

## 超音波を利用した精密音響測距装置の開発

松尾成光\*・平野憲雄\*・片尾 浩\*\*・安藤雅孝\*\*

### Precise Acoustic Ranging System Using Ultrasonic Waves

Shigemitsu MATSUO\*, Norio HIRANO\*, Hiroshi KATAO\*\* and Masataka ANDO\*\*

#### Abstract

The Philippine Sea Plate and Pacific Plate are subducting under the Japanese Islands. Large earthquakes have occurred along these plate boundaries. It is important to measure the amount of movement of the plate directly for the research of earthquake occurrences. Ultrasonic waves are used for precise positioning of a reference point on the seafloor, where electromagnetic waves and lights are not transmittable in the sea water.

For seafloor positioning with a precision of several cm, we developed an acoustic ranging system using linear FM signals around 10 kHz. This report describes the measurement experiments using this system carried out in Osaka Bay. It is confirmed that precision of the acoustic ranging is 3 cm or less by the experiments under the condition of calm water. However, occasionally acoustic signals were disturbed by the multiplex reflections at the sea surface and/or the seafloor. It is important that the transducer of the surface unit is installed at the good position apart longer than 1.3m from reflectors such as the bottom of the ship.

*Key words* : supersonic wave, GPS, chirp radar, sea floor, crustal movement, acoustic ranging, multiplex reflection

#### はじめに

京都大学防災研究所地震予知研究センターでは、海底地殻変動観測の新しい試みとして、GPS と音響測距を組み合わせた海底測位システムの開発を行っている。

日本列島の下には、フィリピン海プレートや太平洋プレートが沈み込んでいる。これら海陸のプレートの衝突が日本海溝、相模トラフ、南海トラフなどを形成し、この付近に多くの巨大地震が発生する。このプレート境界付近でのプレート同士の相対運動を知ることが、地震の発生に関する研究に重要である。しかしながら、日本周辺のプレート境界はそのほとんどが海底下に存在するため、現在陸上で使われている地殻変動観測装置をそのまま使用することは不可能である。

我々は、海底での地殻変動を直接観測するために図 1 に

示すような観測システムの開発を行ってきた(尾鼻ほか, 1998)。観測システム全体は、人工衛星による電波測位系と海中での超音波を用いた音響測距系の二つの系から構成されている。電波測位系で海上点の位置を決定し、音響測距系は海上点と海底観測点間の距離を測定するのに用いる。海上点(観測船)の位置は、GPS(汎地球測位システム)を用いて、陸上測定点(基点)からの相対位置として決定する(デファレンシャルによるキネマティック測位)。また海上の移動体である観測船と海底の固定された観測点との間の距離は、超音波を使った音響トランスポンダによる音響測距で精密に測定する。

1998 年度にはパルス圧縮を M 系列信号による相関処理を用いた方法で、陸上点から 100 km 程度の範囲の海底で 10~20 cm の誤差による測定実績を出している(Obana *et al.*, in press)。1999 年度は、新たな測距技術を採用しさらなる精度向上を図った。それは、音響測距系にリニア FM(チャープ波形)によるパルス圧縮を採用し、数 cm 以内の精度を目標にしたことである。開発したシステムの基礎実験を、大阪湾の西宮ヨットハーバーと須磨の沖合いで行ったのでその結果を報告する。

1999 年 9 月 10 日受付, 1999 年 11 月 10 日受理.

\* 京都大学防災研究所技術室, \*\* 地震予知研究センター.

\* Division of Technical Affairs,

\*\* Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.

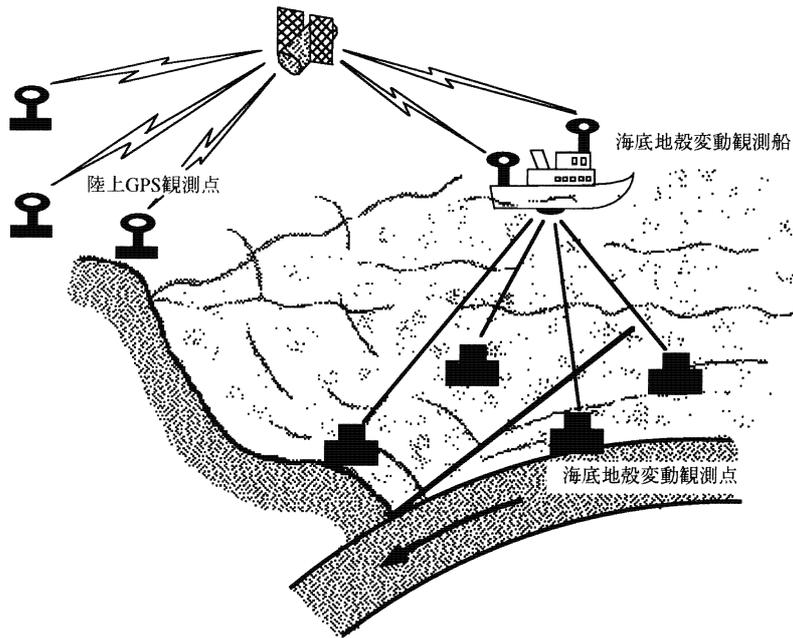


図 1. 海底地殻変動観測システム概念図

### 海中測距装置の構成と概要

海中において電磁波はほとんど伝播しないため、陸上で用いられる GPS や光波測距のような測位手法は使えない。そのためにここでは音響トランスポンダにより、海上の観測点（船上局）と海底に設置した基準点（海底局）の間の距離を超音波の伝播時間から精密に測る方法を採用する（佐伯，1989）。測距システム全体の構成は図 2 のブロック図に示す。この測距システムは船上局と海底局の二つのユニットで構成されている。また、観測船は測距中でも動揺するため、船上局トランスデューサの絶対位置も常に変化している。動揺するトランスデューサの位置を正確に知るために、GPS アンテナと方位計と傾斜計をトランスデューサに最も近い場所に取り付けて、絶対位置の精度を確保できるようにする必要がある。これについては別の機会に述べるとして、今回は海中精密測距部分のみについて述べる。

