

C会場 | 一般セッション：S03. 地殻変動・GNSS・重力

■ 2019年9月16日(月) 14:45 ~ 15:45 | ㊦ C会場 総合研究8号館NSホール

[S03]PM-2

座長:福島 洋(東北大学災害科学国際研究所)、渡邊 俊一(海上保安庁海洋情報部)

14:45 ~ 15:00

[S03-10] 千島海溝南西部根室沖における海底測地観測網の構築

*太田 雄策¹、木戸 元之²、東 龍介¹、佐藤 真樹子¹、鈴木 秀市¹、山本 龍典¹、高橋 秀暢¹、木村 友季保¹、大塚 英人¹、本荘 千枝¹、日野 亮太¹、大園 真子³、岡田 和見³、青田 裕樹³、高橋 浩晃³、篠原 雅尚⁴、富田 史章⁵、金松 敏也⁵、シヨン カンシー⁵、飯沼 卓史⁵ (1. 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター、2. 東北大学災害科学国際研究所、3. 北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センター、4. 東京大学地震研究所、5. 海洋研究開発機構)

15:00 ~ 15:15

[S03-11] ウェイブライダーを用いたGNSS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測 (序報)

*飯沼 卓史¹、木戸 元之²、太田 雄策³、福田 達也¹、富田 史章¹、植木 巖¹ (1. 海洋研究開発機構、2. 東北大学災害科学国際研究所、3. 東北大学大学院理学研究科)

15:15 ~ 15:30

[S03-12] 現在のGNSS-A観測網のSSE検出能力の評価

*横田 裕輔¹、石川 直史² (1. 東京大学生産技術研究所、2. 海上保安庁海洋情報部)

15:30 ~ 15:45

[S03-13] GNSS-A海底地殻変動観測一次処理データフォーマットの作成と活用

*渡邊 俊一¹、石川 直史¹、横田 裕輔²、中村 優斗¹ (1. 海上保安庁海洋情報部、2. 東京大学生産技術研究所)

千島海溝南西部根室沖における海底測地観測網の構築

Construction of the sea-floor geodesy network in Nemuro-Oki, the southwestern part of the Kuril Trench

*太田 雄策¹、木戸 元之²、東 龍介¹、佐藤 真樹子¹、鈴木 秀市¹、山本 龍典¹、高橋 秀暢¹、木村 友季保¹、大塚 英人¹、本荘 千枝¹、日野 亮太¹、大園 真子³、岡田 和見³、青田 裕樹³、高橋 浩晃³、篠原 雅尚⁴、富田 史章⁵、金松 敏也⁵、シヨン カンシー⁵、飯沼 卓史⁵

*Yusaku Ohta¹, Motoyuki Kido², Ryosuke Azuma¹, Makiko Sato¹, Syuichi Suzuki¹, Ryusuke Yamamoto¹, Hidenobu Takahashi¹, Yukiho Kimura¹, Hideto Otsuka¹, Chie Honsho¹, Ryota Hino¹, Mako Ohzono³, Kazumi Okada³, Yuki Aota³, Hiroaki Takahashi³, Shinohara Masanao⁴, Fumiaki Tomita⁵, Toshiya Kanamatsu⁵, Kan-Hsi Hsiung⁵, Takeshi Inuma⁵

1. 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター、2. 東北大学災害科学国際研究所、3. 北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センター、4. 東京大学地震研究所、5. 海洋研究開発機構

1. RCPEVE, Graduate School of Science, Took University, 2. IRIDeS, Tohoku University, 3. ISV, Hokkaido University, 4. ERI, University of Tokyo, 5. JAMSTEC

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0, 以下東北沖地震)ではGNSS-音響結合方式(以下, GNSS-A)や、海底水圧計による海底地殻変動観測によって、プレート境界の深さ十数km以浅で50mを超える大きな断層すべりが生じていたこと、さらにその断層すべりが海溝軸まで到達していたことが高い確度で明らかになった。こうしたプレート境界浅部での大すべりを規定する要因をさまざまな側面から理解することは、超巨大地震の発生様式の理解を深める上で重要であり、特に他の地域における超巨大地震との比較研究を行うことは地震の多様性理解のために必須である。

