

海底地殻変動観測における音響解析

富山 新一：海洋研究室

Analysis for Acoustic Data in Sea Bottom Geodetic Observation

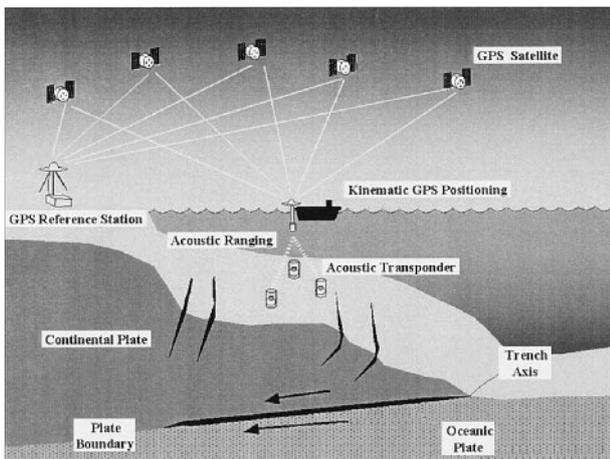
TOYAMA Shin-ichi : Ocean Research Laboratory

1 はじめに

海洋情報部では、キネマティック GPS による海上測位と海底に設置した基準局(トランスポンダー)と観測船との間の音響測距を組み合わせる手法により、海底基準局の位置を精密に決定し、プレート運動による海底地殻変動を検出するための観測を実施している(第1図)。

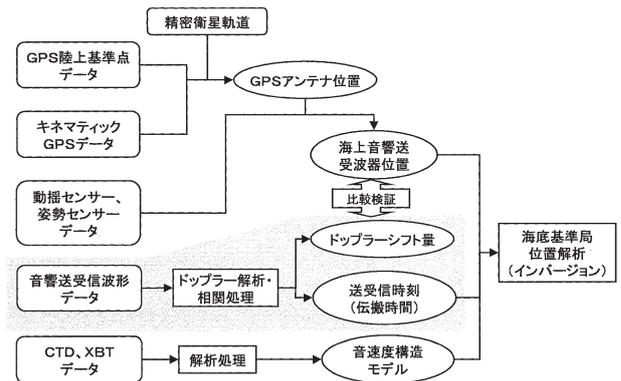
この観測は様々な要素技術の組み合わせにより実現しているものであり、個々の測定精度を高めることが、最終的な測定結果の精度向上のために必要である。第2図に、取得されるデータと解析の全体像を示す。解析は以下の3つの部分に大きく分けられる。

- ① GPS アンテナ位置から、音響送受波器の位置を決定



第1図 GPS-音響リンク方式による海底地殻変動観測の概念図。

Fig. 1 Schematic Image of observation of sea bottom crustal deformation with the GPS-Acoustic measurement system.



第2図 解析全体の流れ

Fig. 2 Flow chart of total analysis.

- ② 音響送受信データの相関処理により音波の伝搬時間を決定
- ③ ①, ②の結果及び音速度構造モデルより決定される船上局と海底局間の距離を求め、最小2乗法により海底局の位置を決定

本稿は、②を中心に、M系列音響信号を用いた測距システムにおける、相関処理による往復時間の精密決定手法について述べるとともに、浅田ほか(2001)の音響解析手法についての記述に基づき作成した音響データ処理ソフトウェアの内部処理の概要についてまとめたものである。

2 M系列信号による音響測距

2.1 M系列

ガロア体 $GF(2)^*$ の要素 0, 1 を係数とする p 次の多項式

$$f(x) = c_p x^p + c_{p-1} x^{p-1} + \dots + c_2 x^2 + c_1 x + 1 \quad \dots\dots(1)$$

