

海底地殻変動観測を目指した音響技術開発†

矢吹哲一朗*

Challenges to Observe Sea Bottom Crustal Deformations with Acoustic Ranging Technique †

Tetsuichiro YABUKI*

1. はじめに

二十世紀の後半になって人工衛星の軌道追跡や電波天文学が測地に利用されるようになり、SLR (Satellite Laser Ranging), VLBI (Very Long Baseline Interferometry), さらにはGPS (Global Positioning System) などの宇宙技術を利用した地球規模の高精度測地手法が実用化された。特に、1990年代に完成されたGPSにより、地表のプレート境界近傍の地殻変動帯で、年間に数センチメートル程度の大きさの変動を詳細に捉えられるようになったことは画期的なことである。

測地学とは別に、二十世紀の半ばから主に海底の地質学・地球物理学的調査により、数百万年を超えるような時間をかけて生じた地球表面の変動が解明され、プレートテクトニクス理論が誕生するとともに、それらが現在の地震や火山噴火などのダイナミックな地表変動と密接に関係していることが明らかにされた。そして(驚くべきことであるが)、宇宙技術で測られたこの数年間の大陸の動きと、主に地質的な証拠から予想される(すなわち数百万年かそれ以上の時間をかけて生じた)動きが、概略において一致していることが明らかとなった。

測地学とプレートテクトニクス理論から、地震や火山活動を含む地表のダイナミックな変動が理解されるにつれて、それらの将来予測が大きなテーマとなってきた。特に、日本のように変動が大

きく、地震や火山災害にたびたび見舞われてきた国にとって重要な課題である。

ところで、宇宙測地技術は、電磁波を利用しているため海底はその対象外となる。水中では、測地に利用できるような波長の短い電磁波はせいぜい数十メートル程度しか届かないのである。その結果、現在では、陸上で高精度・高密度に地殻変動を測ることができるにもかかわらず、一步、海底に踏み出すとほとんどデータがないアンバランスな状態が生じている。海域は観測の空白域として取り残されてしまった。けれども、宇宙測地技術、特にGPS固定観測ネットワークを用いた地殻変動観測の有効性が明らかになるにつれ、それを海域に拡大しようという試みが行われるようになり、電磁波の代わりに水中音響を用いる海底音響測地というべきものの開発がされるようになっていく。

水中音響技術は、水深測量に用いられるほか、潜水艦ソナーのように海中での活動にはかかせないものである。波動現象を用いるという意味において、それまでの(電磁波)測地技術の延長であり、画期的にあたらしい概念が必要であったわけではない。つまり、水中音響技術を利用して海底測地を試みるために必要だったことは、用いる技術要素の見直しと高度化を行い、それらを組み合わせることで海底でも用いることのできる頑強で実用的で精密な技術をコスト的に許容できる範囲内で実現する努力であった。

† Received 2002 January 9th.; Accepted 2002 March 25th.

* 海洋研究室 Ocean Research Laboratory.

本稿では、海上保安庁水路部の取り組みを中心にして、この10年間の海底音響測地技術の発展を概観するが、その前に、特に地震防災の観点から、海底地殻変動観測に対する期待を概観する。

なお、本稿は、筆者らがInternational Hydrographic Review 誌に寄稿した報告記事(Yabuki et al, 2000)の内容を大幅に書き直したものであり、一部に内容の重なりがあることをお断りする。

2. 海底地殻変動の観測が目指すこと

日本列島の周辺でのプレートのぶつかりに起因する地殻変動は、特に国土地理院のGPS固定観測網(GEONET)によるこの数年間のGPS観測から詳細に明らかになった(例えば、村上ほか, 2000)。主な成果としては、(1)大きな地震のあとの余効変動が精密に観測されたこと(例えば、Heki et al., 1997)、(2)ダイナミックな地震波動を伴わない、しかし、地震と同様に蓄積された応力を開放する断層運動、いわゆるゆっくり地震が観測されたこと(例えば、Ozawa et al., 2001)、(3)地域による変動の違いが明らかになり日本列島全体を見わたしたときの地殻変動の不均質性が明らかになったこと(例えば、鷺谷ほか, 1999)であろう。総合すれば、地震時の応力解放および地震と地震の間の応力蓄積過程について、時間・空間特性が明らかにされ、そのメカニズムの解明も行われるようになってきた。そして、地殻変動の時間発展と大地震の発生にいたる過程の議論が可能となりつつある。地震発生の長期的な将来予測に大きく貢献するものである。

ところで、日本列島で地殻変動を引き起こす主な原因の一つは、周辺のプレート境界でのプレート相対運動であるが、プレートどうしがぶつかり合う場所の大部分は海底にあり、陸域の地殻変動観測だけでは全貌を明らかにすることは困難である。地殻変動の状況を適切に把握し理解するためには、海底の地殻変動を観測することが重要である。もし、主なプレート境界に沿って、海底の地殻変動を観測することができれば、日本列島の広

域の地殻応力の状態を支配している沈み込みプレート境界での応力の蓄積・開放の過程を詳細に明らかにできるであろう。このような、大地震に至る地殻活動の全貌を、(海底地殻変動も含めた)観測と解析、シミュレーションにより把握し理解することが地震調査研究の大きな課題となっている(測地学審議会, 1997)。

たとえば、これまで100~200年の間隔で繰り返しマグニチュード8級の地震が発生している南海トラフについて、応力蓄積過程の解明、もし前兆的な地殻変動が起きるとすればその把握、地震で開放される応力の実態の解明が期待される。特に、この地域では次回の大地震が今世紀前半に発生する可能性があると予想され(地震調査委員会, 2001)、今後、海底地殻変動観測への期待はますます高まると考えられる。一方、東北沖の日本海溝沿いの地域は、プレート間地震の起こり方が地域性が強く複雑である(地震調査委員会, 1999)。本稿でその詳細の議論はできないが(現在、この付近のプレート間地震の長期評価が地震調査委員会で議論されている)、海底地殻変動観測からプレートの動態を明らかにすることが大いに期待されている所以である。

