

海底局マルチ測距手法の実装[†]

横田裕輔^{*1}, 田代俊治^{*2}, 下村広樹^{*3}

Implementation of multi-acoustic ranging system[†]

Yusuke YOKOTA^{*1}, Toshiharu TASHIRO^{*2},
and Hiroki SHIMOMURA^{*3}

Abstract

Seafloor geodetic observation using the GPS-Acoustic ranging combination technique has been deployed by the Hydrographic and Oceanographic Department (JHOD). We developed and implemented a new acoustic ranging technique called “the multi-acoustic ranging system”. This technique can reduce an observation time for each epoch and increase observation opportunities. We report a brief summary of observational tests and results.

1 海底地殻変動観測技術の高度化

海洋情報部では、GPS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測の技術開発を継続して実施しており、日本周辺プレート沈み込み帯に海底基準点（以下、基準点と呼ぶ）を展開し、繰り返し観測を実施している（浅田・矢吹, 2001; 藤田, 2006）。

海底地殻変動観測では、まず測線上を移動する測量船の位置をGPS観測によって決定する。そして、測量船に装備された音響トランスデューサーと海底に設置された海底基準局（以下、海底局と呼ぶ）との間の相対位置関係を音響信号によって計測する。これらを組み合わせて各海底局の位置をセンチメートルの精度で求めて、海底局の移動を測定している。

各基準点には、安定した観測結果を得るため複数の海底局が設置されている。各局の位置を平均することで、精度よく基準点の移動を求めることができる。これまでは、これら複数の海底局に対応する識別信号を海底局ごとに送信し返信信号を受け取る、というシーケンスを繰り返すことによって音響測距観測を行ってきた（以下、個別測距手法と呼ぶ）。この送受信の手法は2000年代初頭の運用開始当初から変更されていない（浅田・矢吹, 2001; 富山, 2003; 成田・他, 2005）。

この個別測距手法に代えて、まとめて測距する手法（以下、マルチ測距手法と呼ぶ）が近年検討されてきた（Fig. 1）。海底局を一つ一つ呼び出すのではなく、まとめて呼び出すことで、一回の送受信シーケンスで多くの海底局とのやり取りを

[†] Received September 16, 2016; Accepted October 26, 2016

* 1 海洋調査課 海洋防災調査室 Geodesy and Geophysics Office, Hydrographic Surveys Division

* 2 総務部 政務課 政策評価広報室 Policy Evaluation and Public Relations Office, Policy and Legal Affairs Division, Administration Department

* 3 第一管区海上保安本部 海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 1st R. C. G. Hqs.

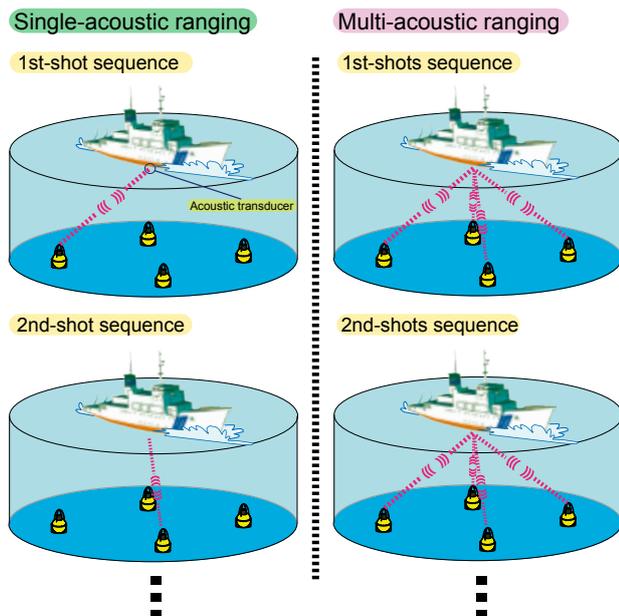


Fig. 1. Schematic pictures of the past seafloor geodetic observation (single-ranging) system and the new multi-acoustic ranging system.