千島海溝は、日本海溝と同じ太平洋プレートが沈み込む場であり、M8クラスの巨大地震が十勝沖や根室沖といった各セグメントで繰り返し発生している。一方、津波堆積物の分布等から、17世紀に、十勝・根室沖の両セグメントを破壊し、さらにプレート境界浅部で大きなすべりが生じるような巨大地震が発生していた可能性が指摘され、そのすべり様式の2011年東北沖地震との類似性が示唆されている (Ioki and Tanioka, 2016)。

こうした観点から、東北大学と北海道大学では、千島海溝根室沖における現在のプレート間固着の実測を目指した海底測地観測網の整備を共同で実施した。具体的には2019年7月に実施された東北海洋生態系調査研究船「新青丸」の共同利用航海KS-19-12航海において、3箇所(GNSS-A観測点および1箇所の海底間音響測距(ADM)観測点)の設置を行った。

本航海では併せて、ピストンコアを用いた採泥による乱泥流堆積物調査を2箇所で行った。また、海底水圧計の長期ドリフトの除去を目的とした自己校正機能付きの海底水圧観測システムのプロトタイプ機の動作実証試験を行った。さらに、日本海溝-千島海溝会合部の地震・微動活動を把握することを目的とし、自己浮上式海底地震計5台の設置も実施している。またウェーブライダーによる長期自律的GNSS-A観測のための試験観測も実施した(飯沼・他, 本大会)。

図にKS-19-12観測において根室沖に新設したGNSS-A観測点、ADM観測点等の観測点分布を示す。GNSS-A観測点は、海溝軸に直交する方向に3観測点を新設した。そのうちの2点は陸側斜面に設置し、1点は沈み込む太平洋プレートの移動速度の実測を目的として、海溝軸よりも南側に設置した。各観測点は3局もしくは4局のトランスポンダーによって構成され、設置後に新青丸の船底トランスデューサーを用いた移動観測による各トランスポンダー位置の計測および、各アレイの初期位置推定のための定点観測を実施した。

ADM観測点は、海溝軸を跨いで3海底局を設置し、うち2局は沈み込む太平洋プレート上に、1局を陸側斜面に設置した。ADMでは、海底局間で音線のパスが通る必要があるため、あらかじめ予定した箇所に正確に設置する必要がある。そのためウィンチで観測装置を吊り下げ、潮流の影響が少ない深度で切り離すことによって、予定した箇所に正確に設置を行った。設置後、船上から単発の測距指示を行い、ADM海底局間で、相互に測距に成功していることを確認した。

今後、GNSS-A観測点については、1年に1回程度の頻度で繰り返し観測を行い、特にプレート境界浅部における固着について明らかにすることを目指す。ADM観測点については、2年間程度の連続観測によって、プレート境界最浅部におけるひずみ蓄積の定量評価を目指す。発表では、より詳細な観測内容等および、現時点までに得られているデータの暫定的な解析結果等について報告する予定である。

謝辞：本研究の一部は、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）の支援を受けて行われました。またKS-19-12航海の実施において、東北海洋生態系調査研究船「新青丸」の乗組員には多くの支援を頂きました。深く感謝いたします。

