

2023/12/08 海底ケーブルWS 公開資料

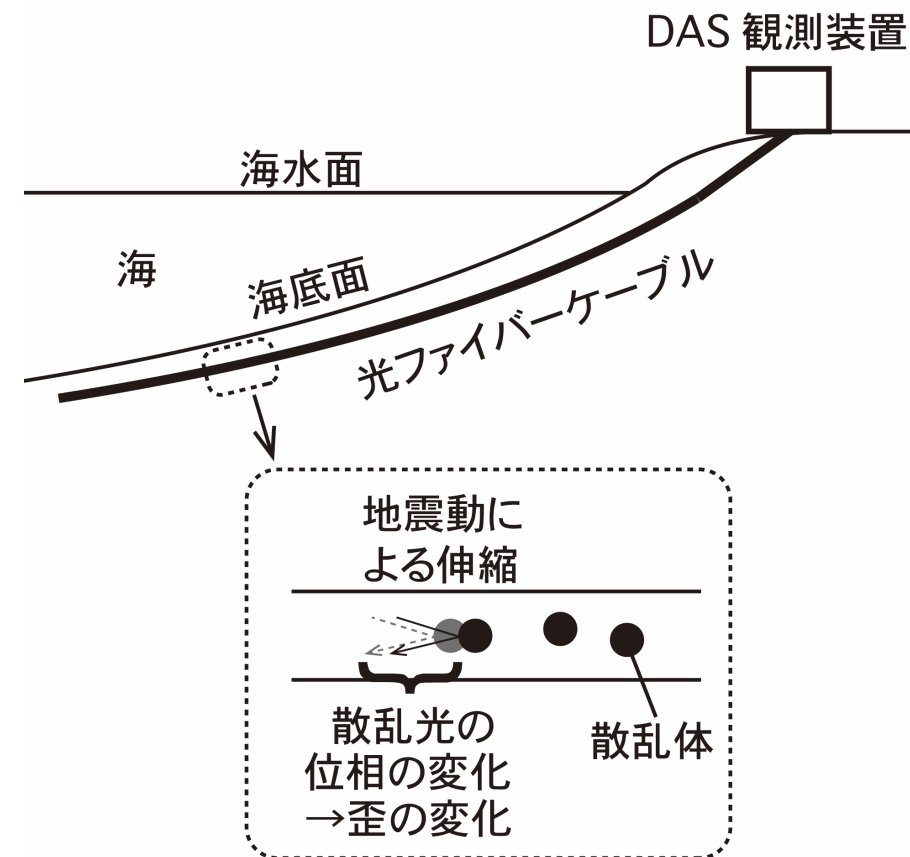
津軽海峡周辺における 分布型音響センシングのデータを用いた リアルタイム地震観測

馬場慧¹・荒木英一郎¹・横引貴史¹・川真田桂²・内山敬介²・吉塚卓史²

1. 海洋研究開発機構 2. 電源開発株式会社

分布型音響センシング (DAS)

- 光ファイバーケーブルに入射したレーザー光のレイリー後方散乱から、ケーブルに沿った歪の変化を数mおきに観測
→ 時空間的に密な観測が可能
- DASによる地震観測
(e.g., Lindsey et al., 2017; Shinohara et al., 2022)
- 海域地震観測におけるDASの利点
 - 既存の海底ケーブルを使うので、設置のコストが低い
 - 陸に測器を設置するため、リアルタイムでデータを確認できる



DASの原理

津軽海峡近辺の地震活動

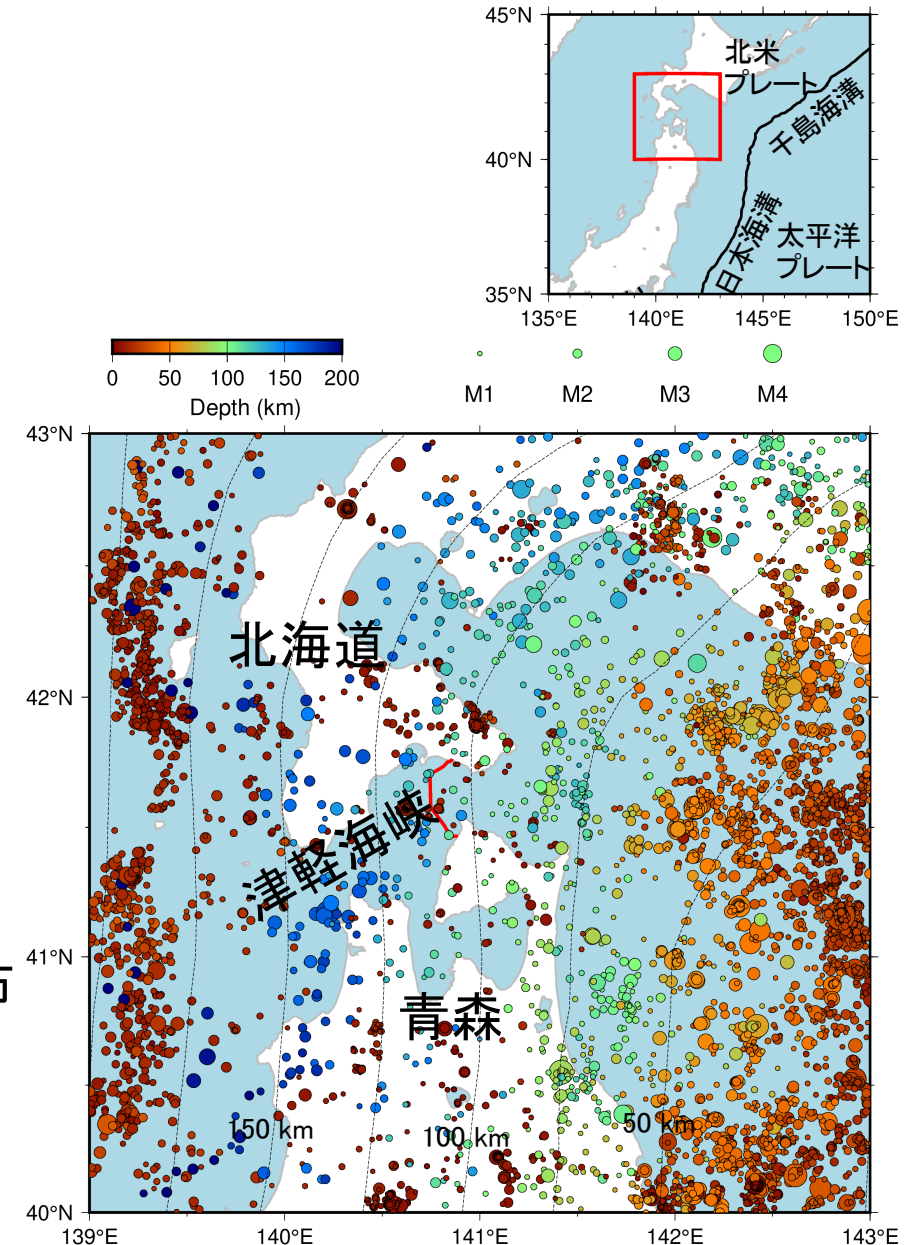
- 日本海溝で北米プレートの下に太平洋プレートが沈み込む沈み込み帯
 - プレート境界地震
 - 沈み込む太平洋プレート内で発生する地震
 - 津軽海峡内部・北海道南部の深さ10 km前後の浅い地震
 - 日本海側の深さ10 km前後の浅い地震

