

3.1.4. ブイ方式を用いた GPS / 音響測距結合方式による海底地殻変動観測の精度向上のための技術開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

「ブイ方式を用いた GPS / 音響測距結合方式による海底地殻変動観測の精度向上のための技術開発」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
国立大学法人東北大学大学院理学研究科	教授	藤本博巳	fujimoto@aob.geophys.tohoku.ac.jp
	助教授	日野亮太	hino@aob.geophys.tohoku.ac.jp
	助教授	三浦 哲	miura@aob.geophys.tohoku.ac.jp

(c) 業務の目的

海溝型地震の想定震源域及びその境界領域においてプレート境界の変動等に起因する地殻変動を正確に把握するためには、その原因となるすべりなどが発生している直上で観測を実施することが重要である。東南海・南海地震や日本海溝・千島海溝周辺で発生する海溝型地震の想定震源域は、その大部分が海域であるため、海底での観測を実施することが必須である。

本事業では、以上の点を踏まえて、GPS / 音響測距結合方式による観測システムの安定性の向上と2~3cmの繰り返し観測精度を目指して、音速構造の補正手法の高度化及び音響測距技術の高度化に重点を置いた技術開発を行う。これまでの観測における基礎的な問題の一つとして、船の音響雑音や海況等により精密音響測距の観測を確実に行うことが難しいという問題があった。そこで雑音源である船から離れたブイを用いて海底地殻変動観測を行う方式を採用し、信頼性に優れた計測システムの構築を目指す。特に、日本海溝・千島海溝周辺で発生する海溝型地震の想定震源域は、東南海・南海地震の震源域と比較して水深が深く、陸からの距離も遠いため、深海底でも安定して観測可能である音響測距装置を開発するとともに、長基線のキネマティック GPS 測位の研究を行い、海底測位精度の向上を図る。

(d) 5カ年の年次実施計画

1) 研究計画1年目

海底地殻変動観測用の海底局・海上局とデータ処理手法、音響構造の時間変化の観測に必要な計測装置の開発を行い、海上試験観測を実施する。熊野灘中央部において GPS / 音響測距結合方式による海底地殻変動観測を実施する。

2) 研究計画 2 年目

海底地殻変動観測用の海底局・海上局とデータ処理手法、音速構造の時間変化の観測に必要な計測装置の開発を引き続き行う。特に、日本海溝・千島海溝周辺で発生する海溝型地震を対象とした観測を実施するため、深海用海底地殻変動観測の海底局・海上局の開発と長基線のキネマティック GPS 測位の研究を開始する。また、平成 15 年度に熊野灘中央部に設置した海底局とブイに搭載した海上局を用いて、GPS / 音響測距結合方式の海底地殻変動観測を行う。音速構造の時間変化を詳細に把握するために、倒立音響測深機等を用いた海洋変動の連続観測の結果と合わせた解析を行う。

3) 研究計画 3 年目

海底地殻変動観測用の海底局・海上局とデータ処理手法、音速構造の時間変化の観測に必要な計測装置の開発を引き続き行う。熊野灘中央部における GPS / 音響測距結合方式の海底地殻変動観測の高度化を進め、繰り返し観測の暫定的な精度評価を行う。日本海溝の陸側斜面でも GPS / 音響測距結合方式の海底地殻変動観測を開始し、大深度の音響測位および長基線のキネマティック GPS 測位の問題点を探る。

4) 研究計画 4 年目

精度評価等の結果を踏まえ、海底地殻変動観測用の海底局・海上局とデータ処理手法、音速構造の時間変化の観測に必要な計測装置の改良を行う。熊野灘中央部における GPS / 音響測距結合方式の海底地殻変動観測を継続するとともに、この海域における測位観測の問題点と解決方法についてまとめる。日本海溝の陸側斜面での海底地殻変動観測を継続するとともに、沈み込む海洋プレートの運動を実測できるシステムを開発するために水深 6000m 近くにおける音響測位および 300km を越える長基線のキネマティック GPS 測位の精度向上を目指し、日本海溝の海側でも GPS / 音響測距結合方式の海底地殻変動観測を開始する。

5) 研究計画 5 年目

海底地殻変動観測用の海底局・海上局とデータ処理手法、音速構造の時間変化の観測に必要な計測装置の改良を引き続き行う。日本海溝の陸側斜面と海側で GPS / 音響測距結合方式の海底地殻変動観測を継続し、大深度の音響測位および長基線のキネマティック GPS 測位に関する問題点と解決方法について取りまとめを行う。5 年間の観測結果をまとめ、繰り返し観測の精度評価を行うとともに、繰り返し観測精度 2~3cm を達成する観測手法と観測条件、およびデータ解析手法を明らかにする。

(e) 平成 16 年度業務目的

平成 16 年度は、前年度に開発し熊野灘中央部に設置した GPS / 音響測距結合方式の海底地殻変動観測用海底局、および同じく前年度に開発した海上ブイに搭載した海上局を用いて、海底局の位置計測を行うとともに、海底局アレイの中心付近において十分時間をかけて海底地殻変動観測を行う。その観測の概念図を図 1 に示す。

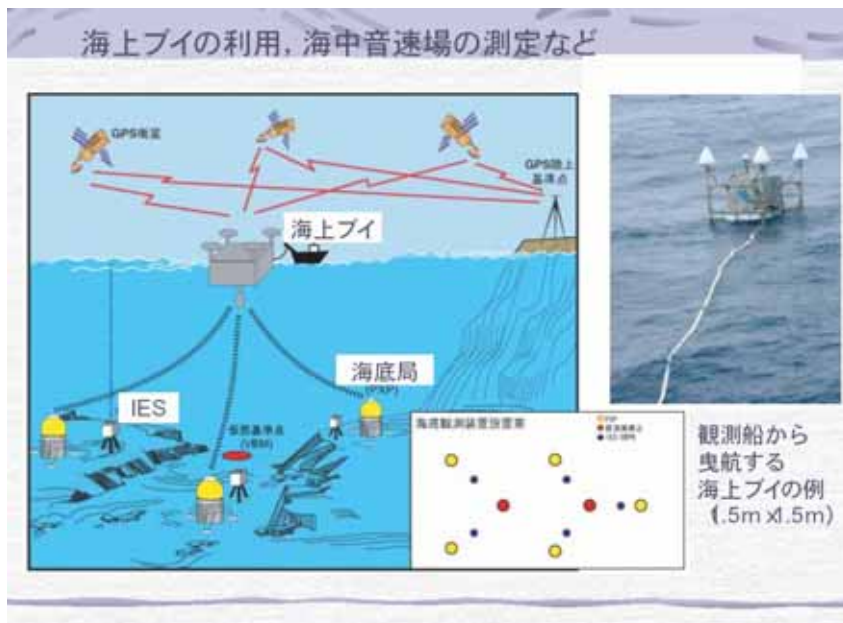


図1 観測方法の概要

3台以上で組んだ海底局アレイの中心で測距を行う。また、音波の波線の中ほどに IES を配置し、音速の連続モニタリングを行う。写真は曳航中のブイ。

観測期間中に、XCTD 等による海洋物理観測を行うとともに、倒立音響測深機と海底圧力計を用いた海洋変動の連続観測を行う。また、海底地殻変動観測用の海底局・海上局とデータ処理手法、音速構造の時間変化の観測に必要な計測装置の開発を引き続き行う。特に、日本海溝・千島海溝周辺で発生する海溝型地震を対象とした観測を実施するため、深海用海底地殻変動観測の海底局・海上局の開発と長基線のキネマティック GPS 測位の研究を開始する。なお、キネマティック GPS 測位については傭船により海上と複数の陸上局を結んだ基線で試験観測及び解析を行い、GPS 測位の問題点の洗い出しと解決法を探る。

(2) 平成 16 年度の成果

(a) 業務の要約

海溝域の巨大地震を引き起こすプレート境界の変動を正確に把握するためには、地震発生帯の直上である海底で地殻変動観測を実施することが必須であるが、繰り返し観測精度等に問題がある。そこで本事業では、GPS / 音響測距結合方式による水平方向の海底地殻変動観測システムについて、プイを用いた観測による雑音の低減化と音速補正の高度化等により 2-3cm の繰り返し観測精度を目指した技術開発を行う。平成 16 年度は、熊野灘中央部において本格的な観測を開始し、三陸沖日本海溝周辺における観測の準備を進めた。熊野灘では 8 月および 11 月に傭船航海を行い、海底局アレイの中心付近において海底精密測位観測と海洋物理観測を行い、9 月上旬に発生した紀伊半島沖地震に伴うと解釈される南向き 30cm 弱の海底地殻変動を検出したが、近接する 2 点の観測結果に差が生じた。また日本海溝周辺における観測に備えて、海底局を 3 台導入するとともに、観測予定海域における KGPS 測位の試験観測を行った。

(b) 業務の実施方法

1) 熊野灘中央部での海底地殻変動観測及び評価

平成 16 年 8 月および 11 月の傭船航海において、熊野灘中央部における本格的な海底地殻変動観測を行った。調査を行った海域と観測サイトを図 2 に示す。また、海上の GPS 測位には下記の表 1 の陸上 GPS 観測点における観測データ（1 秒値）の提供を受けて解析した。

表 1 平成 16 年熊野灘地殻変動観測における陸上観測点

観測機関	観測点名	緯度	経度
国土地理院	0314 (志摩)	34.2501	136.8235
	0315 (三重熊野)	33.8718	136.0888
	0376 (那智勝浦)	33.5805	135.9235
	0637 (紀伊長島)	34.2048	136.3458
名古屋大学	NGYU	35.1547	136.9686
海上保安庁	6006(下里)	33.5777	135.937

a) 8 月の傭船航海

8 月 3 日から 14 日までの 12 日間、洞海マリンシステムズ株式会社の調査船挑洋丸を傭船し、最初の観測を行った。この夏は台風の襲来が異常に多く、この航海も 10 号、11 号、13 号という 3 つの台風の影響を受けたが、なんとか必要な観測は行うことができた。観測サイトを図 2 に示す。

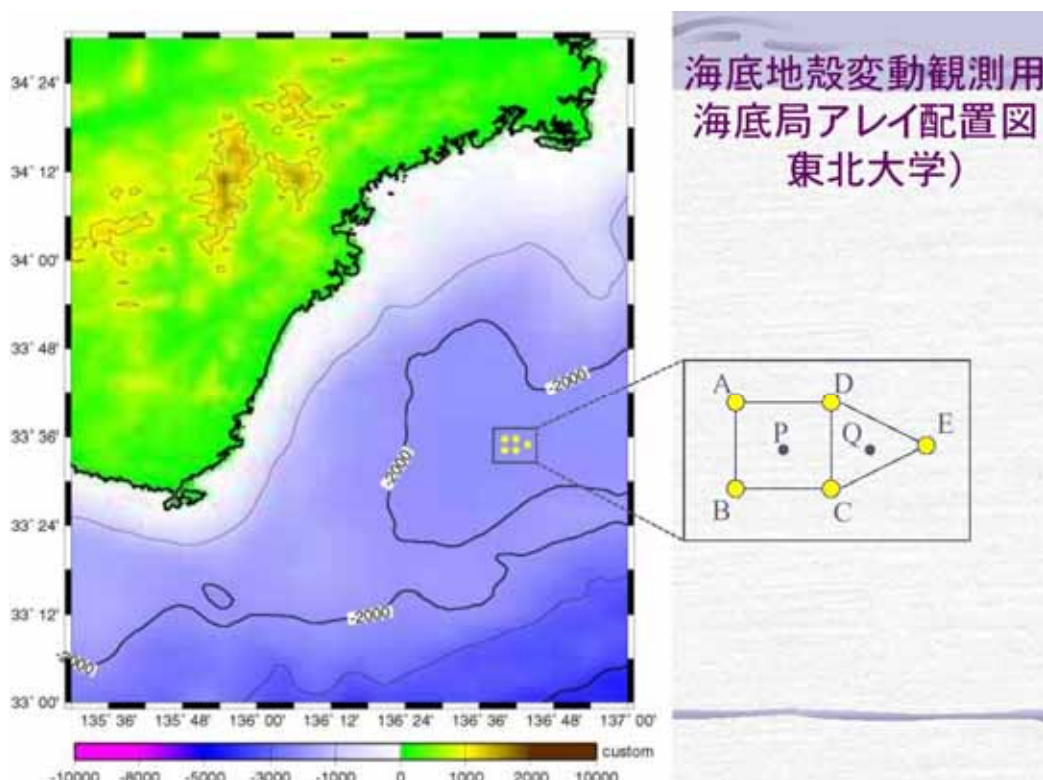


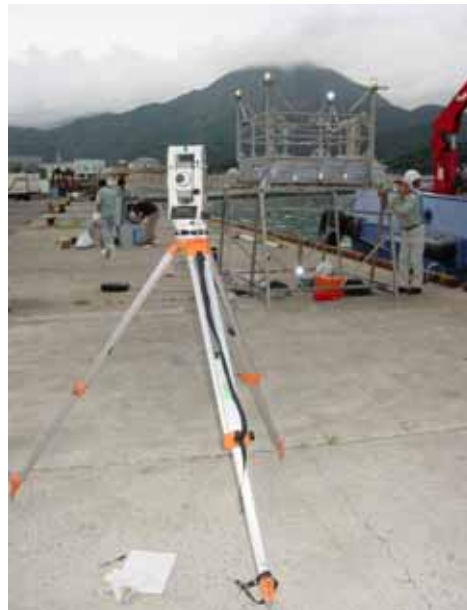
図2 熊野灘沖の観測点の位置と5台の海底局の配置図

A から E までの 5 つの点は、海底局（精密音響測距用音響トランスポンダー）の設置点であるが、A 点から D 点までの 4 点では平成 16 年 3 月に海底局を設置済みであり、この航海で残る E 点へ設置した。ついで C, D, E 点の近くにそれぞれ 1 台の倒立音響測深機（IES: Inverted Echo Sounder）を設置し、観測期間中、海底から海面まで音波が往復する時間を計測した。A-E 点の位置を下記に示す。

