

## 研究ノート

### 海底地殻変動観測用音響トランスデューサの 音響位相特性と音響位相中心

望月将志<sup>\*1</sup>, 成田誉孝<sup>\*2</sup>, 石川直史<sup>\*3</sup>, 吉田善吾<sup>\*1</sup>, 河合晃司<sup>\*3</sup>, 松下優<sup>\*4</sup>,  
川井仁一<sup>\*3</sup>, 淵之上紘和<sup>\*5</sup>, 松本良浩<sup>\*6</sup>, 藤田雅之<sup>\*7</sup>, 浅田昭<sup>\*1</sup>

Acoustic phase characteristics and phase centers of the acoustic transducers for seafloor geodetic observation

Masashi MOCHIZUKI<sup>\*1</sup>, Yoshitaka NARITA<sup>\*2</sup>, Tadashi ISHIKAWA<sup>\*3</sup>, Zengo YOSHIDA<sup>\*1</sup>,  
Koji KAWAI<sup>\*3</sup>, Hiroshi MATSUSHITA<sup>\*4</sup>, Jin'ichi KAWAI<sup>\*3</sup>, Hirokazu FUCHINOUE<sup>\*5</sup>,  
Yoshihiro MATSUMOTO<sup>\*6</sup>, Masayuki FUJITA<sup>\*7</sup> and Akira ASADA<sup>\*1</sup>

#### Abstract

Institute of Industrial Science, University of Tokyo and Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard have been conducting seafloor geodetic observations since 2000. Sufficient observational results to discuss the system and the observational method have been established as we accumulated the experiences of the observations. Issues and knowledge that we have through the observations should be fed back to the system and further observation for improvement. One of such issues is one inherent in acoustic transducers for acoustic ranging. Ranging errors were caused by the operational principles of the transducers and the reference point set on the point at the top center of the transducers. In order to take measure to this issue, tank tests were conducted to evaluate the ranging characteristic curves of the acoustic transducers. And then the acoustic phase centers of the transducers were deduced from these curves. The comparison of the acoustic phase centers of two types of the acoustic transducers, that is, the cylindrical and the spherical curved disk transducers should be needed to retain the continuity of the long-term seafloor geodetic observation.

#### 1 はじめに

東京大学生産技術研究所と海上保安庁海洋情報部は、GPS 音響結合方式による海底地殻変動観測システムの開発を行い、このシステムを利用した海底地殻変動観測網の展開を行ってきた（浅

田・矢吹，2000，2001；Fujita，2003；Mochizuki et al.，2003）。2000年に最初の観測点を熊野灘に設置したのを皮切りに、現在までに、18の観測点を日本島弧太平洋側の前弧域を中心に設置し、釜石沖から室戸沖までを覆う長大な海底地殻変動

†Received 04 January 2007；Accepted 05 February 2007.

- \*1 東京大学生産技術研究所 Institute of Industrial Science, University of Tokyo
- \*2 第七管区海上保安本部 7<sup>th</sup> R.C.G. Hqs.
- \*3 航法測地室 Geodesy and Geophysics Office
- \*4 第三管区海上保安本部 3<sup>th</sup> R.C.G. Hqs.
- \*5 測量船拓洋 R/V TAKUYO
- \*6 海洋研究室 Ocean Research Laboratory
- \*7 技術・国際課 Technology Planning & International Affairs Division

観測網が構築されている。この観測網により、太平洋プレートおよびフィリピン海プレートの沈み込みに伴った、島弧海底地殻の変形を、海底で直接、計測しようとする試みを続けている。

この観測を開始してから7年の歳月がたち、観測回数の多い観測点では、プレート内変動の速度ベクトルを検出することや (Fujita et al., 2006), 地震に伴う変動を検出することに成功しており (Matsumoto et al., 2006), 現行の観測システムが実用になったシステムとなっていることを示す結果が得られている。

