HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 3次元速度構造を考慮した襟裳岬周辺における地震の震源決定 |
| Author(s) | 椎名, 高裕; 高橋, 浩晃; 勝俣, 啓 他 |
| Citation | 北海道大学地球物理学研究報告, 81, 33-43 |
| Issue Date | 2018-03-19 |
| DOI | https://doi.org/10.14943/gbhu.81.33 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/68477 |
| Rights(URL) | https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/ |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | GBHU_81_p33-.pdf |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 81, March 2018, pp. 33 － 43
doi : 10. 14943 / gbhu. 81. 33

論説

# 3 次元速度構造を考慮した襟裳岬周辺における地震の震源決定

椎名　高裕・高橋　浩晃・勝俣　　啓・一柳　昌義
北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

（2018 年 2 月 15 日受理）

# A distribution of earthquakes around the Erimo cape, Hokkaido, Japan, determined by three-dimensional velocity structure

Takahiro SHIINA, Hiroaki TAKAHASHI, Kei KATSUMATA, and Masayoshi ICHIYANAGI
Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received February 5, 2018)

In order to evaluate differences in an earthquake distribution in one- or three-dimensional velocity structures, we tried re-determinations of locations of earthquakes occurred around the Erimo cape, Hokkaido, Japan, in the three-dimensional heterogeneous model. Because of low-velocity anomaly developed beneath the Hidaka mountain range, the relocated earthquakes mark that their focal depths tend to decrease. The maximum focal depth change is about 15 km. These changes of relocated earthquakes from those estimated in the one-dimensional model suggest that precise determinations of hypocenter considering realistic, three-dimensional velocity structure would improve our understandings for seismic activity and their focal mechanism around the Erimo cape.

## Ⅰ．イントロダクション

観測データから地震の震源決定を行う際には，もっぱら 1 次元速度構造モデル（例えば，JMA2001 モデル（上野・他 , 2002）や北海道大学のルーチン構造（笠原・他 , 1994）が使用される．一方，沈み込み帯である日本では，海洋プレートの沈み込みなどにより，不均質構造が 3 次元的に発達していることが知られている．加えて，近年，これらの不均質構造と地震発生の密接な関係が指摘されている．このため，高精度に決定された震源分布と不均質構造を比較することは，地震発生やその活発な活動域の形成メカニズムに対する理解を深める上で非常に重要である．しかしながら，震源決定と不均質構造（特に地震波速度構造）との間にはしばしばトレードオフが生じるため，大規模あるいは極端な地震波速度の異常域が存在する領域周辺では精度のよい地震の震源決定が困難となるほか，1 次元速度構造のように単純化したモデルのもとでは推定される震源位置に

CC BY-NC
この論文はクリエイティブ・コモンズ 表示 － 非営利 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています（http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/）．

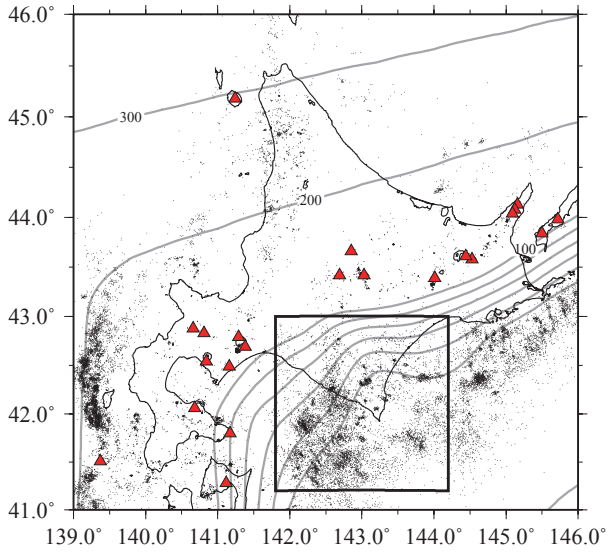



**Fig. 1.** Shallow seismicity (depths of <60 km) in Hokkaido, Japan. A black box indicates study area. Black dots denote earthquakes. Gray contours are the iso-depth contour of the Pacific slab (Kita et al., 2010). Red triangles are volcanoes.