もちろん、地震予知と防災のためには(海底)地殻変動観測だけを実施すればよいわけではない。地殻内部のさまざまな物理的、化学的現象を総合的に観測調査し、シミュレーション等の手法も用いて明らかにすることが必要である。地殻変動観測は、そのような総合調査のなかの項目にすぎないともいえるが、しかし、もっとも重要な項目の一つである。今後、日本列島とその周辺海域を覆うような広域観測を(例えば南海トラフでは百年以上に及ぶ)地震発生サイクルの中で継続し明らかにするような、世代をこえる長期観測が必要となるかもしれない。

3. 水中音響技術と海底地殻変動観測

測地測量の応用という意味では、上記のように海底地殻変動観測の基礎は水中音響技術である。(Spiess, 1980, 1985a, 1985b; 藤本, 1995; 長屋,

1996). 海上保安庁水路部では、マルチビーム測深機を用いた船からの海底リモートセンシングの成功により水中音響技術の能力を実感していたため、その利用は当然のことと考えられた。しかし、音響シグナルの伝播時間測定は比較的容易であるものの、測定された時間を距離に変換するためには、別に音速度構造の情報が必要であり、この精度の確保は簡単ではない。また、音波は水中で減衰が大きく伝達距離に限られる。さらに、後述のように、音速構造の不均質性のために音響シグナルの届かない領域ができる場合もある。何よりも海中で観測するには高度で精密な技術が要求され、決して容易ではない。

この分野の先駆的研究は、米国スクリップス海洋研究所の Spiess らのグループにより行われている。1960年頃から音響を用いた海底の精密測位に関する研究を続け、Spiess(1985a)では、音響を用いた海底地殻変動観測を、(1) 海底の2点間の直接測距 (Direct Path Acoustic Ranging: DPAR) と、(2) 海底—海面—宇宙の機器を測距で結合する方法 (GPS/Acoustic Ranging: G/AR), そして、(3) これらの中間的な方法、すなわち海底と海中の機器の間を測距で結合するもの (Interrogating Underwater vehicle Ranging: IUR) に分類している。

Table 1に各手法の特徴をまとめる。

海底の2点間の測距 (DPAR法) は、機器が設置されれば自動繰り返し観測が可能で地殻変動の時間的推移を追跡できる有効な方法である。また、

深海での観測では、音速度がほとんど変動しないので、精度を確保することが比較的容易である。しかし、2点の間の見通しを確保する必要から基線を長くすることが困難であり、したがって、広域の変動を把握することは難しい。なぜならば、ある程度深い海の中では水圧の上昇に伴って深くなるほど音速度が増大し、結果として水平の音線 (音響シグナルの通る道筋) が上に曲げられるからである。このように、音波のエネルギーが上に逃げてしまうことと、音波の減衰の問題のため、基線長は地形にもよるがそれほど長くはできないし、2点の音響的な視通を確保するため、機器を設置する場所の詳細な地形に気を配らなければならない。観測のターゲットを、特定の断層、あるいは開口割れ目等の変動帯に限定して測定することが必要である。

2つ目の海底—海面—宇宙の機器を測距で結合する方法 (G/AR法) は、具体的にはGPS/音響測距の結合手法と呼ばれるもので、海上の船舶等の位置をGPSで求め、それを基準にして海底の音響基準点 (特定の呼び出しシグナルを受けて特定の応答シグナルを返す音響トランスポンダー) の位置を決めるものである。この手法は、目標精度はともかくとして古くからアイデアはあり、海底の位置 (緯度・経度) を決める原始的な方法ともいえる (Yamazaki, 1975; Spiess, 1985a; 山崎, 1991)。地殻変動観測の観点からは、GPSによる移動体高精度測位が実用的化された1990年台半ば以降に急速に進歩している。GPS移動体の高

Table 1 Comparison of three acoustic systems for sea bottom geodesy.
(音響測距技術を用いた広域の海底地殻変動観測手法の比較)

手 法	観測範囲	観測機会	観測システム	海面付近の複雑な音速度構造
海底2点間直接音響測距 (DPAR)	狭・短	多	単純	影響はない
海底基準点—海上移動体海上移動体—人工衛星測距の結合 (G/AR)	広・長	少	複雑	影響あり
海底基準点—海中移動体音響測距 (IUR)	中	少	複雑	影響の可能性あり

精度測位は広範囲で可能であり（矢吹,1995; Colombo, 1998; Han, 1997), 広域に音響基準点ネットワークを展開し観測をすることが可能になる。その代わり海上に船かブイが必要であるため, 観測を常時行うことは不可能ではないが難しい。また, 音響測距に加えて, GPS測定, 船の動揺の測定, また, 海中の音速度構造の測定を行い, それらを総合的に解析処理しなければならないため, 観測は大掛かりでデータ解析は複雑となり, 長期にわたり継続して実施するには組織的な観測・解析体制の構築が必要である。

もう一つ, これら2つの方法の中間的な方法(IUR法)がある。これは, 海底2点間の直接音響測距をあきらめて, 海中に浮遊するプラットフォーム(たとえば, 船舶からつりさげ曳航する)を用い, 海底の4個以上の音響基準点との間で測距を行って, 海中プラットフォームの測位と海底基準点の幾何学的形状を求めるものである(Spiess, 1985b)。先のDPAR法よりも, 基線長を長くできるものの, それでも音波の減衰のためせいぜい20km程度と見られ, しかも, G/AR法の問題点をそのまま引き継いでいる。また, 曳航プラットフォームが浅いと(浅い方が観測作業は楽である), 海面付近の複雑な音速度構造の影響を受ける可能性もある。

このIUR法は潜水艇のような海中移動体の局所的な高精度測位方法を応用したもので, かなり以前から地殻変動観測への応用の可能性が指摘され, 手法が概念的に論じられシミュレーションも行われていた(たとえば, Yamazaki,1975; Spiess, 1985b)。しかし, 観測システムが大掛かりになるものの成果がそれほど期待できないために, 研究開始の初期ハードルが高かったようで, 日本では本格的なフィールド実験が実施された例を知らない。