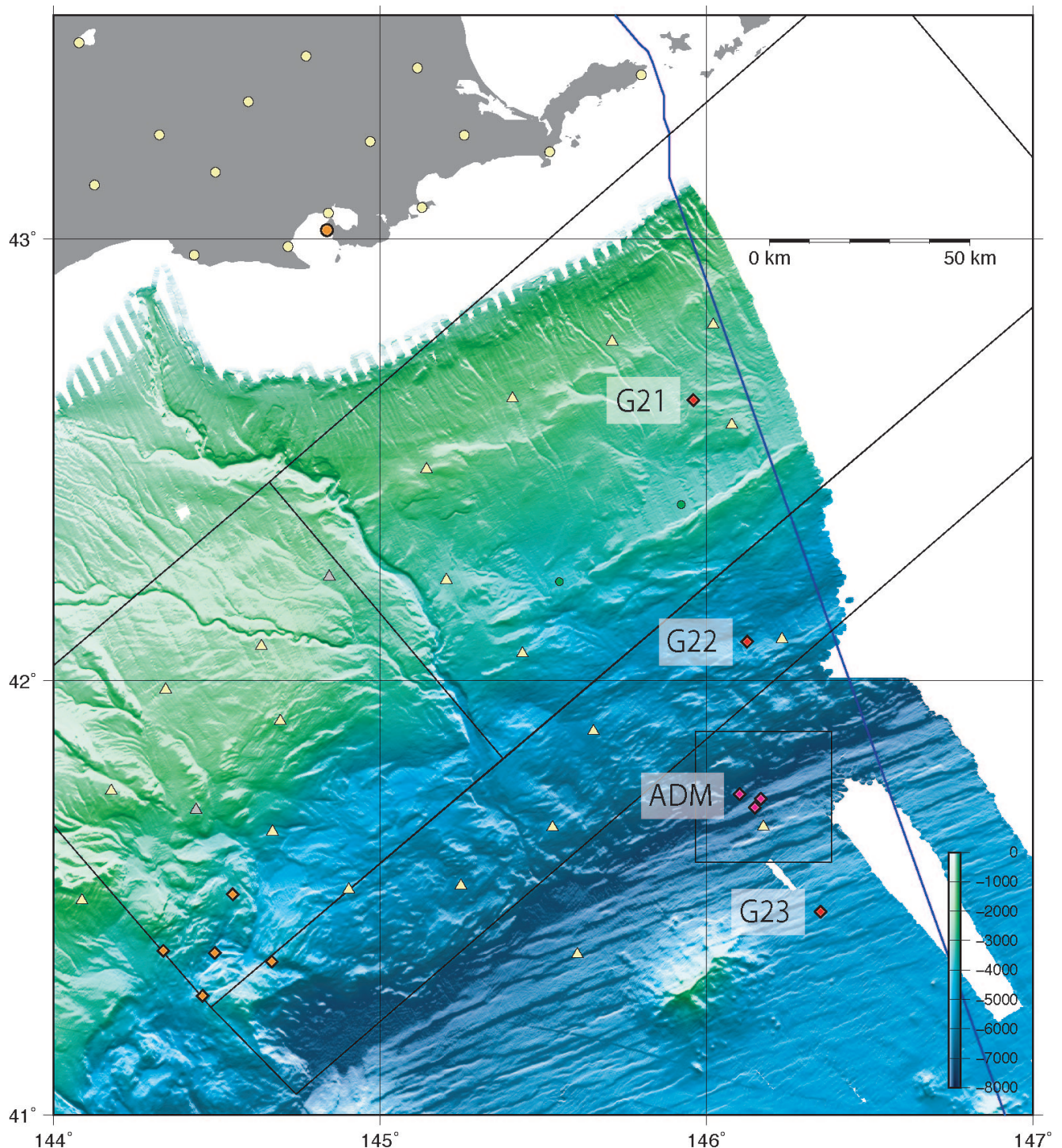


図:KS-19-12航海で設置したGNSS-A観測点およびADM観測点の分布図. 赤ひし形が新設GNSS-A観測点, ピンク色のひし形がADM観測点をそれぞれ示す. 図中の黒矩形はloki and Tanioka (2016)で示された十勝・根室連動型地震の断層面を示す. 黄色三角形はS-net, 黄色丸はGEONET, オレンジ色の丸印がGNSS-A観測における陸上基準GNSS観測点をそれぞれ示す.

