

差分地形法による海底の地殻変動検出にむけて[†]

石川直史^{*1}, 住吉昌直^{*2}, 中村優斗^{*3}, 伊牟田 圭^{*3}, 秋山裕平^{*4}, 渡邊俊一^{*5}, 横田裕輔^{*6}

Toward the detection of seafloor crustal deformation by the differential bathymetry method[†]

Tadashi ISHIKAWA ^{*1}, Masanao SUMIYOSHI ^{*2}, Yuto NAKAMURA ^{*3}, Kei IMUTA ^{*3},
Yuhei AKIYAMA ^{*4}, Shun-ichi WATANABE ^{*5}, and Yusuke YOKOTA ^{*6}

Abstract

Observing crustal deformation associated with earthquakes plays an important role in elucidating the physical process of earthquakes. The differential bathymetry method, which detects crustal deformation of the seafloor by comparing the bathymetry data before and after an earthquake, is effective for observing seafloor deformation caused by a megathrust earthquake occurring at a plate boundary. In preparation for the coming Nankai trough earthquakes, we have started on a trial basis to prepare bathymetric data around the assumed focal region. In order to develop bathymetric data suitable for the differential bathymetry method, we have studied a method to obtain highly accurate bathymetric data by acquiring high-density data with sufficient redundancy and applying the CUBE processing, i.e., a statistical data processing method to estimate bathymetry considering its total propagation uncertainty. As the first trial survey of this differential bathymetry method, a multibeam bathymetric survey was conducted in October 2021 in the vicinity of Minami-Tosa-bae, off the Cape Muroto. This survey provided highly reproducible bathymetry data with no anomalous steps even in overlaps, in the steep depth range of 800 to 2000 m where differential bathymetry method are favored.

1 はじめに

2019年5月31日に開催された中央防災会議において「南海トラフ地震防災対策推進基本計画」が変更され、南海トラフ地震の発生可能性が平常時と比べ相対的に高まったと評価された場合の国

や地方公共団体等の防災対応が定められた。これを受け、同日15時より、気象庁では「南海トラフ地震に関連する情報」の提供を開始した。南海トラフ地震想定震源域またはその周辺においてモーメントマグニチュード (M_w) 7.0以上の地震

[†] Received September 5, 2022; Accepted October 20, 2022

* 1 技術・国際課 Technology Planning and International Affairs Division

* 2 技術・国際課 海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

* 3 沿岸調査課 海洋防災調査室 Geodesy and Geophysics Office, Coastal Surveys Division

* 4 情報利用推進課 Chart and Marine Information Service Division

* 5 大洋調査課 Offshore Surveys Division

* 6 東京大学生産技術研究所 Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

が発生、または想定震源域内のプレート境界において M_w 8.0 以上の地震が発生したと評価された場合、それぞれ「南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）」、「南海トラフ地震臨時情報（巨大地震警戒）」が発出され、後発地震の発生への備えが呼びかけられる。

後発地震に対する備えに対し、科学的調査研究が果たすべき役割として、発生した地震の正確なメカニズムの把握とその後の地震・地殻活動の推移の監視・観測・予測が挙げられる。特に、発生した地震の断層すべりの大きさ・範囲を推定することは、すべり残した領域の把握や地震後の余効変動の推移を把握する上での基本情報となる。

プレート境界断層における地震時すべりの推定には、国土地理院 GEONET 等の陸上 GNSS 観測網による地殻変動観測が有効であるが、南海トラフ地震想定震源域の大部分は陸域から離れた海底下にあり、陸上の観測データのみによる推定では、その精度が低下してしまう欠点がある。海上保安庁が展開する GNSS-音響測距結合方式 (GNSS-A) による海底地殻変動観測網 (Seafloor Geodetic Observation Array : SGO-A) はその欠点を補い、震源域直上の海底の地殻変動を直接測定することを可能にしている。

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.0) では、海上保安庁及び東北大学の GNSS-A 観測点において、20–30 m の大きさの地殻変動を海底で捉えることに成功した (Sato et al., 2011 ; Kido et al., 2011)。この変動量は陸上の GEONET の結果から推定される変動量よりも大きく、海底下のプレート境界で発生する海溝型地震のメカニズムを把握するためには海底観測が必須であることが改めて認識されることとなった。