図 3 に測距原理図を示す。船上局のトランスデューサから測距信号 1 を送信して送信時刻とする。海底局は測距信号 1 の受信を確認すると、測距信号 2 を同じトランスデューサから船上局に送り返す。船上局では測距信号 2 を確認した時刻を決め、それまでの経過時間を計測する。 $TT_1$  はトランスデューサ内部で発生する圧縮遅れ時間、 $T_2$  はあらかじめ海底局内部で設定している遅れ時間、 $TD_1$  は船上局内部で発生する圧縮遅れの時間である。音波の往復伝播時間は  $T_1 + T_2 + T_3 - TT_1 - T_2 - TD_1$  である。なお  $TT_1, T_2, TD_1$  は既知の時間である。海中での音速は  $C_0$  とし

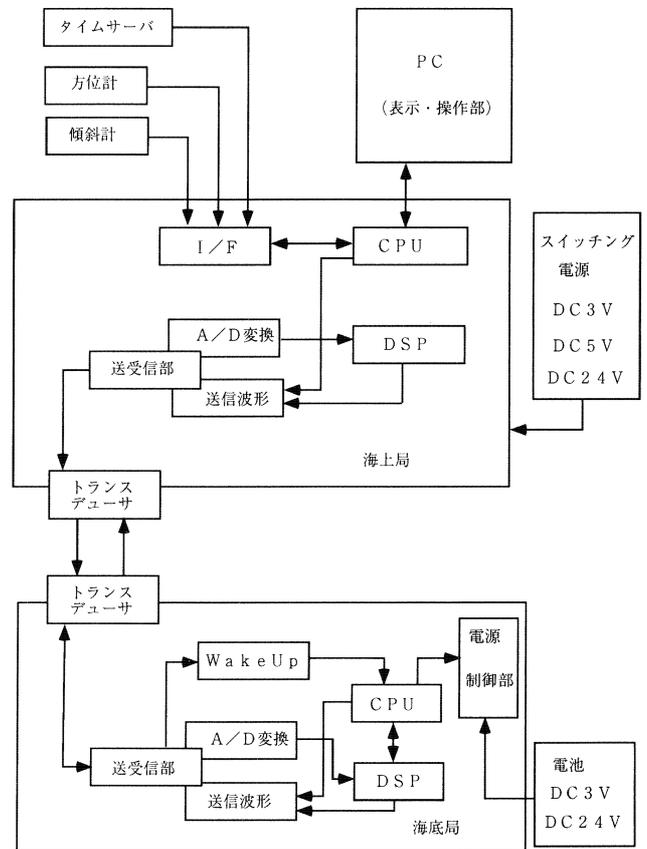


図 2. 海中測距システムブロック図

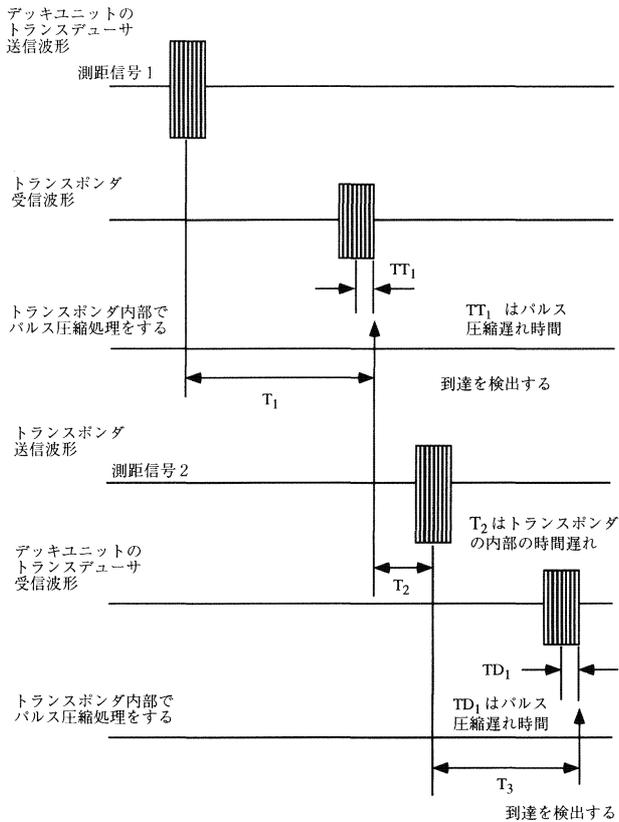


図 3. 測距原理図

て、船上局のトランスデューサから海底局のトランスデューサまでの距離  $L$  は  $(L = T_1 + T_2 + T_3 - TT_1 - T_2 - TD_1) / 2C_0$  により求める。

本実験では超音波の中心周波数を 10 kHz とし、8~12 kHz の周波数帯域でリニア FM チャープ波形を作っている。海上局からの測距信号 1 は 12~8 kHz のダウンチャープ波形 (信号幅 3.41 msec) を送信し、海底局からの測距信号 2 は 8~12 kHz のアップチャープ波形で同じ信号幅で返信する。船上海底両局ではこの信号を 16 ビット、75 kHz でサンプリングしている。なお、この場合は 1 個のサンプリング間隔が距離にして 1 cm に相当する。また、測距信号全体は 256 サンプルの長さとなる。図 4 に受信時刻を正確に割り出す手順を示す。受信信号から最大値を取る時刻を知り、その前後の波形データを入力波形とする。図 4 a は 12~8 kHz のダウンチャープ波形を入力したもので、入力波形と基本波形 (図 4 b) との相互相関結果をとり (図 4 c), その絶対値 (図 4 d) を移動平均し (図 4 e), それを微分した波形 (図 4 f) から最大振幅の p-p がゼロレベルと交わる位置を受信時刻とする。実際に海中を伝播すればノイズが混入し S/N が悪くなり、検出が困難になると予想される。