ウェーブライダーを用いたGNSS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測（序報）

Preliminary Report of the GNSS-Acoustic Observation Using the Wave Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation

*飯沼 卓史¹、木戸 元之²、太田 雄策³、福田 達也¹、富田 史章¹、植木 巖¹

*Takeshi Iinuma¹, Motoyuki Kido², Yusaku Ohta³, Tatsuya Fukuda¹, Fumiaki Tomita¹, Iwao Ueki¹

1. 海洋研究開発機構、2. 東北大学災害科学国際研究所、3. 東北大学大学院理学研究科

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Graduate School of Science, Tohoku University

近年、GNSS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測（以下、GNSS-A観測）によって、プレート間の固着や地震時すべりによる地殻変動が海底で捉えられるようになってきた。しかしながら、GNSS-A観測の実施には、海上でのGNSS測位、及び、海底トランスポンダーとの間の音響測距を行うための海上プラットフォームが必要であり、これまででもっぱら船舶もしくは船舶の制御下にあるブイが用いられてきたが、有人船舶の必要性が、観測の高頻度化に限界を設けるとともに、観測実施コストの低廉化を妨げてしまっているのが現状である。これに対し、海底地殻変動観測点の直上に係留されたブイを用いてGNSS-A観測を行うことによって、リアルタイムに海底地殻変動の検出を行うための技術開発が進められているが、日本近海だけでも現在60点を超えている海底地殻変動観測点すべてにブイを設置するには膨大な費用が必要となる。そこで、海洋研究開発機構と東北大学では、多数の観測点におけるGNSS-A観測の高頻度化を達成すべく、無人機を用いた長期自律的GNSS-A観測を実施するための技術開発に共同で取り組むこととし、2019年7月に実施されたKS-19-12航海において、ウェーブライダーを用いたGNSS-A観測を試験的に行った。

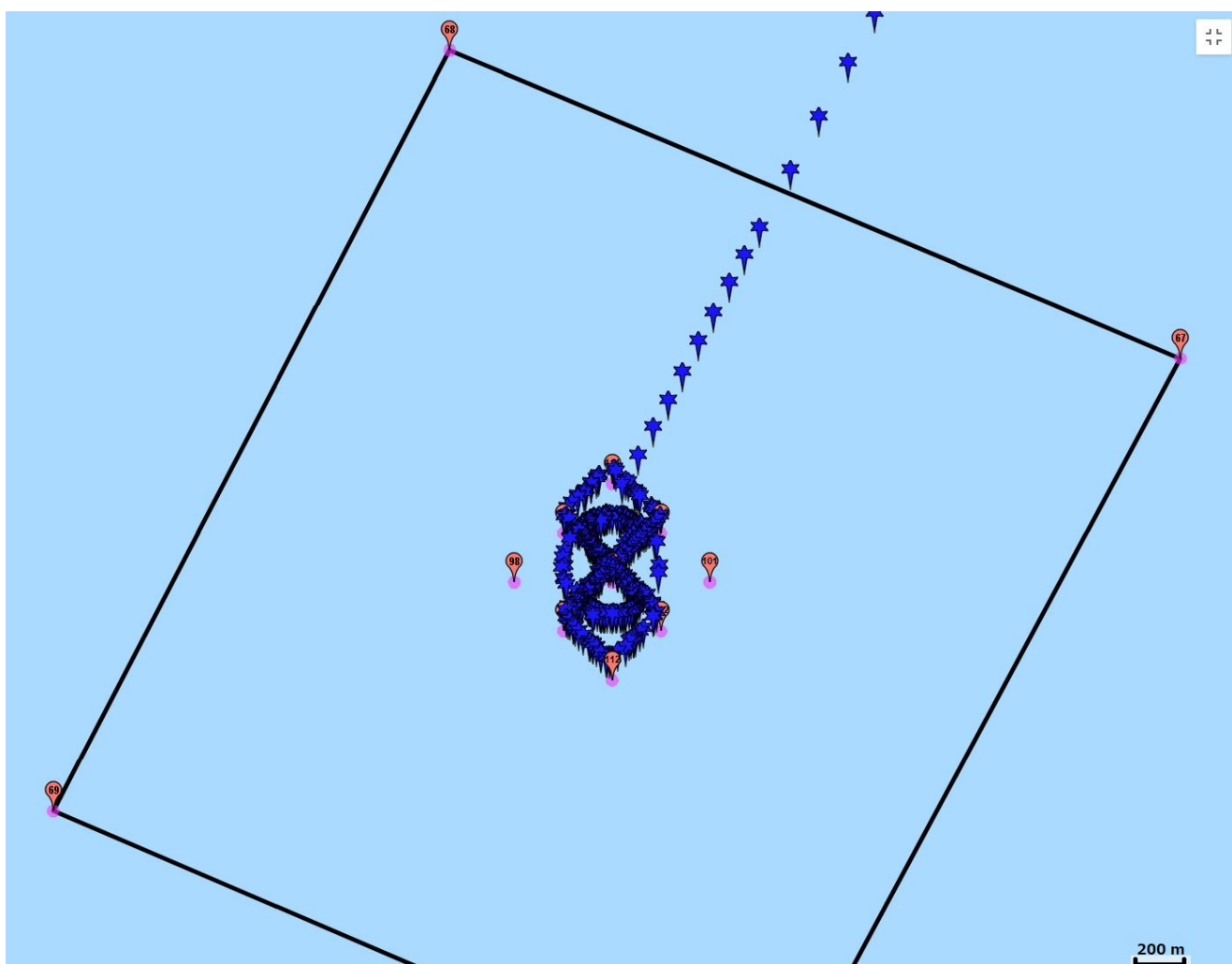
ウェーブライダーは洋上に浮かぶフロート部と水中のグライダー部から構成される。太陽光発電による電力によって制御を行い、波浪によるフロート及びグライダーの上下動を推進力に変えて自律的に航行する無人観測プラットフォームである。燃料を必要としないため長期間の洋上運用が可能であるとともに、観測点における定点保持や海底局アレイ内での移動観測、観測点間の移動やAIS搭載船舶との衝突回避といった運動を自動的に行うことができる。衛星通信を介して陸上からのミッション管理が可能であり、内部ペイロードの電源のオン・オフや航路の設定が随時可能である。今回は以下の点を目標としてシステムの開発を行い、試験観測を実海域で実施した。

