

第 353 回地震調査委員会資料

南海トラフ孔内（間隙水圧）観測による
浅部ゆっくりすべりモニタリング

令和 3 年（2021 年） 2 月 5 日

国立研究開発法人 海洋研究開発機構



南海トラフ孔内（間隙水圧）観測による浅部ゆっくりすべりモニタリング（2020/12/1-2021/1/31）

● 孔内観測点及び DONET によるゆっくりすべり（SSE）モニタリング

現在、JAMSTEC では南海トラフに設置された 3 点の孔内観測点（C0002・C0010・C0006、図 1 及び図 2）と DONET 海底観測点によって南海・東南海地震震源域近傍の SSE 及び低周波微動^{（注）}のモニタリングを実施している。孔内観測点に設置された間隙水圧計を用いて、これまで小規模の SSE を捉えてきた（e.g., Araki et al., 2017, Ariyoshi et al., 2021）。

● SSE モニタリングの結果の図

SSE モニタリングの結果を、直近 2 ヶ月間の 2020 年 12 月 1 日～2021 年 1 月 31 日（図 3）と直近 1 年間の 2020 年 2 月 1 日～2021 年 1 月 31 日（図 4）について示す。熊野灘から室戸沖にかけて発生した低周波微動の時空間分布を、直近 2 ヶ月間の 2020 年 12 月 1 日～2021 年 1 月 31 日（図 5）と直近 1 年間の 2020 年 2 月 1 日～2021 年 1 月 31 日（図 6）について示す。また、2011 年以降に孔内観測点において観測された SSE による間隙水圧変化を図 7 に示す。

● 直近 2 ヶ月（図 3・5）及び 1 年間（図 4・6）の SSE モニタリング結果

直近 2 ヶ月では、12 月 6 日頃から DONET 1 の B ノード東側から低周波微動が活発化しており（図 5）、活動域は B ノード東側から西側に向かって広がっている傾向がみられた（図 5）。2021 年 1 月下旬には C ノード付近で活発化が見られた（図 3・図 5）。一方、12 月 13 日頃から SSE に起因する間隙水圧変動もみられ（図 3）、その変化量は 2011 年以降の SSE と比較して最大規模となった（図 7）。1 月以降は変化量は鈍化傾向にあるものの、依然として変動が続いているとみられる（図 3・図 5）。

^{（注）} 長期孔内観測点及び DONET 観測点に設置された広帯域地震計記録（2～8 Hz）にエンベロープ相関法（Ide, 2010; Ide, 2012）を適用することでイベントの検出を行い、低周波微動カタログを作成した。低周波微動カタログに対して、海洋研究開発機構において自動読み取り手法（Horiuchi et al., 2009）を適用して作成している通常の地震の自動検出カタログ（以下、地震カタログ）及びエアガン地下構造探査のショットリスト（2020 年 8 月 6 日～8 月 30 日）との照合を行い、それぞれのカタログに存在するイベントを通常の地震及びエアガン信号として低周波微動カタログから除去している。ただし、低周波微動カタログには、低周波微動以外にもゆっくり地震・除去しきれなかった通常の地震やエアガンなどのイベントも含まれている。

2020 年 3 月に観測された超低周波地震のメカニズム解は、DONET 観測点に設置された広帯域地震計記録に 0.03-0.05 Hz のバンドパスフィルタを適用し、2 秒のデシメーション処理を行った波形に対して、グリッドサーチによって推定した（Nakano et al., 2018）。

参考文献：

- Araki, E., D. M. Saffer, A. J. Kopf, L. M. Wallace, T. Kimura, Y. Machida, S. Ide, E. Davis, IODP Expedition 365 shipboard scientists, (2017): Recurring and triggered slow-slip events near the

trench at the Nankai Trough subduction megathrust, *Science*, **356**, 1157-1160, doi: 10.1126/science.aan3120

- Ariyoshi, K., T. Iinuma, M. Nakano, T. Kimura, E. Araki, Y. Machida, K. Sueki, S. Yada, T. Nishiyama, K. Suzuki, T. Hori, N. Takahashi, S. Kodaira, (2021): Characteristics of Slow Slip Event in March 2020 revealed from borehole and DONET observatories, *Front. Earth Sci.*, doi: 10.3389/feart.2020.600793
- Horiuchi, S., Y. Horiuchi, S. Yamamoto, H. Nakamura, C. Wu, P. A. Rydelek, M. Kachi, (2009): *Geophys. Res. Lett.*, 36(5), L00B04, doi:10.1029/2008GL036572
- Ide, S., (2010): Striations, duration, migration and tidal response in deep tremor, *Nature*, **466**, 356-359, doi:10.1038/nature09251
- Ide, S., (2012): Variety and spatial heterogeneity of tectonic tremor worldwide, *J. Geo. Res.*, **117**, B03302, doi:10.1029/2011JB008840
- Nakano, M., T. Hori, E. Araki, S. Kodaira, S. Ide, (2018): Shallow very-low-frequency earthquakes accompany slow slip events in the Nankai subduction zone. *Nat Commun* 9, 984, doi:10.1038/s41467-018-03431-5

