

海底地殻変動モニタリング Monitoring of Crustal Deformation on the Seafloor

望月将志*・浅田 昭*・矢吹哲一朗**・藤田雅之**
Masashi MOCHIZUKI, Akira ASADA, Tetsuichiro YABUKI and Masayuki FUJITA

1. はじめに

太平洋プレートとフィリピン海プレートの2つの海洋プレートの沈み込み帯に位置し、海溝型巨大地震の脅威に晒されている日本において(図1)、そうした巨大地震の発生プロセスの解明は、地球科学的な命題というだけでなく、強い社会的な要請であると言っても過言ではない。

近年、GPSをはじめとする衛星技術の利用により、地殻変動の検出、モニタリング精度が大きく向上している。日本国内においては、国土地理院が日本全国に1,000の

ぼるGPS観測点からなる観測網(GEONET)を展開し、地殻変動を連続的にモニターしている¹⁾。この観測網により、海洋プレートの沈み込みに伴って発生する、海溝型地震の準備過程から、地震発生、余効変動にいたるまでの日本列島の変形の様子が連続的にとらえられるようになり、海溝型巨大地震発生メカニズムの解明への、大きな一助となっている。

衛星技術の利用が陸上での地殻変動観測に大きな進歩をもたらす一方、その恩恵は海底にまでは届いていない。海溝型巨大地震発生の現場は陸上から離れた海底下である。その発生メカニズムの完全解明には、発生現場近傍での歪みの蓄積、解放過程を把握することが何にも増して不可欠であるものの、電波の届かない海底では、陸上と同様に衛星技術を直接利用することはできない。海溝型巨大地震発生メカニズムの解明にむけて、陸上の地殻変動観測と遜色ない精度で、海底の地殻変動を検出し、モニターするシステムの開発が広く望まれてきた。

1980年代後半から、米国スクリプス海洋研究所でのこの分野での先駆的な研究が始められた^{2,3,4)}。彼らは米国西海岸沖に位置するJun de Fucaプレート上に観測点を設置し、センチメートルオーダーの海底測地ができることを示すに至った³⁾。日本国内でも複数のグループが1990年代に入ってから、海底で直接地殻変動を検出するシステムの開発に取り組みだした(例えば、^{5,6,7,8)}。

6)、8)は深海域に対応した海底地殻変動観測システムを開発して、日本海溝を挟む太平洋プレート上と島弧側斜面の2カ所に観測点を配置し、東北日本弧でのサイスミックカップリングを直接検出しようと試みている。7)もまた、独自の観測システムを開発し、東海沖地震発生想定海域である駿河トラフにおいて、フィリピン海プレートの沈み込みに伴った地殻の変動を海底で検出する試みを実施している。

東京大学生産技術研究所浅田研究室では、海上保安庁水路部と共同で、海底地殻変動観測システムの研究開発を長年にわたって行ってきた^{5,9,10,11)}。2000年2月に、このシステムを用いた海底地殻変動観測点を熊野トラフに設置した

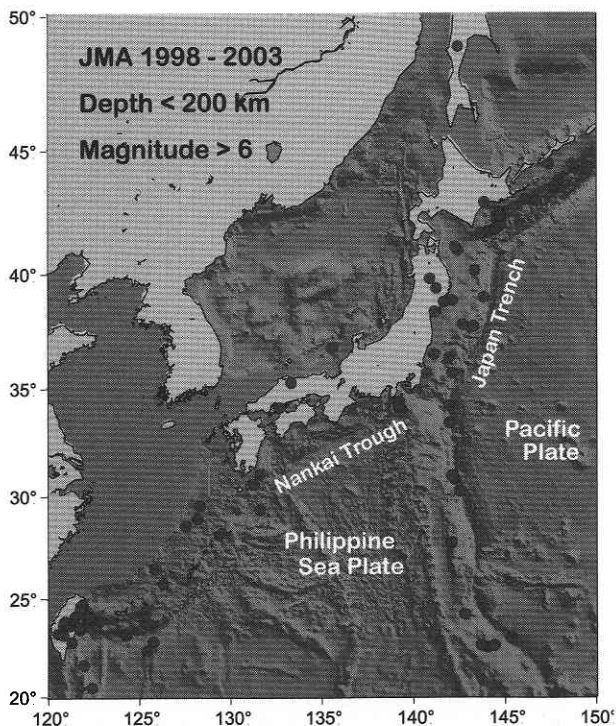


図1 Earthquake distribution around Japan islands. Circles denote locations of epicenters (1998–2003, Focal depth < 200 km, Magnitude > 6). Earthquake list was provided by the Japan Meteorological Agency.