気象庁カタログによる、津軽海峡近辺の地震の分布
(2022/4/1~2023/3/31)

—: 光ファイバーケーブル

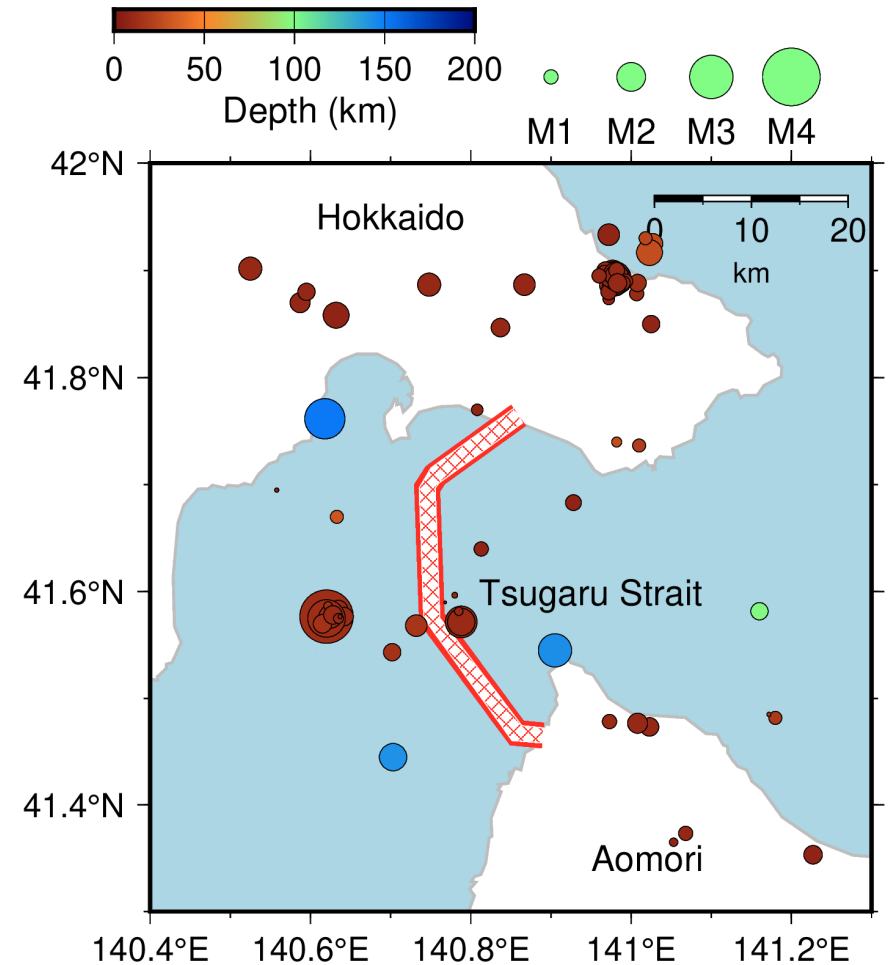
---: 沈み込む太平洋プレート上面

(Nakajima & Hasegawa, 2006; Kita et al., 2010)



DAS観測

- 北海道・青森間を結ぶ海底光ファイバーケーブル約40 km
- 観測期間
 - 22年度: 2022/10/11-2023/2/8
 - 23年度: 2023/6/26-2023/10/17
- AP Sensing
- ゲージ長: 40 m
- チャンネル間隔: 5 m
- 500 Hzサンプリング
- 解析には、100 Hzにデシメーションし、10チャンネルスタックを行なったデータを使用