- A 点 EJ17 北緯 33 度 35.77 分、東経 136 度 40.14 分
- B 点 EJ18 北緯 33 度 34.25 分、東経 136 度 40.08 分
- C 点 EJ19 北緯 33 度 34.23 分、東経 136 度 41.92 分
- D 点 EJ20 北緯 33 度 35.74 分、東経 136 度 41.91 分
- E 点 EJ21 北緯 33 度 35.00 分、東経 136 度 43.85 分

曳航ブイを用いた観測の準備は岸壁から始まる。まずブイを据えつける架台を組立て、その上にブイを組立てる。いずれも小型トラックやコンテナで運べるように小さく分解できるようになっている。図 3 に示すように、GPS アンテナと音響送受波器の位置に光学測量用のリフレクターを取り付け、測量装置を用いてそれぞれの相対位置を mm のオーダーで求める。その観測が終わるとリフレクターを外して、GPS アンテナを取り付け、それぞれのケーブルの端末を波浪に耐えるようにシールする。チェックが終わった段階でブイの架台ごとクレーンで吊り上げて船の甲板に据付け、ロープで固定する。音響送受波器とそれをカバーする遮音板はぶつけてはいけないので、この段階で取り付ける。海上局の上側には 4 台の GPS アンテナ、最下部には音響送受波器が取り付けられてあり、中央にあるアルミ製の箱の中に GPS 受信機とデータ収録装置が収納されている。

図 3 光波測距儀を使った、アンテナと音響送受波器との相対位置測定
それぞれの該当箇所に反射鏡を取り付け測定する。



音響測距装置の船上部は船のブリッジの後方にあるチャートルームに設置し、海上局の音響送受波器までケーブルで結んだ。船とブイの間は、このほかに AC100V の電源ケーブル、LAN ケーブル、および曳航用のロープで結ばれている。

観測は、このブイをクレーンで吊って船の甲板から海面に下ろす作業から始まる。観測中は、ブイを船から数 10m 離して曳航する。図 4 の航跡に示すように、まず各海底局を 1 周するようにブイを曳航し、海底精密測位観測作業を実施した。この観測の結果から、海面から投下して設置した各海底局の正確な位置を求めた。ついで、C,D,E 点からなる正三角形の中心 Q、および A,B,C,D4 点からなる正方形の中心 P の位置にブイを長時間保持し、同様な測位観測を継続した。この観測が海底地殻変動観測の最も重要な部分である。観測中に急に海況が悪化し、荒れた海でブイを回収しなければならぬことが複数回あり、ブイをクレーンで吊り上げる前に GPS アンテナが船尾に当たり破損したり、吊り上げたブイが船の動揺のために揺れだして音響送受波器の遮音板を割ったりするトラブルはあったが、予定していた観測はほぼ実行できた。ブイを用いた海底測位観測と並行して、投げ捨て方式の CTD (X-CTD) および XBT を用いた音速プロファイルの観測を定期的に行った。3 台の IES は観測終了後、音響信号により錘を切り離して浮上させ、回収した。

b) 11 月の傭船航海

11 月 3 日から 14 日までの 12 日間、8 月と同じ調査船挑洋丸を傭船し、熊野灘における 2 回目の観測を行った。この航海では、各海底局の位置決めの観測は行わず、三角形あるいは四角形の海底局アレイの中心に曳航ブイを保持し、海底測位観測を継続した。8 月の航海で音響送受波器の上に取り付けた塩ビ製の遮音板を割ってしまったので、金属製の遮音板を取り付けたが、性能がかなり劣ることが判明し、発砲スチロール製の遮音コーンを作って用いた。8 月の航海と同じように、投げ捨て方式の CTD

3.1.4. プイ方式を用いた GPS / 音響測距結合方式による海底地殻変動観測の精度向上のための技術開発

(X-CTD)およびXBTを用いた音速プロファイルの観測を定期的に行った。観測の前に、A, B, E点のそばにIESを設置し、観測期間中、海底から海面まで音波が往復する時間を計測し、航海の最後に回収した。

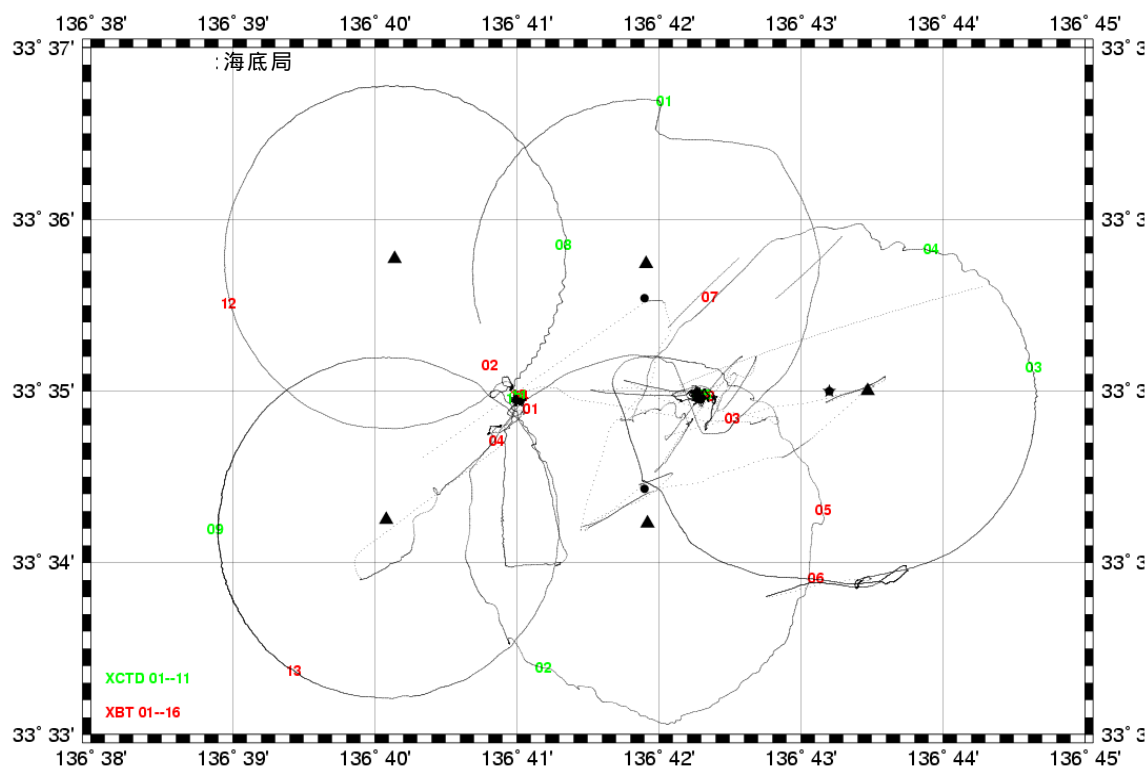


図4 8月の航海の航跡図

各海底局の回りを回り個々の位置を決めた後、アレイ中心で定点保持観測を行い、アレイの精密位置を求めた。定期的に XCTD/XBT で音速構造を測定した。

2) 海洋物理観測の実施及び評価

前項で述べたように、海底地殻変動観測の期間中に、X-CTD および XBT による水温・塩分濃度の海洋物理観測を行った。また倒立音響測深機 (IES: Inverted Echo Sounder) と海底圧力計を用いた海洋変動の連続観測を行った。IESはこの観測のために新たに開発した装置であり、8月の観測は初めての本格的な観測であったので、海面までの往復時間の計測に用いる音波信号について、4種類の信号を試みた。11月の観測では、8月の観測の結果に基づき、結果のよかった2種類の信号を用いた。航海後、海洋物理観測結果を海底測位解析に用いるとともに、海洋変動の観測結果と海底測位解析の結果を比較検討した。

3) 地殻変動観測用海底局等の開発

日本海溝・千島海溝沿いで発生する海溝型地震を対象とした海底地殻変動観測を実現するため、水深4000m海域用の海底局3台を導入した。陸上のGPS基準局の観測データを用いたGPS測位についても、陸から100km以上の海域において必要な測位精度を得る

必要があり、熊野灘で用いた調査線挑洋丸を用いて、8月に東北沖において12日間の傭船航海を行った。この航海も台風15号および16号の影響を受けたが、複数の陸上基準点を用いた海上試験観測を行うことができた。その他、海底地殻変動観測用のデータ処理手法の改良や、音速構造の時間変化を観測するIESの観測方法の改良などを進めた。

東北沖のKGPS測位には、陸上観測点AOB(東北大学青葉山地震観測所)もしくはSNR(東北大学三陸地震観測所)(表2)の観測データ(1秒値)を用いて解析を行った。

表2 平成16年東北沖観測における陸上観測点

観測機関	観測点名	緯度	経度
東北大学	AOB(青葉山地震観測所)	38.2483	140.8475
	SNR(三陸地震観測所)	39.1042	141.8169

(c) 業務の成果

1) 熊野灘中央部での海底地殻変動観測及び評価

8月および11月の傭船航海において、熊野灘中央部における本格的な海底地殻変動観測を行い、重要な成果を得た。それぞれの航海で得られた成果および2回の観測から捉えられた紀伊半島沖地震に伴う海底地殻変動について報告する。

a) 8月の傭船航海

海底精密測位の基礎は海上のGPS測位と海中の音響測距であるので、最初にそれぞれどのような観測データが得られたかを示す。

海上で揺れ動くブイの位置と姿勢角を測定するために、陸上基準局を用いたキネマティックGPS(KGPS)測位法を用いており、NASAのジェット推進研究所(JPL)が開発したGIPSY-OASIS IIという解析ソフトウェアを用いている。この解析方法では、JPLがグローバル観測網を用いて高精度で推定した衛星の精密暦、時計誤差、地球回転などのパラメータを既知量として使い、電離層については、2周波の観測量の比をとることでその影響を取り除いている。これらにより、長基線でも高精度で移動体の座標値を推定できる。

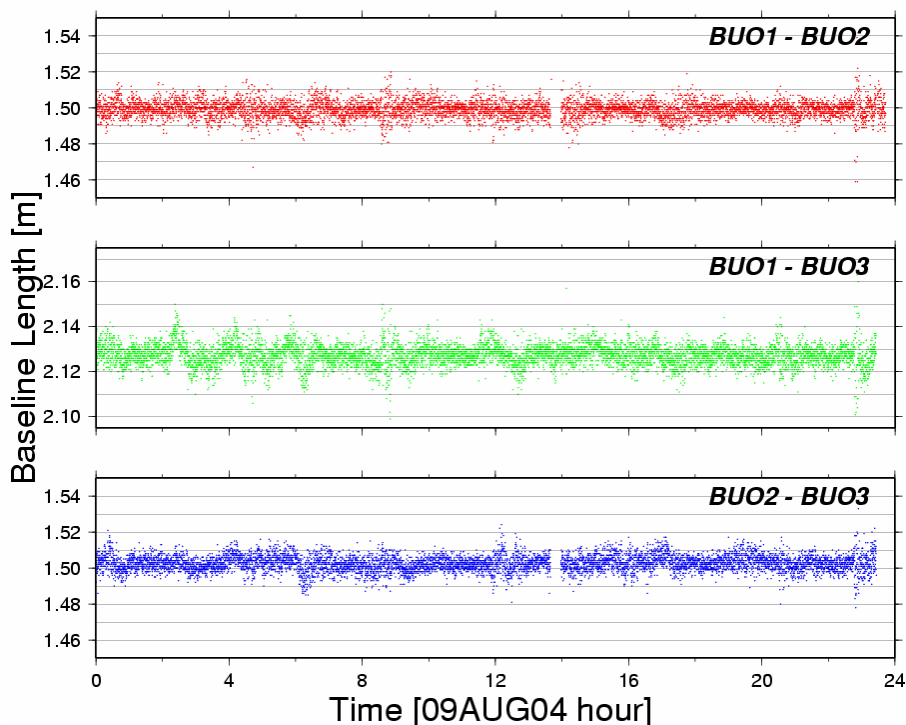


図 5 GPS アンテナ間距離の測定例

標準偏差は 0.5cm 程度である。この表示から絶対位置の評価はできないが、相対位置から求めるブイの姿勢は精度良く追跡できることがわかる。

熊野灘中央部における観測では、名古屋大学の観測点もしくは 4 つの国土地理院の陸上観測点 (表 1) を用いて KGPS 測位によりブイに取り付けた GPS アンテナの位置を求めた。まず陸上観測点の位置決定として、観測期間毎に全ての陸上観測点を用いて多点解析を行い、その期間の平均を取り、陸上観測点位置とした。その陸上点の位置を用いて KGPS 解析を行った。解析は、4 時間を 1 つのセッションとして行い、陸上観測点 1 点以上を基準として用いて、曳航ブイに取り付けた 3 台の GPS アンテナの位置を同時に解く方法で解析を行った。

ブイには 3 台の GPS アンテナが取り付けられているので、それぞれの距離が安定して観測されているかどうかというのが KGPS 測位の一つのチェック方法である。この点については図 5 の例に示すように問題はない。もう一つのチェック方法は海面からの高さの測定である。GPS で測定される高度は地球の準拠楕円体からの高さであるので、その場のジオイド高と海洋潮汐の補正をすれば、海面からの高度差が測定されるはずである。GPS の測位においては、GPS 衛星が上空にしかないから、水平方向の測位に比べて上下方向の測位は誤差が 3 倍以上となることが多い。したがって上下方向の測位誤差が評価できれば、水平方向の測位精度についてもある程度の推定ができる。図 6 は、海底局 C-D-E のアレイの中心付近における海底測位観測期間中に、ブイに取り付けた 3 台の GPS アンテナの位置からブイの下に取り付けてある音響送受波器の 3 次元的位置の変動を示したものであり、最下段の下の線は送受波器の楕円体高であり、その上の細かい線は海面高の変化であり、水深約 1.5m にある音響送受波器の位置がそれほど問題なく求められていることを示している。上の二つのグラフは各海底局の位置から求

めたアレイ中心位置を原点としたときの、曳航ブイの水平位置であり、ブイの保持精度はおおむね $\pm 50\text{m}$ 程度であり、アレイの見かけ位置に対する音速の影響が無視できないので、後述のような補正が必要となる。