図1. これまでの海底地殻変動観測システムとマルチ測距システム概念図。

完了させる方法である。この手法を用いれば、観測地点ごとの測定自体を高速化することができ、全体のシップタイムを変更することなく、観測頻度も引き上げることができる。手法の詳細については、横田・奥村（2015）を参照されたい。

マルチ測距手法は2015年度に測量船「拓洋」に初めて導入された。本稿では、その観測試験と運用の結果について報告する。

2 海底局マルチ測距の実装と観測試験

改良されたシステムは測量船「拓洋」に2015年度に実装された。改良の内容は、基本的には発信を制御する制御部とソフトウェアの改修が主であるが、発信が連続することによる発熱を抑えるための放熱対策も施された。

観測試験は12月に行われた。試験は、「相模湾」と「東海沖1」という観測点で実施された。収録された音響信号の一例をFig. 2に示す。それぞれの海底局に対する音響信号は0.4秒の長さで形成されており、船底の音響発信部の安定性を考慮して発信後0.4秒待機してから次の海底局への発信

が始まるように設計されている。Fig. 2を見るとまず4局に対して約2.8秒の間にまとめて信号が発信されていることがわかる。次に、音響信号がまとめて受信されており、その中でもm3局とm4局については返信信号が重なっているのがわかる。

この音響信号に対して、各海底局からの正確な返信時刻を割り出すために相関処理を施した。相関処理を行うプログラムは、これまで個別測距手法に用いていたプログラム（富山，2003）を改良して、新たに構築された。この解析プログラムで処理した結果をFig. 2下に示す。ここで示す事例ではすべての海底局から良好な返信信号が得られており、返信時刻が割り出せている。

返信信号の後半が後続の返信信号と重なったm3の相関値は一見、相対的に低いものとなっているが、これは後続信号が重なることで相関係数を正規化する際の分母に当たる振幅が大きくなっているためである。重なり方が大きくなっても相関値は0.2を上回って一定の有意性を保っており、識別は可能である（Fig. 3参照）。また、このように重なり合うケースはデータ全体においては少なく、運用に大きな影響はないと考えられる。ただし、今後も注意深く継続的にデータを確認していく必要がある。

結果的に、観測試験では、目立った機器の不調などは見られず、概ね良好な観測結果を得ることができた。

3 実運用で得られた観測結果

12月の観測試験は、これまでの個別測距手法で用いている観測測線と同じ測線で実施していたが、実運用では、Fig. 4に示すような簡易的な測線を用いることとし、測線を周回する回数（セット数）も減らすこととした。これまでに比べて簡単な形状ではあるが、必要なデータ数は十分に得られる。また、データ数や測線配置については事前に数値シミュレーションによっても検討しており、極端な精度の劣化が起こらないことを確認して実施した。数値シミュレーションの詳細について

