

海洋情報部における 2011 年から 2020 年にかけての GNSS-A 海底地殻変動観測の発展と成果[†]

渡邊俊一*

Decadal progress and results of the GNSS-A seafloor geodetic observation from 2011 to 2020[†]

Shun-ichi WATANABE*

Abstract

The Japan Coast Guard has been developing and operating seafloor geodetic observation with the GNSS-Acoustic ranging combined technique (GNSS-A) for more than 20 years. Important scientific results were provided by the GNSS-A observation. In this decade, GNSS-A observation has detected seafloor movements due to the co- and post-seismic crustal deformation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, and the interseismic seafloor velocity along the Japan Trench, the Sagami Trough, and the Nankai Trough, including their temporal variations. These results provided essential information on interplate earthquakes. Decadal improvements of the GNSS-A technique and efficiency have enhanced the observation frequency. Observation accuracy was also improved by introducing a new analysis method where the spatial gradient components of the sound speed structure are estimated and corrected. Recently, we embarked on an effort to develop an “open” GNSS-A for the further development of GNSS-A community.

1 はじめに

地球における位置とその変化を正確に把握し適切に表現することは、測地学の主要な目的の一つであるといえる。位置の変化を捉えることで、グローバルなプレートの相対運動やそれに伴う諸現象としての地殻変動も定量的に検出することが可能となり、そうしたデータは地震学的な研究の発展に大きく寄与してきた。1990年代には、米国 Scripps 海洋研究所において GNSS-音響測距結合方式 (GNSS-A) による海底測位観測が実現した (e.g., Spiess et al., 1998)。GNSS-A 観測が実現し

たことで、それまで電磁波を活用した宇宙測地技術が利用可能な陸上のみに限られていた精密グローバル測位を、原理的には海底にまで広げられるようになった。

海上保安庁では、1990年代から GNSS-A 海底地殻変動観測システムの開発を進め、2000年から実海域における観測を開始した (e.g., 浅田・矢吹, 2000; 矢吹, 2002)。その後、2000年代には観測点の拡充並びに観測精度及び観測効率の向上のための技術開発を継続的に実施し、宮城県沖や福島県沖での地殻変動の検出等、地震学的に重

[†] Received September 18, 2020; Accepted October 29, 2020

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

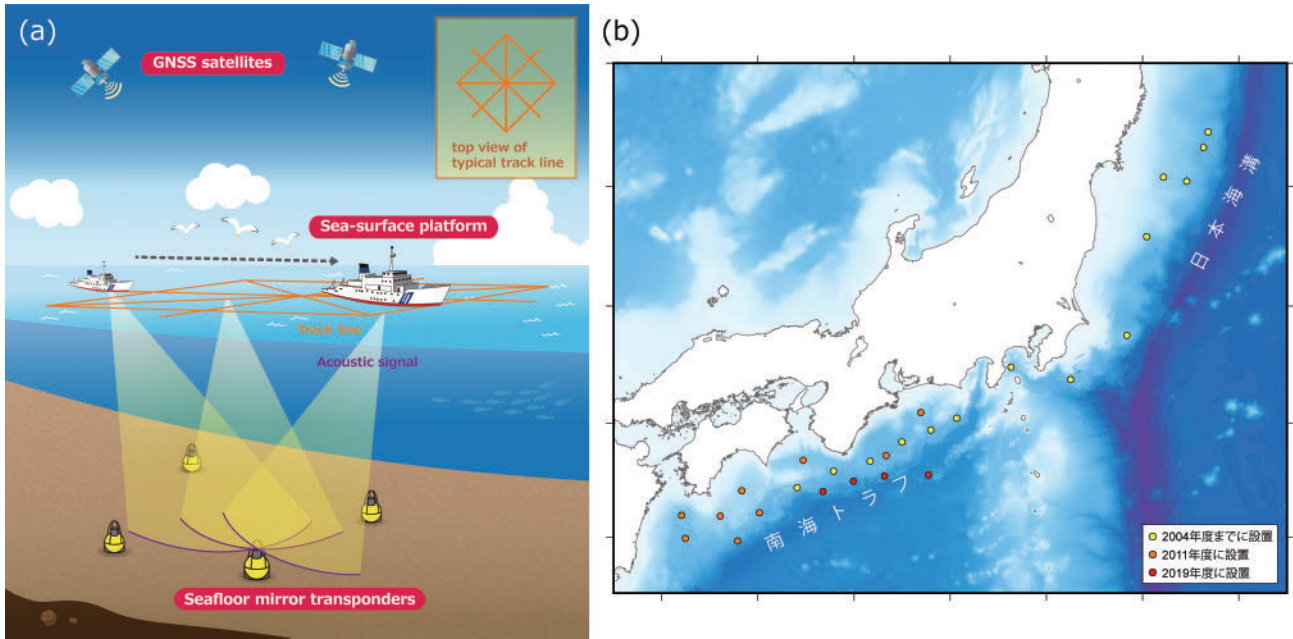


Fig. 1. (a) Schematic diagram of Japan Coast Guard's GNSS-A seafloor geodetic observation (after Watanabe et al., 2020a). (b) Locations of our GNSS-A observation sites as of Sep. 2020.

図1. (a) 海洋情報部で実施している GNSS-A 海底地殻変動観測の概念図 (Watanabe et al., 2020a より), (b) 2020 年 9 月現在の観測点配置.

要な成果を提出してきた (詳しくは, 藤田, 2006; 佐藤・藤田, 2012 のレビューを参照されたい). 現在海上保安庁で実施している GNSS-A 海底地殻変動観測の概念図を Fig. 1 (a) に示す. 現在の観測の全体構成は, 音響トランスデューサの船底装備が実施されたこの時点で概ね確立した.

2010 年代には, 日本海溝沿いの海域でプレート境界型の巨大地震である 2011 年東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.0) が発生し, その海底地殻変動が GNSS-A 技術によって適切に取得された (Sato et al., 2011). 東北地方太平洋沖地震の発生とそのメカニズムに関する研究は, 南海トラフ等, 他地域のプレート境界型地震の評価にも影響を与えた. また, 海底地殻変動データについても, その地震学的な有用性が実証された形となったため, 観測にかかる期待も大きくなった. 2011 年度には海上保安庁により南海トラフ沿いに 9 地点の観測点が増設され, また, 日本海溝沿いには東北大学のグループが 2012 年度に 20 地点の観測点を新たに展開した. さらに, 2019 年度には海上保安

庁が南海トラフ軸の近傍に新たに観測点を設置した (Fig. 1b). このように成果を期待される中, 海上保安庁は着実に海底地殻変動観測の運用及び技術開発を継続し, 東北地方太平洋沖地震の地震後変動 (Watanabe et al., 2014) や南海トラフ及び相模トラフ沿いの平均的な地殻変動 (Yokota et al., 2016; Watanabe et al., 2015) の測定, さらには南海トラフにおけるスロースリップ現象の検出 (Yokota and Ishikawa, 2020) に成功した. 本稿では, この 10 年間で得られた海底地殻変動観測の成果と科学的な意義について総括するとともに, そうした成果を支えるために進められた観測技術の研究開発状況についても概観する.

2 観測の成果

2.1 日本海溝沿いの観測成果

日本海溝沿いでは, 2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.0; e.g., Ide et al., 2011) が発生した. それに伴い, 震央近傍の海底が, 少なくとも南北約 70 km の範囲で 20 m 以上も東 (海溝側) に移動していることが GNSS-A により

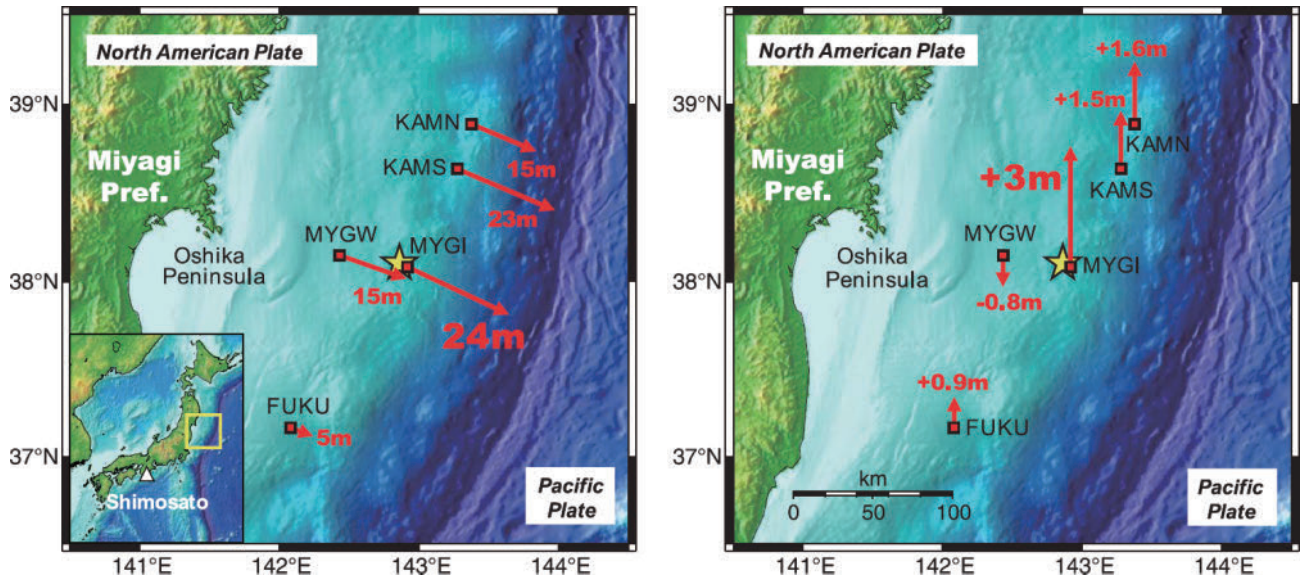


Fig. 2. Coseismic seafloor displacements associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake for horizontal (left panel) and vertical (right panel) components, respectively (after Sato et al., 2011). Red squares and yellow star indicate the locations of our GNSS-A sites and the epicenter, respectively.

図2. 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う海底地殻変動の水平(左)及び鉛直(右)成分(Sato et al., 2011より). 赤四角と黄星は, GNSS-A観測点と震央の位置をそれぞれ示す.

明らかにされた (Fig. 2. Sato et al., 2011; Kido et al., 2011). この成果により, 宮城県沖のプレート境界で最大60mのすべりがあったことが推定された (e.g., Iinuma et al., 2012). こうした地震時すべり分布の推定にあたっては, 海底地殻変動のピーク値が得られた「MYGI」「KAMS」及び東北大学観測点「GJT3」の成果だけではなく, その周辺の観測点の成果も重要な役割を果たしている. 例えば, 震央付近の「MYGI」が隆起していたのに対し, その西側の観測点「MYGW」は沈降を示したが, この観測事実はすべり域のdowndip側のエッジの推定に貢献した. また「KAMS」の北側, 比較的近くに設置された「KAMN」の移動量が「KAMS」に比べてかなり小さかったことは, すべり域の北側のエッジを推定するのに貢献した. さらに, 福島県沖に設置された「FUKU」の移動量は宮城県沖に比べて小さく, 福島県沖以南で比較的すべりが小さかったことを示した. このように, 地震時の海底の動きは宮城県沖と福島県沖で大きなコントラストが見られたが, これは地震前のデータからも支持されている. Sato et al. (2013a) は, 東北地方太平洋沖

地震前のGNSS-A観測データを解析し, 地震前の地殻変動速度にも同様なコントラストがあったことを確認した (Fig. 3).