しかしその一方で、観測の回を重ねる中で、机上ではわからなかったこの観測システムの問題点が明らかになってきている。我々が検出を目指す海底地殻の変形は、年間数 cm から 10 cm といった速さで収束する海洋プレートの運動に伴ったものが主であり、これに応じた変位量をもつ。これを数年間の繰返し測位観測によって検出することを考えれば、少なくとも cm オーダーの測位精度が必要であり、そうした高い精度を目標とする本観測システムでは、計測誤差を生じさせる可能性のある問題点を継続的な観測を通して発見し、一つずつ対処して、観測システムの高精度化、安定化を図っていく必要がある。我々が現在着目し、観測・解析手法の上で改善を施そうとしている、そうした問題点の1つが、音響トランスデューサの形状および振動子の発振原理に起因する計測誤差である。

本稿では、音響トランスデューサに起因する音響測距の問題点を提示するとともに、解決に向けた我々の取り組みについて述べる。

## 2 音響トランスデューサ

現行では2種類の音響トランスデューサを音響測距に使用している。1つは米国 ITC 社製の円筒型トランスデューサ (ITC-3148) である (Fig. 1)。このトランスデューサは、様々な用途で利用されている汎用的なもので、海底地殻変動観測システムの開発当初より使用している。船上局のトランスデューサとしては、2005 年度より



Fig.1 Cylindrical acoustic transducer on the seafloor mirror transponder.

新しいタイプのものへと移行し、実質的に使用されていないが、現在も海底局のすべてでこのトランスデューサを使用している。

円筒型トランスデューサは、リング形状の振動子とその内部に持ち、その振動子が半径方向に振動することによって音響信号の送受信を行う (Fig. 2)。この動作原理に起因して、例えば、振動子の振動方向とそれに直交する方向、つまりトランスデューサの軸方向とでは、同時に送受信された音響信号であってもその位相が  $180^\circ$  ずれたものになってしまうといった、角度に依存した位相ズレが送受信信号に生じることが考えられる。

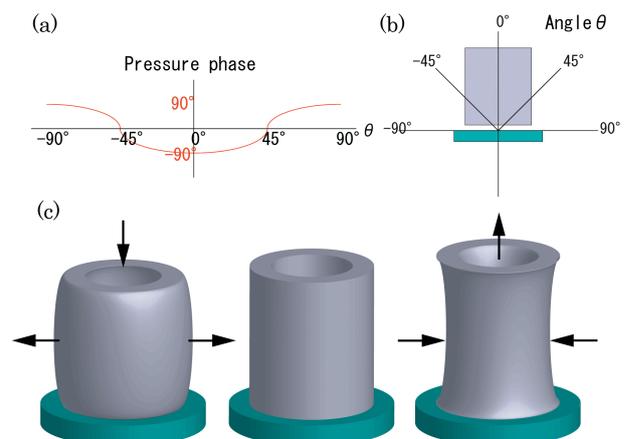


Fig.2 (a) Acoustic pressure phase of the cylindrical acoustic transducer versus angle  $\theta$ . (b)  $\theta$  is measured from the axis of the acoustic transducer. (c) Schematic images of the oscillation mode of the cylindrical oscillator.



Fig. 3 Current acoustic transducer employed on the on-board unit.

測距に利用する信号の搬送波周波数が 10 kHz であることから、その波長はおおむね 15 cm となり、 $180^\circ$  の位相ズレが生じれば 7.5 cm 相当の測距誤差が生じ得ることになる。汎用品であり、利用しやすい反面、こうした特性を十二分に把握した上で利用しなくては、cm オーダーの水中測距は達成し得なくなる。

もう 1 つは、米国 LinkQuest 社の Xiaolong Yu 博士が設計をし、ITC 社が製作を行った、球面型振動板をもつ球面型トランスデューサである (Fig. 3)。これは、2005 年度の観測より、船上局のトランスデューサとして使用し現在に至っている。

曲率を持つ振動板を振動させることで音響信号の送受信を行う動作原理になっている (Fig. 4)。送受波ビームがトランスデューサの軸方向にあり、トランスデューサの軸に対して  $\pm 50^\circ$  の範囲が 6 dB 減衰点で、このビーム内での位相反転が生じないように設計がなされている。船上局-海底局間の測距の多くは、双方のトランスデューサの成す角度が  $0 \sim 50^\circ$  の範囲で実施されるので、これに対応した設計である。船上局側のトランスデューサを、前述の円筒型トランスデューサからこのトランスデューサへ変更することで、位相特性による水中測距への影響を減じることを目指している。

