

3.1.3. 音速構造トモグラフィ手法を用いた 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

「音速構造トモグラフィ手法を用いた 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
国立大学法人名古屋大学大学院・ 環境学研究科	教授	安藤雅孝	ando@seis.nagoya-u.ac.jp
国立大学法人名古屋大学大学院・ 環境学研究科	助手	田所敬一	tad@seis.nagoya-u.ac.jp
国立大学法人名古屋大学大学院・ 環境学研究科	助教授	山内常生	yamauchi@seis.nagoya-u.ac .jp
独立行政法人宇宙航空研究開発機 構航空宇宙技術研究所	研究員	辻井利昭	tsujii@nal.go.jp

(c) 業務の目的

想定震源域及びその境界領域における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・南海地震の想定震源域は、その大部分が海域であるため、海底における観測は必須である。

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海底地殻変動観測のための観測システムの安定性の向上と2~3cmのくり返し観測精度の実現を目指して、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。これまでの観測から浮かび上がってきた問題の一つとして、観測中の海中での音速構造の詳細な変動を捉えることが難しいという点がある。本事業では、主として音速構造トモグラフィにより、海洋音速構造と海底位置を同時に決定する手法を採用し、精度および信頼性に優れた観測システムの構築を目指す。なお、平成15年度からの3年間は、音速構造トモグラフィにより音速構造と海底の位置を同時に決定する手法など複数の手法を用いて試験観測を行い、平成18年度からの2年間は、それまでの成果を踏まえ、適切なシステムの構築を行う。

また、本事業は、東北大学大学院理学研究科が担当する海底地殻変動観測の精度向上のための技術開発と協力して実施する。

(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・海上局等とデータ解析手法の開発を行う。熊野海盆に海底局を設置し、音速構造トモグラフィ手法を用いた 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。また、キネマティック GPS の解析ソフトの開発も始める。

2) 研究計画 2 年目

海底地殻変動観測用の海底局・海上局等とデータ解析手法の開発を引き続き行う。熊野海盆での観測点を新たに設置すると共に、15 年度設置点での観測を引き続き行う。また、キネマティック GPS の解析ソフトの開発を継続する。

3) 研究計画 3 年目

海底地殻変動観測用の海底局・海上局等とデータ解析手法の開発を引き続き行う。また、熊野海盆に新たに海底局等を設置し、観測を行うとともに、平成 15 年度に設置した観測点での観測を継続し、中間的な精度評価を実施する。キネマティック GPS の解析ソフトを完成させる。

4) 研究計画 4 年目

海底地殻変動観測用の海底局・海上局等とデータ解析手法の改良を行う。南海トラフ付近に海底局を設置し観測を行うとともに、前年度までに設置した観測点での観測を継続する。開発したキネマティック GPS の解析ソフトを観測に使用する。

5) 研究計画 5 年目

海底地殻変動観測用の海底局・海上局等とデータ解析手法の改良を引き続き行う。南海トラフ付近に新たに海底局を設置・観測するとともに、前年度までに設置した観測点での観測を継続する。5 年間の観測結果をまとめて、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

GPS / 音響測距結合方式による海底地殻変動観測システムのくり返し観測精度を 2~3cm に向上させるためには、海中音速構造の時空間変化と長基線でのキネマティック GPS 測位精度の低下に対する解決策を確立することが不可欠である。

前者については、海中音速構造の不均質性の特徴を把握し、その不均質性が海底局位置決定精度に与える影響を見積もる。また、音速値の補正方法も確立する。後者については、既存のキネマティック解析ソフトウェアの有効性を陸上実験から明らかにする。また、キネマティック解析ソフトウェアの新規開発も行う。

さらに、年間 3 回程度のくり返し観測を実施し、短期・中期的なくり返し観測精度を評価する。

(2) 平成 16 年度の成果

(a) 業務の要約

船上局の高度化を行い、最短送信間隔 8 秒の船上局を新規に開発した。熊野灘の 1 カ所に 3 台の海底局を設置した。GPS / 音響測距結合方式による海底地殻変動観測を 3 回実施し、海底ベンチマーク位置のくり返し観測精度が 3~7cm であることを確認した。さらに、2004 年 9 月 5 日に発生した紀伊半島南東沖地震による水平変動を観測した。昨年度実施した CTD 同時測定データを解析し、黒潮本流域と反流域では海中音速構造の不均質性の特徴が異なることが明らかになった。また、数値シミュレーションを行い、海中音速構造の不均質性に起因する海底局位置決定のバイアス誤差を見積もった。海底局位置決定方法の改善を行い、CTD 測定で得られた音速値に補正(最大で約 0.1%)を加える方法を確立した。スライダーを用いた陸上での GPS 実験により、RTD は基線長が 60km を超えるキネマティック解析には適さないことが判明した。そのため、新たなキネマティック解析用のソフトウェアを導入した。

(b) 業務の実施方法

本年度の業務項目は、下記の 6 項目とした。

- 1) 船上局の高度化
- 2) 熊野灘における海底局網の構築
- 3) 熊野灘における海底局のくり返し測定
- 4) 音速構造トモグラフィ手法を用いた海中音速構造の不均質性の評価と補正法確立
- 5) キネマティック GPS 測位精度評価実験
- 6) キネマティック GPS ソフトウェアの開発