*東京大学生産技術研究所 機械・生体系部門

**海上保安庁

のを皮切りに、観測システム、解析手法の改良を行いつつ、2003年度末までに、16の観測点を日本列島の前弧域を中心に展開し、5～10年にわたる繰り返し観測の実施を開始した。2004年度末までには更に観測点を2点増設し、観測領域の広域化、重点観測領域での観測点の高密化を図る予定である。本稿では、展開した観測網の概要と、この観測網による海底地殻変動観測の現状について報告を行う。

2. 海底地殻変動観測網の展開

2.1 海底地殻変動観測システム

この海底地殻変動観測システムは、海底に設置される海底基準点と、GPS測位と音響測距を結ぶ船上局、キネマティックGPS測位を実施するための陸上GPS基準局からなる(図2)。船を漂流させながら音響測距信号の送受信を繰り返し行い、船上局-海底基準点間の距離測定を行う。信号送受信時の船上局位置はキネマティックGPS測位と動揺センサーによって精密に決定され、この測位データと測距データを用いて、海底基準点の位置が求められる。こうした測位観測を数年間にわたって繰り返し実施することで、海底基準点の位置変化を追跡し、つまりは、海底地殻の変動を知るといのがこの観測システムのコンセプトである。

海底基準点を構成するのは3基ないし4基のミラートランスポンダーで、このトランスポンダーは船上局から送信された測距信号を受信し、その信号をそのままの形で船上局へ送り返している。音響測距のための測距信号は搬送波周波数10kHzで、1ビットを4波で構成する9次のM系列信号にコード化されている。17" 耐圧ガラス球にエレクトロニクスとバッテリーのすべてを内蔵した小型の設計でありながらも、1年間にのべ2週間程度の観測日数を想定し、5年間以上の長期観測が可能である。

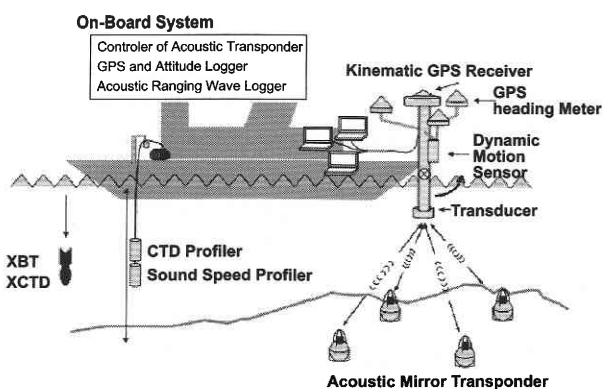


図2 Schematic picture of the seafloor geodetic observation system. A geodetic reference station on the seafloor consists of three or four acoustic mirror transponders. The positions of the ship-board transducer during transmitting and receiving the ranging signals are determined by kinematic GPS system and a dynamic motion sensor.

船上局は測距信号を送受信するためのトランスポンダーシステム、送受波器の位置を精密に決めるためのキネマティックGPS受信器と動揺検知システム、それらのデータの収録システムによって構成されている。音響測距に関するデータは、測距信号波形、測距トリガー信号、GPS時刻信号を1chずつ、計3chを16bit、200kHzサンプリングで収録。GPS測位データは2Hz、姿勢データは50Hzサンプリングで連続収録している。ルビジウム発信器を搭載したマスター時計を導入し、各データ収録システム間の時刻同期、データサンプリングのタイミングの高精度化、安定化を行っている。

観測点設置海域近くの陸上には、2局以上のGPS固定基準局を設置し、後処理による長基線のキネマティックGPS測位を実施している。また観測時には適時、CTD、XBTおよびXCTDを使って水中の音速構造を求め、水中の理論音波走時計算時に利用している。