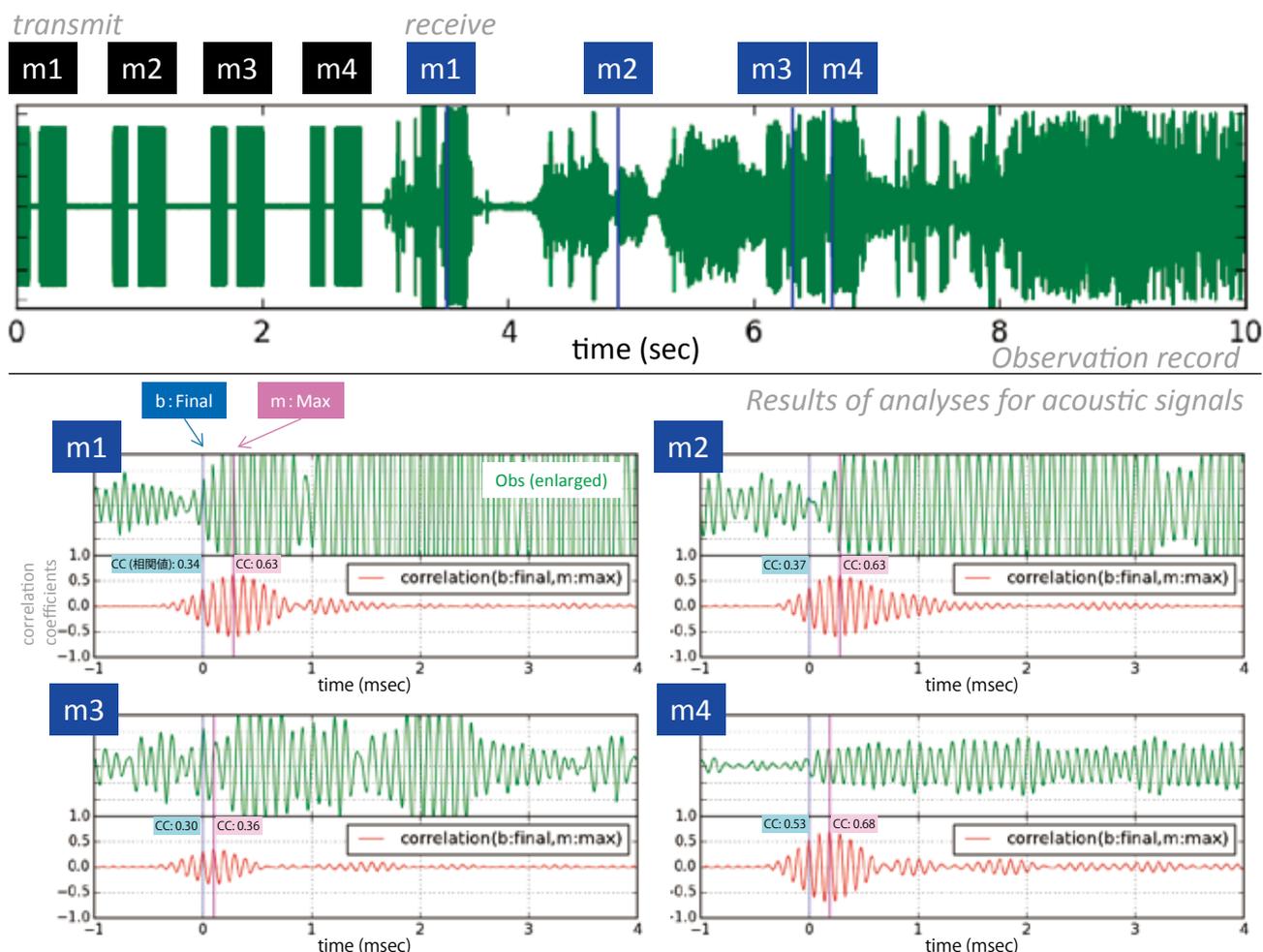


Fig. 2. (Top) An example of acoustic signals observed using multi-ranging system. (Bottom) Results of analyses for acoustic signals.

図2. マルチ測距によって観測された音響信号の一例 (上) とその音響解析の結果 (下).

ては横田・他 (2016) の Fig. 7 などを参照されたい。

この新しい測線で運用した結果は2016年5月と7月に「東海沖1」と「東海沖2」という観測点で得られた。そのデータを用いた最終測位結果を、Fig. 5 上に示す。電子基準点「福江」を基準としてプロットされている。新しく収録されたデータは、これまでのデータや同時期の個別測距手法による収録データと比較しても矛盾のない結果であり、新たな観測手法が精度の劣化を招いていないことが示唆されている。また、Fig. 5 下では、「東海沖2」の2016年7月の個別測距手法とマルチ測距手法によるそれぞれの観測の最終的な音響走時残差を比較している。個別測距手法の結果は平均的なレベルの残差である一方で、マルチ

測距手法の結果は海況が良かったこともあり、より良い残差レベルになっている。これらの結果はマルチ測距手法による音響信号の収録データが十分な精度を持っていることを示している。ただし、精度に関する検証はまだ不十分であることから、今後も検証を続けるとともに、劣化が見られた場合には測線や観測時間の改善を図りたいと考えている。

この手法による一つの基準点の観測時間はこれまでの半日～1日程度から3-6時間程度に改善され、大幅な高速化が図られた。これによって計画上は、2週間強の航海日程でこれまでの倍近くの20点以上の観測を行うことができるようになる。また、別行動の回航時に観測できるようになるなど、柔軟な航海計画が可能となるメリットがある。