があるとき、 $x^n + 1$ という形の多項式のうち、 $f(x)$ で因数分解できる最低次のものの次数 n (これを $f(x)$

の指数という)が 2^p-1 に等しい場合,これを $GF(2)$ 上の p 次原始多項式という. $GF(2)$ 上の p 次原始多項式の係数 $(c_n, c_{n-1}, \dots, c_2, c_1, 1)$ を用いた p 次の線形漸化式

$$a_n = c_1 a_{n-1} + c_2 a_{n-2} + \dots + c_p a_{n-p} \dots \dots \dots (2)$$

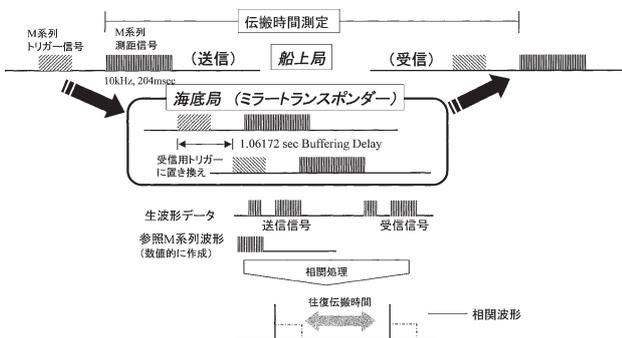
によって生成される $GF(2)$ 上の数列 $\langle a_n \rangle$ をM系列(Maximum-length linearly recurring sequence)という.

M系列は,擬似的にランダムな性質を持つ周期 $T=2^p-1$ のビット列になっている.M系列の0を+1に1を-1に対応させた系列は,位相が完全に一致したときにのみ高い自己相関を示し,それ以外では p がある程度大きければ自己相関がほぼ0になること,また,フィードバックシフトレジスタと呼ばれる簡単なデジタル回路でビット列を容易に生成することが可能であることから,電磁波や音波を用いた様々な計測に利用されている.

2.2 ミラートランスポンダーによる測距システム

海洋情報部が用いている音響測距システム概念図を第3図に示す.

海底局は1海域に通常3個から4個設置されており,これらを区別するために付与された海底局毎に異なる識別用のトリガー信号(8次M系列)に引き続いて測距のための本信号(9次M系列)が船上局



第3図 M系列音響信号による測距システム.
Fig.3 Ranging system using M-sequence acoustic signal.



第4図 測距信号の先頭部分
Fig.4 Example of lead part of ranging signal.

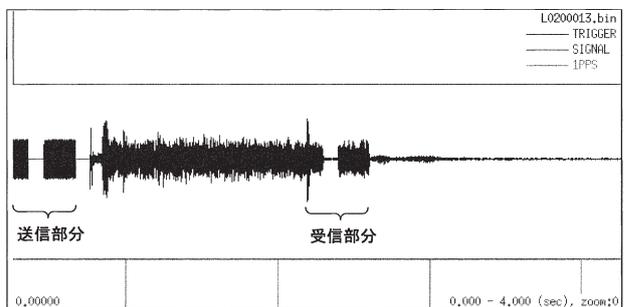
より送られる.海底局は,内部相関処理によって,自身に割り当てられた識別信号を受信したことを認識すると,受信波形を一定時間バッファに蓄えた後,トリガー信号部分のみを置き換えて返送する仕組みになっている.

搬送波は10kHzの正弦波で,M系列の0,1のビットに応じて4波長分を1ビットとして位相変調される.第4図は,実際に使用されている測距信号の先頭部分である.

3 ドップラー効果を考慮した音響相関処理

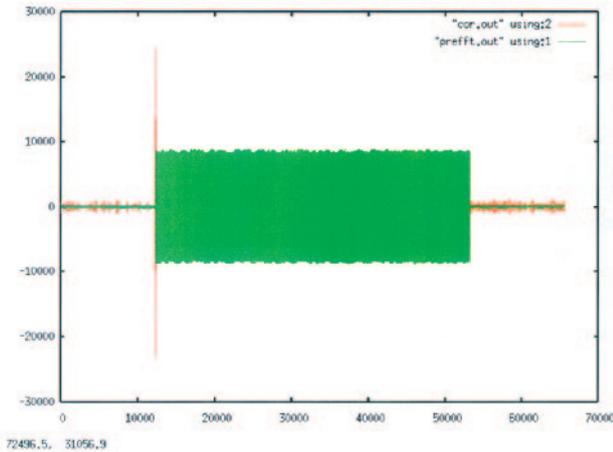
音響データは,ADコンバーターにより,200kHzサンプリングでデジタル化され,ハードディスクに収録される(第5図).数値的に作成された参照用サンプリングデータを用いて,送信波形部分との相関処理を行なった結果を第6図に示す.このように,M系列のランダムな性質を利用した相関処理を行なうことで,204msの信号を数波長以内にパルス圧縮して,高い時間分解能で送受信時刻を決定することが可能となる.