系統的なずれが生じることが予想される．

そこで，本研究では北海道の中でも地震活動が活発な地域のひとつである襟裳岬周辺（Fig. 1）において，3 次元速度構造を考慮した地震の震源位置の決定を行った．北海道中軸部では東北日本弧と千島弧の衝突が生じ，その結果，日高山脈下などでの複雑な構造の発達が知られている（e.g., Tsumura et al., 1999; Murai et al., 2002; Kita et al., 2010, 2012）．襟裳岬周辺は北海道中軸部の中でも地震波速度構造が最もよく調べられている地域であり，顕著な低速度域の存在が明らかになっている（e.g., Kita et al., 2010, 2012）．したがって，複雑な不均質構造が発達し，その分布が明らかになっている襟裳岬周辺は，震源位置推定における 1 次元構造と 3 次元構造の違いを詳しく議論するうえで最も適した地域といえる．

## Ⅱ．データ・手法

本解析では，襟裳岬周辺で 2016 年 1 月から 2017 年 10 月までに発生した地震を対象とする．震源情報（緯度，経度，深さ，読み取り記録など）は気象庁一元化震源カタログを参照した．なお，震源決定フラグが `K`（気象庁震源）および `k`（簡易気象庁震源）となる地震のみを使用した．マグニチュード範囲は 1.0–6.7，震源深さ範囲は 0–150 km である．また，震源深さが最も近い観測点までの震央距離よりも大きい地震は解析から除外した．解析対象となる地震は 745 個であり，観測点の数は 31 である．解析に使用した地震と観測点の分布を Fig. 2 に示す．

速度構造は初動走時の情報から推定された P 波速度分布（Kita et al., 2010）をベースにした．

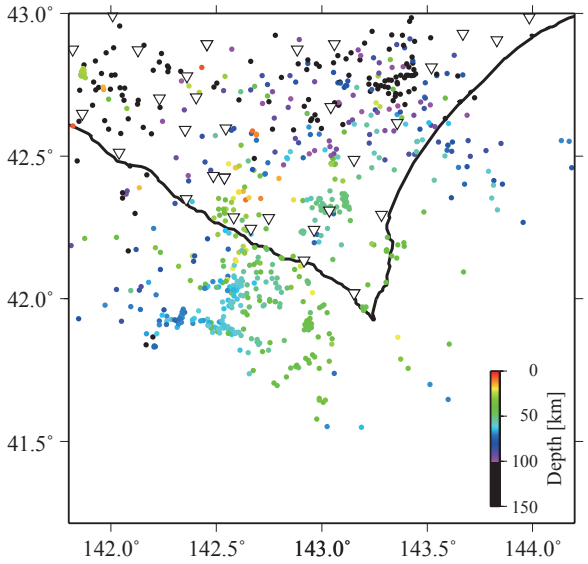



**Fig. 2.** Distributions of earthquakes (colored circles) and stations (inverted white triangles) used in this study.

ただし，本解析では Kita et al. (2010) の解析領域外の速度も必要とする．その際には，5.85 km/s を下限として 1 次元速度構造(JMA2001 モデル(上野・他，2002)) の P 波速度を参照する．この下限速度は，1 次元速度を仮定した場合に，本解析で使用する観測走時データの残差が最も小さくなるように決めた．以下では本解析で使用した 1 次元速度構造を JLP モデル (Fig. 3)，3 次元速度構造を KT モデル (Fig. 4) と呼ぶ．

震源再決定には double-difference tomography 法 (Zhan and Thurber, 2003; 2006) を使用する．ただし，速度構造として KT モデルを仮定し，震源位置のみを未知数とする．再決定には P 波の読み取り記録のみを適用し，相対走時データの重みは小さく (通常の走時データに対して 0.05) とした．以下では 10 回のイタレーション後に得られた震源の分布を結果として示す．

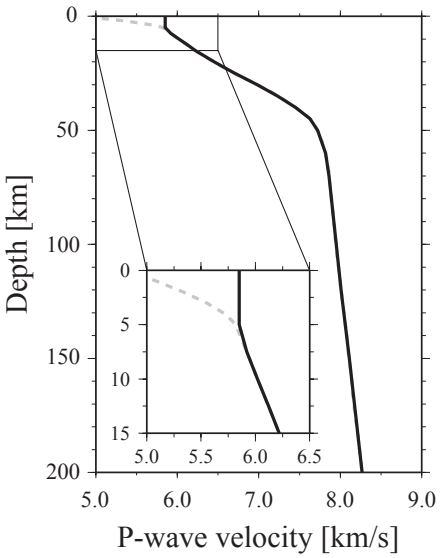



**Fig. 3.** The one-dimensional P-wave velocity structures. Gray dashed and black lines show the JMA2001 model (Ueno et al., 2002) and the JMA model with limited P-wave velocity (JLP) model.