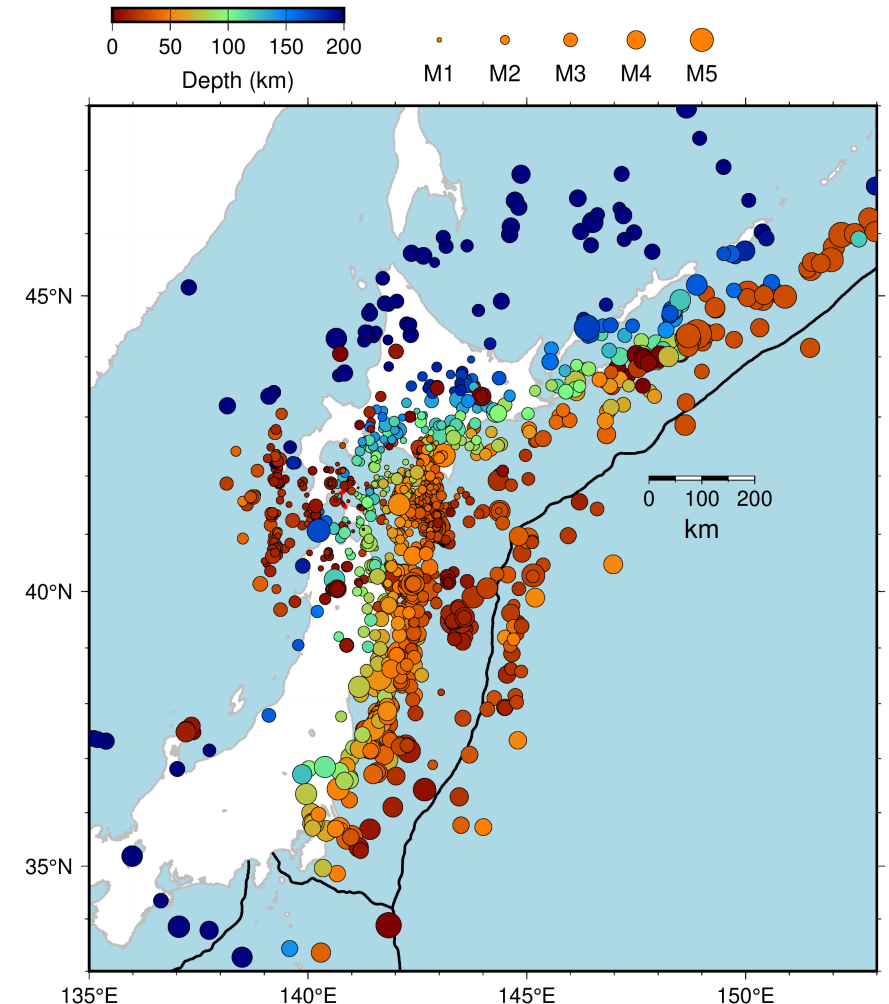


気象庁カタログによる、津軽海峡近辺の地震の分布(2022/4/1~2023/3/31)
—:光ファイバーケーブルが存在している領域

DASで観測できたイベント(2023年度)

- 観測時に、2-10 Hzの周波数帯域で、3分間の時間窓のプロットを作成し、目視で確認
 - 気象庁地震カタログに掲載済みの、1433個のイベントを確認
 - ▶ 最小M:0.4(津軽海峡・北海道南部)
 - マグニチュード1未満の地震が、44個確認できている
- ケーブル近傍における、DASの高い地震観測能力

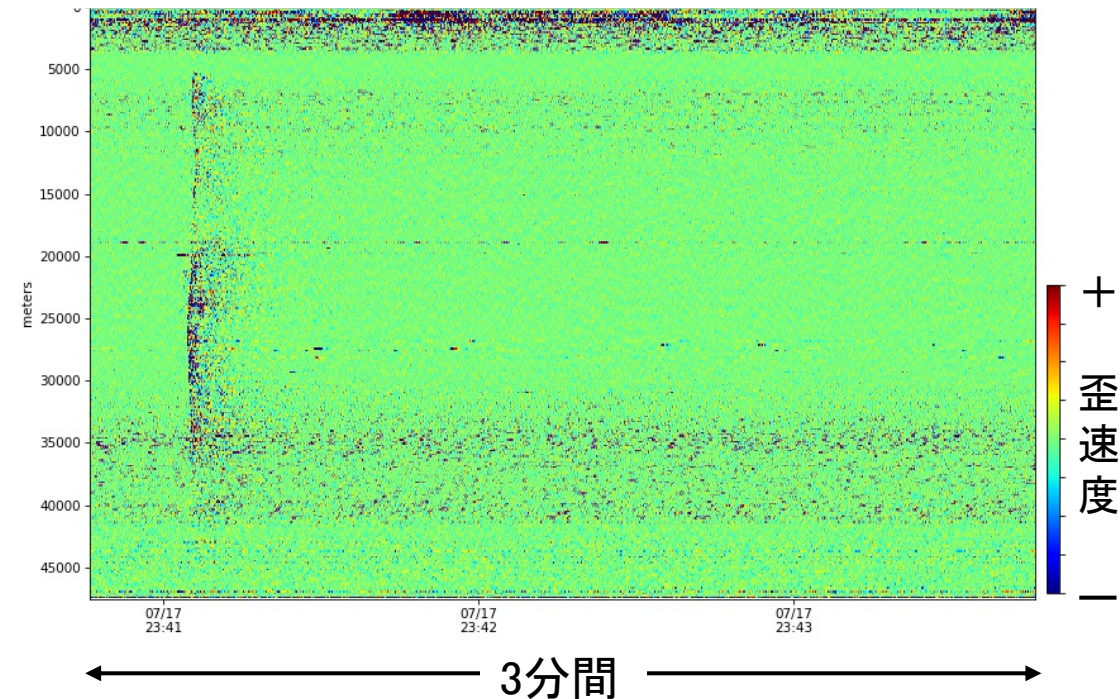
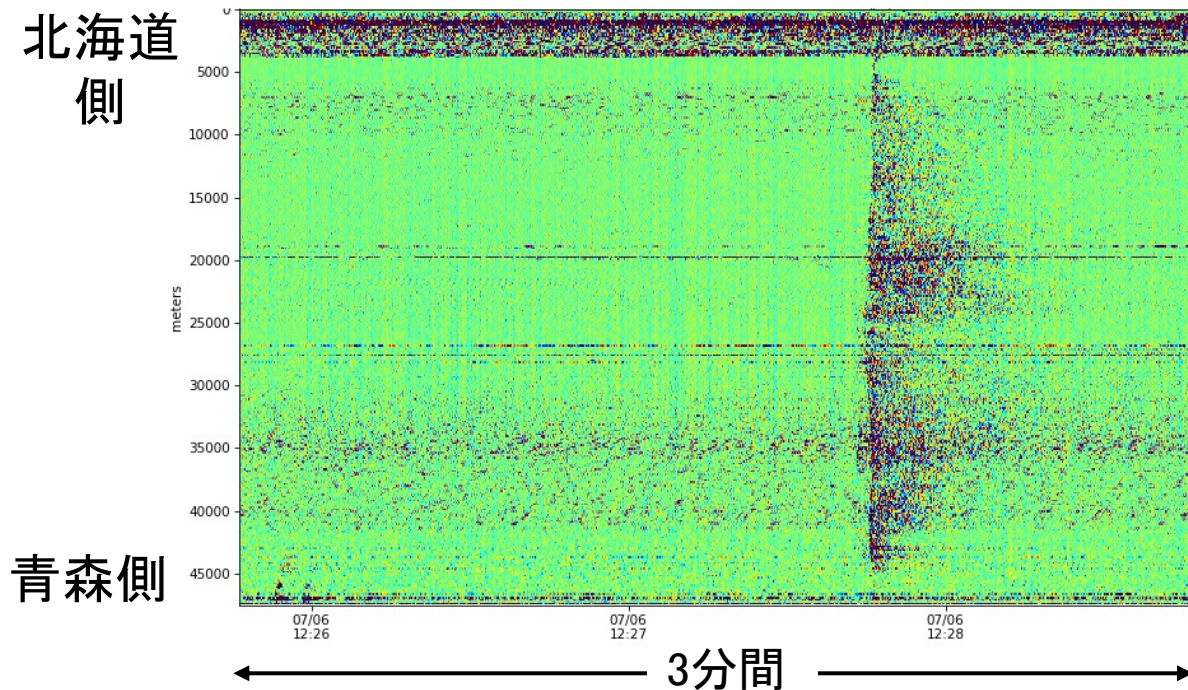
DASで観測された地震の一覧
震源は気象庁地震カタログに基づく



