

海底地殻変動観測のための精密音響測距について

尾鼻浩一郎・片尾 浩・芹澤重厚・松尾成光・
安藤雅孝・岸本清行*

*地質調査所

要旨

海底で地殻変動観測を行うことは、巨大地震の準備過程や発生機構を知る上で重要である。我々は、ディファレンシャルGPSによるキネマティック測位と水中精密音響測距を組み合わせた新しい海底地殻変動観測システムの開発を進めてきた。今回、精密音響測距装置の測定の信頼性と精度の検証実験を行った。その結果、従来測定誤差と思われていたものの中には、後続波を誤認しているものが含まれることが分かった。この様な測定誤差は観測システムの改良によって防ぐことが可能である。

キーワード： 海底地殻変動，精密音響測距，M系列

1. はじめに

日本周辺の海域では、フィリピン海プレートや太平洋プレートの沈み込みに伴った巨大地震が発生している。近年、GPSに代表される宇宙測地技術の大幅な進歩により、日々の地殻変動の様子が分かるようになってきている（国土地理院，1998）。これにより、プレートの相対運動だけでなく、プレート境界域のダイナミックな変動の様子についても研究が進んできている（例えば、Heki et al., 1997）。しかしながら、今までこのような研究では、陸上に設置されている観測点のデータのみが用いられてきた。現在の地球上において、大きな地殻変動が期待されるプレート境界の大部分は海底に存在している。現在までのところ、このような海域のプレート境界で実用となる精度で地殻変動観測はされていない。海域での地殻変動観測が可能となれば、プレート境界で

の巨大地震の発生を含めた沈み込み帯のテクトニクスの解明に大きな役割を果たすことが期待される。また、海域での地殻変動の記録と陸上の観測記録を統合することが出来たなら、より詳細な解析を行うことが出来るだろう。

海底での地殻変動観測装置としては、いくつかのタイプの物が提案されている。例えば2点間の水平方向の変動を観測する手法として精密音響測距が提案されている（例えば、藤本ら，1995；Yabuki et al., 1997）。他にも、傾斜計（Anderson et al., 1997）等を用いた観測も考えられている。しかしながら、このような測定で得られた記録は、既存の陸上の観測網から得られるデータと直接リンクさせることは出来ない。例えば、日本国内では国土地理院によって約25km間隔でGPS連続観測点が整備されている。これらの陸上観測網と空間的に連続して解析できる観測を海域で行うことは、巨大地震の準備過

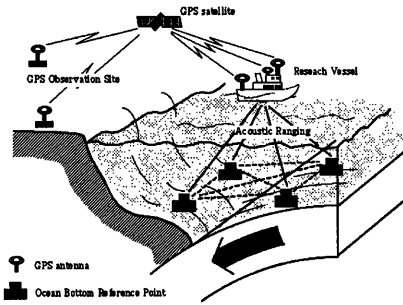


Fig. 1 Overview of the ocean bottom crustal deformation observation system.

程や発生機構を知る上で重要である。我々はFig. 1に示すような海底地殻変動観測システムを開発を行っている(尾鼻ら, 1995; Obana et al., 1998)。この観測システムは、ディファレンシャルGPSによるキネマティック測位と水中精密音響測距を組み合わせたものであり、陸上と海底の基準点をつなぐ事が出来る。実際の観測としては、陸上のGPS観測点を基準としたディファレンシャルGPSによって海上の観測船(もしくは観測ブイ等)の位置を決定する。また、観測船と海底に設置した基準点との間では精密音響測距を行い、両者の間の斜距離を求める。この精密音響測距を繰り返し行い、GPSによる測位結果と組み合わせて、海底に設置した基準点の位置を精度良く決定する。こうして海底基準点の位置を精度良く決定できたなら、このシステムによる観測を適切な時期を置いて繰り返すことにより、海底での地殻変動を計測することが可能となる。

このシステムの観測精度を向上させるためには、キネマティックGPSと精密音響測距の各々の精度を向上させる必要がある。本研究では後者の精密音響測距について測定実験を行った。

