

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[†]

横田裕輔*, 奥村雅之*

Study for improving efficiency in seafloor geodetic observation by means of multi-acoustic ranging[†]

Yusuke YOKOTA* and Masayuki OKUMURA*

Abstract

Japan Hydrographic and Oceanographic Department (JHOD) has been deploying a seafloor geodetic observation network with the GPS-Acoustic combination technique. In order to shorten an observation time, we are considering a new acoustic ranging method. In this new method, we conduct the acoustic ranging for multiple seafloor transponders not alternately but sequentially. We report feasibility and details of this new multi-acoustic ranging method and discuss how much efficiency will be improved by the introduction of the new method.

1 はじめに

海洋情報部では、東京大学生産技術研究所の技術協力の下、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及び海底基準点（以下、基準点）の展開を行い、測量船による繰り返し観測を実施している（浅田・矢吹，2001；藤田，2006）。

海底地殻変動観測は、時々刻々と変化する測量船の位置を「GPS観測」によって決定し、測量船に装備された音響トランスデューサと海底に設置された海底基準局（以下、海底局）との間の距離を「音響測距観測」で測り、それらを組み合わせて海底局の位置をセンチメートルの精度で求めるものである（Fig. 1）。

各基準点には、安定した観測結果を得るため、3または4台の海底局が設置されており、各局の

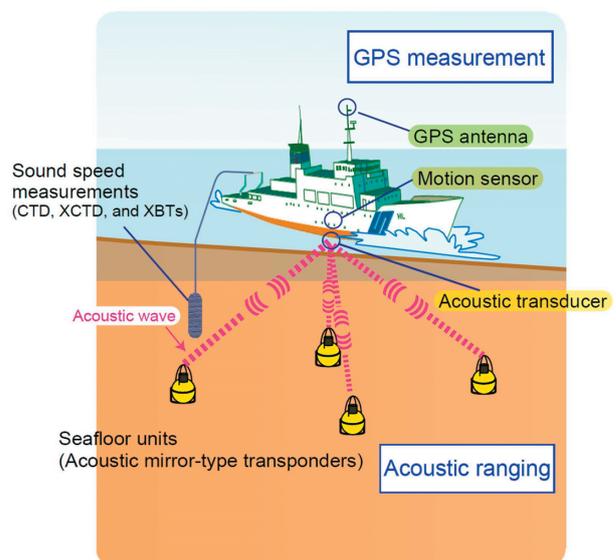


Fig. 1. A schematic picture of seafloor geodetic observation system.

図1. 海底地殻変動観測の概念図。

[†] Received September 22, 2014; Accepted November 10, 2014

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

位置を平均することで、安定して基準点の移動を求めることができる。現在は、これら複数の海底局に対して異なる識別信号によって音響測距観測を行っている（浅田・矢吹, 2001；富山, 2003；佐藤, 2010）。

本観測は様々な地震や地殻変動現象による海底の変動を捉えることに成功してきたが（Sato et al., 2011 など）、将来の南海トラフ巨大地震の際に巨大津波発生源とされるトラフ軸近傍やマグニチュード8クラスの地震が想定されている千島海溝、南西諸島海溝において未観測地域が多数残っており、将来の大規模地震への防災推進の観点から、十分な観測点展開が未だになされていない。しかしながら、現在の観測手法では観測時間とシップタイムの制約によって更なる観測点の展開が難しい状況である。また、地震発生に際して、緊急観測が必要な場合においても、多大な観測時間は足枷となっている。

そこで今後の更なる展開に備えるため、本報告では、海底地殻変動観測の効率化に向けて、現在の観測手法を高速化した新たな音響発信の仕組みについて検討する。

2 現在の音響測距手法

2014年現在、日本の太平洋側のプレート沈み込み帯近傍には、日本海溝沿い、南海トラフ沿いにそれぞれ基準点が設置されている（Fig. 2）。これらの基準点において、移動速度を1 cm/y程度の精度を保って導出するためには、1海底局につき1300ショット程度、1基準点に4台設置されている場合は合計5000ショット程度の音響測距観測を3-5年かけて年間3回程度実施することが必要である。

次に、音響測距観測で使用している音響信号について紹介する。音響信号については、浅田・矢吹（2001）、富山（2003）、佐藤（2010）にまとめられているが、2014年時点の手法について整理する。

