

## 論文内容の要旨

論文題目 曳航ブイに搭載した GPS 音響結合方式の海底精密測位システム  
の開発と深海底における測位試験

( Development of a GPS/Acoustic seafloor positioning system on a towed buoy  
and its trial observations on the deep seafloor )

氏 名 長田 幸仁

日本周辺は、太平洋プレートなどの沈み込みにより海域で大地震が発生しているが、震源域近傍の海底で地殻変動を観測したデータはほとんどない。最近、陸上の GPS 観測や自然地震観測の結果に基づいて、海底のプレート境界のサイスミックカップリングを推定する試みが行われている。たとえば陸上の GPS 観測の結果から日本海溝における海洋プレートの沈み込みに伴うすべり欠損の分布を推定した研究などがあるが、観測点が陸上に限られているため、陸上から離れた場所では解析の信頼性が低い。このように陸上に限られている地殻変動観測を海域に展開することは重要な問題である。本研究では、海底で地殻変動観測を行うための海底精密測位システムの開発と主要な要素技術の評価を行う。

陸上から 200-300km 離れた海底で地殻変動観測を行う手法として GPS 音響結合方式の海底精密測位がある。この手法は、陸上の GPS 基準局を用いてキネマティック GPS (KGPS) を用いた海上の測位と海上海底間の音響測距を結合して、海底の精密な位置を求め、繰り返し観測により海底の水平変動の検出を目指すものである。このような研究は米国および日本で進められているが、これまで用いられている観測システムでは水深 2000-3000m という比較的陸に近い海底でしか観測ができない。水深 6000-7000m という日本周辺の海溝域で地殻変動を行うためには、深海底用の測位システムが不可欠である。このほかにも技術的課題として、海溝軸が陸から 200km も離れているために必要となる長基線の KGPS 測位や、調査船の発する海中音響雑音に妨げられることなく海上測位と海中測位を結合するシステムの開発、海中における音速変化の補正などの課題がある。

日本周辺の海溝域のほぼ任意の場所で海底地殻変動観測を可能にするために、大水深（9000m）用の超深海音響測距装置を米国のスクリプス海洋研究所および東北大学と共同開発した。音波の周波数を8~12kHzと比較的低くし、200dB re. 1 $\mu$ Pa @ 1m nominal という高い音圧で送信することにより、理論上14kmの距離で精密測距ができる装置ができた。14km以上の長距離測距ができれば、水深9000mの海底でも精密測位が可能になる。8~12kHzの音波を用いてステップスイープと呼ばれる周波数変調方式の音響信号(20ms長)を送信し、受信波形との相関処理を行うことにより、1cmよりよい測距分解能を得ている。海底に設置する精密音響トランスポンダー（海底局）の電子部および電池はチタン合金製の耐压容器に収納し、実際に水深9000mの海底に設置することも可能にした。電池の容量は5年以上の観測に耐える設計になっている。後述のハワイ島沖や三陸沖の試験観測で、実際に15.5kmを超える距離で精密測距ができることが確認されている。

陸上から200km以上離れた海上で精密測位を行うためにKGPSを用いている。KGPS解析ソフトとしてNASAのジェット推進研究所が作成したGIPSY-OASISIIを用いて、長基線キネマティックGPS測位の精度を評価する実験を行った。後述するように海上で試験観測を行ったが、絶対的な精度評価を行うことは難しいため陸上でも実験を行った。基線長を仙台—鹿島間の240kmにとり、VLBIパラボナアンテナの外周部にGPSアンテナを取り付けて、そのアンテナを精密な回転台として用いた。このデータを三浦・他(2002)が解析し、理論値と比較しKGPSによる水平位置の精度は、0.03mであったと報告している。この研究は、長基線のKGPS測位における絶対値の評価という意味で重要である。

調査船の発する海中音響雑音に妨げられることなく、海上測位と海中測位を結合するために、2m四方の曳航ブイに搭載した海底測位システムを開発した。ブイの上部には3台のGPSアンテナを取り付け、最下部に音響送受波器を取り付け、GPS受信機や音響測距装置をステンレス製の箱に収納し、電源は船からケーブルで供給するシステムとした。3台のGPSアンテナと音響送受波器の相対位置は、観測の前と後で、光学測量により精密に決定できる。このブイを船から数10m離して曳航することにより、船などからでる音響ノイズ対策が実現するとともに、船を選ばずに観測することが可能になった。