2. 音響測距システム

通常の単独のパルスを用いた方法で音響測距を行った場合、その分解能はせいぜい1m程度である。このままの精度では、期待される地殻変動を観測するのに十分な観測精度を得ることが出来ない。そのため、我々の観測システムではM系列信号と呼ばれる信号の相関処理を用いた方法を使用している。この方式は、疑似不規則系列であるM系列の相関が、鋭いピークを持つことを利用したものであり、精密音響測距において標準的な方法である(例えば、Takeuchi, 1991)。今回我々が使用した観測システムでは、約10kHzの音波を搬送波として用いている。1つのコードは搬送波8波から構成されており、これを7次のM系列信号で位相変調している。実際の測定での計測動作をFig. 2に示す。Fig. 1で海上側の装置に相当する装置から海底側の装置にM系列信号を送信する。この際、海底に複数の基準点を設置した場合を想定して、各々の装置に固有のID識別用の信号も送信する。これに対し、送信された識別信号に対応する海底側装置はM系列信号を受信した後、相関処理を行い、信号を受信した時刻を精密に求める。信号を受信した時刻から一定時間後に、海底側装置はM系列信号を海上側に向けて送り返す。海上側では、送り返されてきた信号に対して海底側と同様の相関処理を行い、受信時刻を精密に求める。海上側では、海上から送信した時刻と海底での送り返すまでの時間が予め分かっているため、海上-海

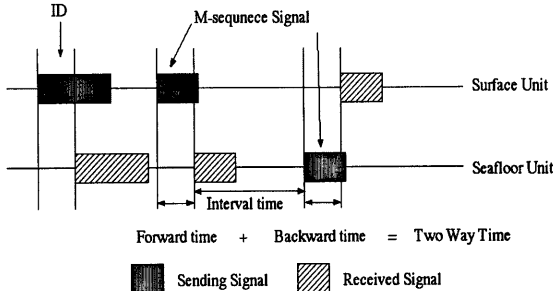


Fig. 2 Timing chart of the M-sequence acoustic ranging system.

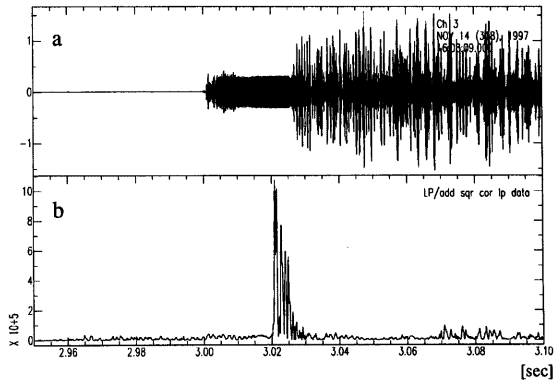


Fig. 3 (a) Example acoustic signal of the M-sequence acoustic ranging system.
(b) Correlation function of above signal.

底の往復の伝播時間を測定することが出来る。最終的には、水温・塩分濃度などの観測を行い、水中音速構造を仮定することによって二点間の伝播時間を距離に直して基準点の位置を決定する。

今回我々は、音響測距装置の測定精度及び、測定誤差の原因を探るため、水槽及び海洋での測定実験を行った。この実験に際しては、二つの装置を固定することにより、実験中に装置間の距離が変化しないようにした。また、現在の測定装置では相関処理を行った結果から求められた伝播時間しか記録として得られない。より詳細な検討を加えるために、装置中から受信した音響信号並びに相関処理過程の信号を直接取り出して記録を行った。

3. 水槽実験と結果

先ず基礎的なデータを得るために、水槽を用いて実験を行った。実験に使用した水槽の大きさは、幅約 2m、奥行き約 1m、高さ約 1m である。この中に、音響測距用のトランスデューサーを互いに向かい合わせて設置した。また、TEAC製DR-M3を記録機として用いて、音響測距装置が受信した信号を直接記録した。以上の様な状態で実験を行った。結果として、音響測距装置の計測した2点間の往復伝播時間は非常にばらついていた。Fig. 3に記録された音響信号の例と、その信号に対して相関処理を行った結果を示す。M系列の音響信号の始めの部分には、相関処理の目安となるように無変調の信号を付加してある。受信した音響信号の立ち上がりと相関値の