音響測距観測における音響信号の発信の流れをFig. 3に示す。まず、船上の音響トランスデュー

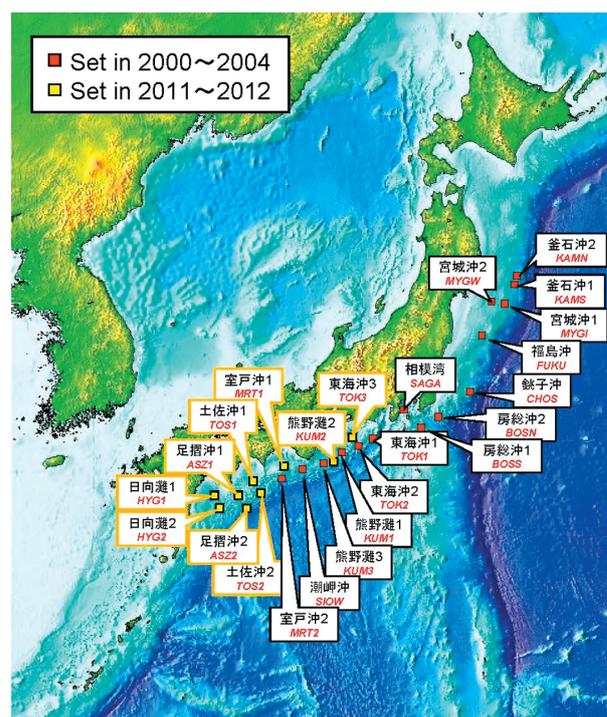


Fig. 2. Seafloor geodetic observation network deployed by Japan Coast Guard.

図2. 海上保安庁の海底地殻変動観測網。

サから音響測距の対象となる海底局の識別信号と測距信号を送信する（Fig. 3中の①）。識別信号は各海底局に異なる信号が割り当てられているが、測距信号は全局に対して同一の信号が使われている。

これら識別・測距のための音響信号は、M系列というコード化されたパルス信号(0, 1)のビットに応じて搬送波(10 kHzの正弦波)を位相変調させたものである（Fig. 4）。識別信号と測距信号には、それぞれ8次4波（信号長：102.2 ms）、9次4波（信号長：204.4 ms）のM系列音響信号が使われている。ここで、8次、9次はM系列の次数を示し、4波はM系列信号の0, 1のビットに応じて搬送波が4波長ごとに位相変調されることを意味している。識別信号には、8次4波M系列信号のうち、我々が定めたM1～M5, M11～M15という10種類の信号が使用されている（佐藤, 2010など）。M系列信号は、他のM系列信号との相関が極めて低く、自己相関においては鋭いピークを持つという特徴があり（Takeuchi, 1991など）、海中音響工学において活用されてい

