苦鉄質で構成されていると推定されるので、日本海東縁の中新世リフト活動部位でD90が深くなる理由は、地下の温度が低いことに加えて、上部地殻・下部地殻とも苦鉄質岩で構成されていることによると結論される。

本サブサブテーマでもこれまで捕獲岩試料の弾性波速度測定実験に取り組んできたが、まず一番の困難さは風化の影響をほとんど被っていない試料を見出すことである。これまでは限られた試料について弾性波速度測定を行ってきたが、本年度の成果のように、捕獲岩を粉碎焼結することでこの課題をクリアできる方向性を示すことができた。将来の地殻構成岩石に関する研究ではこれまで物性実験に用いることができなかった岩石試料も実験対象とすることが可能であり、より高精度な地殻構成岩石の推定が行われると期待される。

### (d) 引用文献

- 1) Matsubara, M., H. Sato, K. Uehira, M. Mochizuki, T. Kanazawa, N. Takahashi, K. Suzuki and S. Kamiya: Seismic velocity structure in and around the Japanese Island src derived from seismic tomography including NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, *Seismic Waves - Probing Earth System*, IntechOpen, 1-19, doi:10.5772/intechopen.86936, 2019.
- 2) 松原誠, ヤノトモコ, 佐藤比呂志: 日本列島における低地殻熱流量域での深い上盤プレート内の地震発生層下限(D90)の特徴, 日本地震学会 2020 年度秋季大会, 2020.
- 3) Shoji ARAI, Hisatoshi HIRAI, Kozo UTO: Mantle peridotite xenoliths from the Southwest Japan arc: a model for the sub-arc upper mantle structure and composition of the Western Pacific rim. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, vol.95, 9-23, 2000.
- 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) Misha Bystricky, Stephen Mackwell : Creep of dry clinopyroxene aggregates. Journal of Geophysical Research, Vol.106, 13442-13454, 2001.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 平成 31 年度 (令和元年度)「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, 3.2.5.3 構成岩石モデルの構築,  
[http://www.eri.utokyo.ac.jp/project/Japan\\_Sea/JSH31R1Report/PDF/18\\_H31R1JSPJ-C3.2.5.3.pdf](http://www.eri.utokyo.ac.jp/project/Japan_Sea/JSH31R1Report/PDF/18_H31R1JSPJ-C3.2.5.3.pdf)

(e) 成果の論文発表・口頭発表等  
なし

(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) 8 ヶ年の成果

(a) 業務の成果

地球内部の温度は深くなるにつれて上昇し、脆性塑性境界以深では岩石は固相流動する。一方、脆性塑性境界以浅は岩石の破壊領域であり、断層運動によって地震が発生する。脆性塑性境界深度は高地温勾配地域では相対的に浅くなり、低地温勾配地域では深くなる。また、脆性塑性境界の深さは地殻を構成する岩石種によっても異なる。一般的には石英を主要構成鉱物とする岩石 (例えば花崗岩類) が地殻を構成する場合は、脆性塑性境界は相対的に浅くなり、苦鉄質岩 (例えばはんれい岩類) が地殻を構成する場合は、脆性塑性境界は相対的に深くなる。脆性塑性境界深度を推定するためには地殻内部の温度構造と構成岩石の情報が必要となる。本サブサブテーマでは地殻内部の温度分布、構成岩石の分布そして脆性塑性境界の深さを推定し、サブサブテーマ 2.2.5.2 で得られた地震発生層下限モデルと比較を行い、地震発生層下限について考察した。

本サブサブテーマなどで実施してきた高温高压下における岩石鉱物の P 波速度・S 波速度同時測定実験から、P 波速度と S 波速度は岩石種と温度に大きく依存することが示され

ている。一方、 $V_p/V_s$  は温度依存性が極めて小さく、岩石種に大きく依存する。つまり、 $V_p/V_s$  トモグラフィにおいて、異なる  $V_p/V_s$  の部位は異なる岩石種から構成されると解釈できる。 $V_p/V_s$  に加えて P 波速度も考慮すると、岩石種を絞り込める<sup>1),2),3),4)</sup>。さらに、同一岩石種が分布する領域の地震波速度データを抽出することで、温度分布を推定することが可能となる。