ブイを船で曳航することにより、任意の場所で測位観測を行うことが可能になり、海中の音速構造の変化を補正する効果的な観測方法が可能になった。海底に3台の海底局を設置し、各海底局の位置を求めたあとで、海底局アレイの中心付近で測位観測を継続するという方法である。海底局アレイとの音響測距により音響送受波器の位置を求め、KGPS測位から求めた音響送受波器の位置と比較することにより、海底局アレイの位置を精密に求める。繰り返し観測により、海底局アレイの水平変位を検出できる。この方法の利点は、海中の音速変化が大きい表層で波線が狭い範囲に集中するため、音速変化の影響が小さくなるということである。

開発した測位システムについて、その要素技術の評価を行うために、2つの試験観測を行った。2001年7月に行われた東京大学海洋研究所の淡青丸航海では、開発した曳航ブ

イシステムを用いて海底精密測位実験を行った。海域は陸から約 300km 離れた三陸沖日本海溝の海側であり、水深は約 5500m である。海底精密測位観測は現在でも水深 3000m を超える海底では行われていないので、画期的な実験であった。海底局は 3 台設置したが、1 台に問題があったため回収し、海底局アレイを用いた測位観測はできなかった。しかし、曳航ブイを用いて 2 台の海底局の位置決定と長基線 KGPS 測位の精度評価を行った。長基線 KGPS の精度評価については、曳航ブイの各アンテナについて異なる基線（基線長は約 270km と約 350km）において KGPS のエポック毎の差を比較した。その結果、緯度・経度については  $1\sigma$  で 2-3cm であることが確認できた。VLBI アンテナを用いて行った陸上の実験により、長基線の KGPS 測位について絶対値の信頼性が確認されており、長基線 KGPS の水平成分は 3cm 程度の測位精度が期待できる。

次に各海底局の周りにブイを曳航して測位観測を行い、その位置を求めた。曳航ブイに搭載した測位システムがほぼ予想通り働くことが確認できた。船の音響雑音は数 10m 離れても音響計測の障害になるという問題はあったが、音響送受波器に音響雑音遮蔽の笠を被せることで解決できることが分かった。この観測における走時残差は  $1\sigma$  で 15cm というやや大きな結果となったが、移動中に海洋物理観測を行うことで改善できる。

上記の三陸沖航海で果たせなかった海底局アレイを用いた海底精密測位は、2000 年 11 月に行ったハワイ島沖の試験観測で実施できた。この観測は、スクリプス海洋研究所との共同研究として、米国の Roger Revelle 号を用いて行った。この船は、2-3m の範囲で船位を制御しながら精密音響測距ができる高性能な船であり、ブイは用いずに船底から音響送受波器を下ろして測位観測を行った。ハワイ島南西沖にスクリプス海洋研究所が設置した音響測距装置 2 台と、本研究で開発した超深海音響測距装置 1 台による海底局アレイを用いた。海底局の水深は 2500 ~ 4500m であり、陸上の GPS 基準局からの基線長は約 50km である。

各海底局の周りで測位観測を行い、海底局の位置を求めた。その結果走時残差は、1 で 6-7cm であった。1 の走時残差から各海底局の推定位置の誤差を評価すると 30-40cm という結果が得られた。次に 3 台の中心に移動し、約 16 時間、海底局アレイの測位を行った。音速構造の時間変化を観測するために、その間連続的に CTD 観測を行った。音速構造の時間変化は表層 500m が特に大きいことが分かった。KGPS 測位と各海底局との音響測距の結果を比較することにより、音速構造の日変化により音響測距に振幅で約 0.6m の影響があることが分かった。しかし音速構造の日変化のみならず短周期の変動も 3 台の海底局との測距に共通しており、海底局アレイの測位にはほとんど影響を与えていない。1 回毎の音響測距から得られる海底局アレイの測位の  $1\sigma$  は、8 ~ 10 cm となった。この結果から 16 時間の観測から求められた測位残差の平均値の計測誤差を推定し、 $1\sigma$  で約 2cm という結果を得た。

本研究の成果は次のようにまとめる事ができる。水深 9000m まで、陸から 300km までの海底で海底精密測位が可能な観測システムを開発した。曳航ブイに搭載したシステムを

採用することで、船を選ばず、日本周辺のほとんどの海溝域周辺で海底測位観測ができる実用的な海底精密測位システムを開発することができた。三陸沖日本海溝の海側およびハワイ島沖の試験観測により、4つの重要な要素技術の性能評価をすることができた。ハワイ島沖の16時間の観測による海底局アレイの測位の推定計測誤差が約2cmであるが、200-300kmの長基線におけるKGPS測位の再現性が約3cmであるので、数cmで海底の水平変動を検出できる測位システムができたといえる。