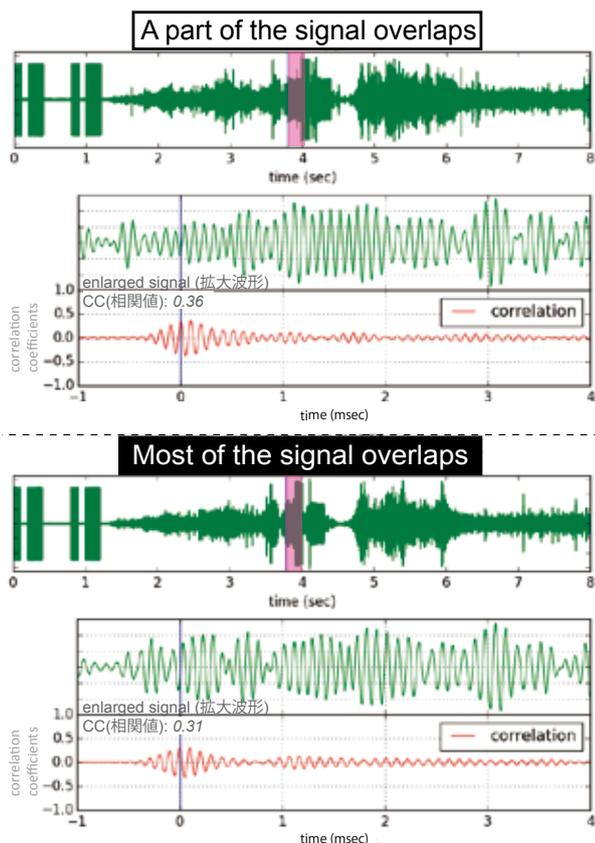


Fig. 3. Acoustic signals and correlation coefficient values in the case A (when a part of the signal overlaps) and the case B (when most of the signal overlaps).

図3. 返信信号の一部が重なり合ったケース (A) と大部分が重なり合ったケース (B) における音響信号と相関係数。

4 今後の課題

新しく実装された観測手法であるマルチ測距手法は良好な音響信号観測結果を得ており、今のところ、海底局位置推定も問題なく実施されている。しかし、新たな課題も見えてきている。

まず、観測手法の運用について改善すべき点がある。これまでとは異なり、複数の音響信号が一度に送受信され、視認が困難になったため、観測中のトラブルへの対応が難しくなった。たとえば、観測中に一局の応答が停止してしまっても波形が入り乱れているため、認識できないことが想定される。このようなことに対応していくため、観測と同時に音響信号の解析ができるようなリアルタイム解析プログラムの開発が必要である。

また、データの解析については、これまでより

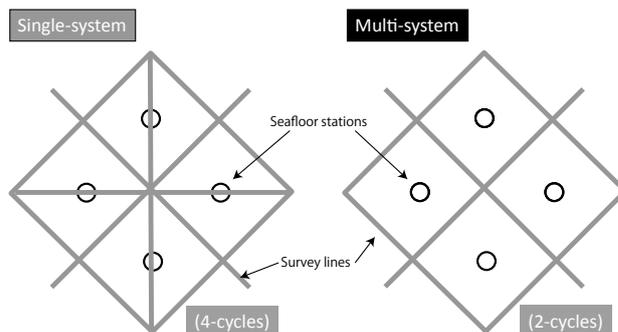


Fig. 4. Survey line layouts used in operations of single-ranging system and multi-ranging system.

図4. これまでの測線計画とマルチ測距用の新しい測線計画。

も時間に対して高密度なデータが得られるため、音速場をより高い時間分解能で検出することができると期待される。しかし、現段階では音速場の時間変化をこれまでと同じ設定で推定しているため、最大限にデータを活用できておらず、解析手法改善の余地がある。

今後、データが蓄積されることで、測線や、測距の時間間隔、音速場推定に関する設定などの最適条件を考えることができるようになっていく。そのためにも、まずは、この新しい観測システムによってデータを蓄積することが必要である。

謝 辞

実装ならびに観測試験において、測量船「拓洋」の乗組員の方々に多大なご協力をいただきました。また、観測手法の運用に際しては、大陸棚調査室の職員の方々、石川直史氏にもご協力・ご助言をいただきました。富山新一氏には本稿を査読いただき、原稿を改善する上で有益な助言をいただきました。解析には国土地理院の電子基準点のデータを使用しております。記して感謝いたします。

文 献

浅田 昭・矢吹哲一郎 (2001) 熊野トラフにおける長期地殻変動観測技術の高度化, 地学雑誌, 110 (4), 529-543.
 藤田雅之 (2006) GPS/音響測距結合方式による