Watanabe et al. (2014) は, 地震後3年間のデータを取りまとめ, 大きなすべりが発生した領域の観測点が, 陸域の観測結果(地震時と同様の海溝向きの動き)とは真逆の方向(陸方向の動き)に, プレートの沈み込みよりも速い速度で動いていることを見出した (Fig. 4). 陸上の動きも含めたこの複雑な地震後地殻変動は, 定性的には以下のように解釈される. そもそも, 規模の大きな地震の後には, 地震時に生じた応力を緩和するプロセスが強く働くことにより, 地震前のプレート間カップリングによる変形とは異なる地殻変動(余効変動)が生じる. 余効変動のソースは, 主に以下の3つがあるとされる (e.g., Wang et al., 2012): (1) 主としてアセノスフェアが粘弾性的にふるまうことで応力を緩和する粘弾性緩和, (2) 地震時の破壊領域の周辺の断層でゆっくりとしたすべりが生じる余効すべり, (3) 地震時に変形した多孔質弾性体の中で間隙流体が移動するために生じる間隙弾性反発である. なお, (3)

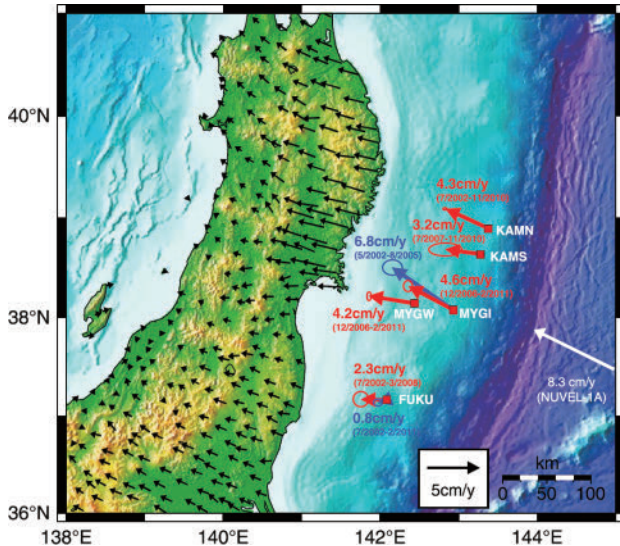


Fig. 3. Interseismic average velocity relative to the North American plate of the NUVEL-1A model (DeMets et al., 1994) detected at the seafloor GNSS-A sites (red and blue arrows represent velocities of different observation periods), the terrestrial GNSS sites (black arrows for GEONET sites provided by Nakagawa et al., 2009) and the Pacific plate in the NUVEL-1A model (white arrow) obtained before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (after Sato et al., 2013a).

図3. 2011年東北地方太平洋沖地震前の観測から得られた、NUVEL-1Aモデル(DeMets et al., 1994)の北米プレートに対する平均地殻変動速度(Sato et al., 2013aより)。赤及び青矢印はそれぞれ異なる期間で算出された海底の平均速度である。黒矢印と白矢印は国土地理院のGEONET観測点の平均速度(中川・他, 2009)及びNUVEL-1Aモデルにおける太平洋プレートの移動速度をそれぞれ示す。

間隙弾性反発の時定数は1か月程度であるとされ、GNSS-Aの観測タイムスケール(地震後最初の観測が本震後3-4週間後となった)に比べて短いためGNSS-A結果の解釈においては考慮していない。(2)余効すべりは、地震時のすべりと同じ向きのすべりが周辺の断層で生じるものであり、その弾性応答として得られる地表変位も地震時と同じ方向(この場合は海溝向き)となる。(1)粘弾性緩和は、地震後に複雑な地表変位を生じさせるソースで、大まかには、陸側プレート下

のマンテルウェッジと沈み込むプレート下のアセノスフェアのそれぞれが海溝向き及び陸向きの地表変動を駆動する。Watanabe et al. (2014)は、特に「MYGI」及び「KAMS」のGNSS-A観測で得た陸向きの動きがプレート収束速度より大きいことを踏まえ、沈み込むプレート下のアセノスフェアの粘弾性緩和が、地震時に大きな変位が生じたエリアの地震後地殻変動において支配的なソースであるとの結論を導いた。

こうした観測事実は、以降の地震後変動モデル研究の方向性を決定づけた。すなわち、地震後の地殻変動をモデル化するにあたっては、第一次近似的にも粘弾性の効果を考慮しなければならないことが強く認識された。実際に、Watanabe et al. (2014)以後の定量的な地震後変動モデルでは、粘弾性構造やレオロジーの複雑性に大きな違いはあるが、ほぼ必ず粘弾性の効果が考慮されている(e.g., Sun et al., 2014; Agata et al., 2019)。

日本海溝沿いの海域では、東北大学の研究チームもGNSS-A観測を実施しており、2012年以降は20観測点を設置してより詳細な地震後地殻変動の把握を進めている(Tomita et al., 2015, 2017; Honsho et al., 2019)。

2.2 南海トラフ沿いの観測成果

南海トラフ沿いの海域では、2000年代からは御前崎沖から室戸岬沖までの6地点で観測を実施してきた。Yokota et al. (2015)は、2011年東北地方太平洋沖地震前までのこれらの地点の観測結果を報告している。2011年度には、宮崎県沖までの海域に9地点の観測点を増設した。Yokota et al. (2016)は、2016年までにこれら計15地点で得られた測位結果から、4-10年間の平均的な地殻変動速度を算出した(Fig. 5a)。なお、東北地方太平洋沖地震の地震時及び地震後の変動は西南日本にも影響を及ぼしている。そのため、平均地殻変動速度の算出に当たっては、前節で述べた我々の日本海溝の観測成果を活用して作られた地殻変動数値モデル(Iinuma et al., 2012; Sun et al., 2014)による補正をすることで、フィリピン海プ

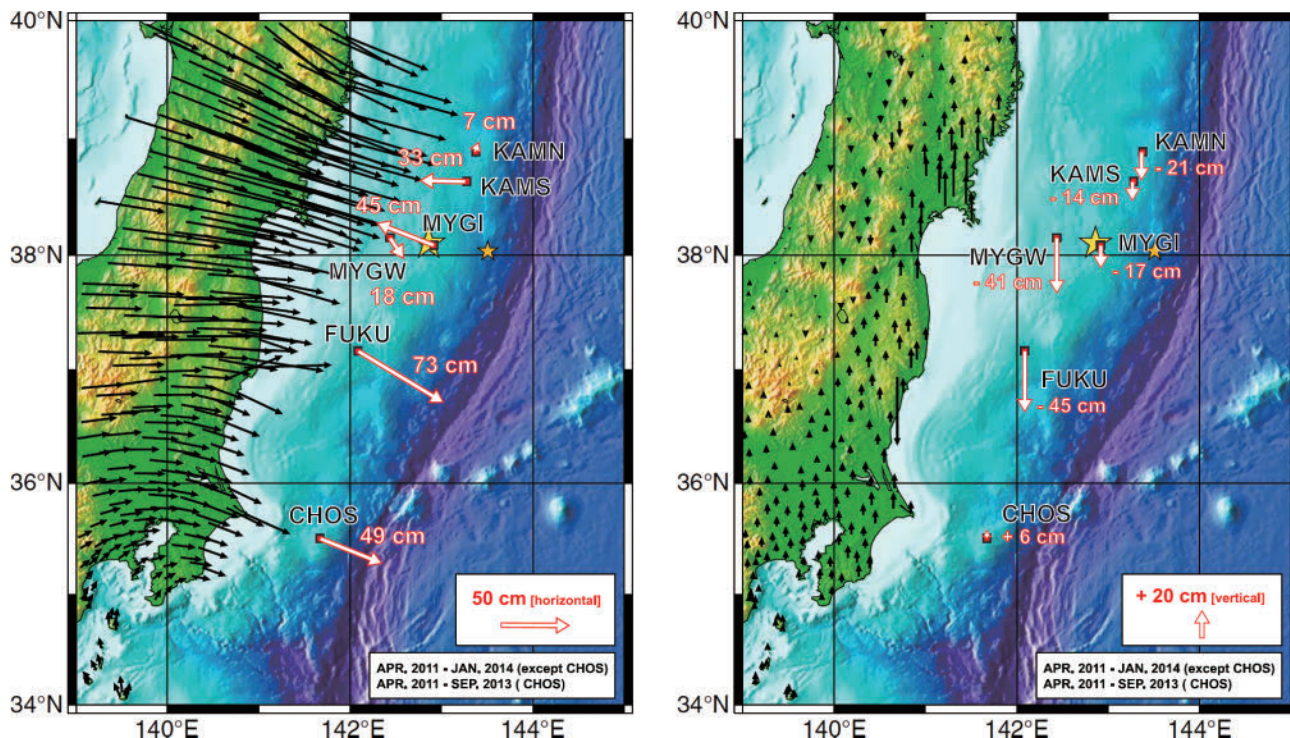


Fig. 4. Horizontal (left panel) and vertical (right panel) components of the cumulative displacements obtained after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake at the seafloor sites for the period from April 2011 to January 2014 (to September 2013 for CHOS) relative to the North American plate of NUVEL-1A (after Watanabe et al., 2014). Red and black arrows indicate the displacements at the seafloor GNSS-A sites and the GEONET sites (Nakagawa et al., 2009), respectively.

