

## 海底地殻変動観測の新しい試み

尾鼻浩一郎\*<sup>1</sup> 片尾 浩\*<sup>1</sup> 安藤 雅孝\*<sup>1</sup> 平原 和朗\*<sup>1</sup>  
 中野 健秀\*<sup>1</sup> 松尾 成光\*<sup>1</sup> 細 善信\*<sup>1</sup> 村上 英幸\*<sup>2</sup>

日本周辺海域では、太平洋プレートやフィリピン海プレートの沈み込みによって様々な地震活動が引き起こされている。これらの沈み込みが起きている海底での地殻変動を直接測定することが可能となれば、陸上のGPS観測網等のデータと合わせて地震発生について考えるうえで極めて有用なデータとなるだろう。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超音波を利用した水中音響測距装置を組み合わせた海底地殻変動観測システムの開発を行っている。今回、「なつしま」を利用して御前崎沖で基礎的な観測実験を行った。その結果は、現在のままの技術を組み合わせただけでは十分な精度は得られないが、技術改良による精度向上を図ることは可能であることを示している。

キーワード：ディファレンシャルGPS、キネマティック測位、音響測距、海底地殻変動

## A Trial of the Measurement of Crustal Deformation at the Ocean Bottom

Koichiro OBANA\*<sup>3</sup> Hiroshi KATAO\*<sup>3</sup> Masataka ANDO\*<sup>3</sup>  
 Kazuro HIRAHARA\*<sup>3</sup> Takehide NAKANO\*<sup>3</sup>  
 Shigemitsu MATSUO\*<sup>3</sup> Yoshinobu HOSO\*<sup>3</sup>  
 Hideyuki MURAKAMI\*<sup>4</sup>

At surrounding area of Japan, many earthquake activities are caused by the subduction of Pacific plate and Philippine sea plate. If we can measure the crustal deformation at the ocean bottom where the oceanic plates subduct, that data must be very valuable to understand the mechanism of seismic activity by connecting with continuously GPS observation data on land. Now, we are developing the measurement system of crustal deformation at the ocean bottom which combines the kinematic positioning by differential GPS and acoustic ranging technique. The basic observational experiment was performed off Omaezaki on the "Natsushima" research cruise. The results show that

\* 1 京都大学防災研究所

\* 2 海洋電子株式会社

\* 3 Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

\* 4 KAIYODENSHI CO., LTD.

both technique don't have enough accuracy now. On the other hand, these results show the possibilities that we can get enough accuracy by improving the system.

**Key words :** Differential GPS, Kinematic positioning, Acoustic ranging, Crustal deformation at the ocean bottom

## 1. はじめに

日本近海では、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海溝軸付近で発生している。また、これらの沈み込みを含むプレート境界におけるプレート同士の相互作用が、内陸の地震発生にも寄与していると考えられている。現在までのところ、様々な研究 (例えば Chachin and Kato, 1994) によって、VLBIやGPSによって測られたプレート同士の全体的な相対運動が明らかになってきている。しかし、プレート境界に沿った部分でプレート同士が、実際のところどのように振舞っているのかは不明である。従って、プレート境界域での地殻変動を直接測定することができれば、海溝軸付近で発生する巨大地震だけでなく、内陸部の地震発生について考えるうえで極めて有用なデータを得られると考える。しかしながら、日本を取り囲むプレート境界は、そのほとんどが海底下にあるため、陸上で使われている通常の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。そのため、海底で地殻変動を直接測定するためには様々な工夫を凝らした装置が必要となる。そこで我々は、海底での地殻変動を観測することを目指して、図1に示すようなシステムの開発を行っている。このシステムは、2点でGPS観測を行い、片方を基点にしてもう一方の相対位置を求めるディファレンシャル