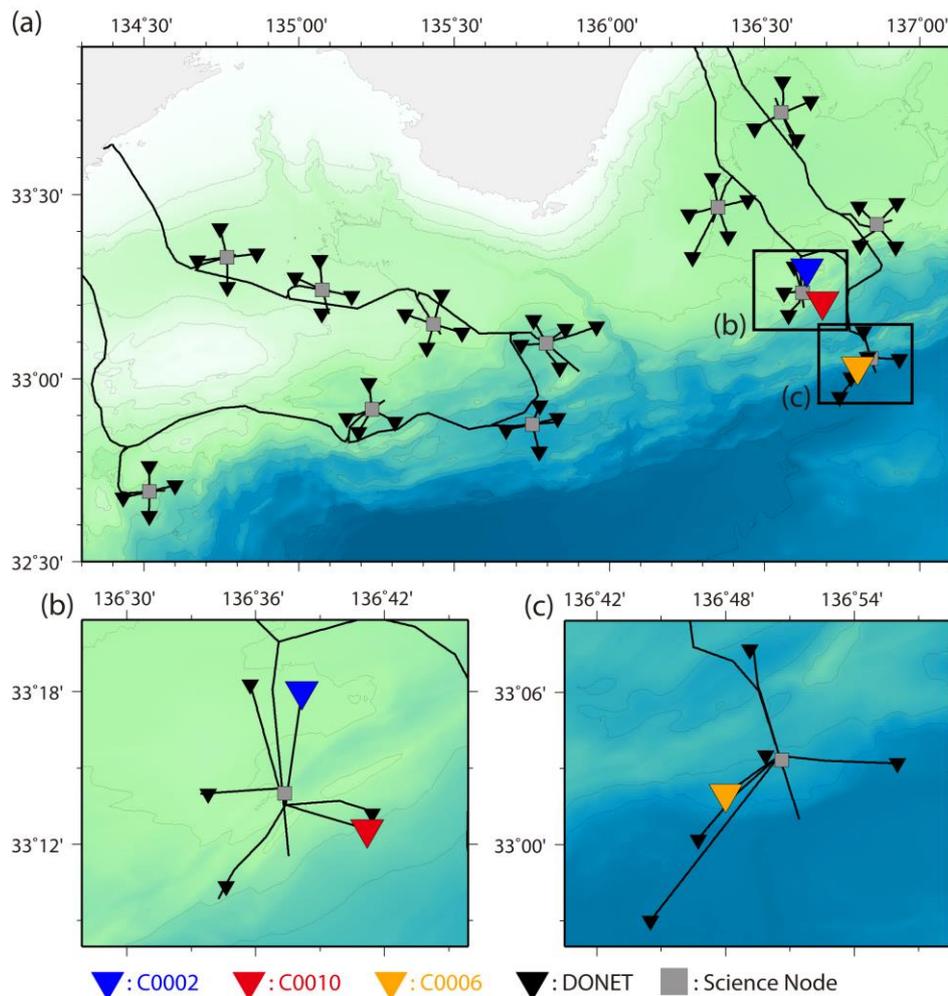


図 1 南海トラフ東南海地震震源域沖合に設置された 3 点の長期孔内観測点 (C0002、C0010、C0006) と DONET の観測点配置図。▼・▼・▼・▼は、それぞれ C0002・C0010・C0006・DONET 観測点を示す。(a) DONET 全域。(b) 孔内観測点 (C0002、C0010) 周辺。(c) 孔内観測点 (C0006) 周辺。

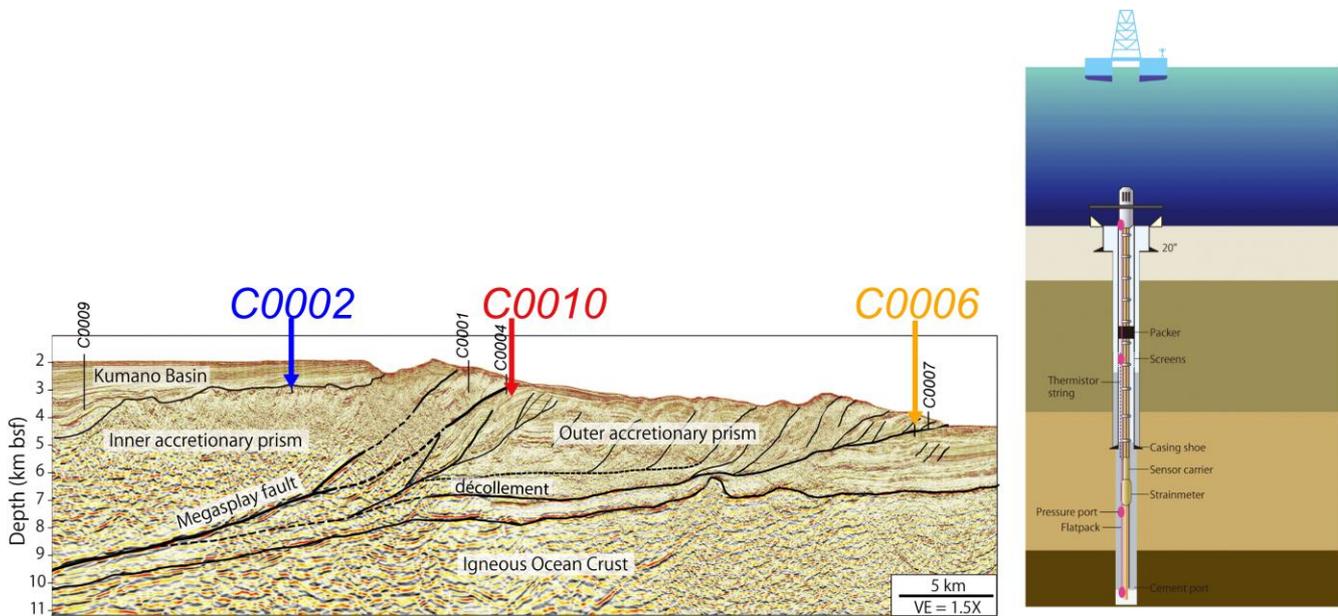


図 2 南海トラフ東南海地震震源域沖合に設置された 3 点の長期孔内観測点 (C0002、C0010、C0006) の設置位置 (地震断面図に投影)。海底下 980m (C0002)、650 m (C0010)、495 m (C0006) まで掘削した孔内における地殻内の間隙水圧・体積歪 (C0010、C0006)・地震動などの記録を DONET ケーブルを用いてデータ伝送することにより連続リアルタイム観測を実施している。