ピークがずれているのは、そのためである。相関処理した結果を見ると、直達波によるものと考えられる最初の相関値のピークの後に、いくつもの相関値のピークがあることが分かる。これらのピークは、水槽内壁や水面からの反射等に起因するものと考えられる。これらのうちには、直達波と同程度の強度を有するピークも存在している。直達波よりもこれら後続波のピークが大きくなってしまった場合、現在の装置ではこれを区別することが出来ない。そのため、音響信号の受信時刻を実際の受信時刻より遅いと判断してしまう可能性がある。このような場合、測定された結果が本来の観測精度以上にばらつく事が起きる。

4. 海洋実験

水槽での実験から、直達波に続く後続波によって受信時刻を誤認してしまう可能性があることが分かった。このことを、実際の海洋で確かめるとともに、異なるIDを持つ装置の呼び分け、並びに測定距離を延ばした場合の測距可能性の確認のための実験を行った。実験は、1998年3月4日から5日にかけて行った。実験を行った和歌山県田辺湾の概略図をFig. 4に示す。図中のTowerは京都大学防災研究所白浜海象観測所の観測塔である。観測塔では、風向・風力・波高・水深別の水温等が観測されている。この観測塔に実際の観測システムでは海上側の装置となるものを設置した。この装置に対しては、水槽実験の時と同様に音響信号を記録できるようにして

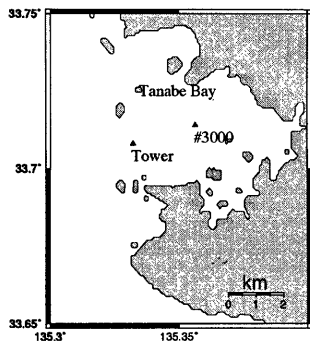


Fig. 4 Map of Tanabe bay. Tower indicates observation tower of Shirahama Oceanographic Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. The surface unit was set on the tower. #3000 indicates the sea floor unit.

ある。一方、海底側基準点となるべき装置は、観測塔から東に約2.1km離れた、「アボセ」と呼ばれる浅瀬付近に設置した（図中#3000）。こちらの装置には、水温計を設置し水温観測も同時に行った。海底側の装置のトランスデューサーは、海底から1m程立ち上がった形で設置してある。2点の間は水深が30m程あるが、観測塔自体は水深10m程の浅瀬に建っている。また、海底側の装置を設置した場所は、水深18m程度である。

実験では、観測塔側の装置の準備をした後、3月

4日午前10時頃から海底側装置の設置を行った。設置に際しては、白浜海象観測所の観測船「かいしょう」を利用した。当初の予定では、海底側の装置を2台設置して交互に測定を行うことになっていたが、天候等の都合により連続して設置できたのは1台のみであった。2台の海底側装置が設置されている間は、異なるID(#3000, #3002)をもつ装置の呼び分けをテストをするため、二台の装置に対して交互に測距を行った。その後、風が強くなり波も高くなってきたため11時30分頃に海底側装置1台(#3002)を回収した。それ以降は、観測塔から残りの1台(#3000)に対して音響測距を30秒おきに自動的に繰り返して行った。また、30分に1回の割合で音響信号を直接記録した。なお、記録媒体の容量の関係で、音響信号の記録は5日の午前2時30分までしか得られていない。音響測距装置の設置後、観測塔と海底側装置設置点付近でSTD観測を行い水温並びに塩分濃度の鉛直プロファイルを得た（Fig. 5）。この結果をみると、二点で海水の温度・塩分濃度共にかなり異なっている様子が見て取れる。また、観測塔側・海底装置側共に、水深10m程度のところを境にして上下で水温が異なり、はっきりとした温度境界が見られる。今回観測塔側に設置したトランスデューサーは、ほぼこの温度境界付近の深さに設置されている。この二点の測定から、実験海域全体の海水構造の複雑さが伺える。測距信号の送受信は翌日まで自動的に行われた。翌日午前9時頃に実験を終了し、海底側装置並びに船上装置の回収を行った。

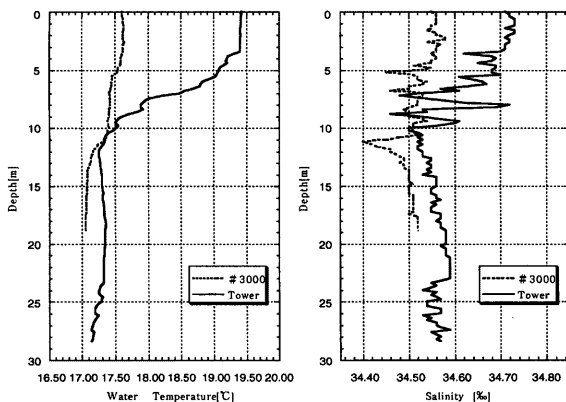


Fig. 5 Profiles of water temperature and salinity observed by STD. Tower and #3000 correspond with the observation point which are shown in Fig. 4.