各項目の実施方法は以下の通りである。詳しくは次節「(c)業務の成果」で述べる。また、各項目の実施期間を下の表にまとめた。

- 1) では音響測距の間隔を短縮した船上局を新たに開発する。購入した海底局 1 台を用いて、開発した船上局の動作・性能試験を岸壁および実海域で実施する。開発・試験を通年行う。
- 2) では調査船を用いて購入した海底局 3 台を熊野灘 1 カ所に設置する。設置作業は 1 日であるが、準備や設置後の動作チェックは通年行う。
- 3) では調査船を用いて熊野灘に設置した海底局の観測を実施する。観測は合計 10 日間程度実施するが、準備や解析等は通年行う。観測の際には、船上局や海底局、GPS 受信機等を用いる。
- 4) では平成 15 年度に実施した CTD 同時測定データを詳細に検討し、海底局位置決定精度の向上に役立てる。解析はコンピュータを主に用いて行う。

5) は陸上の異なる基線長において同時観測実験を行うことにより、移動体の位置決定精度向上を目指すものである。このための準備を含め通年実施する。実験観測にあたっては、GPS 受信機やデータ解析用キネマティック解析用ソフトを用いる。

6) はキネマティック GPS 解析ソフト開発を目指すものであり、かつ既存のソフトウェアの比較検討を行うものである。解析はコンピュータを主に用いて行う。

業 務 項 目	実 施 期 間 (平成 16 年 4 月 1 日 ~ 平成 17 年 3 月 31 日)											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
	月	月	月	月	月	月	月	月	月	月	月	月
船上局の高度化	←											→
熊野灘における海底局網の構築	←											→
熊野灘における海底局のくり返し測定	←											→
音速構造トモグラフィ手法を用いた海中音速構造の不均質性の評価と補正法確立	←											→
キネマティック GPS 測位精度評価実験	←											→
キネマティック GPS ソフトウェアの開発	←											→

(c) 業務の成果

1) 船上局の高度化

測距誤差がランダム誤差の場合、誤差はデータ数の平方根に逆比例するため、精度向上のためには音響測距の回数を増やす必要がある。一方、シップタイムは限られているため、測定時間を長く取ることは不可能である。また、海中音速構造の時間変化による海底局位置決定精度の低下を避けるには、やはり測定時間は短い方が望ましい。したがって、音響測距の回数を増やすためには、測距信号の送信間隔を短くする必要がある。

平成 15 年度は測距信号の送信間隔が 10 秒であったが、本年度はさらなる高度化を行なって、最短 8 秒間隔で測距信号を送信できる船上局を新規に開発した（写真 1）。実施した高度化の内容は下記のとおりである。なお、購入した海底局 1 台を用いて、開発した船上局の動作・性能試験を岸壁および実海域で実施した。

・ CPU の複数化

船上局 CPU の主なタスクは、測距信号の送受信（制御）、演算処理、モニタへの受信

波形の表示、メディア（CF カード）への受信波形データ記録である。このうち、波形表示と波形データ記録を行う際に CPU に負荷がかかっており、測距信号の送信間隔短縮への弊害となっていた。そこで、これらのタスクを行う CPU を別に設けて処理時間を短縮することで、送信間隔の短縮が実現した。

今後、80 倍速書き込みの CF カードへの対応など、さらなる処理時間短縮の手段を模索する必要がある。

・通信インターフェースの USB への変更

船上局本体からモニタ（PC）への波形出力を行う際の通信インターフェースを RS232C から USB に変更した。これにより、230400bps での通信が可能となった。また、測距信号送信などの制御コマンドをホスト PC から船上局へ送信する際も USB を使用することにした。



写真 1 新規船上局本体の外観

2) 熊野灘における海底局網の構築

2005 年 11 月 8 日に、三重県科学技術振興センターの調査船「あさま」(写真 2) によって熊野灘の KMC サイト(図 1)に 3 台の海底局を設置した(表 1)。平成 15 年度同様、各海底局は、5 年間の測定が可能な容量のバッテリーを装備して、13 インチガラス球に封入した。

キネマティック GPS の基準局は、浜島(三重県科学技術振興センター)、尾鷲(尾鷲市立向井小学校)、下里(海上保安庁下里水路観測所)に設置した(写真 3)。GPS 受信機は Thales Navigation 社の iCGRS を使用し、マルチパスを防ぐためにチョークリングアンテナを使用した。GPS 受信機の内部時計は GPS 衛星の原子時計よりも精度が数桁悪い。そのため、キネマティック GPS 測位の結果にバイアスが生じることが実験により確かめられている¹⁾。この測位精度低下を防ぐために、GPS 受信機に原子時計(ルビジウム発振器)を装着した。以上の GPS に関する仕様は、観測船上においても同じである。観測船上では Ashtech 社の Z-Surveyor (受信機)も使用した。

さらに、国土地理院との共同研究として、GEONET の観測点のうち志摩、紀伊長島、紀伊勝浦の 3 点(図 1 参照)を 1 秒サンプリングで収録し、基準局として使用した。