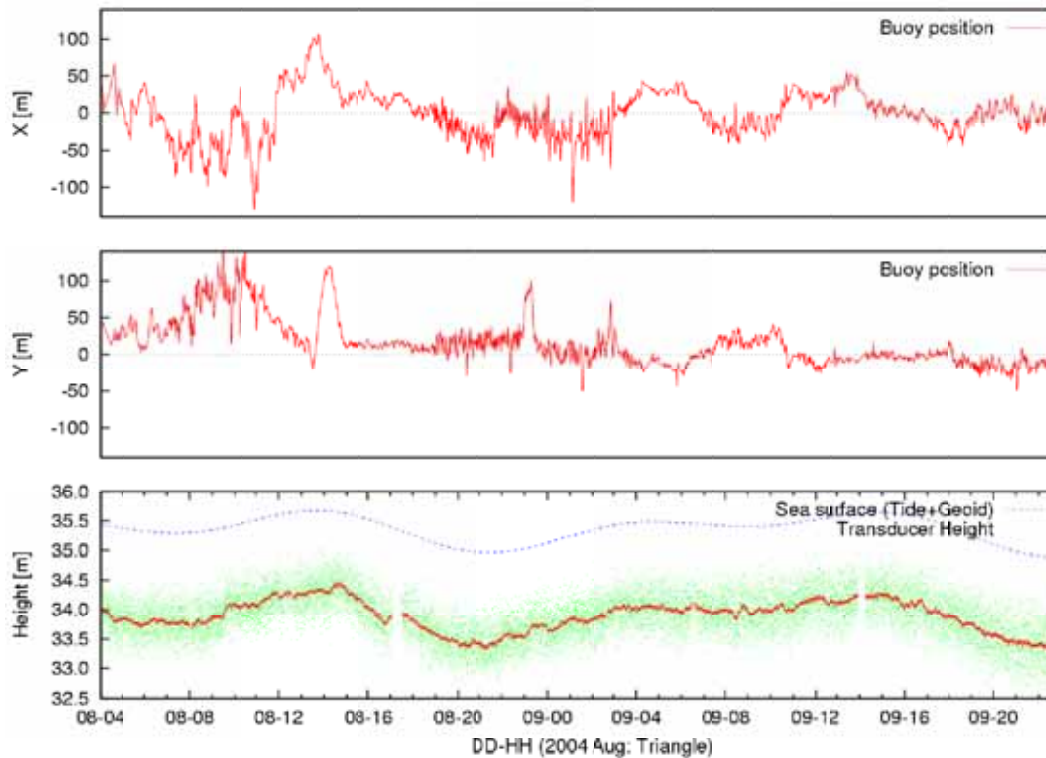


図6 海底局アレイの中心で観測中のブイの東西・南北・高さ方向の時間変化
中心から 100m 程度外れている時間帯もある。

音響測距データの一部を図 7 に示す。横軸は時間であり、図の上側は各海底局との走時（音波の往復時間の半分）であり、測距が確実に実行されていることが分かる。走時が急に变化している部分は、その海底局から応答信号を返信する際の遅延時間を変える作業に対応している。任意の海底局に信号を送り、この遅延時間を 10ms（斜め距離で約 7.5m、水平距離で約 10m）のステップで増加させていくことができる。船が頻繁に船首方位を大きく変えながらブイの位置を保持しており、ブイの位置はリアルタイムには分からないシステムになっていたため、遅延時間を 1 ステップ増加させる指令が海底局に届いたかどうか現場では分かりにくいという問題があり、後で解析するまで正確な遅延時間が判明しない。走時に基づいてブイの位置を制御すると、現場での遅延時間の取り違いが保持位置の誤りにつながる恐れもある。

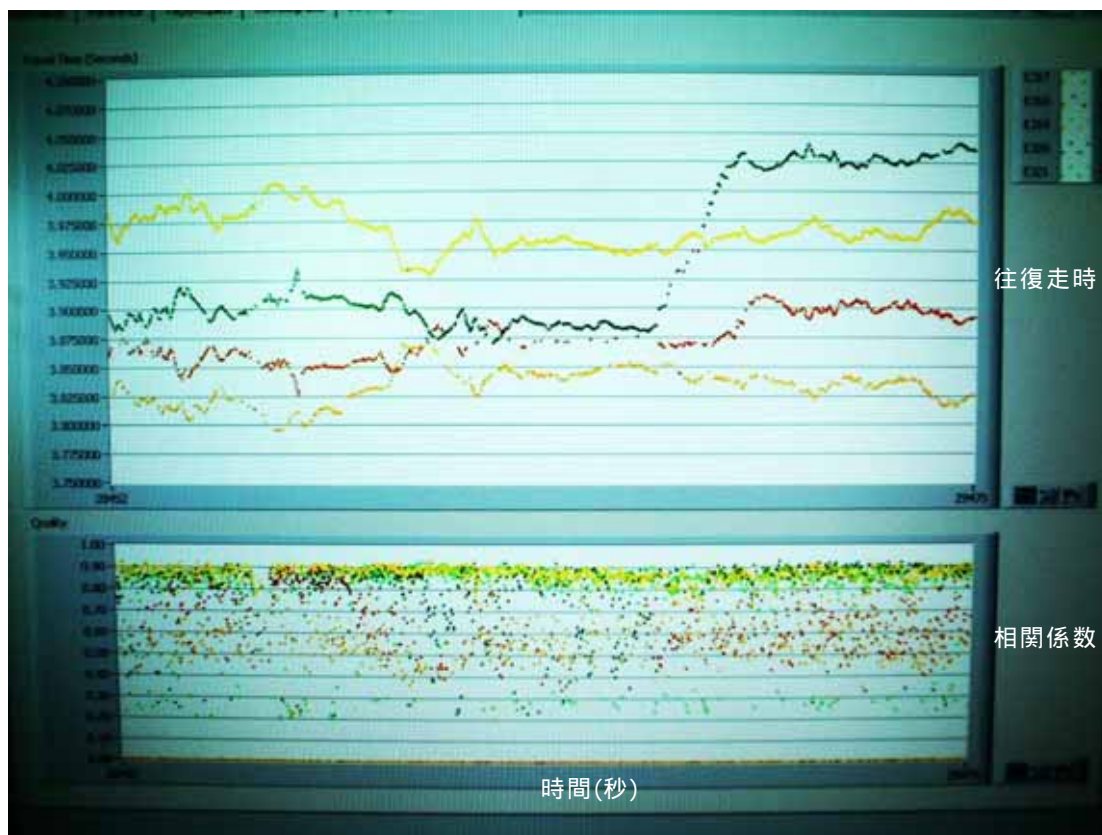


図 7 8月の航海で観測された音響測距データの一部であり、防音カバーの効果を示す。図の上側は各海底局との測距結果、下側は相関係数を示す。防音カバーが破損した方向にある海底局との観測はノイズが多く、相関係数が 0.5 程度まで落ちている(赤)が、破損していない方向は 0.9 と非常に高い値で安定している(黄色)。

図 7 の下側は送信信号と受信信号の相関係数であり、音響送受波器に被せている笠状の遮音板の効果を示すデータである。二つの海底局からの信号は相関係数が 0.8-0.9 を示しているのに、一つの海底局からの相関係数は 0.5-0.6 である。この航海では急に海況が悪化することがあり、荒れた海で曳航ブイを回収する時にこの遮音板をブイの架台にぶつけて半分ほど割ってしまった。その後の観測では、遮音板が残っている

方向にある海底局からの信号の相関係数が高く、遮音板が割れて無くなっている方向からの信号の相関係数が低いということが確認された。

以上のように、GPS 測位も音響測距も想定どおりに実行できていることを確認した上で、海底測位の解析を行った。8月の航海では、まず図4におけるブイの航跡に示すように各海底局の周りで観測し、それぞれの正確な位置を求めた。各海底局を周る間に、投げ捨て方式のCTD (X-CTD) およびXBTを用いた音速プロファイルの観測を行っているので、その結果を用いて、走時から海底局までの距離を求めた。各海底局の位置がどの程度の測距残差で求められているかを示す一例を図8に示す。これは図4のC点の海底局との走時残差の時系列を示しており、走時残差で0.4ms(1) 海底の水平位置の計測誤差にして数10cmである。この程度の精度で各海底局の位置を求めておけば、海底局アレイの中心の位置を1cmよりよい繰り返し観測精度で求めることができるという点が、海底局アレイを用いた観測の利点である(長田、2005)。

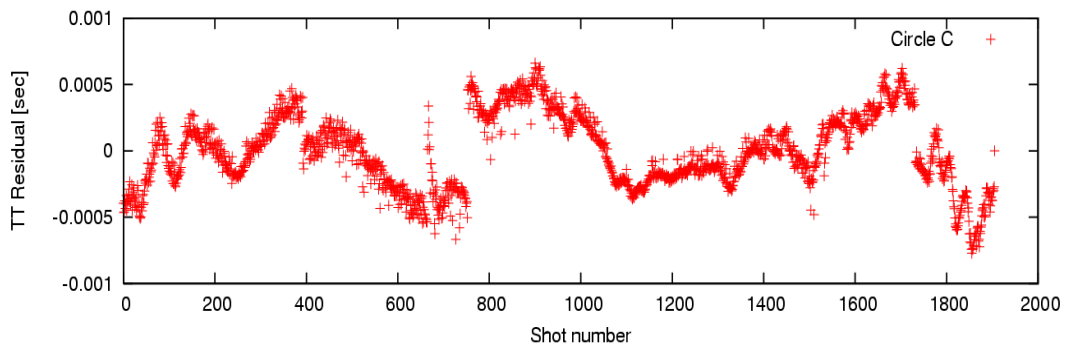


図8 図4のC点に示す海底局の位置決め観測における走時残差

1 の走時残差は約0.4msであり、海底局の水平位置の計測誤差に換算すると数10cmとなる。

ついで、海底局C,D,Eからなる三角形の中心G付近において長時間実施した海底測位観測について解析を行った。この観測が海底地殻変動観測の最も重要な部分であり、海底局アレイの中心位置を1cmのオーダーで求めることが目的である。この観測中に音速プロファイルの観測を定期的に行っており、その結果を図9に示す。この結果を用いて平均音速の時間変化の第一次近似を求めた。

中心付近の観測では、各海底局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、海底局アレイの中心の位置を精密に求める。そのような観測を繰り返すことにより、海底局アレイの水平変位を検出することを目指す。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という点にある。音速変化は全ての海底局との測距にほぼ等しい影響を与えるので、アレイの中心で観測すれば、音響送受波器の水平位置は音速変化の影響をほとんど受けない。ただし、観測位置がアレイの中心からずれると、そのずれの量と音速変化量に比例した誤差が生ずるので、補正する必要がある(Kido et al., 2004)。

上述のように、8月の観測では、海底局アレイの中心から最大で 100m あまり外れた場所で観測していた時間帯もある。アレイの中心を原点として、ブイの位置をプロットした結果を図 10 に示す。

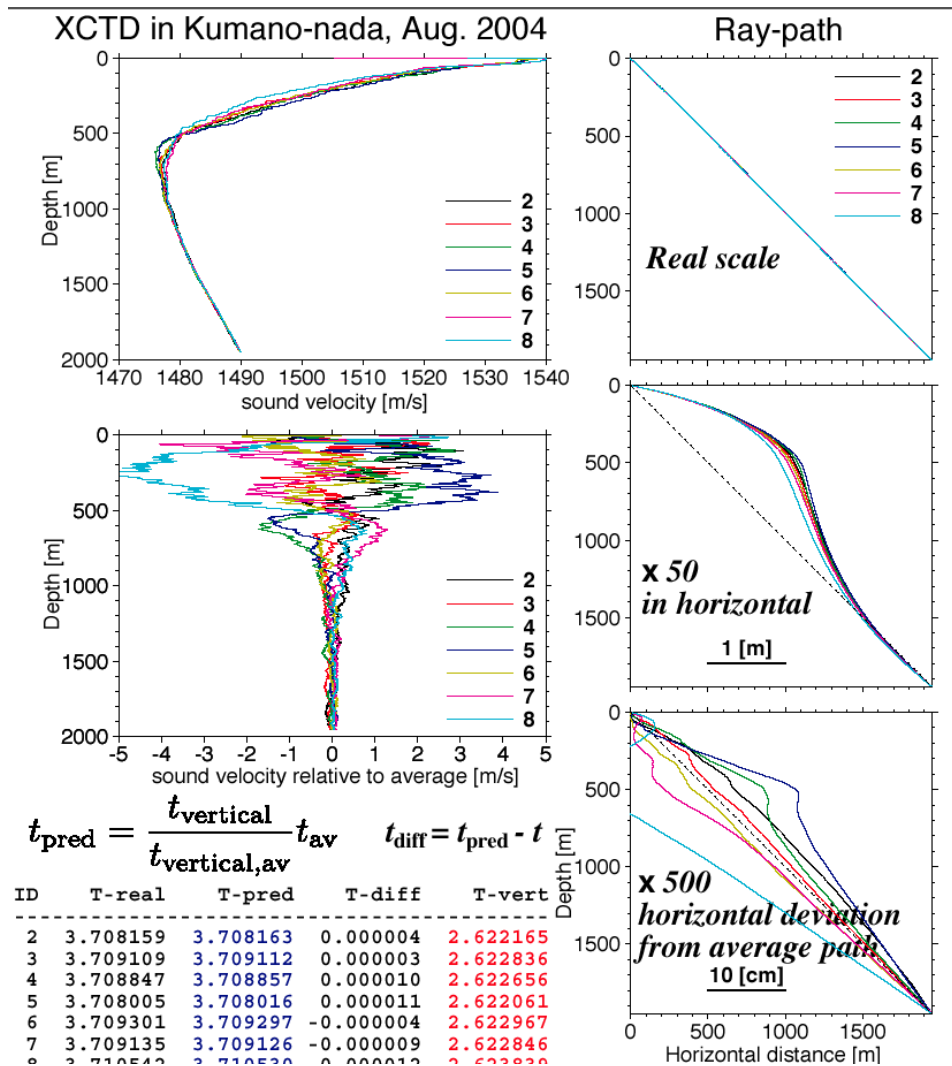


図9 8月の航海中に行った XCTD の観測をプロットした結果と、それらの音速モデルでの波線の理論計算

表層 500m の音速変化が特に大きい。

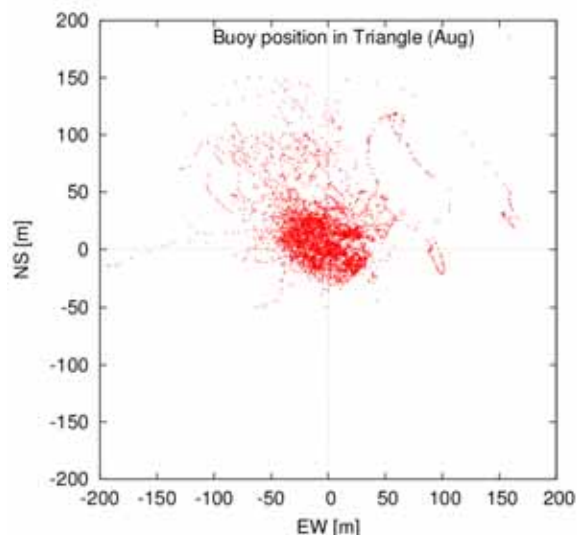


図 10 中心で観測中のブイの位置の変化 制御精度は半径 50m 程度。

図 9 に見られる程度の音速時間変化がある場合、ブイをアレイ中心から 10m 以内に保持しないと、音速変化の影響がキャンセルされずアレイの見かけの位置がずれてしまうことが Kido et al. (2004) により示されている。図 11 上段で示した測距残差のコヒーレントな変動成分は音速変化をそのまま反映しているの、これに 30 分のローパスフィルターをかけたものを音速の時間変化とみなし測距残差を再計算すると、図 11 下段のように残差がほぼゼロになる。このように音速時間補正を行うことにより、ブイの位置が中心から外れていても、アレイの位置を精度良く求めることが可能になる。