しかしながら、地殻変動観測は観測点直下の比較的狭い範囲で発生したすべりによる変動しか捉えることができない。GEONET は、全国に約 30 km 間隔で約 1300 点を展開することでこの欠点を補っているが、海上保安庁の SGO-A の観測点間隔は約 100 km 程度で設置点数も少ないため、

地震時すべり推定の空間分解能は必ずしも十分ではない。2011 年時点における東北沖の GNSS-A 観測点も、陸から約 150 km の沖合までに限られており、そこから海溝軸に至る領域の地殻変動は捉えられていない。

観測の空白域となっている海溝軸付近の地殻変動は、海洋研究開発機構の海底地形調査によって得られた。これは、地震発生前に取得していた地形データと地震後に同じ測線で行った地形調査の結果の差分から、地震時の変動を推定するものである (差分地形法)。その結果、海溝軸付近では GNSS-A 観測点において観測された変動よりもさらに大きい約 50 m の水平変動があったことが捉えられた (Fujiwara et al., 2011)。この結果は、津波の観測データから推測された海溝軸付近の地殻変動 (Fuji et al., 2011 ; Satake et al., 2013) と整合的であり、甚大な被害をもたらした巨大津波の起源としての地殻変動を直接的に捉えた重要な成果となった。このときの差分地形法の精度は水平変動について約 20 m と見積もられており、2–3 cm の精度を持つ GNSS-A 観測 (Yokota et al., 2018) と 3 桁の違いがあるが、観測点が無い観測の空白域においても、予め海底地形データを整備しておくことによって大まかな地殻変動を捕捉できる可能性があることで、差分地形法の有用性は高いと考えられる。

また、津波の発生原因としては、断層すべりによる海底の地殻変動のほかに、地震動による海底地すべりも考えられる。例えば、1771 年に先島諸島に大きな被害をもたらした八重山地震津波では、その発生原因について地震に伴う海底すべりや津波地震、分岐断層の活動等の複数の説が提唱されており、現時点で結論は得られていない (地震調査委員会, 2022)。差分地形法はこのような地すべりによる地形変化を捉えることも可能であり、Fujiwara et al. (2011) も日本海溝の海溝軸付近の地すべり起因と考えられる地形変化を報告している。このことから、差分地形法を目的とした海底地形データ整備は、将来の南海トラフにおける津波の発生原因の詳細を明らかにする上でも重

要な鍵となる。

以上のような差分地形法による海底地殻変動観測の有用さから、海洋防災調査室ではSGO-Aにおける定常的なGNSS-A観測に加え、差分地形法による海底地殻変動観測（これをSGO-B: Seafloor Geodetic Observation by differential Bathymetryと名付けた）の実現に向けた試行として海底地形調査に着手した。本稿では、差分地形法に必要な精度を確保するための観測の方針と2021年10月に実施した最初の調査について報告する。

なお、地震発生前後の海底地形を比較するというアイデア自体は、比較的単純な故に古くから使われている。関東大震災を引き起こした1923年の関東地震の際には、地震後に海軍水路部が測量艦4隻による相模湾周辺の測量を行い、地震前の測量結果との比較を行った。その結果100 m以上の隆起・沈降を検出し、文部省の震災予防調査会において水路部長の内田虎三郎から「驚クベキ變化ヲ生ゼシヲ發見」との報告がなされている（内田, 1923）。この結果は、当時の専門家による議論を巻き起こし（例えば、寺田, 1924）、非常に興味深いものの、現代の観点では、この地震による上下動は10 mを超えないと考えられており（宍倉, 2006）、当時の測量結果は誤差による過大評価であったとするのが妥当であると思われる。一方で、この水深変化を地殻変動ではなく地すべりとし、地すべりによる津波のモデルを評価する動きもある（村田・他, 2020）。

2 差分地形法による海底地殻変動観測に向けた海底地形データ整備

気象庁では、南海トラフにおける地震発生の可能性を評価した結果を「南海トラフ地震に関連する情報」として発表するにあたり、有識者及び関係機関からなる「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」を開催している。海底の地殻変動を把握する責務を担う海上保安庁は関係機関として同会に参加し、定期的に観測成果を報告している。