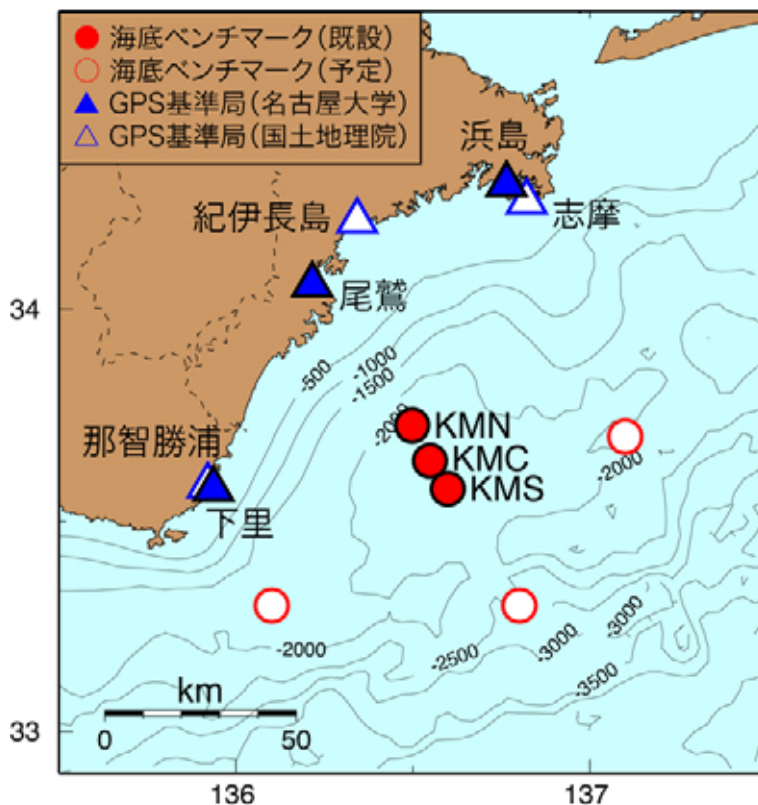


図1 熊野灘における海底ベンチマーク設置地点とキネマティック GPS の基準局
今年度は KMC に設置した。KMN および KMS は、平成 15 年度に設置済みである。

表 1 熊野灘海底局投入位置 (WGS84)

コード	海底局番号	緯度	経度	概略水深 (m)
KMC	21	33 ° 39.08 N	136 ° 33.87 E	2080
	22	33 ° 38.26 N	136 ° 32.85 E	2080
	23	33 ° 37.67 N	136 ° 33.30 E	2080



写真 2 観測に使用した三重県科学技術振興センターの調査船「あさま」



写真3 キネマティック GPS 基準局（尾鷲）の設置状況

3) 熊野灘における海底局のくり返し測定

今年度は KMS サイト（図 1 参照）において、くり返し測定を 3 回行なった。3 回の測定とも三重県科学技術振興センターの調査船「あさま」により実施した。実施日は下記のとおりである：

- 第 1 回 2004 年 7 月 15～16 日および 21 日
（12～14 日および 22 日には KMN サイトでの測定を行なっている）
- 第 2 回 2004 年 11 月 9～10 日
- 第 3 回 2005 年 1 月 19 日

「あさま」はスクリューが小さいため、航走時のノイズが非常に小さく、航走しながらでも S/N 比の高い音響測距信号が収録できる（図 2）。したがって、計画した測線上での音響測距が可能である。本年度に実施した 3 回の測定とも、海底局を偏りなく囲むような測線を設定して、船を 2～3 ノットで航走させながら音響測距を行なった（図 3）。

キネマティック GPS 解析は以下の手順で行なった。まず、キネマティック解析の基準局である尾鷲の座標値を ITRF2000 準拠でスタティック解析により決定した。ソフトウェアは Bernese 5.0 を使用し、IGS (International GPS service) 観測点の臼田 (USUD)、つくば (TSKB)、武漢 (WUHN)、グアム (GUAM) を固定して解析を行なった。衛星軌道情報は IGS の最終精密暦を使用し、仰角マスクは 10 度とした。対流圏遅延は 2 時間ごとに推定した。海洋潮汐加重補正は行なっていない。次に、Waypoint 社のソフトウェア GrafNav を用いて、1 エポック (1 秒) ごとの観測船の座標をキネマティック解析により決定した。この時も IGS 最終精密暦を使用した。

音響測距データについては、収録した測距信号波形と理論送信波形との相互相関処理を行い、測距信号の往復走時 (船上局 海底局 船上局) を求めた。海底局位置決定には相互相関係数が 0.60 以上のデータのみを用いた。海中音速構造は、Sea Bird 社の CTD プロファイラ SBE-911plus を用いて測定した各深度でのデータを DelGrosso の式²⁾で変

換し、さらに補正係数を掛けた値を使用した。音速の補正法に関しては、次の項目 4) で詳述する。解析に使用した音響測距データの個数とCTD測定回数を表 2 に示す。