実海域における観測では,船体が動揺していることにより,送信時と受信時の海底局に対する視線速度の差に起因するドップラー効果のため,受信信号



第5図 音響送受信データの例
Fig.5 An example of transmitted/received signal.

* 2つの整数0と1を要素とする集合で,要素間の演算は法を2として行う.すなわち,加減算については,0+0=1+1=0-0=1-1=0,0+1=1+0=0-1=1-0=1と規約される.乗除算については実数体上の演算と同様.本文中の因数分解も,この演算規約により行なわれることに注意.



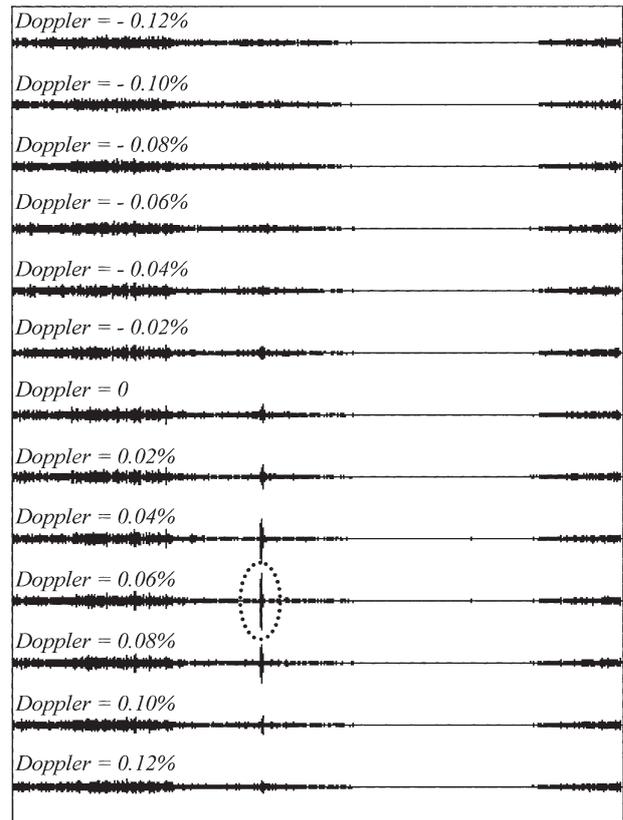
第 6 図 送信信号部分の相関処理結果(1)
Fig. 6 Result of cross correlation between transmitted signal and reference signal (1).

の周波数は変化している。この変化量は数%にも達する場合があります。受信波形部分については、単純に相関処理を行っても十分な相関結果が得られないことになる。

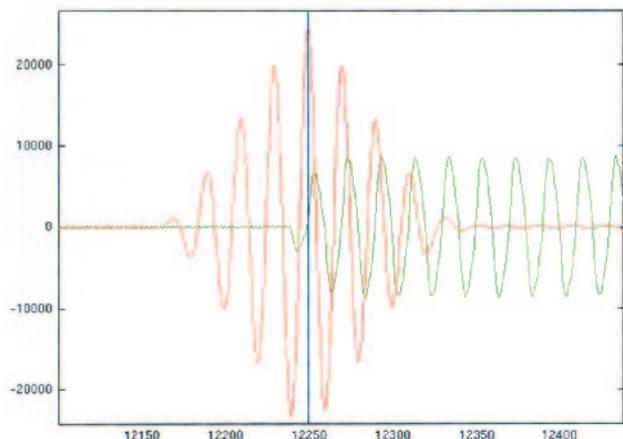
このため、ドップラーシフト量を何らかの手段で決定する必要があるが、現在は、段階的に周波数を変化させた参照波形を用いて、それぞれについて受信波形との相関処理を行ない、最も良好な相関結果が得られた周波数からドップラーシフト量を求めている。実際のプログラムでは、FFT 処理速度を上げるために、まずサンプリング間隔を 4 倍にしてドップラー変位量を大まかな段階に区分し、それぞれについて相関処理を行ない(第 7 図)、次に最も相関の良いドップラー変位量を中心にして、さらに細かく区分して通常のサンプリング間隔で相関処理を行ない、最終的なドップラー値を決定する。

