

12 - 9 海底測地観測の現状と課題： 海底 GPS, 圧力観測, 音響測距

Progress report on seafloor geodetic observations: GPS/A, OBP, and acoustic ranging

藤本博己（東北大学大学院理学研究科）

Hiromi Fujimoto (Graduate School of Science, Tohoku University)

1. 海底 GPS 観測

東北大学で取り組んでいる海底地殻変動観測について、現状と課題を簡単に報告する。GPS 音響結合方式の海底地殻変動観測は、GPS/A 観測あるいは海底 GPS と呼ばれており、プレート境界の固着状態の時空間変動を捉える切り札として、その重要性が認識されている。1990 年代に米国のスクリップス海洋研究所のグループがこの手法を提唱し、日本では今世紀に入って、海上保安庁や東北大学、名古屋大学で実海域の観測を開始した。2005 年の宮城県沖の地震後に、海上保安庁により固着状態の時間変動が捉えられた¹⁾ことは重要な成果であり、また観測の現状を示すよい例でもある。

しかし陸上 GPS と海底 GPS の観測には大きな差がある。現状の海底 GPS の繰り返し測位精度は、海況等により 2-3cm ないし数 cm 程度であり、陸上 GPS 測位に比べると 1 桁以上の差がある。また、日本国内には 1300 点ほどの高密度の GPS 観測網があるのに対して、海底の観測点は 30 にも満たず、宮城県沖の海域を除けば、孤立した点の観測となっている。1 点の観測に 1 日～2 日程度の時間を要しているという問題もあり、この観測時間の短縮も重要である。また陸上の GPS 観測点の大部分では連続かつセミリアルタイムの観測が行われているが、海底 GPS はキャンペーン観測の繰り返しであり、陸上の地殻変動観測で言えば「三角測量」の段階である。このような海陸の地殻変動観測の差を縮めるのが今後の課題である。

これまでの研究により、測位精度と観測時間を制約している最大の要因は、海中における水平方向の音速変化であると推定されている。水平方向の音速変化は直接、海底の測位結果に影響するので、1 日～2 日間の観測を行うことによりその影響を低減してきた。東北大学ではこの問題を克服するために、第 1 図に示すように、海底局を増やして、海底局アレイの測位とともに水平方向の音速変化を観測する試みを進めている²⁾。文部科学省の委託研究の下で、係留ブイを用いた連続観測に向けた取り組みも平成 22 年度から開始している。キネマティック GPS により海上の測位を行うと、海上の GPS 観測データを陸上に伝送するという問題がネックとなる。そこで GPS 単独測位法 PPP の採用を検討している。陸上から時計の補正情報を送るだけでよいので、比較的安価な衛星通信が利用できる。今のところ測位精度は 10cm 程度と言われているが、世界中で精度向上に向けた研究が進みつつある。

2. 海底圧力観測による上下変動の観測

海底 GPS では観測点が海上にしかないので、海底の鉛直方向の測位は、海上海底間の平均音速の変化とトレードオフの関係になり、1cm 程度の精度を得ることは難しい。海底の上下変動の観測において今のところ最も有力なのは海底圧力の観測である。水晶圧力計を用いた深海用海底圧力計 (OBP) は一定のドリフトを除けば長期安定性に優れており、水深換算で 1mm 程度の分解能がある。海中の温度変化の影響は、水晶温度計と併用することによりほぼ正確に補正できる。今のと

ころ、地震に伴うステップ状の上下変動は容易に検出できるが、プレート運動に伴う年間で1cm程度の定常的な隆起・沈降の観測には、月間で1-2cm程度の、測器のドリフトを補正する必要があるという問題がある。海底ベンチマークを設けて、無人探査機等でドリフトをチェックするという手法もあるが、海底観測の前後でセンサーのドリフトを測定して補正できないか、東北大学で検討中である。

もうひとつの、あるいは最大の問題は、海底圧力変動は、海洋変動と海底の上下変動の和であるということである。特に、数日から1ヶ月程度の海洋変動が問題となる。そこで海洋を1層で近似し、大気擾乱によって駆動される海洋変動モデリングを行い、いろいろな海域の海底圧力観測データとの比較を行った。両者の相関はモデリングのメッシュサイズに依存し、5分メッシュがベストであることがわかった³⁾。その場合の、観測データとの比較を第2図に示す。