GPSによるキネマティック測位と、超音波を利用した精密音響測距を組み合わせたものである。このシステムによる観測では、(1)陸上のリファレンス点と海上の観測装置の相対位置をキネマティック測位で求める、(2)海上の観測装置と海底に設置した観測基点との間の音波の伝播時間を多点で測定する、(3)測定海域において水温、塩分濃度等の観測を空間的に行い、測定海域の水中音速構造を明らかにする、の3つの観測を同時に行う。その後、これらの記録を統合し、地震の震源決定のような要領で海底の観測基点と陸上のリファレンス点との相対位置を決定し、この観測を繰り返すことにより海底に設置した基点の変位を測定することを目指す。最終的には、このシステムによって得られたデータを、陸上のGPS観測網のデータと連結して、海溝軸から内陸部にわたる広域の地殻変動を総合的に解釈することが目標である。

このシステムによる観測を精度良く行うためには、GPSによるキネマティック測位と、超音波を利用した音響測距の精度をいかに確保するかということが重要になる。現在の段階では双方共まだまだ発展途上の技術であり、現状のままでは目的に対して十分な精度を得ることは難しい。

そこで、我々はこれらの技術を、我々の海底地殻変動観測システムに生かしていくための基礎実験として海上観測装置を試作し、海底との音響測距並びに陸上とのキネマティック測位の実験を行った。

## 2. 海底地殻変動観測システム

今回の実験で使用した観測装置を図2に示す。これらの装置は海上側と海底側のユニットに別れている。将来的に海底に設置する装置では、当然海底側の測器は海底に固定される必要があるが、今回の実験で用いた物は、回収して改良を加える必要があるため、ガラス球を用いて自己浮上させて回収可能な物にしたため海底に固定されていない。海底側のユニットは、音響測距用のトランスデューサーを備えており、設置前の装置起動時に海上側装置と同期をとった後、5分おきに音響測距用の超音波信号を送信する。この信号は10kHzの音波を搬送波とし、5次M系列で位相変調されている。海上側のユニッ

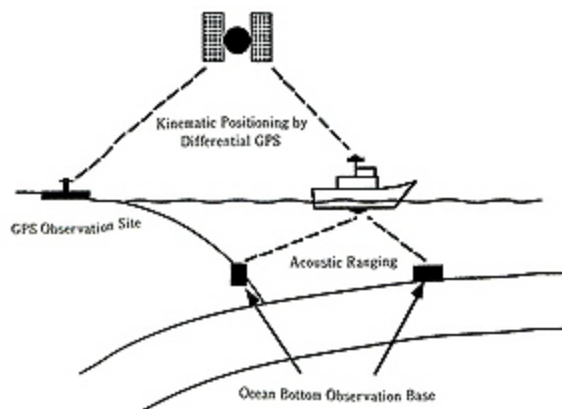


図1 海底地殻変動観測システム概念図  
Fig. 1 Overview of the measurements system of crustal deformation at the ocean bottom.



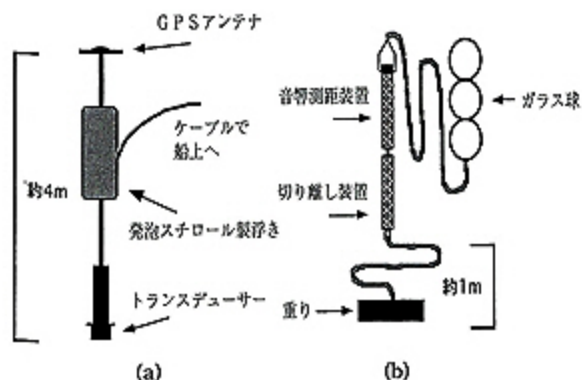


図2 海底地殻変動観測装置。(a) 海上側ユニット、(b) 海底側ユニット  
 Fig. 2 The units of this measurement system. (a) sea surface unit, (b) sea floor unit.

トは、海面下の部分に音響測距用のトランスデューサーを、海面上の部分にはGPS観測用のアンテナを備えた浮体である。これらの装置はケーブルによって船上にある観測装置と結ばれており、船上から制御を行うことができる。トランスデューサーによって受信された海底側からの超音波は、船上に設置した検波装置でサンプリング周波数5kHzで位相0°、90°の2相同期検波され、受信装置内のメモリーに蓄えられる。このデータをパソコンで吸い上げ、パソコン上で相関処理を行うことで海底-海上間の超音波の伝播時間を知ることができる。(尾鼻ほか、1994) 海上側ユニットのGPSアンテナは、船上に設置したAshtech社製Z-XIIレシーバーと結ばれており、陸上側のGPS観測点とともにサンプリング周期1秒で



図3 GPSリファレンス観測点と観測実験を行った海域の配置  
 Fig. 3 Map of the GPS reference sites and experiment sea area.

