# **12-2** GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測の現状と課題 Current status and issues of GPS/acoustic seafloor geodetic observation

海上保安庁 Japan Coast Guard

## 1. はじめに

日本は、世界でも有数の地震大国で、歴史的にも度々巨大地震が発生し、地震動や津波による被 害を受けてきた.このような巨大地震の震源域の大部分は海域にあるため、次に発生する地震の時 期や規模等を予測するためには、震源域の直上、すなわち海域で地殻変動を観測し、プレート間の 固着状況を把握することが重要である.海域での観測は、技術的困難も多く、海域は地殻変動観測 の空白域となっていたが、近年、ようやく海底の地殻変動を検出することができるようになったこ とを受け、本稿では GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測の現状と課題についてまとめる.

#### 2. GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測の概要

GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測の概念図を第1図に示す.この観測は、時々刻々 と変化する船の位置を決める「キネマティック GPS(KGPS)測位」と船と海底に設置した海底基 準局との間の距離を測る「音響測距」を組み合わせて、海底基準局の位置を高精度に決定し、その 観測を継続的に行うことで海底の動きを捉えようというものである.日本では、海上保安庁・東京 大学生産技術研究所、東北大学、名古屋大学の3グループが、三陸沖から室戸岬沖にかけての太平 洋側に海底基準点を展開し、測量船等による繰り返し観測を行っている(第2図).

この観測で海底の位置をセンチメートルの精度で決定するためには、克服しなければならない 2 つの大きな技術的課題があった.一つ目は、音響測距観測で得られた走時を距離に換算するのに必要な海中の音速構造が時間的にも空間的にも変化しており、厳密に把握することが困難なことである.そして、二つ目は、陸から 100km 以上離れた船の位置を決定するためには高精度の長距離基線KGPS 測位が必要となることである.海中音速構造による誤差の低減については、試行錯誤の末、解析的に音速度の時間変化を推定し、補正することで安定した海底局の位置決定が行えるようになった(第3図).また、船の位置決定については、海上保安庁では、NASA で開発された長距離測位用解析ソフトウエア IT<sup>15</sup>を使用しているが、それだけでは十分な測位精度が得られなかった.そのため、測位結果を評価して(第4図),船上 GPS アンテナの位置決定に使用する陸上基準点の選定に利用したり、DOP (Dilution of Precision:精度低下率)を考慮した観測時間を設定する等の工夫を行い、概ねセンチメートルの精度で安定して船の位置を求めることが可能となった.この他にもさまざまな問題があったが、一つ一の問題点を抽出・解決し、ようやく海底地殻変動を検出することができる技術レベルに到達した<sup>2</sup>.

## 3. 海底地殻変動観測の主な成果

(1)海洋プレートの沈み込みに伴う地殻変動

観測結果の一例として,海上保安庁の「宮城沖 1」及び「福島沖」海底基準点の位置座標時系列を第5図に示す.これらの座標値を線形回帰して,下里 SLR 局のユーラシアプレート安定域に対する動き(3.2cm/年, 291°)<sup>3)</sup>で補正し,ユーラシアプレート安定域に対する動きとして,「宮

城沖1」海底基準点で北西に7.3cm/年,「福島沖」海底基準点でほぼ西向きに3.1cm/年が求められた(第6図)<sup>4)</sup>. この結果は,陸上の GPS 結果から求めたバックスリップ分布<sup>5)</sup>から推定される移動速度と有意に異なっており,海域の地殻変動データを使用することで,バックスリップモデルを高精度化することが可能となると考えられる.

また,他の海域でも徐々に移動速度の検出が報告されており、これまでに得られた速度ベクト ルを第7図にまとめて示す<sup>の</sup>.

#### (2) Co-seismic な変動

2004年の紀伊半島南東沖地震(M7.4, M6.9)に伴い,熊野灘に設置されている東北大学及び名 古屋大学の海底基準点で南に約20~30cmの変位が<sup>7/8)</sup>(第8図),2005年の宮城県沖の地震(M7.2) に伴い,海上保安庁の宮城沖2海底基準点において東に約10cmの変位が検出された<sup>9)</sup>. 紀伊半 島南東沖地震に伴う海底地殻変動は,国土地理院の断層モデルから推定される変動量と大きく異 なっており,陸海の地殻変動データを満たすような断層モデルが提案された<sup>7/8)</sup>.