DAS観測波形例（津軽海峡の小さいイベント）

津軽海峡で発生したマグニチュード0-1クラスの小地震が多く観測できている

- 2023/7/6 21:27:37.9JST
41.572°N 140.623°E 12 km M0.8 津軽海峡
- 2023/7/18 08:41JST頃
- 気象庁掲載なし、震源は津軽海峡



DASで観測された歪速度の時空間分布

2023年度の観測の目的

DASデータを使って、P波・S波の到達時刻読み取りや震源決定を自動で行うことを試みる

- 手動による到達時刻読み取りは手間がかかるため、リアルタイムで地震活動をモニタリングするのは難しい
- DASデータを使って、P波・S波の到達時刻をリアルタイムで自動で読み取り、震源をすぐに決められるようにする
 - DASケーブルが存在する津軽海峡近辺の地震活動のモニタリング
- P波・S波の自動到達時刻読み取りには、津軽海峡における地震波形の特徴や、DASの波形の特徴を考慮する必要がある
 - 自動読み取りに深層学習モデルを用いる

自動震源決定の流れ

- DASのみで震源決定が行える、津軽海峡のケーブル近傍のイベントを対象

PhaseNet (Zhu and Beroza, 2018) による自動ピック



ピックのグルーピング

P波速度1.5 km/s・S波速度0.7 km/s以上の見かけ速度で説明できるピックの組み合わせをグルーピング(波形確認のうえ、経験的に定めた)



