

## 2. 2. 2. 2 海域プレート構造調査

### 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 年度業務目的

#### (2) 令和 2 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
  - 1) 長期観測型海底地震計データの解析
- (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

#### 2.2.2 海域プレート構造調査

### (b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学地震研究所	教授	篠原 雅尚
	教授	塩原 肇
	准教授	望月 公廣
	助教	一瀬 建日
	助教	悪原 岳
東京海洋大学	准教授	中東 和夫
北海道大学	准教授	吉澤 和範

### (c) 業務の目的

日本海海域において海底地震観測を行い、プレート構造を明らかにし、津波波源モデル・震源断層モデルや数値構造モデルに必要な基礎資料を得る。

### (d) 8カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

#### 1) 平成 25 年度：

日本海大和海盆の領域において、広帯域海底地震計を含む長期観測型海底地震計計 6 台を設置し、長期海底地震観測を開始した。

#### 2) 平成 26 年度：

日本海大和海盆の領域において、広帯域海底地震計を含む長期観測型海底地震計計 6 台を回収・再設置し、長期海底地震観測を継続した。プレート構造を明らかにする解析を実施すると共に、国内外の学会において、情報収集を行った。

#### 3) 平成 27 年度：

日本海大和海盆の領域において、広帯域海底地震計を含む長期観測型海底地震計計 6 台を回収・再設置し、長期海底地震観測を継続した。これまで得られた海底観測データと陸上観測点データと統合処理しトモグラフィ解析を実施した。

#### 4) 平成 28 年度：

日本海大和海盆の領域において、前年度設置し、1 年程度の観測を行った広帯域海底地震計を含む長期観測型海底地震計を回収し、大和海盆における長期海底地震観測を終了した。これまでに蓄積したデータを用いて、大和海盆域の地殻・上部マントルを含む海域プレートの構造を明らかにするためにトモグラフィ解析・レシーバ関数解析を実施した。

5) 平成 29 年度 :

日本海盆の領域において、広帯域海底地震計を含む長期観測型海底地震計 7 台の設置を行い、長期海底地震観測を開始した。また、これまでに得られたデータから、プレート構造を明らかにする解析を実施した。

6) 平成 30 年度 :

日本海盆の領域において、前年度設置し、1 年程度の観測を行った広帯域海底地震計を含む長期観測型海底地震計を回収した。また、観測を継続するために、ほぼ同一地点に 7 台を再設置した。また、回収したデータの解析を開始した。

7) 平成 31 年度 (令和元年度) :

日本海盆の領域において、広帯域海底地震計を含む長期観測型海底地震計を回収し、観測を終了した。これまでに得られたデータを用いて、レーザ関数解析・実体波トモグラフィ解析を継続した。表面波のデータを組み込むために、ジョイントインバージョン解析に着手した。

8) 令和 2 年度 :

日本海盆の領域において、これまでに蓄積した約 2 年間のデータを用いて、日本海盆地の地殻・上部マントルを含む海域プレートの構造を明らかにした。大和海盆のデータとともに、日本海におけるプレート構造に関する成果をとりまとめた。

(e) 令和 2 年度業務目的

日本海盆の領域において、これまでに蓄積した約 2 年間のデータを用いて、日本海盆地の地殻・上部マントルを含む海域プレートの構造を明らかにする。最終年度であるので、日本海におけるプレート構造に関する成果をとりまとめる。学会において成果公表および情報収集を行う。

**(2) 令和 2 年度の成果**

(a) 業務の要約

日本海における地震および津波発生を考える上において、地殻・上部マントルを含むプレートの構造を明らかにすることは重要なデータとなる。特に脆性破壊を起こすリソスフェアの厚さ及びその構造は、津波波源モデル及び震源断層モデルの構築に必要である。深部構造を求めるためには、遠地地震を含む多数の地震を観測できるように、同一地点において数年にわたる長期の観測を行うことが重要である。令和 2 年度は、これまでに本委託研究によって取得された海底地震計のデータを利用して、レーザ関数解析およびトモグラフィ解析を行った。得られた結果から、日本海海域下におけるリソスフェア・アセノスフェア境界 (Lithosphere-Asthenosphere Boundary, LAB) の深さに関する知見を得た。

