

研究解説

海底音響基準ネット

Seafloor acoustic reference network

浅田 昭*・矢吹 哲一朗**

Akira ASADA and Tetsuichiro YABUKI

1. はじめに

南海トラフ、日本海溝はプレート境界に位置し、フィリピン海プレート、太平洋プレートの沈み込みにともない歴史的に繰り返し巨大地震が発生している海域である。プレートの沈み込みと地震発生のメカニズムはこれまで様々な地球科学的な調査によって次第に明らかにされてきた。陸域では GPS 基準ネット観測が充実され、リアルタイムに近い状態で全国の地殻変動の様子がモニタリングできる状態になっている。しかしながら、海底での地殻変動に関するデータは非常に少なく、震源の海底で起こっている地殻変動と地震との関係はよく分かっていない。このため、海底における新しい地殻活動を観測する技術開発として、熊野トラフと三陸沖の海底に海底音響基準局を設置し、陸域から海底に及ぶ地殻変動を長期間計測する GPS・音響測地研究を開始した。

海底の断層構造等を挟む水平地殻歪み、また、プレートの沈み込みにともなう、プレート境界から陸部にいたる広域の変動ベクトルの精密計測を可能にするため、海底に GPS と音響により中継した音響基準ネットを展開し地殻変動を観測する手法の研究開発を行うものである。巨大地震の震源から離れた陸上よりも、震源海域に地殻変動現象を捕らえるセンサーを設置することは、大きな利点がある。

最初に、紀伊半島下里水路観測所と大王埼 DGPS 灯台に GPS 基準点を設置し、南海トラフの陸側に位置する熊野トラフ、北緯 33 度 40 分、東経 137 度 00 分、水深 2020 m 付近の海域において 4 台の海底基準局を設置し、キネマティック GPS による海上測量と精密海底音響測位を組み合わせた海底測地により長期観測を行うものである (Fig. 1)。2000 年 2 月に設置を完了し、同時に海上保安庁水路部の測量船「明洋」を使い最初の海底測地観測を行った。

*東京大学生産技術研究所 海中工学研究センター

**海上保安庁水路部

もう 1 個所、釜石沖の北緯 38 度 40 分、東経 143 度 15 分、水深 2100 m と北緯 38 度 52 分、東経 143 度 19 分、2200 m の海底に、2 セット (4 台×2 個所) を 6 月から 7 月にかけて設置し、釜石、金華山に GPS 基準局を設置し、初期観測を行う予定である。

今後は、水路部の測量船を使い年 3 回程度の繰り返し観測を継続し、陸上 GPS 局と海底に設置した海底基準局システム間との変動ベクトル量をモニタリングする計画である。

2. 計測方法

海底測地観測の実用性を考慮するとシンプルな計測システムが望ましい。音響距離計測を基に海底測地を行おうとすると、音響距離計測精度、水温構造変動、海水の流れの変動の 3 つの重要な問題がある。なるべく水温構造の変動に影響を受けずに測地を行うためには、直交する X-Y 座標を設定し、各座標軸上に 2 点ずつ音響トランスポンダーを設置することが基本である。このときの水深はほぼ同じ

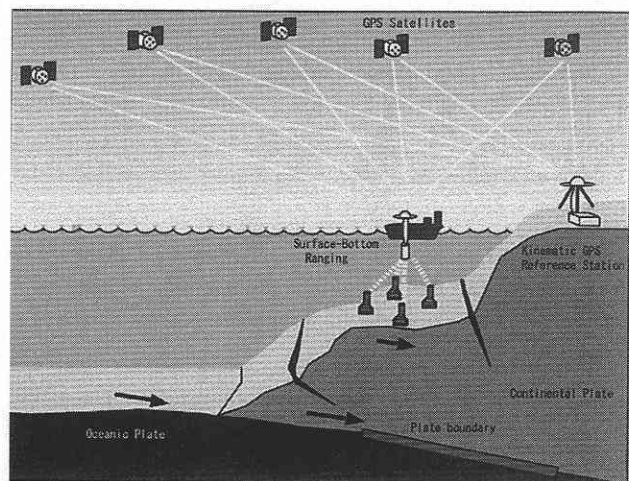


Fig. 1 The system configuration of the GPS/Acoustic seafloor positioning.