次節以降で, 最近になっていくつかの成果が得られている(1)と(2)の手法について概観する。

4. 海底の2点間を結ぶ基線の音響測距

この方法は, 比較的早くから, いくつかの機関

で検討され実験が行われている(例えば, Spiess, 1980; Chadwick et al., 1994; Fujimoto, 1990; 藤本ほか, 1995)。以下で, 海上保安庁水路部の開発研究を中心に概説する。

4.1 海底ステーションシステムの開発

海上保安庁水路部と(財)日本船舶振興会の補助を受けた(財)日本水路協会は共同で, 「海底ステーションシステムの開発研究」プロジェクトを開始し, 海底地殻変動観測を目的にフィールド実験を視野に入れた海底2点間音響測距技術開発を1989年に始めた(浅田ほか, 1991)。基線の長さ1キロメートルで1センチメートルの精度を目指した。要求される精度を満たす技術的な仕様を定め, 測機を試作する取り組みが中心で, 既に存在する技術的確で注意深い組み合わせによる測定装置の試作と, その実用試験から, 海底地殻変動観測の可能性を明らかにすることを目的とした。

しかし浅海試験などは成功したものの, 深海での海域実験は期間内にはできなかった(日本水路協会, 1993)。その大きな原因は, 要求精度が厳しく, また機材の深海底への設置や回収機能も必要であるために当時の技術では機器が複雑で巨大で扱いにくいものになったこと, さらに, 開発した機器の海域試験が年に1~2回程度しかできずしかも深海底に複雑な機材を計画通りに設置することは限られた予算の中では困難だったことである。つまり, 机上プランに基づいた現実的な観測機材を製作することができなかった。しかしながら, この研究プロジェクトにおいて, 基本的な測定装置の試作と基礎データ収集を行うことができ, 先導的な研究として十分に意義のある成果を残した。

4.2 東太平洋海膨実験

3節に述べたように, 2点間の音響測距は, ターゲットを絞り込んだ狭い領域の測定では大きな力を発揮する。その観点からいくつかの機関で, 特に, 海底の拡大プレート境界での測定が試みられデータ取得に成功している(Fig.1)(Nagaya

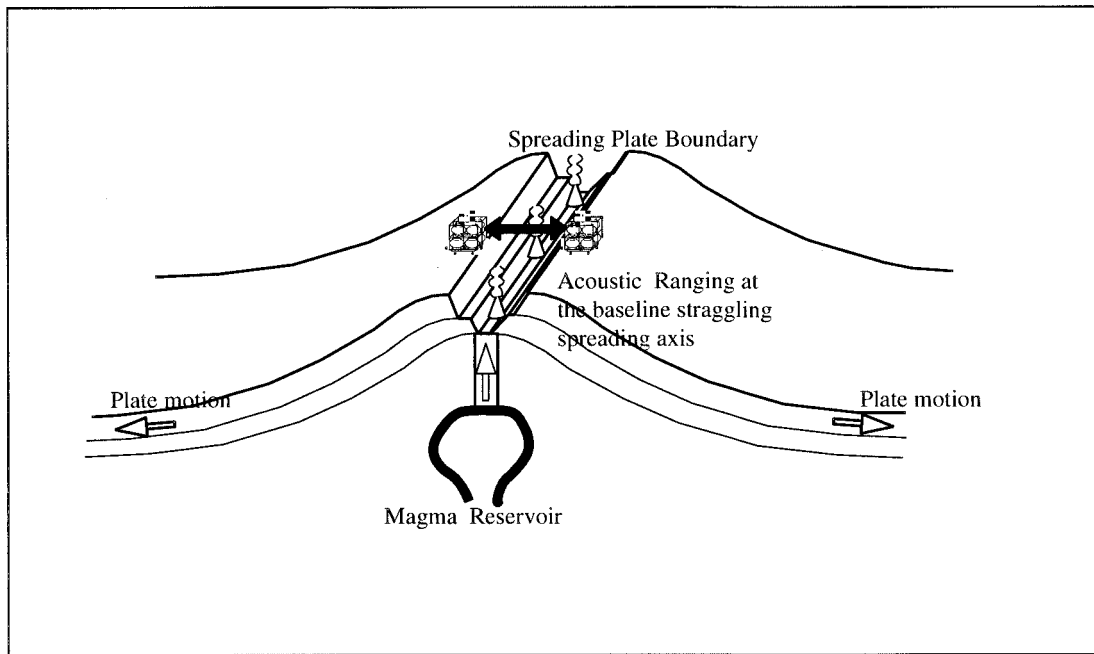


Fig. 1 Schematic Image of the observation of spreading process with direct path acoustic ranging at the baseline straggling over the spreading plate boundary.

et al., 1999; 長屋, 2000a; Chadwell et al., 1999; 藤本, 1999).

海上保安庁水路部は、科学技術振興調整費「海嶺におけるエネルギー物質フラックスの解明に関する国際共同研究 (Ridge Flux 計画)」(平成5年度~10年度)に参加し、先の(財)日本水路協会と水路部の共同研究で試作した機器をベースにして改良を加えることにより基線長1km程度、測定繰り返し間隔1時間で1年以上にわたって継続観測が可能な機器を作成し、SeaFAR (SeaFloor Acoustic Ranging System)と名付けた(Yabuki et al., 1994; 長屋ほか, 1994; 矢吹ほか, 1995; 長屋ほか, 1996; 長屋, 1997)。そして、1997~1998年に東太平洋海膨南緯18度付近の水深およそ2700mの海底で観測を成功させた(Figs. 2-4)(Nagaya et al., 1999; 長屋, 2000a)。このときは、設置を海洋科学技術センターの潜水艇「しんかい6500」を用いて実施している(浦辺ほか, 1999)。測定には、30-50kHz チャープ信号を使い、分解能1cm以上での測定である。この海域は、プレート拡大速度が年間約16cmと世界でもっとも速