上記のキネマティック GPS 測位、音響測距、海中音速構造のデータに、サテライトコンパスで測定した船の動揺のデータを加えて海底ベンチマークの位置を決定した。海底ベンチマークの位置は、各サイトにおいて海底局が作る多角形の重心位置として定義する。短期的および中期的な海底ベンチマークのくり返し観測精度を評価するため、7月および11月については、それぞれふたつの期間（IおよびIIとする）に分割した場合と分割しない場合との両方で解析を行なった。図 4、図 5、表 3 に海底ベンチマークの位置決定結果を示す。表 3 には WGS84 系における緯度・経度を局地直交座標系（原点は 2004 年 7 月の座標）での座標値に変換した値も記載した。

各測定時の位置決定誤差は、図 4 および図 5 にエラーバーで示したように約 5cm である。海底ベンチマーク位置決定の際には、後述のように音速構造の補正を行なっている。これは、音速構造の時空間変化をモデル化していることにほかならない。しかし、音速構造の時空間変化が大きくなるにつれて補正が困難になり、海底ベンチマーク位置決定の誤差も大きくなる。そこで、音速補正の結果得られた時空間変化の範囲内で音速構造を変化させて擬似走時データを作成し、これを用いて海底ベンチマーク位置を決定して、どの程度ばらついて決まるかを検討した。この時の海底ベンチマーク位置のばらつきを位置推定の誤差としてエラーバーで示している。

7月の期間 I と期間 II、11月の期間 I と期間 II、11月全期間と1月の解析結果をそれぞれ比較すると、くり返し観測精度は 3~7cm であると評価できる。特に7月の測定時には、短期的ではあるが、3cm のくり返し観測精度が達成できた。

熊野灘に設置した海底局網の近傍で 2004 年 9 月 5 日に紀伊半島南東沖地震が発生した。19 時 07 分 (JST) に発生した前震は M6.9、23 時 57 分 (JST) に発生した本震は M7.4 であった。KMS サイトでは、紀伊半島南東沖地震の前に 1 回 (2004 年 7 月)、後に 2 回 (2004 年 11 月および 2005 年 1 月) の測定を実施しており、地震時の水平変動を捉えることができた。図 4、図 5、表 3 において、2004 年 7 月と 11 月の間にくり返し観測精度を有意に超える座標値の差がみられる。これが紀伊半島南東沖地震による水平変動である。表 3 には、国土地理院の電子基準点のひとつである岩崎 (電子基準点番号 950154) を固定した場合の変位も記載した。岩崎固定の変位を計算するために、国土地理院の位相データを使用して、前述の尾鷲の場合と同様の方法で岩崎の ITRF2000 系における座標値を決定した。決定した期間は海底局測定日を含む 5 日間である。決定された座標値から求められる岩崎の変動を加えることによって、岩崎固定の変位を算出した。

2004 年 11 月と 2005 年 1 月の座標値の差は誤差の範囲内であって、有意な変動を捉えているわけではない。したがって、2004 年 7 月の座標を始点とし、11 月と 1 月の平均座標を終点とするベクトルを地震時の変動ベクトルと定義する。そうすると、KMS サイトで観測された紀伊半島南東沖地震時の水平変動 (岩崎固定) は南南東方向へ約 21cm となる (図 6)。国土地理院の電子基準点で観測された紀伊半島南東沖地震時の水平変動 (岩崎固定) は、最大でも志摩 (95031) の約 6cm であった。KMS サイトで 21cm もの水平変動が観測されたことは、海域で発生する地震に対して GPS / 音響測距結合方式による海底地殻変動観測が極めて有効性であることを示している。

国土地理院³⁾や東京大学地震研究所⁴⁾から紀伊半島南東沖地震の断層モデルが報告されている。地殻変動の観点から言うと、どちらのモデルでも陸上でのGPS観測結果はよく説明できるが、KMSサイトで観測された水平変動の方向や大きさを説明することはできない。そこで、KMSサイトでの観測結果を説明できる新たな断層モデルを求めた。断層の走向、傾斜、すべり角は、防災科学技術研究所によるF-netのメカニズム解⁵⁾を参考にした。メカニズム解のふたつの節面のうち、前震は南傾斜の方を、本震は南西傾斜の方を断層面とした。断層面の大きさ(長さ、幅)と位置は気象庁の一元化震源による震央分布を参考にして決定した。すべり量はF-netのメカニズム解から得られた地震モーメントの大きさに合うように決定した。得られた断層モデル(暫定版)を図7と表4に示す。理論的な変位分布の計算にはCoulomb 2.6⁶⁾を使用した。海域で発生する地震の断層モデルを決定するには、陸域での観測に加えて海域での地殻変動観測が不可欠である。