なお、過去の論文と表記を統一するため、2020 年 4 月以降の提出資料では **C0002** を青色、**C0010** を赤色で示している。

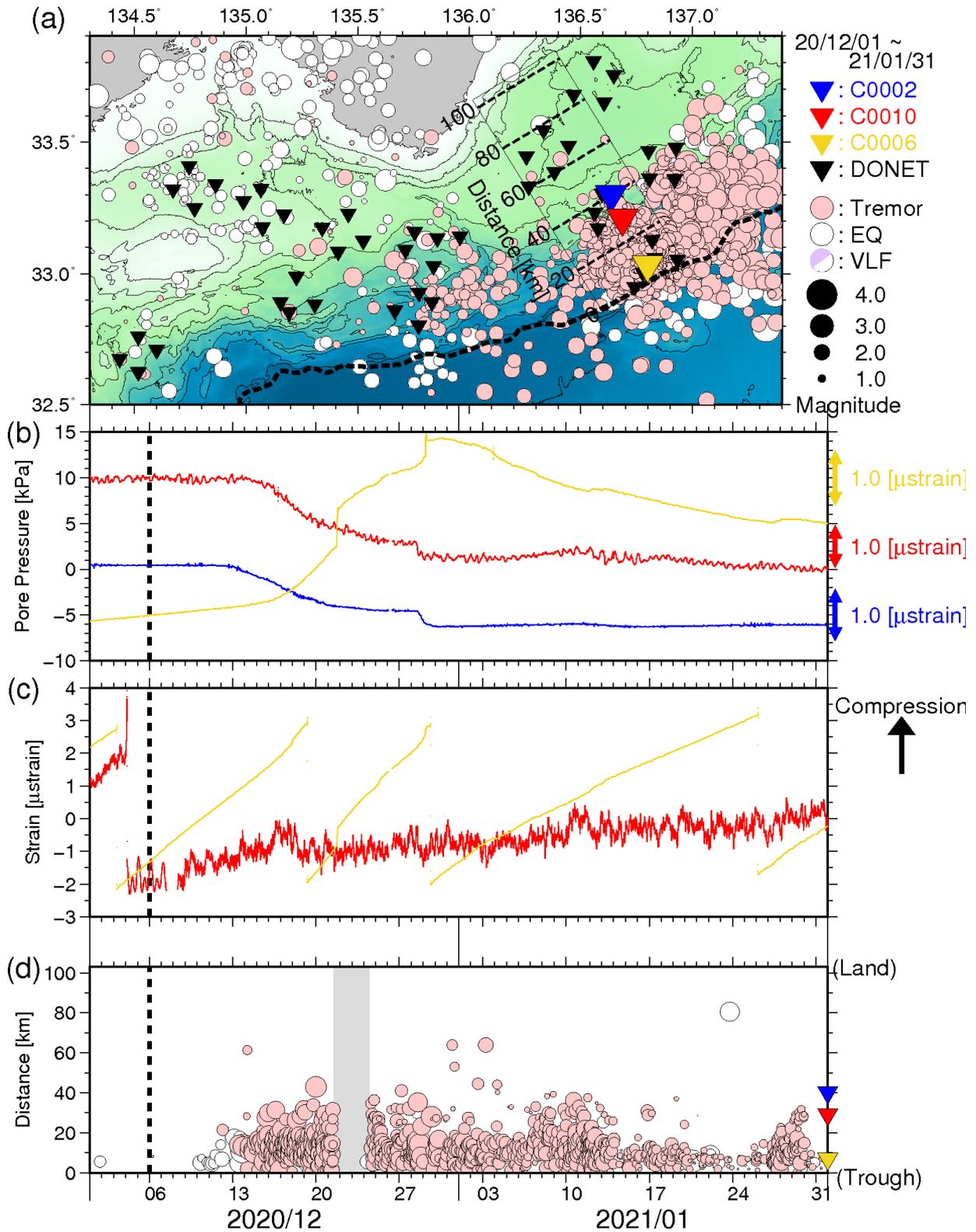


図3 直近2ヶ月間のSSE・低周波微動モニタリング(2020年12月1日~2021年1月31日)。
 (a) 低周波微動と通常の地震の震央分布図(●:低周波微動、○:通常の地震)。それぞれの震源深さが、0~15 km及び0~60 kmの範囲に決まったイベントのみを示す。▼、▼、▼、▼は、それぞれC0002・C0010・C0006・DONET観測点を示す。破線はトラフ軸を示す。(b) 長期孔内観測点における間隙水圧変化(—:C0002、—:C0010、—:C0006)。(c) 長期孔内観測点における体積歪変化(—:C0010、—:C0006)。(d) 低周波微動と通常地震の時空間分布。図3a中に実線で示した矩形領域内において発生したイベントについて示す。縦軸は、トラフ軸からの距離(km)を示す。12月21日以降、サーバ入替のため微動と地震カタログの照合は未処理である(灰色部分は未収録)。

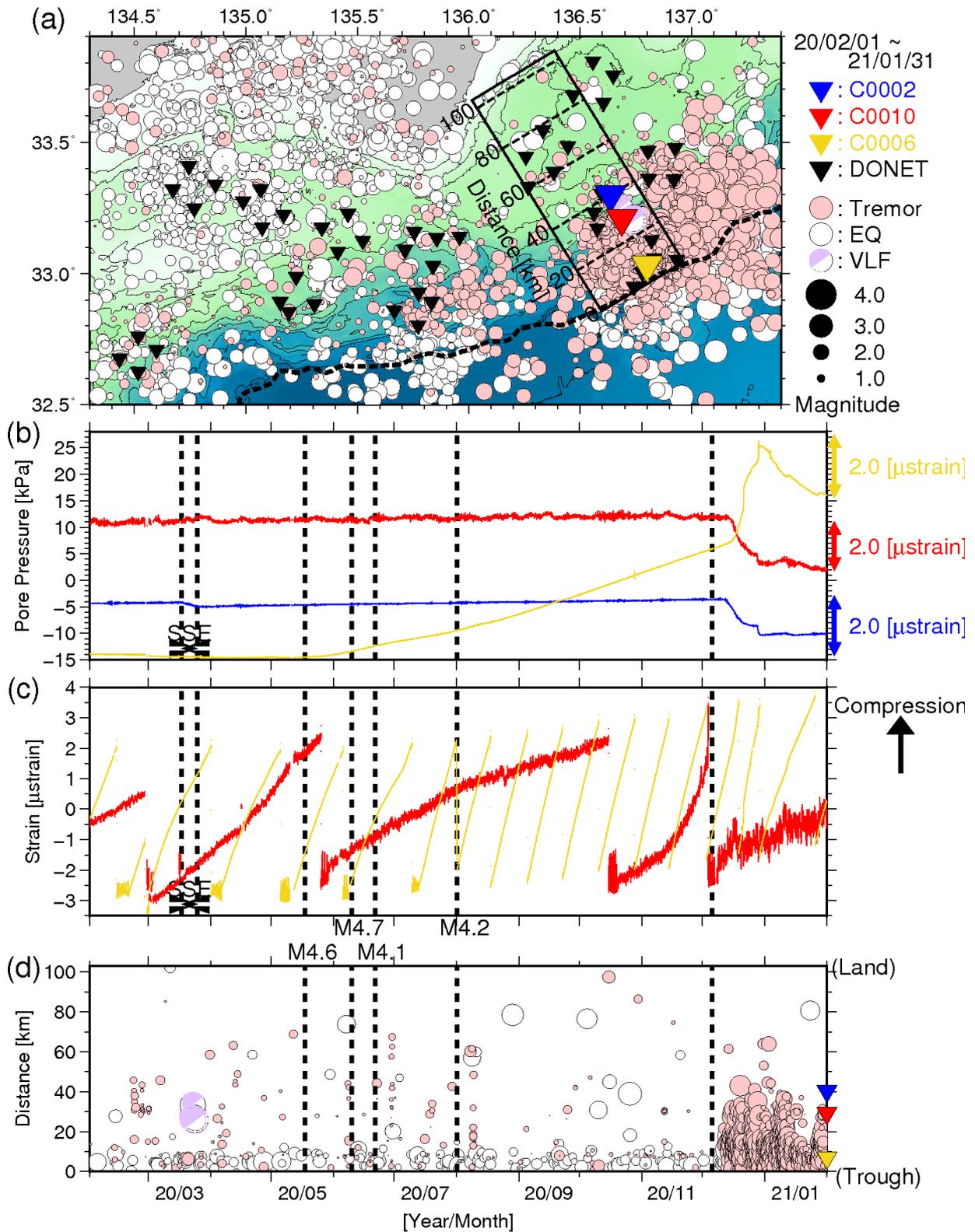


図4 直近1年間のSSE・低周波微動モニタリング(2020年2月1日~2021年1月31日)。図3と同様のシンボルにて表示している。(a)低周波微動の震央分布図。(b)間隙水圧変化。(c)体積歪変化。(d)低周波微動の時空間分布。超低周波地震のメカニズム解(●)についても低周波微動と同様に示す。体積歪変化は、基準値を超えると歪計内のバルブを開けてリセットするため、相対値のみを使用。なお、2020年2月28日はノードA交換に伴うC0010水圧計の不具合のため、2020年3月2日、16日および4月16日は測器の状態確認や再起動のため、2020年5月10日~12日および6月3日、12月7日~8日、21日~24日はサーバ不具合・入替のため、各期間において一部データが欠測している。点線で示す地震情報については、図3および図6を参照。