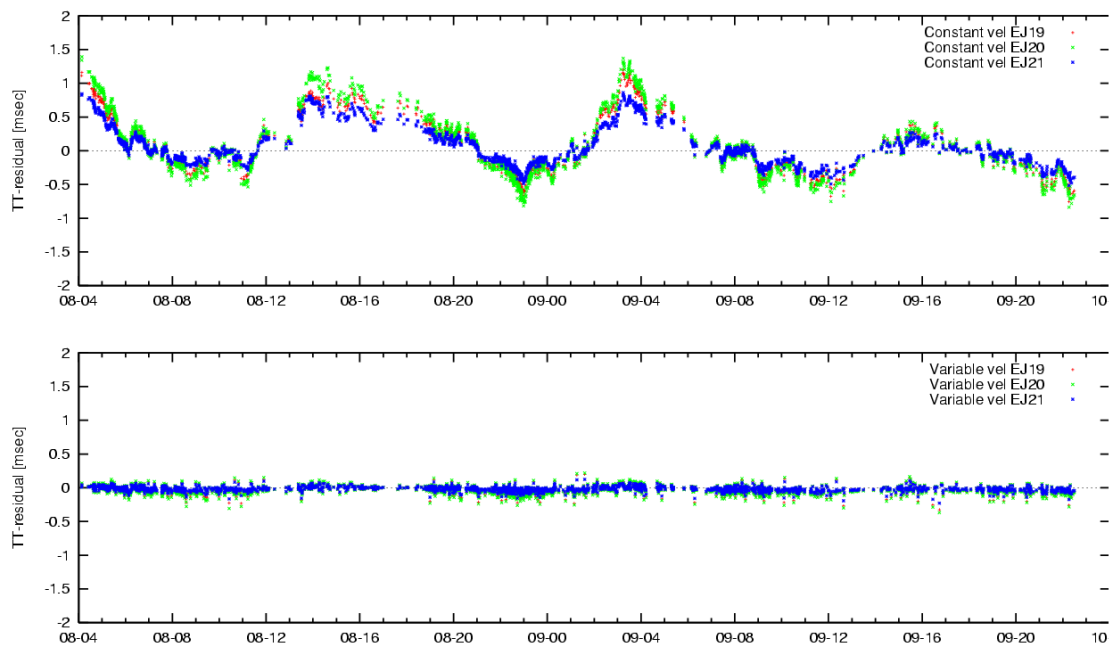


図 11 8月の三角形アレイ位置決め観測における走時残差の例

上の図で3海底局への走時残差がほぼ同期していることから、音速が水平成層構造を保ったまま時間変化していることがわかる。下の図は30分のローパスフィルターで音速時間変化を補正したときの走時残差。プイをアレイの中心に正確に保持でる場合は不要な補正であるが、今回の観測では保持精度が50m程度のため、全ての解析に同様の補正を施した。

このようにして小さくした測距残差に伴う海底局アレイの測位結果の変動を図12の上二つのグラフに示す。緑の点は、ばらつきが大きいのので除外した観測結果である。観測値が正規分布をしていれば、標準偏差をデータ数の平方根で割ることにより平均値の計測誤差を推定することができるが、この結果を見ると、ランダムな変化の他に、系統的な変化も見られる。この系統的な誤差の原因として、KGPS測位の解析が2時間単位であることと、音速水平成層構造からの時間による擾乱の影響が考えられる。そこで、KGPS解析の半周期である1時間毎の平均位置を求め、図12下段の二つのグラフに示した。図12の結果を2次元平面にプロットした結果を図13に示す。

3.1.4. ブイ方式を用いた GPS / 音響測距結合方式による海底地殻変動観測の精度向上のための技術開発

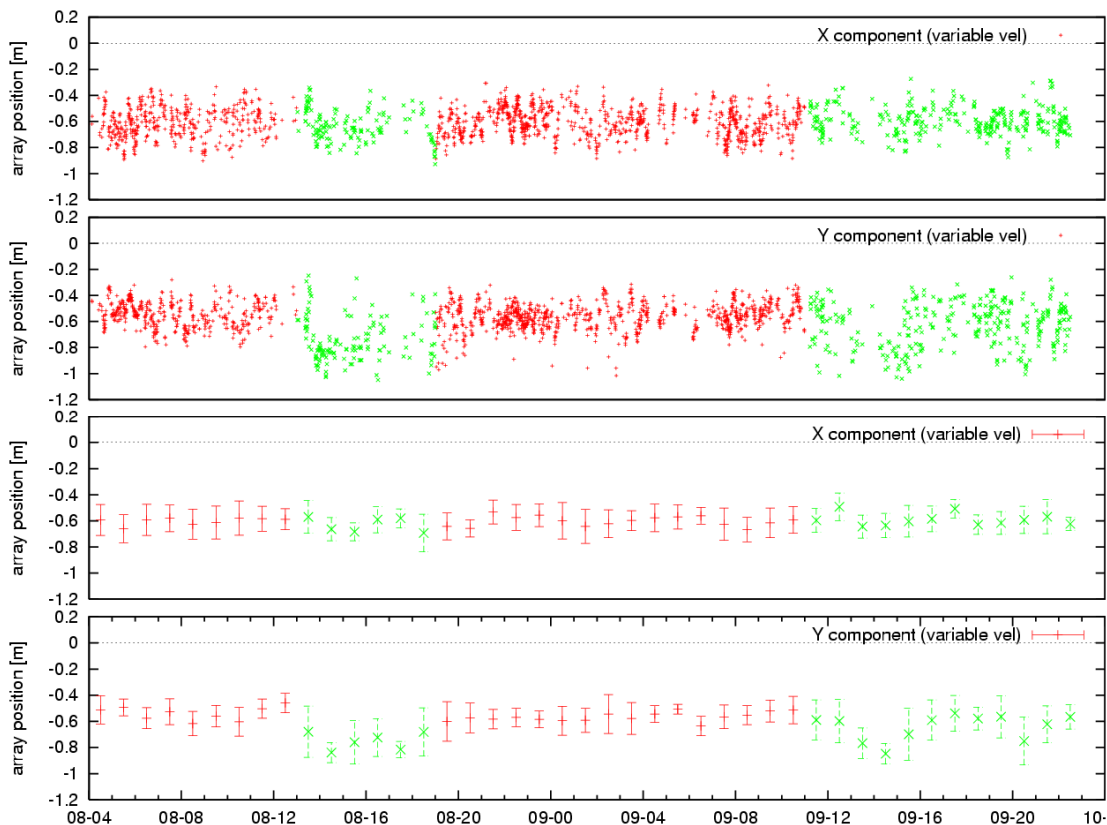


図 12 8月の三角形アレイ位置決め観測の結果であり、各海底局の位置決めから求めたアレイ中心の位置を原点としている。データがまばらで信頼できない区間は緑で表示し、解析から外した。下の図は1時間毎の平均とその標準偏差である。

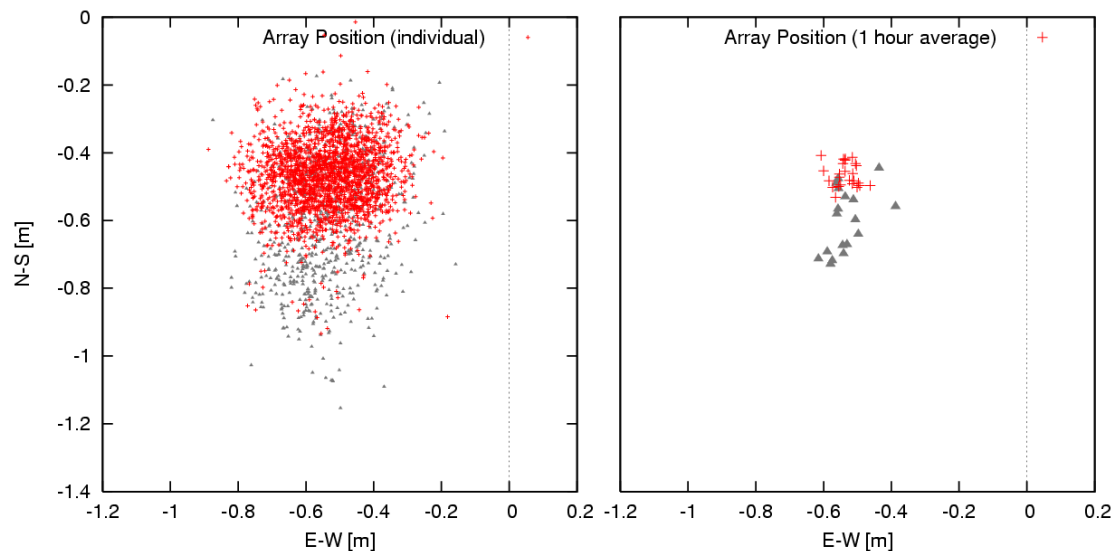


図 13 8月の三角形アレイ位置決め結果のXYプロット

1時間ごとの平均値のプロットはばらつきが小さいことがわかる。除外した時間帯のデータはグレーで示してある。

四角形の海底局アレイの中心 F 点付近における海底測位観測についても、同様な解析を行った。海底局アレイの測位結果の変動を図 14 に、水平位置のプロットを図 15 に示す。

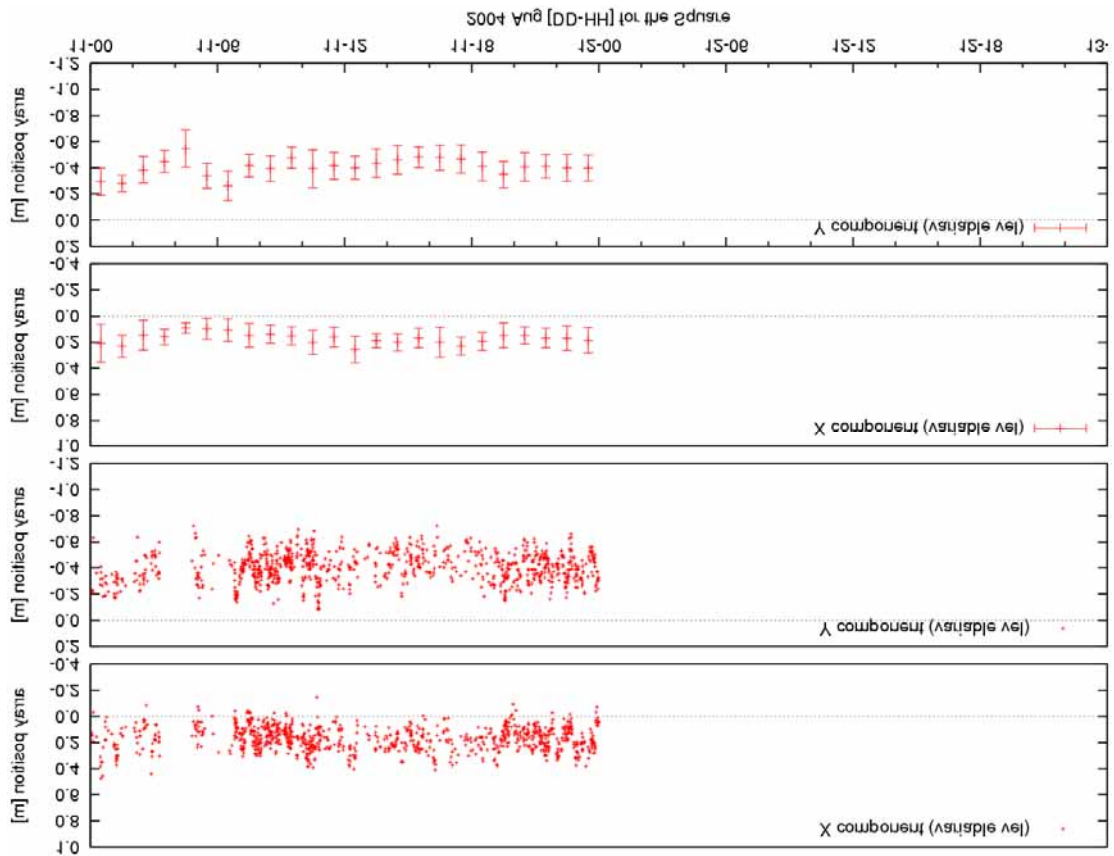


図 14 8月の四角形アレイの位置決め結果

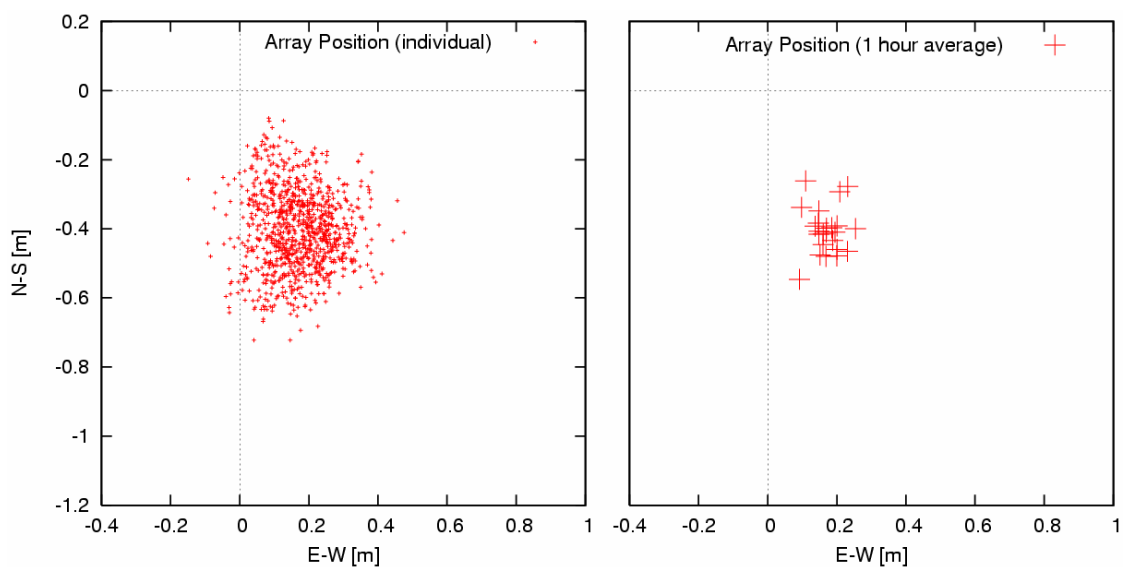


図 15 8月の四角形アレイの位置決め結果のXYプロット

b) 11月の備船航海

11月の備船航海で得られた2回目の熊野灘の海底測位観測においても、海底局のデータ返送遅延時間の設定が想定したようにはなっていないことが後で判明し、8月の航海とほぼ同様な解析を行った。KGPS 解析については、8月と同様に解析を行った。三角形の海底局アレイの測位結果を図 16 に、水平位置のプロットを図 17 に示す。