S波を含む6個以上のピックがある

イベント検出



Hypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987) による震源決定

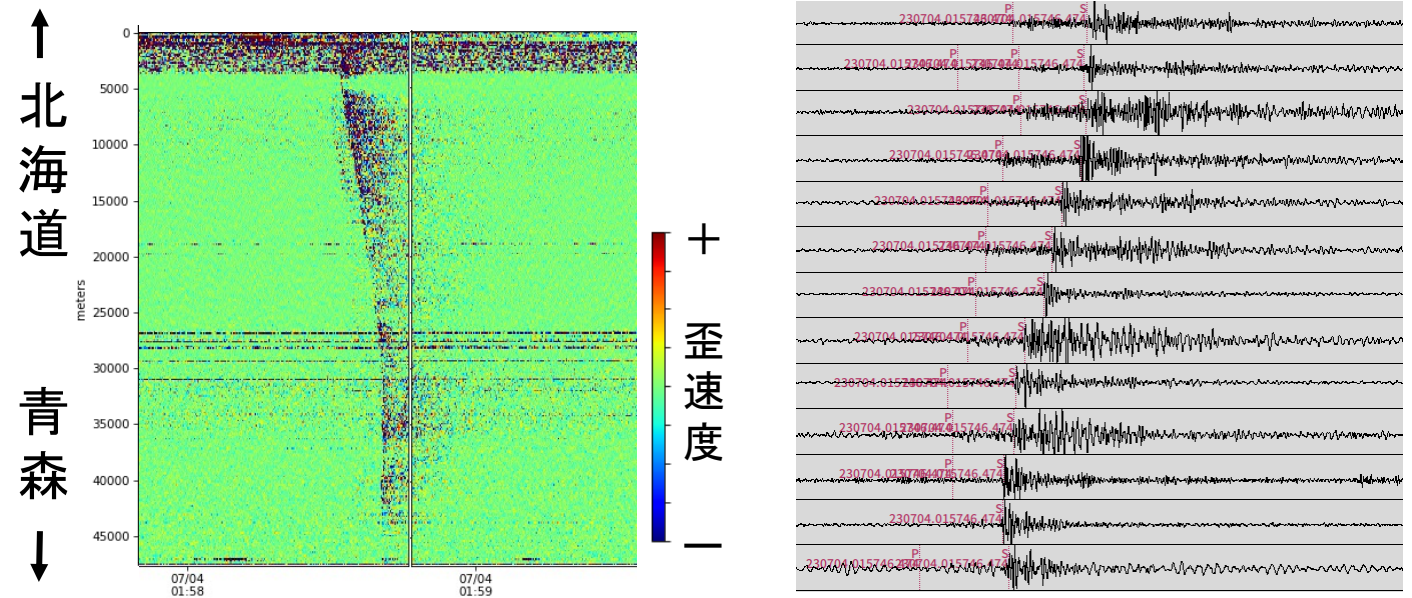
気象庁1次元速度構造 (Ueno et al., 2002) を使用

2022年度の観測データの地震の観測走時と理論走時の差をもとに観測点補正値を定めた

深層学習による自動走時読み取り

津軽海峡近辺の地震のDAS観測波形を学習した深層学習モデルを使用

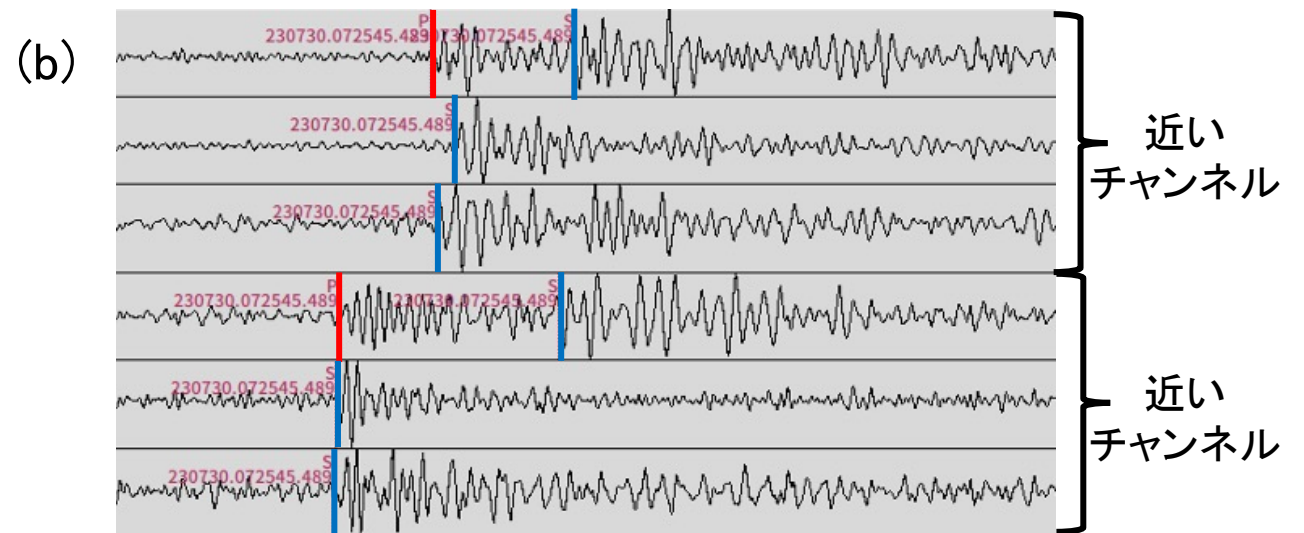
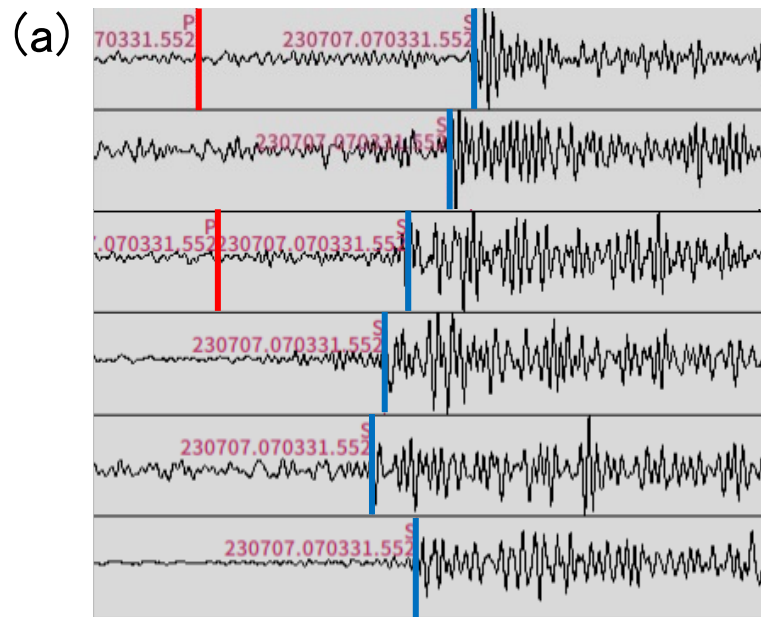
- PhaseNetのデフォルトモデルに、2022年度に発生した津軽海峡近辺の地震のDAS観測波形を、手動で読み取ったP波・S波の時刻とともに学習させた
- 2分間の時間窓で、1分ずつ重複しながら後ろにずらし、波形を毎分読み取らせる
- 1 kmおきのチャンネルで、46チャンネルを用いる
- 震源決定に使うProbabilityのしきい値
P: 0.55 S: 0.3 (デフォルト)



DASプロットと、PhaseNetによる到達走時読み取りの例

PhaseNetによる自動走時読み取りの課題

- P波の誤検知 (a)
- S波の到達をP波と読み違え、後続波で振幅が大きくなったタイミングでS波を読む (b)
- S波を読み落とす
- P波とS波をセットで読もうとするため？