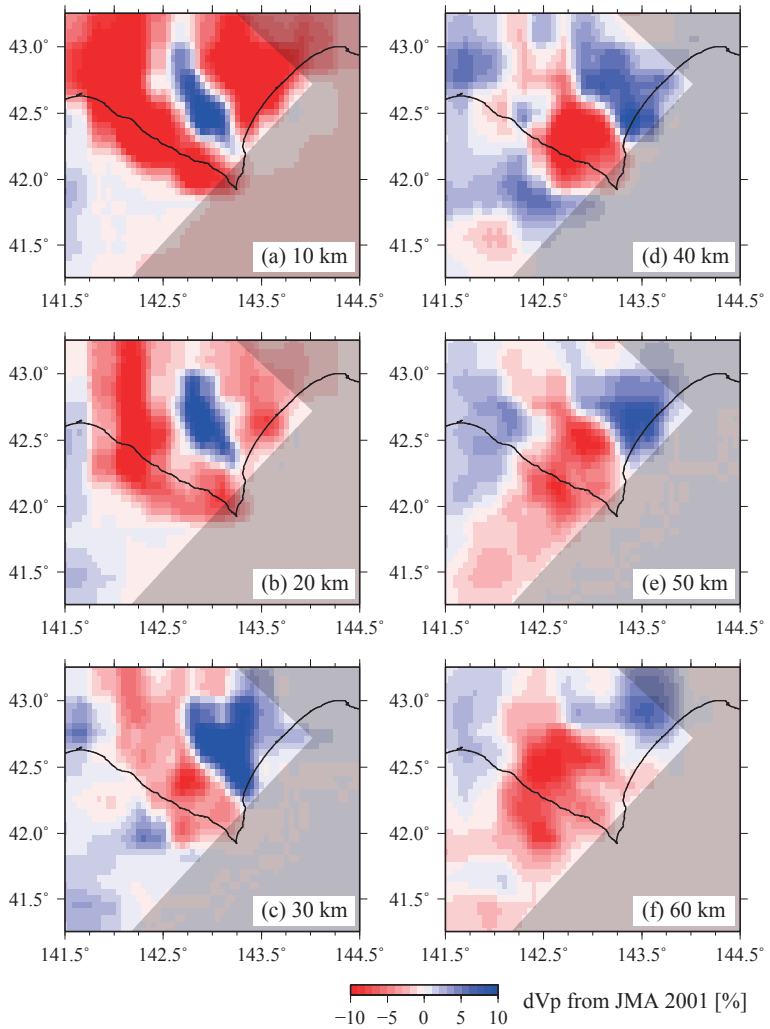



**Fig. 4.** The P-wave velocity structure of the KT model that is based on Kita et al. (2010). Velocity anomaly of the model from the JMA2001 is shown. Outside of the analysis area in Kita et al. (2010) is black masked.

## Ⅲ. 結　　果

3 次元速度構造（KT モデル）を仮定すると，気象庁一元化震源カタログに記載された震源位置（以下，初期震源）では走時残差が負に大きく偏る（Fig. 5a）．本解析では走時残差 $\delta t$は

$$\delta t = t^{obs} - t^{cal},$$

と定義される．ここで，$t^{obs}$ と $t^{cal}$ はそれぞれ観測走時と速度構造モデルに対する理論走時である．したがって，負の走時残差は KT モデルで計算される理論走時が観測走時に対して大きいことを示す．本解析では速度構造として既存のモデルを与えているため，この負の走時残差は初期震源が

実際よりも観測点から離れた位置に決定されていることを意味する．

震源再決定を行うことで，初期震源位置に対して得られた走時残差が小さくなることがわかる（Fig. 5a）．この走時残差の改善に対応し，震源深さや観測点までの震央距離が減少した（Fig. 5b）．特に，深さ約 50–100 km を初期震源深さとする地震では震源深さの変化が大きく，最大で 15 km 程度浅くなる．また，深さ約 100 km 以深の地震では震源深さの減少とともに水平方向での震源移動が生じていることがわかる．このような特徴は再決定前後での震源分布を比較することでも確認できる（Fig. 6）．