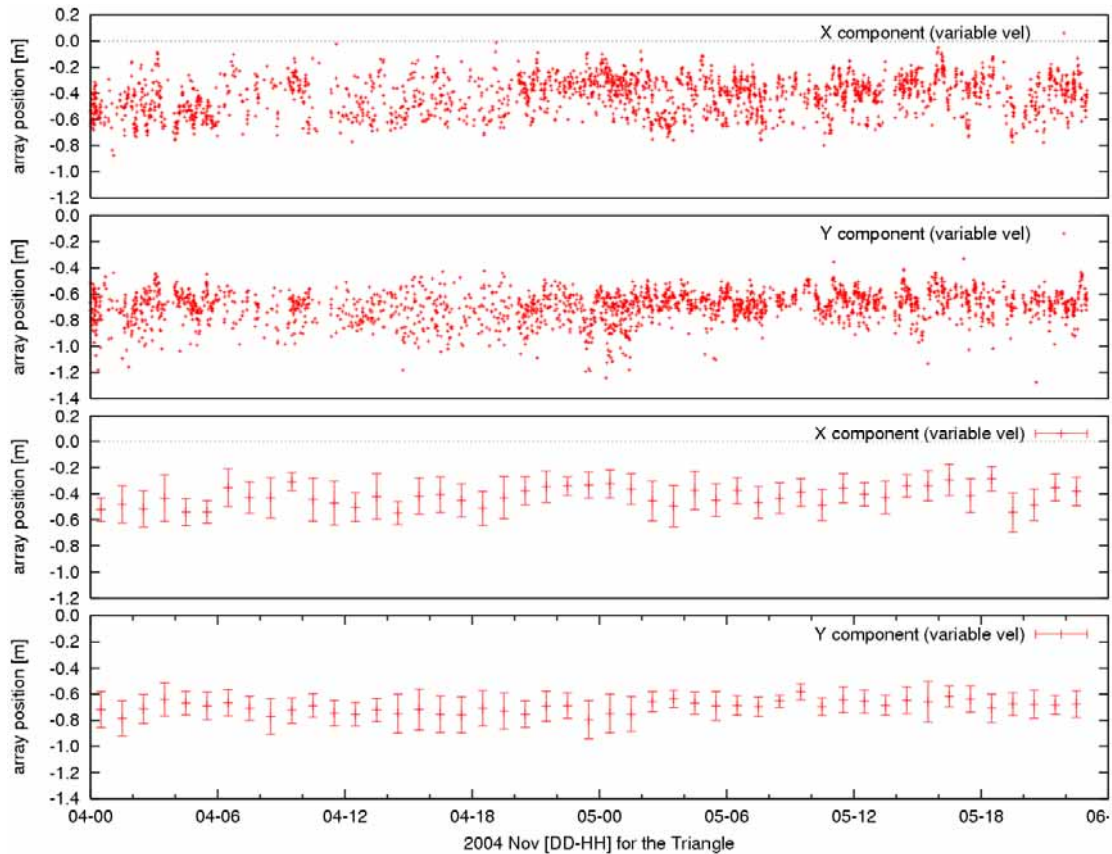


図 16 11月の三角形アレイ位置決め観測の結果

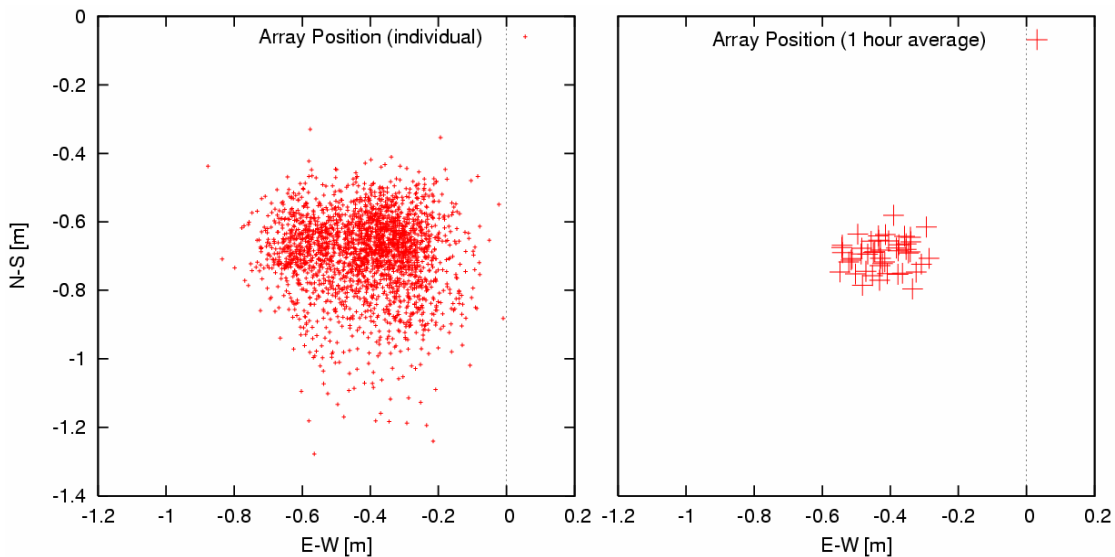


図 17 11月の三角形アレイの位置決め結果のXYプロット

同様に、四角形の海底局アレイの測位結果を図 18 と図 19 に示す。

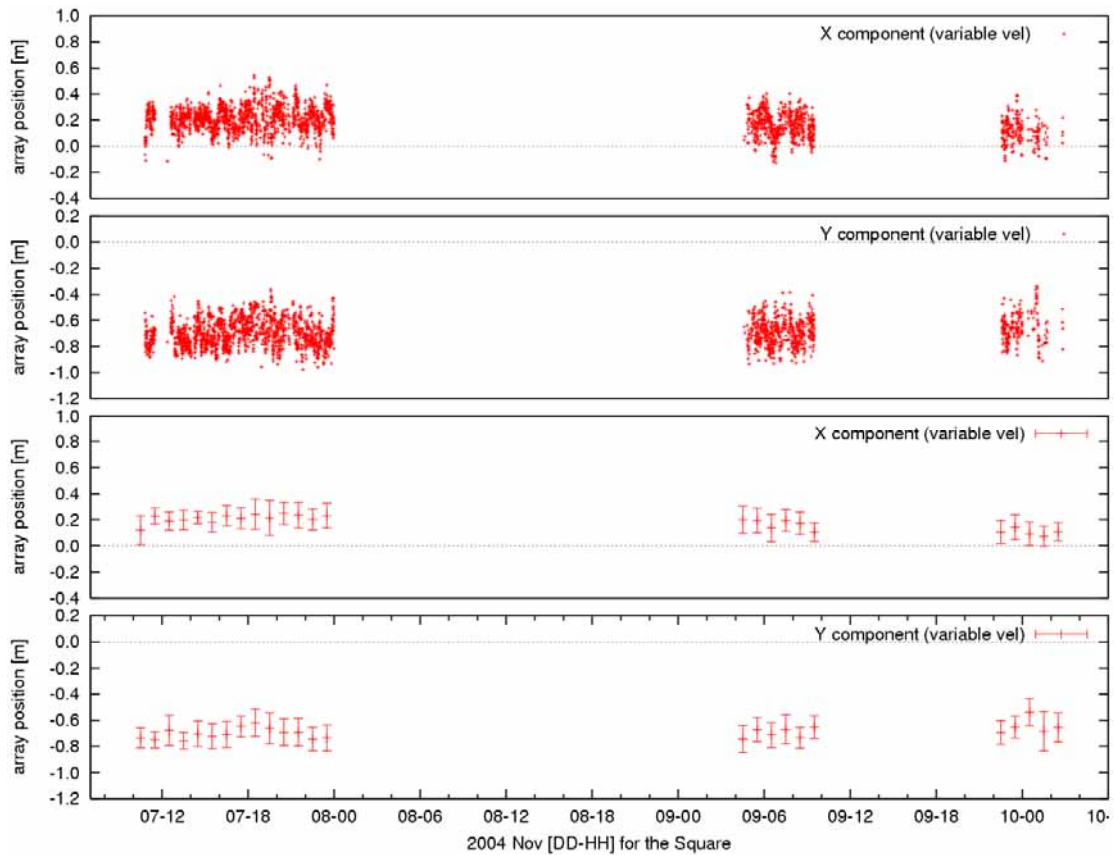


図 18 11月の四角形アレイの位置決め結果

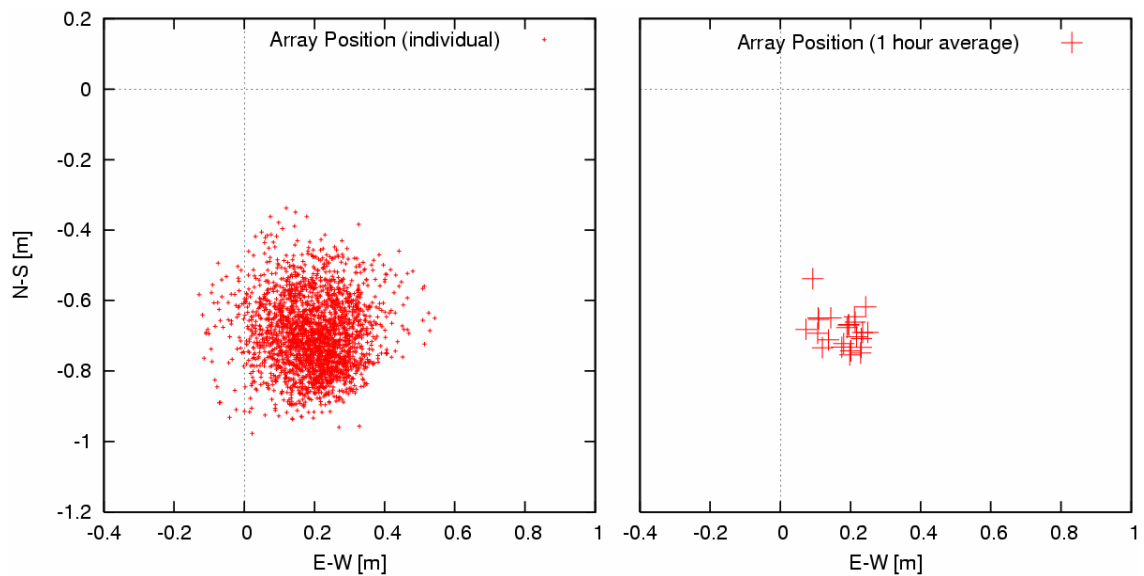


図 19 11月の四角形アレイの位置決め結果のXYプロット

音響測距については、新しい遮音板を用いたが、いずれの海底局との測距でも相関係数が 0.6 程度であり、8 月の航海の始めと比べるとかなり低くなったので、発砲スチロール製の遮音コーンを用いて、相関係数を 0.7 程度まで向上させた。当初の塩ビ製遮音板の性能がよく、丈夫な代替品を作ることはそれほど簡単なことではないことがわかった。

c) 8 月と 11 月の観測から推定される海底地殻変動

2004 年 9 月 5 日 23 時 57 分に紀伊半島の南東沖で M7.4 の地震が発生した。この地震の約 5 時間前の 19 時 07 分には M6.9 の前震が発生しており、地震活動は前震 - 本震 - 余震型で推移した。地震の発震機構は南北方向に圧力軸を持つ逆断層型で、フィリピン海プレート内部で発生した地震と考えられる。この地震に伴い、広域にわたる地殻変動が観測され、三重県の志摩半島では約 5cm 南へ変位した。この地震の余効変動は現在のところ確認されていない(図 20)。