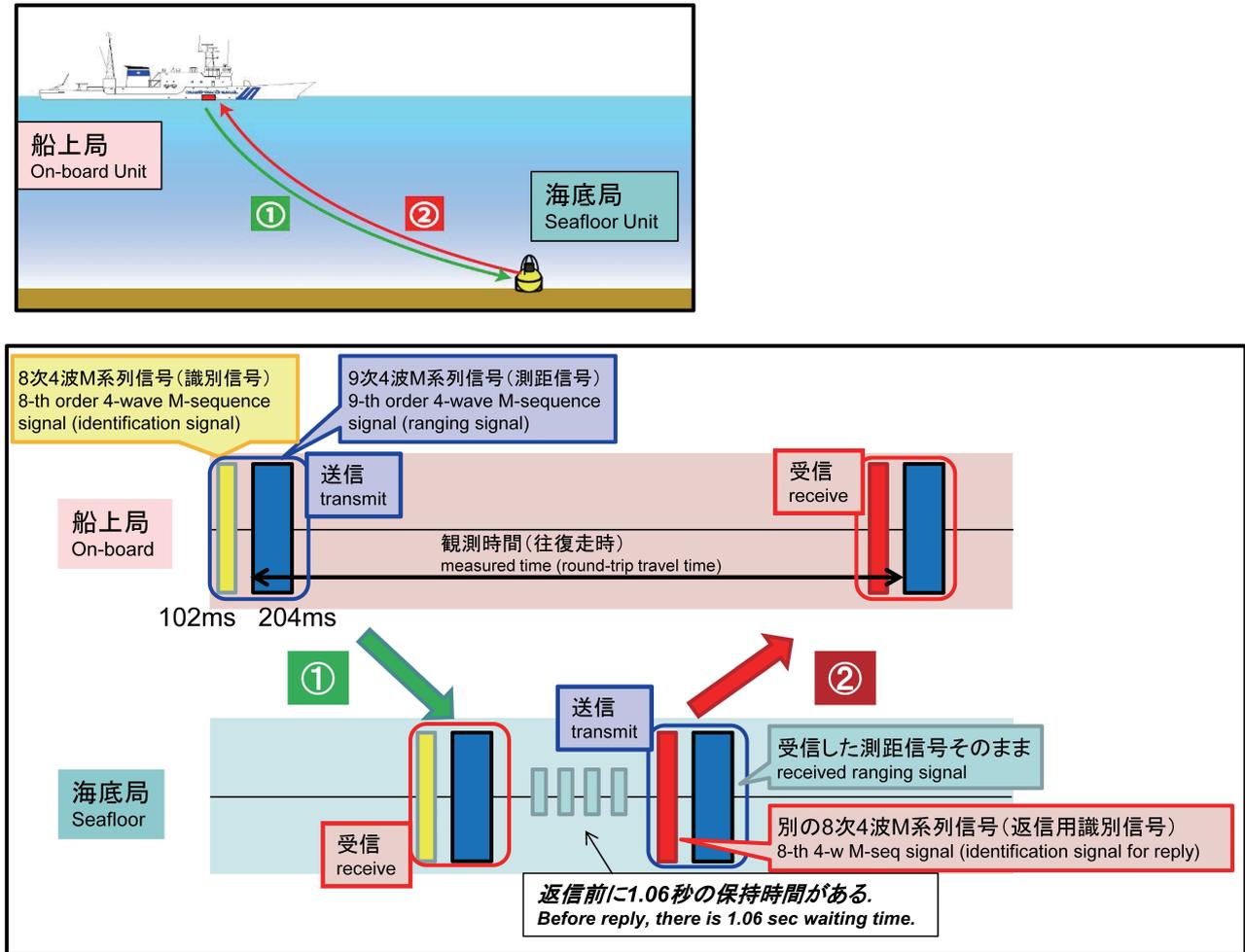


Fig. 3. Ranging system using M-sequence acoustic signals. (after Sato (2010))

図3. M系列音響信号による音響測距システム (佐藤 (2010) を改変).

る。

各海底局は自身の識別信号を受信すると、0.1秒後に続けて送信される測距信号をバッファに蓄え、1.06秒後に返信用トリガー信号であるM6と呼ばれる信号(全海底局共通の8次4波M系列信号)を先頭に付けて返信する(Fig. 3中の②)。船上では、ADコンバータを通して、返信された一連の音響信号を200kHzサンプリングで収録する。この際、信号の振幅が振りきれないようにオートゲインコントローラー(AGC)によって振幅を調整している。これが1回(1ショット)の音響測距観測となる。この観測をM1, M2, M3, M4, M1, …とそれぞれの海底局に対して順番に繰り返し行う(Fig. 5(a))。海底局の深度にもよるが、1局ごとに10–16秒程度の間隔で行い、1基準点の観測で合計約5000ショットの音響測距

データを取得するまで繰り返す。測線の移動時間や音波の伝播速度を決めるための音速観測時間も含めると、4局設置されている場合、概ね1日程度の観測時間が必要となっている。これらの音響測距データは、理論送信波形と相互相関が取られ、船上の音響トランスデューサと海底局との間の音響信号の往復時間を求めて距離の情報に変換される。

このような1局ごとに送受信を繰り返す手法を、複数局まとめて送受信する手法に変更することで大幅に観測時間を短縮することができる。また、この手法であれば船上局の改修のみで済むため、既存の海底局に対しても使用できる。そこで今般、識別信号と測距信号を改めることによって観測を効率化する検討を行った。次節では、その手法について述べる。