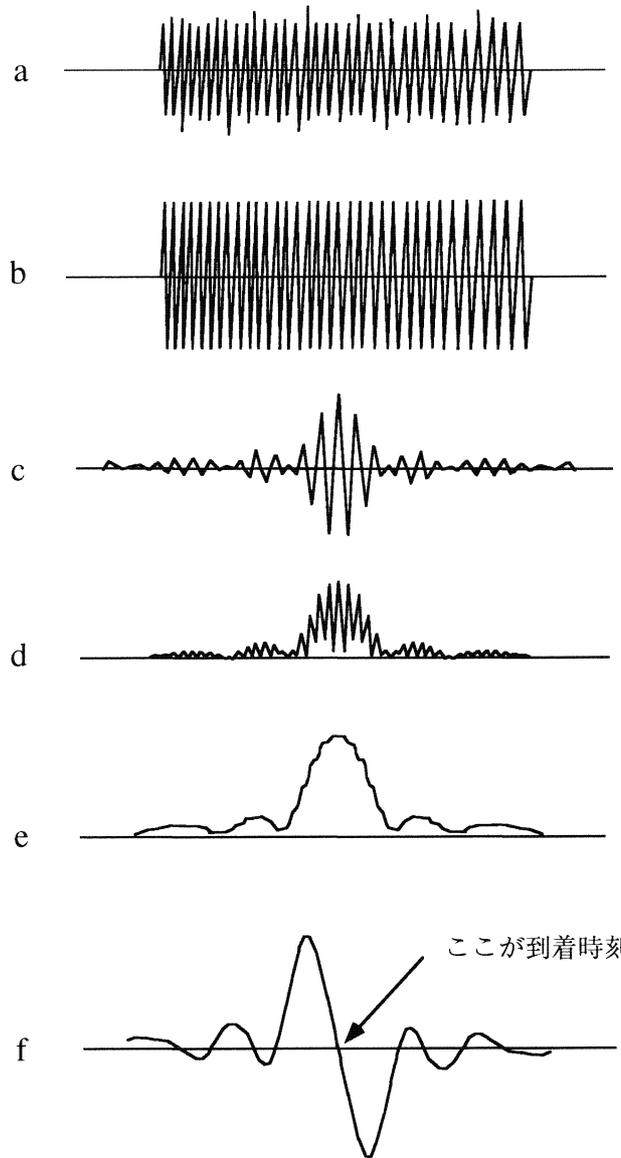


図 4. 受信時刻を正確に求める手順

(a) 12~8 kHz のダウンチャープ入力波形, (b) 基本波形, (c) 入力波形と基本波形との相互相関結果, (d) 絶対値を取った結果, (e) 移動平均した結果, (f) 微分結果。

## 実 験

### 1. 西宮ヨットハーバーでの計測精度の実験

試作した海中測距システムの計測精度および作動状態を調べるために最初は水槽実験を行った。しかし、水槽の壁面および水面からと思われる多重反射波の影響が大きくなり、正常な受信波形が取り込めず、水槽実験が困難だった。そこで、テストフィールドとして水深 7~8 m の西宮ヨットハーバーで実験を行った。実験の状況を図 5 (試験 1: 距離固定, 試験 2: 距離可変) に示す。