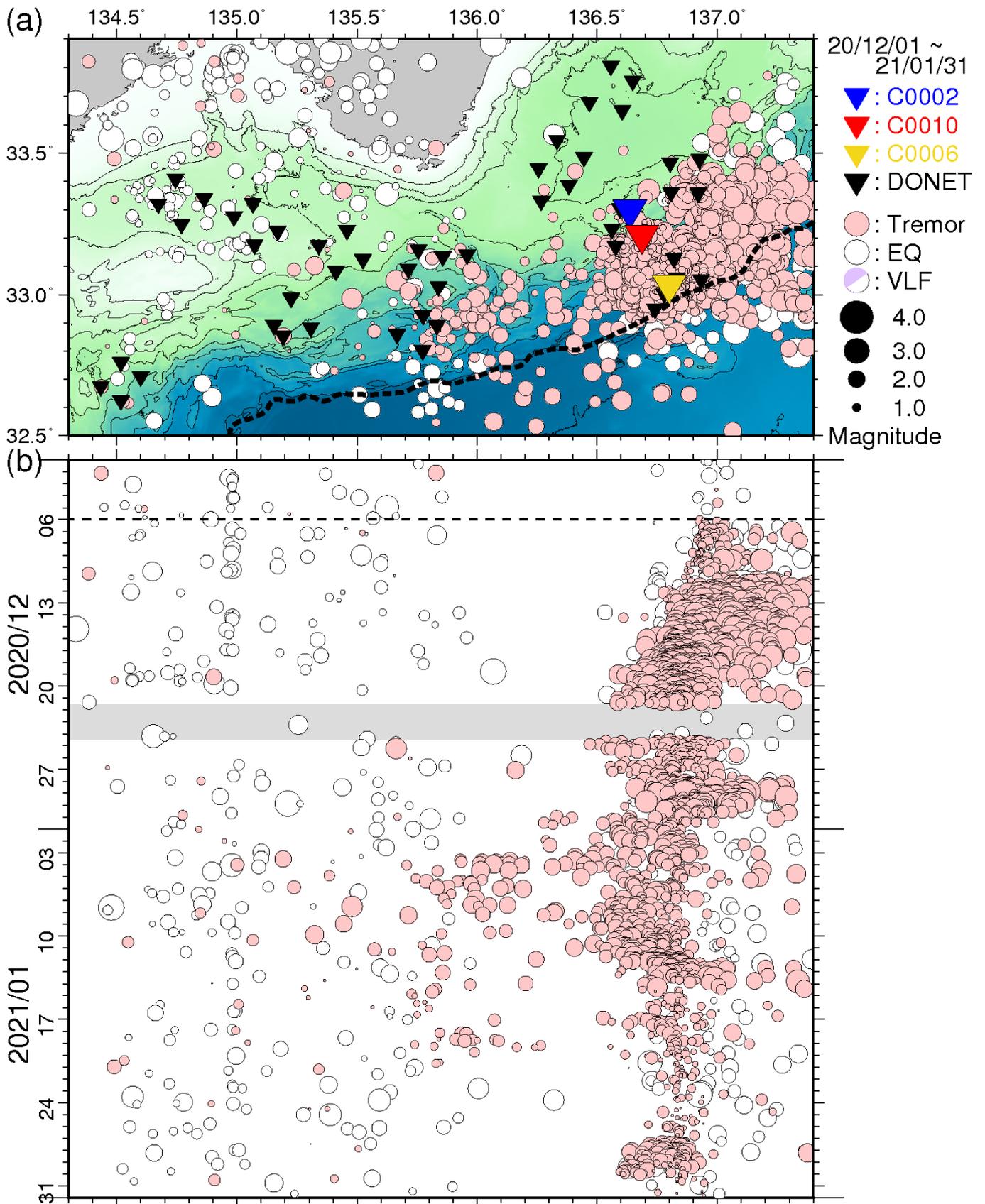


図5 直近2ヵ月間において熊野灘から室戸沖にて発生した低周波微動の時空間分布(2020年12月1日~2021年1月31日)。図3と同様のシンボルにて表示している。(a)低周波微動の震央分布図。(b)aに示した震央を経度方向へ投影した低周波微動の時空間分布図。点線(2020年12月6日)は低周波微動が活発化した時刻。12月21日以降、サーバ入替のため微動と地震カタログの照合は未処理である(灰色部分は未収録)。

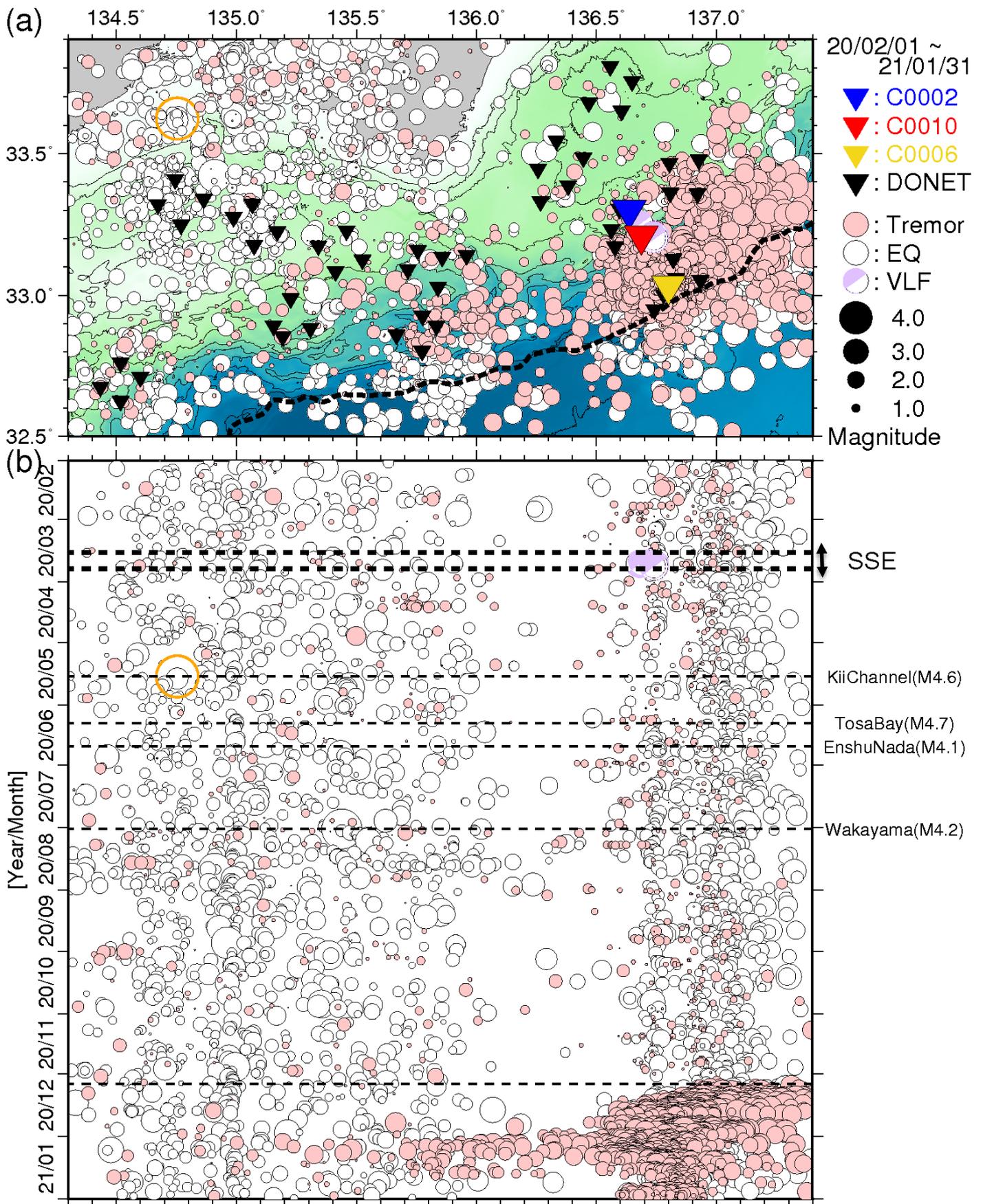


図6 直近1年間において熊野灘から室戸沖にて発生した低周波微動の時空間分布(2020年2月1日~2021年1月31日)。図3と同様のシンボルにて表示している。(a)低周波微動の震央分布図。