図 4. 2011 年東北地方太平洋沖地震後 2014 年 1 月までの観測で得られた、NUVEL-1A モデルの北米プレートに対する累積地殻変動の水平 (左) 及び鉛直 (右) 成分 (Watanabe et al., 2014 より). 赤矢印及び黒矢印は、それぞれ海底 GNSS-A 観測点及び陸上 GEONET 観測点 (中川・他, 2009) で得られた累積変位を示す。

プレート沈み込みの影響のみを考慮できるような形式とした。

こうして複数の地点で得られた面的な海底地殻変動速度データをもとに、Yokota et al. (2016) は、Yabuki and Matsu'ura (1992) の手法をバックスリップモデルとして適用し、プレート境界面上の平均的なすべり欠損速度分布を推定した (Fig. 5b)。GNSS-A 観測によって海底の測地データが得られたことで、それまでの解析では十分な空間解像度が得られなかった沖合のすべり欠損分布の詳細が判明した。この研究以後、プレート境界面の固着分布モデルでは海底測地データが重視されるようになり、テクトニックブロックの運動を含める等の精緻化が進んだ (e.g., Nishimura et al., 2018; Kimura et al., 2019)。さらに、Watanabe et al. (2018) は GNSS-A 観測成果の応

用例として、2004 年紀伊半島南東沖地震の影響も考慮したうえで、南海前弧スリバーに対する平均すべり欠損速度を算出し、その反発を励起源と仮定した津波の伝播を計算した。彼らは、プレート境界面モデルの不確定性にも着目し、その精緻化が GNSS-A 観測の結果を適切に議論する上で重要であることも指摘した。

上記はいずれも数年以上の時間スケールでの平均的な変位速度に基づく議論であるが、一般に地殻変動は経時的なゆらぎを持つ。そうした経時的現象のうち、プレート境界面上でゆっくりとしたすべりを生じるスロースリップに伴う地殻変動は、陸域の測地観測により検出されてきた (e.g., Ozawa et al., 2002)。スロースリップを含むスロー地震現象に関しては、2000 年代以降に様々な時定数の現象が検出されており、巨大地震発生域へ

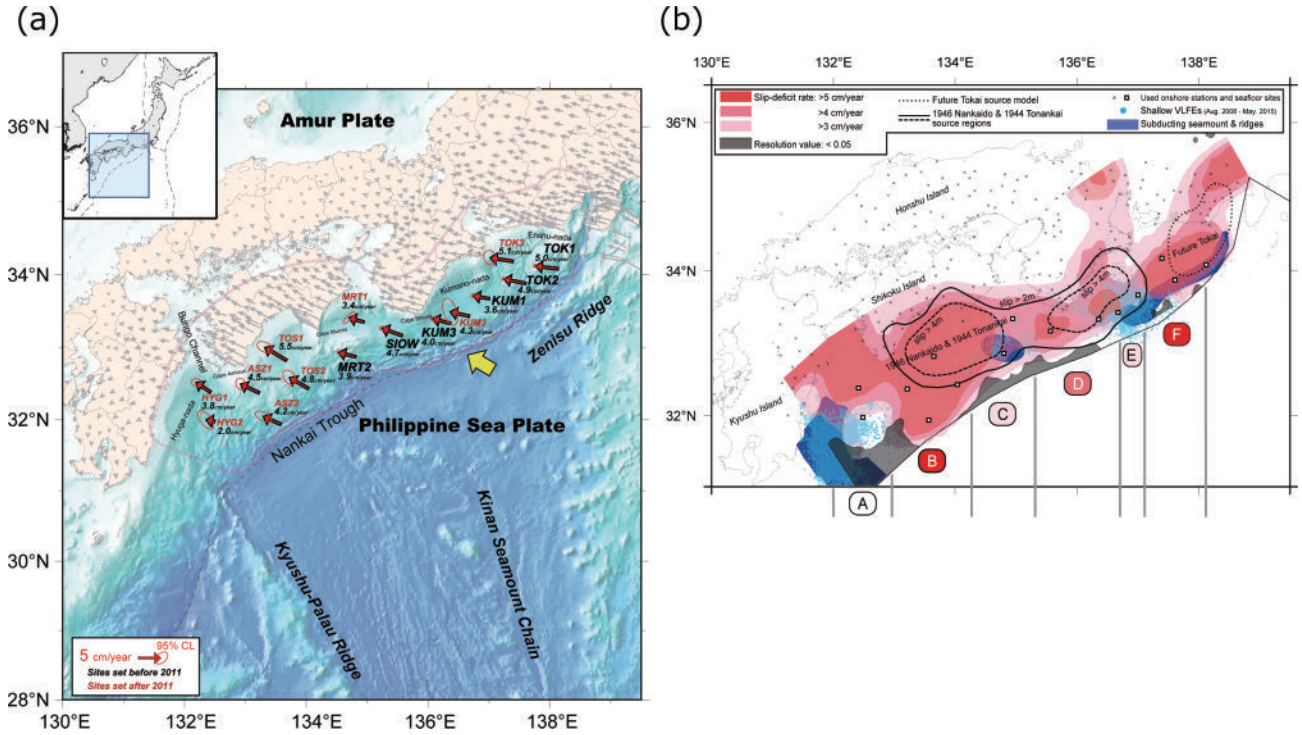


Fig. 5. (a) Interseismic average velocity along the Nankai Trough relative to the Amur plate of the MORVEL model (DeMets et al., 2010) detected at the seafloor GNSS-A sites (red arrows), the terrestrial GNSS sites (gray arrows for GEONET sites provided by Nakagawa et al., 2009) and the Philippine Sea plate in the MORVEL model (yellow arrow). (b) Interplate slip deficit rate distribution estimated from the terrestrial and seafloor geodetic data. Figures were adopted from Yokota et al. (2016).

図 5. (a) 南海トラフ沿いの、MORVEL モデル (DeMets et al., 2010) のアムールプレートに対する平均地殻変動速度. 赤矢印, 灰矢印, 黄矢印は, 海底 GNSS-A 観測点, 陸上 GEONET 観測点 (中川・他, 2009), 及び MORVEL モデルにおけるフィリピン海プレートの移動速度をそれぞれ示す. (b) 海陸地殻変動観測データから推定されたプレート間すべり欠損速度分布. 図は Yokota et al. (2016) による.

の応力载荷等の効果, 巨大地震との比較における発生メカニズムの類似性等の観点から研究が進められている (e.g., Obara and Kato, 2016). スロースリップ現象に伴う地殻変動を海底で捉えることを目的として, Yokota and Ishikawa (2020) は, GNSS-A 観測で得られた海底変位時系列について統計学的手法を用いて精査した. その結果, 複数の GNSS-A 観測点で海底地殻変動のゆらぎの検出に成功し, そのうち, 複数観測点において同時性が認められる 2017–2018 年の紀伊水道南方のイベントについては断層すべりモデルも推定した (Fig. 6).

上述のように, GNSS-A による海底での測地観測は多くの成果をあげてきたが, 特にプレートの沈み込みが生じる海溝軸あるいはトラフ軸の近傍

での観測は, いまだ十分ではない. この領域は, 地震発生時に特に巨大な津波の励起源となる可能性があるため, 重点的な観測が必要である. そこで, 2019 年度には御前崎沖から室戸岬沖にかけての南海トラフ軸近傍に計 4 点の観測点を新たに設置し, 観測を開始した (中村・他, 2019, Fig. 1b). これら新設点の平均速度については, 現状の観測頻度が維持されれば, 数年後には得られると期待される.

海上保安庁以外にも, 南海トラフ沿い及び駿河トラフ沿いの海域では, 名古屋大学のグループが継続して GNSS-A 観測を実施している (Tadokoro et al., 2012; Yasuda et al., 2014). 2013 年以降には, 志摩半島南方の南海トラフ軸周辺でも GNSS-A 観測を開始し, 2016 年までのデータか

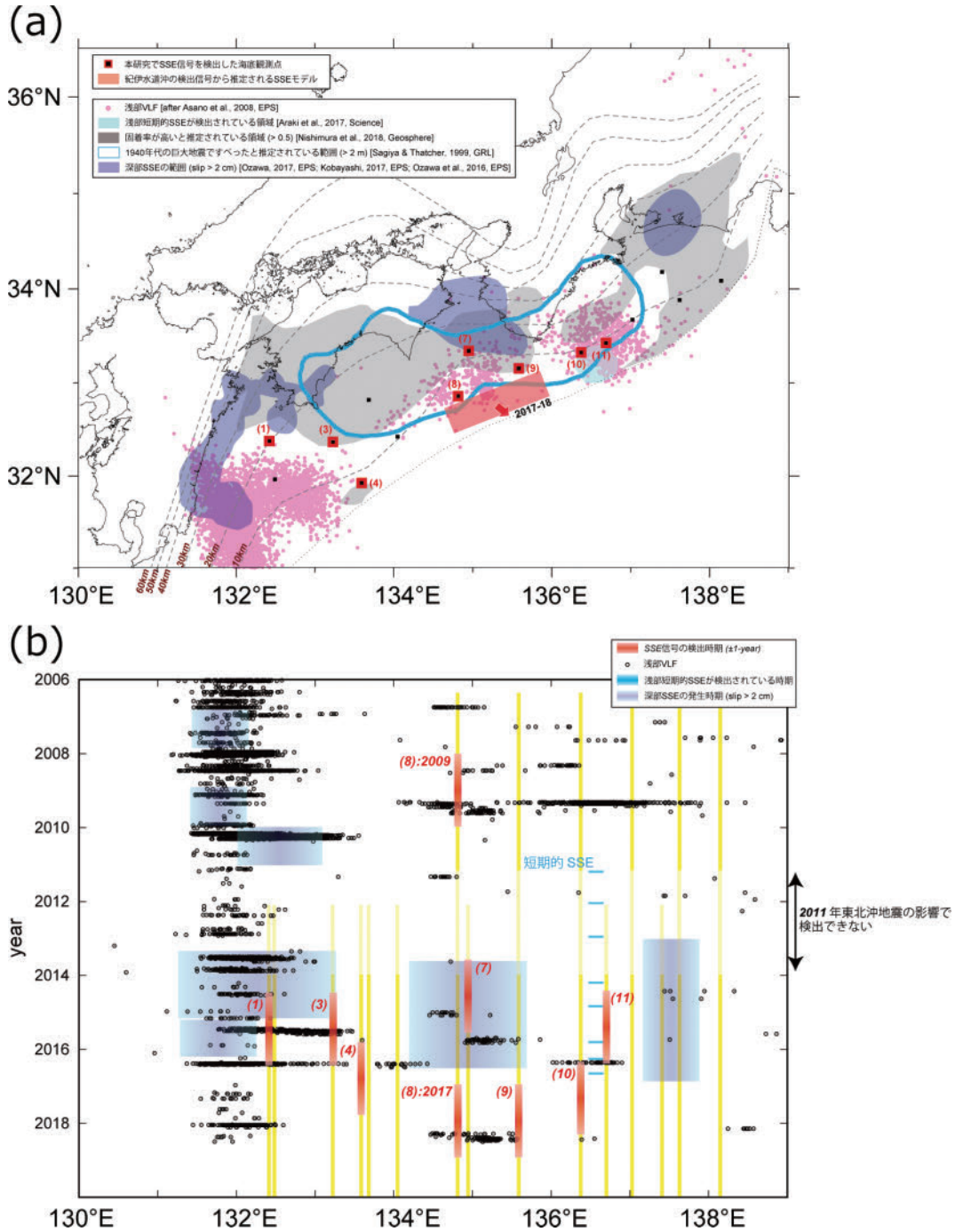


Fig. 6. (a) Spatial relationship between seafloor GNSS-A sites that detected SSE signals (red squares) and some phenomena along the Nankai Trough (see legends in the panel). Red rectangle and vector are the 2017–2018 Kii Channel shallow SSE model and slip angle, respectively, estimated by grid search when it was assumed to be due to a single SSE. (b) Shallow VLF time series compared with shallow and deep SSE timings (see legends in the panel). Red lines indicate the SSE timings detected at seafloor sites. Each yellow line indicates the longitude of the site. Figures were modified from Yokota and Ishikawa (2020).