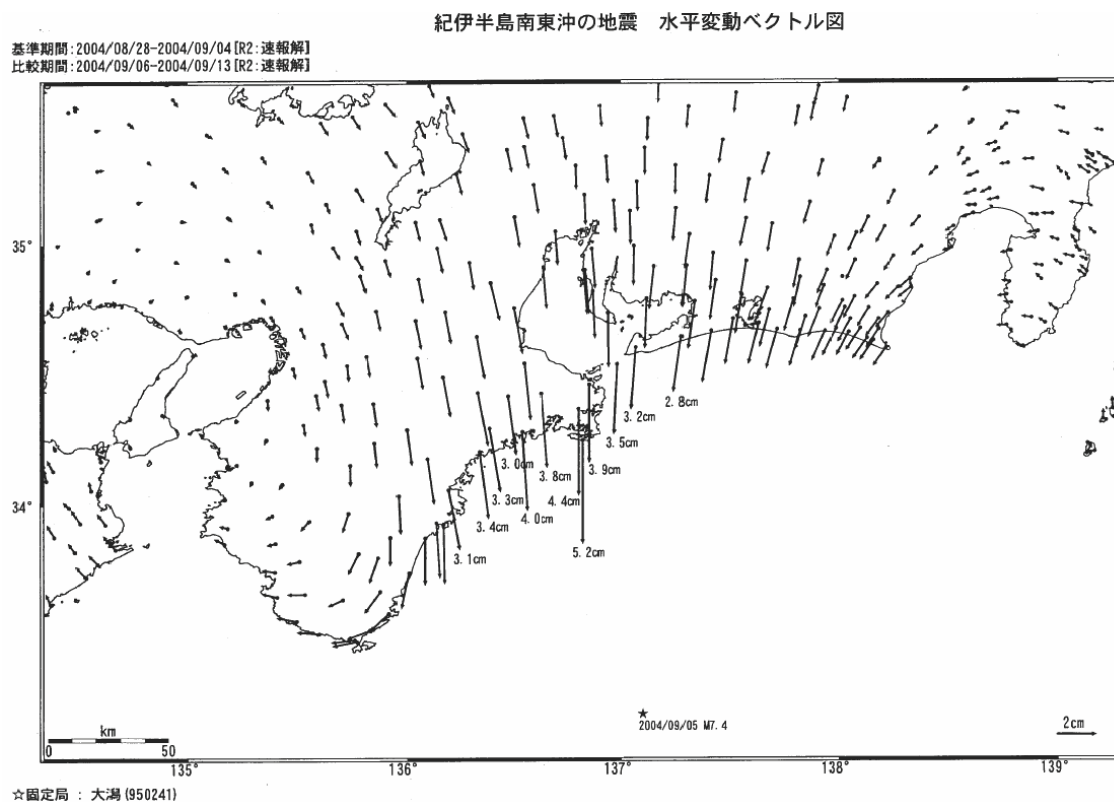


図 20 国土地理院の GEONET により観測された 2004 年紀伊半島東方沖地震に伴った地殻変動

国土地理院は、GPS により観測されたデータをもとに 1 枚の断層面からなる断層モデル(図 21)と 2 枚の断層面からなるモデル(図 22)を推定している。各モデルのパラメータは表 3 に示した。

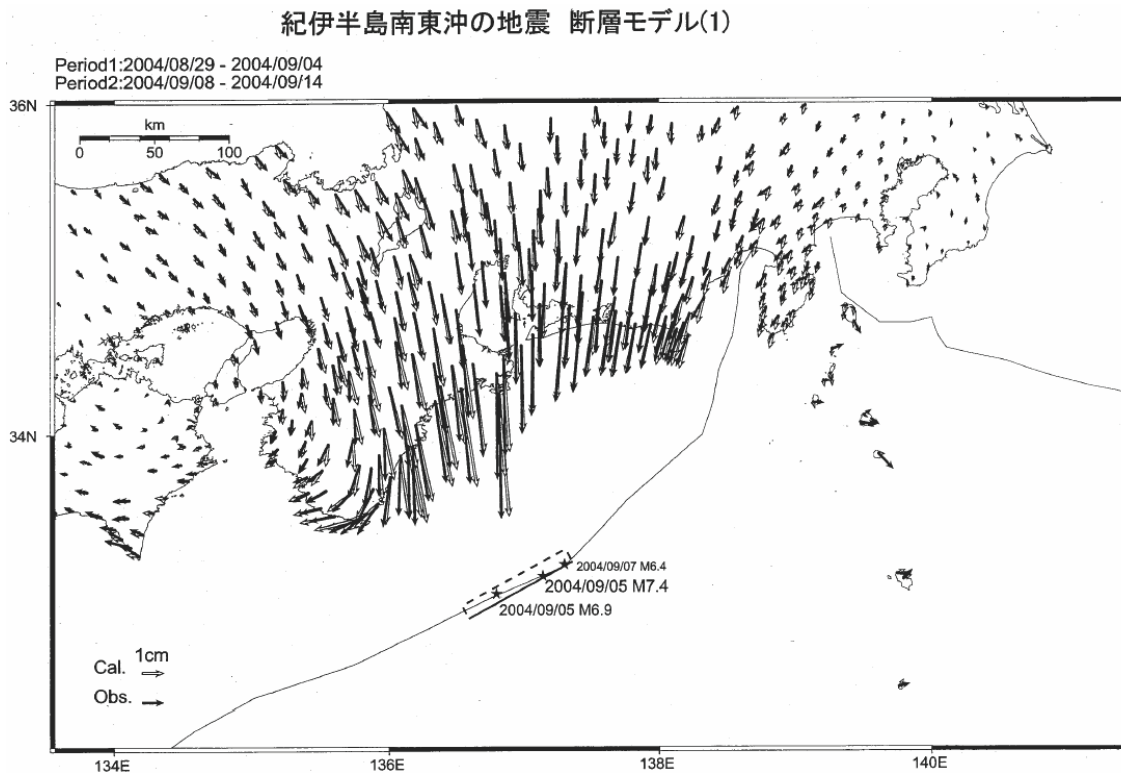


図 21 1枚の断層モデルにより計算された地殻変動と観測された地殻変動

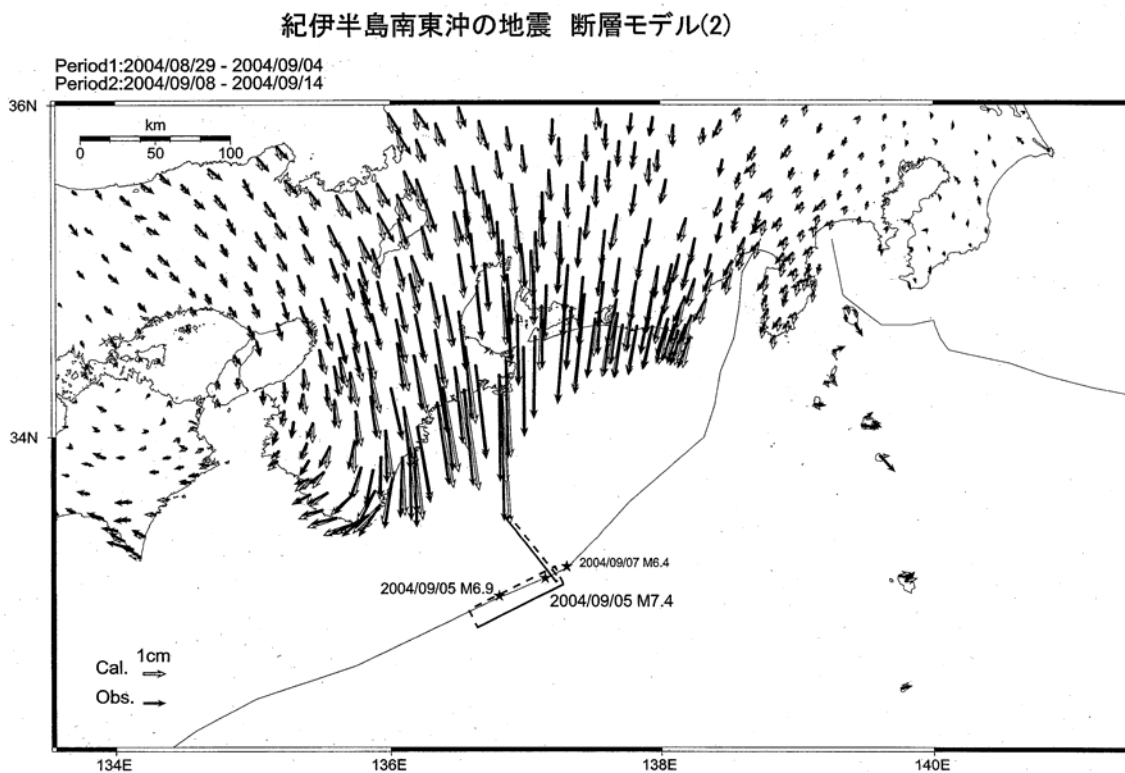


図 22 2枚の断層モデルにより計算された地殻変動と観測された地殻変動

表 3 国土地理院による紀伊半島東方沖地震の断層モデル

Lat. deg.	Lon. deg.	Length km	Width km	Depth km	Strike deg.	Dip deg.	Rake deg.	Slip m	Mw
1 fault plane model									
33.23	137.36	80.8	20.4	7.0	242	61	59	3.79	7.4
2 fault plane model									
33.10	137.28	66.5	23.5	12.5	244	56	67	3.26	7.4
33.12	137.22	54.7	21.4	8.2	321	82	143	1.25	7.0

これらの断層モデルから期待される海底地殻変動を計算した結果を図 23、24 にそれぞれ示す。東北大学の海底地殻変動観測点では、1 枚の断層モデルの場合には約 13cm、2 枚の断層モデルの場合には約 10cm ほぼ南方に変位していることが期待できる。

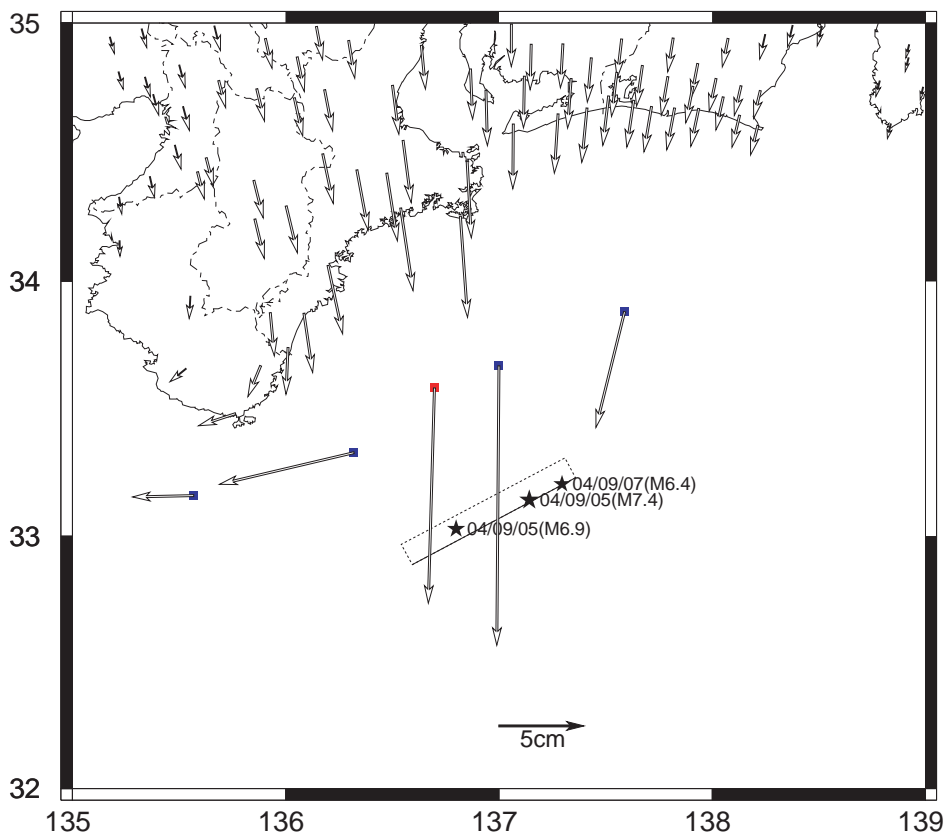


図 23 1 枚の断層モデルにより計算された海底地殻変動観測点における水平変動
赤、青の四角はそれぞれ東北大学、海上保安庁の海底地殻変動観測点を示す。

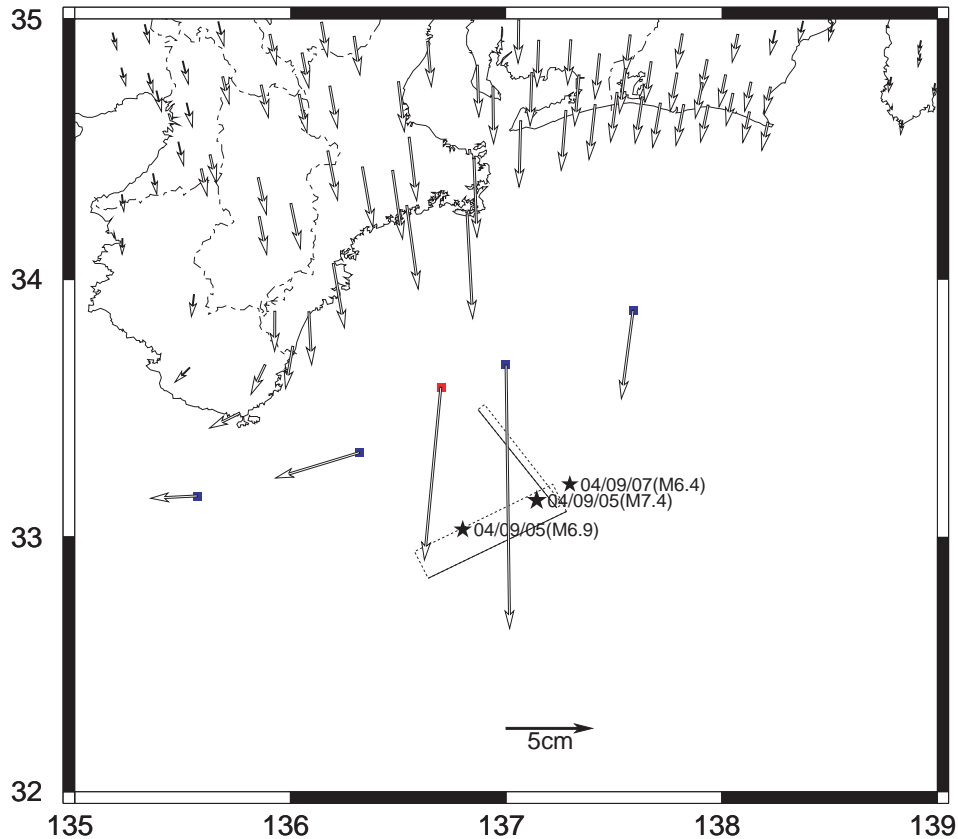


図 24 図 23 に同じ ただし、2 枚の断層モデルの場合。

幸い、11月に2回目の熊野灘観測航海を予定していたので、この地震に伴う海底地殻変動を現場で観測できる機会を得た。8月と11月の海底測位観測の結果を比較した結果を表4および図25に示す。三角形の海底局アレイの中心Q点では、南南東に約25cm、四角形の海底局アレイの中心P点では、南方に約28cmの変動があったという結果が得られた。近接する2点で観測された地殻変動が10cm近く異なっているが、余震域が観測サイト近傍まで延びており、原因を慎重に究明する必要がある。