2.2 海底地殻変動観測網

2000年2月、この海底地殻変動観測システムによる最初の観測点を紀伊半島東方沖の熊野灘に設置し、同年5月に最初の観測を実施した。海底基準点は紀伊半島から南東に離れた海域で、水深2,000mの海底に置かれている(図3(a))。キネマティックGPS測位の基準となる陸上GPS観測点は大崎と下里の2地点に設置され、海底基準点とのそれぞれの距離は70kmと100kmである。二日間にわたって測距観測が実施され、うねりが高く、測量船(船上局)が大きく上下変動をするという厳しい観測条件であったにもかかわらず、海底基準点を構成する3基の海底局(ミラートランスポンダー)の位置を、距離残差の標準偏差で7cm程度で推定することができた(図3(c))^{11,12)}。水平位置のみに注目すれば、距離残差の標準偏差は5cm以内に収まるという測位結果であった。距離残差のみを観測精度の指標とすることには問題があるが、従来の海底測定の精度を考えれば極めて大きな進歩であり、実観測に足る精度を有していると判断し、このシステムによる海底地殻変動観測基準点を、日本列島の前弧域海底へ展開し、2つの海洋プレートの沈み込みに伴う、島弧海底地殻の変動をとらえる試みを開始した。

2003年度末までに設置した海底地殻変動観測基準点は図4に示す16点である。北から順に、釜石沖2点、宮城沖1点、福島沖1点、常磐沖1点、房総沖2点、相模湾1点、東海沖2点、潮岬沖2点、熊野灘1点、三宅島西方海域3点となっている。三宅島西方海域に設置の3点は、2000年6月より活発化した同海域の、一連の火山、地震活動に関連して緊急に配備したものである。

更に2004年度末までには2点の新設が予定されている。1点は四国室戸岬沖で、南海地震の発生想定海域まで観測網を広げようとするものである。もう1点は重点観測海域としている宮城沖で、より高密度な観測を実施するための