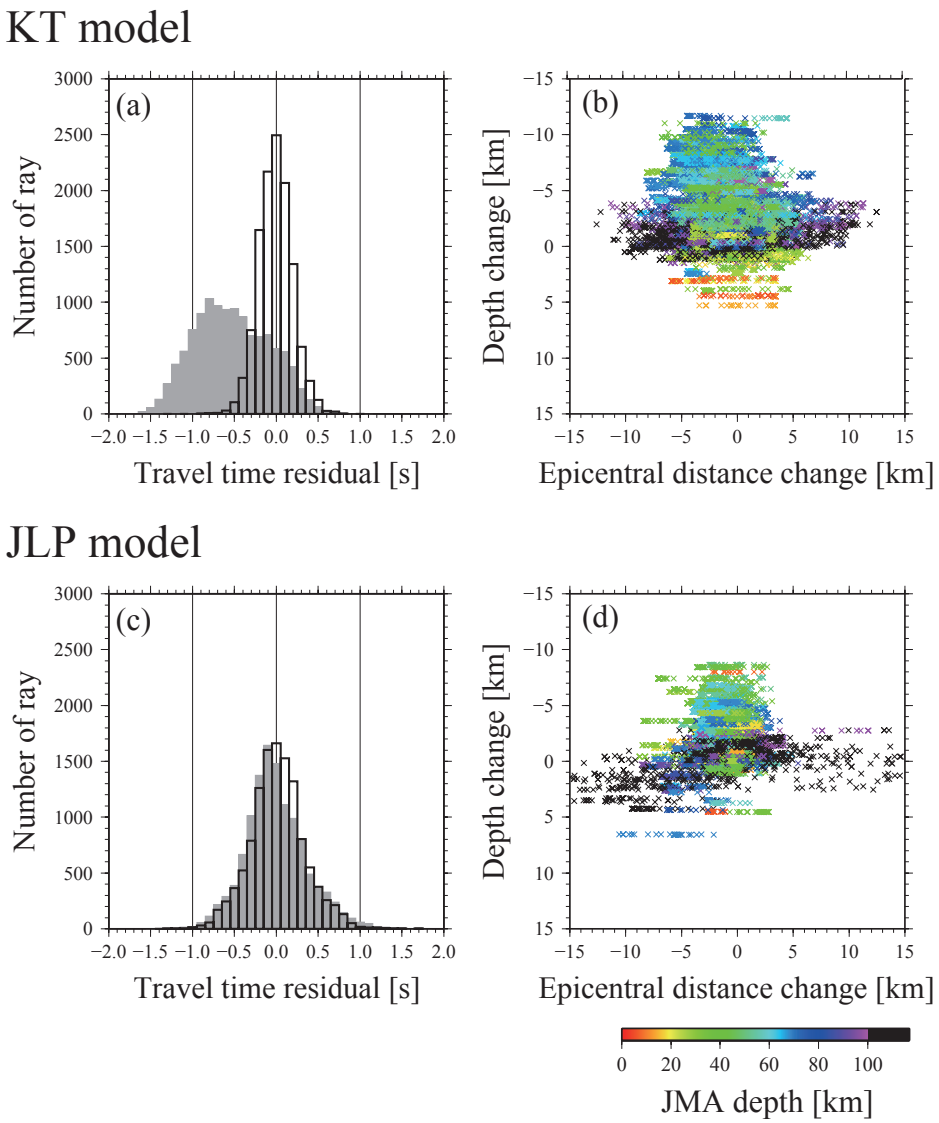



**Fig. 5.** Distributions of travel-time residuals and changes of earthquake locations for the KT and the JLP models. (a, c) Gray and white histograms indicate travel-time residuals for initial and relocated positions, respectively.