試験 1 では、ヨットハーバーの棧橋から保持ロープで両局のトランスデューサを吊り下げ、潮の流れで動かないよ

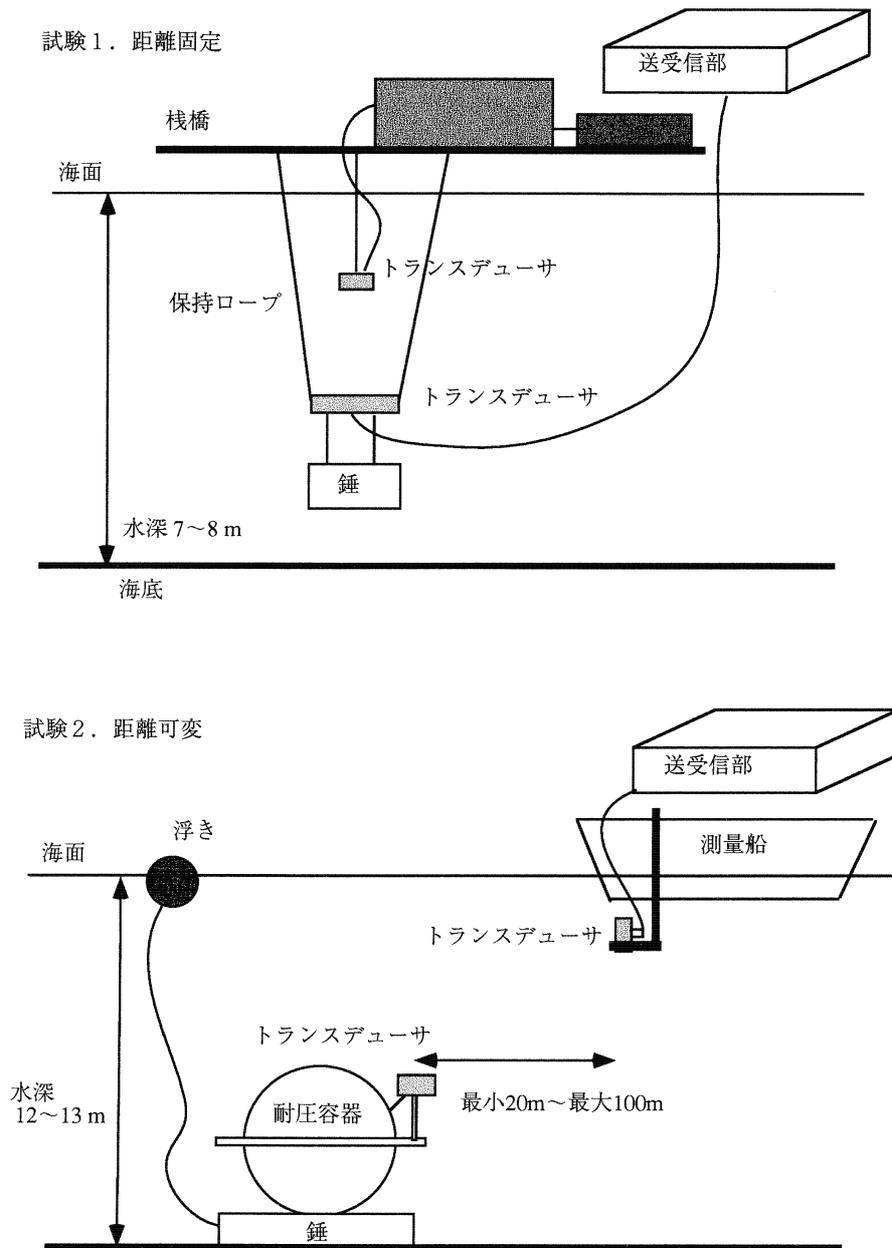


図5. 測定距離試験の状況（西宮ヨットハーバー）  
 試験1：距離を固定，試験2：距離可変。

うに重りをぶらさげた。船上局側のトランスデューサはロープで係留して、鉛直方向10cm間隔でロープの長さを変えていながら距離の変化を測定した。

試験2では、海底局を耐圧容器に組み込んで海底に着底させた。ここでは、一方の船上局側のトランスデューサは実験船の左舷に固定した長さ4mのパイプの先端に取り付けた。海底局直上付近では問題なく測定できた。試験を行った場所が水深7~8mの浅海であり、トランスデューサに指向性があるため、船上局と海底局が300m以上離れた測定はできなかった。

図6に試験1の結果の一部を示す。縦軸に距離(m)、横軸に測定回数のグラフで、ロープの長さを10cm毎に変更して測定距離を固定した後の測定結果である。ロープ長についての測定のばらつきは3cm以下に収まっている。また標準偏差値は1cmである。ロープ長を変えるとそれにしたがって距離も忠実に変化していることがわかる。この時の水中音速は1,500m/sと仮定した値を使った。また、S/Nの問題では船のスクリュー音が影響大であることも判った。

## 2. 須磨沖の実験

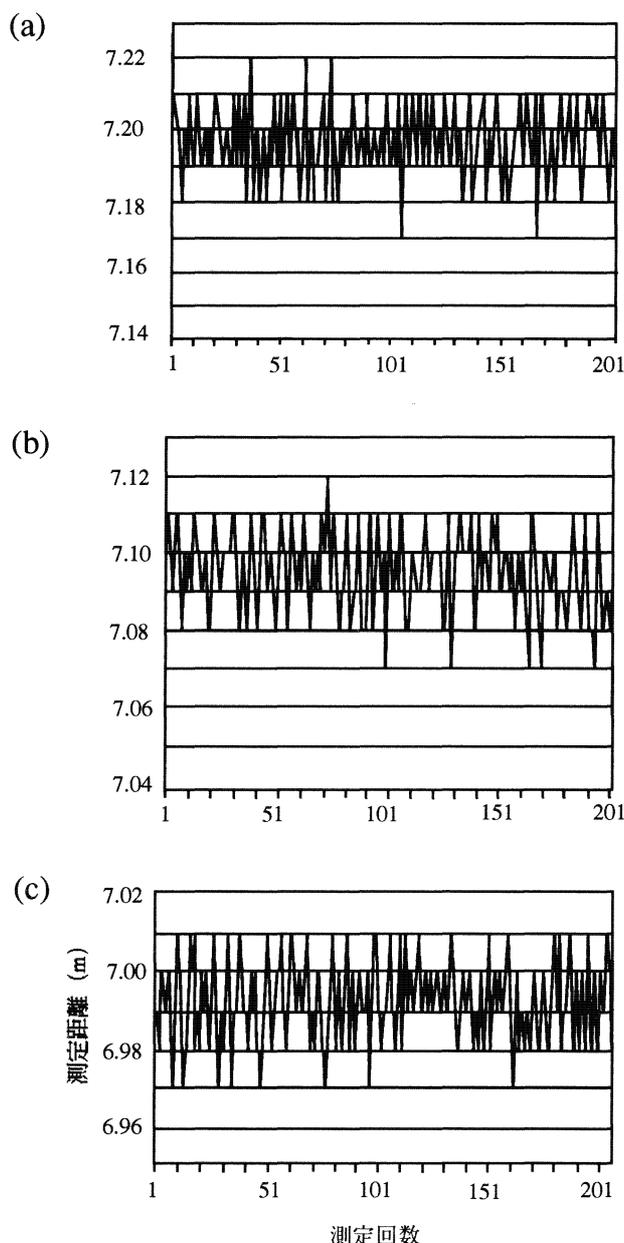


図 6. 測定距離試験（西宮ヨットハーバー）試験 1 結果  
 (a) ロープ長 7.20 m, (b) ロープ長 7.10 m, (c) ロープ長 7.00 m.