陸上の地殻変動データのみで沖合で発生した地震の断層モデルを一意的に推定することは困難 であり、海域の地殻変動データを使用することで、より詳細な断層モデルの議論が可能となると 考えられる.

#### 4. 地震予知研究に向けての課題と最近の取り組み

(1) 今後の課題

観測精度については、将来的には陸上の GPS 観測に準ずる精度を目指すものの、当面の目標として、現在 2~3cm (RMS) である水平位置決定精度を 1cm (RMS) に、現在 5 年程度の長期観測が必要な水平移動速度の推定をより短期間で 1cm/年以下の精度で検出することを目指したいと考えている. そのためには、継続的かつ高頻度な観測を行うとともに、現在、最も大きな誤差要因だと考えられている海中音速構造の空間的不均質による誤差の低減が必要である.

観測点の配置については,発生が懸念されている宮城県沖地震,東海・東南海・南海地震の想 定震源域に重点的に観測点を展開することが望ましい.特に,南海地震の想定震源域は,観測の 空白域となっており,この海域における観測点の充実・強化が課題である.また,多くの観測点 での観測に対応するためには,観測効率の向上や観測コストの低減といった取組も必要である.

観測頻度については、観測精度にも関わるため、できるだけ高頻度な観測を行うとともに、セ ミリアルタイム観測を目指した研究を進める必要がある.

(2) 最近の取り組み

最後に、(1)の課題を解決するために行われている主な取り組みを紹介する.

海上保安庁では,海底地殻変動観測の効率化とより安定した観測を目指して,測量船の船底に 音響トランスデューサを常設した(第9図).従来の支柱式観測システムでは,航走に伴うノイズ や支柱への負荷を避けるため,漂流しながら観測しなければならなかったが,今回の改造により, 24時間体制で航走しながら観測を行うことが可能となった.これにより,音響トランスデューサ の上げ下げや測線の移動にかかる時間が削減され,1海域あたりの観測時間の大幅な短縮が見込 まれるとともに,観測データの空間バランスの改善による観測精度の向上が期待される.

また、大学では、観測精度の向上を目指した海中音速構造の空間的不均質の影響を低減するた

めの研究(東北大学,名古屋大学)<sup>10)11)</sup>や,海底ケーブルやAUV(自律型海中ロボット),係留 ブイ等の最新技術を用いたセミリアルタイム観測の研究が進められている<sup>12)13</sup>(第10図).

### 4. まとめ

GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測は、これまでに海洋プレートの沈み込みに伴う地 殻変動や Co-seismic な変動を検出することに成功し、現在の位置決定精度は 2~3cm (RMS)、移動 速度の推定精度は 1cm/年以下(5年程度の長期観測)である.観測密度・精度ともに、陸上の地殻 変動観測には及ばないものの、技術的にはここ数年で飛躍的に進展したと言える.

今後は、更なる観測精度の向上を目指すとともに、宮城県沖地震や南海地震の想定震源域における観測点の充実強化が必要である.現在、各グループにおいて、観測の効率化や観測精度の向上の ための取り組みが行われており、今後益々の海底地殻変動観測技術の発展が期待される.