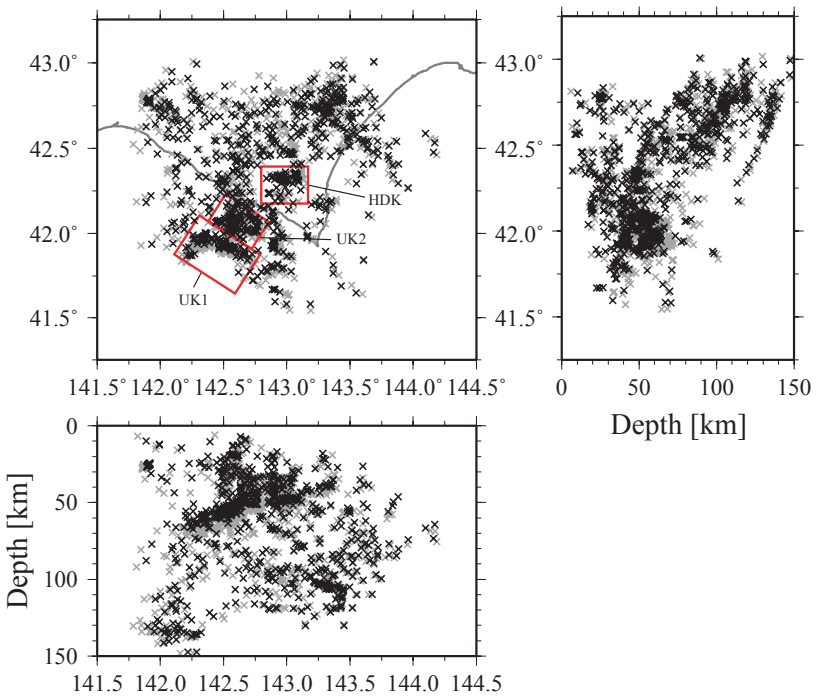



**Fig. 6.** Relocated (black crosses) and initial (gray crosses) locations of earthquakes.

## Ⅳ. 議論・考察

### 4-1. 震源位置の変化の妥当性

3 次元速度構造（KT モデル）で震源再決定を行うと襟裳岬周辺の地震では震源深さが浅くなる傾向を示す．特に，浦河沖（UK1，UK2）など，顕著な低速度域が推定された領域で震源深さの変化が大きくなる傾向がある．これは本解析の地震と観測点の配置ではそのような低速度域を交差する波線が多く分布することで，再決定後の震源がより浅い位置に決定されたことを示す．

なお，再決定による震源位置の変化要因として，解析データの違いも考えられる．本解析では P 波の読み取り記録のみを使用したことに加え，観測点分布が震源域近くに限定される．このような限定された解析データの影響を調べるため，本解析では 1 次元速度構造（JLP モデル）でも同様の解析を行った．

JLP モデルにおける震源位置の変化は，KT モデルと類似した特徴を示す（Fig. 5d）．つまり，深さ約 100 km 以浅の地震では震源深さが減少する傾向があり，深さ約 100 km 以深の地震では水平方向に震源位置が変化した．浅部域で JMA2001 モデルより P 波速度が大きくなる JLP モデルでは初期位置に対して再決定後の震源深さや震央距離の増加が期待される．また，再決定前後で走時残差の分布はほぼ同じである（Fig. 5c）．これらは深さ 100 km 以浅の地震でみられる震源深さの減少を速度構造の違いで説明することが難しいことを意味している．このため，JLP モデルに対する

再決定の結果は，本解析の限定されたデータは特に深さ 100 km の地震の震源深さを浅く推定するバイアスがあることを示しているだろう．ただし，その変化量は数 km 程度であり，KT モデルにおける震源深さ変化（最大 15 km 程度）よりも小さい．したがって，KT モデルで得られた震源分布の変化（特に震源深さの減少）は実際の 3 次元速度構造の影響を強く受けていると考えられる．