図 6. (a) スロースリップによるシグナルを検出した海底 GNSS-A 観測点 (赤四角) と南海トラフ沿いの諸現象 (図中の凡例を参照) との空間的な関係. 紀伊水道南方の赤長方形と矢印は, グリッドサーチにより推定した 2017–2018 年の浅部スロースリップモデルとすべり角をそれぞれ示す. (b) 浅部 VLF と浅部及び深部スロースリップの時間的比較 (図中の凡例を参照). 赤線は GNSS-A 観測点で検出されたスロースリップの発生時期を示す. 黄線は, 海底観測点の経度を示す. 図は Yokota and Ishikawa (2020) を一部修正したものである.

ら、プレート境界浅部域の固着状況を推定している (Yasuda et al., 2017). また、係留ブイを用いた観測の技術開発も各研究グループによりなされており (Imano et al., 2019; Kinugasa et al., 2020; Tadokoro et al., 2020), 新たな観測技術開発の場にもなっている,

2.3 相模トラフ沿いの観測

日本海溝及び南海トラフ沿いの海域以外にも、相模トラフ沿いのフィリピン海プレート上に「SAGA」及び「BOSS」観測点を設置し、観測を実施している。フィリピン海プレート上でGNSS観測が可能な場所はほとんどが火山活動も活発な領域に限られているので、ローカルな影響から離れた海底での測地観測結果は、プレート運動モデルのバイアスを精査する上で貴重である。さらに、プレートの沈み込むトラフ近傍で観測すればプレートの沈み込む速度を直接測定できるので、プレート境界近傍でのプレート運動モデルの適用可能性を調べる上でも重要である。

Watanabe et al. (2015) は、「SAGA」及び「BOSS」観測点の動きを、陸上のGNSS観測から得られたテクトニックブロック運動モデルに関連付けて解釈した (Fig. 7). 「BOSS」の動きは、伊豆諸島を含む伊豆前弧ブロックがフィリピン海プレートとは異なる動きをしていることを示した Nishimura (2011) のモデルにおける伊豆前弧ブロックの剛体運動と整合的であり、同モデルの妥当性をサポートした。また、「SAGA」の動きについては、伊豆半島東方沖に伊豆前弧ブロックと伊豆マイクロプレートの境界が存在し、それらが50–80%程度カップリングをしているとして説明できることを示した。

3 技術開発

3.1 観測機器の開発・アップデート

本節では、海上保安庁のGNSS-A観測について、ハードウェア部分の開発状況について概観する。観測機器の変遷と観測頻度についてはIshikawa et al. (2020) に詳細にまとめられてい

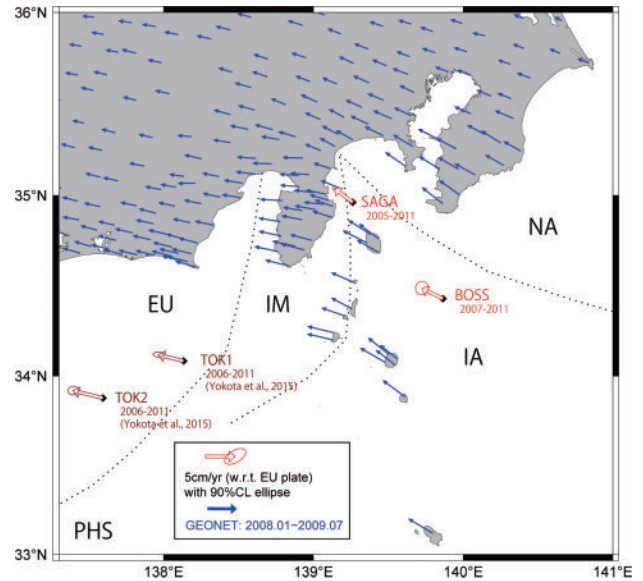
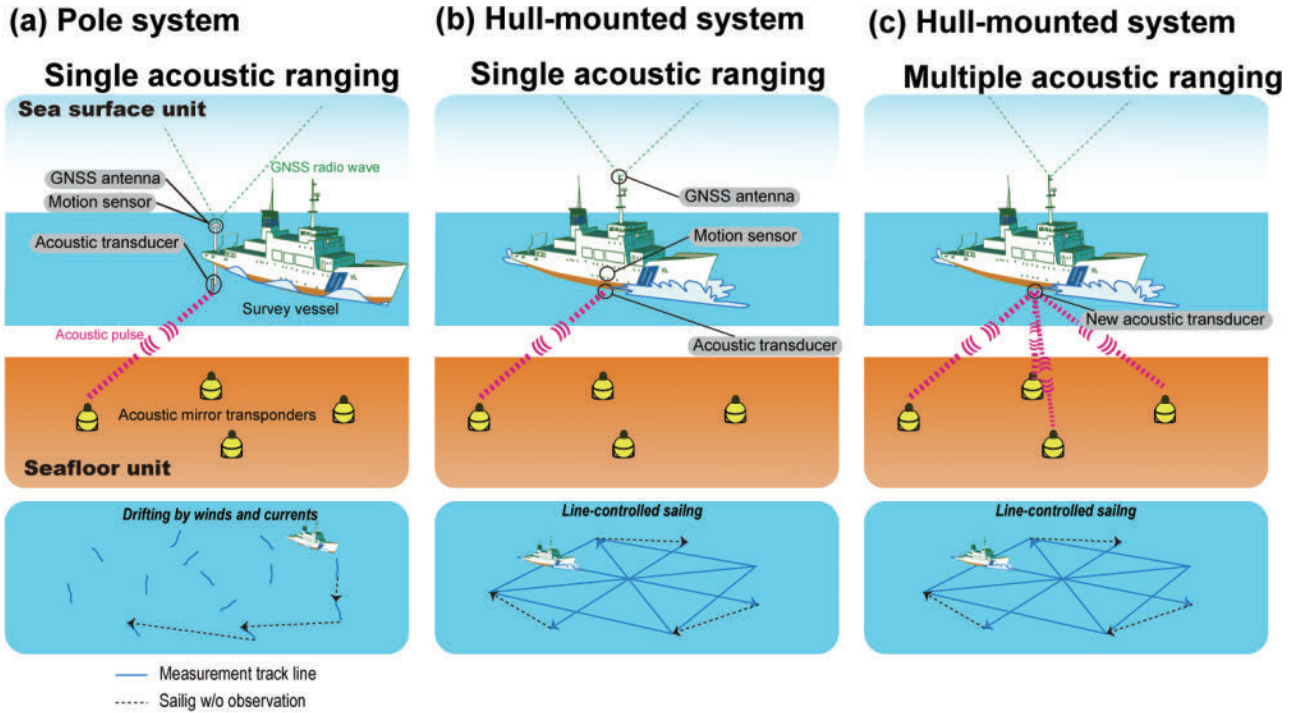


Fig. 7. Horizontal velocities relative to the Eurasian plate of the NUVEL-1A model obtained in the Kanto region before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake; red, brown, and blue arrows indicate the seafloor velocities estimated by Watanabe et al. (2015), by Yokota et al. (2015) and the terrestrial velocities at the GEONET sites (Nakagawa et al., 2009), respectively. Black dotted lines indicate the boundaries of the tectonic blocks. Figure was modified from Watanabe et al. (2015).

図7. 2011年東北地方太平洋沖地震前の観測から得られた、NUVEL-1Aモデルのユーラシアプレートに対する関東地方の水平変位速度。赤矢印、茶矢印、及び黒矢印は、それぞれWatanabe et al. (2015)で得られた海底速度、Yokota et al. (2015)で得られた速度、及び陸上GEONET観測点(中川・他, 2009)で得られた速度を示す。黒点線はテクトニックブロックの境界を示す。図はWatanabe et al. (2015)を一部修正したものである。

るが、特に音響トランスデューサに関する近年の技術開発はGNSS-A観測の効率化に直接寄与していることがわかる (Fig. 8).

そうした重要な技術開発の一つが、2008年に測量船「明洋」の船底にトランスデューサを設置した「船底装備」である (川井・他, 2009). この船底装備により、エンジンを止めての漂流観測から、任意の測線上を移動しながら観測する航走観測へと観測デザインが切り替えられた。これに



(d) Changes in observation frequency between 2000 and 2018 with changes to the observation system

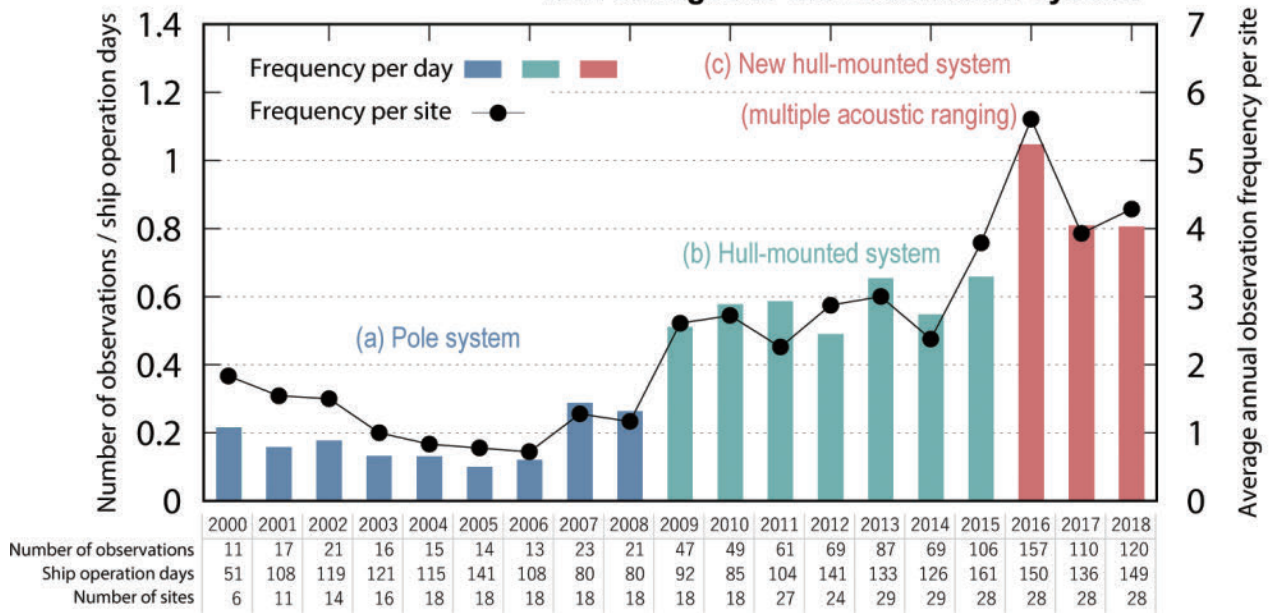


Fig. 8. History of the Japan Coast Guard’s GNSS-A observation system. (a) Schematic of the GNSS-A pole system. (b) Schematic of the GNSS-A hull-mounted system. (c) Schematic of the GNSS-A hull-mounted system with a new transducer for multiple acoustic ranging. (d) Changes in observation frequency between 2000 and 2018 with changes to the observation system. Figures were adopted from Ishikawa et al. (2020).

図 8. 海洋情報部で実施している GNSS-A 海底地殻変動観測システムの推移. (a) 支柱を用いた漂流観測, (b) 船底装備による航走観測, (c) マルチ測距技術を実装した航走観測の概念図. (d) 2000 年から 2018 年の観測頻度の推移. 図は Ishikawa et al. (2020) による.