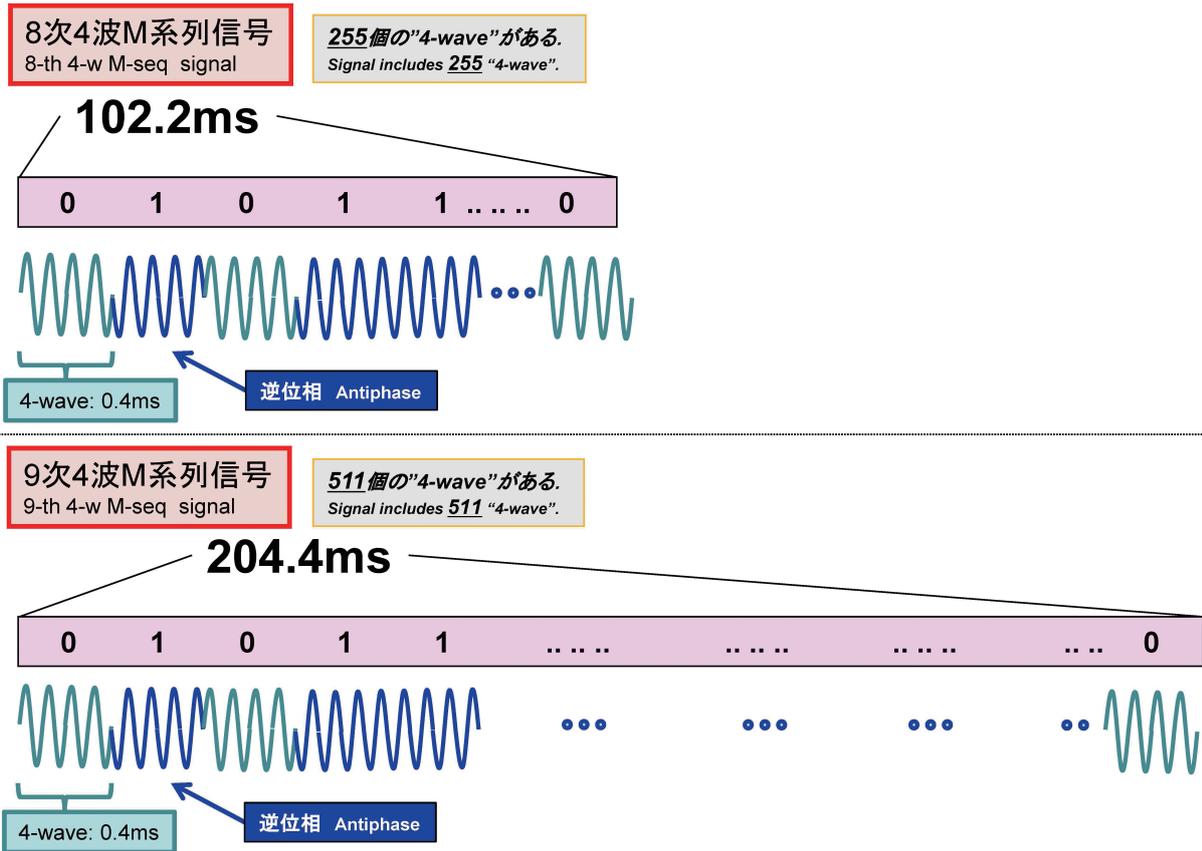


Fig. 4. Detail of 8th- and 9th-order 4-wave M-sequence signals.