4 参照波形の改善

第 8 図は、送信信号部分の相関処理結果のピーク位置を拡大したものである。中央のピークが正弦波の立ち上がり位置を正確に捉えているが、その両側の波長の整数倍ずれた位置にも相関のピーク(ここではサイドピークと呼ぶ)が対称的に存在している。これは用いている M 系列信号の 1 ビットが複数の正弦波から構成されているために、参照波形と受信波形の位相がちょうど整数波長ずれているときに、ビットの重なり部分で相関してしまうことによるも

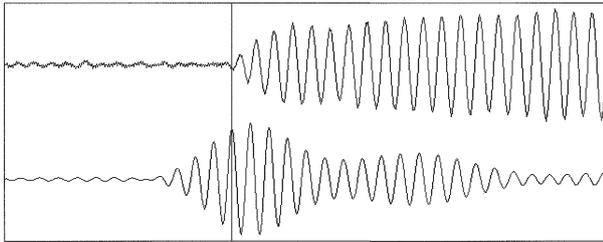


第 7 図 ドップラーシフト量の決定
Fig. 7 Determination of Doppler-shift parameter.



第 8 図 送信信号部分の相関処理結果(2)
Fig. 8 Result of cross correlation between transmitted signal and reference signal (2).

のである。一般に M 系列信号の 1 ビットが n 個の正弦波で構成されている場合、相関波形のサイドピークの高さは中央のピークから近い順に、中央のピークの高さの $(n-1)/n$, $(n-2)/n$, ..., $1/n$ となり、n が大きくなるにつれてサイドピークの存在する幅が広くなるとともに、振幅も大きくなるため、以下に述べるように、このサイドピークの存在が信号の



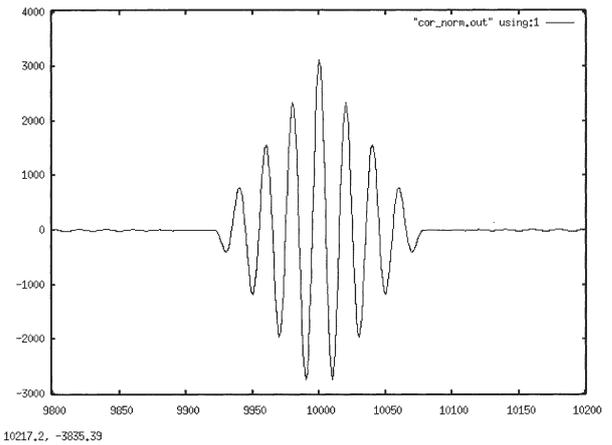
第9図 上：典型的な受信波形(上)とその相関処理結果(下)
 Fig. 9 Typical received signal (upper) and result of cross correlation (lower).

相関位置を精密に決定することに対する障害となる。

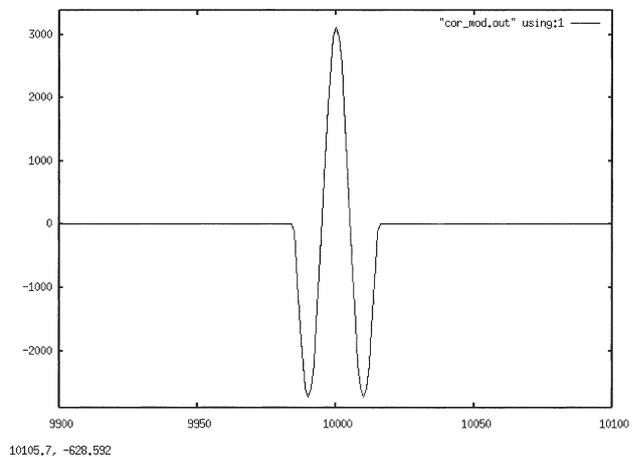
海中を往復して受信された信号は、伝搬中の減衰による波形の歪みやマルチパスが重なることなどにより変形している(第9図(上))。この波形の歪みと前述のサイドピークの存在のため、実際の受信波形の相関処理結果は第8図の送信波形の相関処理と異なり、第9図(下)に示すとおり最も高いピークの位置が必ずしも受信時刻とは一致しない。このことは機械的な処理により同定された受信時刻と、実際の受信時刻の間に誤差を生じさせる要因となる。