より、幾何学的にバランスの取れた配置で比較的短時間にデータを収録することが可能となり、海底局位置と音速のバイアス誤差を軽減しやすくなった (Sato et al., 2013b)。以降、「拓洋」「海洋」「昭洋」にも船底トランスデューサがそれぞれ設置され (氏原・成田, 2012; 秋山・他, 2013; 秋山・横田, 2014), 観測体制が充実した。最近では 2019 年度に就役した測量船「平洋」にも設置されており (吉田・他, 2021), 2020 年度就役予定の「光洋」にも装備される予定である。

もう一つのトピックは、マルチ測距技術の開発と実装である (横田・奥村, 2015; 横田・他, 2017)。マルチ測距とは、従来、1 シーケンスの音響信号に一つの海底局への信号しか載せていなかったものを、複数の海底局への信号を連続的に送信できるようにしたものである。その実装により観測効率が向上し、18 日間で 28 点の観測を実施することが可能になった (松下・小池, 2018)。各観測点における観測所要時間が短くなれば海況の変化にも対応しやすくなり、観測計画が立てやすくなる点もメリットとしてあげられる。各観測点の観測頻度が上がれば、より時間分解能が高くなり、経時的な変動を捉えやすくなる。こうした技術開発は、特にスロースリップの検出 (Yokota and Ishikawa, 2020) において大いに貢献した。

3.2 解析技術の高度化

本節では、GNSS-A 解析技術の発展について概観する。GNSS-A は、GNSS による測量船位置測定と音響測距観測を組み合わせた観測技術であり、それぞれの要素技術ごとにも解決すべき課題と技術導入の目標がある。

2010 年代前半は、2000 年代後半に導入された海底局相対位置を全観測期間に亘って固定するアレイ固定手法 (松本・他, 2008) の評価が主に進められた (石川・佐藤, 2012; 秋山・渡邊, 2015)。アレイ固定手法による解析を実際に適用するにあたっては、海底局更新による重心位置の変化についても考慮する必要がある。氏原・他 (2013) は、海底局の更新時にも海底局の重心位

置を継続して引き継げるよう、新旧海底局アレイ全体の重心を参照点とする解析ストラテジを提案した。

GNSS 測位技術に関するトピックとしては、精密単独測位 (PPP; Zumberge et al., 1997) の導入が挙げられる。従来は、キネマティック GNSS 解析に長基線解析ソフトウェア IT (Interferometric Translocation; Colombo, 1998) version 4.2 を用いて、国土地理院の運用する電子基準点 (さらに以前には下里水路観測所の本土基準点) に対する位置を求めていた。Watanabe et al. (2017) は、実際に GNSS-A 観測時に取得された 2Hz GNSS データを用いて従来の基線解析と複数のソフトウェアでの PPP 結果を比較し、GNSS-A の精度においていずれも同等の安定性を示すことを確認した。そのうえで、渡邊・他 (2020d) は、PPP ソフトウェア RTKLIB v2.4.2 (Takasu, 2013) を用いて、異なる GNSS 解析手法が最終的な海底測位解に与える影響を調査し、PPP による GNSS-A 結果が基線解析によるものと同等の安定性をもつことを示した (Fig. 9)。加えて、PPP 解析に用いる衛星軌道情報及び時計補正情報として複数の GNSS プロダクトを比較し、現状の GNSS-A の観測精度では、5 秒と 30 秒の時計補正情報で大きな差が生じないこと、17–41 時間後に入手可能な速報暦を用いた場合にも、最終暦 (公開に 12–18 日を要する) を用いた場合に比べて測位結果が悪化しないことをそれぞれ確認した。GNSS-A 観測における PPP の実用性が示されたことを受け、2020 年度からはルーチン解析に採用されている。

次に、音響測距技術であるが、音響信号の往復走時を幾何学的距離に変換するためには、経路上の音速構造を適切に把握することが肝要である。我々の GNSS-A 観測手法では、複数の海上点からの音響往復走時を取得し、それらのデータを同時に満たすような音速プロファイルのリファレンスからの偏差分を、なめらかな時間の関数として推定している (解析ソフトウェア「SGOBS」; Fujita et al., 2006)。渡邊・内田 (2016) は、実際

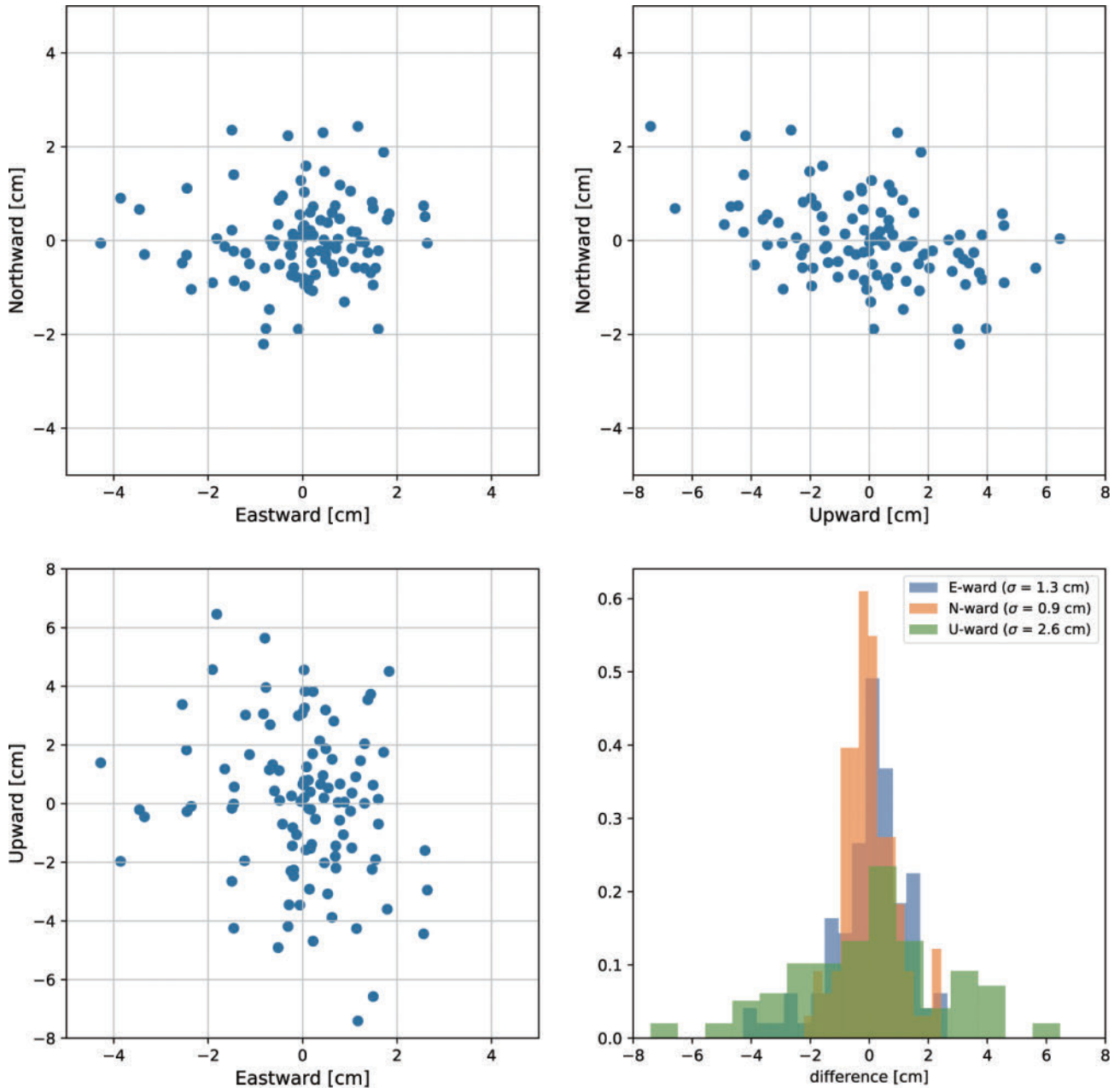


Fig. 9. Distributions of differences between the GNSS-A seafloor positions determined by using baseline solution and PPP solution for northward-eastward (top-left), northward-upward (top-right), and upward-eastward (bottom-left) components. Histograms of eastward (blue), northward (orange), and upward differences (green) are shown in the bottom-right panel (after Watanabe et al., 2020d).

図9. 基線解析とPPPによる測位結果を用いて得られたGNSS-A海底測位結果の偏差の分布(渡邊・他, 2020dより). 北一東(左上), 北一上(右上), 及び上一東(左下)成分を示す. 右下に東向き(青), 北向き(橙), 及び上向き(緑)の分布のヒストグラムを示す.

の観測海域で取得した水温プロファイル等から, 各観測点で取りうる音速の幅を調査した. その結果をもとに, 渡邊(2016)は, 解析に用いる音速初期値が海底局位置に与える影響を調べ, 特に上下成分との強い相関があることを確認した. 石川

(2019)はより詳細に初期音速依存性を調査し, 推定される局位置がある一定範囲の幅の中に収まることを見出した. この結果は, 得られた幅が観測システムの最小分解能であることを示唆する. 最終的に, 渡邊・他(2019)は, 音速と局位置を

同時に推定する解析プログラムを開発する過程で、初期音速値の局位置への依存性が消失することを発見した。その結果、解析プログラム「SGOBS」では位置と音速を交互に推定し、それぞれの推定の過程で外れ値を除去する操作をルーチン解析において導入していたためにバイアスのかかったデータの取捨が生じていたことが、初期音速依存性の原因であることがわかった。とはいえ、除去されるデータ数は必ずしも多くないため、初期音速依存性は少数のデータの結果に対する敏感さを示す例であるともいえる。この現象は、GNSS-A 解の性質を調べる上で重要であると思われるところ、今後も詳細な研究が求められる。

音速推定に関する重要な進展としては、空間的に勾配を持つ音速構造の抽出が挙げられる。従来の解析においては、音速は、水平成層を時間の関数としてのみ推定していた。しかし実際には、例えば黒潮流域などでは明らかに空間的に傾斜した構造が卓越する。こうした構造を想定すれば、同じ地点からの音響信号であっても、海底の数 km の領域に広がって設置されている海底局ごとに異なる音速値を適用する必要がある。Yokota et al. (2018b, 2019) は、従来の解析が終了した後の残差をさらに詳細に解析し、海底局位置に依存した音速変分量を抽出して補正する手法を開発し、測位精度を向上させた。抽出された音速構造は、海中の温度構造を反映しているとも考えられる。海底局位置に依存した音速変分量は、同じ海面位置から異なる海底局に対して発信された音線経路上の平均音速の差である。したがって、これは比較的深部の音速勾配に敏感なパラメータとして抽出される (Fig. 10a の V_2)。一方、従来の解析で時間とともに変化する量として抽出した音速変化は、ある音速勾配の上を測量船が移動することによって生じる見かけの音速変化とみなすことも可能である。この見方に立てば、観測データから比較的浅部の音速勾配に敏感なパラメータも抽出できる (Fig. 10a の V_1)。Yokota and Ishikawa (2019) 及び Yokota et al. (2020) は、それぞれ日