図 4. 8次 4 波 M 系列信号と 9 次 4 波 M 系列信号の詳細。

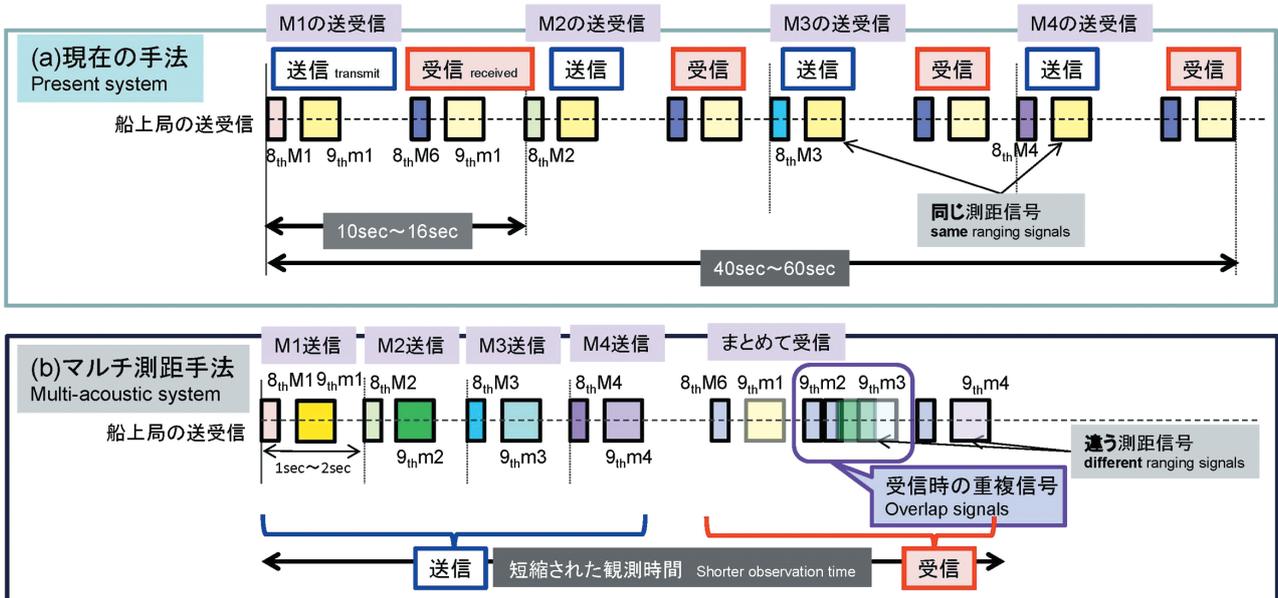


Fig. 5. Comparison of (a) a present acoustic ranging system and (b) a multi-acoustic ranging system.

図 5. (a) 従来の音響測距手法と (b) マルチ測距手法の発信順の比較。

3 新たに導入するマルチ測距手法

3.1 概要

これまでの音響信号の発信は10秒以上の間隔を開けて行っていたが、新しい手法では海底局からの応答を待つことなく1秒程度の間隔で音響信号を発信し、海底局からの返信波をまとめて受信する (Fig. 5 (b))。本報告では、この送受信手法のことを、新しくマルチ測距手法と呼ぶこととする。この場合、Fig. 5 (b) に示すように、仮に測距信号 (船上局から発信する9次4波M系列信号) が各局で同一である場合、重なった受信波を相関処理の際に識別できなくなる。これに対応するため、船上局から送信する9次の測距信号を、各局に対して1種類ずつ新規に設定する。

このように9次4波M系列信号の受信波が重なる場合、相関処理が可能かどうか、あらかじめ数値的に確認する必要がある。次項では、数値的な確認について述べる。

3.2 重複受信に関する確認

まず、9次4波M系列信号の元となる9次M系列について具体的に記す。なお、M系列の発生原理については富山 (2003)、8次M系列については佐藤 (2010) にまとめられているので、本報告では省略する。

9次M系列は、信号長が $2^9 - 1 = 511$ ビット、すなわち511個の0, 1の組み合わせで構成されている。それぞれ自己相関は大きく、相互相関が小さい独立した48種類の原始多項式に基づいている。信号の種類も48である。

Fig. 6に、9次M系列の48個の原始多項式を示す。現在、測距信号として使用している原始多項式はm01、未使用の原始多項式は便宜上m02~m48と名付けることとした。これらの原始多項式から生成されるビット信号の相互相関を取るによりM系列の類似性を評価した結果、いずれの信号の相互相関係数のピーク値も0.21を上回ることはなかった。

佐藤 (2010) では、8次M系列について同様に確認を行っている。相互相関係数のピーク値が

0.3以下であれば、8次4波M系列信号を用いた実際の観測でも問題なく音響測距が行えることを確認している。9次M系列についても相互相関係数が小さいことが確認できたため、実際の観測において重複受信が発生したとしても、9次4波M系列信号が識別できないという事態は発生しないものと考えられる。

また、9次M系列同士のビット相関のほかに、8次M系列と9次M系列のビット相関、並びに数値的に作成した擬似9次4波M系列信号の相互相関も同様に確認したところ、いずれの相関係数のピーク値も0.3を上回ることはなかった。実際の搭載段階では、初期値を511種類の中から選ぶことで、さらに相関係数を下げることができるので、より識別しやすく設計できる。

加えて、数値的に作成した別々の擬似9次4波M系列信号を完全に重ね合わせた波形に対して、実際の解析に使用している相関処理を行う試験も実施した。Fig. 7は、m01とm03の9次4波M系列信号を重ね合わせて、m01との相関処理を行ったものである。完全に重ね合わせているため、振幅が0になっている部分があるにも関わらず、相関処理によって受信時刻を正確に決定することができている。重ね合わせ時刻をずらして同様の試験を行ったが、結果は良好であった。このように9次4波M系列信号は、実用に耐えうると判断できる。