(b) 業務の成果

1) 長期観測型海底地震計データの解析

本業務では、広帯域海底地震計、短周期海底地震計を用いた長期観測型海底地震計<sup>1)</sup>により取得されたデータの解析を行う。広帯域海底地震計は直径 650 mm のチタン合金製の耐圧容器、固有周期 360 秒の広帯域地震センサー、レコーダー、音響通信制御装置などから構成されている。短周期観測型海底地震計は直径 500 mm のチタン合金製の耐圧容器、マイクロコンピューター制御のジンバルシステムを持つ固有周期 1 秒の速度型地震計、レコーダー、音響通信制御装置などから構成されている。この他にラジオビーコン、フラッシュライトなどが外装されている。地震データは SD カード、またはハードディスクに収録され、電源には 1 年間の連続観測が可能な大容量のリチウム電池を使用している。これらの動作試験などは、設置前に東京大学地震研究所にて実施した。本委託研究では、前年度までに、大和海盆においては 3 年間、日本海盆においては 2 年間の観測データを取得している。本年度も、これらのデータを利用して、レシーバ関数解析およびトモグラフィ解析を継続した。

前年度までに、広帯域地震計の波形記録を用いて S 波レシーバ関数を計算し、LAB 由来の  $S_p$  変換波を抽出することに成功している。各観測点で深度変換したスタック波形は、大和堆の下で LAB が深いことを示唆している（図 1）。本年度はレシーバ関数波形をより定量的に解釈するために、レシーバ関数波形インバージョン解析用のソフトウェアを開発した。本ソフトウェアには、モデルパラメタ数の仮定を必要とせず、かつ誤差の推定が可能な非線形インバージョン手法<sup>2)</sup>を実装した。また、効率良い解の探査を行うために、パラレルテンパリング法<sup>3)</sup>と呼ばれる計算手法を導入した。波形インバージョン解析を行うにあたって、海底の堆積物がレシーバ関数波形に与える影響についても考察した。海底地震計で記録される波形では、柔らかい堆積層内で多重反射する S 波によって、水平動記録にスペクトルノッチが現れることが解析的に示された。デコンボリューション時に安定化のために与えるダンピング値や観測波形に含まれるノイズによってこのスペクトルホールが埋まると、計算される S 波レシーバ関数の振幅が顕著に小さくなることが判明した。このような影響を考慮に入れつつ、インバージョン解析を行った。