将来の南海トラフ地震発生時の地殻変動を正確に把握するためには、SGO-Aのさらなる充実に加え、観測の空白域においては、差分地形法による地殻変動の検出を可能とするような海底地形データを取得しておく必要がある。現在、政府が想定している南海トラフ地震は M_w 8-9クラスである。 M_w 9.0の東北地方太平洋沖地震では、数十mオーダーの海底地殻変動観測を捉えることに成功したが、 M_w 8クラスの地震では、想定される地殻変動はこれよりも小さく、10 m以下程度と考えられる（例えば、Sagiya and Thatcher, 1999）。Fujiwara et al. (2011)は、得られた変動の水平精度を約20 mと見積もっている。この精度はマルチビーム測深機のフットプリントの5-12分の1程度に対応しており、測深機の水平分解能を超えて地殻変動が検出できることを示しているが、 M_w 8クラスの変動を捉えるためには、より高い精度が求められる。Fujiwara et al. (2011)では比較に用いているのは元々地殻変動の検出目的で取得したデータではないため測線が1本しかなく、さらに比較元の地震前データは1999年と2004年に取得したものであり、船の測位精度の低さや音速の誤差などの点で、必ずしも本手法に最適な精度を有したデータではなかった。一方、はじめから異なる時期の詳細な地形の比較を目的とし、最新の機器による精度の高いデータを面的に取得すれば、より高い精度で地殻変動を捉えることが可能になると期待される。海上保安庁では、これまでも南海トラフ周辺海域で海底地形調査を行ってきたが、古いデータでは地殻変動を捉えるために必要な精度を確保することが難しいことから、改めて最新の機器・手法によって海底地形調査を行い、将来の南海トラフ地震に備えることが重要である。

より高い精度の海底地形データを取得するためには、航海安全のために高い精度が求められる港湾・航路・沿岸域の水路測量における水深データ処理手法として使用されているCUBE処理（海上保安庁, 2022）を前提としたマルチビーム測深手法を採用することが現時点では最適である。

CUBE 処理は、測深ビーム毎に異なる総伝播不確かさを考慮した統計的なデータ処理により、測深点データから高密度の水深グリッドデータ（以下、CUBE 水深という）を算出する処理手法である（住吉・他, 2020）。CUBE 処理を前提とした測深手法においては、統計処理により高い精度を確保するため、十分な冗長性が担保された高密度データを取得する必要がある。具体的には、水深の精度検証がなされたマルチビーム測深機を使用し、船速を出し過ぎずデータの品質と測線方向の点密度を上げることを重視する他、スワス幅を広げ過ぎずビーム角の大きなスワス端付近の測深データを取得しないこと、測線のスワス幅の重複率を 100% とし高密度データを面的に取得することなどに注意し観測を実施する必要がある。また、測量毎の結果の検証のため測線に直行する照査線の設定や適切な頻度の音速プロファイル測定も必要となる。最終的に得られる CUBE 水深は、音速の不確かさ等に起因するスワス端付近の精度の悪いデータの影響が最小限に留められ、オーバーラップ部分においても異常な段差のないスムーズで再現性の高い品質管理された水深データとなるため（住吉・他, 2020）、他の測量の水深データとの直接比較が原理的に可能である。

また、海底地形を比較した際に変化が捉えにくいなだらかな地形よりも急峻な地形の方がより精度よく地殻変動が推定できる（Fujiwara et al., 2015）ため、場所の選定も重要となる。基本的には、SGO-A の観測の空白域となっているトラフ軸近傍をメインターゲットとし、急峻で地すべりなどの地形変化を起こしそうな場所を優先的に調査することが望ましい。なお、フィリピン海プレート沈み込みに伴う定常的な地殻変動は年間数 cm 程度であるため、数年から十数年程度の期間の累積の変動はマルチビーム測深の精度以下であり無視しても差し支えない。したがって、別の期間に取得したデータを結合し面的に範囲を拡げていくことが可能である。

3 令和 3 年度差分地形海底地殻変動調査

海洋防災調査室では、SGO-B の最初の試行として、測量船「海洋」による令和 3 年度第 6 次海底地殻変動観測のうち 2021 年 10 月 21 日夜遅くから 23 日未明までの約 26 時間、海底地形データを取得した。実施海域は、Fig. 1 (a) の赤四角で示した室戸岬南東沖の水深 800–2000 m の領域に設定した。この領域は南土佐礫（みなみとさばえ）と呼ばれる浅所が東西に伸び、差分地形法に有利な急峻な地形となっている。また、領域の南東端には SGO-A の MRT2 観測点が位置しており、GNSS-A 観測との比較も可能となっている。