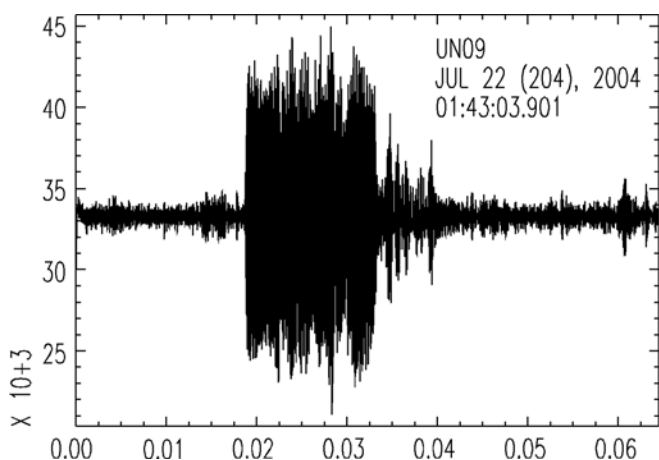


図2 約3ノットで航走中に取得した測距信号波形 2004年7月22日に「あさま」にて収録。

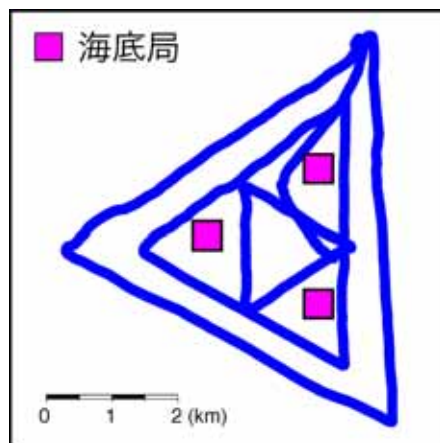


図3 2005年1月観測時の航跡(青線)

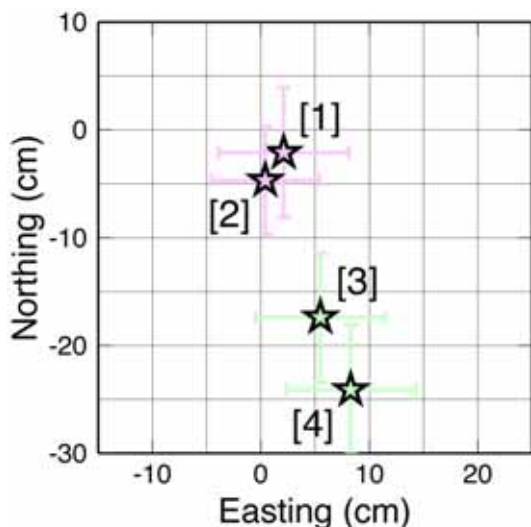


図4 くり返し観測結果(その1)
7月および11月のデータをそれぞれ分割して解析した場合。 [1] 7月期間 I、 [2] 7月期間 II、 [3] 11月期間 I、 [4] 11月期間 II。

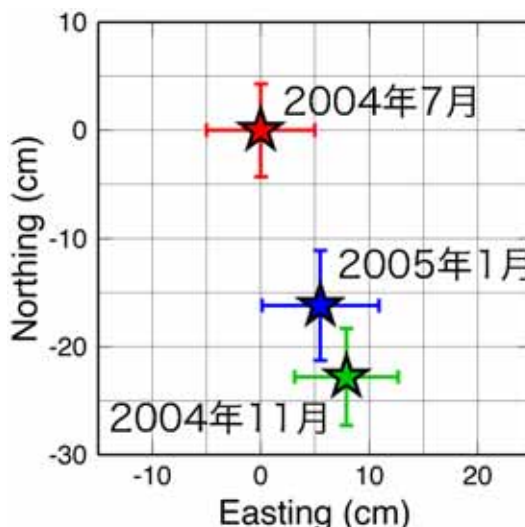


図5 くり返し観測結果(その2)
7月および11月のデータを分割しない場合。

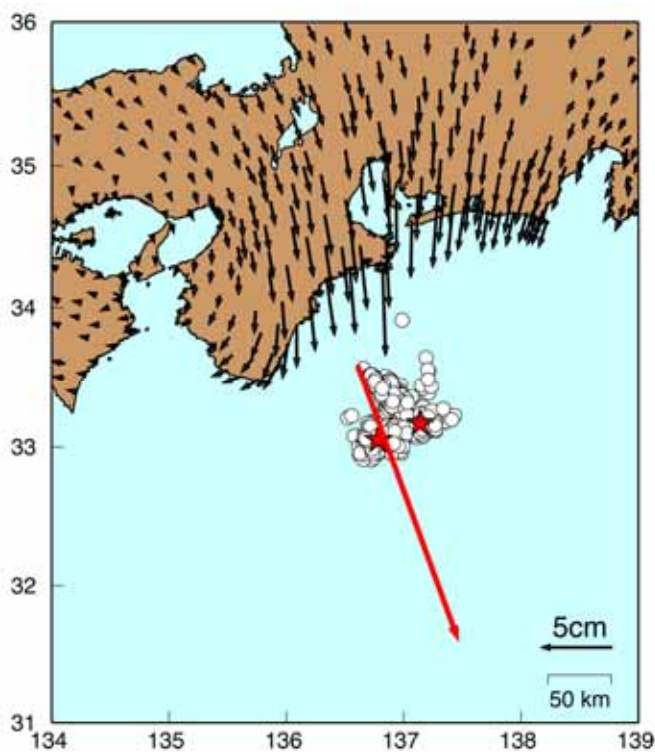


図 6 紀伊半島南東沖地震による岩崎に対する水平変動と余震分布（白丸印）

赤矢印が KMS サイトにおける水平変動ベクトル。陸上の変動ベクトルは、国土地理院による電子基準点の「日々の座標値(F2 解)」を用いて計算した(基準期間：2004 年 8 月 28 日～9 月 4 日、比較期間：9 月 6 日～9 月 13 日)。余震分布のプロットには気象庁一元化震源カタログを使用した。期間は 2004 年 9 月 5 日 19 時 07 分～9 月 7 日 19 時 06 分。星印は前震および本震の震央(気象庁による)。