(b) aに示した震央を経度方向へ投影した低周波微動の時空間分布図。超低周波地震のメカニズム解についても低周波微動と同様に示す。○は2020年5月17日に発生した紀伊水道地震を示す。

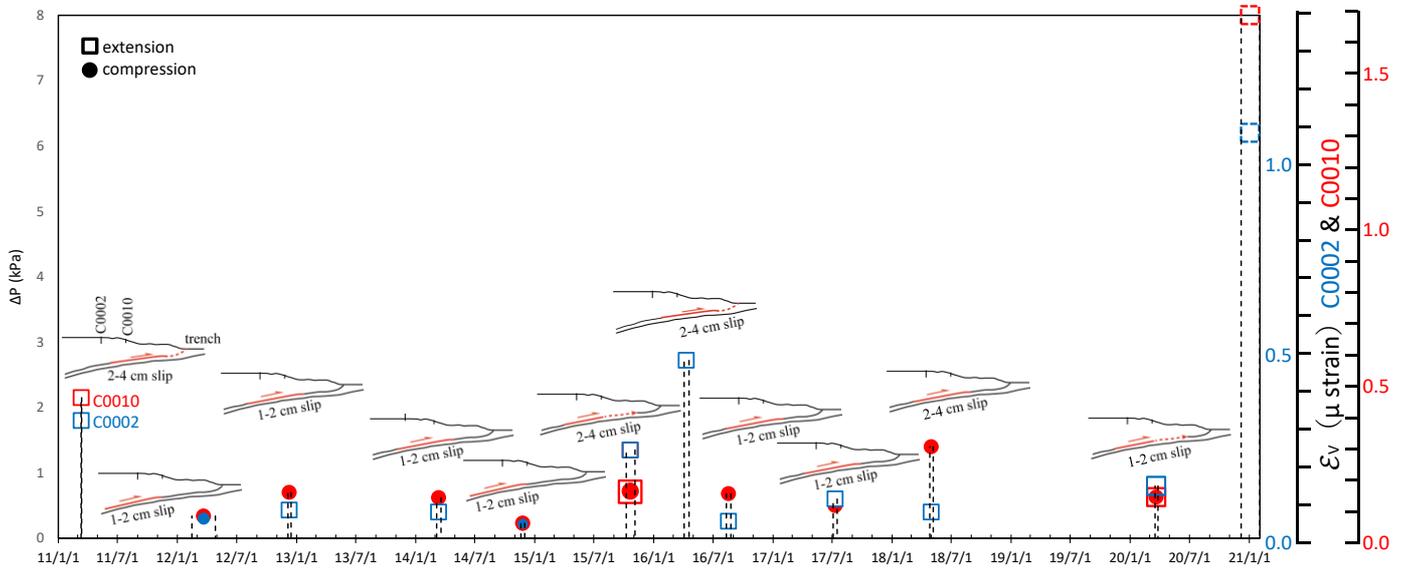


図7 孔内観測点において観測されたSSE 発生時の間隙水圧変化 (Araki et al., 2017; Ariyoshi et al. 2021) を加筆・修正)。間隙水圧変化 (ΔP) とそれらを体積歪 (ϵ_v) に換算したスケールを縦軸に示している。●・□は、それぞれ圧縮・伸長方向の間隙水圧変化を示す。青・赤のシンボルは、それぞれC0002・C0010 の間隙水圧変化を示す。

すべり面のモデル検討と低周波微動発生域との比較

2020年12月~2021年1月にかけて、熊野灘に設置された掘削孔内の間隙水圧、孔内傾斜計、また海底傾斜計にゆっくりとした変動がみられた(図8)。12/3のDONET1Bノードに設置された海底傾斜計BMS1点の変化に続き、12/10よりC0002, C0010, C0006掘削孔内において間隙水圧・傾斜の変動が観測され、これらの観測点では2021年1月まで大きな変動が観測された。

観測された変動を説明する滑り断層モデルのフォワードモデリングによる検討を実施した。観測された変動の状況は、観測点によって時期・変化の大きさが多様であり、複数域での複数滑りイベントの発生を強く示唆する観測結果となっているが、複数の観測点で同時に大きな変化が見られた2020/12/16-2020/12/21の期間について、プレート境界に断層を置いた場合に、孔内間隙水圧、孔内および海底傾斜計の変化量を説明しうる断層パラメータを検討した。C0006点の孔内傾斜は、変化量が非常に大きいため、重みづけを低く調節して検討した。

その結果、図9の通り、同時期に観測された低周波微動の活発な活動がみられる領域の陸よりの断層(Mw 6.1)で観測された地殻変動が説明できる。

また、モデリングをした期間を含む低周波微動の積算モーメントの分布(図10-1, 10-2)は、時期により様々な領域での滑りが同時的に発生したことを示唆しているが、低周波微動活動が活発な期間・領域の近傍の観測点ではゆっくりとした間隙水圧や傾斜の変動も伴っていた(図8と比較)。一方、BMS1観測点で最初にゆっくりとした傾斜変動がみられた時期には、低周波微動はほとんどみられておらず、低周波微動とゆっくり滑りとの関連は注意して検討する必要があると思われる。

超低周波地震の速報解析結果

12月6日頃から活発化している低周波微動活動にあわせて、浅部超低周波地震(sVLFE)の記録が確認されている。そこで、一連の活動の初期にあたる12月6日から12月16日までの範囲において、これらのメカニズム解の推定を実施中であり、下記に暫定結果を示す(図11, 12)。これまでの資料に掲載しているものと同様に、DONET観測点に設置された広帯域地震計記録に0.03-0.05 Hzのバンドパスフィルタを適用し、2秒のデシメーション処理を行った波形に対して、グリッドサーチを適用している(Nakano et al., 2018)。