3. 短基線の海底間音響測距

海底GPSの項でも問題となったように、海中の音速は温度・圧力・塩分の増加とともに増加し、特に温度の影響が大きい。しかし深海底では、温度は零度近くで変動も小さく、塩分の変動も小さい。この特長を生かしたのが海底間音響測距である。深海では、音速は基本的に圧力に依存して増加するので、水平方向に送りだされた音波は上向きに曲がってしまう。このことと、底層流があると温度変化の補正は難しいので、海底間音響測距は1km程度の短基線で行われることが多い。1本足で3mほど立ち上げた3台の装置を用いて、熊野灘の平坦な海底で4ヶ月余り観測し、温度や装置の傾斜の影響等を補正した結果を第3図に示す。1cm(RMS)程度の繰り返し測定精度が得られている⁴⁾。この観測は比較的容易に海底ケーブルシステムに結合できるので、分岐断層のモニタリング装置として使用できる可能性を示すことができたと言えよう。

参 考 文 献

- 1) Sato, M., H. Saito, T. Ishikawa, T. Matsumoto, M. Fujita, M. Mochizuki and A. Asada (2011) Restoration of interpolate locking after the 2005 off Miyagi Prefecture earthquake, detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01312, doi:10.1029/2010GL045689.
- 2) Kido, M. (2007) Detecting horizontal gradient of sound speed in ocean, *Earth Planet. Space*, 59, e33-e36.
- 3) 稲津大祐・日野亮太・藤本博己(2011) 大気擾乱によって駆動される短周期全球順圧海洋モデルの解像度依存性, *SENAC*, 44 (2), 41-48.
- 4) Osada, Y., M. Kido, and H. Fujimoto (submitted) A long-term seafloor experiment using seafloor acoustic ranging system: precise horizontal distance measurements toward the detection of seafloor crustal deformation.

水平音速勾配推定の試み(一方向の例)

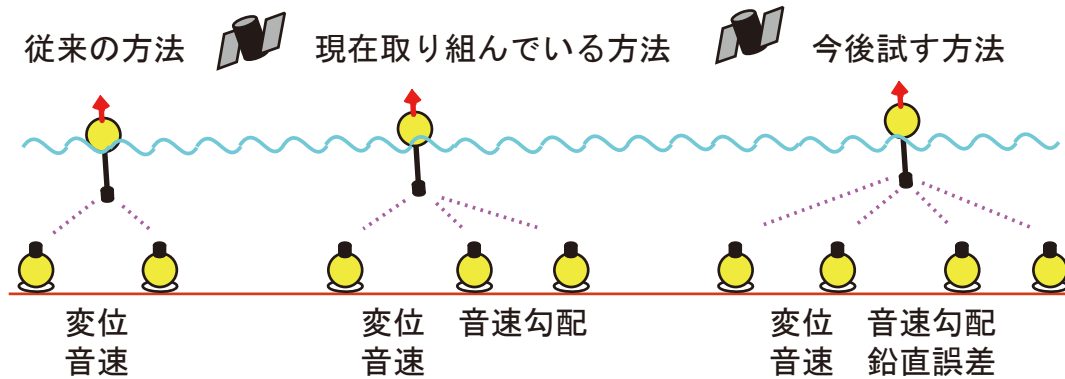


図 1 海底局を増やすことにより，海底局アレイの測位とともに水平方向の音速変化も観測する試み (Kido, 2007). 1次元に単純化した場合3つの海底局が必要である。GPSの鉛直誤差の影響も補正するには4つが必要となる。

Fig. 1 A plan to estimate lateral variation in underwater sound speed as well as the position of the precision acoustic transponder (PXP) array (Kido, 2007). Three PXPs are necessary in 1-D analysis. Vertical errors in GPS positioning can also be estimated by the analysis with four PXPs.