1. 海底地殻変動観測点において、
 - (ア) フロート上に設置したGNSSアンテナ及びフロート内のジャイロからのデータを取得すること
 - (イ) 各観測点に設置されている海底トランスポンダーを起動させること
 - (ウ) 十数時間のあいだ、一定時間間隔で音響測距信号を発信し、各トランスポンダーからの音響測距信号を受信し、記録すること
2. 海底地殻変動観測点間を自律的に移動し、観測点においては設定された範囲内にとどまること

2019年7月3日から13日にかけて行われた、東北海洋生態系調査研究船「新青丸」の共同利用航海（KS-19-12）において、関連機材を搭載したウェーブライダーを用いた試験観測を実施した。東北大学が青森県沖に設置したG02観測点において投入してGNSS-A観測を開始し、終了後は岩手県沖に設置されたG03観測点に移動させてGNSS-A観測を実施する、という計画のもとに各種設定を行った。結果として、海況に恵まれず、G03観測点への移動及びそこでの観測を断念せざるを得なかったが、G02観測点での観測、並びに、十勝沖の海底地震計設置点への移動によって、前述の目標を達成することができた。図にG02観測点におけるウェーブライダーの航跡を示す。外側の黒実線の四角形は各海底局を頂点としており、中心定点付近に設定された地点を通る8の字もしくは半径200mほどの円形の航路をほとんど外れることなく辿っていたことが良く

分かる。取得したデータについては現在解析中であり、秋季大会当日においては、暫定的な解析結果についても報告する予定である。

謝辞：本研究の一部は文科省科研費26109007の助成を受けて行われました。また、ウェーブグライダーの整備及び運用に際してご尽力・ご協力いただいた、株式会社マリン・ワーク・ジャパンの長濱徹哉氏，藤井信宏氏，松永浩志氏及び横田牧人氏，並びに，東北海洋生態系調査研究船「新青丸」の乗組員及びKS-19-12航海乗船研究者各位に深く感謝いたします。