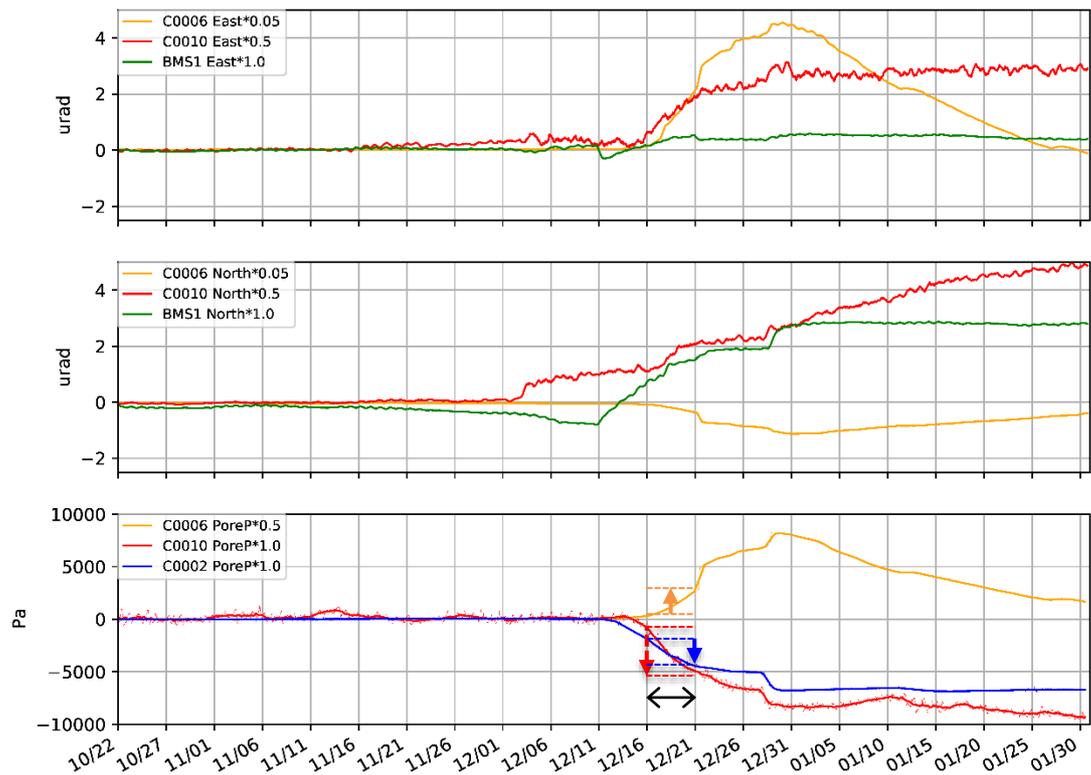


図8 熊野灘に設置された掘削孔内の間隙水圧、孔内傾斜計、また海底傾斜計に見られたゆっくりとした変動。上段：東傾斜 中段：北傾斜（各単位 μrad ）下段：孔内間隙水圧(単位Pa)。孔内観測点 C0002(青線), C0010（赤線）, C0006（橙線）、海底傾斜観測点 BMS1(緑線)。観測点位置は、図9に示す。下段の矢印は図9の断層モデルの検討期間を示している。観測点間で観測振幅が大きく異なるため、図に示す通りのスケーリングを行っている。

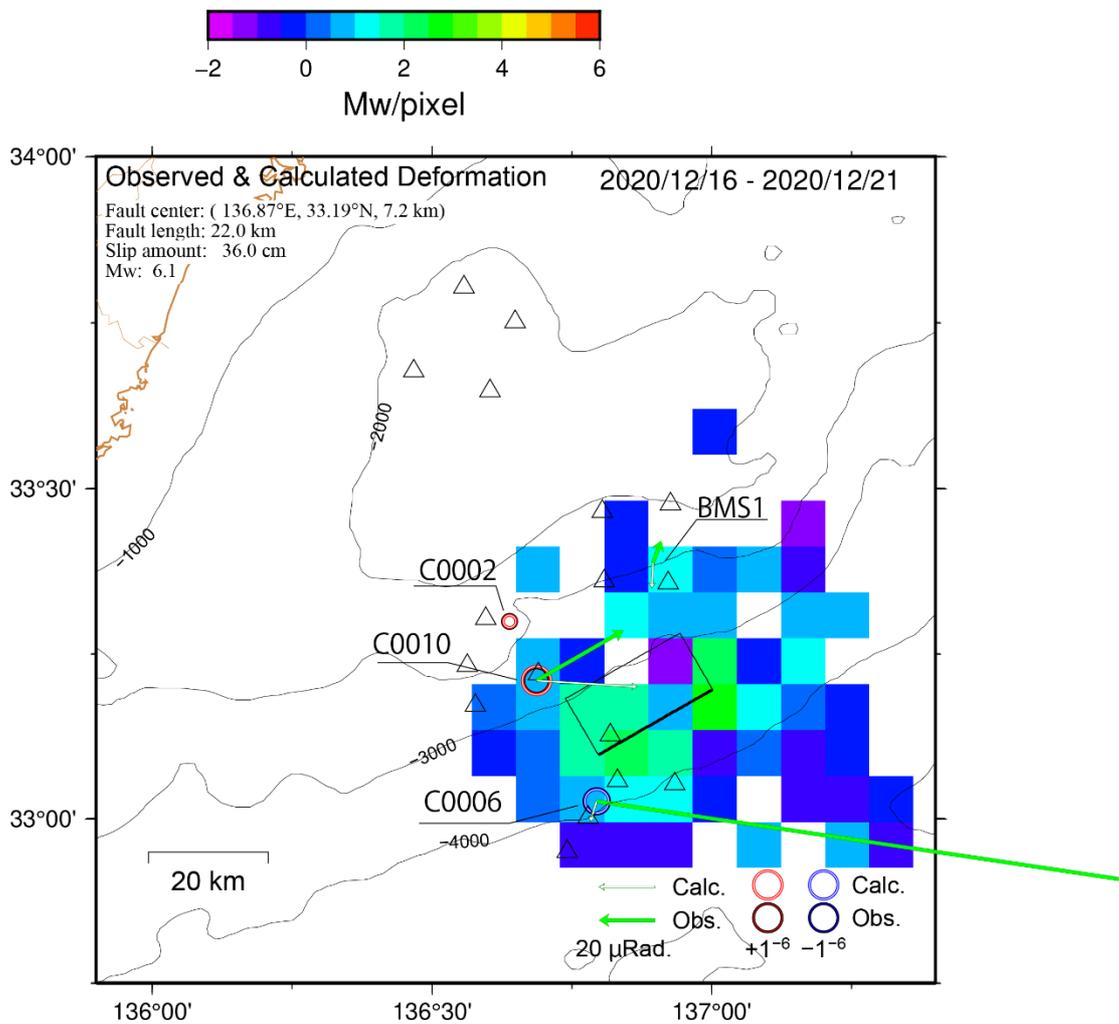


図9 2020/12/16-2020/12/21 の期間についてのC0002, C0010, C0006点の孔内間隙水圧、孔内傾斜、およびBMS1点の海底傾斜変動を説明しうる断層モデル（矩形：プレート境界面、Mw6.1）。○は孔内間隙水圧による体積歪変化、矢印（緑）は傾斜変動をそれぞれモデル(Calc)と観測(Obs.)について示した。DONET観測点位置（△）を参考のため示した。また、図10-1に示した低周波微動の積算モーメントの対応する期間を重ねて表示している。