使用したマルチビーム測深機は Kongsberg Maritime 社製 EM302 で、発信周波数は 30 kHz、ビーム幅は $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ となっており、及川・他（2010）のとおり精度管理がなされている。測深モードは Very Deep mode を用い、パルス長 5 ms の連続波又は同等バンド幅の FM 波（レンジ分解能 3.75 m に対応）が使用された。測深ビームのフットプリントは、船の進行方向・直交方向（直下付近）とともに、水深 800–2000 m で 15–35 m となっている。

船の進行方向の測深点間隔は、7 ノットの速力で観測したため、水深 800–2000 m で 5–15 m となっている。測線配置は、水深 1400 m において、スワス幅（スワス角 ± 40 度）で重複率をおおむね 100% に維持できるように、1150 m とした（Fig. 1 (b)）。照査線については、主測線と直行する方向で主測線の間隔の 15 倍を標準間隔とする水路測量における設定方法に基づき、照査線 1 本を設定して実施したものの、風向き・海流の向き等による船体動揺の悪化により有効な測深データがほとんど全てで取得できなかったため、主測線との比較検証は行えなかった。

音速改正は、XBT 及び XCTD を使用し、海域に応じた適切な頻度で音速プロファイルを測定した。測線配置及び XBT/XCTD の投入位置は Fig. 1 (c) のとおりである。また、受波器のビームステアリングに使用するため、表面音速もリアルタイムに計測した。潮汐補正は今回の調査海域であ

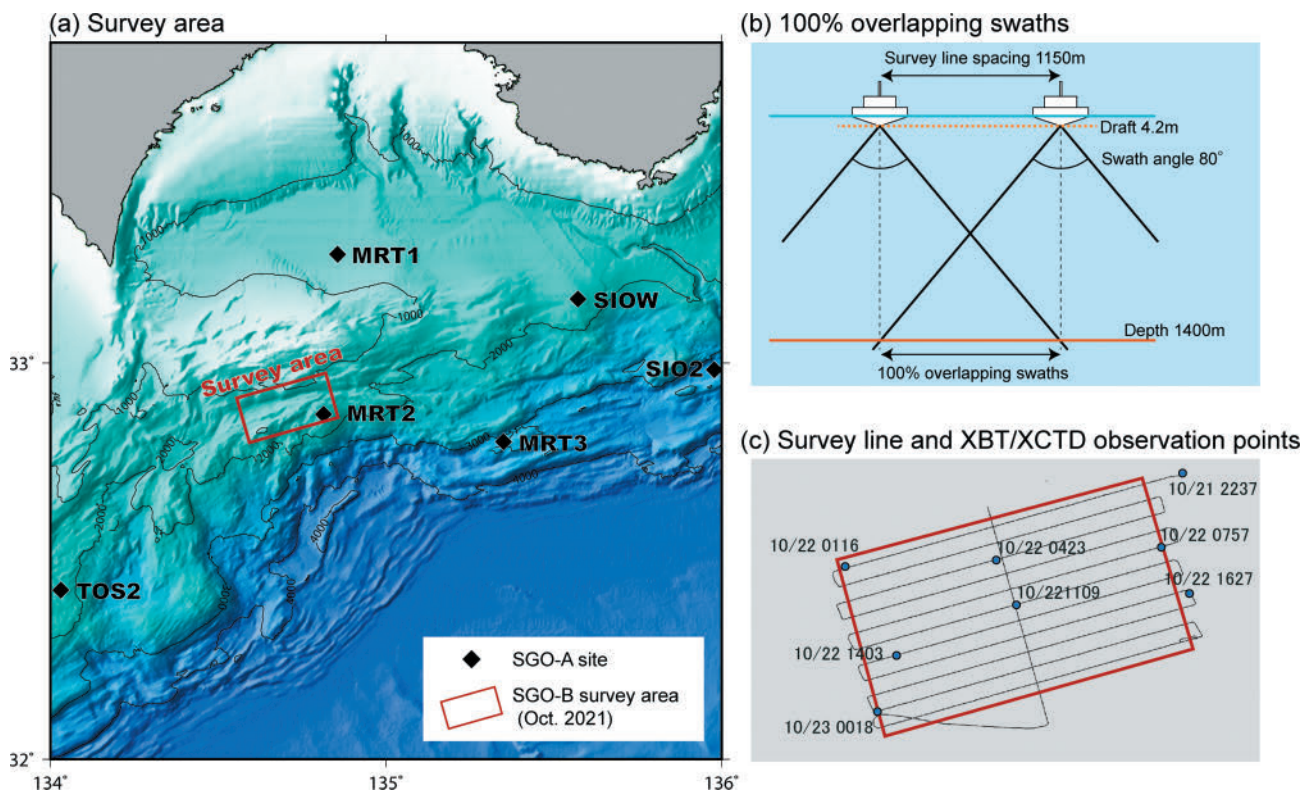


Fig. 1. (a) Survey area. (b) Survey line spacing setting for 100% overlapping swaths. (c) Survey line and XBT/XCTD observation points.