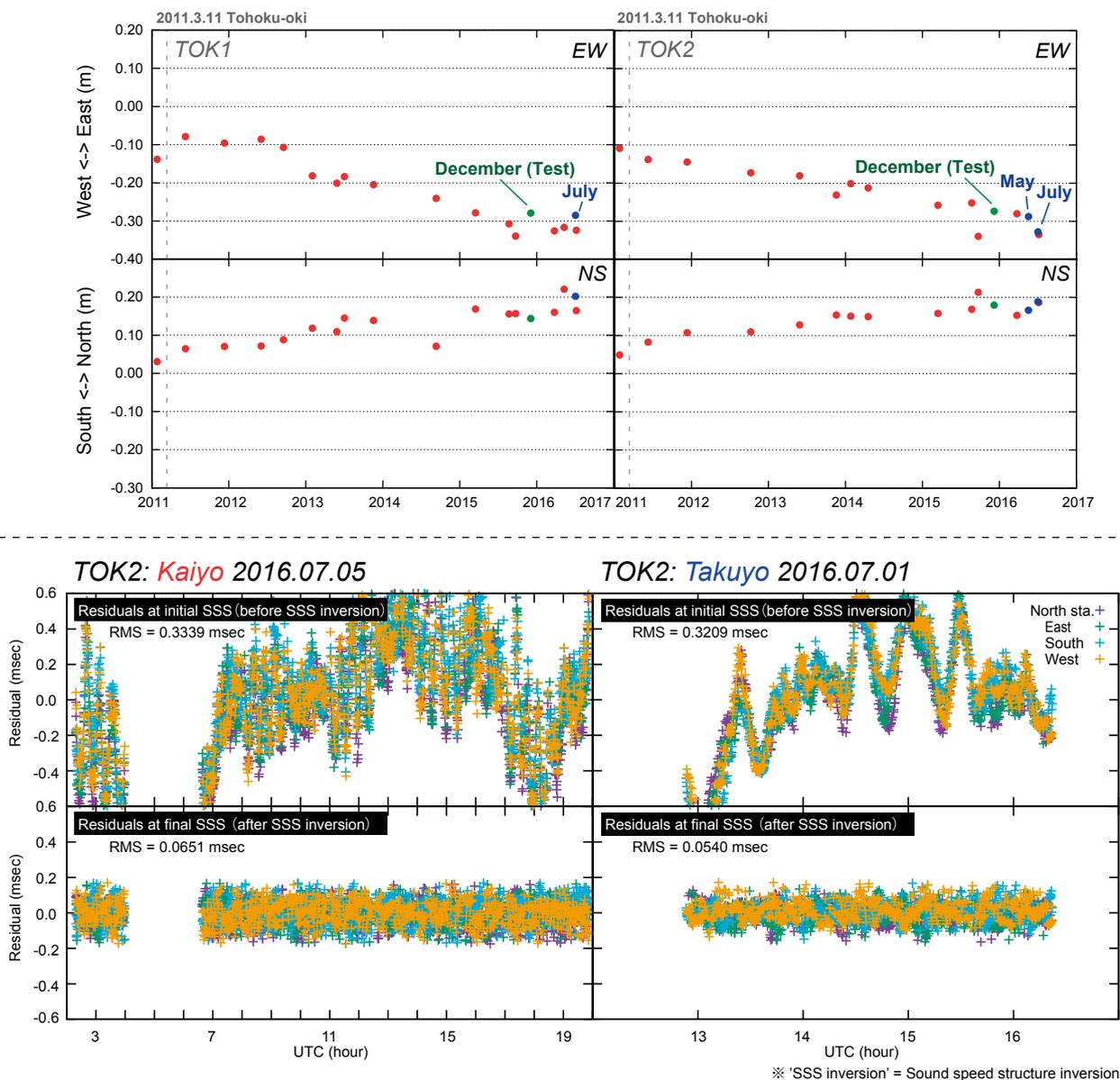


Fig. 5. (Top) Resultant time series of seafloor station positions on sites TOK1 and TOK2. Green and blue circles indicate the epochs observed using multi-ranging system. (Bottom) Residuals of acoustic travel times in the cases of the single-ranging system (left) and the multi-ranging system (right). The residuals before the sound speed structure (SSS) inversion are drawn in the top graphs. The residuals after the SSS inversion are drawn in the bottom graphs.

図 5. (上) TOK1 と TOK2 での最終測位結果の時系列. 緑丸と青丸がマルチ測距による観測を示す. (下) 個別測距手法 (左) とマルチ測距手法 (右) のそれぞれの場合の音響残差の比較. 上側が音速構造推定前, 下側が音速構造推定後の結果を示す.

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.

成田誉孝・畝見潤一郎・望月将志 (2005) 海底地殻変動観測における機器の現状とその運用について, 海洋情報部技報, 23, 53-60.

富山新一 (2003) 海底地殻変動観測における音響解析, 海洋情報部技報, 21, 67-72.

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.

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.

要 旨

海上保安庁海洋情報部で実施している海底地殻変動観測における新しい音響測距手法であるマルチ測距手法を採用した観測装置が初めて測量船に搭載された。この手法によって，各基準点での滞在時間が短縮され，それに伴って観測頻度を向上させることができる。本稿では，装置の試験と実際の運用結果について紹介する。