岩石鉱物の弾性波速度の視点から東北地方の下部地殻の構成岩石を論じた研究は、先行研究で報告されている<sup>1),2),3),4)</sup>。本サブサブテーマでは同様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<sup>5)</sup>を用いて上部地殻を含む地殻全体の構成岩石の分布を推定した。例えば東北地方の場合、上部地殻には低  $V_p/V_s$  比が広域に分布しており、石英を主要構成鉱物とする岩石（代表的なものとしては花崗岩類）が上部地殻に広く分布していることが読み取れる。一方、八郎潟～庄内平野～栗島～佐渡海峡・新潟平野へと連続する日本海東縁の中新世リフト活動域の上部地殻は相対的に高  $V_p/V_s$  比を示しており、苦鉄質岩石が上部地殻の主な構成岩石であると推定される。

東北地方の下部地殻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<sup>2),4)</sup>。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  $V_p/V_s$  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<sup>2)</sup>。本サブサブテーマでは、深さ 20 km の地震波速度データから  $V_p/V_s=1.77\sim 1.78$  の範囲の P 波速度を抽出し、温度構造や脆性塑性深度を推定した。例えば、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判明した。また、奥羽脊梁山脈周辺や朝日山地周辺で脆性塑性境界深度が浅く、日本海沿岸周辺では深い傾向がわかる。ここで得られた温度分布や脆性塑性境界深度とサブサブテーマ 2.2.5.2 で得られた地震発生層下限 D90<sup>6)</sup>を比較考察すると、定性的には脆性塑性境界深度と D90 の深さ分布は類似した傾向を示した。つまり、日本海東縁の中新世リフト活動部位（日本海沿岸周辺）で D90 が深くなるという特徴は同地域の地下の温度が低いことが要因の一つであると考えられる。しかし、定量的に比較すると、奥羽脊梁山脈周辺について推定された脆性塑性境界深度は地震発生層下限 D90 とほぼ同じ深さであるが、日本海東縁の中新世リフト活動部位では D90 が脆性塑性境界よりも深くなる傾向がある。日本海東縁の中新世リフト活動部位で D90 が深くなる理由は、地下の温度が低いことに加えて、上部地殻・下部地殻とも苦鉄質岩で構成されていることに起因すると考えられる。

#### (b) 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、地殻構成岩石、温度構造および脆性塑性境界深度を推定した。その結果、奥羽脊梁山脈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、日本海東縁の中新世リフト地殻では推定した脆性塑性境界よりも D90 が深くなっている。地殻構成岩石モデルによれば、中新世リフト地殻は主に苦鉄質岩石で構成されていると推定されるので、日本海東縁の中新世リフト地殻で D90 が深いのは、地下の温度が低いことに加えて、上部地殻・下部地殻とも苦鉄質岩で構成されていることに起因すると結論される。



(c) 引用文献

- 1) 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*, 396, 245-259, 2005.
- 2) Nishimoto, S., Ishikawa, M., Arima, M., Yoshida, T., Nakajima, J.,: 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: Solid Earth*, 113, CiteID B12212.
- 3) 石川正弘, 松原誠, 武田哲也 : 北上山地下の珪長質下部地殻と斜方輝石岩マントル : 白亜紀スラブメルティングの証拠, *岩石鉱物科学*, **43**, 100-107, 2014.
- 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*, **123**, 355-364, 2017.
- 5) Matsubara, M., H. Sato, K. Uehira, M. Mochizuki, T. Kanazawa, N. Takahashi, K. Suzuki and S. Kamiya, : Seismic velocity structure in and around the Japanese Island arc derived from seismic tomography including NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, *Seismic Waves - Probing Earth System, IntechOpen*, 1-19, doi:10.5772/intechopen.86936, 2019
- 6) 松原誠, ヤノトモコ, 佐藤比呂志 : 日本列島における低地殻熱流量域での深い上盤プレート内の地震発生層下限(D90)の特徴, *日本地震学会 2020 年度秋季大会*, 2020.