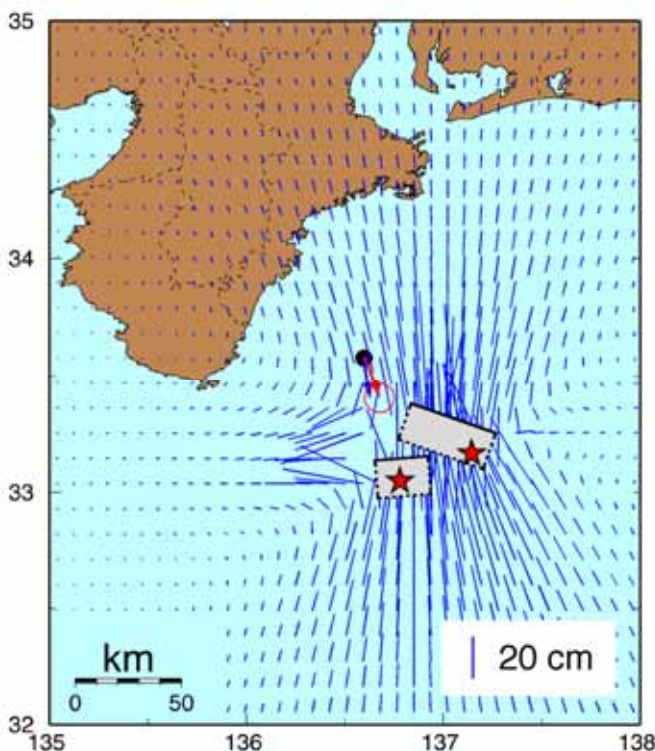


図 7 KMS サイトで観測された水平変動を説明できる紀伊半島南東沖地震（前震、本震）の断層モデル

赤矢印は KMS での変動ベクトル（岩崎固定）。赤丸は誤差楕円。青線は、灰色の矩形領域で示される断層面上のすべりによる理論的な水平変動。星印は前震および本震の震央(気象庁による)。

表 2 音響測距データの個数および CTD 測定回数

期 間		日 付	測距データ数	CTD 測定回数
2004 年 7 月	期間 I	15 ~ 16 日	2205	3
	期間 II	21 日	2184	2
	全期間	15 ~ 16 , 21 日	4417	5
2004 年 11 月	期間 I	9 日	2478	1
	期間 II	10 日	2004	1
	全期間	9 ~ 10 日	4613	2
2005 年 1 月	-	19 日	2436	1

表 3 海底ベンチマークの位置決定結果

期 間	緯度 (° N)	経度 (° E)	04 年 7 月からの差 (cm) (北, 東)	岩崎固定変位 (cm) (北, 東)
2004 年 7 月	33.5770456	136.611990 9	(00.0, 00.0)	(00.0, 00.0)
2004 年 11 月	33.5770435	136.611991 8	(-22.8, 07.9)	(-22.8, 08.2)
2005 年 1 月	33.5770441	136.611991 5	(-16.2, 05.5)	(-16.3, 06.1)

表 4 紀伊半島南東沖地震の断層モデル

	長さ (km)	幅 (km)	走向 (°)	傾斜 (°)	すべり角 (°)	すべり量 (m)	地震モーメント (Nm)	Mw
前震	25	23	85	40	90	4.1	7.5×10^{19}	7.2
本震	42	23	110	40	130	5.5	1.7×10^{20}	7.5

4) 音速構造トモグラフィ手法を用いた海中音速構造の不均質性の評価と補正法確立

音響測距で得られるデータは、船上局 - 海底局間を往復する超音波の走時である。この走時データを距離に換算するには、海中の音速構造を厳密に知る必要がある。ところが、海中音速構造は時空間的に変化するため、その変化量によっては海底局位置決定精度に大きな影響を及ぼす可能性がある。また、測定海域である熊野灘は、通常時は黒潮の流路となっているため、黒潮が作り出す海中音速構造の不均質性の影響を見積もる必要がある。

平成 15 年度に、黒潮本流域と反流域において 2 隻の船を用いて数力所で CTD 同時測定を行い、海中音速構造の空間変化 (不均質性) を実測した⁷⁾。図 8 は実測した音速の平均値からのずれを図示したもので、平均値からのずれが大きい部分ほど濃い色で示されている。黒潮反流域では、赤と青が短い周期で繰り返しており、比較的短波長の不均質

が卓越していることが分かる。一方、黒潮本流域では、赤のピークと青のピークの間隔が長く、長波長の不均質が卓越している。また、黒潮本流域であっても、潮流平行方向の方が直交方向よりも不均質性が小さい(潮流平行方向の方が直交方向に比べて色が薄い)。