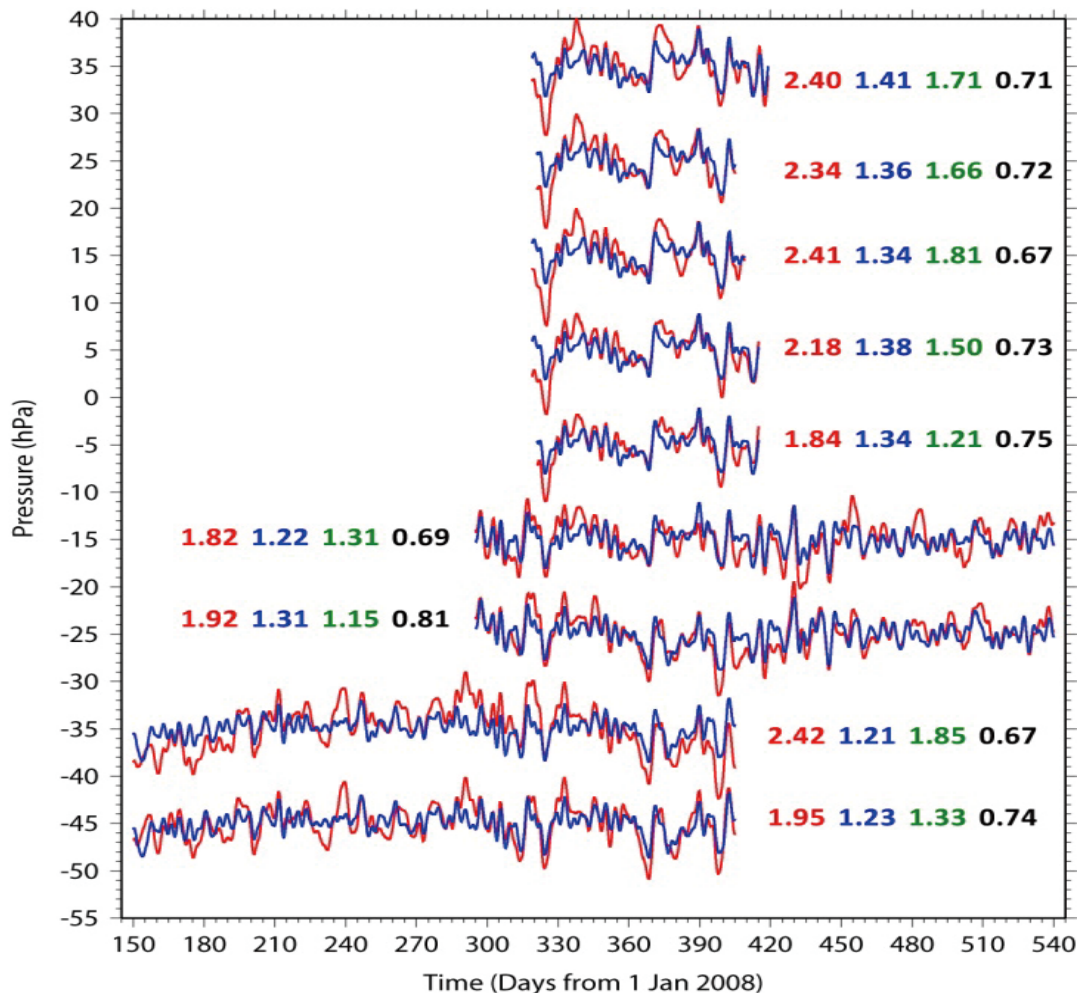


図 2 宮城県沖の海底圧力観測データ (赤線) と，大気擾乱によって駆動される海洋変動モデリング (メッシュサイズ5分) の結果 (青線) を比較した例 (Inazu et al., 2011). 2日以上周期帯で示した。図中の数字は観測 (赤)，モデル (青)，残差 (緑) 時系列の標準偏差，および，観測とモデルの相関係数 (黒) を示す。圧力単位 1hPa は，水深換算でほぼ1cmに相当する。

Fig. 2 A result of comparison between the ocean bottom pressure variation observed in the offshore of Miyagi Prefecture (red line) and that estimated from numerical modeling of ocean dynamics (mesh size 5 minutes) derived by atmospheric disturbances (blue line) (Inazu et al., 2011). The result is shown in the period band longer than 2 days. The numerals in the figure show observation (red), model (blue), RMS residuals (green), and correlation coefficient between the observation and model (black). The unit of pressure is hPa, which approximately corresponds to water depth in cm.