この誤差は、波長の整数倍という離散的な性質を持ち、往復の伝搬距離に換算して15cmから数10cmにも及ぶことから、現在のところ、解析結果の全てについて、人間の判断による確認作業及び必要に応じた再解析作業を要しているところである。この誤差が真の値を中心として対称な分布を持つことが期待できるならば、観測で得られる測距データの数が十分大きければ、統計的な効果により最終的な局位置の決定には大きな影響を及ぼさないため、上記のような確認作業は不要になると考えられるものの、現時点ではその性質が明らかでないため、例えばシミュレーションにより詳細な分析を行ない、誤差の性質を明らかにして、解析の効率や精度を向上させることも必要であろう。

前述のサイドピークの問題を軽減するため、浅田ほか(2001)で述べられている狭パルス化のアイデアを基に、同様の手法を現在作成中の解析ソフトウェアに導入することを試みたので、以下にその概要を述べる。



第10図 数値的に作成した仮想的な相関波形
 Fig.10 Numerical cross correlation data.

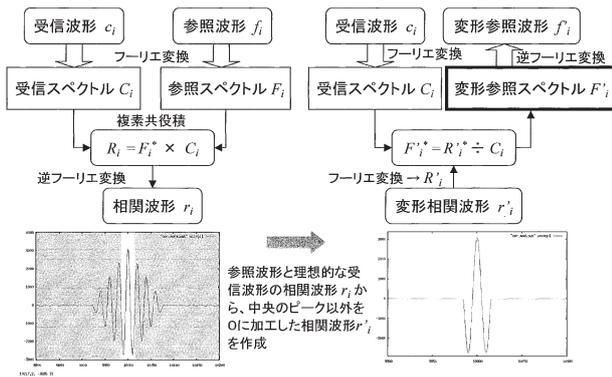


第11図 変形された相関波形
 Fig.11 Manually edited cross correlation data.

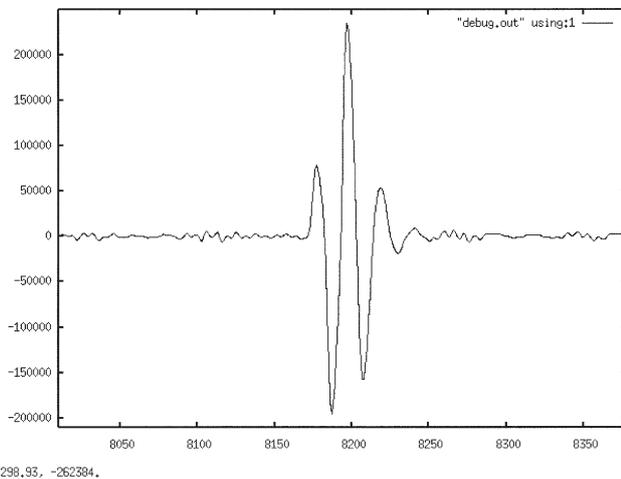
参照用サンプリングデータを f_i 、受信波形のサンプリングデータを c_i 、それぞれにFFT処理を行なって周波数領域に変換したサンプリングデータを F_i 、 C_i とする。通常の相関処理では、 F_i の複素共役と C_i の積 $R_i = F_i^* C_i$ に逆FFT処理を行なった結果 r_i が得られる相関結果である。

数値的に作成した理想的なM系列位相変調信号を参照信号として用い、同じ信号を適当な量(ここでは10000サンプル)だけシフトさせた信号を受信信号として用いて、通常の相関処理を行なった結果を第10図に示す。

次に、この仮想的な相関データを基に、中央のピーク以外の部分が0になるような編集を施した変形相関波形(第11図)を作成し、通常の相関処理の逆の



第12図 変形参照波形の作成手順
Fig.12 Procedure to create modified reference signal.