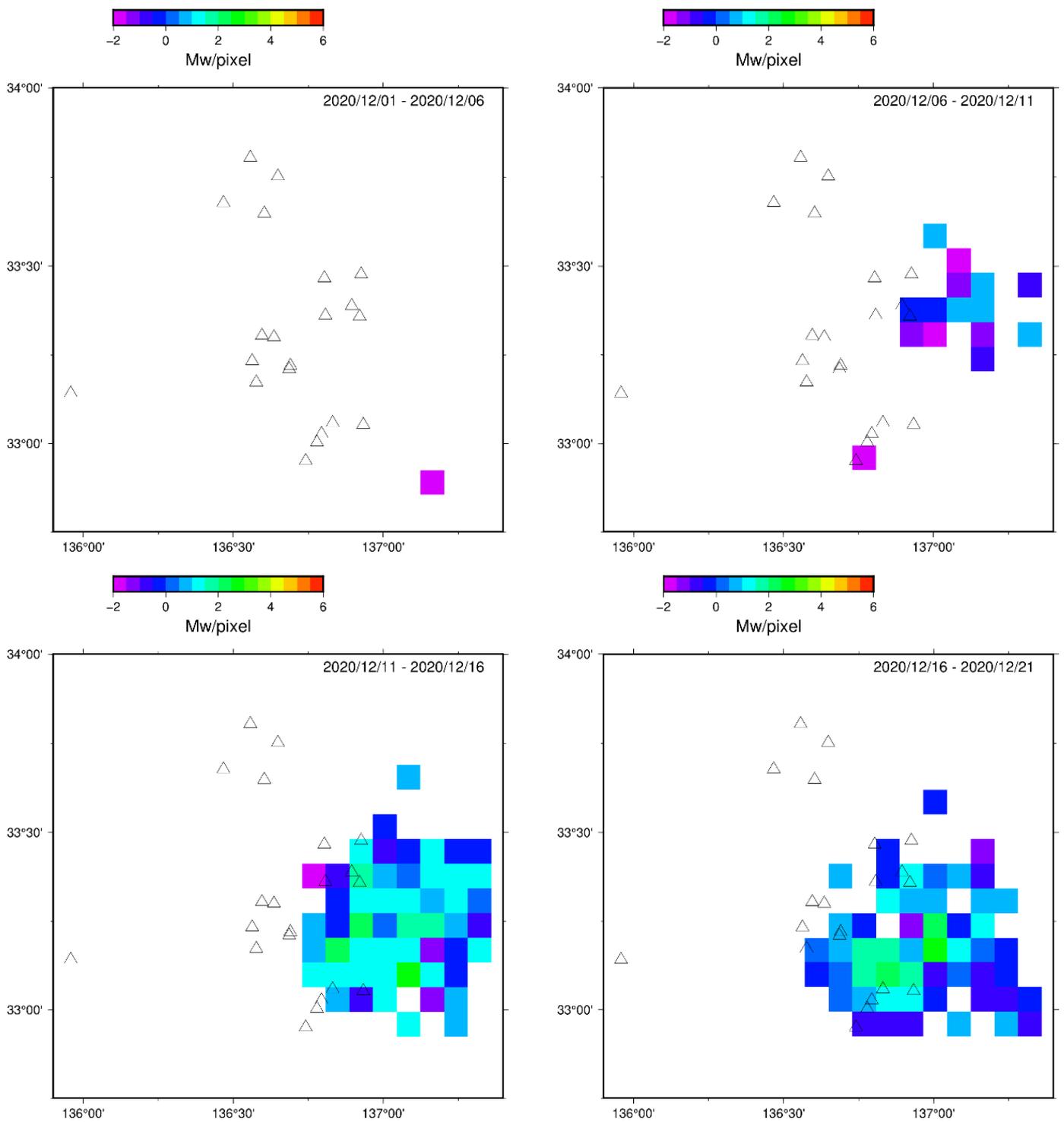


図10-1 5日間のウィンドウ毎の低周波微動(LFT)による積算モーメントマグニチュード(Mw)の分布の時間推移。積算モーメント(M_0)は2-8Hzの地震動エネルギー(E_s)からYabe et al., 2021に基づき $M_0 = E_s/10^{-8.5}$ を仮定し、 $M_w = (\log_{10}(M_0) - 9.1)/1.5$ により計算した。左上から12/1-12/6, ... 12/16-12/21 の期間について示した。三角はDONET観測点と孔内観測点の位置を示す。右下を図9に重ねている。

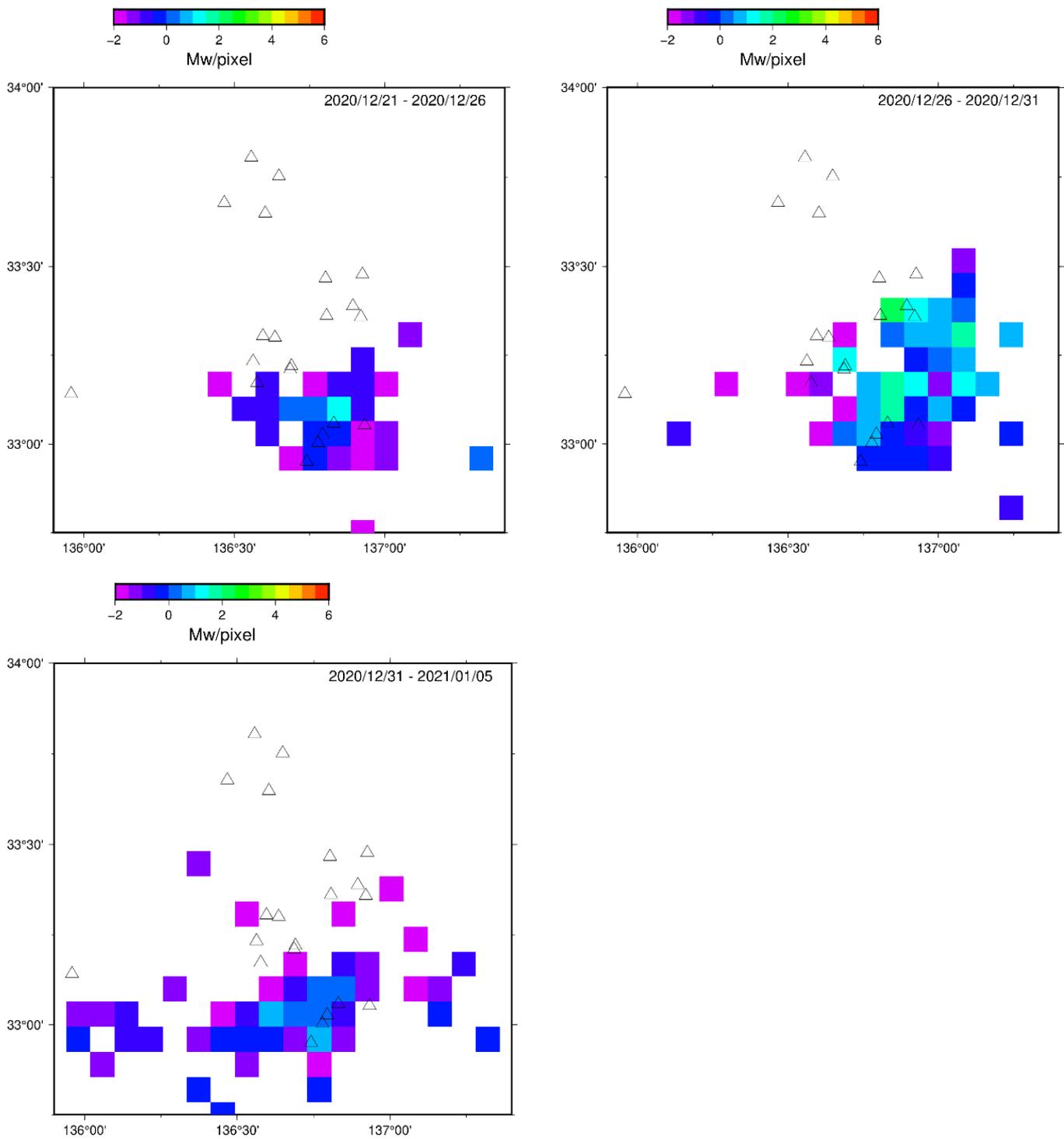


図10-2 5日間のウィンドウ毎の低周波微動(LFT)による積算モーメントマグニチュード(Mw)の分布の時間推移。積算モーメント(M_0)は2-8Hzの地震動エネルギー(E_s)からYabe et al., 2021に基づき $M_0 = E_s/10^{-8.5}$ を仮定し、 $M_w = (\log_{10}(M_0) - 9.1)/1.5$ により計算した。左上から12/21-12/26, ... 12/31-2021/1/5 の期間について示した。三角はDONET観測点と孔内観測点の位置を示す。