前述のように西宮ヨットハーバーでの計測精度の実験では、短い距離の場合ではあるが 1 cm 程度の精度で距離を測れる事がわかった。次に、さらに水深の深い場所で試験を行った。実験日は 1999 年 6 月 14 日、場所は神戸市の須磨沖合いで潮の流れの早い海域である。

ここでは、海面や海底の多重反射およびトランスデューサの指向特性を含めた 3 通りの実験、

実験 1：距離可変＝固定した海底局と移動体との間の測定の場合、

実験 2：距離固定＝海底局を船上から吊り下げた場合、

実験 3：距離固定＝船上局側も海底局を吊り下げているロープを利用し、海面や船底から離して固定した場合、を行った。

実験 1 の概念図を図 7 に示す。海底局は水深約 40 m の海底に着底させた。船上局側のトランスデューサは、西宮での実験 2 と同じく実験船の左舷に固定したパイプの先端である。また、海面から 1.5 m で船底より深く海底へ向けた形で固定した。

図 8 に 2 秒毎の測距データを示す。縦軸は距離 (m)、横軸は計測回数である。海底局を海底に設置した場合には、実験船との位置関係で計測が出来ない場合があった。原因としては、直接波と反射波とのマルチパスの影響、海底局から遠く離れた場合にはトランスデューサの指向性の対向状態の悪化が考えられる。正常に計測出来ている場合の距離は最大で約 120 m であり、波線の角度としては海底局トランスデューサからみて垂直方向より 70°であった。状況が良い場合は連続的に計測が可能であり、実験船の移動の軌跡が結果のグラフに表れている。

実験 2 は、実験 1 で測定不能になった原因の調査のため急速実行した。まずトランスデューサ同士が互いに向き合うように海底局をロープで船より吊り下げて距離を固定した (図 9 参照)。ただし船上局側トランスデューサと海底局のトランスデューサ間の距離は正確に実測していない。船上局側トランスデューサの取り付け方法は実験 1 と同じである。図 10 に結果を示す。データに約 51.5 m の距離を示すものと、53 m 強の値を示すものの二つのグループが表れているのが特徴的である。各グループの中でもばらつきが大きい。これはロープの伸びと船の揺れによるパイプ先端のふらつきと考えられる。海底局を海底から離れたところにロープで固定したので、海底局側でのマルチパスの影響は無くなっていると思われる。一方、左舷側に装備した船上局側トランスデューサではマルチパスの影響が出ている可能性がある。距離の短い方が直接波と思われるが、もう一つのグループとの距離差が約 1.5 m あるので、海面からあるいは実験船の船底からの反射波と考えられる。

実験 3 は、船の揺れによるトランスデューサ間の方向のふらつきをなくすのと、船底からの反射をなくすために、海底局を吊り下げている同じロープに船上局のトランスデューサを取り付け、さらに船底から離して図 11 のように配置した。実験 3 の結果を図 12 に示す。船上局側と海底局のトランスデューサの両方にマルチパスの影響はなく、距離は約 48 m となり測定誤差も小さくなり連続して安定している。

