地震計アレイ観測による南極昭和基地周辺の微小地震及び氷震の震源推定

真美 (ADEP). 橋本 大志 (NIPR). 金尾 政紀 (NIPR) 課題番号:040RP2024

波道推定のイメージ図

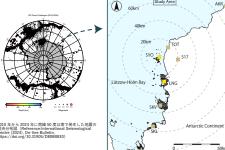
はじめに

南極昭和基地やリュツォ・ホルム湾沿岸部では長年地震観測が行われ、南極域で発生する地震や世界各地で発生する遠地地震に加えて、東 オングル島周辺部の局地的な地震が記録されている (Kanao and Kaminuma, 2006)。一方、雪氷圏では氷震や氷震微動と呼ばれる氷の割 れも発生し、その振動も地震計で記録される。昭和基地周辺においては、それらの振動が潮汐や氷山の移動によって発生していると報告さ れている (Murayama et al., 2017; Tanaka et al., 2019)。また氷震は氷河の流動や氷の温度変化によっても引き起こされると考えられてお り、氷震活動のモニタリングは、地球温暖化などの環境変動の指標としても重要である。これらの振動は遠地地震と比べると規模が小さい (前述の局地地震では M-0.5~1.4 程度) ため、観測点間隔が広い既存の地震観測網のみではその発生の検出や震源位置の推定を行うことが 難しい。そこで第58次南極観測隊において東オングル鳥内の二箇所に地震計アレイ観測点 (Array A. B.) を設置した。

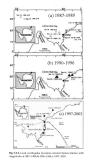
単点で設置されている既存観測点と異なり、窓に設置されたアレイ観測点では入射する波の到来方向を推定することができる。 本研究では 二箇所のアレイ観測点のデータを組み合わせることで、従来の観測データでは推定することが難しい微小震動(以下、イベント)を検出し

観測点. 地震計の他にインフラサウンドセンサも設置され、通年で波

その位置推定を試みた。



形データを収録している。



解析対象エリアの地図、昭和基地は南極大陸から西に約 4km 離れた これまでに報告されているリッツォ・ホルム 事オンゲル島にある 事オンゲル島とリュツェ・ホルム湾沿岸部に沿 湾の地震活動 (Kanao and Kaminuma 2006) 署された地震観測点を口で示す。 時い色の□は現在は勘向されている

解析方法 **Evenet Detection**

連続波形からイベントの給出 給出されたイベント波形に対して Array A R それぞれでセンブラ 検出されたトリガー波形から、 ンス解析 (Neidell and Taner, 1971) により波の到来方向 イベントの検出には STA/LTA を用いた 南極観測線しらせのラミング新 (slowness ベクトル)を推定する。センプランスの値 (smb) は複 ヘリコプターによる振動

- STA のタイムウインドウ: 0.3sec
- ITAのタイムウインドウ:60sec 13 観測点中 6 点以上で STA/LTA≥2.5
- 継続時間: 2sec 以上

2017/01/13 - 2017/02/19

2017/12/06 - 2018/01/28

データ期間:

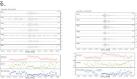
明らかに S/N が悪い 流地地雷 に対応するものを除外し両期間で90 固のイベント候補を得た

DOA(Direction of Arrival) 推定

数の波形記録がどれだけ整合しているかを表す

i=12 net (net: 細測占数) i=1.2....ndt (ndt: タイムウイ ンドウ内のデータ数) Xi:i観測点の振幅値

slowness ベクトルを -1.0~1.0s/m の範囲で 0.02 間隔で与え, 各波形記録の想定される時間ズレを考慮して smb を算出する。 バンドバスフィルターはイベント記録の特徴に応じて、2-4Hz, 4-6Hz, 6-8Hz, 8-10Hz から選び、タイムウインドウは 0.5sec も L.くは 0.25sec とした 波形記録からイベントに対応すると思わ れる時間のうち、smb がピークとなる時の slowness ベクトルを



センプランス解析によって slowness と azimuth を算出した例。左図が Array A、右図か Array B の結果、各図は上から順に各アレイの速度波形(フィルタあり)センブランス 値 (smb)、波の進行方向(azimuth)、slowness を示す。 azimuth は波の進行方向となる ため、波源は azimuth とは反対方向に推定される.

Array A と B のへの波の到来方向を組み合 わせることで波源の位置を推定することが できる (右図)

Location

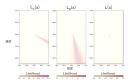
DOA 推定によって得られた slowness ベク トルを S_{obs}、震源が x にあるときの理論 slowness ベクトルを S...(x) とすると尤度関 数しは次式となる。



Array A に関する尤度関数を L_x(x), Array B に関する尤度関数を L_x(x) と

$| (x) = | (x) \times |_{-}(x)$

を最大にする波源位置 x を推定する。位置 x は緯度経度方向に 0.005° 間 隔として $S_{a,b}(x)$ を計算して尤度を求めた。 σ は $S_{a,b}$ の標準偏差



北度の空間分布から震源を推定する例 (2017/01/25 04:31 のイベント), 左 から Array A, Array B, 両アレイを組み合わせた北度を 2 次元空間 (緯度経 度) にプロットしている。黒点は各アレイの位置。赤い色の場所に波源が推 定される。

臨時地震計アレイ観測

地震計アレイ観測では、狭い範囲に地震計を密に設置し、観測点間の波形 が似ていることを利用して解析を行う。普段日本で観測されるような一般 的な地震ではP波やS波といった明瞭な波が観測され、その波の到着時刻 から震源の位置が決まる。しかし、規模が小さかったりノイズが大きい波 形記録ではいつ波が到着したのかが読み取れない。このような場合には 波形の相関を利用できるアレイ観測点が有利である 対象領域は既存の観 測点密度が小さく、氷震微動といった波形の立ち上がりが不明瞭な波も観 測されると期待されたことから、アレイ観測を実施することとした。アレ イ観測では観測点の形状や広がり、観測点間隔によって分解能が決まる 限られた機材と設置環境の中で、できるだけ波の到来方向によって分解能