図 1. (a) 調査区域. (b) 100%オーバーラップのための測線間隔の設定. (c) 測線配置と XBT/XCTD 観測地点.

る沖合での潮位の現場値が得られていないため省略したが、これに起因する鉛直誤差は、気象庁所管の常設験潮所「室戸岬」の測深時の潮位変化から、最大で±0.8 m 程度であると見積もられる。

船の位置及び姿勢は、Kongsberg Seatex 社製 SEAPATH200 により決定した。測位精度は 0.7 m RMS、ロール及びピッチ精度は 0.02 度 RMS（振幅±5 度の場合）、ヘディング精度は 0.05 度、ヒープ精度は 5 cm 又は振幅の 5% のうち大きい方の値である。

データ処理は Teledyne Geospatial 社製の CARIS HIPS and SIPS 10.4 を使い、CUBE 処理を適用して、全測深点から CUBE 水深を算出した。CUBE 水深の精度向上のため、水平分解能（ビームのフットプリント）、水平解像度（測深点間隔）等を考慮し、CUBE 水深のグリッドサイズは今回の調査海域の水深で標準的に使用される 32 m 又は 64 m よりも高解像度の 16 m を選択した。

本調査によって得られた水深データの海底地形

陰影図及び 3 次元海底地形図を Fig. 2 及び 3 に示す。CUBE 処理により、スワス端付近の精度の悪いデータの影響が最小限に留められ、オーバーラップ部分においても異常な段差のない再現性の高い水深データが得られたことが分かる。また、CUBE 水深の不確かさは、水深 800–2000 m で 1.5–3 m (95% CL) であった。

なお、今回の調査では南土佐藩が過去に調査された位置より西方約 2 km に位置していた。過去の水深データは、昭和 48 年のシングルビーム測深による測線間隔の粗い測量で、海上測位はロラン C よる精度の低いものであったことから、このような差が生じたものと考えられる。

4 今後に向けて

今回、差分地形法のための最初の海底地形調査を実施した。次回調査では、今回と一部領域が重なるように調査を行い、重なった領域の地形データの比較によって、本手法の精度評価を行うこと