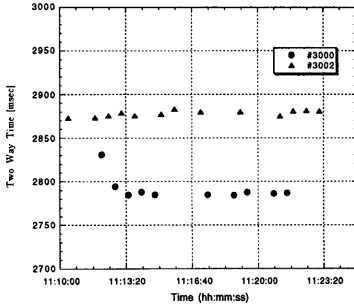


Fig. 6 Observed two way time for two different sea floor unit (#3000 and #3002). Circles indicate the data for #3000 and triangles indicate the data for #3002.

5. 結果

まず、異なるIDを持つ海底側装置の呼び分けの結果を示す (Fig. 6)。二台の装置が同時に設置されていた時間は短かったが、海況悪かったためか測定値はあまり安定してない。しかしながら、今回使用した二つのID(#3000,#3002)毎に結果を見ると、このような悪条件下でもきちんとIDを区別して測定が行えていることが明らかになった。これにより、海底に観測基準点をアレイ状に設置して同時測定を行うことも可能であると考えられる。

次に、#3000の装置に対する連続測定の結果を示す。Fig. 7(a)には2点間の測定された音波の往復伝播時間の時間変化を示してある。測定結果は、全体

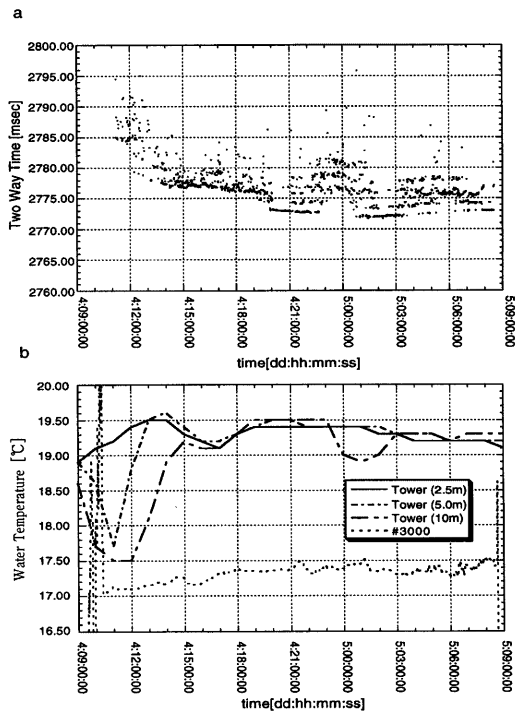


Fig. 7 (a) Observed two way time for sea floor unit #3000. Successfully observed data are only shown in here. (b) Observed water temperature. Water temperature measurements at the tower were made at 2.5m, 5.0m, and 10m in depth. Measurement interval is 1 hour at the tower, while at sea floor unit (#3000), 1 minute.

としては非常にばらついているように見える。ばらついている物のなかでも、いくつかのグループに分けられるように見える。また、そのばらつきの様子が時間と共に激しく変化していることが分かる。まず、4日14時以前は測定結果のばらつきが非常に大きく、また測定結果が得られていない事も多い。その後、測定は比較的安定するものの、4日20時頃まで測定された伝播時間は徐々に短くなってきている。4日20時前から測定された伝播時間が急激に3msec程短くなる。その後21時頃までは徐々に伝播時間が短くなってきていて、測定値は非常に安定している。21時を過ぎると測定値の内、最も早いものはそれ以前の記録と連続しているように見えるが、それより遅いものがいくつかのグループを作って分布しており、測定値がばらつき始める。この状態が2時間ほど続いた後、最も伝播時間の短いグループは見えなくなってしまうが、5日1時頃から再び見え始める。その後は、徐々に伝播時間が長くなっていくが、ばらつきの状態に大きな変化は見られず、5日9時に実験を終了した。