研究速報

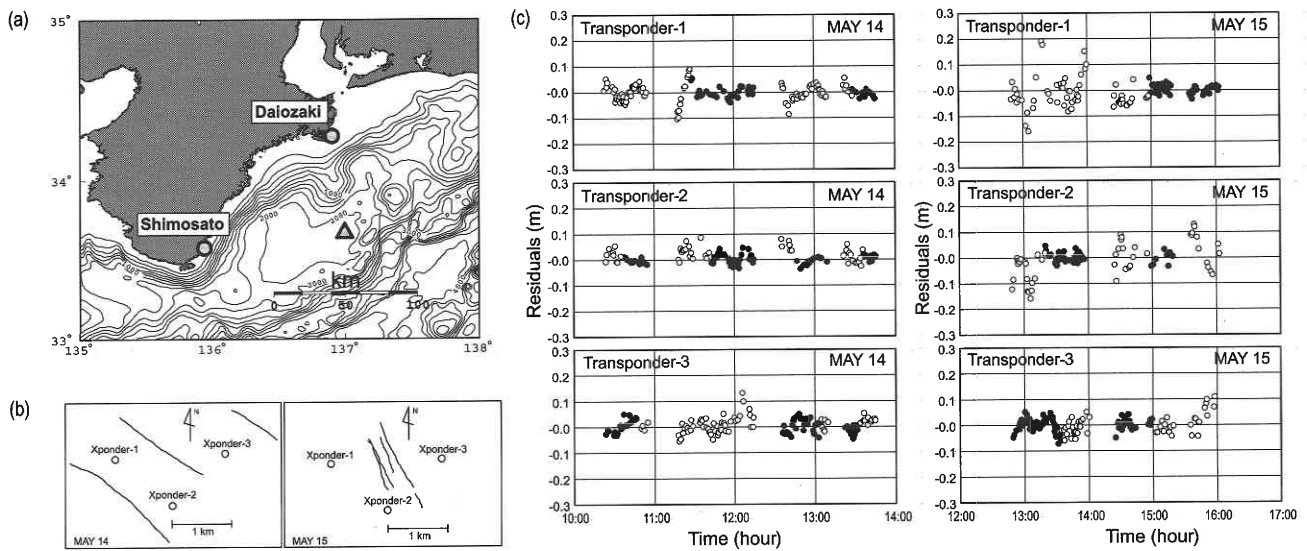


図3 (a) Position of the seafloor geodetic reference station built in the Kumano trough. Triangle denotes the position of the station. Circles show the position of on-land kinematic GPS stations. (b) Distribution of the seafloor acoustic transponders and the acoustic ranging profiles of the observations conducted on 14 and 15 MAY, 2000. (c) The figures are reproduction of Fig. 11 in 11). The acoustic ranging residuals relative to the estimated horizontal positions of three seafloor acoustic transponders. Closed circles denote the residuals corresponding to the data whose two-way acoustic travel times are less than 3.0 s, ones whose two-way acoustic travel times are longer than 3.0 s are denoted by open circles. Upper: Transponder-1, of which standard deviation (SD) of ranging residuals was 3.9 cm. Middle: Transponder-2, of which SD of ranging residuals was 4.1 cm. Lower: Transponder-3, of which SD of ranging residuals was 3.0 cm.

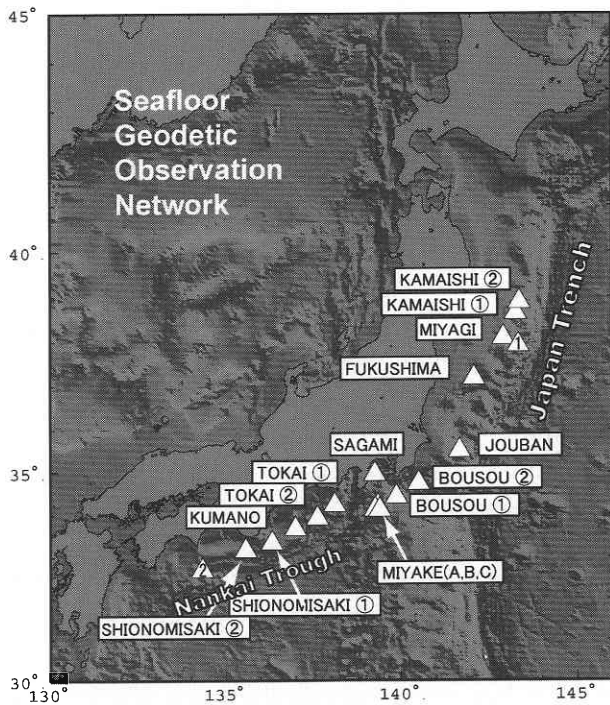


図4 The seafloor geodetic observation network around Japan. Triangles denote locations of seafloor geodetic reference stations, which consists of four acoustic transponders. Non-numbered and numbered triangles correspond to existing and planned ones, respectively. Triangles numbered as 1 (Off-Miyagi) and 2 (Off-Muroto) are planned positions of new seafloor geodetic reference stations that will be added to the network in 2004.

ものである。計18点による海底地殻変動観測網にて、二つの海洋プレートの沈み込み帯に沿った、海底地殻の変動をモニターすることとなっている。これにより近い将来、プレート間力学的カップリング強度の空間分布の把握、海溝型プレート間地震発生プロセスの理解に大きな一歩を踏み出せるものと考えている。

3. 潮岬沖②基準点での観測例

これまでの観測、解析の例として、2003年8~9月に潮岬沖②基準点で実施された観測とその解析結果を示す。この海底基準点は2003年8月に、紀伊半島潮岬沖、水深2,000 mの海底に設置されたもので、設置直後に実施された観測ということになる(図5(a))。のべ6日間にわたる測距観測を行った。観測期間中は黒潮が北上し、観測海域は常に東向きの強い潮流の中に置かれ、測距中の観測船は2.0~4.0 kntの速さで流されていた。当然のことながら、測距側線もこの黒潮の流れを反映し、すべてが東西方向に並ぶ結果となった(図5(b))。

6日間にわたって取得したすべての測距データをもとに海底基準点の位置を求めると共に、このデータセットを各日毎のデータに対応する6つのサブデータセットに分け、これらのサブデータセットからも海底基準局の位置を求めて比較を行った(図6)。フルデータセットから求めた海底基準点位置を基準とし、各サブデータセットから求めた位置がこの規準に対してどのように分布するかを見るこ