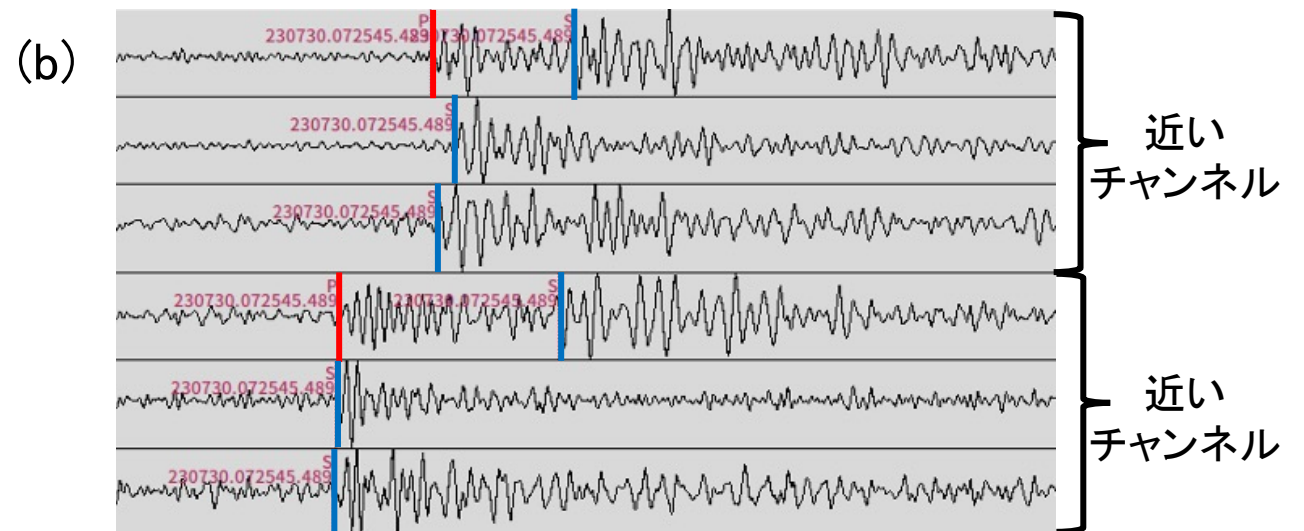
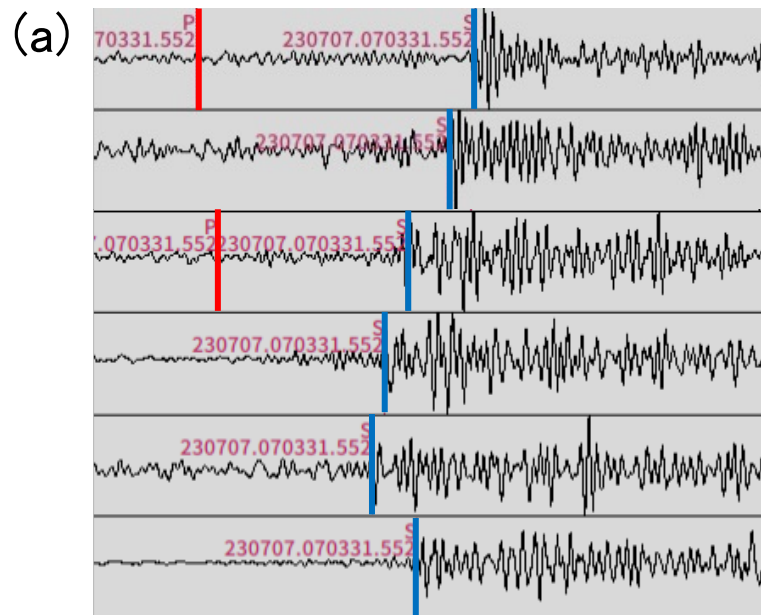
PhaseNetによる誤検知の例 —: P波のピック —: S波のピック

PhaseNetによる自動走時読み取りの改善

- P波の誤検知の対応 (a)

- Probability > 0.55: 本物のP波もしくはS波の読み違い
- Probability < 0.55: 誤検知

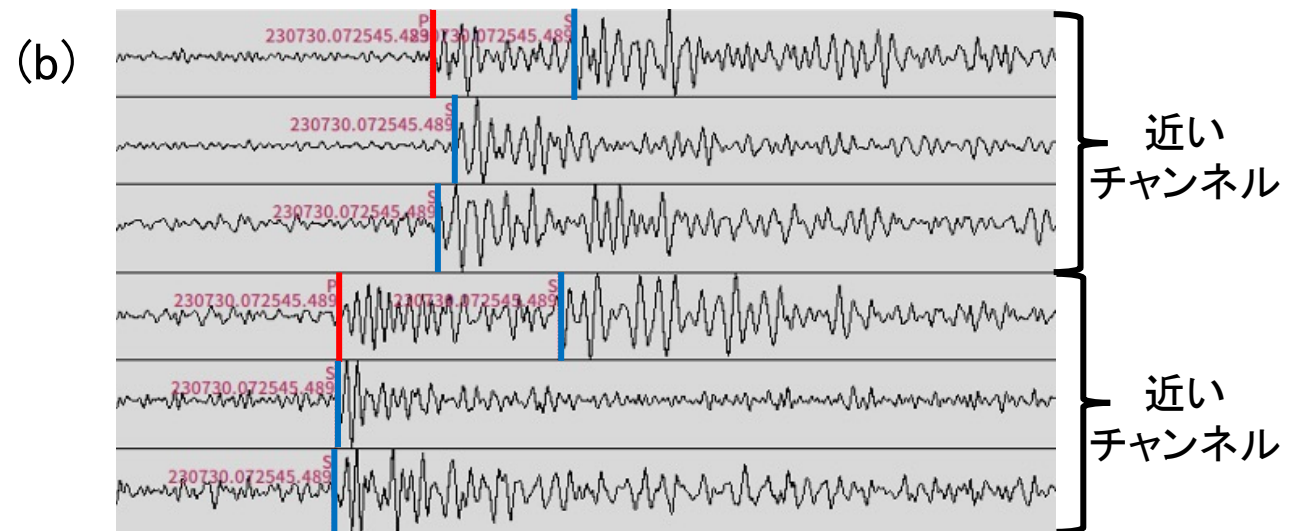
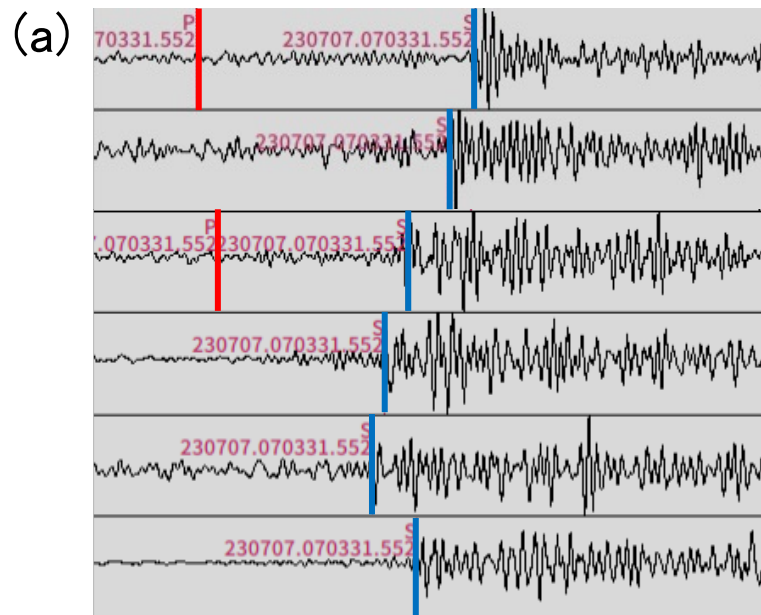
→ P波のProbabilityのしきい値を0.55にする (default: 0.3)