Fig. 7(b)に観測塔ならびに海底側装置で観測した水温変化を示す。観測塔では異なる3つの水深で1時間おきに0.1℃まで測定した結果である。海底側装置#3000では1分おきに0.01℃まで測定している。観測塔側の水温は、4日15時頃までは鉛直方向の水温差が大きいが、19時以降は比較的安定している様に見える。ただし、5日0時頃から3時頃までは、水深10mの測定値だけが低下している。海底側装置のほうでは、設置後徐々に水温が上昇している様子が見て取れる。ただし、所々で水温が短時間の内に

変動している。例えば、4日21時以降1時間ほどの間に0.2℃上昇した後、元に戻るといった変動が見られる。

6. 考察

まず、Fig. 7で音響測距の測定値と水温の変化を比べて見る。音響測距の結果・水温共に、急激な変化も見られるが、大まかな傾向としては水温変化と測定値の変化は相関している様に見える。また、4日20時頃を境にして測定値が3msec程短くなる事は、2点間の水温が約0.3℃上昇したことにより説明できるが、観測塔側では4日17時から20時にかけて、各々の深さで0.3~0.4℃、また#3000側でも4日16時以降、約0.2℃の水温上昇が認められている(Fig. 7(b))。測定値の急激な変化とは変動速度が必ずしも一致しないが、水温変化によって生じる音速変化で説明することも可能である。

4日12時17分に記録された音響信号に対する相関処理の結果をFig. 8(a)に示す。この時間は、測定値は非常にばらついており、安定した測距を行うことが出来ていなかった。処理した結果を見ると、同じ様な大きさをもったピークがいくつかあることが分かる。さらに、最も強いピークの前にも相関値の極大が複数存在する。現在の観測システムでは、このような場合でも最も相関の良いところを受信時刻と判定してしまいますため、測定結果が大きくばらつく原因になっている。

Fig. 8(b)に測定値が安定していた、4日20時47分

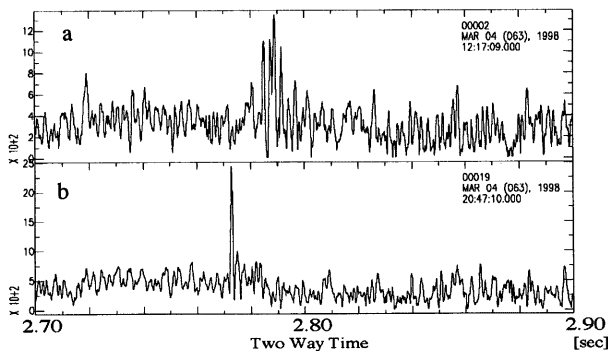


Fig. 8 (a) Correlation function of acoustic signal recorded at 3/4 12:17. (b) Correlation function of acoustic signal recorded at 3/4 20:47.