このような海中音速構造の不均質性が 1 回の観測時のバイアス誤差に与える影響を見積もるために、数値シミュレーションを行なった⁷⁾。まず、CTD同時測定で実測した不均質性を含む海中音速構造を用いて、仮想海底局位置から海面(船上局)までの疑似走時データセットを作成する。次に、音速値を平均音速とした半無限均質構造モデルにおいて、疑似走時データセットを最もよく説明する海底局位置をグリッドサーチで求めた。本シミュレーションで評価するバイアス誤差は、半無限均質構造で決定された海底局位置と最初に設定した仮想海底局位置との差である。シミュレーションの結果を図 9 に示す。黒潮反流域では短波長の不均質が卓越しているため、不均質性の影響がうまくキャンセルされて、バイアス誤差は比較的小さい。一方、黒潮本流域では長波長の不均質が卓越しているため、測線が約 2 マイル(約 3.7km)以上と長い場合は、バイアス誤差が著しく増大する。ただし、黒潮本流域でも測線が潮流に平行な場合は、そもそも海中音速の不均質性が小さいため、バイアス誤差は極端に小さい。2005 年は黒潮が紀伊半島付近で大きく離岸しており、測定海域は黒潮反流域に入っている(図 10)。したがって、海中音速構造の不均質性の影響は小さいと考えられる。

CTD測定から得られる生の音速構造をそのまま使用して海底局位置決定を行なった場合、図 11aのように系統的な走時残差が残ってしまう。したがって、生の音速構造を補正して海底局位置決定に使用する必要がある。補正の方法としては、各深度において生の音速値に補正係数を掛けるという方法を採用した。時空間変化も考慮して、1 回の測定で得た全測距データセットを AIC¹が最小になるデータ(ショット)数で区切り、それぞれのデータセットの残差二乗和を最小にする音速補正係数と海底局位置を同時に決定した。その結果、系統的な走時残差は格段に小さくなった(図 11b)。音速の補正量は最大で約 0.1%である。

¹ AIC(赤池の情報量基準) ある決まった個数のモデルパラメタを推定する際には、データセットに対する予測値の残差二乗和が小さいことを基準に行う。しかし、一般にモデルパラメタの数が増えるほど残差二乗和は小さくなるため、残差二乗和の比較では最適なモデルパラメタ数を決定することはできない。AICとは、モデルパラメタの数とそれに従う残差の変化の関係を記述し、最適なモデルパラメタ数を選ぶための基準となる量であり、下記の式で定義される。AICが小さいほどより良いモデルと見なされる。