現在のGNSS-A観測網のSSE検出能力の評価

Validation of SSE detection capability of the present GNSS-A observation network

*横田 裕輔¹、石川 直史²

*Yusuke Yokota¹, Tadashi Ishikawa²

1. 東京大学生産技術研究所、2. 海上保安庁海洋情報部

1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard

GNSS-音響測距結合方式(GNSS-A)による海底地殻変動観測技術は長期的スケールにおける海底の精密な地殻変動場を連続的に検出することができる唯一の観測技術である。これまでに、東北沖地震の巨大な地殻変動場、その余効変動場、南海トラフ沿いや南西諸島海溝沿いの固着状態などのきわめて重要な地震学的知見を提供しており、地震学において重要な役割を持っている。

近年、GNSS-Aは観測システムの高度化と洗練、解析システムの開発が進み、cmオーダーの観測精度で年スケールの地殻変動場を検出できるようになった。たとえば、観測頻度を向上させるための音響システム開発やシミュレーション研究、海中音速構造の複雑性の理解とその検出などが進められた。2019年時点では、地点によって違いが大きいものの、頻度は4-10回/年、精度は1.5-2.5 cm (1- σ)を達成している。これにより、従来は捉えられなかった非地震性の海底地殻変動場のある程度の感度で検知することが可能となった。

2018年までの観測結果には、南海トラフ沿いのいくつかの観測地点で非地震性の地殻変動と考えられる信号が見られており、かなり明瞭なものから不明瞭なものまで観測点や時期によってさまざまな信号が得られている。そこで、Nishimura et al. [2013, JGR]を参考にc-AIC [Akaike, 1974, IEEE TAC; Sugiura, 1976, CSTM]を用いた識別方法によって、これらの信号の分析を行い、豊後水道沖、紀伊水道沖、熊野灘沖の3領域について非地震性の地殻変動は統計的に尤もらしく、SSEによるものと推定されることがわかっている。

これらの信号は数多くあるはずのSSEによる地殻変動のうち巨大な信号のみが検出されていると考えられる。今後、観測網の整備、他の観測手法による結果との議論や検出の可否の議論を行っていく上では、GNSS-A観測網のSSE検出能力を適切に把握しておく必要がある。本稿では、疑似データによる数値試験と実際のデータに対する統計検定の結果から、海底地殻変動場の検出能力についての評価を行う。

現状のGNSS-A観測網において、最高の精度が達成されている場合における観測感度を疑似データによる試験で調査した。疑似データは現在の観測能力に合わせて数値的に誤差を与えて生成する。得られた1000ケースほどの疑似データに対して、c-AICによる識別を行い、地殻変動を含むかどうかを検定していく。その結果からは、4-5 cm程度の地殻変動を検知することはできるが、それ以下の場合、誤検知率や空振り率が高くなってしまふことが示された。またいくつかの時定数の地殻変動を含む疑似データに対してモデルによる時定数の推定精度を調査したところ、時定数の決定精度が低いことも示された。これは現在の観測頻度が隔月程度であることが主な原因と考えられる。

合わせて、それぞれの観測点の個別の感度検証も行った。観測点ごとの時系列データから、いくつかのデータを省いて地殻変動の有無を検定した時の各パラメータの決定精度を検証した。この時、省いたデータが多くなっても地殻変動に関する推定パラメータが安定している場合は高感度の観測地点、データの除去により簡単に推定パラメータが不安定になる場合は低感度の観測地点である。この検証により、たとえばASZ1(足摺岬の沖合)とHYG1(日向灘の沖合)の2点を比較すると、ASZ1がより不安定であることがわかる。近傍2点でも生じ

てしまうこの違いの原因については、海中音速構造以外の要因も含めて今後検証する必要がある。

また、現状のGNSS-A観測網の能力を考慮して、水藤 [2016, 測地学会誌] と同様の手法でSSEの検出範囲の推定も実施した。この結果からは沖合の海底観測点近傍でのSSEの検出能力が新たに得られたと解釈できるが、検出不能な領域も広く、観測網の拡張が求められる。

参考文献：

Yokota, Y., T. Ishikawa and S. Watanabe (2018): Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations, Scientific Data, 5:180182, doi:10.1038/sdata.2018.182