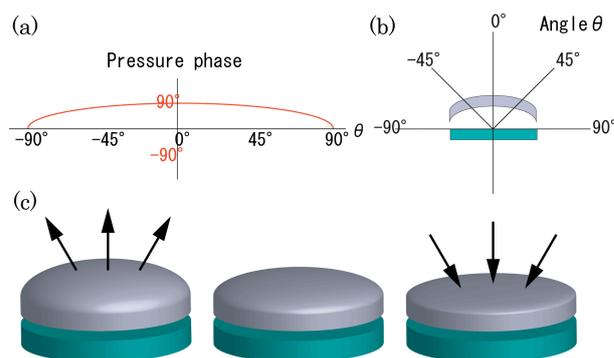


Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the spherical curved disk acoustic transducer.

### 3 水槽試験

音響トランスデューサの性能情報として、メーカー側が振幅特性を提示することはあっても、位相特性を提示することは少ない。我々の海底地殻変動観測で使用している 2 種類の音響トランスデューサについても例外ではない。cm オーダーの測距、測位を目指す我々にとって音響トランスデューサの位相特性を把握した上で観測を実施することは必須である。

2 種類の音響トランスデューサの位相特性を計測する試験を、東京大学生産技術研究所海中工学研究センターの試験水槽にて実施した。この試験水槽は AUV の開発用に設計、設置されたもので、700 cm (W)  $\times$  700 cm (D)  $\times$  900 cm (H) の大きさを有するものである。水槽中央部付近に、工事現場等で利用されている汎用の足場パイプとユニバーサルジョイントを組み合わせた試験治具を設置して計測を行った (Fig. 5)。

計測の概要を Fig. 6 に示す。足場パイプによって水槽中に固定されたハイドロフォンに対し、音響トランスデューサは常に一定距離 (Fig. 6 において  $L=150$  cm と固定する。) を維持したまま、ユニバーサルジョイントによって角度 ( $\theta$ ) を変えられるような仕組みにしてある。音響トランスデューサを送波器に、ハイドロフォンを受波器として、 $L=150$  cm を維持しつつ  $\theta$  を変えながら音響測距を行い、 $\theta$  の変化によって、 $L=150$  cm という実距離の音響測距値がどのように変化するかの把握を行う。本論文では  $\theta$  を  $0^\circ$  から  $10^\circ$  刻

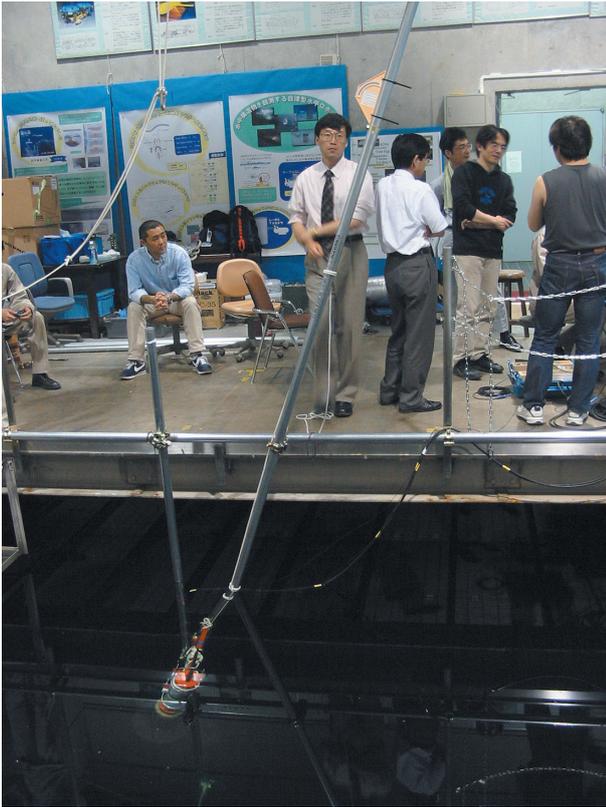


Fig. 5 A snapshot from the water tank test.