3.1.4. ブイ方式を用いた GPS / 音響測距結合方式による海底地殻変動観測の精度向上のための技術開発

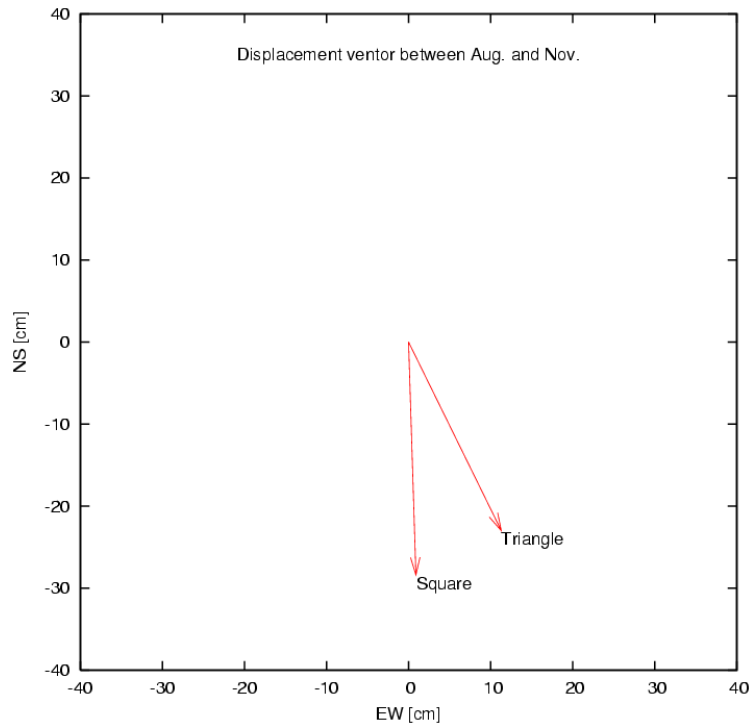


図 25 8月と11月の観測で検出された変位ベクトル
三角形と四角形での検出をそれぞれ示した。

表 4 最終的な測位結果のまとめ。単位 [cm]

観測	個々の平均(東西)	個々の平均(南北)	個々の標準偏差(東西)	個々の標準偏差(南北)	1時間平均の平均(東西)	1時間平均の平均(南北)	1時間平均の標準偏差(東西)	1時間平均の標準偏差(南北)	変位量(東西)	変位量(南北)
8月三角形	-53.7	-46.9	11.0	10.1	-53.5	-46.6	3.4	3.4	---	---
11月三角形	-41.7	-69.3	14.0	11.6	-42.2	-69.6	7.1	4.6	11.3	-23.0
8月四角形	16.8	-40.5	9.1	11.4	17.1	-40.5	4.0	6.6	---	---
11月四角形	19.5	-69.6	9.8	10.3	18.0	-68.9	5.1	4.8	0.9	-28.4

2) 海洋物理観測の実施及び評価

8月および11月の海底地殻変動観測の期間中に、X-CTD および XBT による水温・塩分濃度の海洋物理観測を行い、音速の鉛直プロファイルを求めた。従来は、一つの海底局を一周し設置位置を求める観測期間中、音速構造は変化しないと仮定して解析していたが、8月の観測では、一周する間に3回の海洋物理観測を行い、音速の時空間変化を実測し、その補正を行うことができた。また海底局アレイの中心付近における観測では、約6時間ごとに音速の鉛直プロファイルを観測し、音速構造の時間変化の第一次近似を得た。音速変化に関するさらに詳しい解析は、Kido et al. (2004)の方法により実施した。

観測期間中、IES と海底圧力計を用いた海洋変動の連続観測を行った8月の航海において、図4のC、D、E点のアレイ中心側に IES を設置した。E点の IES は海底圧力計も装備している。E点の IES は計測のタイミングに問題があり、IES の観測データを得ることはできなかったが、他の測器は正常に作動し、海底から海面までの走時と海底圧力の日収変化を観測した。

海上の音響送受波器と海底局間の音響測距では、音波が海面付近から出て海底までを斜めに往復する時間を計測するが、IES では、音波が海底付近から出て鉛直方向に海面まで行き、そこで反射されて海底付近まで戻る時間を計測する(図1参照)。つまりほとんど同じような観測を行っているのである、海底に3台の海底局においてそのアレイの中心付近で観測する方法の利点は、アレイ中心付近の表層の海中音速構造が水平成層構造をなしている場合、つまり音速が水深の関数になっている場合、平均音速が時間変化しても海底測位に与える影響はキャンセルされるという点である。海中の音速構造が水平方向に変化している場合、その変化の影響を捉えることはできるが、測位誤差を引き起こす。そこで、海上海底間を音波が斜めに往復する区間の適切な場所に IES を設置しておけば、海上海底間の平均音速の時間変化をモニターできる。3台の IES を設置すれば、アレイ中心付近における音速変化の空間変化と時間変化をほぼモニターできるはずである。問題は、海上海底間の音響測距では海面の波浪の影響は補正しているが、IES の計測では波浪の影響を補正できないという点である。観測してみると確かに一回毎の測定値はばらつくが、1時間程度の移動平均をとると、図26に示すように、日変化がきれいに観測される。海面までの音波の往復時間の計測には4種類の信号を用いたが、観測結果のばらつきが最も小さいという点で、周波数変調方式の信号を用いた結果を示した。したがって観測結果の4分の1しか使っていないことになる。この日変化には潮汐の影響が含まれているので、IES に取り付けられている海底圧力計の観測データを用いて補正を行う。

11月の航海では、A、B、E点のアレイ中心よりに IES を設置した。E点の IES は海底圧力計も装備している。全ての測器が正常に作動し、海底から海面までの走時と海底圧力の日収変化を観測した。8月の観測では、4種類の音響信号を用いたが、11月の観測では、周波数変調方式の信号および位相変調方式の短い信号を用いた。したがっていずれの信号を用いても観測結果の2分の1を使えることになり、8月の観測に比べて結果のばらつきが少なくなった。周波数変調方式の信号を用いた観測結果に60分の移動平均を施した結果を図27に示す。

3.1.4. プイ方式を用いた GPS / 音響測距結合方式による海底地殻変動観測の精度向上のための技術開発

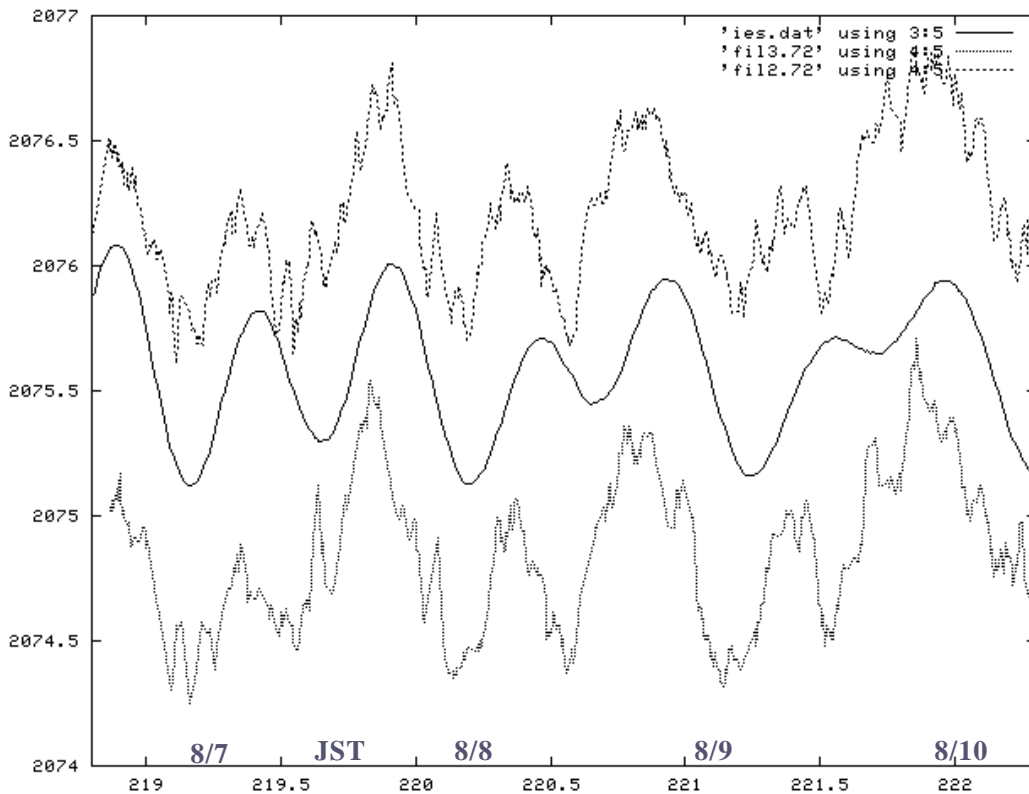


図 26 上と下のギザギザしたグラフは IES による観測の例
中央のなまらかなグラフは、同時に測定した圧力値から求めた水深変動をしめす。

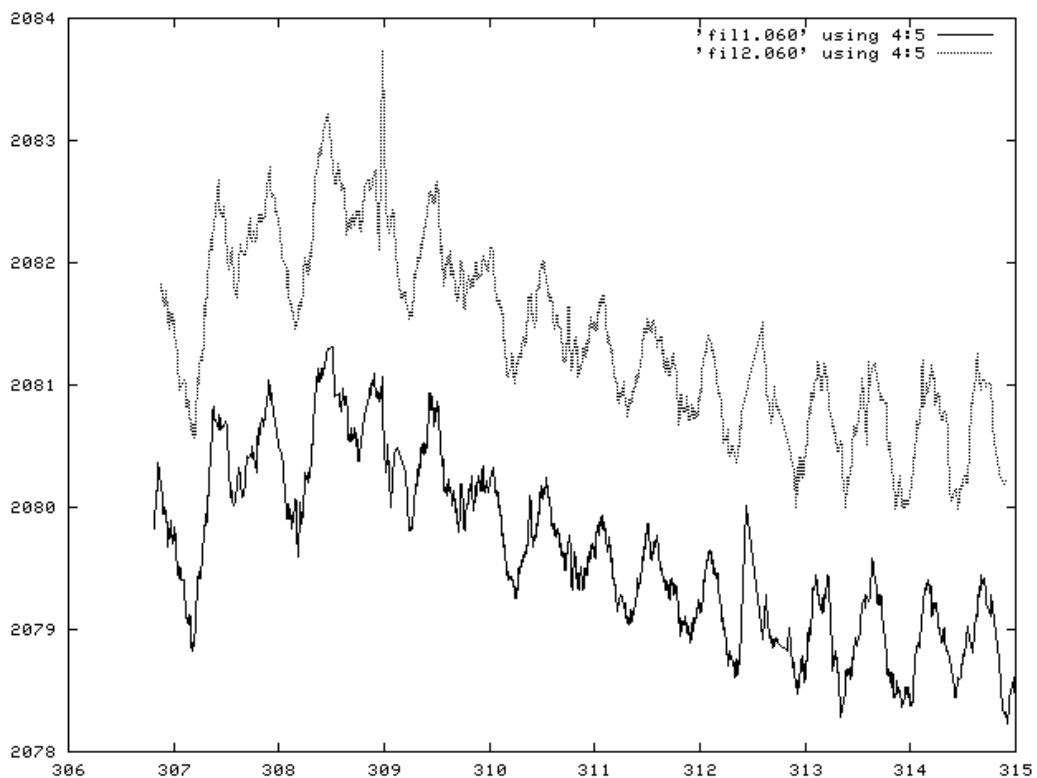


図 27 11月の観測で得られた IES による観測の例

3) 地殻変動観測用海底局等の開発

熊野灘中央部の観測サイトは、水深が約 2080m、陸から約 60km であるが、日本海溝域で予定している観測サイトは、水深も深く、陸からもはるかに遠い。水深が深くなると音響信号が減衰する。平成 17 年度には宮城県沖の水深 3300m 海域において地殻変動観測を開始する予定なので、水深 4000m 海域用の海底局 3 台を導入した。

陸上の GPS 基準局の観測データを用いた GPS 測位についても、陸から 100km 以上の海域において必要な測位精度を得る必要がある。そこで 8 月に三陸沖において 12 日間の備船航海を行い、表 2 に示す SNR と AOB いう二つの陸上基準点を用いた海上試験観測を行った。図 28 は結果の一例であり、宮城県沖の陸から約 130km 離れた点における測位結果である。下の図は SNR あるいは AOB を陸上基準点としたときの、KGPS 測位の高度にジオイド高と海洋潮汐の補正を行って求めた GPS アンテナの海面からの高さであり、上の図はそのときの GPS 衛星の個数を示す。SNR を基準とすると AOB を基準とする場合に比べて安定した結果が得られている。この原因として基線長が SNR は約 130km に対し、AOB は約 210km と離れていることや、解析のログによれば AOB が SNR に比べ観測データが悪いということが解析に影響を与え、最終解まで得られなかったためだと考えられる。また SNR の解析結果に注目すると、ところどころにスパイクが見られるが、GPS 衛星の個数が少なくなるときの影響があると考えられる。