く、また、拡大領域が幅にして数キロメートルそこそこの帯状領域に限られる場所で、拡大のプレートダイナミクスを測定するには理想的な場所であった。数千キロにわたって拡大プレート境界が連る場所のプレート運動とマグマ活動の実態を明らかにすることは、地球環境の観点から大きな意味をもつ。

SeaFARによる観測は、日本から遠くはなれた海域でただ一度のチャンスに成功させなければならないことや、トラブルが生じても船上に限られた資材と人員と時間で解決しなければならないなど、多くの困難をとまなうものであった。結果として、1年間の測定でプレート拡大ではなく地下のマグマ溜まりが冷えたために生じたと思われる収縮(基線長の減少)を検出した。その結果は、同時に行われた水温や圧力などの測定と整合し、得られた結果が正しかったと見られている(藤本, 1999)。個々の距離測定から長期的な変動をのぞいた残りのばらつきは1cm以下となり、当初の予測を超える良いものであった。

なお、米国でも同様の試みが東太平洋北部の

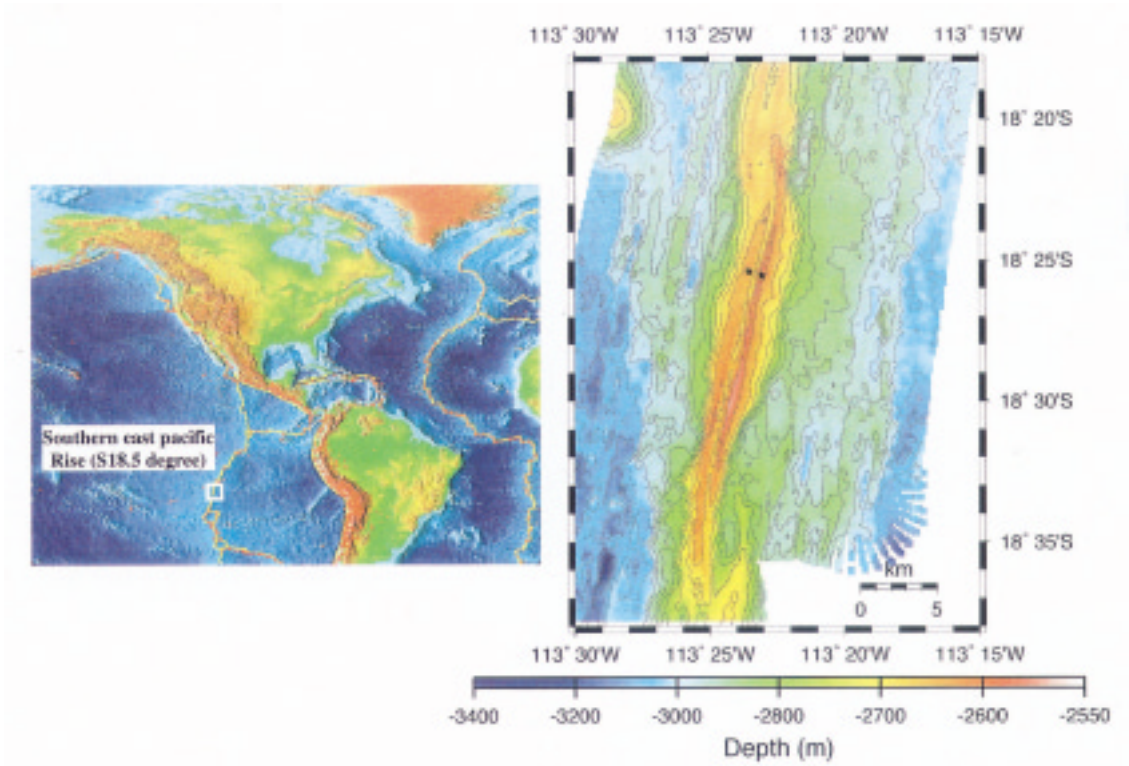


Fig. 2 Location map showing the field experiment point with SeaFAR in 1997-1998 at Southern East Pacific Rise spreading boundary. The distance between the two points (stars in the right figure) was measured repeatedly for more than 400 days.



Fig. 3 Photo of SeaFAR (one of twin unit) just before the placement on the sea floor in 1997 at Southern East Pacific Rise.

Juan de Fuca リッジで実施され、スクリップス海洋研究所のグループは、同様の測定を成功させた。偶然であるが、これも拡大軸での基線長の収縮を測定している (Chadwell et al., 1999)。

4. 3 プレート収束の測定に向けて

プレート拡大境界での観測の成功は、2点間直接音響測距が海底の現象を捉えるのに有効であることを示している。成功要因のひとつは、深海の水温がほとんど一定で変化が少ないことである。プレート拡大境界は陸地から遠く離れた場所にあることが多く、環境変動の大きい陸地の影響を受けにくい。大洋中央の深海は、火山活動を除けば環境変動の要因が少ない場所である。

これに対し、日本近海のプレート収束域は、陸(すなわち日本列島)に近く陸上の環境変動の影響を受けやすい(長屋, 1997)。さらに、プレート収束境界周辺の変動帯は、場所によるものの、広い場所では数百キロメートルに分散してしまうこともある。このため、海上保安庁水路部では海