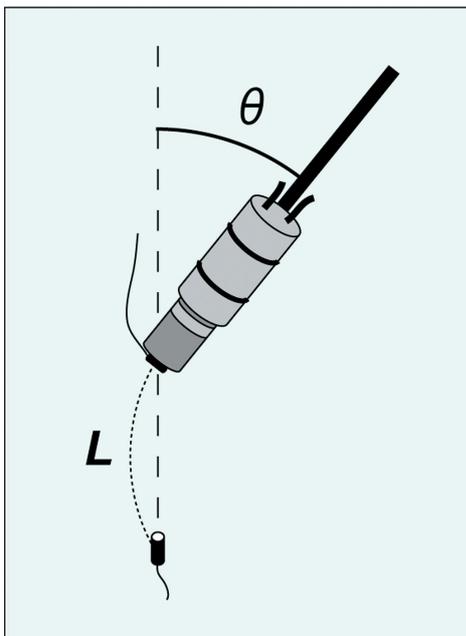


Fig. 6 Schematic image of the ranging procedure in the water tank.

みで  $60^\circ$  まで、更にこの水槽においての限界値となる  $64^\circ$  の 8 つの角度に設定し計測した値を扱う。設定した角度において、それぞれ 15 回程度の測距を実施している。更にトランスデューサの軸を回転軸として  $90^\circ$  回した位置においても同様の計測を実施している。

送信する信号は、海底地殻変動観測で利用されているものと同じ、10 kHz の正弦波を搬送波とし、4 波を 1 ビットとしてコーディングした 9 次の M 系列信号 (204 ms 長) である (浅田・矢吹, 2001 ; Mochizuki et al., 2003, 2005)。受波器として使用するハイドロフォン (RESON TC 4013) は、感応部が 1 cm 程度の小型のもので、使用する音響信号の波長 ( $\sim 15$  cm) に比して小さく、ほぼ等方的なレスポンスを持つことから、点として見なすことができる。

音響トランスデューサの送信信号とハイドロフォンの受信信号を 2 つのチャンネルで同時に収録し、それぞれの収録タイミングを測距信号のレプリカとの相互相関によって求める。このタイミングの差が計測信号の伝搬走時となり、測距結果に対応する値となる。収録システムは現行の海底地殻変動観測システムをそのまま代用しており、200 kHz のサンプリング間隔で収録を実施した。

音響トランスデューサとハイドロフォン間距離は、ハイドロフォン感応部から音響トランスデューサ頭頂部中央までの距離としている。これは、通常 of 海底地殻変動観測の解析において、頭頂部中央をもって、送受信時のトランスデューサの位置としていることに依っている。

#### 4 計測特性曲線

Fig. 7 に計測結果を示す。150 cm の距離を音響測距した際に、トランスデューサに対する受信点の位置 (角度) が変わること、測距結果の違いがどのように現れるかということを示している。横軸に角度  $\theta$  をとり、縦軸には伝搬走時に対応するサンプル数をとっている。200 kHz で収録をしているのでこのサンプル数にサンプル間隔の 5  $\mu$ s をかけたものが実際の伝搬走時となる。10 kHz