東北沖では、AOB から約 350km 離れた日本海溝海側の海域において、2m 四方の比較的大きなブイに GPS アンテナ 3 台取り付け、AOB と SNR を基準として、同じ解析ソフトを用いて KGPS 測位を行ったことがあり、そのときは、双方の水平位置は 3cm 程度で一致したという過去の実績がある（例えば、長田、2005）。今回、なぜ 210 km の基線長で測位ができなかったのか、原因を究明する必要がある。11 月の熊野灘航海後、KGPS 解析用の PC が壊れ、それまで使用していたソフトをそのまま使うことができなくなった。新たに立ち上げた解析ソフトについて、パラメーター設定等にまだ問題がある可能性がある。また参考のために、8 月に行われた熊野灘中央部における同様な結果の一例を図 29 に示す。図 28 の結果も同様であるが、陸上局に比べて海上局において受信している衛星数が少ない。ブイを 1.5m 四方に小型化したので動揺が大きくなったことが影響している可能性もある。これらの問題を早急に検討する必要がある。

その他、海底地殻変動観測用のデータ処理手法については、上述のように、Kido et al. (2004) の手法を用いた測位解析などの改良を進め、繰り返し測位精度の向上を果たした。また音速構造の時間変化を観測する IES の観測においても、4 種類の音響信号を用いた 8 月の観測により、どのような音響信号が適切であるかということ分かり、11 月の観測ではより安定した計測結果を得た。

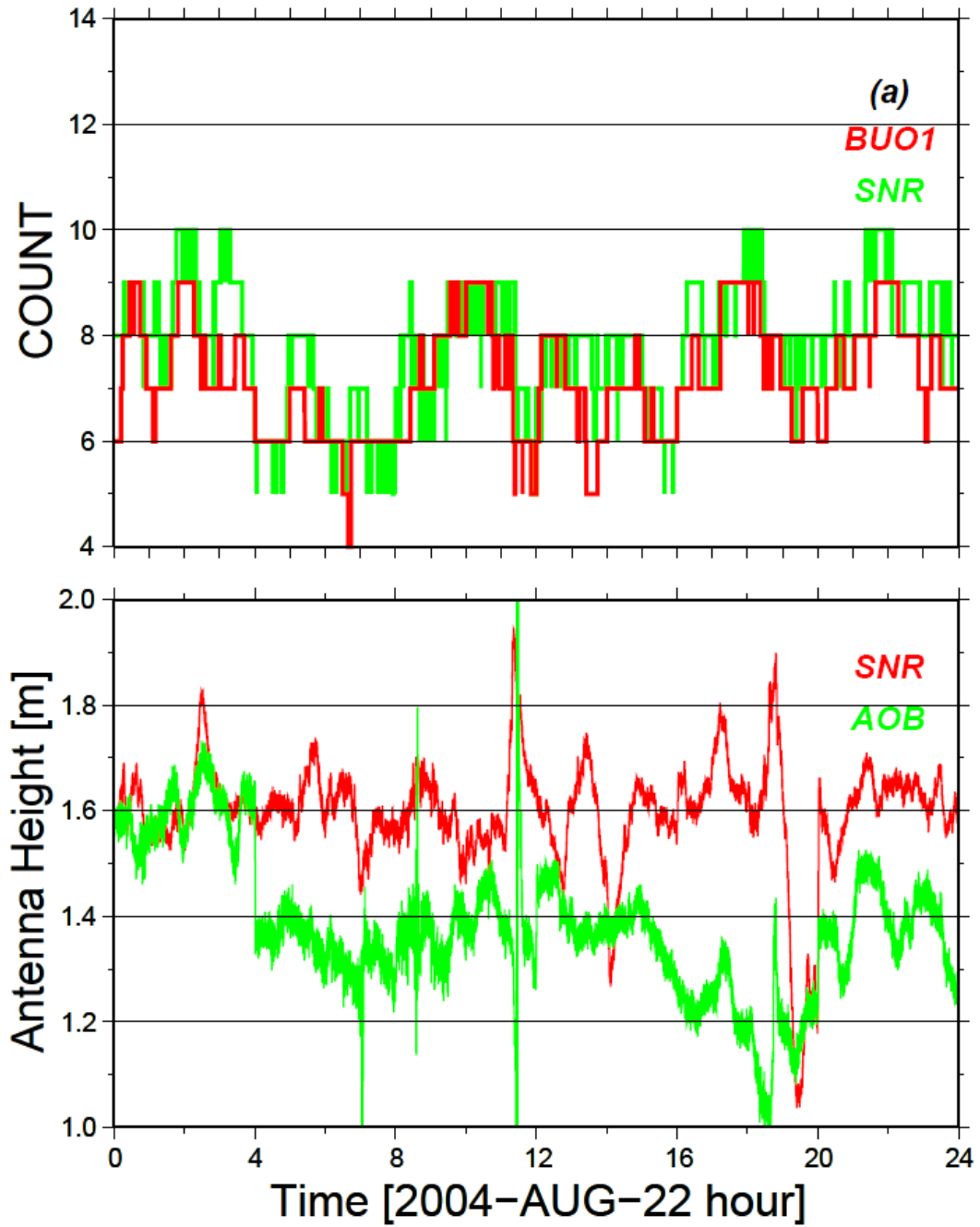


図 28 GPS アンテナの海面からの高さ
 上の図は、SNR を基準としたときの GPS 衛星の受信数。

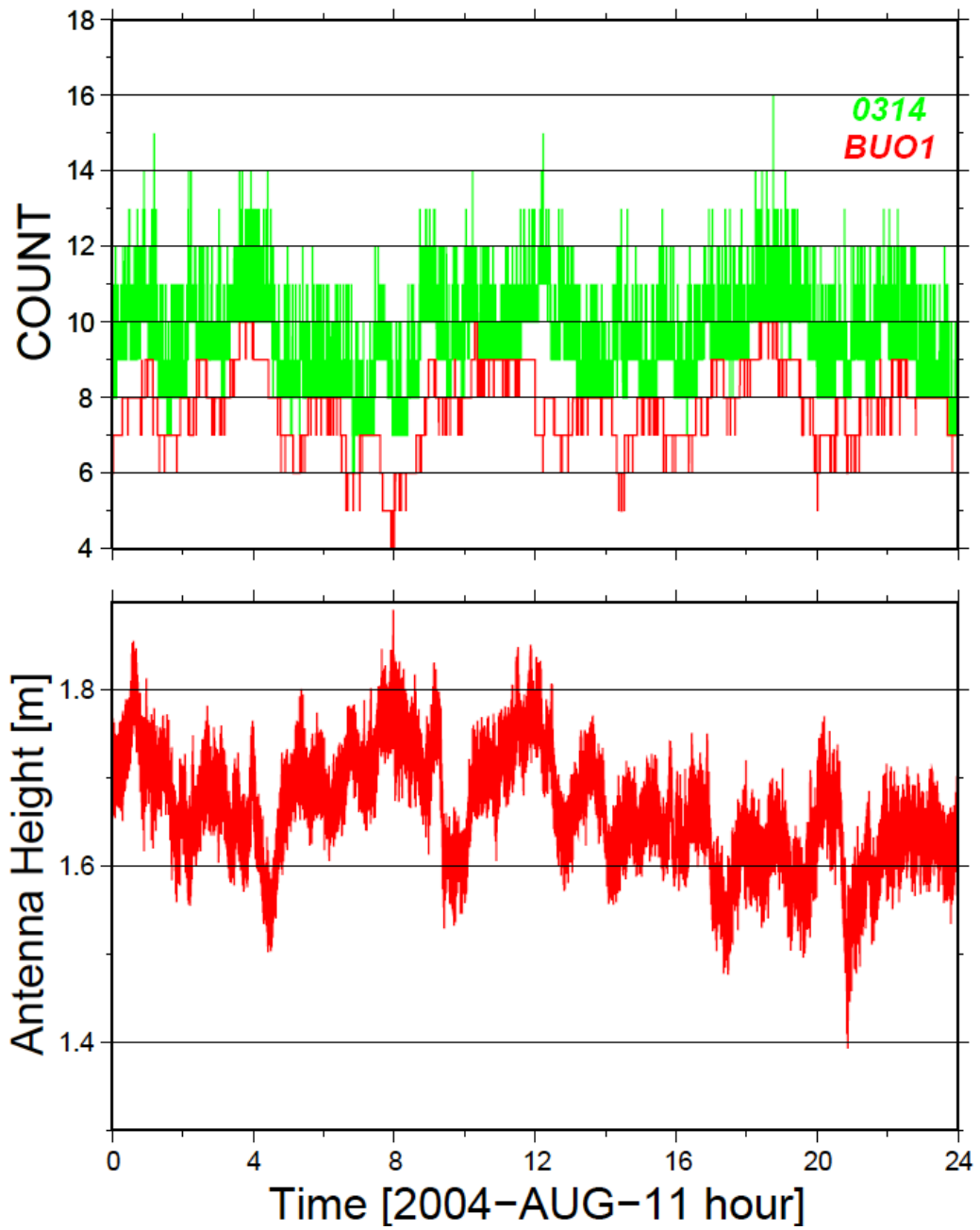


図 29 下の図は GPS アンテナの海面からの高さ
上の図は、多点（国土地理院の 4 点）を基準としたときの GPS 衛星の受信数とブイにおける GPS 衛星の受信数。

(d) 結論ならびに今後の課題

平成 16 年度は、熊野灘中央部において本格的な観測を開始し、三陸沖日本海溝周辺における観測の準備を進めた。熊野灘では 8 月および 11 月に備船航海を行い、海底局アレイの中心付近において海底精密測位観測と海洋物理観測を行い、9 月上旬に発生した紀伊半島沖地震に伴うと解釈される南向き 30cm 弱の海底地殻変動を検出した。近接する 2 点の観測結果に有意な差が出ており、その原因を調べる必要がある。日本海溝・千島海溝沿いで発生する海溝型地震を対象とした海底地殻変動観測を実現するため、日本海溝を横断する測線に沿った海底地殻変動観測を計画しており、平成 17 年度から開始する日本海溝周辺における観測に備えて、海底局を 3 台導入するとともに、観測予定海域における KGPS 測位の試験観測を行った。小型のブイを用いた GPS 測位についても、検討すべき問題が残っている。

(e) 引用文献

- 1) 長田幸仁 (2005)、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、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士論文。
- 2) Kido, M., A. Sweeney, Y. Osada, H. Fujimoto and S. Miura, A Synthetic Test of Precision in GPS/Acoustic Measurements of Seafloor Positioning, AGU, 85 (47), Fall Meet. Suppl., Abstract G21A-0141, 2004.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Fujimoto, H., A. Sweeney, S. Miura, M. Kido, and Y. Osada	An Experiment on GPS/A Seafloor Positioning in the Central Part of Kumano-nada, Central Japan	AGU Fall Meeting, G21A-0139	2004 年 12 月 14 日
Kido, M., A. D. Sweeney, Y. Osada, H. Fujimoto and S. Miura	A synthetic test of precision in GPS/Acoustic measurements of seafloor positioning	AGU Fall Meeting, G21A-0141	2004 年 12 月 14 日
藤本博巳・木戸元之・長田幸仁・川上太一・野口正廣・日野亮太	IES の開発と熊野灘における試験観測	海洋調査技術学会	2004 年 11 月 18 日

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

無し。

(3) 平成 17 年度業務計画案

(a) 業務計画

平成 17 年度は、15 年度に開発し熊野灘中央部に設置した GPS / 音響測距結合方式の海底地殻変動観測用海底局と海上ブイに搭載した海上局を用いて、三角形および正方形の海底局アレイの中心点付近において十分時間をかけた海底地殻変動観測を行い、測位精度の向上に取り組む。また、日本海溝・千島海溝周辺で発生する海溝型地震を対象とした観測の充実を図るために、昨年度開発した深海用海底地殻変動観測の海底局 3 台を三陸沖の水深 3000m 以上の海底に設置し、水深も陸からの距離も大きい外洋という環境において海底地殻変動観測を開始する。いずれの観測においても、観測期間中に、XCTD 等による海洋物理観測を行うとともに、倒立音響測深機と海底圧力計を用いた海洋変動の連続観測を行い、海底測位に対する音速構造の変化の影響をより精密に補正する。異なる基線長における KGPS 測位データを名古屋大学と共同解析し、KGPS 測位解析ソフトの特性を明らかにするとともに、共通の動揺観測装置を用いてブイや船の動揺の影響をより精密に補正する研究を行う。さらに、日本海溝の海側でも GPS / 音響測距結合方式の海底地殻変動観測を来年度に開始するために、6000m 水深用の音響測距装置と、最新型の GPS 受信機を導入する。

(b) 実施計画

1) 熊野灘および三陸沖における海底地殻変動観測及び評価

熊野灘においては、既設の海底局アレイの中心付近において GPS 音響測距結合方式の海底地殻変動観測を引き続き実施し、データを蓄積するとともに測位の精度向上評価を行う。三陸沖においては、水深 3000m 以上の海底に海底局を設置し、海底地殻変動観測を開始し、外洋域における観測の問題点とその対策を明らかにする。

2) 海中音速構造の解析及び評価

熊野灘では、海底地殻変動観測の実施にあわせて、水温や塩分濃度などの海洋物理観測を行うとともに、倒立音響測深機を用いた海洋の物理的変動の観測を行い、その変動が海底地殻変動観測に与える影響を評価する。

3) 陸から遠い深海底における海底地殻変動観測システムの開発

6000m 水深用の音響測距システムを開発するとともに、基線長 300km のキネマティック GPS 測位の精度向上を目指し、新型の GPS 受信機を導入して測位観測を行う。さらに、複数のキネマティック GPS 解析ソフトの比較や、共通の動揺観測装置を用いた観測など、共同研究を進める。

4) 海底地殻変動観測システムの開発に関する中間とりまとめ

海底地殻変動観測システムについては、名古屋大学と東北大学で技術協力をしつつ、異なる手法を用いて開発を行っている。開発の着手から 3 年目にあたり、技術的な情報交換の場である海底地殻変動WG（事務局：東京大学地震研究所）において、中間的なとりまとめを行う。

(c) 目標とする成果

- 1) 熊野灘中央部における GPS 音響測距結合方式の海底地殻変動観測を継続し、前年度の 2 回の観測と合わせて、観測サイトにおける水平方向の海底地殻変動を明らかにするとともに、繰り返し観測精度の評価を行なう。

- 2) 宮城県沖の水深約 3300m、陸から 170km の観測サイトにおいて同じ方式の海底地殻変動観測を開始し、計測誤差を見積もるとともに、水深の増加と陸からの距離の増加に伴う問題点を明らかにし、解決策を探る。