向灘及び紀伊水道南方で得た水温プロファイル及び数値海洋モデルと、推定された音速勾配パラメータを比較し、GNSS 気象学のアナロジーとしての GNSS-A 海洋学への発展の可能性を示した (Fig. 10b-d)。

Watanabe et al. (2020a) は、こうした成果をさらに発展させ、Fig. 10 (a) の V_1 及び V_2 といった音速勾配パラメータを陽にモデル化したうえで、経験ベイズ法に基づき、統計学的に適切なデータの取り扱いを導入することで、空間勾配も含めた海中音速摂動場の時間変化と海底局位置のすべてを同時に推定する手法を考案した (Fig. 11)。彼らは、この解析手法に基づく Python ベースの新たな解析ソフトウェア「GARPOS」(Watanabe et al., 2020b) を構築・公開した。GARPOS にはデータの入出力の合理化や複数モデルの並列計算も導入されており、観測回数の増加に伴い解析時間が長大になってきた従来の SGOBS の複数エポック一括解析 (松本・他, 2008) に比べて、ルーチン解析ベースで数 10 倍以上のスピードで計算を完了できるようになった。

ところで、そもそも解析においては測位精度を向上させることが重要な目的の一つであるが、測位精度の評価については、個々の観測エポック内でのデータのばらつきのみでは評価できず、エポック間のバイアスも含めて評価しなければならないことは常に念頭に置くべきである。こうした精度評価の客観性及び適切性を担保することは困難であるが、石川 (2016) は、基礎的な統計学の表現を用いて測位精度の評価指標を整理し、変位時系列の精度に関する議論の土台をつくった。観測デザインや解析手法に関する精度評価においては、疑似データを用いたシミュレーションも有効である。横田・他 (2016) は人工的にノイズを加えた疑似 GNSS-A データを生成するシミュレータを作成し、GNSS 誤差の伝播の様子やデータ量の影響について評価した。このシミュレータを用いて、Nakamura et al. (2021) は、海底局アレイと測線サイズの精度への影響を調べ、現在の観測デ

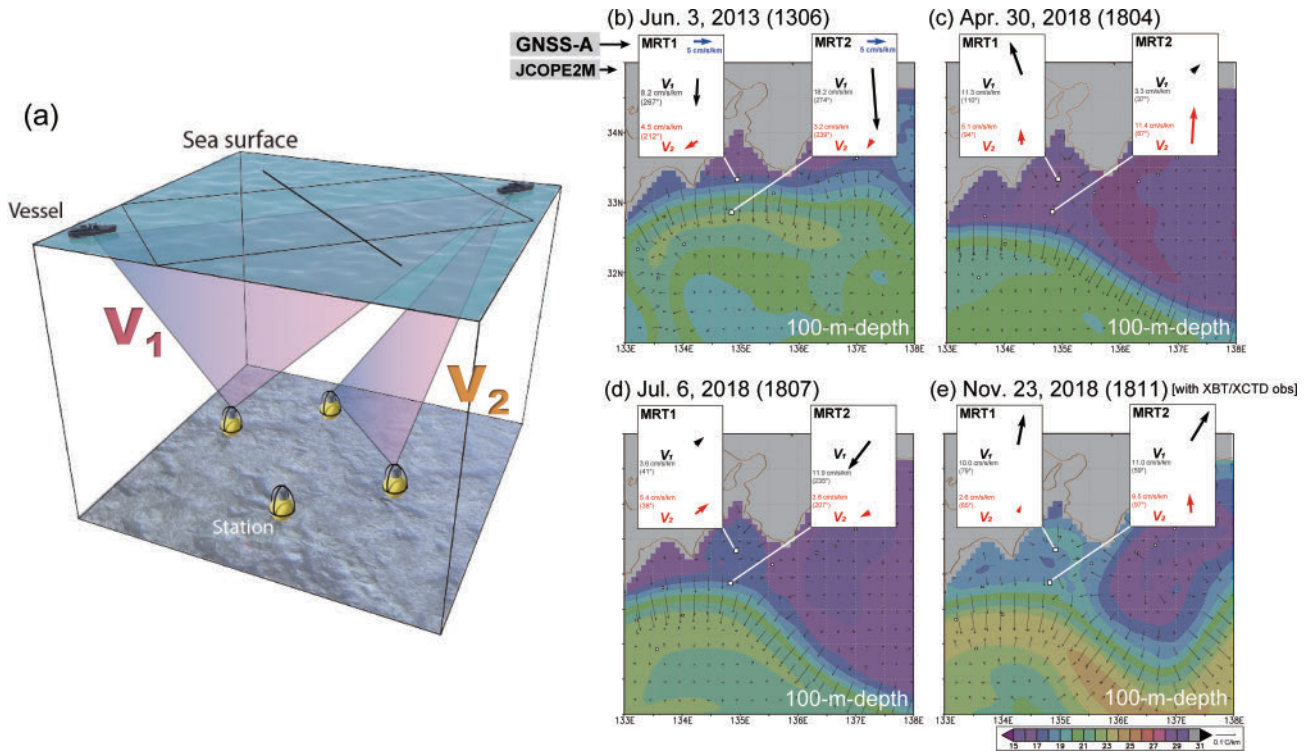


Fig. 10. (a) A schematic image of extracting gradient parameters of the sound speed structure. Gradient parameters V_1 (black arrows) and V_2 (red arrows) extracted from GNSS-A, and 100 m-depth temperature fields of the JCOPE2M reanalysis (Miyazawa et al., 2017, 2019) on observation dates, (b) June 3, 2013, (c) April 30, 2018, (d) July 6, 2018 and (e) November 23, 2018 for MRT1 and MRT2 sites (after Yokota et al., 2020).

図 10. (a) 音速勾配パラメータ抽出の概念図。GNSS-A 観測から抽出された音速勾配パラメータ V_1 (黒矢印) 及び V_2 (赤矢印), 並びに JCOPE2M 再解析データ (Miyazawa et al., 2017, 2019) による, 観測日の水深 100 m の水温。(b) 2013 年 6 月 3 日, (c) 2018 年 4 月 30 日, (d) 2018 年 7 月 6 日, 及び (e) 2018 年 11 月 23 日の MRT1 及び MRT2 観測点における結果。図は Yokota et al. (2020) による。

ザインが妥当であることを示した。

4 まとめと今後の展望

これまでに概観してきたように、観測成果においても技術の高度化においても、この 10 年間の進展は目覚ましいものであった。もちろん、これはそれ以前の、GNSS-A 観測の黎明期から継続して積み重ねられてきた成果の上に成り立ったものである (以前の技術開発等については、佐藤・藤田 (2012) のレビューを参照されたい)。特に、観測の初期には不可能だと言われていた海底でのセンチメートル測位が実現し、GNSS-A 観測が地震学・測地学の研究の方向性に影響を与えるまでになったのには、数多くの研究者・職員の努力はもちろんのこと、事業の持続性を担保するための職員育成も含めたシステム・制度設計が極めて重

要な役割を果たしたであろう。加えて、観測点維持のための海底局更新及びより詳細な地殻変動場を推定するための観測点の増設、並びにシブタイムの確保など、運用体制維持に関する努力があったことも忘れてはならない。

他方で、先のレビュー論文で指摘されつつも、いまだ実現していない課題もある。具体的には観測の自動化あるいはリアルタイム化であり、これが次に目指すべき技術開発の目標であろう。自動化については、自律的に海洋あるいは空中を航行するロボット技術の発展やコモディティ化が進み、開発の機運が高まっている。例えば、Chadwell (2016) は実際に自律型の海洋観測プラットフォーム Wave Glider を用いた GNSS-A 観測を実現した。セミリアルタイム化については、PPP の導入と、より軽快に動作する解析ソフト

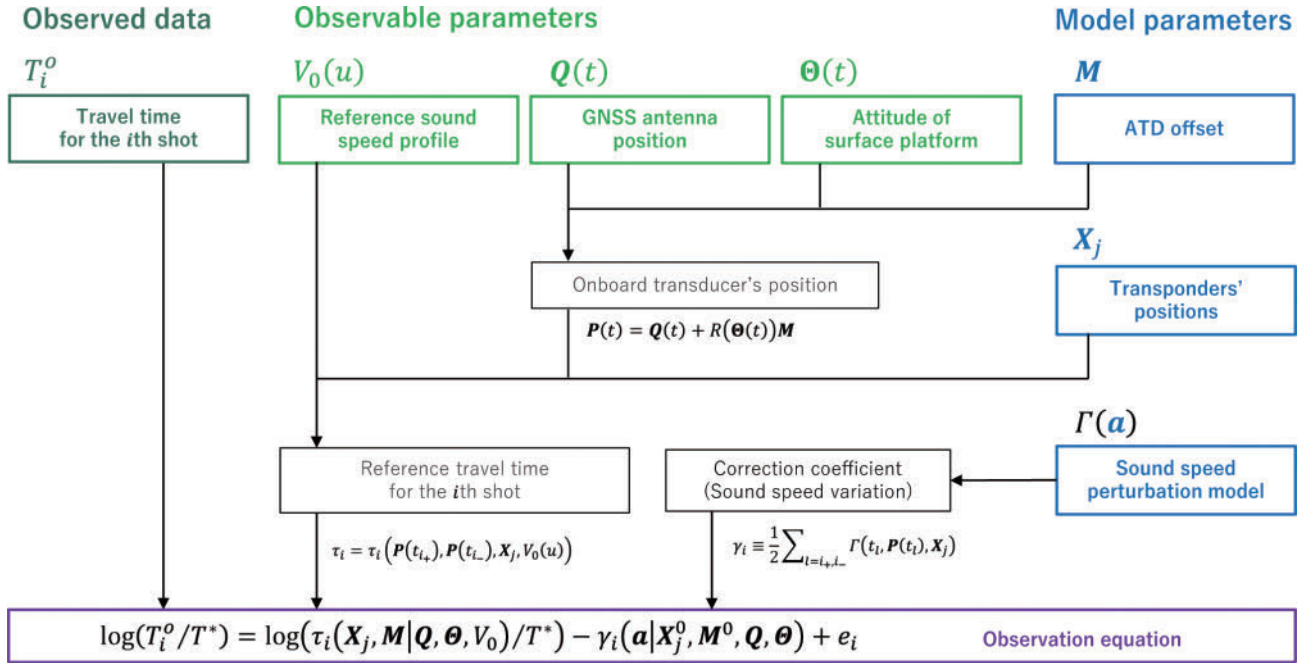


Fig. 11. Flow chart to construct the observation equation for the newly developed analysis method implemented in GARPOS (after Watanabe et al., 2020a).

図 11. 新たに開発した解析ソフトウェア GARPOS で用いる観測方程式を導出するためのフローチャート (Watanabe et al., 2020a より).