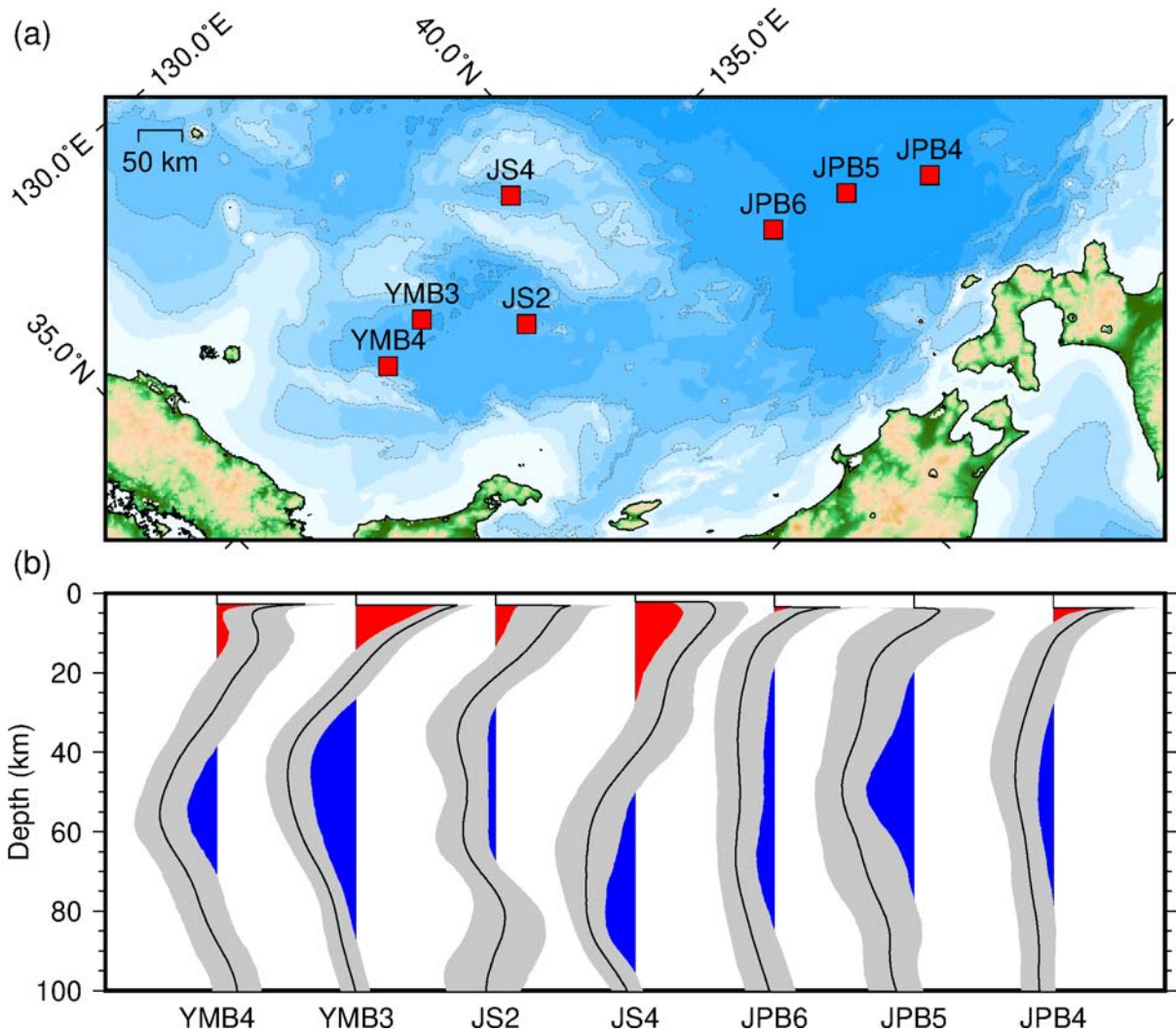


図 1 広帯域地震計データへの S 波レシーバ関数解析の適用結果。(a) 観測点の配置図。(b) 各観測点でスタックした S 波レシーバ関数。S 波レシーバ関数は、正・負のフェーズがそれぞれ赤、青色で示されており、95%信頼区間を灰色で示す。深度変換にあたっては、波形インバージョンにより求められた構造を仮定している。

上述のインバージョン解析を大和海盆、大和堆、日本海盆を代表する観測点 (YMB4、JS4、JPB4 観測点、図 1a 参照のこと) に適用し、堆積層構造から上部マントルの深さ (~100 km) までの一次元 S 波速度構造を求めた。その結果、大和海盆、日本海盆の直下では 45 km の深さに LAB が求められたのに対し、大和堆の下では、65 km の深さに求められた (図 2)。