サンプリングしている。これらのGPSデータは下船後、両者をまとめてキネマティック基線解析を行う。

### 3. キネマティック測位及び音響測距実験

#### 3.1 実験

実験は、海洋科学技術センター「なつしま」を利用して、1994年10月に静岡県御前崎沖で行った(写真1)。リファレンスとなる陸上のGPS観測点としては、京都大学防災研究所地震予知研究センターの上宝、潮岬、並びに宇治の3点のGPS観測点を用いた。なお、本稿では上宝と宇治についての解析結果を示す。各々の配置を図3に示す。実験に際しては、まず海底側と海上側の音響測距装置の同期をとった後、海底側のユニットを海に投入した。その後、計3日間にわたって実験を行った。実験時には海上側のユニットを「なつしま」から海面に流し、船をドリフトさせながら収録を行った。1日の実験では、1時間のGPS観測を行うと同時に超音波測距の実験を行った。なお、今回の実験では、実際に海底に設置した観測器の位置を求めることは後述する実験の都合上、行わなかった。そういう意味で、今回の実験は主として実際の海洋上での使用に関する基礎的な実験の意味合いが強い。

#### 3.2 実験結果

##### 3.2.1 GPSキネマティック測位

「なつしま」から海面に流した海上ユニットの位置をディファレンシャルGPSによるキネマティック解析で求めた結果の一例を図4に示す。解析に用いたソフトはAshtech社製のP-NAVであり、放送暦を用いた解析を行っている。図4中にはリファレンス点として上宝と宇治を用いた2つの基線解析の結果を示してある。これには、船のドリフトに合わせた海上側のユニットの軌跡が表れている。基線長は上宝が約232km、宇治が約217kmである。まず、図4より海面上でGPSアンテナが動揺している状態でも、基線解析を行うのに十分な質のデータを受信できていることが分かる。この実験では、1時間の間途切れることなくGPSのデータを受信できており、2つのリファレンス点について、各々に対して行った解析結果を見ると、双方共よく一致している。リファレンス点を違えた場合の解析結果のずれはおおむね40cm程度である。これは、陸上でアンテナの運動を制御しながら行ったキネマティック測位の基礎実験で、基線長が約160kmの場合の誤差が±15cm程度であることを考えると、今回用いた解析方法の精度としては限界に近いと考

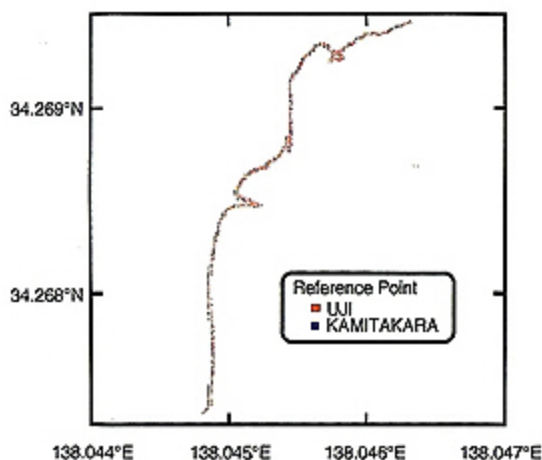


図4 GPSキネマティック測位の解析例。上室と宇治をリファレンスとした

Fig. 4 Example of kinematic positioning The reference sites are Kamitakara and Uji.