で、また、X-Y座標軸原点から等距離の点に設置することが望ましい。こうして、原点付近の海面にキネマティックGPS等で動揺計測される海面局を配置し、海底局4点との音響測距を行うと、原点付近の海面局の位置を正確に計測することができる。この付近の水温構造が等しいとすると、原点から等距離にある海底局からの音線伝播経路は同じ屈折曲線となり、海面局が原点付近であれば音速構造の変動にあまり左右されずに水平位置計測が行われる。高さ方向の精度は犠牲にして、音速変動による誤差を消去する方法である。往復伝播時間から音響測距を行うと、海水の流れによる誤差は行きと帰りでキャンセルされる。X軸上の2点を使いX座標値を求め、Y軸上の2点からY座標値を計測した音響測位と、GPSによる測位の情報を長年に渡って計測すれば、GPSの陸上基準点と音響測距原点との基線長をモニタリングすることができることになる。

海面局の動揺センサー(TSS-335B)は傾き2成分の計測精度は0.1度、上下変位の相対計測精度は5cmのものを使用している。GPSアンテナと音響送受波器は8mの専用取り付けパイプで固定した。GPSアンテナはGPSジャイロ(NR 230 MK II)用に正三角形に3個と、キネマティックGPS精密位置計測(4000 SSE)用に中心に1個、GPSアンテナの直下に動揺センサを取り付けた。8mのパイプの動揺により、パイプ最下端に取り付けた送受波器の位置はジャイロ、動揺センサー、キネマティックGPSを使って正確に求めることができる。

計測精度の良い音響測距を可能とする小型のミラー式のトランスポンダーを製作した。搬送波周波数10kHz、トリガー測定用にM系列波(4波8次)、計測用にM系列波(8波8次)を使用する。船局からトリガー測定用のM系列波と計測用のM系列波を続けて発信する。従局側のミラー式のトランスポンダーにおいて、トリガー測定用のM系列波を計測・受信し、これが受信されたことと認識したら、後続の測定用のM系列波をメモリに記録し、1.061秒±3μ秒後に受信波形を増幅して送り返す。これにより、従局で受波した計測用のM系列波を、ミラーのようにそのまま送り返すことができる。この測距分解能は距離に換算して1cm程度である。船局と4局の海底基準局間の距離はM系列音響パルス発信信号の往復時間計測により精密に計測される。船局の送受波器で受信した信号、この起動TTLパルス信号、信号船上送受波器の受信信号、GPSの1PPSパルス信号はサンプリング周波数192kHz~200kHz、16ビットのA/Dデジタルデータレコーダに連続して収録する。

3. 熊野トラフにおける海底基準局設置と海底測地計測試験

1999年11月には海洋科学技術センターのROV「かいこ

う」を使い熊野トラフに2台の海底基準局を設置した。まず、既有的大型海底基準局1台と3台のLBL水中音響測位用トランスポンダーの設置作業を行った。LBL誘導の下に、観測ワイヤーウィンチによる海底基準局設置とROVを使って所定位置への再設置作業により、日本測地系において北緯33度40.000分、東経137度0.000分をほぼ中心とし、南北に各1000m、計2000m離して海底に大型と小型の2台の海底音響基準局を設置した。本作業に引き続き2000年2月に測量船「明洋」を使い、3台のLBL水中音響測位用トランスポンダーの設置作業を行い、LBL誘導の下に中心点から東西に各1000m離してもう2台を設置し、対角線の長さが2000mの正確な正方形型に東西南北に計4局を配置した。

2月に行った最初の海底測地観測の概要¹⁾は以下のとおりである。GPS基準点を設置した下里水路観測所は、海底測地試験地点からほぼ西に100km、大王崎DGPS灯台は北にはほぼ70kmに位置し、計測間隔2Hzで後処理による船上局のキネマティックGPS位置計測を行った。

船局と4局の海底基準局間のM系列音響パルスの往復伝搬した信号は十分なS/Nを持って受信記録された。このM系列の音響パルス発信信号、この起動TTLパルス信号、信号船上送受波器の受信信号、GPSの1PPSパルス信号はサンプリング周波数192kHz、16ビットのA/DデジタルデータレコーダRX-808WBで、連続1時間を4回、20分計測を4回行った。各回の計測は、海底4局の上を北東から南西に漂流しながら、海底4局との音響測距計測を行った。海底4局の中心を通る測線計測を4回、東外側と西外側を2回計測し、良好なデジタル記録を収録した。この後、起動TTLパルス、そのRS232C計時情報とGPSの1PPSパルスを記録し、RS232C計時情報の時間遅れを計測した。これらの計測の前後に、CTDと音速形SVPLUSによる水深2000mまでの音速プロファイル計測、XBTによる1測線毎の計測を行った。

4. 音響測距解析(M系列信号のドップラー効果による伸縮計測)

熊野トラフにおける初回観測の受信信号を精密に解析し、発信波形のずれ、受信時におけるマルチパスの重畳によるM系列受信信号のパルス圧縮処理におけるゆがみ現象、マルチパスを考慮した最適なパルス圧縮、精密な受信時間計測法、音速構造の時空間変動の把握などを解析し、精密な測地計測手法を開発しながら海底地殻変動観測を行っていくこととしている。使用したM系列波は、搬送波10kHzで8波8次のM系列(204ms)の信号である。

計算による204msの基準M系列波と、192kHzサンプリングで受信記録した船局と海底局間の往復伝搬波との相関処理において注意しなければならない現象がある。Fig.