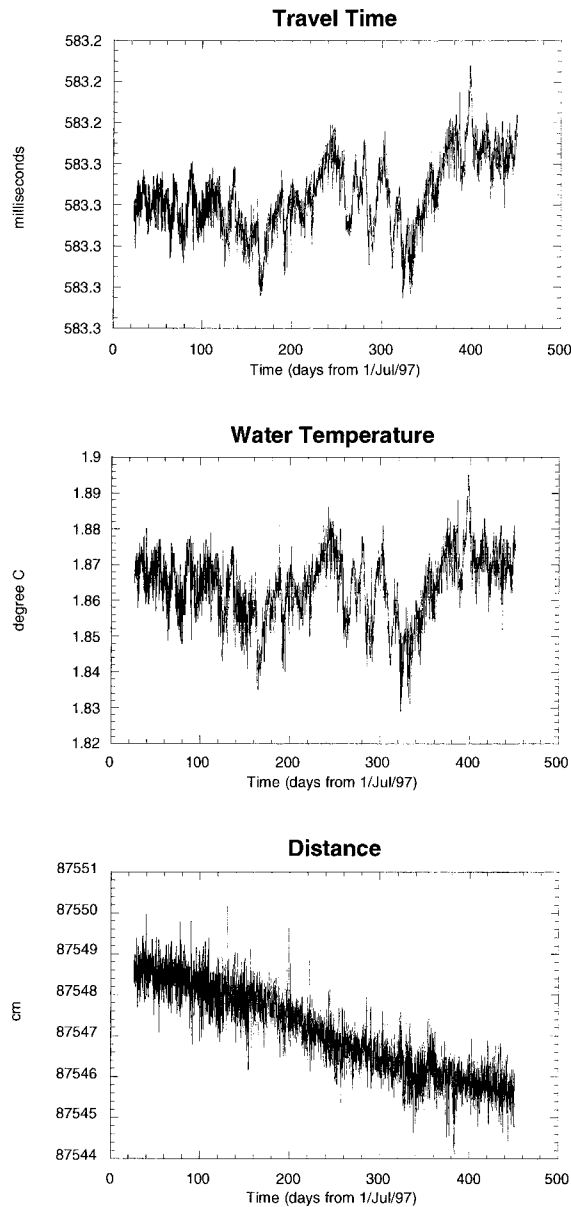


Fig. 4 Observed variations of water temperature, travel time of acoustic signal and estimated distance of baseline at Southern East Pacific Rise by using SeaFAR. Distance is calculated with the assumption of constant salinity (35 ppt) and pressure changes based on global ocean tide model. The trend of distance changes suggests the shortening of baseline, because of the cooling down process of sub-sea bottom magma reservoir.

底の2点間の音響測距による日本近海プレート収束境界での地殻変動観測を実用化するために、水温に加えて塩分も含めた深海の環境変動測定と、測距信号の周波数を40kHz から10kHz程度に低

くし音波の到達距離を拡大することにより（精度が多少落ちるものの）基線長を5km程度に延ばす地殻変動観測実験を実施しつつある。

前述のように、深海では水平方向に出た音線は上に曲げられることから、水平音響測距の音線は下に凸の湾曲したものになる。例えば、水深3千メートルで水平基線を5kmとした場合、中央での音波の下方への垂れ下がり40m程度、基線長10kmの場合はおよそ150mである（長屋, 1996）。このため、日本近海での海底2点間直接測距は、限定された場所で観測ターゲットを絞って実施することが必要である。海底の地殻構造等をもとにその場所で期待される変動を推測し、地形も考慮して実施しなければならない。

また、SeaFARでは、測定データはすべて内蔵メモリに保存し、機材の回収後に取り出している。しかし、日本近海の地震防災を視野に入れた地殻変動調査では、リアルタイムのデータ受信も期待される場所である。もし、海底ケーブルを用いてデータ受信のみならず電力供給ができれば、回収作業もなくなり長期にわたり安定してデータを取得することも夢ではなくなる。海上保安庁水路部では、科学技術振興調整費「海底ケーブルを用いた地震等多目的地球環境モニターネットワークの開発に関する研究（VENUS計画）」（平成7年度～11年度）に参加し、沖縄沖の深海底で海底ケーブルを利用した音響測距の観測実験を行っている（Nagaya and Yabuki, 1997; Nagaya, 2000b）。しかし、このような海底ケーブルを用いた観測は、新たなケーブル設置の検討も必要で、大規模な体制の構築を伴うものとなる。

5. GPS測位と音響測距のリンク

G/AR法（Fig.5）は、地殻変動観測の観点からは、1990年頃まではほとんど机上議論のみで実際に試みられることはなかった。海上で船船の位置を（地殻変動観測で期待するような）高い精度で測定する現実的な手法は存在しなかった。IUR法を用いて海底地殻変動の広域化を推進するほうが、当面、成功の可能性が高いと見られてい

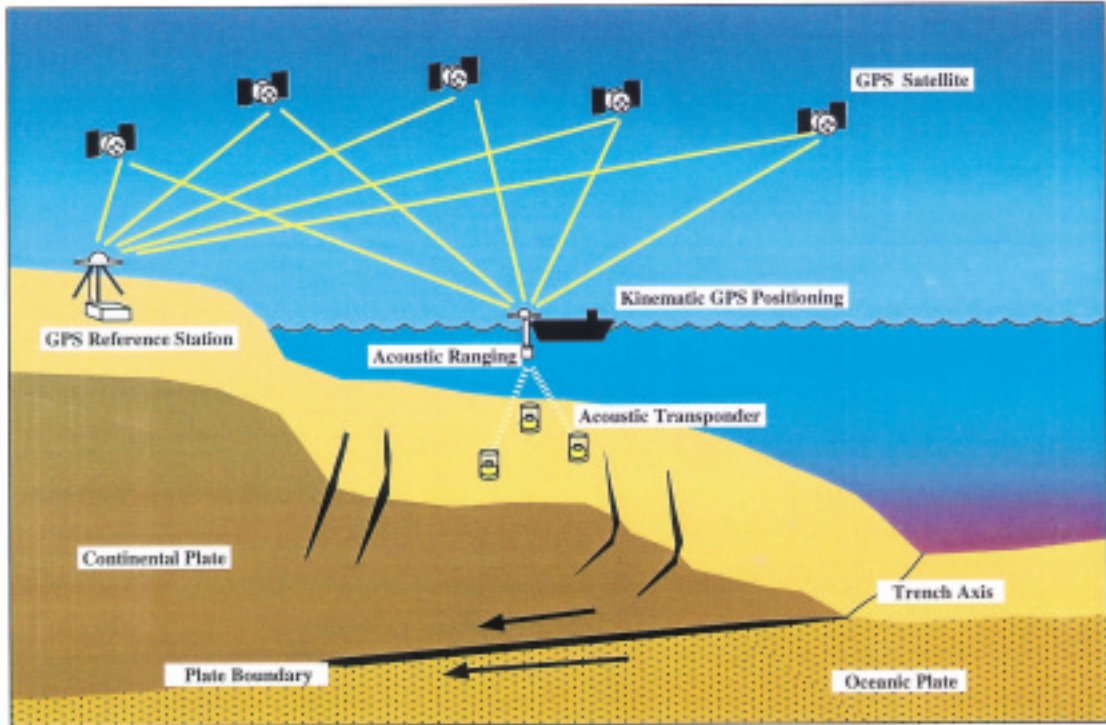


Fig. 5 Schematic Image of the observation of sea bottom crustal deformations with GPS/Acoustic ranging method at the vicinity of convergence plate boundary.