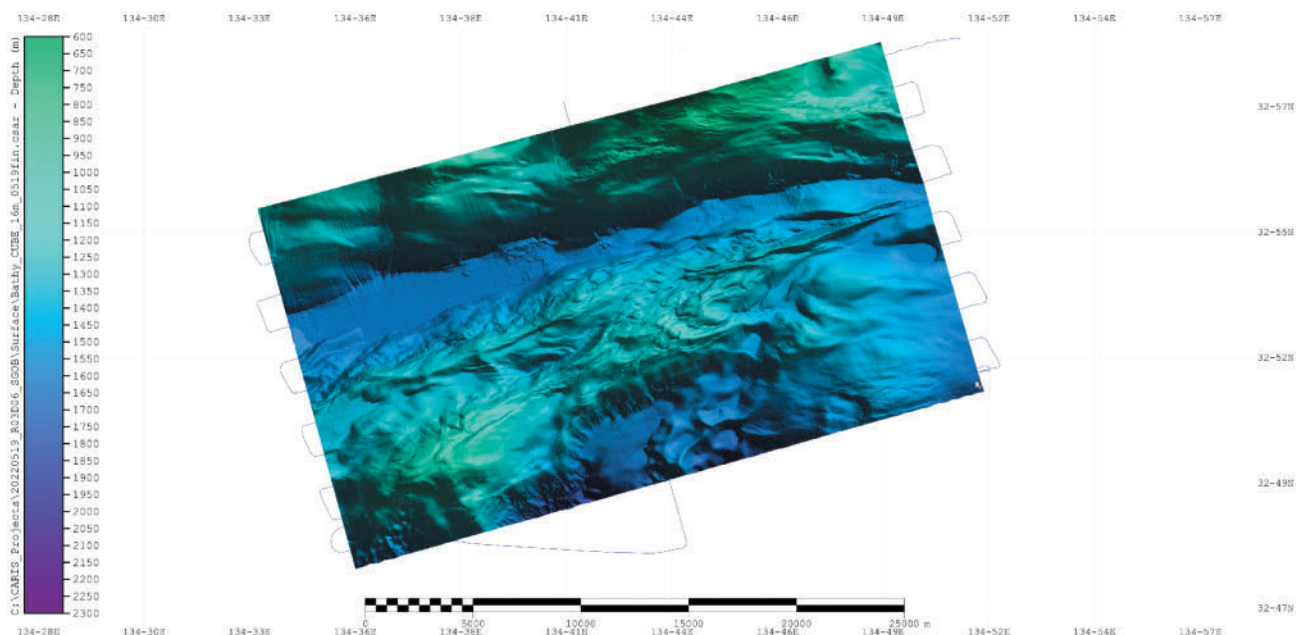


Fig. 2. Shaded bathymetric map with vertical exaggeration by 10.

図2. 海底地形陰影図（高さ強調10倍）.

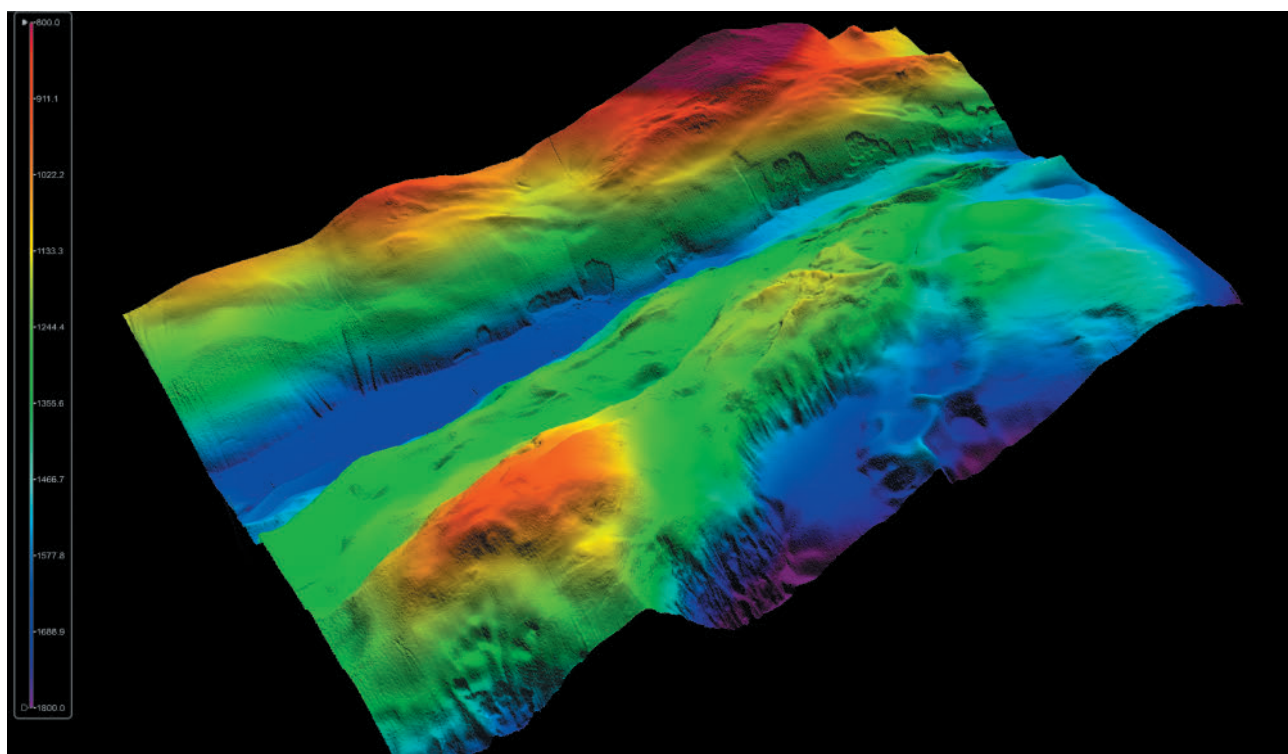


Fig. 3. 3D bathymetric map with vertical exaggeration by 5.

図3. 3次元海底地形図（高さ強調5倍）.