えられる。図5には、解析結果の一部を拡大して示してある。これを見ると、海上観測器が50cm程度の振幅で動揺していることがよく分かる。実際、海上ユニットは波浪等の影響により非常によく揺れている。それにも関わらず、連続した解析が行えていることは、今後の技術改良によるさらなる精度向上が期待される。ただし、海上側の観測装置があまり激しく動揺しているようであると、最終的な解析において、海底側測器の位置を求める際に誤差が大きくなるのでこれについては、別途考慮が必要である。

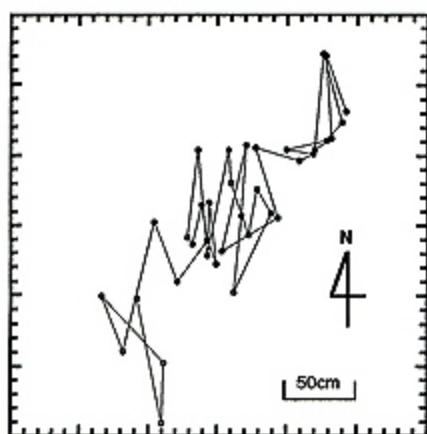


図5 図4の一部を拡大したもの。リファレンスは上室

Fig. 5 Magnification of a part of fig.4. The reference site is Kamitakara.

### 3. 2. 2 水中音響測距

音響測距による海底側ユニットから海上側ユニットまでの音波の到達時刻の計測は、極めて安定して行われた。しかし、今回の実験で用いた計測方式は、海底側の装置を設置する前に、海上側の装置と両者の同期をとって起動させた後、海底側の装置が一方的に音響測距用の信号を5分おきに送信し続けるというものであった。今回の実験ではこのことが最大の問題点となった。実験は数日間にわたって行われたが、その期間中に船上側の装置と海底側の装置の温度状況が異なるため、同期させた各々の測器の時計にずれが生じた。このため、海底と海上間の音響測距によって得られた到達時刻は、温度の違いによる時計のずれを含んでおり、実際に海底側の測器の位置を求めることはできなかった。図6に実験結果の一例を示す。船のドリフトに合わせて海上側の測器の位置が移動しており、それによる音波の到達時刻が変化していくのが表れている。室内で両方の測器の温度を変えて実験を行った結果を見ると、実際の到達時刻は図に示してある時間より早いと考えられる。

### 4. 今後の課題

今回の実験結果を見てみると、まずディファレンシャルGPSによるキネマティック測位に関しては、海面上で波浪の影響等によってアンテナが動揺しているにもかかわらず基線解析を行うのに十分な質のデータを収録することができた。また、基線解析の結果を見ると、その精度は、陸上での基礎実験を行った際に得られたものとほぼ同じであると言える。ただ、現在のところ、その精度

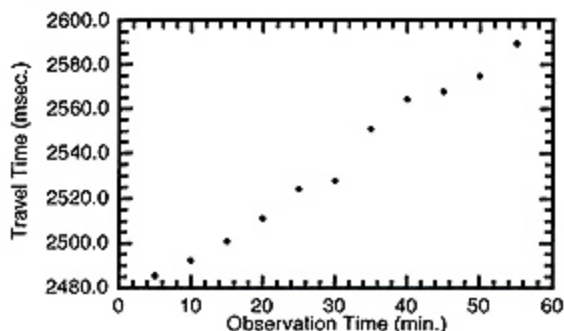


図6 音響測距の観測結果。観測器のドリフトにあわせて、海底からの音波の到達時刻が変化している

Fig. 6 The results of acoustic ranging. The travel time of the acoustic wave changed with the drift of the surface unit.



は±15～30cm程度であり、海溝軸付近のプレート運動を計測するには不十分である。今後は、現在の放送暦を用いた解析を、精密暦を用いるなどして精度向上を図り、少なくとももう1桁上の精度を確保できるようにしたい。また、陸上側のリファレンス点の配置についても考慮する必要があると考える。

水中音響測距装置に関しては、現在の方式は長期にわたる観測に不適であることが明らかになった。現在、海上側から超音波信号を送信し、これに海底側が応答する方式に改造して試験を行っている。また、今回の装置では、サンプリングや検波方式の関係で30cm程度の精度しか確保できなかったが、これに関しても、目下のところ改良並びに試験を行っており、さらに1桁上の精度の確保を目指している。