#### 参考文献

- Colombo, O. L. and A. G. Evans (1998): Precise, decimeter-level differential GPS over great distances at sea and on land, Proc. ION GPS-98, Nashville, Tennessee.
- Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada and O. L. Colombo (2006): GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, Earth Planets Space, 58, 265-275.
- 3) Sengoku, A. (1998): A plate motion study using Ajisai SLR data, Earth Planets Space, 50, 611-627.
- 4) 海上保安庁 (2008): 海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 第81 巻
- Suwa, Y., S. Miura, A. Hasegawa, T. Sato, and K. Tachibana (2006): Interplate coupling beneath NE Japan inferred from three-dimensional displacement field, J. Geophys. Res., 111, doi:10.1029/2004JB003203.
- 6) 佐藤まりこ・木戸元之・田所敬一 (2008): GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測〜観測成果と新たな取り組み〜,測地学会誌,第54巻(3),113-125.
- 7) Kido, M., H. Fujimoto, S. Miura, Y. Osada, K. Tatsuka, and T. Tabei (2006): Seafloor displacement at Kumano-nada caused by the 2004 off Kii Peninsula earthquakes, detected through repeated GPS/Acoustic surveys, Earth Planets Space, 58, 911-915.
- Tadokoro, K., M. Ando, R. Ikuta, T. Okuda, G. M. Besana, S. Sugimoto, and M. Kuno (2006): Observation of coseismic seafloor crustal deformation due to M7 class offshore earthquakes, Geophys. Res. Lett., 33, doi: 10.1029/2006GL026742.
- Matsumoto, Y., M. Fujita, T. Ishikawa, M. Mochizuki, T. Yabuki, and A. Asada (2006): Undersea co-seismic crustal movements associated with the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation, Earth Planets Space, 58, 1573-1576.
- 10) Kido, M. (2007): Detecting horizontal gradient of sound speed in ocean, Earth Planets Space, 59, e33-e36.
- 11) 杉本慎吾・田所敬一・佐柳敬造・生田領野・奥田 隆・長尾年恭・安藤雅孝 (2007): 海底地殻変動観測における 温度・圧力連続計測,東海大学海洋研究所研究報告, 28, 37-48.
- Fujimoto, H (2006): Ocean Bottom Crustal Movement Observation Using GPS/Acoustic System by Universities in Japan, J. Geodetic Soc. Japan, 52 (4), 265-272.
- 13) 望月将志・浅田 昭・浦 環・藤田雅之 (2008): 海中ロボットを利用する次世代海底地殻変動観測システムの開発, 測地学会誌, 第54巻(3), 189-197.



第1図 海底地殻変動観測の概念図 Fig.1 Schematic picture of the GPS/acoustic seafloor geodetic observation.



第2図 海底基準点の配置 Fig.2 Locations of the seafloor reference points. (■: Japan Coast Guard, ◆: Tohoku Univ., ▲: Nagoya Univ.)



第4図 KGPS結果の評価手法(a)と評価の例(b)

Fig.4 (a) Way of accuracy evaluation of K-GPS height solution and (b) example of evaluation.





Fig.5 Time series of the estimated position at the seafloor reference points off Miyagi 1 and off Fukushima. The position reference is Shimosato in central Japan. Green lines show the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake(M7.2).





Fig.6 Crustal velocity vectors at the seafloor reference points off Miyagi 1 and off Fukushima relative to the stable part of the Eurasian plate. Red arrows show the observed results.Black arrows show the synthetic vectors calculated from the back-slip model of Suwa et al.(2006).



Fig.7 Crustal velocity vectors (red arrows) detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation relative to the stable part of the Eurasian plate. Black arrows show crustal velocity vectors at GEONET on-land GPS stations.



- 第8図 2004年紀伊半島南東沖地震(M7.4, M6.9)に伴う地殻変動
  (→):観測値,→:計算値((a)国土地理院断層モデル, (b)Kido et al.(2006)による断層モデル))
  Fig.8 Co-seismic displacements associated with the 2004 SE Off Kii Peninsula Earthquakes.
- Red arrows show the observed results. Blue arrows show the synthetic displacements calculated from the fault models by (a) GSI and (b) Kido et al.(2006).



第9図 海上保安庁の船底装備式観測システムと観測データの配置例

Fig.9 JCG's new observation system for sailing observation and example of data distribution.



<sup>(</sup>東京大学生産技術研究所作成)

第10図 AUV(自律型海中ロボット)を利用した次世代型海底地殻変動観測システム Fig.10 New generation observation system using AUV (Autonomous Underwater Vehicles), developing by IIS, Tokyo Univ.