PhaseNetによる誤検知の例 —: P波のピック —: S波のピック

PhaseNetによる自動走時読み取りの改善

- S波到達をP波と取り違える誤検知の対応 (b)
 - P波の観測走時と理論走時の差が2秒以上の場合
- **P波をS波とラベリングしなおして震源再決定**



PhaseNetによる誤検知の例 —: P波のピック —: S波のピック

震源再決定

- 自動読み取りの課題を踏まえ、以下の震源再決定プロセスで震源再決定を行う

Hypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987) による震源決定



P波の観測走時と理論走時の差が2秒以上→P波をS波とラベリングしなおす

Hypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987) による震源再決定



Watanabe (1971) の式によるマグニチュード推定 (hypomhに実装されている)
S波速度710 m/sを仮定して、S波歪振幅を速度振幅に直してhypomhに導入

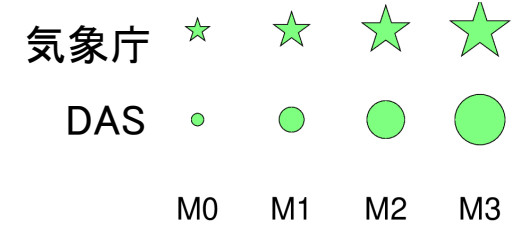
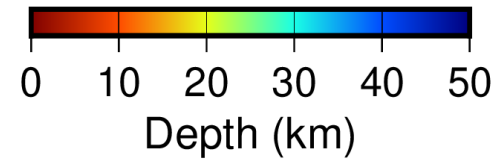
※以下のイベントは誤検知・誤決定として除去

- P波とS波の到達時刻の中央値の差が3.5秒以上
→遠いイベントの誤決定
- Hypomhが出した経度方向と緯度方向の誤差がともに1.5 km以上
- Mの大きさに対して、P波やS波の検知数が少ないもの

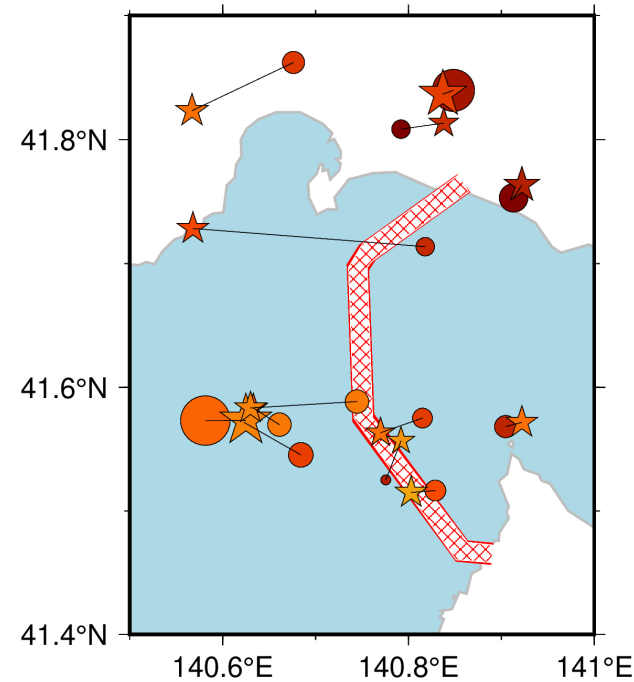
Mの範囲	Pピック数のしきい値	Sピック数のしきい値
$M > 1.5$	20	30
$1.0 \leq M < 1.5$	15	20
$0.5 \leq M < 1.0$	3	10
$0.0 \leq M < 0.5$	3	7