観測システム全体としては、現在GPS測位と音響測距は各々を全く独立の系で行っているが、今後はGPS時計を用いて、全体を一括して制御できるようにしていきたい。また、今回GPSアンテナが振幅50cm程度で揺れていたが、この時、海面下のトランスデューサーはより大きな振幅で揺れているはずである。このままでは、海底に設置された測器の位置を求める際に誤差が大きくなってしまうため、今後、浮体を用いた海上側の観測器は、それ自体を改良して、その動揺をより少なくすることが必要である。また、観測船に複数のGPSアンテナとトランスデューサーを直接固定し、それによって船体の方位、

傾きとともにトランスデューサーの位置を求めるのも有効ではないかと思われる。

今後は、以上のような装置の改良を行うとともに、海底側の測器の位置を求める際に重要となる水中の音速度構造に関してもシミュレーション等を行っていきたい。

#### 謝 辞

今回の観測実験にあたりご尽力いただき、また色々と貴重なアドバイスをいただきました母船「なつしま」の船長はじめ乗組員の方々、「しんかい」潜航チームの方々に深く感謝いたします。

#### 引用文献

Chachin, T. and T.Kato (1994) : An Estimation of Rotation Parameters of Philippine Sea Plate Motion from GPS and VLBI Data. Proceedings of the Japanese Symposium on GPS (1994) , 229-234.

尾鼻浩一郎・片尾 浩・安藤雅孝・松尾成光・村上英幸 (1994) : 超音波を利用した水中測距装置の試作. 日本地震学会講演予稿集, 2, 99.

(原稿受理: 1995年6月20日)

(注) 写真は次ページ以降に掲載

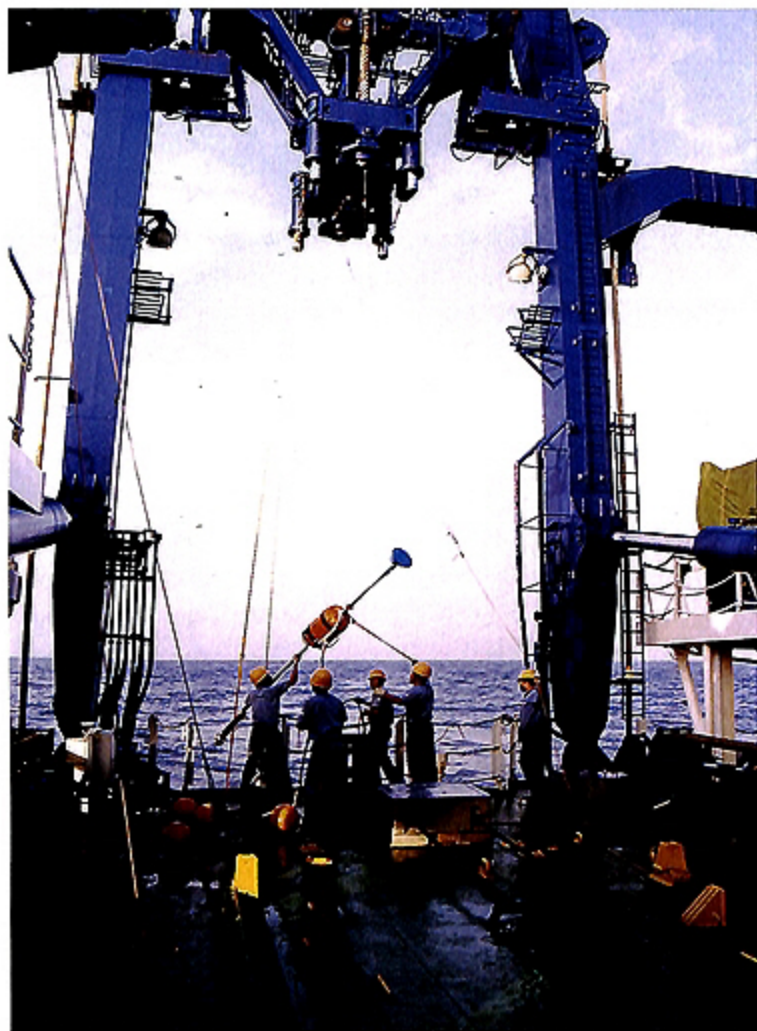


写真1 「なつしま」船上での観測作業風景  
Photo 1 A scene of the experiments on "Natsushima".