たようである (Spiess, 1985b). しかし, GPSの登場で, 事態は劇的に変化した.

最初に, G/AR法によりプレート運動モデルと比較できる観測結果を実現したのも, 米国のスクリップス海洋研究所の Spiessらのグループである. 当初は, IUR法の確立を目指し, 音響トランスポンダの独自開発から行っていたが, その間にGPSが1993年にシステムとして完成し, 海上での24時間精密測位が実現したことからのこのG/AR法を試みて, 東太平洋北部のJuan de Fucaリッジでの観測に成功した (Spiess and Hildebrand, 1995; Spiess et al., 1998).

日本では, 地震予知の観点から海底地殻変動観測に対する大きな期待があり, 京都大学のグループは試験的に機器の開発とテストを行い可能性を探った (Obana, 1998). 海上保安庁水路部と(財)日本船舶振興会の補助を受けた(財)日本水路協会も, 共同で, 「精密海底調査による海底変動の検出手法の研究」を実施し, その可能性を追求した (日本水路協会, 1996; 矢吹・亀谷, 1996).

その後, 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・観測システムの高度化に関する総合研究」(平成8年度~12年度)において, 大学グループと水路部で開発研究が継続されている (Asada and Yabuki, 1999, 2001b; 浅田・矢吹, 2000, 2001a; Obana et al., 1999; 田所ほか, 2001). この結果, 南海トラフに近い熊野灘の水深2千メートルの海域に開発したトランスポンダーを設置し, 2000年5月と8月に観測を行った (Figs. 6 and 7). その繰り返し再現性 (つまり, 3ヶ月間に地殻変動がなかったと見られることから理想的にはゼロとなるべき量) がおよそ2センチメートルであると報告されている. これに並行して, 海上保安庁水路部では, 東北沖の日本海溝沿いの陸側斜面にも観測点を設置して観測を開始している.

この方法が, 最近, 日本で大きく注目されているのは, プレート収束境界での海底地殻変動観測にとって有効な方法と考えられるからである. 既に述べたようにプレート沈み込み帯の変動を観測

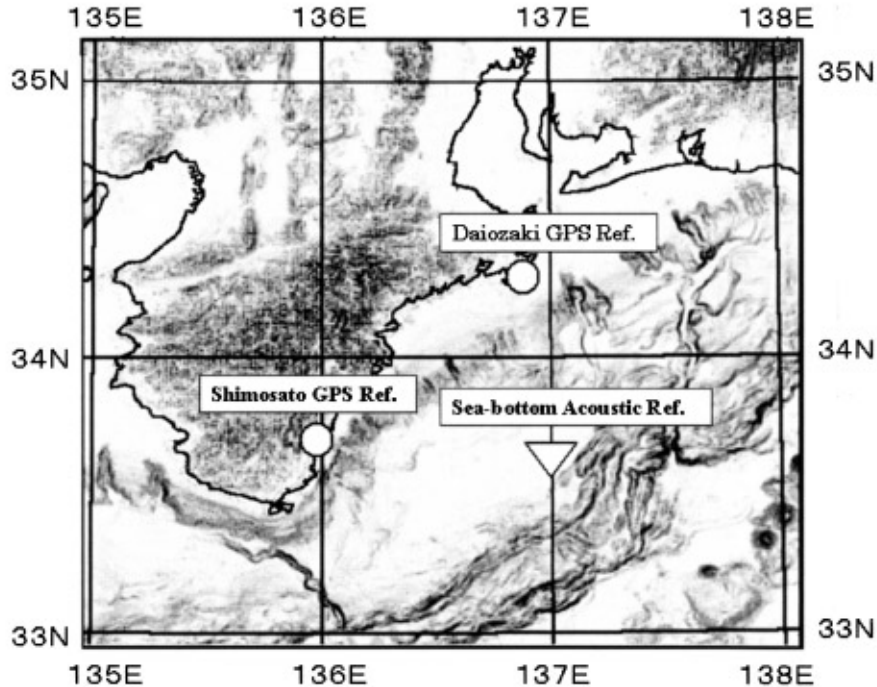


Fig. 6 Location of sea bottom geodetic station established with three transponders in February 2000 (Triangle). GPS reference points for sea surface precise positioning are shown(circles). (After Asada and Yabuki 2001b)

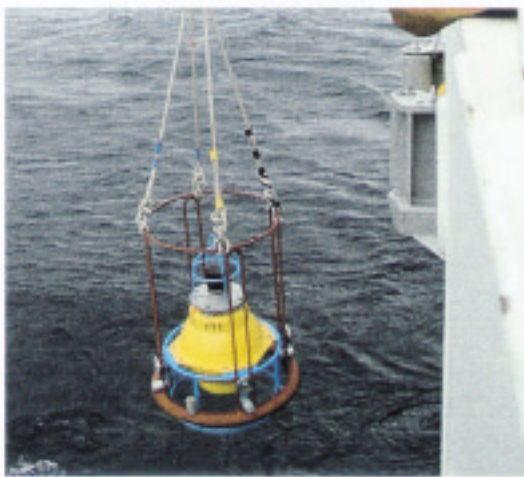


Fig. 7 Photo of a precise transponder just before the placement on the sea floor in 2000 at Kumanonada.