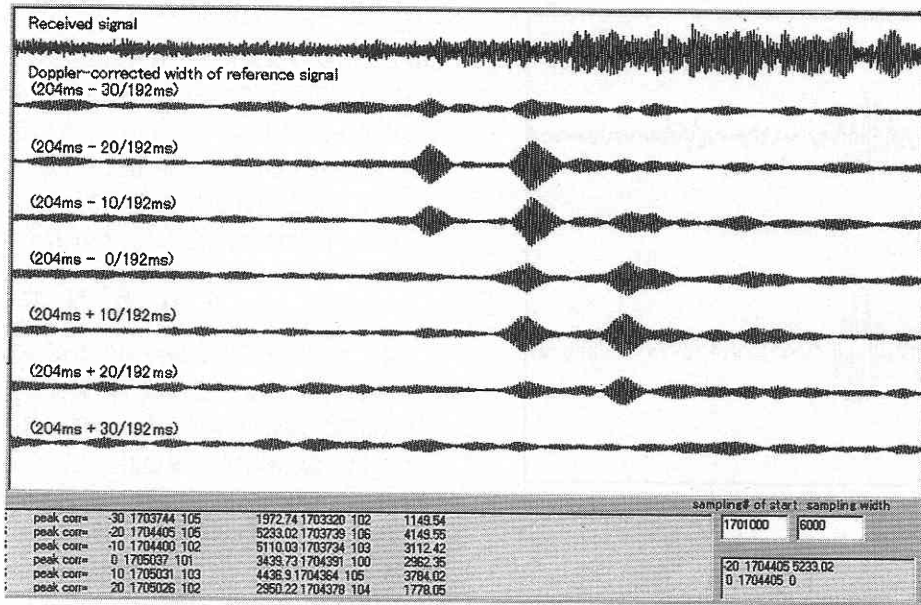


Fig. 2 Received signal and correlation results using 7 reference M-sequence signals in correspondence with Doppler-corrected width.

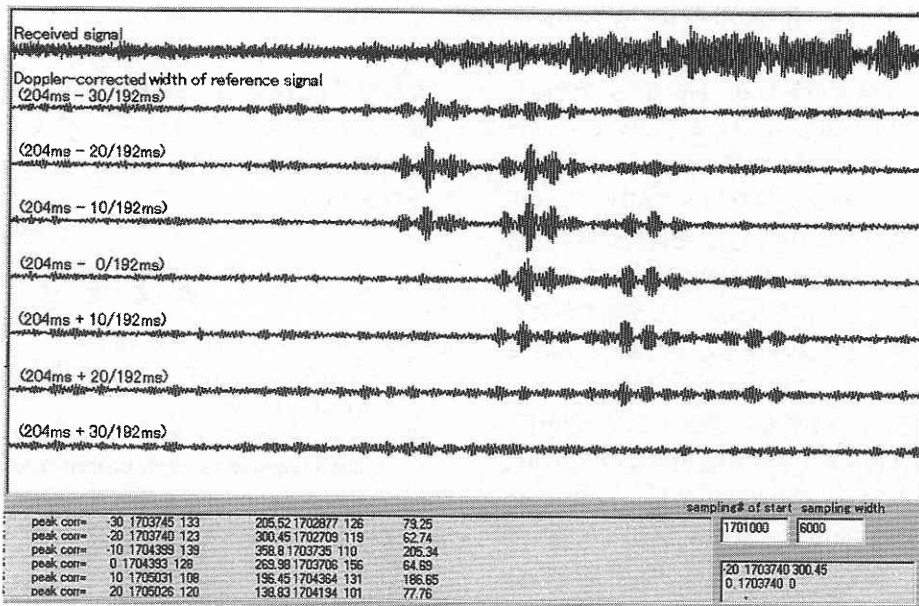


Fig. 3 Received signal and correlation results using 7 reference M-sequence signals in correspondence with Doppler-corrected width. The reference signals are modified to enhance a compressed pulse.