ウェア GARPOS の開発により、衛星通信等で GNSS 補正情報の入手さえ可能になれば船上で観測の 2-3 日後には測位解を得られるようになるまで進展している。このような観測機動性を高める技術が確立すれば、地震直後や異常な現象が発生した場合の緊急調査の速報性が著しく向上するため、社会的な影響も大きいと考えられる。

観測点のさらなる拡充も重要な課題であるといえる。日本海溝や南海トラフ沿いの観測網をさらに充実させることはもちろん、過去に地震が発生した記録のある南西諸島海溝 (e.g., Nakamura, 2009; 後藤, 2013) や千島海溝 (e.g., Tanioka et al., 2007; Ioki and Tanioka, 2016) 沿いの海域についても観測を広げていくことが求められる。これらの海域については、南西諸島海溝については名古屋大学を中心とした研究グループ (Tadokoro et al., 2018) が、千島海溝沿いには北海道大学と東北大学を中心とした研究グループ (北海道大学・東北大学, 2019) が、それぞれ GNSS-A 観測を実施しているので、そうした先行研究で得られ

た知見を活かしながら拡充を進めていくことが望ましい。

最後に、オープンサイエンスに関する話題にも触れておきたい。オープンサイエンスという語については厳密に定義されているものではないが、林 (2018) は、暫定的に「ICT によるデジタル化とネットワーク化された情報基盤およびその基盤が開放する多量で多様な情報を様々に活用して科学研究を変容させる活動であり、産業を含む社会を変え、科学と社会の関係も変える活動」とまとめている。学術研究側からの具体的な活動としては、学術雑誌論文のオープンアクセス化、査読前論文のプレプリントサーバーへの掲載、研究データ・ソフトウェアの適切な管理・保存・共有・公開といった動きが挙げられる。特にグローバル測地データに関しては、GGOS (全球統合測地観測システム) の下にデータ DOI (デジタルオブジェクト識別子) 作業部会が 2019 年に設置され、測地データに特有の事情を考慮したうえでのデータ管理のあり方についての議論が始まった。

我々の GNSS-A 観測に関しても、近年、こうし

た思想に基づく試みがなされはじめた。具体的には、GNSS-A 時系列データへの DOI の付与及びデータ論文の執筆 (Yokota et al., 2018a), 解析ソフトウェア GARPOS の公開と DOI の付与 (Watanabe et al., 2020b), また、測地データインバージョンソフトウェア YM1992 (オリジナルは Yabuki and Matsu'ura, 1992) の公開と DOI の付与 (Watanabe et al., 2020c) が挙げられる。今後は、GNSS-A の取得データ (音響走時とその時点の船位情報など) を適切な形で公開していくことを目指している。こうしたオープンサイエンスの取り組みは、我々の海底地殻変動観測データの科学的貢献を可視化してプレゼンスを高めるだけでなく、観測・解析の両面において多くの研究者・学生の参入を促し、分野全体の発展にもつながると期待される。

海上保安庁のこれまでの業績は、まさに GNSS-A 観測の発展の礎を築いてきたものであるといえる。今後は海外の研究機関を含め世界的な広がりを見せていくであろうことも踏まえ、フロントランナーとしてさらなる発展を目指し、まだ数多く存在する課題に地道に取り組んでいくことが重要であろう。

謝 辞

海上保安庁における海底地殻変動観測の運用及び技術開発は、歴代の海洋防災調査室職員、測量船「平洋」, 「昭洋」, 「拓洋」, 「明洋」, 及び「海洋」乗組員をはじめ、多くの方々の協力の下に実施されてきました。船舶位置の基線解析においては、陸上基準点データとして、国土地理院の電子基準点データを提供していただいています。また、GNSS-A 観測の技術開発は、東京大学生産技術研究所と協力して実施しています。原稿の作成に当たっては、匿名の査読者並びに石川直史氏及び中村優斗氏に有用な助言をいただきました。

文 献

Agata R., S. Barbot, K. Fujita, M. Hyodo, T. Iinuma, R. Nakata, T. Ichimura, and T. Horii (2019)

Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake, *Nature Commun.*, 10, 1385, doi:10.1038/s41467-019-08984-7.

秋山裕平・氏原直人・大門 肇 (2013) 測量船「海洋」への海底地殻変動観測装置の設置, 海洋情報部研究報告, 50, 91-96.

秋山裕平・横田裕輔 (2014) 測量船「昭洋」への海底地殻変動観測装置の設置, 海洋情報部研究報告, 51, 106-112.

秋山裕平・渡邊俊一 (2015) 海底地殻変動観測における重心推定法の効果についての考察, 海洋情報部研究報告, 52, 88-96.

浅田 昭・矢吹哲一郎 (2000) 海底音響基準ネット, 生産研究, 52, 293-296.

Chadwell, C. D. (2016) Campaign-style GPS-Acoustic with wave gliders and permanent seafloor benchmarks, *Proceedings of the Subduction Zone Observatory Workshop*, Boise Center, Boise, ID, Sep. 29-Oct. 1 2016, Boise, ID.

Colombo, O. L. (1998) Long range kinematic GPS, in *GPS for Geodesy*, 2nd Edition, edited by P. J. E. Teunissen and A. Kleusberg, Springer, pp. 537-568.

DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein (1994) Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2191-2194, doi:10.1029/94GL02118.

DeMets, C., R. G. Gordon, and D. F. Argus (2010) Geologically current plate motions, *Geophys. J. Int.*, 181, 1-80, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x.

藤田雅之 (2006) GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測～海上保安庁の取り組み (レビュー)～, 海洋情報部研究報告, 42, 1-14.

Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y.

- Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo (2006) GPS/acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, 58, 265–275, doi:10.1186/BF03351923.
- 後藤和彦 (2013) 1911年に喜界島近海で発生した巨大地震の震源位置の再評価, *地震*, 65, 3, 231–242, doi:10.4294/zisin.65.231.
- 林 和弘 (2018) オープンサイエンスの進展とシチズンサイエンスから共創型研究への発展, *学術の動向*, 23, [11], 12–29, doi:10.5363/tits.23.11_12.
- 北海道大学・東北大学 (2019) プレスリリース：千島海溝南部での海底地殻変動観測を開始～地震津波災害軽減への貢献に期待～, https://www2.sci.hokudai.ac.jp/faculty/wp/wp-content/uploads/2019/07/190708_pr2.pdf, 参照 2020年9月16日.
- Honsho, C., M. Kido, F. Tomita, and N. Uchida (2019) Offshore postseismic deformation of the 2011 Tohoku earthquake revisited: Application of an improved GPS-acoustic positioning method considering horizontal gradient of sound speed structure, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 124, 5990–6009, doi:10.1029/2018JB017135.
- Ide, S., A. Baltay, and G. Beroza (2011) Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, 332, 1426–1429, doi:10.1126/science.1207020.
- Iinuma, T., R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto, and S. Miura (2012) Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 117, B07409. doi:10.1029/2012JB009186.
- Imano, M., M. Kido, C. Honsho, Y. Ohta, N. Takahashi, T. Fukuda, H. Ochi, and R. Hino (2019) Assessment of directional accuracy of GNSS-Acoustic measurement using a slackly moored buoy, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 6, 56, doi:10.1186/s40645-019-0302-1.
- Ioki, K. and Y. Tanioka (2016) Re-estimated fault model of the 17th century great earthquake off Hokkaido using tsunami deposit data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 433, 133–138, doi:10.1016/j.epsl.2015.10.009.
- 石川直史・佐藤まりこ (2012) 海底地殻変動観測における重心推定法の評価, *海洋情報部研究報告*, 48, 74–84.
- 石川直史 (2016) 海底地殻変動観測の統計的な精度評価手法, *海洋情報部研究報告*, 53, 45–56.
- 石川直史 (2019) GNSS-A 測位における測位解と音速変化の関係, *海洋情報部研究報告*, 57, 120–129.
- Ishikawa, T., Y. Yokota, S. Watanabe, and Y. Nakamura (2020) History of on-board equipment improvement for GNSS-A observation with focus on observation frequency, *Front. Earth Sci.*, 8:150, doi:10.3389/feart.2020.00150.
- 川井仁一・浅倉宜矢・松本良浩 (2009) 測量船「明洋」への海底地殻変動観測用送受波器の船底装備について, *海洋情報部技報*, 27, 50–55.
- 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, L24303, doi:10.1029/2011GL050057.
- Kimura, H., K. Tadokoro, and T. Ito (2019) Interplate coupling distribution along the Nankai Trough in southwest Japan estimated from the block motion model based on onshore GNSS and seafloor GNSS/A observations, *J. Geophys. Res.*, 124, 6140–

- 6164, doi:10.1029/2018JB016159.
- Kinugasa, N., K. Tadokoro, T. Kato, and Y. Terada (2020) Estimation of temporal and spatial variation of sound speed in ocean from GNSS-A measurements for observation using moored buoy, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 7, 21, doi:10.1186/s40645-020-00331-5.
- 松下 優・小池未空時 (2018) 海底局マルチ測距手法による海底地殻変動観測の効率化, *海洋情報部研究報告*, 56, 46-49.
- 松本良浩・藤田雅之・石川直史 (2008) 海底地殻変動観測における複数エポック一括局位置解析手法の導入, *海洋情報部技報*, 26, 16-22.
- Miyazawa, Y., S. M. Varlamov, T. Miyama, X. T. Guo, T. Hihara, K. Kiyomatsu, M. Kachi, Y. Kurihara, and H. Murakami (2017) Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three dimensional variational scheme, *Ocean Dyn.*, 67, 713-728, doi:10.1007/s10236-017-1056-1.
- Miyazawa, Y., A. Kuwano-Yoshida, T. Doi, T. Nishikawa, T. Narazaki, T. Fukuoka, and K. Sato (2019) Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the Kuroshio-Oyashio Confluence region, *Ocean Dyn.*, 69, 267-282, doi:10.1007/s10236-018-1238-5.
- 中川弘之・豊福隆史・小谷京湖・宮原伐折羅・岩下知真子・川元智司・畑中雄樹・宗包浩志・石本正芳・湯通堂亨・石倉信広・菅原安宏 (2009) GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第4版) によるルーチン解析システムの構築について, *国土地理院時報*, 118, 1-8.
- Nakamura, M. (2009) Fault model of the 1771 Yaeyama earthquake along the Ryukyu Trench estimated from the devastating tsunami, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19307, doi:10.1029/2009GL039730.
- Nakamura, Y., Y. Yokota, T. Ishikawa, and S. Watanabe (2021) Optimal transponder array and survey line configurations for GNSS-A observation evaluated by numerical simulation, *Front. Earth Sci.*, doi:10.3389/feart.2021.600993 (accepted).
- 中村優斗・石川直史・渡邊俊一・横田裕輔 (2019) 南海トラフ海域への GNSS-A 観測点の増設による測地インバージョン解析の分解能の事前評価, *日本測地学会第132回講演会*.
- Nishimura, T. (2011) Back-arc spreading of the northern Izu-Ogasawara (Bonin) Islands arc clarified by GPS data, *Tectonophysics*, 512, 60-67, doi:10.1016/j.tecto.2011.09.022.
- Nishimura, T., Y. Yokota, K. Tadokoro, and T. Ochi (2018) Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, *Geosphere*, 14, [2], 535-551, doi:10.1130/GES01529.1.
- Obara, K. and A. Kato (2016) Connecting slow earthquakes to huge earthquakes, *Science*, 353, 253-257, doi:10.1126/science.aaf1512.
- Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yari, and T. Nishimura (2002) Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan, *Science*, 298, 1009-1012, doi:10.1126/science.1076780.
- 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, doi:10.1126/science.1207401.
- 佐藤まりこ・藤田雅之 (2012) GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測技術の進展, *海洋情報部研究報告*, 48, 26-40.
- Sato, M., M. Fujita, Y. Matsumoto, T. Ishikawa, H.