### 考 察

須磨沖の実験 1 で海底局を海底に設置した場合には、実験船との位置関係で常時の計測が出来なかった。原因の一

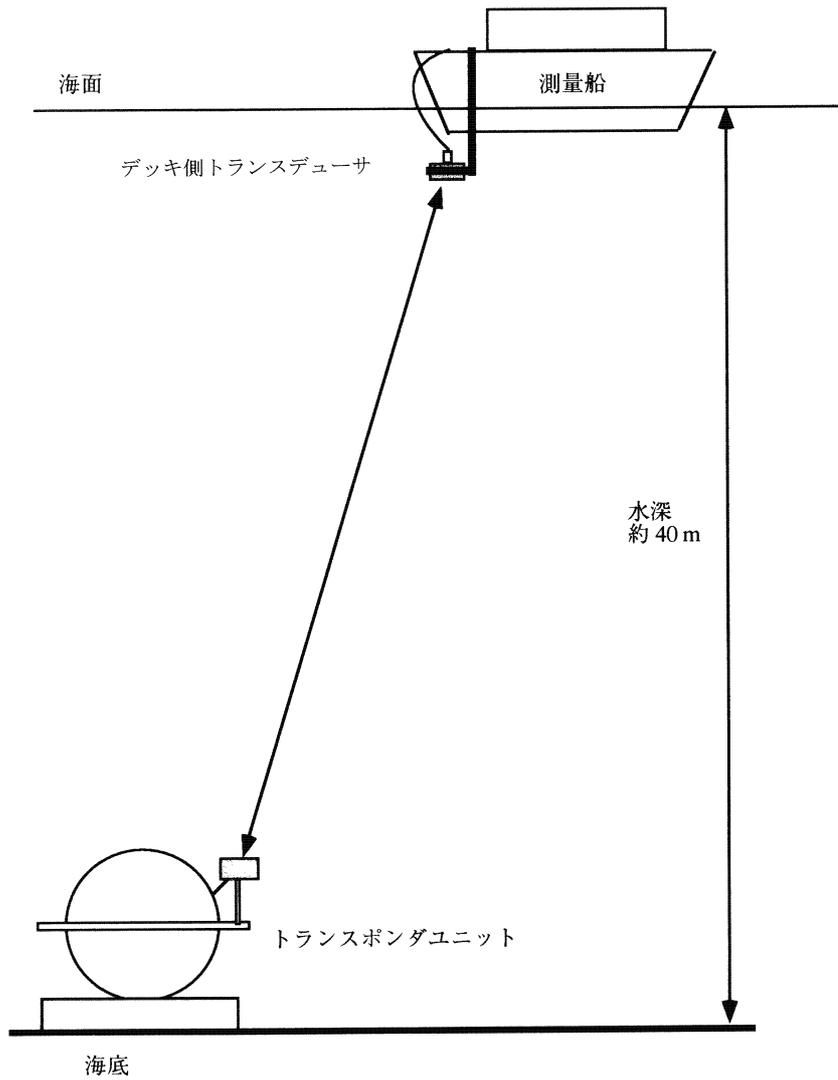


図 7. 須磨沖での海底局（固定）と船上局（移動体）との距離が可変の場合の測定試験

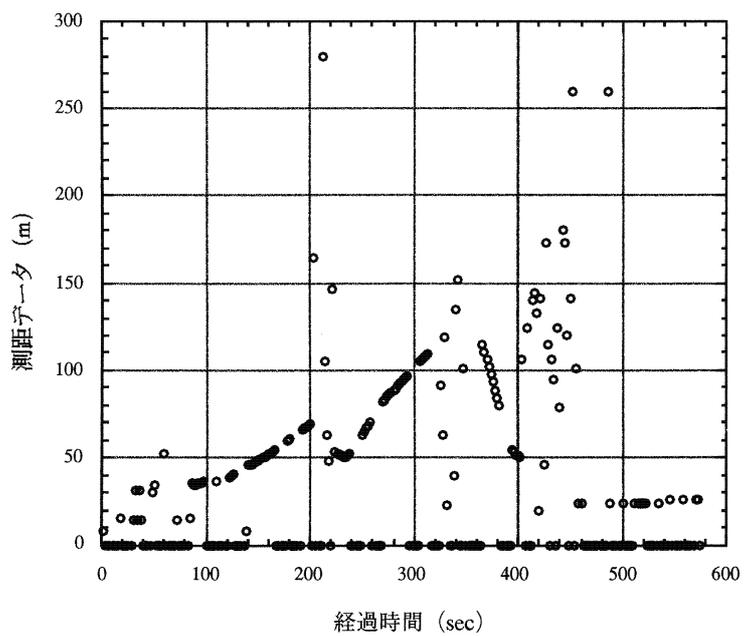


図 8. 須磨沖実験 1 (図 7) の 2 秒毎の測距データ (全体)

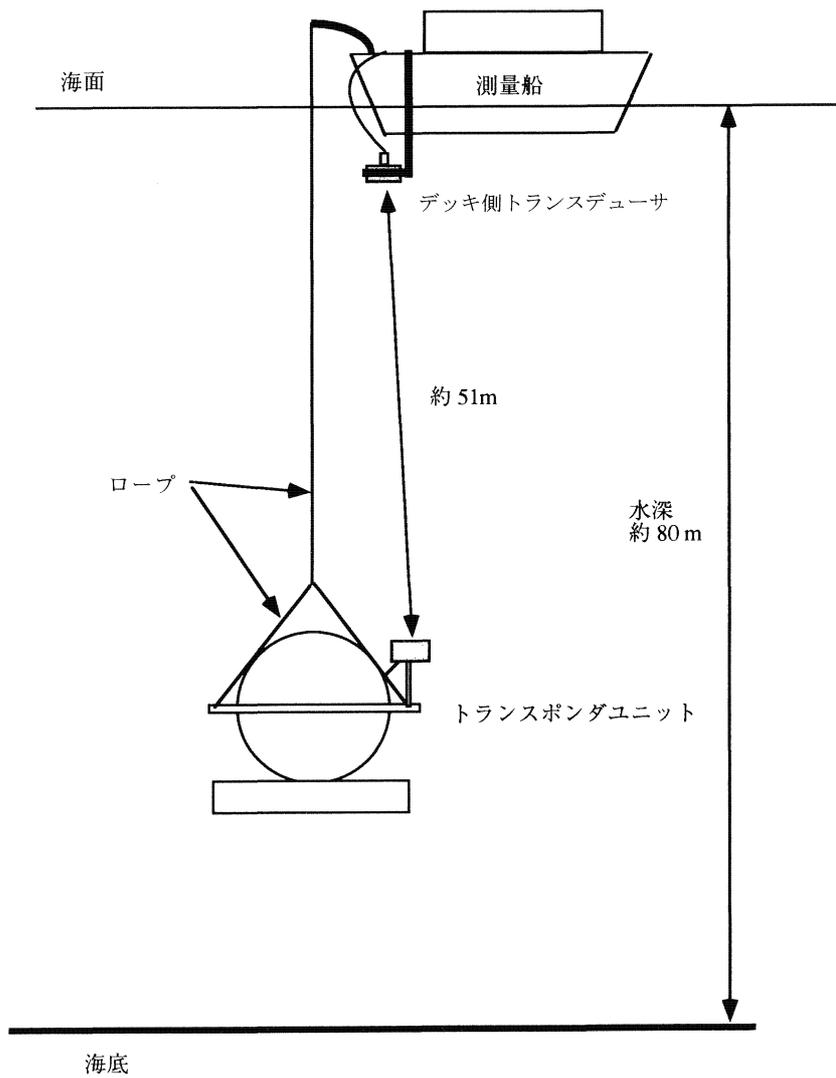


図 9. 海底局を船から吊り下げて距離固定した場合の計測試験 (須磨沖実験 2)