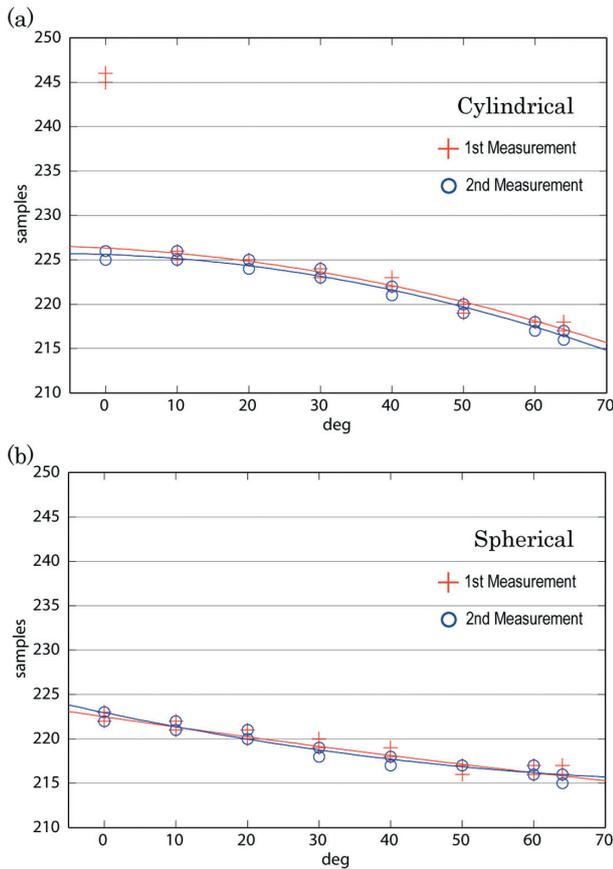


Fig. 7 Ranging results of the cylindrical (a) and the spherical curved disk (b) transducers in the tank test. Ordinate axis indicates ADC samples. Red crosses and blue open circles correspond to 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> measurements, respectively, carried out in two directions which intersect orthogonally. Lines are quadratic polynomial functions deduced by the least square method.

の正弦波を搬送波として用いていることから、20サンプルが1波長、即ち約15cmに対応する。

Fig. 7 (a) は円筒型トランスデューサに対する計測結果を示している。一見すると取得データ数が少ないように見えるが、測距の再現性が高く、同じ位置に重なってプロットされている。

トランスデューサの軸の延長方向である  $\theta = 0^\circ$  での計測値の中に、トレンドから大きくズレたものが確認できる。これは、この方向が、振動子の振動方向と直交方向にあることを一因としているのではないかと考えている。振動子の振動方向に正対する  $\theta = 90^\circ$  の位置であれば、第一に、振動子の近接する部分から生じる音圧変化を直接

受信することになる。これに比して  $\theta = 0^\circ$  の位置では、振動子各部より生成された音圧変化が伝播ののち形成する音場をとらえることとなり、自ずと受信する音圧の変化にも微妙な差が生じてくる。実際の受信波形を、その先頭部のエンベロープの形に着目して見比べてみても、 $\theta = 0^\circ$  のときにはなまっていたものが、 $\theta$  値が大きくなるにつれて立ち上りの明瞭なものになっていた。こうした受信波形の微妙な差異が、信号到達時刻の読み取りに影響を及ぼし、およそ1波長分ずれたところを読み取ってしまったものと考えている。音源となるトランスデューサ近傍では音場の揺らぎが大きく、特に水槽のように狭く閉じられた空間では、より一層、円筒型トランスデューサ頭頂部方向での計測を困難なものにしてしまっていることも考えられる。このことは、汎用性の高い円筒型トランスデューサを利用する際に把握しておかねばならない事項であるといえよう。

これらの計測値はアウトライヤーとしてとらえ以後の解析では除外し、トレンドに乗った部分のみに目を向けていくと、 $0^\circ$  から  $64^\circ$  まで、受信点の位置を変えることで、計測値にほぼ半波長分、7.5 cm 程度の差が生じていることがわかる。

Fig. 7 (b) は球面型トランスデューサに対する計測結果である。 $0^\circ \sim 64^\circ$  の範囲での計測値の開きが4.5 cm 程度に抑制されており、円筒型トランスデューサに比して、音響トランスデューサの特性によって生じる計測誤差が軽減されていることが見て取れる。

水槽試験では音響トランスデューサを送波器としてのみ利用し、いわば音響トランスデューサが持つ、電気信号から音響信号への変換特性の実測を行ったものといえる。実際の観測においては音響トランスデューサを、送波器としてだけでなく受波器としても使用し、測距信号の往復走時を計測することになる。このとき、送波と受波をそれぞれ2度ずつ行うため、計4度にわたって音響トランスデューサの持つ特性の影響を受けることになる。よって、Fig. 7 が示す以上の測距結果への

角度依存性が存在しうることになる。cm オーダーの測位を目指す海底地殻変動観測においては無視できるものではなく、何らかの対応が必要となる。

### 5 音響トランスデューサの位相中心

水槽試験で示された同一距離に対する音響測距値の開きは、音響トランスデューサの発振原理によるものだけでなく、それ以外に、音響トランスデューサ上の計測基準点の取り方にも影響を受けているものと考えられる。