3.3 海底局の呼び出し順の制御

実際の観測において、受信時には、1波目の返信信号の振幅に依存してAGCが受信強度を調整する。ほとんどの場合、1波目は近傍の海底局からの返信波であるため、2波目以降の振幅よりも大きくなり、2波目以降の受信はAGCがかかっても問題なく行われる。しかしながら、何らかの理由で近傍の海底局の発信強度が下がっている場合、2波目以降の振幅が1波目よりも大きくなりうる。この場合はAGCが相対的に弱くかかるため、稀に2波目以降の受信波の振幅が飽和して振りきれってしまう場合が考えられる。

m01(529): $x^9 + x^4 + 1$	m26(799): $x^9 + x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + x^1 + 1$
m02(539): $x^9 + x^4 + x^3 + x^1 + 1$	m27(803): $x^9 + x^8 + x^5 + x^1 + 1$
m03(545): $x^9 + x^5 + 1$	m28(817): $x^9 + x^8 + x^5 + x^4 + 1$
m04(557): $x^9 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$	m29(827): $x^9 + x^8 + x^5 + x^4 + x^3 + x^1 + 1$
m05(563): $x^9 + x^5 + x^4 + x^1 + 1$	m30(847): $x^9 + x^8 + x^6 + x^3 + x^2 + x^1 + 1$
m06(601): $x^9 + x^6 + x^4 + x^3 + 1$	m31(859): $x^9 + x^8 + x^6 + x^4 + x^3 + x^1 + 1$
m07(607): $x^9 + x^6 + x^4 + x^3 + x^2 + x^1 + 1$	m32(865): $x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + 1$
m08(617): $x^9 + x^6 + x^5 + x^3 + 1$	m33(875): $x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^3 + x^1 + 1$
m09(623): $x^9 + x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + x^1 + 1$	m34(877): $x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$
m10(631): $x^9 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + x^1 + 1$	m35(883): $x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + x^1 + 1$
m11(637): $x^9 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$	m36(895): $x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2$ $+ x^1 + 1$
m12(647): $x^9 + x^7 + x^2 + x^1 + 1$	m37(901): $x^9 + x^8 + x^7 + x^2 + 1$
m13(661): $x^9 + x^7 + x^4 + x^2 + 1$	m38(911): $x^9 + x^8 + x^7 + x^3 + x^2 + x^1 + 1$
m14(675): $x^9 + x^7 + x^5 + x^1 + 1$	m39(949): $x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + 1$
m15(677): $x^9 + x^7 + x^5 + x^2 + 1$	m40(953): $x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$
m16(687): $x^9 + x^7 + x^5 + x^3 + x^2 + x^1 + 1$	m41(967): $x^9 + x^8 + x^7 + x^6 + x^2 + x^1 + 1$
m17(695): $x^9 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x^1 + 1$	m42(971): $x^9 + x^8 + x^7 + x^6 + x^3 + x^1 + 1$
m18(701): $x^9 + x^7 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$	m43(973): $x^9 + x^8 + x^7 + x^6 + x^3 + x^2 + 1$
m19(719): $x^9 + x^7 + x^6 + x^3 + x^2 + x^1 + 1$	m44(981): $x^9 + x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + 1$
m20(721): $x^9 + x^7 + x^6 + x^4 + 1$	m45(985): $x^9 + x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^3 + 1$
m21(731): $x^9 + x^7 + x^6 + x^4 + x^3 + x^1 + 1$	m46(995): $x^9 + x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^1 + 1$
m22(757): $x^9 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + 1$	m47(1001): $x^9 + x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^3 + 1$
m23(761): $x^9 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$	m48(1019): $x^9 + x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3$ $+ x^1 + 1$
m24(787): $x^9 + x^8 + x^4 + x^1 + 1$	
m25(789): $x^9 + x^8 + x^4 + x^1 + 1$	

Fig. 6. Primitive polynomials of 9th-order M-sequence.
 図 6. 9次 M 系列の原始多項式.