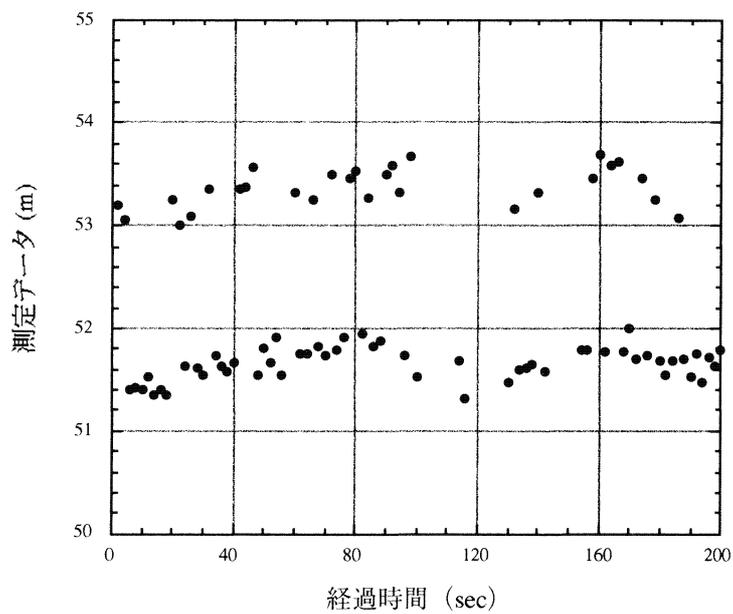


図 10. 須磨沖実験 2 (図 8) での 2 秒毎の測距データ (反射したデータが含まれる)

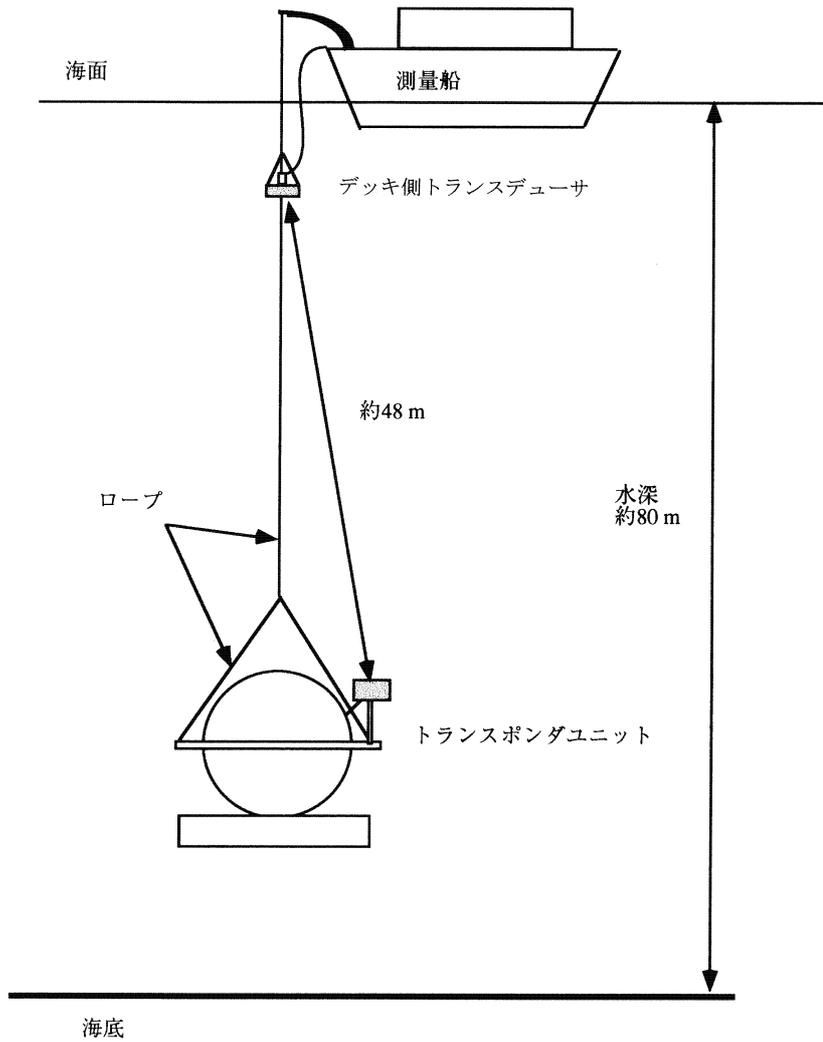


図 11. 船上局側のトランスデューサを海底から離れた計測試験 (須磨沖実験 3)

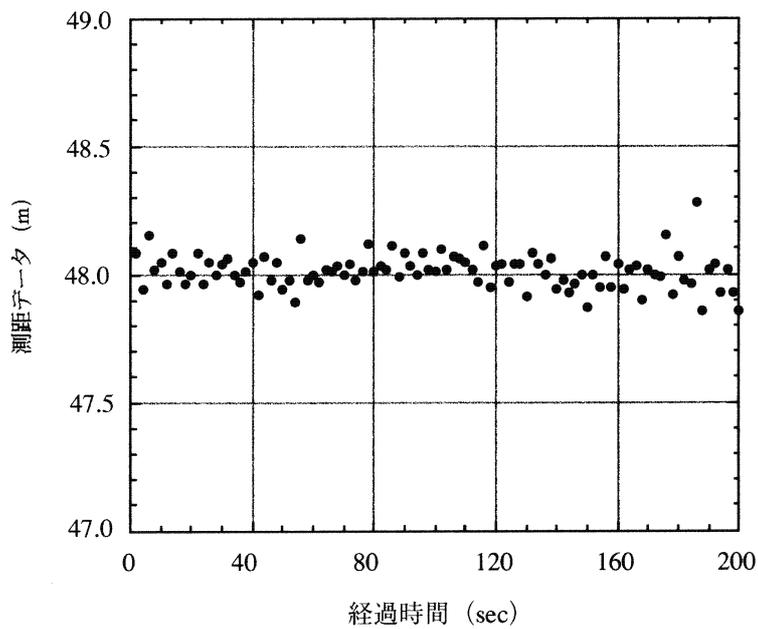


図 12. 須磨沖実験 3 (図 10) の 2 秒毎の測距データ

つとしては、送受信方向がトランスデューサの指向性の範囲からはずれたことが考えられる。海底局が傾いた状態で着底すると測定可能範囲が真上ではなくなり、測定が困難になる。トランスデューサが常に真上に向くような工夫をすれば海底傾斜の影響は軽減できるであろう。いずれにしても指向性が強いので、浅海では測定可能な範囲は狭くなる。ただし水深が増すほど海面での測定可能範囲も広がる。トランスデューサが常に真上を向くような設置法を工夫すれば、深い海底に設置した場合は指向性の問題はほとんど無くなるであろう。