Yokota, Y., T. Ishikawa and S. Watanabe (2018): Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS-A oceanography, Mar. Geophys. Res., doi:10.1007/s11001-018-9362-7

GNSS-A海底地殻変動観測一次処理データフォーマットの作成と活用

A compatible format for preprocessed GNSS-A seafloor geodetic data

*渡邊 俊一¹、石川 直史¹、横田 裕輔²、中村 優斗¹

*Shun-ichi Watanabe¹, Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota², Yuto Nakamura¹

1. 海上保安庁海洋情報部、2. 東京大学生産技術研究所

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

GNSS-A技術を用いた海底測地観測は、海上保安庁や大学等、複数の機関で実施されている。各機関で得られたGNSS-Aデータはそれぞれ独自のフォーマットで収集され、独自のルーチンで処理・解析される。他方で、GNSS-A解析において必要となるデータは原則として観測手法によらない。そのため、もし互換性のあるGNSS-Aのデータフォーマットが作成されれば、複数の観測主体のデータを直接比較したり、それぞれの解析ストラテジで処理したりするといった連携が可能になる。さらに、データフォーマットが定まれば、GNSS観測のRINEXのように、GNSS-A観測を実施していない研究者もGNSS-A解析を直接行うことが容易になり、研究の裾野が広がることも期待される。そこで、本研究ではまず、GNSS-Aの解析において必要となるデータセットを以下のように整理した。

2019年現在において、海上保安庁の実施する海底地殻変動観測で測量船において取得される生データは、(1) 音響波形データ (200 kHzサンプリング)、(2) 動揺計測データ (10-20 Hzサンプリング)、(3) GNSSのRINEXデータ (2 Hzサンプリング)、(4) 音速測定用XBT/CTDデータ (1 m層の水溫・塩分濃度プロファイルデータ) である (図中ピンク背景)。海底局位置の解析 (以下、局位置解析) においては、まずこれらの生データから、各ショットに関するデータを抽出する必要がある。具体的には、現行の局位置解析において必要なデータとして、ショットごとに、ショットID (海底局番号)、ショット発信時及び受信時の、時刻、トランスデューサ位置及び測量船の姿勢 (それぞれ3成分)、並びに音波往復走時に加え、そのショットが含まれる観測セット番号 (一般にはフラグとして扱う変数) の17パラメータを抽出する (図中緑背景)。なお、ここで時刻が必要になるのは音速補正を時間の連続関数としてモデル化しているため、及び固体地球潮汐の効果を補正するためであり、測量船の姿勢が必要になるのはGNSSアンテナ・トランスデューサ間の測定誤差 (トランスデューサ位置バイアス) を推定するためである。また、ショット発信時刻と受信時刻に加えて往復走時が必要なのは、海底局において設定される返答シグナルの発射ディレイが、海底局ごとに異なるためである。

これらショットごとのデータセットをCSV等にまとめたファイルを、GNSS-A一次処理データフォーマットとして定義できる。実際の解析においては、これらショットデータに加え、音速プロファイルデータ及び初期局位置データ等の広い意味での先験情報が必要になる (図中薄緑背景)。ただし、前者は実測値に限らずモデルによっては統計値でも代用可能であり、後者については本質的にショットデータから抽出可能であるため、データセットとしての重要性は低く、あくまで解析の再現性を担保するための情報に過ぎないともいえる。そのため、これらはショットデータとは別ファイルとして与えるようにしている。

今回作成したデータセットは観測の生データからかなりの容量が圧縮されたものであり、データ読み込みの高速化の点や、将来のデータ交換時にも有利に働く。他方で、データセットにおいて捨象される情報、中でも特に重要と思われるのはGNSS解析が一次処理に含まれておりその手法が観測者に依存してしまうこと、をどう扱うべきかについては、今後議論する必要があると考える。

本発表では、上記データセットについて、海上保安庁で収集されるデータを基に紹介する。また、作成したデータセットに合わせて、局位置解析プログラムを全面的に改修・簡略化し、容易にモデルを変更することを

可能としたので、当プログラムにおいて試みた複数の音速モデルによる結果も示し、その内容についても議論する。