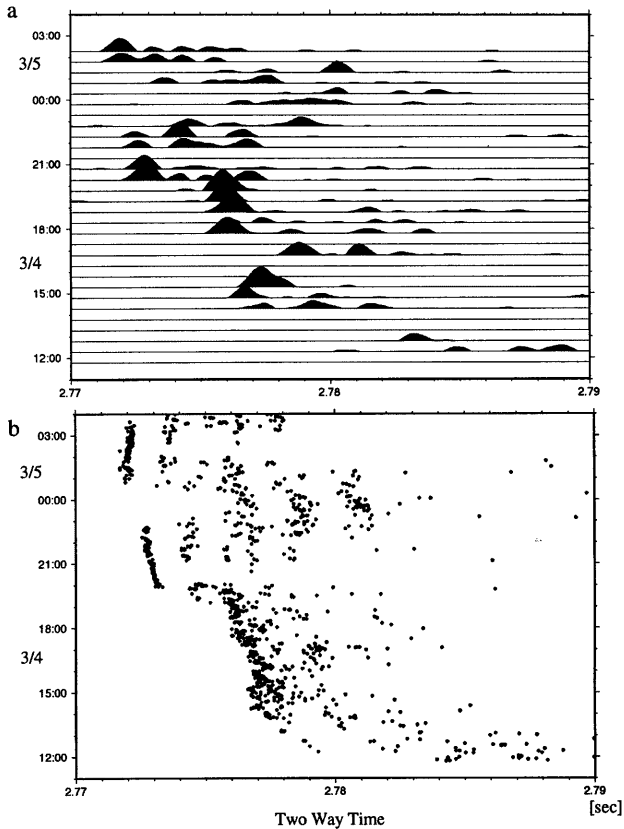


Fig. 9 (a)Correlation function calculated from acoustic signals. (b) Two way times observed by the acoustic ranging system. Horizontal axes are two way time and vertical axes are recorded time.

の記録を相関処理した結果を示す。この時は受信した信号のなかに復調されたM系列信号が眼で見て判る程きれいな信号が受信できていた。この様に良好な記録が得られた場合には、図に示したように相関処理した結果には鋭いピークが現われている。また、相関値のピーク自体も12時17分の記録より大きくなっている。この場合、いくつかの相関値のピークを混同するような事も起こらないため、安定した測定を行うことが出来た。

Fig. 9(a)に実際に測定した波形から計算した相関値を時間を追って示す。これを見ると、時間によって相関値の現われ方がまちまちである様子が良く分かる。Fig. 9(b)に示した同じ時間帯での測定結果と

比べて見ると測定結果のばらつきの主たる原因は、測定誤差というよりは、実際に観測される音響波形の違いであることが分かる。実験開始後、4日14時頃までは測定値が大きくばらついていたが、この時間の相関処理した結果には強いピークが見られない。これ以降、相関処理の結果に強いピークが表われている場合は、測定結果もその相関値のピークの幅にばらついているが、複数のピークが表われている場合は、各々のピークに対応するいくつかのグループに分かれて分布している。したがって、受信した音響信号の微妙な変化で、測定値の大きなばらつきが生じているものと思われる。この様な違いは、実験を行った2点間で海水構造が時間的に変化したため

ではないかと考えられる。Fig. 7は水温変化と測定値の変化を同時に示したものである。4日15時ころから観測塔での水温の鉛直方向の差が小さくなっているが、この頃から測定結果が安定し始めている。これは、観測塔側に設置したトランスデューサーが上下の海水温の境界付近に設置されていたため (Fig. 5)、鉛直方向の温度差が大きいたまには境界層の変化によって、音波の伝播経路が大きく影響を受けたためと思われる。4日21時頃には、それまでままとまっていた測定値が急にばらつき始めているが、この時には#3000での水温が急激に約0.2℃上昇している。このような水温の変化は、湾内での海水の移動等の原因が考えられる。このことによって直達波や反射波を含め、測定している二点間で音波の伝わり方が変化して、測定結果に変化を生じさせたものと考えられる。また、Fig. 9から分かるように、測定結果がいくつかのグループを作っているように見えるのは、同じ様な強さを持った相関値のピークが現われたのが原因である。この様に複数の相関値のピークが現われるのは、実験海域の水中音速構の変化と共に、実験を行った海域の水深が浅いために海面や海底での多重反射が原因と考えられる。このような、複数の相関値のピークを見極めることは、今後の観測システムの精度向上にとって必要不可欠である。例えば、相関値のレベルがある以上のピークのうち最も早く到達したものを直達波とみなす等の工夫が必要である。

7. まとめ

今回の水槽実験ならびに海洋での実験においては測定値のばらつきが大きく、測距システムの精度を議論することは難しい。ただし、そのばらつきの原因は実験を行った浅海の湾特有の海水構造の時空間的複雑さに起因するものと考えられる。海水構造が安定している場合には、測定値の信頼性はさらに高いと言える。また、研究が目的としている測定海域の深海底では、今回の様な短時間での急激な海水構造の変化考えにくい。水深1000m以下では、音速はきわめて安定していると考えられている (Fujimoto et al., 1991)。したがって今回の実験のように、浅い湾内で2kmを水平に測距した場合より、同じ距離を鉛直方向に測距したほうがより精度良く測定する事が出来る。その場合、今回の実験以上に安定した測定が行えるものと考えられる。また、異なるIDを持つ海底側装置の呼び分けも確実に行えている事が分かった。これにより、実際の測定の際