このようなケースに備えて、あらかじめ海底局の呼び出し順を船上で制御できるように設計しておく必要がある。呼び出し順の制御さえ出来れば、強い受信波を返す海底局から順に呼び出すことで2波目以降の振幅が飽和することを防ぎ、上記の問題は回避可能である。

4 観測時間の短縮率

重複した9次4波M系列信号の識別が可能であることが確認できたため、マルチ測距手法の実現性は確認された。本報告では最後に、現在展開されている観測点における観測時間の実際の短縮率について検討する。

トランスデューサの仕様上は信号間の間隔が、0.5秒程度でも問題ないため、ここでは0.6秒間

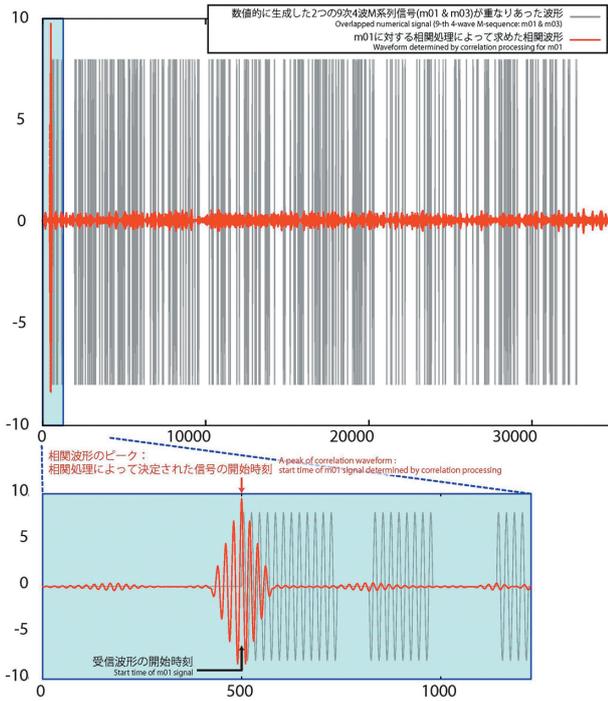


Fig. 7. Comparison of an overlapped numerical signal (9th 4-wave M-sequence: m01 and m03) (black) and a waveform determined by correlation processing for m01 (red).

図7. 数値的に生成した2つの9次4波M系列信号(m01とm03)が重なりあった波形(黒)とm01に対して相関処理を行った波形(赤)の比較。

隔で発信し、1局につき約1秒ごとに発信することを想定する。実際のマルチ測距信号は Fig. 8(a) に示すように、4局に対しては約3.4秒の信号となり、3局に対しては約2.4秒、2局に対しては約1.4秒の信号となる。

この観測で使用するトランスデューサは信号を発信している状態では受信することができない。海底局の返信信号がマルチ測距信号全体の発信終了より前に船上局に戻ってくる場合には、返信信号を受信し損なうことになるため、避けなければならない。この問題は、最初に発信する海底局の直上で観測している場合に最も発生しやすい。発信中に返信信号が船上トランスデューサまで返ってくるかどうかを、深さに応じて計算したものが Fig. 8 (b) である。海水中の音速は全て1500 m/s、海底局の保持時間は1.06秒とし、最初に呼び出す海底局の直上で発信するものとして計算している。

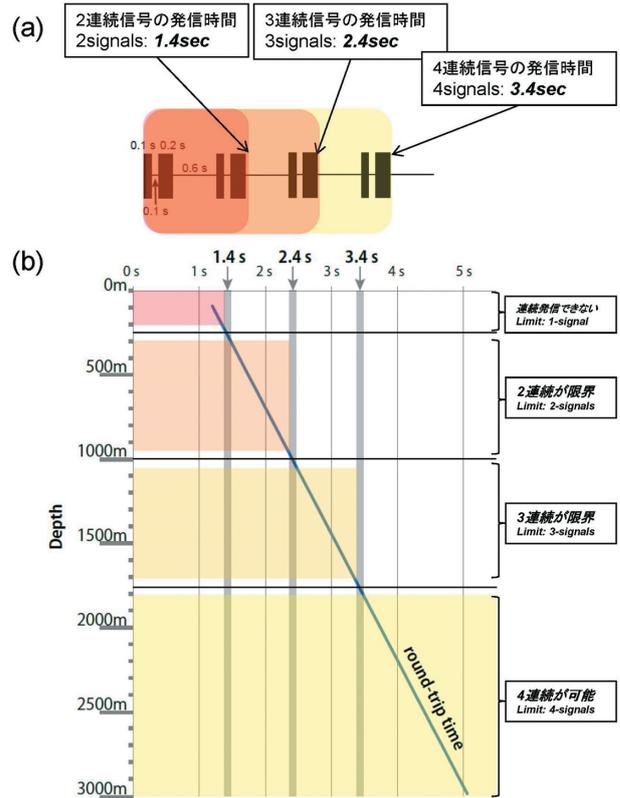


Fig. 8. (a) Transmission times and (b) a function of the shortest round-trip time for depth in multi-acoustic ranging system.