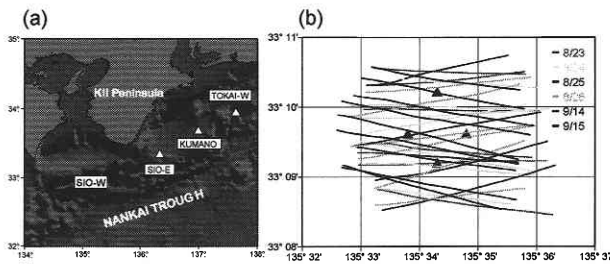


図5 (a) Location map of the seafloor geodetic reference stations off the Kii peninsula along the Nankai trough. Triangles indicate the location of the stations. Closed one among four triangles shows the position of the reference site, Shionomisaki-2 (SIO-W). (b) Ranging profiles in the campaign conducted at the SIO-W reference station in August and September, 2003. Diurnal profiles are distinguished by using different shading. Closed triangle indicates position of the seafloor acoustic transponder. All the profiles in (b) are plotted based on preliminary analyses of kinematic GPS positioning. Further analysis of long baseline kinematic GPS positioning with multiple on-land reference site data to achieve final solution of profiles.

とで、この位置解析の再現性の評価を行おうというものである。通常、海底基準局の位置を求めるには5)、10)によって開発されたフォワードモデリングの手法によって行っている。しかし今回は、複数のデータセットから求めた位置同士の比較を行うために、それぞれのデータセットに対し、解析者の主観を排除し同一の手順を踏んで解析を行えるように、13)による、最小自乗法に基づいた線形インバージョン手法を用いている。

図6には各データセットから求められた海底基準点の位置が、EW、NS、UDの成分毎に比較されている。各サブセットから求められた座標のEW成分は、基準となるフルデータセットから求めた座標(図6中の“ALL”)に対して7cm以内に分布している(図6(a))。このことは、この6日間の観測における基準点位置解析が、EW成分については7cmの再現性をもって行われたということを示している。一方、NS成分に関してみてみれば、基準値に対して、サブセットからもとめた値は、EW成分に比して大きくばらつき最大20cm離れて求まっている(図6(b))。これら2つの成分での再現性の評価から、この観測における海底基準点の位置である、6日間のフルデータセットから求められた座標(“ALL”)は、EW成分がNS成分に比して安定して求められているということが出来る。このことは、測距点が海底基準点を構成する4基のミラートランスポンダーの位置に対して不均質に分布していることを反映したものである。黒潮の影響により測線がすべて東西方向を向いて分布したため、測距点はNS方向よりもEW方向に密に分布する結果となった。このことが、求められた海底基準点位置の決定精度に反映したのである。こうしたことは、このとき以外の観測、また他の観測点においても

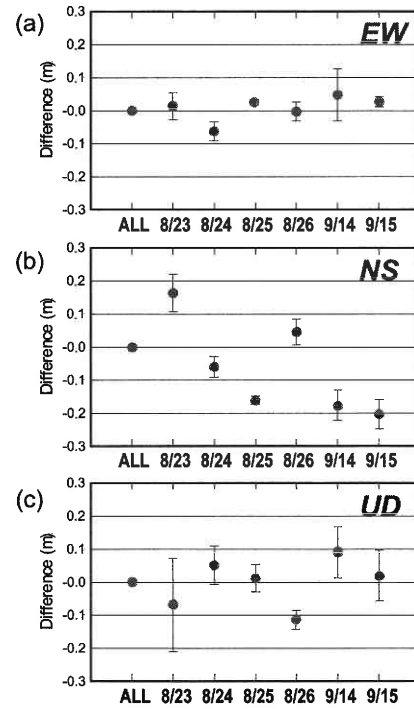


図6 Comparison of the SIO-W reference station derived from the different datasets. The reference coordinates are ones that were determined from the full dataset (denoted as “ALL”). The coordinates determined from the six subsets composed of data acquired each day were plotted as the differences from the reference one. (a) The differences in EW coordinate from the reference one (derived from the full dataset). (b) The differences in NS coordinate from the reference one. (c) The differences in UD coordinate from the reference one.