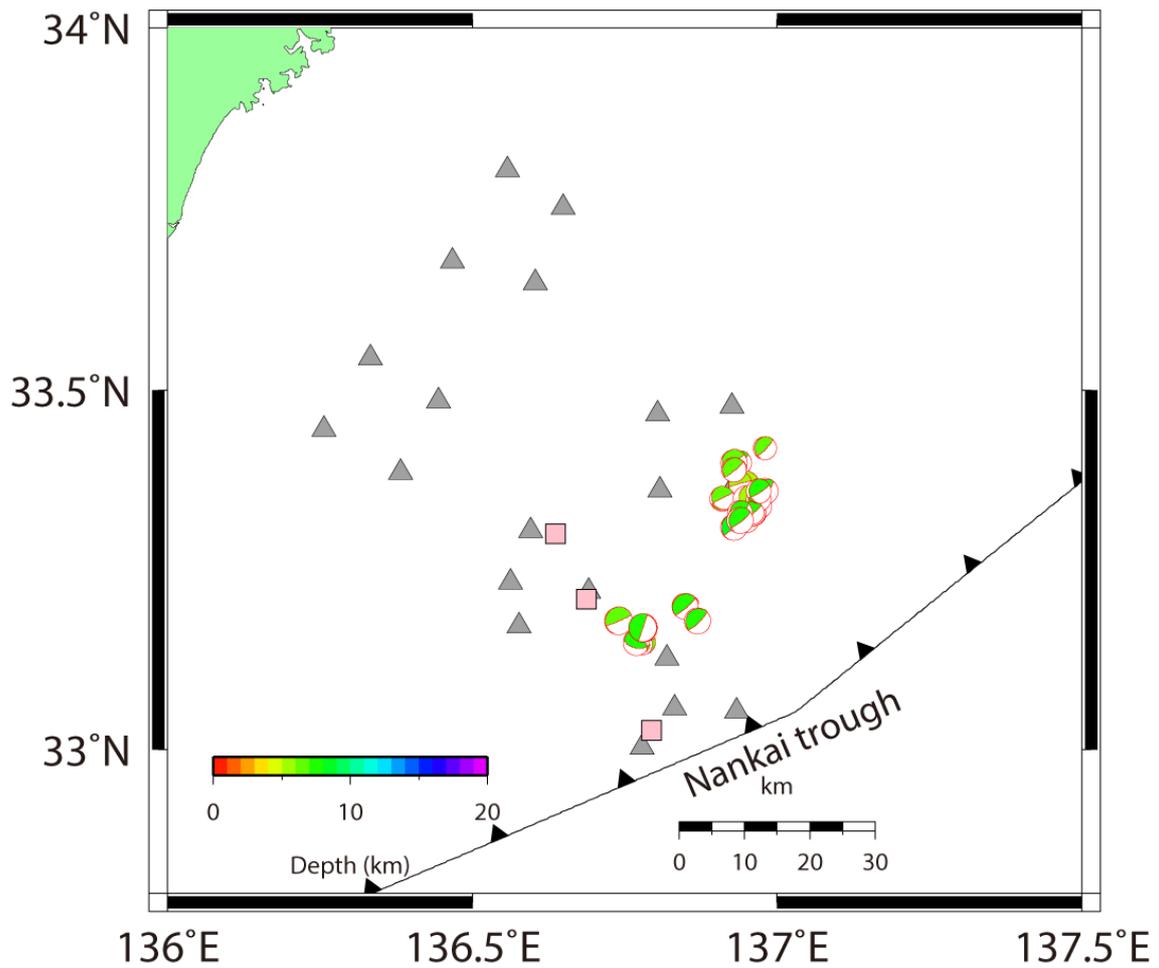


図11 推定したsVLFEのメカニズム解分布。灰色の三角はDONET1観測点、ピンクの四角は孔内観測点の位置を示す。解析期間は12月6日21時から12日04時までと、13日21時から16日17時までの2つの時間窓に分かれ、前者が北東のクラスター、後者は南西のクラスターにあたる。なお、12日5時から13日21時までの間と16日18時以降は未処理。

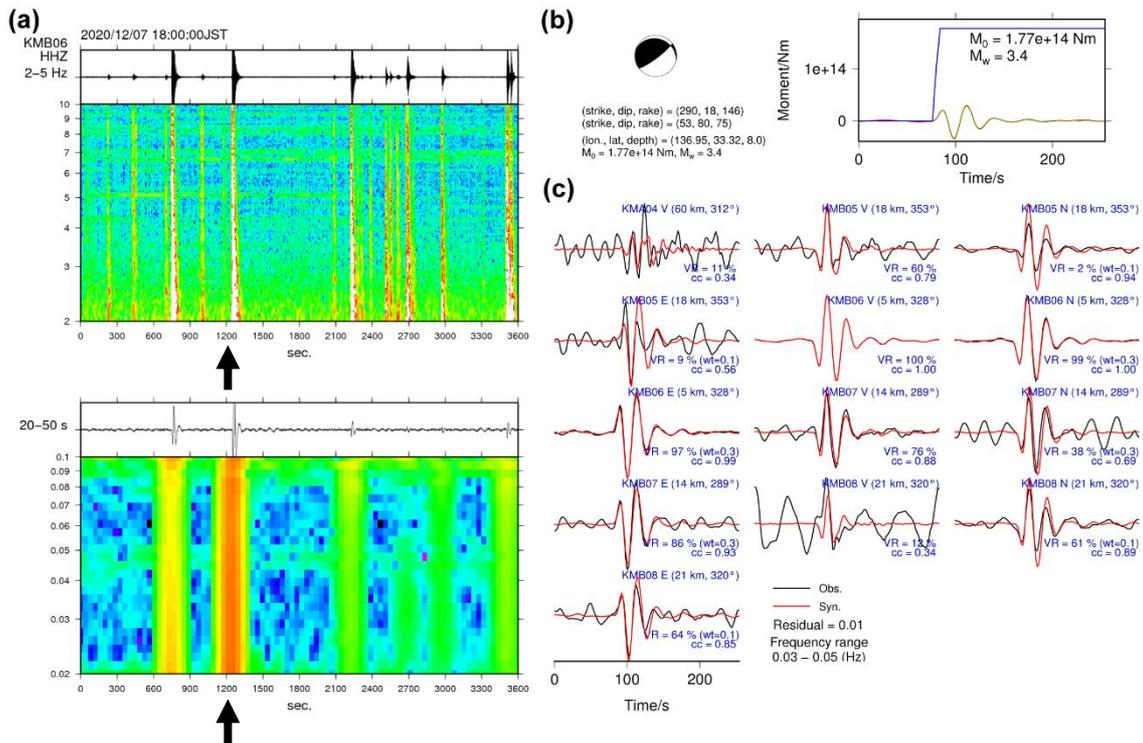


図12 解析した波形の一例。12月7日18時20分頃（黒矢印）のsVLFE。（a）KMB06観測点におけるランニングスペクトル。上が2-5Hz,下が20-50s.該当時刻にVLFEの帯域に強いシグナルが確認できる。（b）推定したメカニズム解と震源時間関数、地震モーメント。（c）各観測点、各成分における理論波形（赤）と観測波形（黒）の比較。