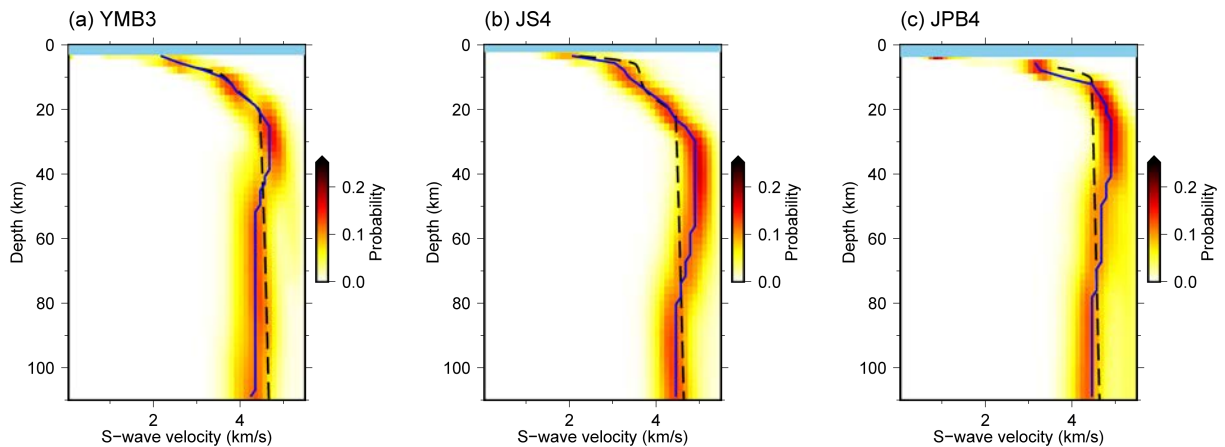


図 2 S 波レシーバ関数波形のインバージョン解析結果。黒色の波線は先見情報として用いたリファレンスモデルを表す。黄色から赤色の背景色がインバージョンで求めた S 波速度の事後確率を表す。青色の実線は、各深さにおける S 波速度の中央値を表す。

並行して、実体波トモグラフィ解析による、3次元速度構造の解析が進められた。本年度は、これまでに大和海盆と日本海盆で得られているデータについて、P・S波初動の検測を進め、最終的に得られた 5,701 個の震源を用いてトモグラフィ解析を行なった。

トモグラフィ解析によって得られた P 波速度構造を図 3 に示す。図中では、全球の平均的な速度構造モデルである、IASP91 モデル<sup>4)</sup>からのずれを表していることに注意されたい。海底地震計のデータを加えることで、解像可能な領域が日本海海域側に広く拡張している。大和堆の直下で、高速度異常が日本海盆・大和海盆と比べて深く（65 km 程度）まで続いており、S 波レシーバ関数で得られた傾向と整合的であることが確認された（図 4b,c）。また、同様な傾向は、表面波トモグラフィを行った先行研究<sup>5)</sup>による S 波構造モデルにも表れている（図 4d）。