水槽試験では音響トランスデューサ頭頂部中央を計測の基準点とし、ここから 150 cm 離れた位置に小型のハイドロフォンを配置し測距を実施した。実際の海底地殻変動観測においても、同一の支柱に取り付けられた GPS 装置と動揺センサーによって、音響トランスデューサ頭頂部中央の位置が、送受信時の音響トランスデューサの位置として求められて、解析に利用されている。これは、トランスデューサの詳細な内部構造や動作原理、制御原理といったことをメーカー側が公開せず、音響的中心を知るすべがないため、便宜的に計測の基準点を頭頂部中央に置いたに過ぎない。ここでいう音響的中心とは、遠方で観測した際に、音響トランスデューサ内、あるいは近傍のその一点より、等方的に音響エネルギーが放出されるように見える点をイメージしている。GPS アンテナに記載されている位相中心の位置に相当する音響トランスデューサ上の点といった方がより具体的かもしれない。

前章で示した水槽試験の結果を用いて、音響トランスデューサ上の音響的位相中心を推定する試みを実施した。その概念図を Fig.8 (a) に示す。

音響トランスデューサの音響的位相中心が軸上に存在し、軸対象な位相特性を示すものと仮定をする。水槽試験では頭頂部にその点を仮定していたが、実際にはそこから内側に  $d$  だけ入った位置に音響的位相中心があるものとし、角度  $\theta$  とハイドロフォンまでの実距離  $L$  を計算し直す。新

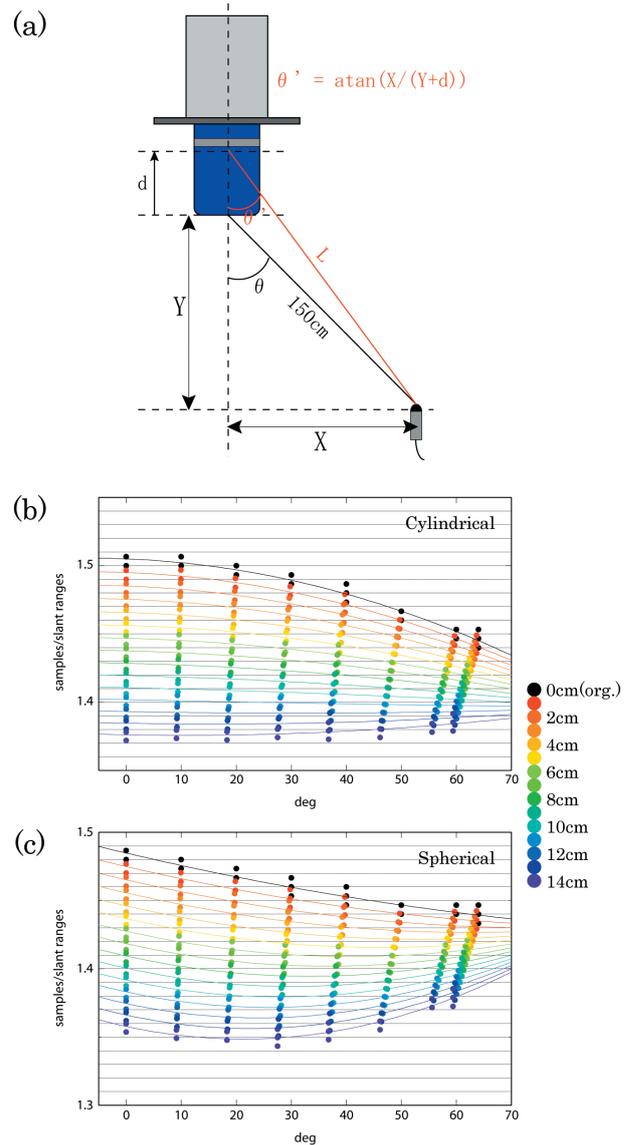


Fig.8(a) Schematic image of the estimation of the acoustic phase center. The acoustic phase center is assumed to be at  $d$  cm inside from the top and on the axis of the acoustic transducer.  $L$  and  $\theta'$  are calculated as  $d$  ranges between 1 and 14 cm at interval of 1 cm. The response curves, which were obtained from the tank test, are redrawn based on the  $L$  and  $\theta'$ . (b) : Redrawn response curves for the cylindrical acoustic transducer. (c) : Redrawn response curves for the spherical curved disk acoustic transducer.