震源決定結果

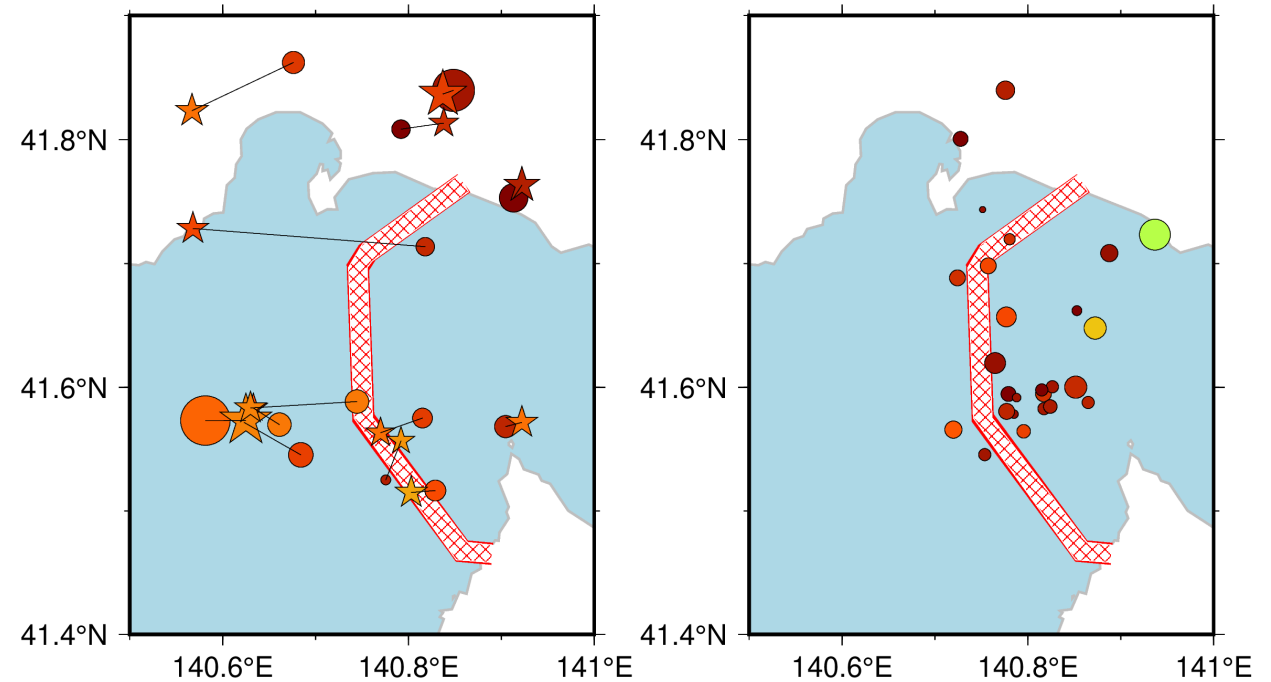
- ケーブルの直上から東側のイベントおよび西側の大きいイベントは、気象庁の震源と1-5 kmの違いで決定できた
- ケーブルの西側の小さいイベントは東西方向の誤差が大きい
- 気象庁カタログに掲載のない、マグニチュード0-1クラスの地震を、約25個検出
- 大半は深さ10 km前後の浅い地震



気象庁カタログ掲載あり



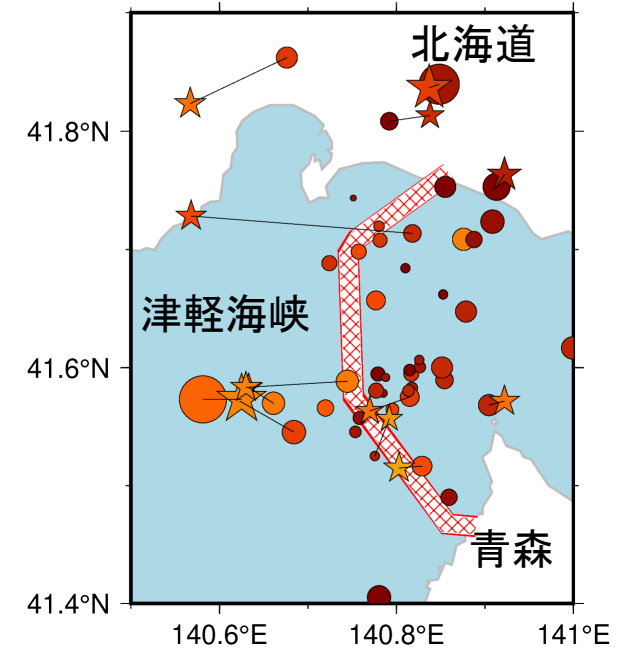
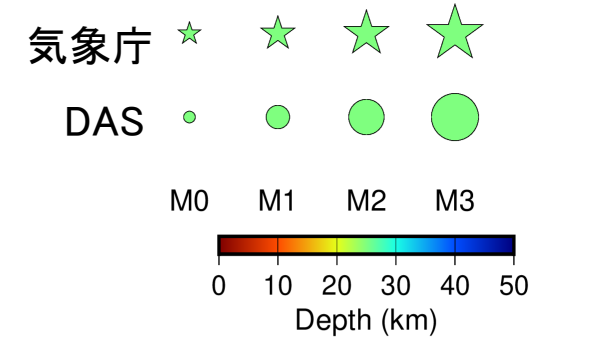
気象庁カタログ掲載なし



検出・震源決定した地震の分布

まとめ

- 津軽海峡のDAS観測データを用いて、PhaseNetによるP波・S波到達時刻読み取りや、hypomhによる震源決定を、自動でリアルタイム行うことを試みた
- ケーブルの直上から内側では、気象庁カタログの震源とよく一致した結果が得られた
- 気象庁カタログに掲載のないM0-1クラスの地震を、4ヶ月で約25個検出した
- Future work
 - ピック・震源決定の精度向上の検討
 - 検知能力を既存のカタログと定量的比較
 - 自動解析の2022年度データへの適用
 - 既存の地震観測網データと併用解析
 - 津軽海峡の地震活動についての議論・検討



震源決定した地震の分布

—: 光ファイバーケーブルが存在している領域

謝辞: 本研究では、気象庁地震カタログおよび地震予知総合研究振興会の観測データを使用いたしました。