マルチパスについては、海面や海底からの多重反射が考えられる。直接波との識別が困難な場合は測定不能になる。図 4e のように一つの山の形をした波形ならば理想だが、直接波と反射波とが重なりあったものを受信すると、相互相関波形も複雑となり、微分波形の最大 p-p が不明で計測できない場合があり得る。送信パルスの幅は 3.41 msec だから、2.56 m 以上の差であれば別個の受信パルスとして処理できる。従って、反射経路を考えてトランスデューサは 1.3 m 以上の距離で反射物体から離さねばならない。須磨沖の実験 2 (図 10) で二つの測定値グループの差が 1.5 m なのは、受信パルスが重なったが、なんらかの理由で、最大振幅の p-p を検出できた。本来は重なったパルスは干渉したものとなり、微分波形も複雑になっているはずである。したがって正しい位置を検出していない可能性があり直接波のデータであっても精度の信頼性がない。須磨沖の実験 3 (図 12) から、二つの測定値グループがなくなったのは、反射物体 (船体) から離れた結果、受信パルスが重ならなくなったためと考えられる。たとえ反射波が出て識別できれば測定データは信用できるが、二つの測定値の差が 2.5 m 以内のデータであれば数 cm の精度の議論には採用できない。質の良いデータを得るには不必要な反射を減らさなければならない。トランスデューサは海底、海面、船体など反射体となりうる物体から 1.3 m 以上離れた位置に設置する工夫をする必要がある。

### 今後の課題

今回行った試験結果の計測精度は 3 cm 以内に収まったが、須磨沖の実験において計測不能の場合が多く生じる事がわかった。予想される原因として、海底局が自由落下による着底状態によっては傾く場合がある。このため指向性の範囲も傾き、真上の海面では測定できなくなる恐れがある。改良点として、海底局のトランスデューサ固定法にジンバル機構を採用し (図 13)、海底局の真上の海面で測定できるようにするつもりである。本システムの次の段階での実験は、1,000 m クラスの深い海域での測定実験であ

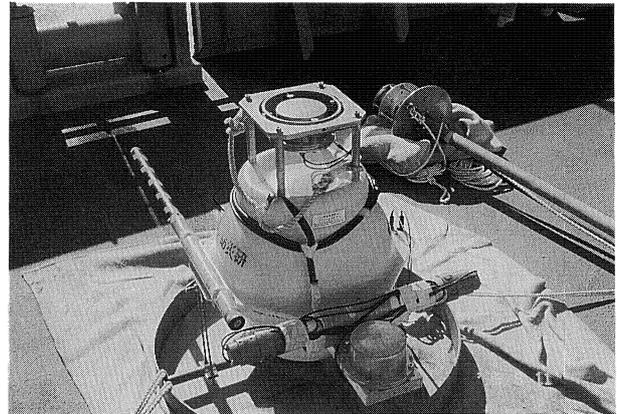


図 13. トランスデューサ取り付けにジンバル機構を採用した改良型海底局

る。M 系列を使ったシステムでは十数 cm の精度で測定成果を出している (安藤ほか, 1999)。我々は、さらなる精度向上を目指してこのチャープ波形方式によるシステム開発も試みている。超音波を使う限りは伝播する距離が長くなると媒体の性質 (水温、塩分濃度、水圧等の情報) によって測定精度が大きく変わる。測定精度を上げれば媒質の影響も詳しく現れるはずである。船上局と海底局との間を多点で測定すれば、媒体の性質すなわち海中の音響速度構造が詳細に明らかになり、同時に距離精度の向上が期待される。問題を解決するためにも、詳しいデータを豊富に取り込む事を今後の課題としたい。

謝辞：今回の海底変動測定システムの製作にあたっては古野電気株式会社船用機器事業部開発部の森松秀治氏および早乙女信也氏に参画して頂いた。また、西宮ヨットハーバーと須磨沖の実験には、古野電気所属の実験船「スピリットオブフルノ 21」を使用させていただき、同船の船長の福崎 浩氏、京都大学大学院理学研究科博士課程の田所敬一氏、同じく修士課程の永井直子氏にもご協力を頂いた。

### 文 献

- 安藤雅孝, 1999, 海底地殻変動測定の新しい試み, 平成 7, 8, 9 年度科学研究費補助金 (基盤研究) 研究成果報告書。  
 尾鼻浩一郎・片尾 浩・芹澤重厚・松尾成光・安藤雅孝・岸本清行, 1998, 海底地殻変動観測のための精密音響測距について, 京都大学防災研究所年報, 41 B-1, 67-75。  
 Obana, K., Katao H. and M. Ando, 1999, Seafloor positioning system with GPS-acoustic link for crustal dynamic observation, *Earth Planet and Space* (in press).  
 佐伯理郎, 1989, 海洋音響断層観測システムの開発のための送受信装置の実海域実験, 海洋調査技術, 1, 45-55。