### 4-2. 襟裳岬周辺における地震の震源分布

島弧直交および平行方向の測線に沿う鉛直断面内での震源分布を Fig. 7 に示す．この鉛直断面図

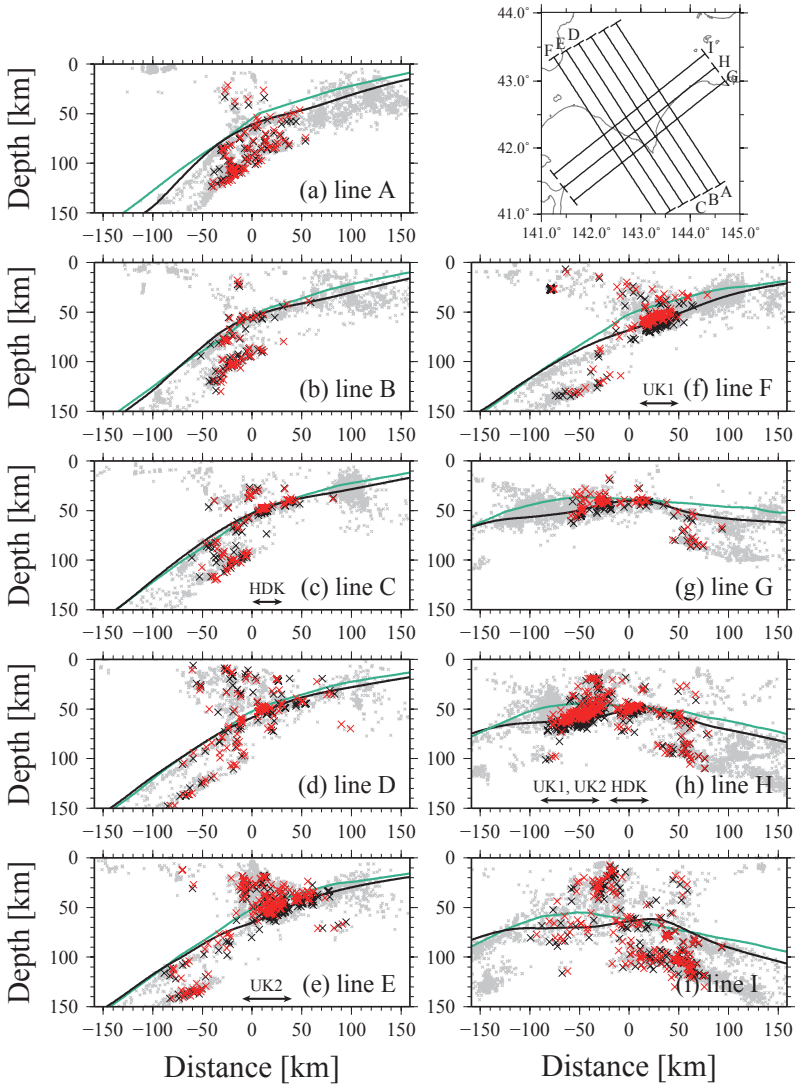



**Fig. 7.** Locations of relocated (red crosses) and initial (black crosses) earthquakes in vertical cross-sections. Background seismicity during from 2003 to 2015 is shown by gray crosses. Black and green lines indicate geometry of the Pacific slab estimated by Kita et al. (2010) and Nakajima et al. (2010), respectively.

からも分布のパターンは大きく変わらない一方で，全体的に震源深さが浅くなっていることがわかる．

日高山脈周辺（HDK）や浦河沖周辺（UK1 と UK2）で密集して発生する地震（Fig. 6）の多くは，プレート境界付近の地震活動に対応する（Fig. 7）．このうち，日高山脈下での地震活動域の分布は震源再決定の前後で大きく変化せず，沈み込む太平洋スラブ上部境界付近に分布する（Fig. 7c）．対して，浦河沖周辺の地震活動は再決定により浅くなる．この分布を既存のプレート形状モデル（Kita et al., 2010）と比較すると，プレート境界直下付近の震源分布がプレート境界よりもやや浅く決まるようにみえる．再決定後の分布は別のプレート形状モデル（例えば，Nakajima et al., 2009）とも対応しない（Fig. 7e–f）．

プレート境界付近の地震分布に注目すると，日高山脈周辺（HDK）と浦河沖周辺（UK1 と UK2）における再決定後の震源分布はそれぞれ陸域下と海域下の特徴を代表する（Fig. 7）．すなわち，陸域下では再決定後の震源分布がやや浅くなり，プレート境界付近に位置する，一方海域下の地震は震源深さが大きく減少し，そのプレート境界とは必ずしも一致しない．太平洋スラブ内に加え，東北日本弧と千島弧の衝突帯である襟裳岬周辺ではプレート境界より浅部でも地震が発生することが知られている（例えば，1982 年浦河沖地震）．一方，他の地域と比べて，太平洋スラブ上部境界の形状があまりよく決まっていない．例えば，Nakajima et al.（2009）と Kita et al.（2010）を比べると海域下では深さに大きな違いがある（Fig. 7）．したがって，襟裳岬周辺で発生する地震の分布とプレート境界の位置関係をより詳しく議論するためには，3 次元構造を考慮した震源決定を進め，発震機構解（メカニズム解）などを含め，不均質構造との更なる検討が必要である．

### 4-3．初動メカニズム解推定への影響

前節で述べたように，メカニズム解は地震発生や発生領域を調べるうえで重要な情報源となる．しかしながら，信頼性の高いメカニズム解推定は精度のよい震源位置の決定が必要不可欠である．逆に言えば，本解析のように 3 次元速度構造を適用することによる震源位置の変化は，メカニズム解の推定結果にも影響を及ぼすとことが予想される．そこで本節では，再決定前後の震源位置におけてメカニズム解がどのように変化するかを調べ，その傾向を考察する．

本解析で使用した地震のうち，54 の地震で初動の押し引き分布から震源メカニズム解が推定された．これらの地震のマグニチュードは 3 以上である．なお，初動メカニズム解を推定する際には，速度構造として 1 次元速度構造を与え，本解析領域外を含め，押し引き記録が得られるすべての観測点を使用した．これは本解析領域内の観測点のみでは観測データが少なく，初動メカニズム解を安定した推定することが困難となったためである．したがって，本節では主に震源位置の変化による影響に注目し，考察を行う．

推定された初動メカニズム解の特徴を Fig. 8a に示す．ここでは，Frohlich（2001）に従い，P 軸（圧縮軸）と T 軸（引張軸），B 軸（Null 軸）の傾斜角を用いてメカニズム解を分類した．Fig. 8a から（少なくとも本解析のデータセットでは）襟裳岬周辺で逆断層型の地震が多く発生していることが