のターゲットとすると、たとえば日本近海の場合、日本海溝沿いに長さ千キロメートル、幅二百キロメートル以上の広い範囲で、少なくとも数十年間わたって観測を継続することが求められるかもしれない。このような広域での長期観測は、3節で述べた3つの方法の中でG/AR法がもっとも有効

である。

しかし、もちろん問題点も多い。先に述べたように、今のところデータ取得が間欠的で年に数回というような頻度でしか取れない。高い頻度のデータ取得のためには、電源、データ取得等の大きな問題を多数抱えており、ケーブル敷設や海上ブイ設置等も含め今後の課題である。

また、システムが複雑で大掛かりであり、多くの計測を結びつけて解析するので誤差要因が数多くなる。この方法の鍵となる技術は、船舶のGPS高精度測位と動揺計測、そして、音響測距と音速度計測の4つであり、成果はこれらの観測データを結合して得られる。したがって、観測結果で得られた変動が真の海底地殻変動かどうかを判断し、もし、何らかの誤差が混入した場合、どこにその原因があるかを確認するには、相当の努力が必要である。特に、GPS測位と音響測距では信号がある程度の距離を伝搬するため、その経路の途中で何かの異常（擾乱）が生じると海底基準局の測位結果に影響を与える。この影響と真の地殻変

動の区別ができない場合が問題である。

例えばGPS測位では、人工衛星や受信機の問題に加え、電波伝搬経路の電離層、大気、そして障害物やマルチパスの影響が見かけ上の変動を与える原因となりうる。これらは、海上船舶の位置測定にとっては誤差要因である。陸上基準点と海上移動点のGPSデータの注意深い評価と適切な対策が必要であろう。

また、音響測距についても、音波伝搬経路での音速度構造の擾乱を問題にしなければならない。仮に表層の100mまでの深さのところでは音速構造に0.1パーセント(1.5m/s)の誤差があった場合、(音線が垂直ならば)片道で約10cmの測距誤差が生じる。表層は、特に音速構造の変動が激しく、厳密にどのような振る舞い(変動の特性)を持つのか、その実体を明らかにする必要がある。

このように、GPSについても音響測距についても、測定データを収集し、その分析から、音速度構造の変動のような誤差要因に関する情報を定量的に得て、モデル化、補正データの収集、統計処理などによりその影響を取り除くことが必要と考えられる。

6. おわりに

この10年の海底地殻変動観測の発展を、特に水中音響の手法に限って概観した。10年以上前のSpiess(1985a)を読むと、さまざまなアイデアを議論しながらも、机上の議論だけでフィールド観測データがないことがもどかしく感じられる。可能性を追求しながらも、実際に実現するには大きなハードルがいくつも存在していた。現在でもこのような海底地殻変動観測に取り組んでいる機関は、世界的に見ても数少ない。

この10年の間には、日本では1995年に阪神淡路大震災があり、科学技術に依存する都市が地震災害に対して盤石でないこと、地震予知の試みが社会に貢献できるような能力をいまだ備えていないことが明らかとなった。今も、この状況が大幅に改善されたとはいえない。それでも、地殻内部の現象解明は、特にGPS観測網と高帯域地震観

測網の整備により画期的に前進しつつある。その一方で、観測空白域としての海域の重要性をきわだたせるようになってきている。事実上、日本ほど海底地殻変動観測への要求が高い場所は世界に類を見ない。本稿で述べたような研究開発は、たとえば音響技術にしるGPSにしる、特に、米国の軍事技術、宇宙技術で開発された部分がかかなりの割合で入っているものの、それらを利用した地震現象の解明は日本が積極的に推進すべきものである。

水中音響技術を用いた方法が真に有効であるかどうか、それは今後の展開を見なければわからない。そのためには、技術的な改良を加え観測データの信頼性を高めることだけで不十分であり、観測に必要な負荷を少なくするとともに、観測体制を人的・経済的に支える社会基盤の整備も重要である。社会の期待と信頼を前提として、それに答える技術的・組織的努力とともに、社会と観測実施機関のつながりを常に維持することが必要であろう。