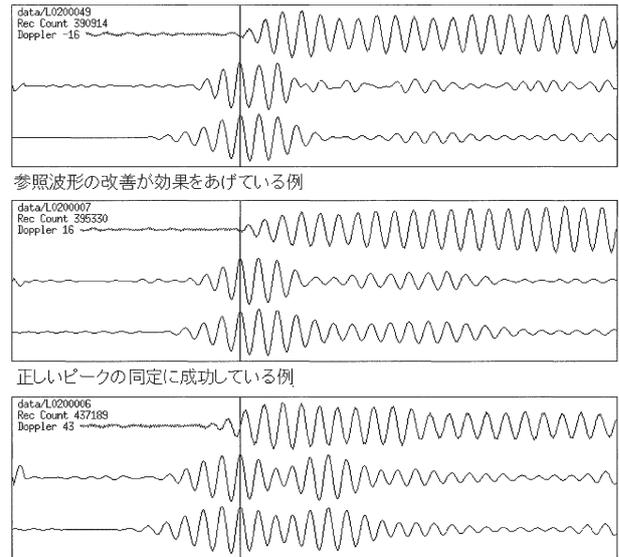
第13図 変形参照波形と送信波形の相関結果
Fig.13 Result of cross correlation between transmitted signal and modified reference signal.

手順をたどって、変形された新たな参照波形を得るのが今回採用した手法である。

第12図は、変形参照波形の作成手順をまとめたものである。実際のソフトウェアでは、各ドップラー量に対応した変形参照スペクトル F_i' をあらかじめ用意しておき、これを相関処理に用いている。

第13図は変形参照波形と実際の送信波形の相関処理結果である。サイドピークをほとんど無くすることに成功しているが、中央の両脇のピークが残っているのは、実際の送信電圧波形が純粋な正弦波とわずかに異なるためである。

この狭パルス化の手法を実際に得られた受信波形に適用してみたところ、全てのデータについては



正しいピークの同定に成功している例

正しいピークの同定に失敗している例(インタラクティブにピークを選び直す)

第14図 処理結果の例. 各図中、上：受信波形、中：変型参照波形との相関結果、下：標準参照波形との相関結果
Fig.14 Some results. In each figure, Upper: Received signal, Middle: Correlation with modified reference, Lower: Correlation with norman reference.

ないものの、サイドピークの数が増減したり、通常の場合では分離できなかったマルチパスが分離されるなど、ある程度の効果が見られる例が得られた(第14図)。

実際の送信波形は送信回路の特性のため正弦波からの僅かな歪みがある。また、前述のとおり受信波形は大きく歪んでいることから、サイドピークをこれ以上軽減するためには、よりいっそうの工夫が必要となるが今後の課題としたい。

今回作成したソフトウェアでは、これまで述べたような M 系列信号の相関波形の特徴を考慮して、以下のような手順で自動的に受信時刻を同定している。

- ① 信号の前方からデータを検索し、S/N 比を考慮して有意な信号と考えられる部分を検出
- ② 上の部分から順次ピークの高さを調べて、次のピークとの振幅の比が一定値以下になったピークの位置を受信時刻として採用

これにより、ある程度人間の判断と一致するピークの同定結果が得られているが、現時点では十分な割合で正しいピーク位置を同定することは出来てい

ないため、現在のソフトウェアでは相関結果をディスプレイに表示し、対話的にピークの同定位置を修正することができるオプションを設けている。今後、実データの処理を重ね、参照波形のさらなる改善及びピーク位置決定アルゴリズムの改良を行なって、完全な自動処理が可能となることを目指したい。

5 まとめ

海底地殻変動観測における M 系列信号を用いた音響データ処理を行うにあたって、ドップラー効果やサイドピークの存在など、実データの特徴に応じて必要となる解析上の留意点についてまとめた。

今後も引き続いてデータの性質の理解を深め、解析の精度を高めていくことが必要である。

また、今後の課題ではあるが、M 系列信号の解析に特徴的な誤差の性質について解明し、個々の結果についての誤差の情報を最終的な局位置解析への入力情報として与えることで、解析全般の精度・確度を向上させるとともに、解析結果をより詳細に評価することが可能となると思われる。

参 考 文 献

- 浅田昭, 矢吹哲一郎: 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, (2001).
- 日野幹雄: スペクトル解析 (朝倉書店), (1989)
- 伏見正則: 乱数 (東京大学出版会), 12-21, (1989)
- 長屋好治: 音波を利用した海底での歪計測に関する基礎的考察, 水路部研究報告, **31**, 67-76, (1995).