見受けられ、測距点をいかに均質に分布させるかということが、海底基準点の測位にとって極めて重要なファクターであることがわかる。

現行の観測手法では、風と表層流のみが、観測中の船の動きを決定している。機関を動かして船の動きを制御するということは、海中の音響測距へのノイズを増大させることになるため行うことができないのである。測距点の展開を、風や潮流といった自然現象に委ねざるを得ない以上、各観測点における、気象・海象を十分に把握した上で、観測を行うことが必要となっている。

4. 今後の展開

観測網を展開し、観測の回を重ねる中で、観測手法・システムについて議論するに足るだけのデータが集まり、そのデータの中から机上ではわからなかったこの観測システムの問題点が明らかになってきている。センチメートルレベルの位置精度を目標とする本観測システムでは、計測誤差を生じさせる可能性のあるこうした問題点を継続的な観測を通して発見し、一つずつ対処して、観測システムの高精度化、安定化を図っていく必要がある。

研究速報

これまでにも、船上局においてGPSアンテナと水中音響トランスデューサーを結ぶ支柱の改良がなされている。これは、海底基準点位置解析の際に、音響測距の残差がオフセット値を持ったことから、観測中にこの支柱にたわみが生じていることがわかったからである。また、技術革新にあわせて、データ収録システムの更新、GPS受信機の更新、ルビジウム発信器を用いたマスター時計の導入などが行われ、常にシステムの高精度化と安定化の取り組みが行われている。

現段階において注目をし、何らかの対応策を実施しようと考えているシステム上の問題点の1つが、トランスデューサーの形状および振動子の特性による計測誤差である。

精密水中音響測距のためのトランスデューサーは、海底局、船上局ともに、使用周波数、出力などの観点から米国ITC社製の円筒型のものを使用してきた。船上局と海底局のトランスデューサーは同一の製品を使用しており、このサイズは直径=12cm、長さ=11cmである。測距に使用する信号の波長15cmとほぼ同等の代表的長さを持ち、信号に対して近似的に点として見なすことができない大きさである。したがって、測距信号の円筒型トランスデューサーへの入射角度により、レスポンスの違い、ひいては測距結果の違いが生じており、水中測距の精度を高めていく上では、何らかの改善・対処を施さなければならない点となっている。

この問題への対応として、測距結果への補正方法の導入、計測誤差をより小さくする新たなタイプのトランスデューサーの導入の2点を考え、実現に向けて作業を進めているところである。この新型のトランスデューサーは、米国LinkQuest社のN. Xiao博士の協力のもとで、我々の測距観測において利用する頻度の高い0~50°の信号入射角において、送受信レスポンスの差が現行のものに比して小さくなり、より点源に近く振る舞うように設計されている。新型トランスデューサーが手元に届き、新旧それぞれのトランスデューサーの送受信特性の把握、相互の比較を実施す

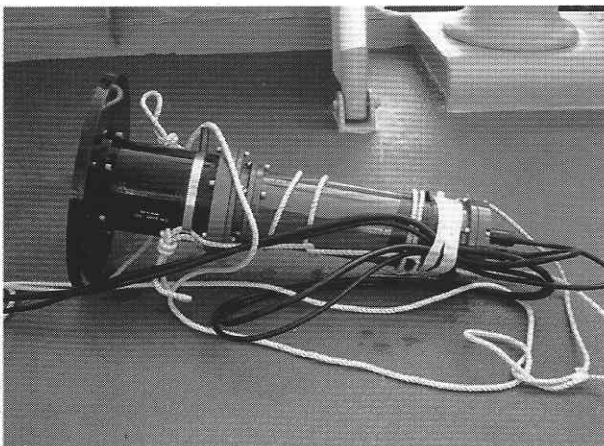


図7 Appearance of new acoustic transducer that will be introduced into the seafloor geodetic observation system.