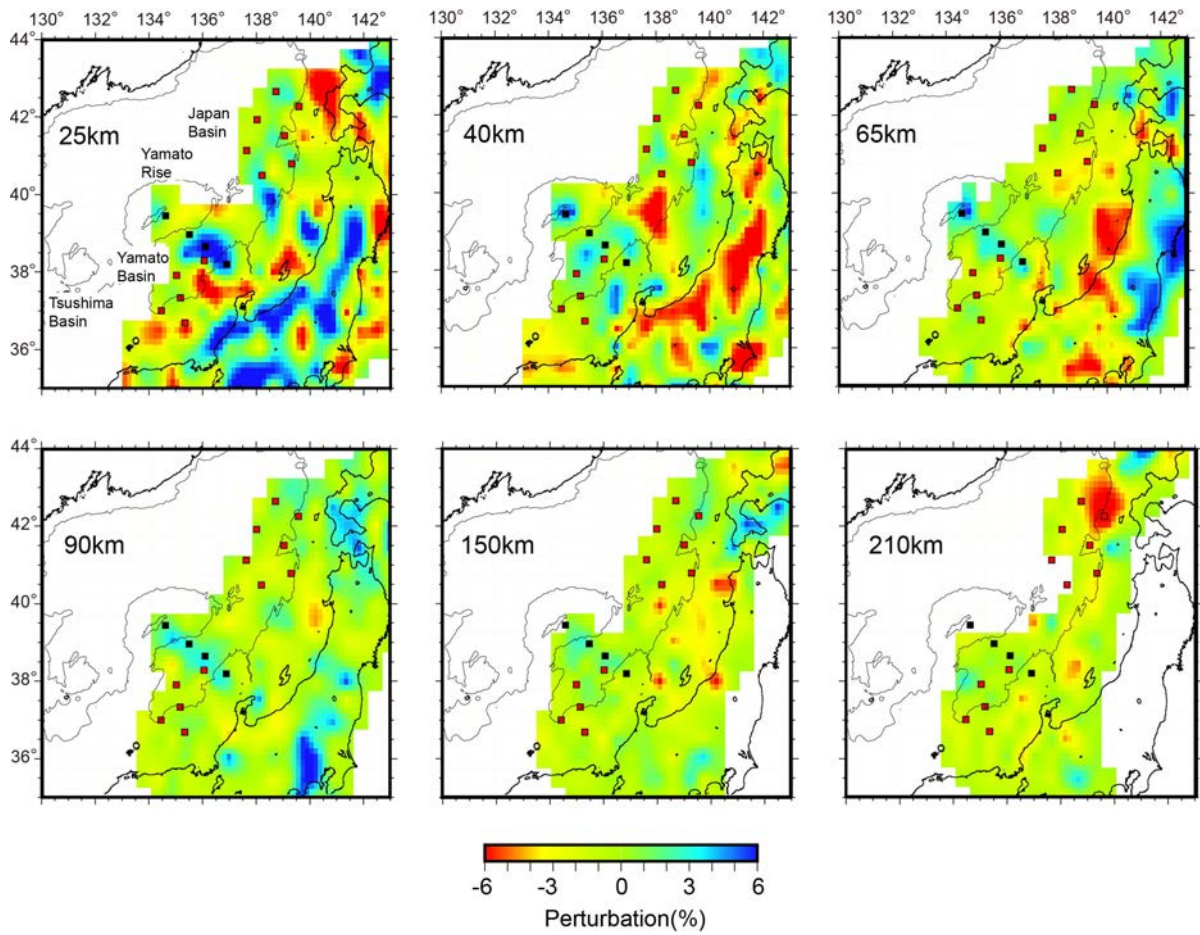


図3 実体波トモグラフィ解析で得られたP波速度構造。全球の平均的な一次元速度構造モデル（IASP91モデル<sup>4)</sup>からのずれを示している。



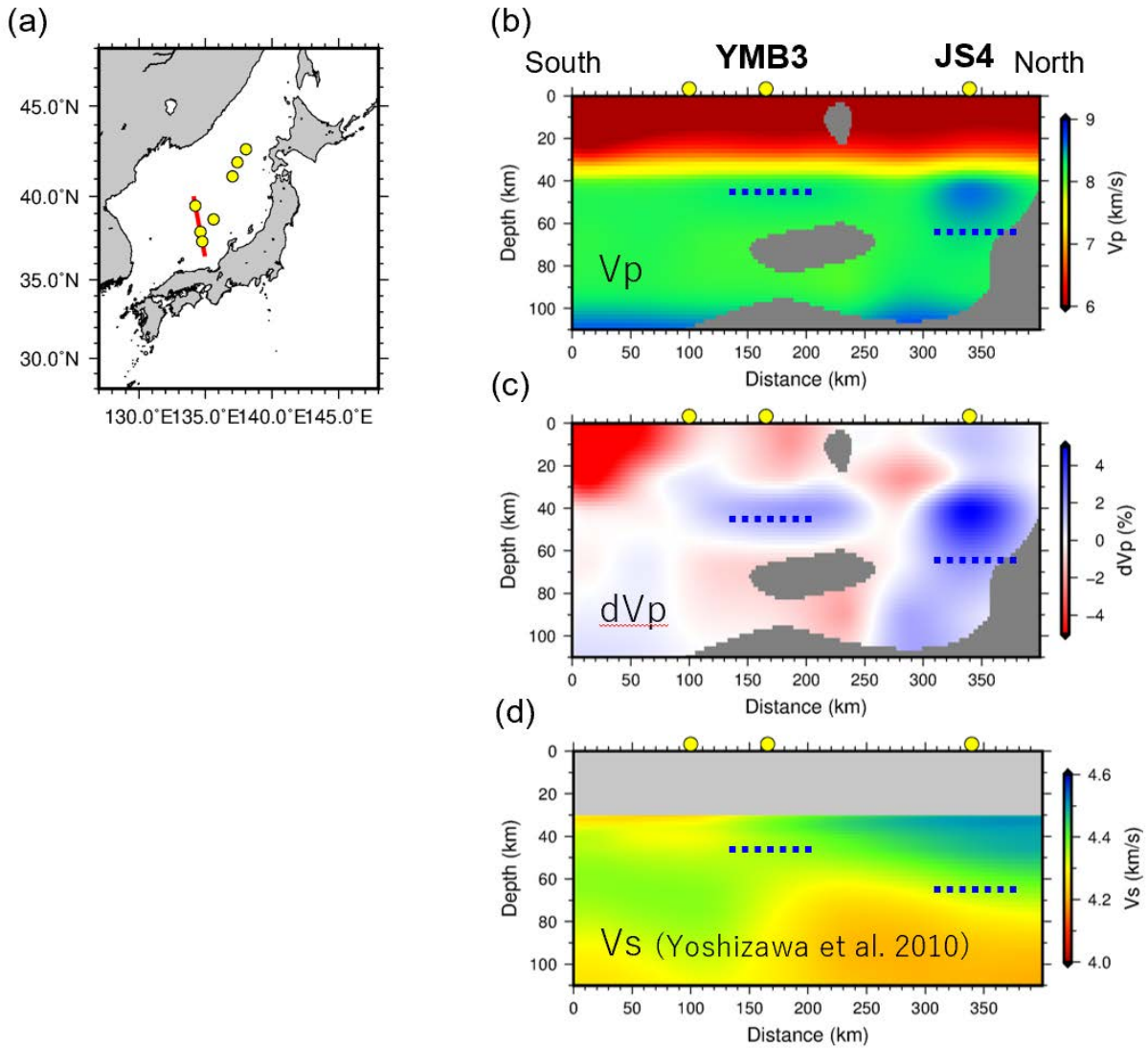


図4 レシーバ関数解析により得られた LAB の深さとトモグラフィモデルの比較。(a) 黄色の丸が観測点、赤い線は断面図の位置を示す。(b) 実体波トモグラフィ解析で得られた P 波速度構造の断面図。(c) 実体波トモグラフィ解析で得られた P 波速度異常構造の断面図。全球の平均的な一次元速度構造モデル (IASP91 モデル<sup>4)</sup>) からのずれを示している。(d) 表面波トモグラフィ解析を行った先行研究<sup>5)</sup>による S 波速度構造モデル。青色の点線はレシーバ関数のインバージョンにより求められた LAB の深さを示す。

大和海盆と日本海盆下で同程度の深さ (45 km 程度) に LAB が得られたことは、両海盆の形成時期・メカニズムがおおよそ共通であることを示唆している。大和海盆・日本海盆の下では背弧拡大によって薄いリソスフェアが形成されていると考えられる。一方で、大和堆の下では、大陸起源の厚いリソスフェアが存在すると解釈できる。

(c) 結論ならびに今後の課題

大和海盆・日本海盆に設置された海底地震計のデータについて、レシーバ関数解析およ



びトモグラフィ解析を行い、海域プレート構造に関する知見を得た。S波レシーバ関数波形のインバージョン解析では、大和海盆・日本海盆の下でLABが45 km程度の深さに位置するという示唆を得た。一方、大和堆の下ではLABの位置が深くなっており、65 kmの深さに求められた。実体波トモグラフィ解析で求めた3次元P波速度構造モデルや、先行研究で報告されている3次元S波速度構造でも同様な傾向がみられ、結果の妥当性が確認できる。

現状ではレシーバ関数解析の結果に重みをおいて、観測点直下に限定したLABの深さを議論している。今後は、実体波・表面波トモグラフィ解析による3次元速度構造モデルを合わせることで、水平方向の不均質についてより詳細に検討し、日本海海域下におけるLABの面的なマッピングを試みることを有益であると考えます。

(d) 引用文献

- 1) 金沢敏彦, 篠原雅尚, 塩原肇: 海底地震観測の最近の進展－海底地震観測システムと海底における自然地震観測の進展について－, 地震 2, Vol.61, pp.S55-S68, 2009.