200	III : M7.9. 35km WNW of Paneura, Pagua NewGuine		
AKH		-	AMIG U
D12 ADS	-	-	AMIZ U
AIOH AIOH			AMIS U
AKH	- MINURAL CONTRACTOR AND ADDRESS OF THE PARTY OF THE PART		AMIN U
ARICE IN			AMIG U
AMH2 AMH			AMON U

震波が到来すると(黄矢印)下図①のような時刻ズレが生し 南から地震波が到来すると(緑矢印)下図②のような時刻 プレを生じた波形記録が得られる。このように際に抽雷性 を設置すると注目する波の到着時刻のズレから到来方向が

波の伝播方向とアレイ観測点で記録されるデータ 左回の ように北から観測点が A.B.C と並んでいる場合、北から地



() 車オングル島の地図と地震観測点の位置 SYO(未) は昭和 【始の始雲観測点 (既存、満年観測)、春▽が Array A、緑▽が Array B の観測点位置を示す。

b) Array A 観測点の設置状況、3 成分速度地震計を岩場に固定し まにデータ収録禁管 特別校正田 CPS アンテナ バッテリを設置 データは CF カードに記録される.

e) Array B 観測点の設置状況、1つの収録装置に対して上下動地 展計を3台接続.

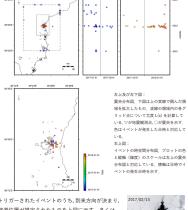
n 各アレイの観測期間と構成

e) 収録された波形記録例、左図が観測点の位置、中央図が Array の上下動速度波形記録,右図が ArrayB の上下動速度波形記録。 017/01/22 に漆地 (パプアニューギニア) で発生した地震が記 最されていた。同じアレイ内の観測点どうしは似たような形の記

推定された波源の位置

2017/12/21 の 1 日分の連続波形データ、ArrayA の観測点の : つである AKHE の UD 成分記録、1 時間の波形のうち薄緑が| 半 30 分、水色が後半 30 分を示す。

L(x) から推定された震源分布



波源位置が推定されたものを上図に示す。多くは slowness が大きく、今回は表面波として震央を推 定した。一部は実体波のような振動軌跡をもつイベ ントも含まれることから、今後は速度構造も考慮し た需源位置推定を行う 2つの観測期間を比較する と後半の方がオングル鳥の東方での地震(もしくは 氷震) 活動が活発なようであった。 MODIS の衛星 画像と参考に見ると、2017年の2月は多くの海氷 が流出した後の状態で、2018年1月はまだ沿岸部 が海氷が残っている。2018年のイベントが氷霧と するとこれらの海氷状況の違いが、左図の右上図の 活動度の違いに影響しているかもしれない。



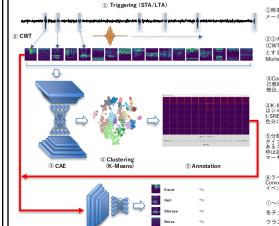
MODIS 衛星面像 F: 2017/02/14 編彰

下:2018/01/12撮影。 天気が良ければ海氷状況がわかる

機械学習によるイベント検出

沙源位置を推定するにあたりイベント給出では STA/ITA を使用したが、この手注ではパラメータによってどのようなイベントが給出されるかが注まる 雪氷圏で発生する振動の周波数と継続時間は多様であり、一つのパラメータだけでの検出では見添してしまう可能性がある より多くのイベントが検出さ れるようにパラメータを調整したり、複数のパラメータで STA/LTA トリガーを実施することも可能だが、そうすると今度は誤検出(ノイズをイベントと して取り出してしまう)が多くなる。切り出された波形記録がノイズかイベントかはマニュアルでチェックすることになり、将来的に周辺観測点のデータ ントを検出しつつ、ノイズとイベントの判別も自動化するために機械学習を取り入れたイベント検出を試みる。

リュツォ・ホルム湾周辺の観測データの特徴として、人工ノイズの混入がある。主に夏季に砕氷船やヘリコプターによるノイズがあり、これらはイベント として輸出されてしまうことがあるが、周波数の特徴を見ると特徴的な構造をしている。また、検出対象となるイベントもまた何らかの特徴をもった周波 数構造をしていることから、ウェーブレット変換をして得た画像で判別できそうであった。よって、下図の流れで自動検出を行うこととした



①時系列の連続波形データに対して1つのパラ メータセットで STA/LTA トリガーをかける。

②①のトリガー波形に連続ウェーブレット変換 (CWT) を行って得たスカログラムを入力データ とする。マザーウェーブレットは complex Morlet waylet > 1.7-

③Convolutional Autoencoder(CAE) によって自己教師学習を行い、スカログラム画像の特徴量の

④K-Means によるクラスタリング、クラスタ数はシルエット分析により21とした。左図はt-SNEを用いて次元削減を行い、クラスタごとに 色分けしたものである

⑤分類したクラスタの精度を高め、統合して波形 タイプ名をつける (ここはマニュアル) 左図はあるクラスタに割り当てられた画像の一覧で、赤枠は誤ってラベル付された画像を除去するための

⑥ラベル付したデータを教師として、新たに Convolutional Neural Network(CNN) を学習し

①~④までは実施済みで、クラスタリングの結果 をチェックしつつラベル付を行っている。 F手く クラスタリングできている印象 今後は粉師デー タを作成し CNN を学習したのち連続波形データ へ適用してイベント検出を試みる予定である.