が重要である。その後はメインターゲットであるトラフ軸近傍に向けて、調査領域を少しずつ沖合に移行していく、あるいは地すべりが発生しやすいような地形がある領域を重点的に行うなど、限ら

れた時間で効果的にデータを取得していく計画の検討が重要である。

文 献

- Fujii, Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa (2011) Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 55.
- Fujiwara, T., S. Kodaira, T. No, Y. Kaiho, N. Takahashi, and Y. Kaneda (2011) The 2011 Tohoku-Oki Earthquake: Displacement Reaching the Trench axis, *Science*, 334, 1240.
- Fujiwara, T., Y. Masaki, and F. Yamamoto (2015) Evaluation of Spatial Resolution and Estimation Error of Seafloor Displacement Observation from Vessel-Based Bathymetric Survey by Use of AUV-Based Bathymetric Data, *Mar. Geophys. Res.*, 36, [1], 45-60.
- 地震調査委員会 (2022) 日向灘及び南西諸島海溝周辺の地震活動の長期評価 (第二版), 地震調査研究推進本部, 東京.
- 海上保安庁 (2022) 水路測量業務準則施行細則 (昭和 58 年 4 月 27 日保水海第 13 号, 令和 4 年 3 月 8 日保海海第 184 号により一部改正), 海上保安庁, 東京.
- Kido, M., Y. Osada, H. Fujimoto, R. Hino, and Y. Ito (2011) Trench-normal Variation in Observed Seafloor Displacements Associated with the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, [24], L24303.
- 村田一城・佐々真志・高川智博 (2020) 海底地すべり及び地すべり津波のリスク評価に向けた地震時海底地盤液状化危険度の検討, *土木学会論文集 B3 (海洋開発)*, 76, I_1055-I_1060.
- 及川光弘・渡邊奈保子・橋本崇史・吉田 剛・千葉未子 (2010) 深海域のマルチビーム音響測深データの不確かさと管理, *海洋情報部研究報告*, 46, 39-46.
- Sagiya, T. and W. Thatcher (1999) Coseismic slip resolution along a plate boundary megathrust: The Nankai Trough, Japan, *J. Geophys. Res.*, 104, [B1], 1111-1129.
- Satake, K., Y. Fujii, T. Harada, and Y. Namegaya (2013) Time and Space Distribution of Coseismic Slip of the 2011 Tohoku Earthquake as Inferred from Tsunami Waveform Data, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 103, 1473-1492.
- Sato, M., T. Ishikawa, N. Ujihara, S. Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki, and A. Asada (2011) Displacement above the Hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 332, 1395.
- 住吉昌直・栗田洋和・安原 徹・橋本崇史・小川 遥・長澤亮佑・長野勝行・吉澤 信・眞保智彦・秋山裕平 (2020) マルチビーム水深測量成果における CUBE 水深の採用について: 海外水路機関における最適化の事例紹介, *海洋情報部研究報告*, 58, 66-79.
- 宍倉正展 (2006) 関東地震に伴う地殻変動, 1923 関東大震災報告書 - 第 1 編 -, 中央防災会議編, 29-32, 内閣府, 東京.
- 寺田寅彦 (1924) 大正十二年九月一日の地震に就いて, *地学雑誌*, 36, 395-410.
- 内田虎三郎 (1923) 関東大地震ニ因ル相模湾底及附近地形ノ變化調査報告, 震災豫防調査會報告, 第百号 (乙), pp.61.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, and S. Watanabe (2018) Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations, *Sci. Data*, 5:180182.

要 旨

地震時の地殻変動を把握することは発生した地震の物理過程の解明に重要な役割を果たす。地震発生前後の海底地形データを比較することで海底の地殻変動を検出する差分地形法は、プレート境界で発生した巨大地震の地殻変動を把握するために有効である。海洋防災調査室では、将来の南海トラフ地震に備え、想定震源域の海底における地形データの整備を試行的に開始した。差分地形法に適した海底地形データを整備するため、十分な冗長性が担保された高密度データを取得して、総

伝播不確かさを考慮して水深を求める統計的な処理である CUBE 処理を適用することにより，精度の高い海底地形データを取得する方法について検討した．差分地形法のための調査の最初の試行として，2021 年 10 月に室戸岬沖の南土佐礮周辺において，マルチビーム測深機による海底地形調査を実施した．本調査により，水深 800–2000 m の差分地形法に有利な急峻な地形の海域において，オーバーラップ部分においても異常な段差のない再現性の高い水深データが取得された．