- Saitou, M. Mochizuki, and A. Asada (2013a) Interplate coupling off northeastern Japan before the 2011 Tohoku-oki earthquake, inferred from seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 1–10, doi:10.1002/jgrb.50275.
- Sato, M., M. Fujita, Y. Matsumoto, H. Saito, T. Ishikawa, and T. Asakura (2013b) Improvement of GPS/acoustic seafloor positioning precision through controlling the ship's track line, *J. Geod.*, 87, 825–842, doi:10.1007/s00190-013-0649-9.
- Spiess, F. N., C. D. Chadwell, J. A. Hildebrand, L. E. Young, G. H. Percell Jr., and H. Dragert (1998) Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 108, 101–112, doi:10.1016/S0031-9201(98)00089-2.
- Sun, T., K. Wang, T. Iinuma, R. Hino, J. He, H. Fujimoto, M. Kido, Y. Osada, S. Miura, Y. Ohta, and Y. Hu (2014) Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Nature*, 514, 84–87, doi:10.1038/nature13778.
- Tadokoro, K., R. Ikuta, T. Watanabe, M. Ando, T. Okuda, S. Nagai, K. Yasuda, and T. Sakata (2012) Interseismic seafloor crustal deformation immediately above the source region of anticipated megathrust earthquake along the Nankai Trough, Japan, *Geophys. Res. Lett.* 39, L10306, doi:10.1029/2012GL051696.
- Tadokoro, K., M. Nakamura, M. Ando, H. Kimura, T. Watanabe, and K. Matsuhira (2018) Interplate coupling state at the Nansei-Shoto (Ryukyu) Trench, Japan, deduced from seafloor crustal deformation measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 6869–6877, doi:10.1029/2018GL078655.
- Tadokoro, K., N. Kinugasa, T. Kato, Y. Terada, and K. Matsuhira (2020) A Marine-Buoy-Mounted System for Continuous and Real-Time Measurement of Seafloor Crustal Deformation, *Front. Earth Sci.*, 8:123, doi: 10.3389/feart.2020.00123.
- Takasu, T. (2013) RTKLIB Ver. 2.4.2: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, <http://www.rtklib.com/>.
- Tanioka, Y., K. Satake, and K. Hirata (2007) Recurrence of recent large earthquakes along the southernmost Kurile-Kamchatka Subduction Zone, in *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region*, doi:10.1029/172GM13.
- Tomita, F., M. Kido, Y. Osada, R. Hino, Y. Ohta, and T. Iinuma (2015) First measurement of the displacement rate of the Pacific Plate near the Japan Trench after the 2011 Tohoku-Oki earthquake using GPS/acoustic technique, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 8391–8397, doi:10.1002/2015GL065746.
- Tomita, F., M. Kido, Y. Ohta, T. Iinuma, and R. Hino (2017) Along-trench variation in seafloor displacements after the 2011 Tohoku earthquake, *Sci. Adv.*, 3, e1700113, doi:10.1126/sciadv.1700113.
- 氏原直人・成田誉孝 (2012) 測量船「拓洋」への海底地殻変動観測装置設置について (速報), *海洋情報部研究報告*, 48, 85–90.
- 氏原直人・佐藤まりこ・石川直史・渡邊俊一 (2013) 海底基準局の更新に係る時系列連続性確保のための新しい解析方法, *海洋情報部研究報告*, 50, 84–90.
- Wang, K., Y. Hu, and J. He (2012) Deformation cycles of subduction earthquake in a viscoelastic Earth, *Nature*, 484, 327–332, doi:10.1038/nature11032.
- Watanabe, S., M. Sato, M. Fujita, T. Ishikawa, Y. Yokota, N. Ujihara, and A. Asada (2014) Evidence of viscoelastic deformation following

- the 2011 Tohoku-oki earthquake revealed from seafloor geodetic observation, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5789–5796, doi:10.1002/2014GL061134.
- Watanabe, S., T. Ishikawa, and Y. Yokota (2015) Non-volcanic crustal movements of the northernmost Philippine Sea plate detected by the GPS-acoustic seafloor positioning, *Earth Planets Space*, 67, 184, doi:10.1186/s40623-015-0352-6.
- 渡邊俊一・内田 徹 (2016) 日本沿岸西太平洋海域における同一海域での海中水温・塩分プロフィールの時間的安定性の検証, 海洋情報部研究報告, 53, 57–81.
- 渡邊俊一 (2016) 海底局位置決定における海中音速構造の影響と初期値依存性についての考察, 海洋情報部研究報告, 53, 82–89.
- Watanabe, S., Y. Bock, C. D. Chadwell, P. Fang, and J. Geng (2017) Long-term stability of the kinematic precise point positioning for the sea surface observation unit compared with the baseline analysis, *Rep. of Hydrogr. Oceanogr. Res.*, 54, 38–73.
- Watanabe, S., Y. Bock, D. Melgar, and K. Tadokoro (2018) Tsunami scenarios based on interseismic models along the Nankai Trough, Japan from seafloor and onshore geodesy, *J. Geophys. Res.*, 123, 2448–2461, doi:10.1002/2017JB014799.
- 渡邊俊一・石川直史・横田裕輔・中村優斗 (2019) GNSS-A 海底地殻変動観測における海中音速と海底局位置の相関に関する考察, 日本測地学会第 132 回講演会.
- Watanabe, S., T. Ishikawa, Y. Yokota, and Y. Nakamura (2020a) GARPOS: Analysis software for the GNSS-A seafloor positioning with simultaneous estimation of sound speed structure, *Front. Earth Sci.*, 8:597532, doi:10.3389/feart.2020.597532.
- Watanabe, S., T. Ishikawa, Y. Yokota, and Y. Nakamura (2020b) GARPOS v0.1.0: Analysis tool for GNSS-Acoustic seafloor positioning (Version 0.1.0), Zenodo, doi:10.5281/zenodo.3992688.
- Watanabe, S., Y. Yokota, Y. Nakamura, and T. Yabuki (2020c) YM1992: Geodetic data inversion tool (Version v1.0.0), Zenodo, doi:10.5281/zenodo.3984875.
- 渡邊俊一・横田裕輔・石川直史 (2020d) キネマティック精密単独測位を用いた GNSS-A 海底測位の精度検証, 測地学会誌, 66, 1–7, doi:10.11366/sokuchi.66.1.
- 矢吹哲一朗 (2002) 海底地殻変動観測を目指した音響技術開発, 水路部研究報告, 38, 47–58.
- Yabuki, T. and M. Matsu'ura (1992) A geodetic data inversion using a Bayesian information criterion for spatial distribution of fault slip, *Geophys. J. Int.*, 109, 363–375, doi:10.1111/j.1365-246X.1992.tb00102.x.
- Yasuda, K., K. Tadokoro, R. Ikuta, T. Watanabe, S. Nagai, T. Okuda, C. Fujii, and K. Sayanagi (2014) Interplate locking condition derived from seafloor geodetic data at the northernmost part of the Suruga Trough, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5806–5812, doi:10.1002/2014GL060945.
- Yasuda, K., K. Tadokoro, S. Taniguchi, H. Kimura, and K. Matsuhira (2017) Interplate locking condition derived from seafloor geodetic observation in the shallowest subduction segment at the Central Nankai Trough, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 3572–3579, doi:10.1002/2017GL072918.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, M. Sato, S. Watanabe, H. Saito, N. Ujihara, Y. Matsumoto, S. Toyama, M. Fujita, T. Yabuki, M. Mochizuki, and A. Asada (2015) Heterogeneous interplate coupling along the Nankai Trough, Japan, detected by GPS-acoustic seafloor geodetic observation, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 2, 10,

- doi:10.1186/s40645-015-0040-y.
横田裕輔・奥村雅之 (2015) 海底局マルチ測距手法による海底地殻変動観測の効率化に向けた検討, 海洋情報部研究報告, 52, 79-87.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada (2016) Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, 534, 374-377, doi:10.1038/nature17632.
- 横田裕輔・田代俊治・石川直史・渡邊俊一 (2016) 海底地殻変動観測シミュレータの開発, 海洋情報部研究報告, 53, 90-97.
- 横田裕輔・田代俊治・下村広樹 (2017) 海底局マルチ測距手法の実装, 海洋情報部研究報告, 54, 32-37.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, and S. Watanabe (2018a) Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations, *Sci. Data*, 5, 180182, doi:10.1038/sdata.2018.182.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, and S. Watanabe (2018b) Analytical approach for the precise GNSS-A seafloor geodetic observation: Extraction of ocean disturbance effect, *OCEANS/Techno ocean 2018*, doi:10.1109/OCEANSKOBE.2018.8559190.
- Yokota, Y. and T. Ishikawa (2019) Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS A oceanography: GNSS A as a sensor for detecting sound speed gradient, *SN Appl. Sci.*, 1, 693, doi:10.1007/s42452-019-0699-6.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, and S. Watanabe (2019) Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS-A oceanography, *Marine Geophys. Res.*, 40, [4], 493-504, doi:10.1007/s11001-018-9362-7.
- Yokota, Y. and T. Ishikawa (2020) Shallow slow slip events along the Nankai Trough detected by the GNSS-A, *Sci. Adv.*, 6, eaay5786, doi:10.1126/sciadv.aay5786.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, and Y. Nakamura (2020) Kilometer-scale sound speed structure that affects GNSS-A observation: Case study off the Kii Channel, *Front. Earth Sci.*, 8:331, doi:10.3389/feart.2020.00331.
- 吉田 茂・渡邊俊一・橋本友寿・中村優斗 (2021) 測量船「平洋」への海底地殻変動観測装置の設置, 海洋情報部研究報告, 59, 178-189.
- Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, 102 (B3), 5005-5017, doi:10.1029/96JB03860.

要 旨

海上保安庁海洋情報部が20年にわたり開発及び運用を継続してきたGNSS-音響測距結合方式(GNSS-A)による海底地殻変動観測は、この10年の間に数多くの重要な科学的成果を報告してきた。例えば、東北地方太平洋沖地震の地震前・地震時・地震後地殻変動や南海トラフ沿いのプレート境界固着に伴う地殻変動の時空間的な揺らぎを直接的に検出した成果は、現在、プレート境界型地震の研究を進める上で無視することのできないデータとなっている。また、この10年で観測の効率化・合理化や観測体制の拡充が進んだことで各観測点での観測頻度が向上しただけでなく、新たな解析技術の開発により海洋場の適切な推定が可能となるなど、観測精度も向上した。こうした発展は、海底地殻変動観測業務へのリソースの持続的な投入により実現しているが、さらにGNSS-A研究を発展させることを目指し、オープンサイエンスの取り組みにも着手している。