海底間音響測距の観測例（距離～1 km程度）

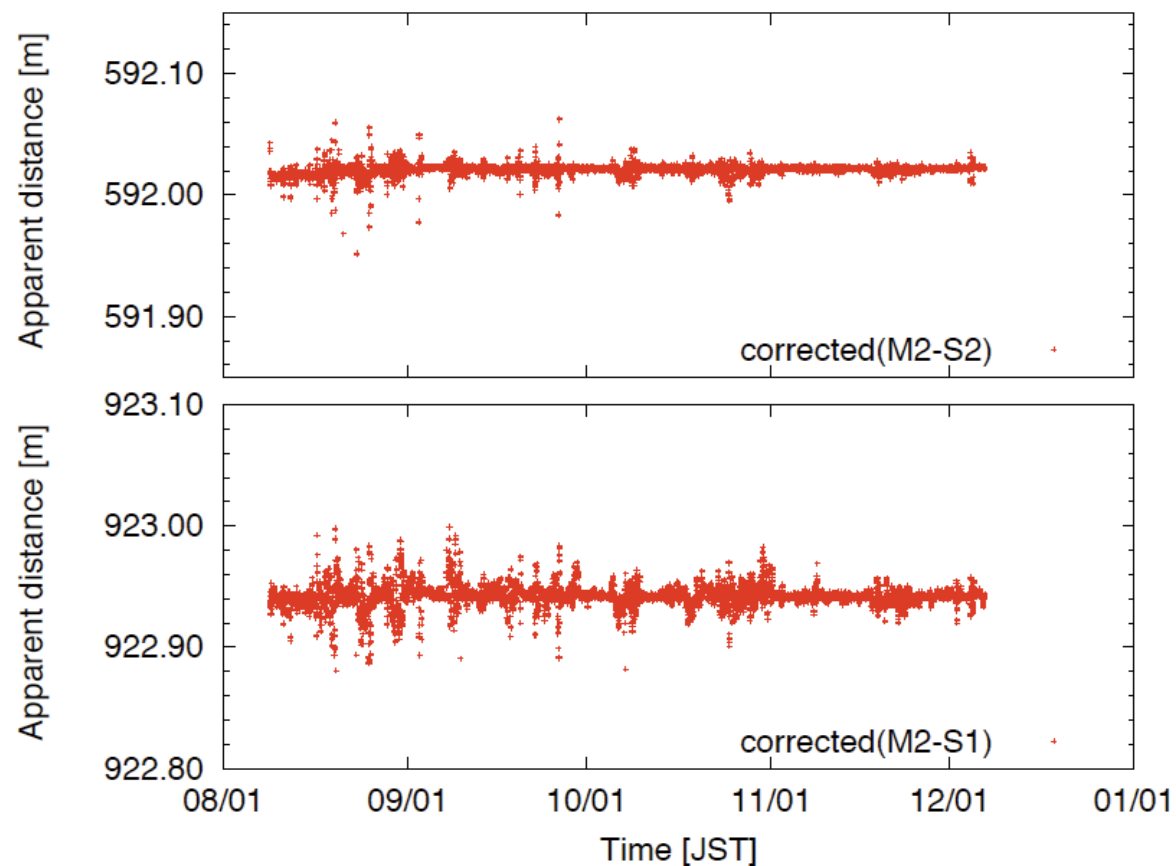
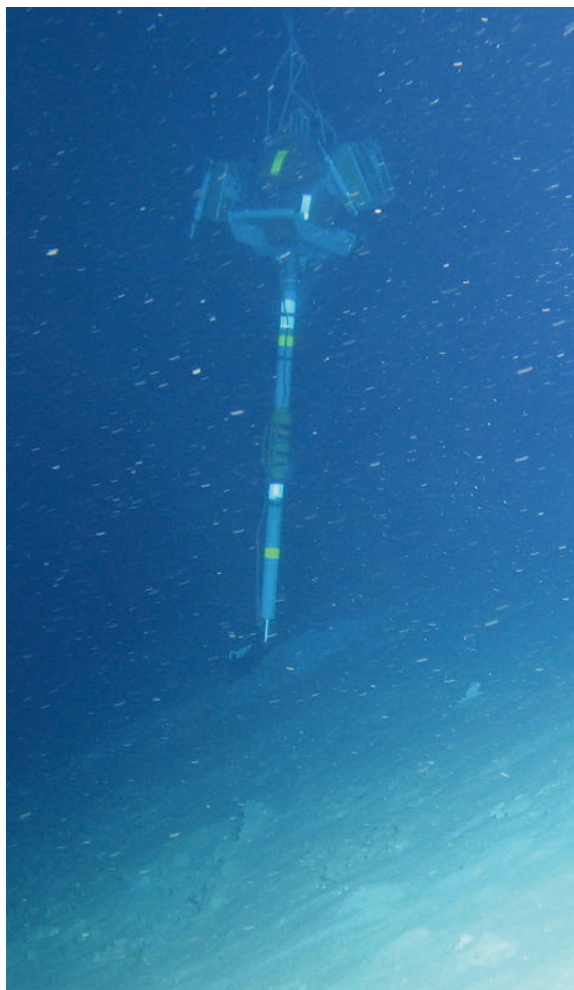


図3 海底間音響測距の観測例. 熊野灘の平坦な海底で、基線長1km弱で4ヶ月余りの観測を行い、RMSで1cm程度の繰り返し測定精度が得られた (Osada et al., submitted).

Fig. 3 A result of observation of seafloor acoustic ranging after corrections for temperature effect etc. The precision was about 1cm in RMS in the observation for more than 4 months with a baseline shorter than 1 km on a flat seafloor of Kumano-nada