図8. (a) マルチ測距手法における発信時間と (b) それに対する最短受信時間。

1800 m 以深の基準点については4局全てを連続発信することが可能である。しかし、1000 m ~ 1800 m 程度の深さの場合、3連続発信が限界となる。すなわち、この深さでは4局の基準点に対して、 $(M1 + M2 + M3) \rightarrow (M4 + M1 + M2) \rightarrow (M3 + M4 + M1) \rightarrow (M2 + M3 + M4) \rightarrow \dots$ と発信する必要がある。また、1000 m 以浅の基準点では2連続発信が限界である。

この計算を基に、既存の基準点での観測時間の短縮率の一例を Table 1 に示す (基準点の位置は Fig. 2 を参照)。計算には、測線の移動時間は含んでいないが、CTD などによる音速観測時間は含めていない。最も効率化されるのは1800 m 以深の基準点であり、最大35%程度まで観測時間を短縮することができる。1000 m 程度の深さの基準点で2連続発信する場合でも、50%程度まで短縮することができる。0.6秒としている信号間隔

Table 1. Shortening coefficient of observation time for four seafloor sites due to multi-acoustic ranging system.

表 1. 深さの違う海底基準点におけるマルチ測距手法による観測時間の短縮率.

基準点名	深度	連続発信可能な信号数	現在の合計観測時間	新手法での合計観測時間	短縮率
Site name	Depth	Sequence	Present total-time	New total-time	Shortening coefficient
ASZ2	2910m	4-times	18h36m	6h30m	35%
KAMN	2300m	4-times	17h33m	6h08m	35%
TOK2	1560m	3-times	15h53m	6h37m	43%
TOS1	1030m	2-times	15h43m	8h02m	51%

をさらに短くすることで、浅い基準点でも観測時間をさらに短縮することが可能である。

5 今後の課題

本報告では、海底地殻変動観測の観測時間短縮を図るため、2014年現在まで使われてきた個別に発信する音響測距手法をマルチ測距手法に変更する検討を行った。本検討の結果として、技術的な問題は生じないと考えられ、実現可能な技術と言える。

残された検討課題は、2点ある。1点目は、本稿では0.6秒間隔としたトランスデューサの連続発信間隔の限界の検証である。連続発信によるトランスデューサ自体の発熱や、直前の発信による振動が、音響発信にどの程度の影響を与えるかについて未検証であり、またこれらによるトランスデューサの劣化の進行程度についてもこれまで検証されていない。発信間隔を短くすることができれば、さらに観測時間を短くすることができる。浅い海域においては、2連続発信が3連続や4連続発信になることで、さらに効率を2～3割程度上げることができる。この検証には実機を用いた試験が必要となる。

もう1点は、短時間観測による音速構造の時間

変化要素の影響の検証である。短時間観測のメリットとして、水温構造の日周期変化などの時定数の長い水温変化に影響されないため、適切な間隔で水温を観測すれば、水温構造の時間変化による最終測位解への誤差を減らすことができる点が挙げられる。一方、デメリットとして、水塊構造や傾斜構造など、ごく短い時間内に発生する特徴的な水温構造は、観測時間が短いほど誤差として最終解に影響する可能性がある。この短時間観測のデメリットは過去の観測データや数値シミュレーションなどから影響を確認する必要がある。

本稿で検討したマルチ測距手法の実用化によって、更なる観測網の拡張をめざしていきたいと考えている。

謝 辞

佐藤まりこ氏には、本検討に着手する糸口を与えていただいた上、M系列信号の相関処理に関して多大なる技術的なサポートをいただきました。また、富山新一氏には、本論文の改善に資する有益なコメントをいただきました。記して感謝いたします。

文 献

- 浅田 昭・矢吹哲一朗 (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.
- 佐藤まりこ (2010) 海底基準局の識別信号の追加について, 海洋情報部研究報告, 46, 108-115.
- 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.
- Takeuchi, T. (1991) A Long-Range and High-Resolution Underwater Acoustic Positioning System, *Marine Geodesy*, 14, 225-231.
- 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.

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の観測時間短縮に向けた新しい音響測距手法について検討した。現在用いられている個別に音響測距する手法から、まとめて送受信するマルチ測距手法への変更について、実現性を示すと同時に、実際の観測時間の短縮率について考察した。今後、本手法を導入し、海底地殻変動観測網の拡張や、緊急観測の際の短時間観測などに活用していきたいと考えている。