たに求めた角度  $\theta'$  に対して、測距結果を書き直すという作業を、 $d$  を 1 cm ~ 14 cm まで 1 cm ずつ変えて行っていった。

Fig.8 (b,c) がその結果を示している。計測距離  $L$  は角度によって変わってくるため、伝搬走

時に対応するサンプル数を計測距離  $L$  で除算し、単位長あたりのサンプル数を縦軸に、 $\theta$  を横軸にプロットしている。最上部に黒色でプロットされているのが、Fig.7 に示されているものに対応している。

Fig.9 (a) は円筒型トランスデューサに対応した結果。仮定する音響位相中心を、音響トランスデューサのより内部に持つて行くに従い、角度に対して平坦な特性を持つようになっていく。  $d = 12 \text{ cm}$  としたときに最も平坦な特性を示している。平坦な特性、即ち、どの角度に対して測距結果が変わらない点であり、この点が円筒型トランスデューサの音響位相中心と考えることができる。

Fig.9 (b) は球面型トランスデューサに対する結果である。円筒型トランスデューサの場合と比べて少し下向きに凸な特性を示しているが、  $d = 9 \text{ cm}$  のときに最も平坦に近い特性を示すことになり、この付近に音響位相中心があるものと推定することができる。内部については全くもって詳細が分からないのであるが、振動板の曲率や独自の制御機構をして、  $0 \sim 50^\circ$  の範囲で送受波の位相特性が平坦に保たれるように調整されており、こうした機構が分からないまま、幾何的に位相特性を推定したことで、平坦な特性からのズレが生じたのではないかと考えている。Fig.7 (b) において、  $0 \sim 50^\circ$  の範囲で、数  $\text{cm}$  の計測地の開きが残っているのも、これと同じ理由によるものと考えられる。

ここでの解析結果をもとに考えれば、円筒型、球面型ともに音響トランスデューサの計測基準点は、それぞれ  $12 \text{ cm}$ 、  $9 \text{ cm}$  とかなり内部にあるといえる。この点を音響測距時の送受波点と考えることで、音響トランスデューサの位相特性による測距結果への影響を大きく減ずることが可能となる。

## 6 まとめ

海底地殻変動観測における水中音響測距精度の向上を目指し、現行で使用している2種類の音響

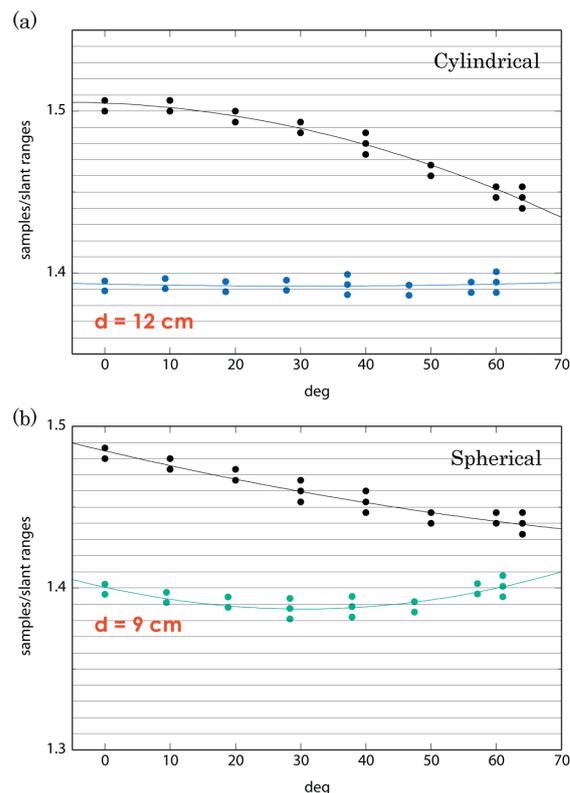


Fig. 9 Phase response curves for the cylindrical (a) and the spherical curved disk (b) acoustic transducers. Ordinate axis indicates ADC samples per unit range. Black dots indicate ranging results in the tank test. Black lines are quadratic polynomial functions deduced by the least square method. Color dots and lines correspond to ones with ranges and angles recalculated based on the assumed phase centers.