わかる．この傾向は再決定前でも同様である．ただし，再決定後の震源位置では低角逆断層型，いわゆるプレート境界型，としてメカニズム解が分類される地震がいくつか見られた（Fig. 8d, e, g）．これは 3 次元速度構造において浅い位置に震源が決定されたことを反映していると考えられる．これらの結果は，3 次元速度構造を考慮した震源再決定はメカニズム解を推定する上でも重要であり，また，それらを精査することで襟裳岬周辺における地震活動や応力場などをより深く理解できる可能性を示唆しているだろう．

なお，不均質構造が発達する場合にはその伝播経路などを考慮することでメカニズム解の推定精度が向上することが知られている（e.g., Takemura et al., 2016）．本解析の解析領域内に分布する観測点で得られた押し引き記録を，KT モデルで計算される射出角や射出方位に従ってメカニズム解上に投影すると，再決定後の震源位置で推定されるメカニズム解の極性と異なる場合がある（Fig. 8b-g における ReL と 3D ray tracing の比較）．また，本解析の結果はスラブ内地震の震源位置やメカニズム解（Fig. 7 や Fig. 8c, f）の変化は再決定前後で小さい．Kita et al. (2010) は日高山脈下のマントルウェッジ付近に注目した解析であるため，KT モデルも太平洋スラブ内や深さ 80–100 km 以深など，3 次元的な不均質構造が現実を十分に反映できていない領域が存在すると考えられる．また，日高山脈周辺ではしばしば臨時地震観測が行われている（e.g., 勝俣・他，2002）．稠密な観測網における読み取り記録を適用することで本解析のような狭い領域を対象とする場合でも高精度なメカニズム解の推定が実現できると期待される．したがって，より広範での 3 次元速度構造を

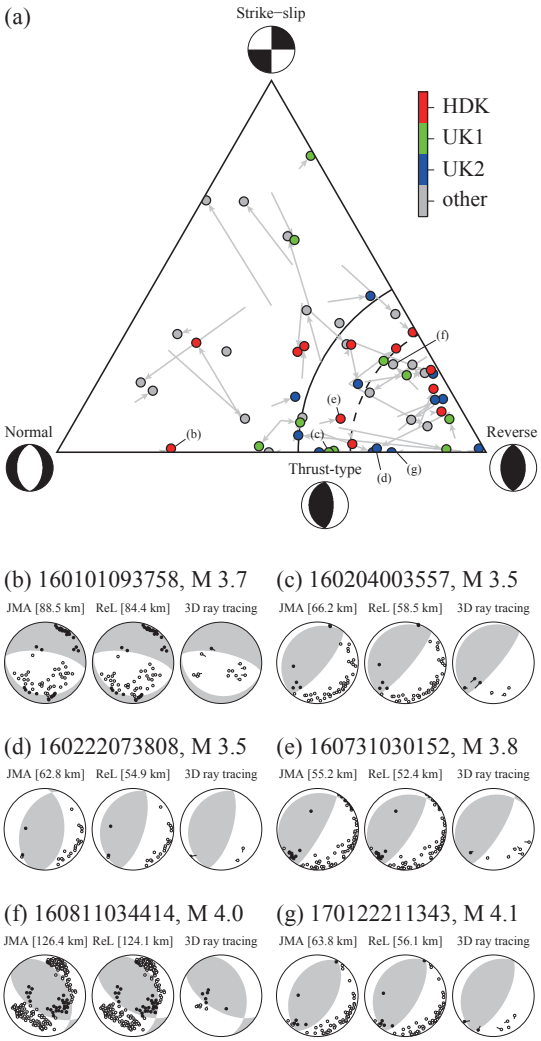



**Fig. 8.** (a) The triangle diagram and (b - g) examples of focal mechanism estimated for the relocated earthquakes. Arrows denote changes of focal mechanism characteristics to at the relocated from at the initial position. (b - g) Focal mechanisms for (JMA) initial and (ReL) relocated locations of earthquakes. Up and down polarity at stations are plotted as white and black circles, respectively, on the focal mechanisms. (3D ray tracing) The polarity calculated for three-dimensional velocity model are plotted on the focal mechanism that estimated for the relocated locations.