2, 3の例においては, 船が1 kt程度でドリフトし, 同時に送受波器の上下動, 水平動が合わさったドップラー効果により, M系列波は1波長程度縮んでいることが解析された. この解析には2つの方法が試みられた. もう1つは, 255ビットのM系列信号の内, 前部75ビット分のみで他は消されたものと, 後ろ75ビット部分のみで他は消され

たものの基準M系列波を2種類用意し, 相関をとったところ Fig. 4に示すように後者は前者に対し約18サンプル分(94 μs, 14 cm相当)早くパルスを形成した. つまり, 受信した204 msの信号は18サンプル分縮んでいた.

通常の8波8次のM系列信号でパルス圧縮する相関を行うと, 15波程度の3角形状のパルス波群が形成される

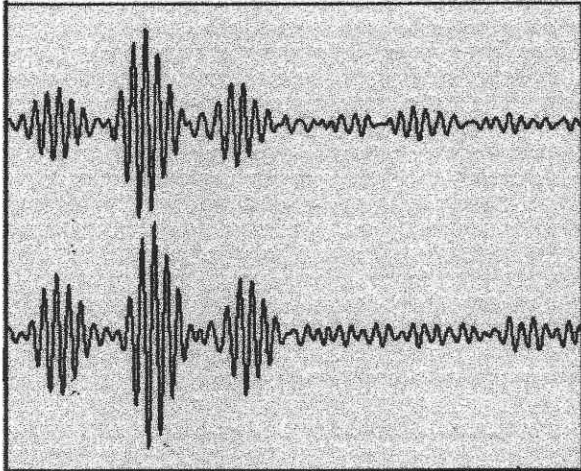


Fig. 4 Shrink of 94 micro-seconds of the received signal was revealed. (Lower) The fore 75 bits of the reference M-sequence were available in correlating and the rear 180 bits were invalid. (Upper) The fore 180 bits were invalid and the rear 75 bits were available.

(Fig. 2). これでは、ピークと隣の波とは振幅で1/8程度の差しか生じないため、Fig. 3, 4のようにパルス圧縮を強調するように、基準波を改良した。この場合、前後に副パルスが生じるという弊害が生じる。Fig. 3, 4の受信した往復伝搬M系列波形の相関パルス圧縮結果の例において、大よそ3群のマルチパス受信信号が見受けられる。これらは7種類の伸縮したM系列波を使って相関パルス圧縮した結果である。伸縮ゼロの時は第2受信波が第1受信波のように見える。ところが縮めたM系列波との相関結果からその前に真の第1信号が存在することが明らかになった。伸縮がない基準波のみで相関をとった場合、第2受信波である海面反射波を誤って検知する危険が生じる。第2受信波を良く見ると、2つが重なっていることが分かる。これらは往路にのみ海面反射したものと復路にのみ海面反射した信号と推定される。しかも片方は伸び、もう片方は縮んでいる。3番目は往復路とも海面反射したものであ

る。ドップラー効果とマルチパスの関わりを注意し、真の第1受信波の最大相関を探さなければならない。前部と後部以外を隠した2つのM系列受信波を使って、ドップラー効果を計測するより、Fig. 3, 4の例のように、実際には-40から+40サンプル相当の1サンプリング分解能でスキャンした伸縮信号を使って2次元のM系列相関解析する方が的確に往復伝搬時間を計測することができた。

5. おわりに

現在までに往復の伝搬時間の計測から始まり、各センサーの時間遅れ修正、送受波器の動揺を正確に捉えた3次元位置計測、海底局の位置決め、音速構造の変動の影響を受けにくい海底基準点位置の計測と、一通りの処理ソフトを作成した。位置計算にはWGS 84地球楕円体を使用し、3軸の地球座標系で解析を行っている。海底基準局の正確な位置決めに至るには、更に音速度構造の多層構造と平均音速との差異、時間的変動の把握と補正、伝搬波の揺らぎの問題、動揺センサーのオフセット補正など、それらの処理の有効性を確認しながら組み込んでいく予定である。また、熊野トラフにおいては、海底基準局として4局設置したが、今回の計測では北側の1台はあまり良くなく、3台を用いて解析した。当初、音速構造の変動の影響を少なくする目的で正方形を45度回転した4頂点で1組の海底基準局システムを考えていた²⁾が、1台が不調のため、3局で音速構造の変動の影響を少なくする方法で計測しなければならなかった。

(2000年5月9日受理)

参考文献

- 1) 浅田 昭, 矢吹哲一朗, 熊野トラフにおける海底音響測地基準点の長期観測, 平成12年度海洋音響学会講演予稿集 PP. 111-114, 2000.
- 2) Asada, A. and T. Yabuki, 1999, Acoustic ranging system for ocean bottom geodesy and synthetic aperture technique of a multi-beam echo sounder, International Workshop on recurrence of great interplate earthquakes and its mechanism, proc. pp. 65-75, 1999.