- 2) Akuhara, T., Tsuji, T., Tonegawa, T.: Overpressured underthrust sediment in the Nankai Trough forearc inferred from transdimensional inversion of high-frequency teleseismic waveforms, Geophysical Research Letters, Vol.47, No.15, pp.e2020GL088280, 2020.
- 3) Sambridge, M.: A Parallel Tempering algorithm for probabilistic sampling and multimodal optimization, Geophysical Journal International, Vol.196, No.1, pp.357–374, 2014.
- 4) Kennett, B.L.N., and Engdahl, E.R.: Travel times for global earthquake location and phase association. Geophysical Journal International, Vol.105, pp.429-465, 1991.
- 5) Yoshizawa, K., Miyake, K., Yomogida, K.: 3D upper mantle structure beneath Japan and its surrounding region from inter-station dispersion measurements of surface waves, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol.183, No.1–2, pp.4-19, 2010.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Seismic transdimensional inversion tools for flat and isotropic layered structures in the ocean (SEIS-FILO) (ポスター発表)	Akuhara, T.	AGU 2020 Fall meeting (Virtual)	令和2年 12月15日	国外
The lithosphere-	Akuhara, T.,	IRIS Marine	令和3年3	国外

asthenosphere boundary beneath the Sea of Japan back-arc basin (ポスター発表)	Nakahigashi, K., Shinohara, M., Yamada, T., Yamashita, Y., Shiobara, H., Mochizuki, K.	Seismology Symposium (Virtual)	月11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