構築とより稠密な観測データによる，波線（伝播経路）の変化を含めた，メカニズム解推定を行うことでプレート境界やスラブ内地震の震源特性のより詳細な検討が実現できるだろう．

## V．結　　論

本研究では襟裳岬周辺で発生する地震の震源を，3 次元速度構造のもとで決定した．その結果，3 次元速度構造を考慮すると襟裳岬で発生する震源深さが浅く決まることがわかった．これは北海道中軸部における東北日本弧と千島弧の衝突に関係する，低速度域の分布を反映するものであり，これを考慮しない 1 次元構造モデルでは震源深さを深く見積もっていることを示唆する．震源決定の不確定さは初動メカニズム解の推定にも影響するため，今後，3 次元速度構造を考慮した上で，震源分布や地震活動を明らかにしていくことで，襟裳岬周辺で発生する地震のメカニズムや太平洋プレートの形状などがより詳しく検討することができると考えられる．

**謝辞**　広島大学の北佐枝子博士にはＰ波速度構造を提供いただきました．解析には気象庁一元化震源カタログのデータを使用させていただきました．図の作成には GMT（Wessel and Smith, 1998）を使用させていただきました．記して，感謝申し上げます．

### 文　　献

勝俣啓・和田直人・笠原　稔・岡山宗夫・一柳昌義・石川春義・高田真秀・長郁夫・海野徳仁・岡田知己・中村綾子・堀修一郎・立花憲司・河野俊夫・仁田交市・橋本恵一・伊藤喜宏・五十嵐俊博・中島淳一・浅野陽一・伊藤亜妃・内田直希・宗田靖恵・氏川尚子・長谷見晶子・出町知嗣・平田直・卜部卓・酒井慎一・井出哲・荻野泉・瀬戸憲彦・酒井要・橋本信一・羽田敏夫・山中佳子・三浦勝美・萩原弘子・小林勝・井上義弘・田上貴代子・中川茂樹・津田健一・松原誠・多田卓・青山裕・松澤孝紀・趙燕來・山崎文人・山田守・佐々木嘉三・松平良浩・雑賀敦・小森哲也・梅田康弘・伊藤　潔・小泉誠・和田博夫・平野憲雄・西田良平・松島健・植平健司・大島光貴・平野船一郎，2002．　大学合同臨時地震観測によって決定された島弧－島弧型日高衝突帯旬の震源分布と震源メカニズム解，地震研彙報，77，199-223.

笠原稔・小平秀一・本谷義信，1994．1993 年釧路沖地震の余震活動とそれ以前の北海道周辺の地震活動，平成 5 年度文部科学省科学研究費突発災害調査研究成果報告，1993 年釧路沖地震による被害の調査研究，27-34.

Kita, S., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima, and T. Matsuzawa, 2010. Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 290, 415-426, doi:10.1016/j.epsl.2009.12.038.

Kita, S., A. Hasegawa, J. Nakajima, T. Okada, T. Matsuzawa, and K. Katsumata. 2012. High-resolution seismic velocity structure beneath the Hokkaido corner, northern Japan: Arc-arc collision and origins of the 1970 M 6.7 Hidaka and 1982 M 7.1 Urakawa-Oki earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 117, B12301, doi:10.1029/2012JB009356.

Murai, Y., S. Akiyama, K. Katsumata, T. Takanami, T. Yamashina, T. Watanabe, I. Cho, M. Tanaka, A. Kuwano, N. Wada, H. Shimamura, I. Furuya, D. Zhao, and R. Sanda, 2003. Delamination structure imaged in source area of the 1982 Urakawa-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1490, doi:10.1029/2002GL016459.

Shiina, T., J. Nakajima, G. Toyokuni, and T. Matsuzawa, 2014. Guided wave observations and evidence for the low-velocity subducting crust beneath Hokkaido, northern Japan, *Earth Planets Space*, 66, 69, doi:10.1186/1880-5981-66-69.

Takemura, S., K. Shiomi, T. Kimura and T. Saito, 2016. Systematic difference between first-motion and waveform-inversion solutions for shallow offshore earthquakes due to a low-angle dipping slab, *Earth Planets Space*, 68, 149, doi:10.1186/s40623-016-0527-9.

Tsumura, N., H. Ikawa, T. Ikawa, M. Shinohara, T. Ito, K. Arita, T. Moriya, G. Kimura, and T. Ikawa, 1999. Delamination-wedge structure beneath the Hidaka Collision Zone, Central Hokkaido, Japan inferred from seismic reflection profiling, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 1057-1060.

上野寛・畠山信一・明田川保・舟崎淳・浜田信生，2002．気象庁の震源決定法の改善－浅部速度構造と重み関数の改良－，検震時報，65，123-134.

Wessel, P., and W. H. F. Smith, 1998. New, improved version of generic mapping tools released, *Eos, Trans. Am. Geophys. Union, 79*, 579, doi:10.1029/98EO00426.

Zhang, H., and C. H. Thurber, 2003. Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward Fault, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93, 1875-1889, doi:10.1785/0120020190.

Zhang, H., and C.H. Thurber, 2006. Development and Applications of Double-difference Seismic Tomography, *Pure Appl. Geophys.*, 163, 373-403, doi:10.1007/s00024-005-0021-y.