最後に、本稿をまとめるにあたり、海上保安庁水路部の小田卷実、打田明雄、仙石 新、岡野博文の各氏にお世話になりました。記して感謝します。

参 考 文 献

- 浅田 昭・小野房吉・長屋好治・植田義夫：水路部における海底観測計画，月刊海洋，23，255-263，(1991)。
- Asada, A. and T. Yabuki: Acoustic ranging system for ocean bottom geodesy and synthetic aperture technique of a multi-beam echosounder, *Proc. of "International Workshop on recurrence of great interplate earthquakes and its mechanism"*, 65-75, (1999).
- 浅田 昭・矢吹哲一朗：海底音響基準ネット，生産研究，52，293-296，(2000)。
- 浅田 昭・矢吹哲一朗：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, (2001a).
- Asada, A. and T. Yabuki: Centimeter Level Positioning on the Seafloor, *Proc. Japan Academy*, **77**, 7-12, (2001b).
- Colombo, O. L.: Long-Distance Kinematic GPS, in "GPS for Geodesy 2nd Edition", edited by P. J. E. Teunissen and A. Kleusberg, Springer, 537-568, (1998).
- Chadwell, C. D., J. A. Hildebrand, F. N. Spiess, J. L. Morton, W. R. Normark and C. A. Reiss: No Spreading across the Southern Juan de Fuca ridge axial cleft during 1994-1996, *Geophys. Res. Lett.*, **26(16)**, 2525-2528, (1999).
- Chadwick, W., H. B. Milburn and R. W. Embley: Acoustic extensometer: measuring mid-ocean spreading, *Sea Technology*, **36**, 33-38, (1995).
- Fujimoto, H., J. Segawa, T. Furuta and H. Murakami: Installation of Ocean Floor Bases for observation of seafloor crustal movement, *Marine Geodesy*, **14**, 177-184, (1990).
- 藤本博巳・金沢敏彦・村上英幸：海底精密音響測距－その可能性を示す観測結果－, *地震* **2**, **48**, 289-292, (1995).
- 藤本博巳：海底精密音響測距, 水平方向の海底地殻変動観測, *海洋調査技術*, **7(2)**, 1-9, (1995).
- 藤本博巳：南部太平洋海膨の拡大軸を横断する海底圧力・測距の長期観測, *JAMSTEC 深海研究*, **14**, 35-42, (1999).
- Han, S.: Carrier phase-based long range GPS kinematic positioning, Report from School of Geomatic Engineering, University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia, (1997).
- Heki, K., S. Miyazaki and H. Tsuji: Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench, *Nature*, **386**, 595-598, (1997).
- 地震調査委員会：日本の地震活動－被害地震から見た地域別の特徴－ 追補版, *地震調査研究推進本部 地震調査委員会*, (1999).
- 地震調査委員会：南海トラフの地震の長期評価について, *地震調査研究推進本部 地震調査委員会*, (2001).
- 村上 亮・小澤慎三郎・西村卓也・宮崎真一・鷲谷威・多田堯：GPS連続観測による地殻変動観測の地震・火山研究への応用, *地学雑誌*, **109**, 971-982, (2000).
- 長屋好治・矢吹哲一朗・小野房吉・浅田昭・田尻克之：水路部における海底地殻変動観測への取り組み, *月刊地球*, **16(6)**, 309-314, (1994).
- 長屋好治：音波を利用した海底での歪測定に関する基礎的考察, *水路部研究報告*, **31**, 67-76, (1996).
- 長屋好治・矢吹哲一朗・小野房吉・浅田昭：海底音響測距計の開発, *水路部研究報告*, **32**, 89-99, (1996).
- 長屋好治：音響測距計の水温補正, *水路部技報*, **15**, 60-63, (1997).
- Nagaya, Y. and T. Yabuki: Detection of the Crustal Deformation on the Seafloor by Acoustic Ranging, *Proceedings of International Workshop on Scientific Use of Submersible Cables*, 189-191, (1997).
- Nagaya, Y., T. Urabe and T. Yabuki: Crustal Deformation Observation at the Crest of EPR 18.5S with the Seafloor Acoustic Ranging Method, *EOS Trans, AGU*, 1999 Fall Meeting, **80**, No.46, (1999).
- 長屋好治：海嶺における地殻変動の長期観測, 海嶺におけるエネルギー物資フラックスの海面に関する国際共同研究成果報告書, *科学技術庁*, 140-151, (2000a).
- 長屋好治：海底音響測距システムによる観測, VENUS計画成果報告書, VENUS計画研究推進委員会, 148-151, (2000b).
- 日本水路協会：海底ステーションシステムの研究開発, *日本水路協会*, 52p, (1993).
- 日本水路協会：精密海底調査による海底変動の検

- 出手法の研究, その2, 日本水路協会, 89p, (1996).
- Obana, K.: Development of Seafloor Positioning System with GPS-acoustic Link for Crustal Dynamics Observation, D. Thesis, Kyoto University, Japan, 99p, (1998).
- Obana, K., H. Katao and M. Ando: Seafloor positioning for Crustal Dynamics Observation, *Proc. of "International Workshop on recurrence of great interplate earthquakes and its mechanism"*, 76-83, (1999).
- Ozawa, S., M. Murakami and T. Tada: Time-dependent inversion study of the slow thrust event in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, **106**, 787-802, (2001).
- 鷺谷 威・宮崎真一・多田 堯: GPSで見た日本列島の変形, 月刊地球, **21**, 236-243, (1999).
- 測地学審議会: 地震予知のための新たな観測研究計画の推進について(建議), 測地学審議会, (1997).
- Spiess, F. N.: Acoustic Technique for Marine Geodesy, *Marine Geodesy*, **4**, 13-27, (1980).
- Spiess, F. N.: Suboceanic Geodetic Measurement, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing GE23*, **4**, 502-510, (1985a).
- Spiess, F. N.: Analysis of a possible Sea Floor Strain Measurement System, *Marine Geodesy*, **9**, 385-398, (1985b).
- Spiess, F. N. and J. A. Hildebrand: Employing Geodesy to Study Temporal Variability at a Mid-Ocean Ridge, *EOS Trans., AGU*, **76**, No.45, 451, 455, (1995).
- Spiess, F. N., C. D. Chadwell, J. A. Hildebrand, L. E. Young, G. H. Percell Jr. and H. Dragert: Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **108**, 101-112, (1998).
- 田所敬一・安藤雅孝・佐藤一敏・山田卓司・奥田隆・片尾 浩・岸本清行: 音響測距 - GPSリンクによる海底地殻変動観測システムの開発 -, 地学雑誌, **110**, 521-528, (2001).
- 浦辺徹郎・藤岡換太郎・満沢巨彦・RidgeFlux'97航海参加研究者: 超高速拡大軸である東太平洋海膨南部における海底長期観測ステーションの設置について, JAMSTEC 深海研究, **14**, 1-19, (1999).
- Yabuki T., Y. Nagaya, F. Ono, A. Asada and K. Tajiri: Development of a Seabottom Horizontal Distance Meter for Observation of Seafloor Movements by the Hydrographic Department of Japan, *Proceedings of International Symposium on Marine Positioning 1994*, Hannover, Germany, (1994).
- 矢吹哲一朗: GPSを用いた海上移動体の測位技術の開発と応用, 海洋調査技術, **7**(1), 47-54, (1995).
- 矢吹哲一朗・長屋好治・田尻克之: 深海底での超音波による精密音響測距の試み, - 相模湾での試験観測結果 -, 海洋調査技術, **7**(2), 29-32, (1995).
- 矢吹哲一朗・亀谷雅幸: 海底基準点の測地測量に関する基礎実験: 海洋調査技術, **8**(2), 11-21, (1996).
- Yabuki, T., Y. Nagaya and A. Asada: Approach for the realization of sea bottom crustal deformation observation: Targets and Tactics in waters around Japan, *International Hydrographic Review*, **1**(2) (New Series), 62-70, (2000).
- Yamazaki, A.: Position determination of Marine Control Points, *J. Geod. Soc. Japan*, **21**, 159-169, (1975).
- 山崎 昭: 海底基準点の位置決定シミュレーション, 海洋調査技術, **2**(2), 11-20, (1990).