トランスデューサの計測特性把握のための水槽試験を実施した。

円筒型トランスデューサは、  $150 \text{ cm}$  の測距距離に対し、軸方向、即ち  $\theta = 0^\circ$  方向と、  $\theta = 64^\circ$  方向とでは、測距信号波長の半波長、約  $7.5 \text{ cm}$  の測距結果の差を持つことが明らかとなった。後から船上局トランスデューサとして導入された、球面型トランスデューサは、円筒型トランスデューサのそれに比して約  $3 \text{ cm}$  減じ、計測結果の差が  $4.5 \text{ cm}$  程度に収められている。こうした計測結果に見られる差は、音響トランスデューサの発振原理に起因する音響位相特性によるものと、計測の基準点を音響トランスデューサの頭頂部中央に置いていることに起因する2つを原因と

して考えることができる。

更に水槽試験で把握した計測特性をもとにして、両音響トランスデューサの音響位相中心の推定を行った。円筒型トランスデューサは頭頂部から 12 cm 内部に入った位置に、球面型トランスデューサの場合には、9 cm 内側に入った場所に音響位相中心があると仮定すると、 $\theta$  に対して平坦な計測特性を得られることが分かった。

#### 謝 辞

水槽試験の実施に当たっては海洋情報部諸氏に参加いただいた。また、計画段階より、(株)三ツ矢農水の岡部圭二氏に多大なるご尽力をいただいた。本文中の図の作成にソフトウェアパッケージ GMT (Wessel and Smith, 1991) を使用した。記して感謝する。

#### 要 旨

GPS/音響結合方式による海底地殻変動観測において、今後、考慮されるべき問題点の 1 つとして、音響測距に見込まれる測距誤差があげられる。音響トランスデューサの動作原理に起因して角度による送受波信号の位相差が生じること、計測の基準点をトランスデューサ頭頂部中央としていることがその要因となっている。1 度の送信あるいは受信によって生じ得る測距誤差は数 cm に達すると見込まれ、cm オーダーの測位を必要とする海底地殻変動観測において、無視することのできない問題点であるといえる。

我々は現行で使用している 2 種類の音響トランスデューサに対して水槽試験を実施し、角度による測距応答曲線を取得、見込まれる計測誤差の把握を行った。更に、水槽試験で取得した測距応答曲線をもとに、トランスデューサの音響位相中心の推定を実施し、円筒型トランスデューサは、現在測距の基準点としている頭頂部より 12 cm 内側に、球面型トランスデューサは 9 cm 内側に音響位相中心があるとの結果を得た。この位置を測距の基準点とし、2 種類の音響トランスデューサの音響位相中心の差を認識した上で観測を実施す

ることにより、長期にわたる観測の連続性、安定性が維持されるものと考えられる。

#### 参考文献

- 浅田昭, 矢吹哲一郎 (2000), 海底音響基準ネット, *生産研究*, 52, 293-296.
- 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.
- Fujita, M. (2003), Seafloor geodetic observation—GPS/acoustic combination technique—, *Hydro International*, 7, 41-43.
- Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo (2006), GPS/Acoustic seafloor geodetic observation : method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, 58, 265-275.
- Matsumoto, Y., M. Fujita, T. Ishikawa, M. Mochizuki, T. Yabuki, and A. Asada (2006), Undersea co-seismic crustal movements associated with the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake detected by GPS/Acoustic seafloor geodetic observation, *Earth Planets Space* (in press).
- Mochizuki, M., M. Sato, M. Katayama, T. Yabuki, Z. Yoshida, and A. Asada (2003), Construction of seafloor geodetic observation network around Japan, *Recent advances in marine science and technology 2002*, 591-600.
- Mochizuki, M., M. Fujita, M. Sato, Z. Yoshida, M. Katayama, T. Yabuki, and A. Asada (2005), Repeated trials of seafloor geodetic observation network around Japan, *Recent advances in marine science and technology 2004*, 11-18.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith (1991), Free software helps map and display data, *EOS Trans. AGU*, 72, 441, 445-446.