名称	機能
Seismic transdimensional inversion tools for flat and isotropic layered structures in the ocean (SEIS-FILO)	レシーバ関数と表面波インバージョンの非線形インバージョン解析を行う。

3) 仕様・標準等の策定

なし

**(3) 8 ヶ年の成果**

(a) 業務の成果

日本海における地震および津波発生を考える上において、地殻・上部マントルを含むプレートの構造を明らかにすることは重要なデータとなる。特に脆性破壊を起こすリソスフェアの厚さ及びその構造は、津波波源モデル及び震源断層モデルの構築に必要である。本委託研究では、海底地震計を用いた自然地震観測を大和海盆において3年間、日本海盆においては2年間行った。得られたデータの解析によってプレート構造を明らかにすることを目指した。

海域観測で得られたデータと日本列島上の定常観測網で得られたデータを統合し、実体波トモグラフィ解析を行うことで、従来よりも海側に解像可能領域が広がった3次元P波・S波速度構造を得た。大和堆の下では、マントル内の高速度異常が周囲と比べて深く(60–70 km)まで続いていることが明らかとなった(図4b,c)。また、日本海海域の地下100 km

以深に大規模な地震波低速度域が見つかった。日本海海域下における沈み込み帯ダイナミクス of 新たな知見が得られた<sup>1)</sup>。

レシーバ関数は、地下の不連続面に由来する変換波を抽出する手法であり、LAB の深さを高精度に拘束できる有力な手法である。しかしながら、海底地震計への応用例は少なく、海表面や堆積層内での多重反射波のような、海域データに特有なノイズの影響についてはほとんど議論されてこなかった。このような海域ノイズの影響下でも正しくレシーバ関数を計算するために、新しいデコンボリューション手法を開発した<sup>2)</sup>。新手法で高周波帯域の P 波レシーバ関数を計算することで、堆積層スケール (<1 km) の細かい構造を解像できるようになった。その一方で、多重反射波の影響で、深部構造の推定が難しいことも分かってきた。

S 波レシーバ関数は、原理上多重反射波の影響を受けない。日本海海域のデータを用いて計算された S 波レシーバ関数は、確かに LAB 由来の Sp 変換波と考えられる負のフェーズを示し、大和堆の下で LAB が深くなっていることが示唆された (図 1)。また、インバージョン解析による定量的な解釈の結果、大和海盆および日本海盆の下では LAB が 45 km 程度、大和堆の下では 65 km 程度の深さに位置することが明らかとなった (図 2)。

#### (b) 結論ならびに今後の課題

本委託研究では、海底地震観測により得られた自然地震データの解析によって、日本海海域下のプレート構造に関する調査を行った。S 波レシーバ関数の結果から、大和海盆と日本海盆の下では LAB が深さ 45 km 程度に位置するのに対し、大和堆の下では 65 km 程度まで深くなっていることが明らかとなった。同様な傾向は、実体波トモグラフィ解析の結果からも示唆された。レシーバ関数によって観測点直下の LAB の深さを精度よく求めることに成功した。今後は、実体波・表面波トモグラフィ解析による 3 次元速度構造モデルを合わせることで、水平方向の不均質についてより詳細に検討し、日本海海域下における LAB の面的なマッピングを試みることにより、日本海における地震および津波発生を考えるためにさらに有用な情報が得られると考える。

#### (c) 引用文献

- 1) Nakahigashi, K., Shinohara, M., Yamada, T., Uehira, K., Sakai, S., Mochizuki, K., Shiobara, H., Kanazawa, T.: Deep slab dehydration and large-scale upwelling flow in the upper mantle beneath the Japan Sea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.120, No.5, pp.3278-3292, 2015.
- 2) Akuhara, T., Bostock, M.G., Plourde, A.P., Shinohara, M.: Beyond receiver functions: Green's function estimation by transdimensional inversion and its application to OBS data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.124, No.2, pp.1944-1961, 2019.