べく、水槽にて実験を実施している¹⁴⁾(図7)。この特性把握の実験が終わり次第、新型トランスデューサーを観測システムに導入し、一段精度の高い観測を開始する予定である。

現段階において、我々の海底地殻変動観測システムは、陸上の地殻変動観測網と肩を並べる観測精度を有していると言える状況にはまだ至っていない。しかし、観測経験を積み重ねる中で観測システム、観測手法の改良の繰り返しによって、10年の内には、陸上観測と同等の観測精度を持つ観測網にし、海陸の境を持たない地殻変動観測網を日本列島に構築したいと目指している。

謝 辞

海底地殻変動観測は、海上保安庁の測量船、「海洋」と「明洋」を使って実施され、乗組員の方々の多大なる助力によって観測が行われている。海中工学研究センターの吉田善吾博士と、海上保安庁海洋情報部海洋調査課航法測地室のメンバーの方々には、観測各回に参加していただき、データ取得の最前線で汗を流していただいている。本稿の中で示した図のいくつかはGMTソフトウェア¹⁵⁾を利用して作成した。ここに記して感謝致します。

(2004年9月21日受理)

参 考 文 献

- 1) S. Miyazaki and Y. Hatanaka, Crustal deformation observed by GSI's new GPS array, *EOS Trans. AGU*, 78, S104, 1997.
- 2) F. N. Spiess, Analysis of a possible seafloor strain measurement system, *Marine Geodesy*, 9, 385-398, 1985.
- 3) F. N. Spiess, C.D. Chadwell, J.A. Hildebrand, L.E. Young, G.H. Purcell Jr., and H. Dragert, Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies, *Phys. Earth Planet. Int.*, 108, 101-112, 1998.
- 4) C. D. Chadwell, F. N. Spiess, J. A. Hildebrand, and H. Dragert, Seafloor geodetic evidence of episodic spreading 25 km east of the Jun de Fuca Ridge, *EOS. Trans. AGU*, 83, *Fall Meet. Suppl., Abst.*, T22A-1130, 2002.
- 5) 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.
- 6) H. Fujimoto, S. Miura, Y. Osada, H. Shiobara, T. Kanazawa, A. Sweeney, J. A. Hildebrand, and C. D. Chadwell, Development of seafloor positioning system for the monitoring of seismic coupling at the Japan trench off Sanriku, *EOS. Trans. AGU*, 82(47), *Fall Meet. Suppl., Abst.*, G41A-0212, 2001.
- 7) K. Tadokoro, M. Miyake, K. Sato, M. Ando, and T. Okuda, Long-term and repeated observations of ocean bottom crustal deformation, *Abst. of Seism. Soc. Japan 2001 Fall Meet.*, C14, 2001.
- 8) Y. Osada, H. Fujimoto, S. Miura, A. Sweeney, T. Kanazawa, S. Nakao, S. Sakai, J. A. Hildebrand, and C. D. Chadwell, Estimation and correction for the effect of sound velocity variation on GPS/Scoustic seafloor positioning: An experiment off Hawaii Island, *EPS*, 55(10), e17-e20, 2003.
- 9) T. Yabuki, Y. Nagaya, and A. Asada, Approach for the realization

- of sea bottom crustal deformation observations targets and tactics in waters around Japan, *Int. Hydro. Review*, 1(2), 62-70, 2000.
- 10) A. Asada, and T. Yabuki, Centimeter-level positioning on the seafloor, *Proc. of the Japan Academy*, 77, Ser. B, 7-12, 2001a.
- 11) 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, 2001 b.
- 12) M. Mochizuki, M. Sato, M. Katayama, T. Yabuki, Z. Yoshida, and A. Asada, Construction of seafloor geodetic observation network around Japan, *Recent Advances in Marine Science and Technology 2002*, 591-600, 2003.
- 13) 藤田雅之, 佐藤まりこ, 矢吹哲一朗, 望月将志, 浅田昭, 地底地殻変動観測における局位置解析手法と初期値依存性, *日本測地学会第 100 回講演会要旨集*, 31-32, 2003.
- 14) M. Mochizuki, M. Fujita, M. Sato, Z. Yoshida, T. Yabuki, and A. Asada, Trials of seafloor geodetic monitoring around Japan, *Proc of OCEANS'04 MTS/IEEE/TECHNO-OCEAN'04 "Bridges Across the Oceans"* Nov.9-12, Kobe, Japan (submitted).
- 15) P. Wessel and W.H.F. Smith, "Free software helps map and display data," *EOS Trans. AGU*, 72, 441, 445-446, 1991.