に連続的に複数の海底基準点に対して測距を行う事が期待される。この場合、地殻変動の速度に対し、一回当りの測定時間は短くなるため基準点のレイの形状が不変と考えることにより、観測精度を向上させる事が出来る。今後は、実際に海域でGPSと音響測距を組み合わせた観測を行える装置の制作を行っていく考えである。

謝辞

今回の実験に当たっては、京都大学防災研究所の藤木繁男技官、平野憲雄技官、田所敬一氏にご協力頂きました。音響測距装置の制作については、村上英幸氏を始めとする海洋電子株式会社の皆様にご協力頂きました。本研究は、科学技術振興調整費「南海トラフにおける海溝型巨大地震災害軽減のための地震発生機構のモデル化・観測システム高度化に関する総合研究」の一研究項目である「海底における新しい地殻活動観測手法の研究開発」（地質調査所担当）の研究費の一部が充てられました。また、平成9年度文部省科学研究費補助金・基盤研究(A)(2)「海底地殻変動測定の新しい試み」（課題番号07554016、代表・安藤雅孝京都大学防災研究所教授）及び、平成9年度文部省科学研究費補助金・特別研究員奨励費「海底における地殻変動観測の研究」（受付番号3030・研究代表者尾鼻浩一郎）の補助を受けました。

参考文献

- 尾鼻浩一郎・片尾 浩・安藤雅孝・平原和朗・中野健秀・松尾成光・細 善信・村上英幸 (1995) : 海底地殻変動観測の新しい試み, JAMSTEC 深海研究, 第11号, pp. 205-210.
- 国土地理院 (1998) : 全国GPS連続観測結果, 地震予知連絡会会報, 第59巻, pp. 614-633.
- 藤本博巴・金沢敏彦・村上英幸 (1995) : 海底精密音響測距実験 - その可能性を示す観測結果 -, 地震, 第48巻, 第2輯, pp. 289-292.
- Anderson G., Constable S., Staudigel H., and Wyatt F. K. (1997): A seafloor long-baseline tiltmeter, *J. Geophys. Res.*, vol. 102, pp. 20269-20285.
- Fujimoto H., Kanazawa T., and Murakami H. (1996) : Seafloor acoustic ranging and the effect of temperature variation, *Proc. Gravity, Geoid and Marine Geodesy International Symposium*, pp. 690-695.

- Fujimoto H., Segawa J., Furuta T., and Murakami H. (1991) : Installation of ocean bottom bases for obserbation of seafloor crustal movement, Marine Geodesy, Vol. 14, pp. 177-184.
- Heki K., Miyazaki S., and Tsuji H. (1997) : Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench, Nature, Vol. 386, pp.595-598.
- Obana K., Katao H., and Ando M. (1998) : Sea floor positioning by GPS-Acoustic Link System. (Submitted to the Island Arc)
- Takeuchi T. (1991) : A Long-Range and High-Resolution underwater acoustic positioning system, Marine Geodesy, Vol. 14, pp. 225-231.
- Yabuki T., Nagaya Y., Asada A., Ono F., and Tajiri K. (1997): Development of a seafloor acoustic ranging system (SeaFAR) : Preliminary results of long term trial experiment, JAMSTEC Journal of Deep Sea Research, Special Volume, Deep Sea Research in Subduction Zones, Spreading Centers and Backarc Basins, pp. 147-151.

Precise Acoustic Ranging for Seafloor Crustal Deformation Observation

Koichiro OBANA, Hirohi KATAO, Shigeatsu SERIZAWA,
Shigemitsu MATSUO, Masataka ANDO, and Kiyoyuki KISHIMOTO*

*Geological Survey of Japan

Synopsis

Most of plate boundaries are located beneath the sea. It is very important to observe crustal deformation around these area. Now, we are developing a seafloor crustal deformation observation system which combines the kinematic positioning by differential GPS and the precise acoustic ranging. The precise acoustic ranging is very important technique for this system. In this study, we perform experiments to confirm the precision of acoustic ranging. According to these results, observation results are affected by following signal after true direct signal. It is possible to improve this observation system by removing these affected data.

Keywords: Seafloor Crustal Deformation; Precise Acoustic Ranging; M-sequence