$$AIC = -2 \times (\text{モデルパラメタの最大対数尤度}) + 2 \times (\text{モデルパラメタ数})$$

ここで、最大対数尤度とは $-(\text{残差})^2 / (\text{データ自体の測定誤差})^2$ で表される量である。

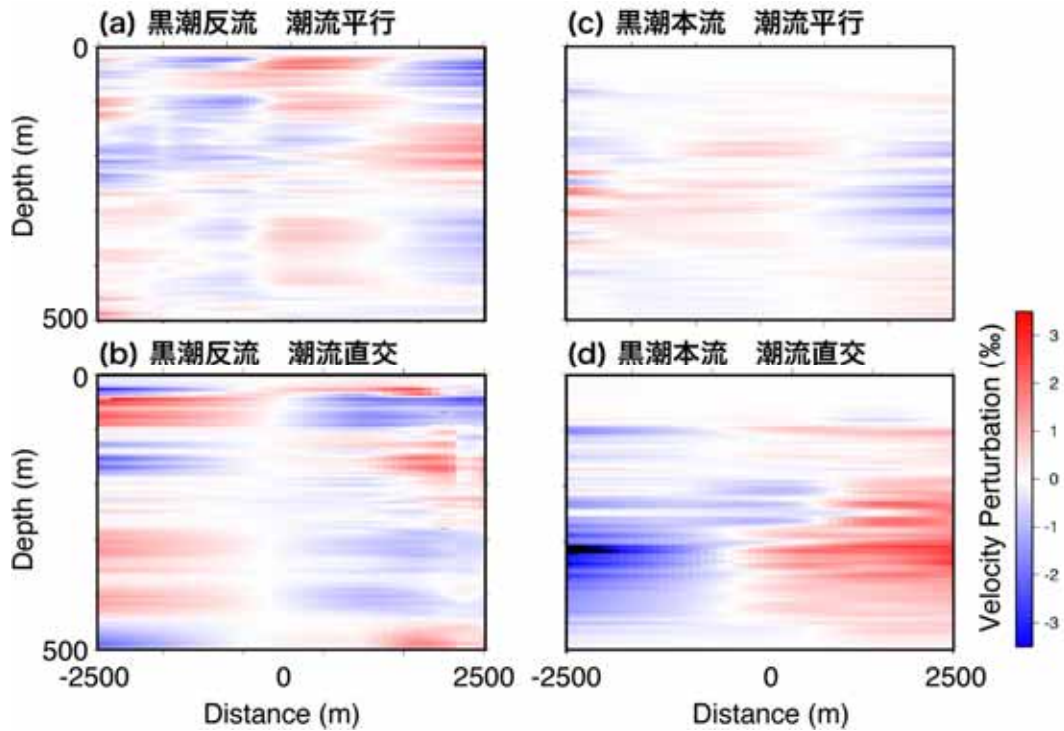


図 8 音速構造の不均質性の実測結果

CTD の測定による平均値が白で、赤および青が濃いほど平均値からのずれが大きいことを示す。

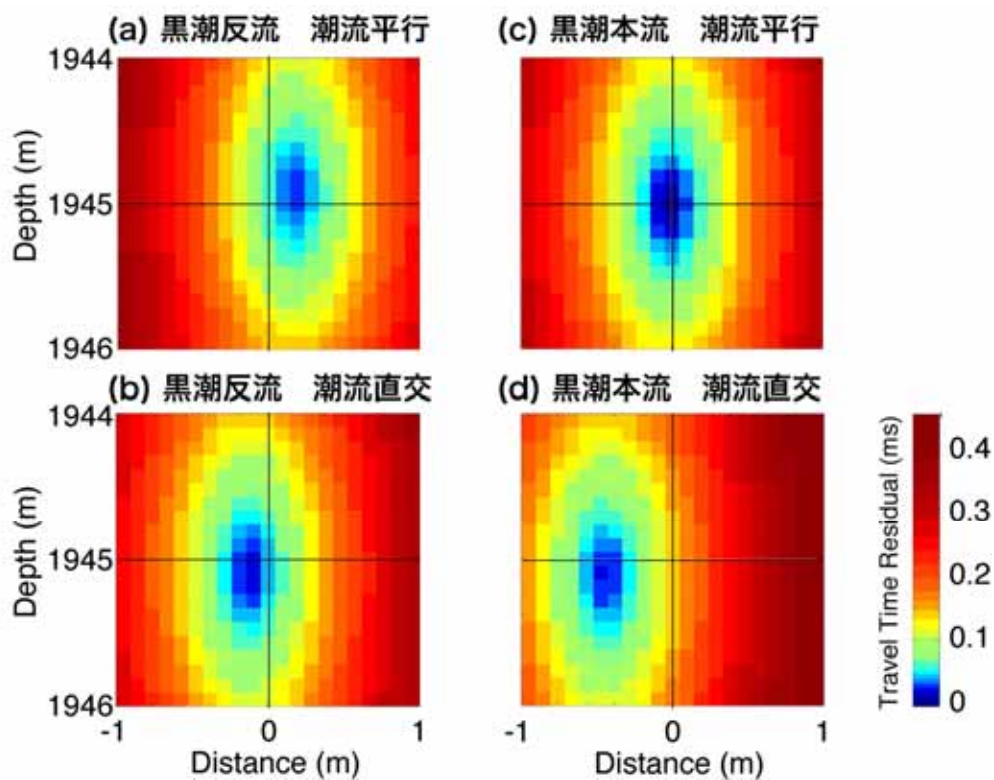


図 9 音速構造の不均質性によって生じるバイアス誤差の数値シミュレーション結果
座標 (0, 1945) の位置に仮想海底局を配置した場合の走時残差のプロファイルを示す。

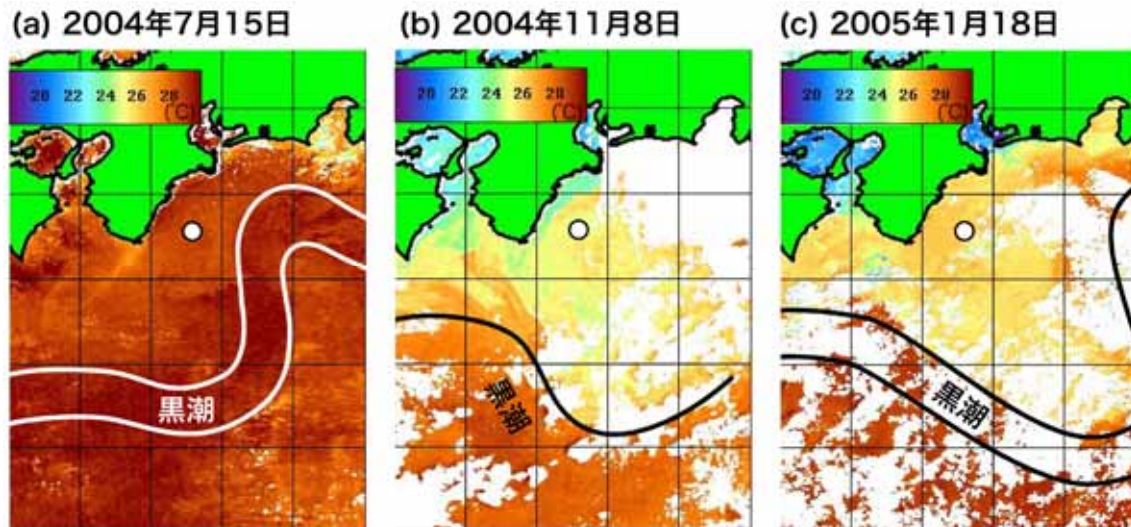


図 10 海底局測定時の黒潮の流路

カラーバーは海面水温（単位 $^{\circ}\text{C}$ ）を示す。白丸は KMS サイトの位置。三重県科学技術振興センターweb サイト掲載の NOAA 海面水温画像に加筆。

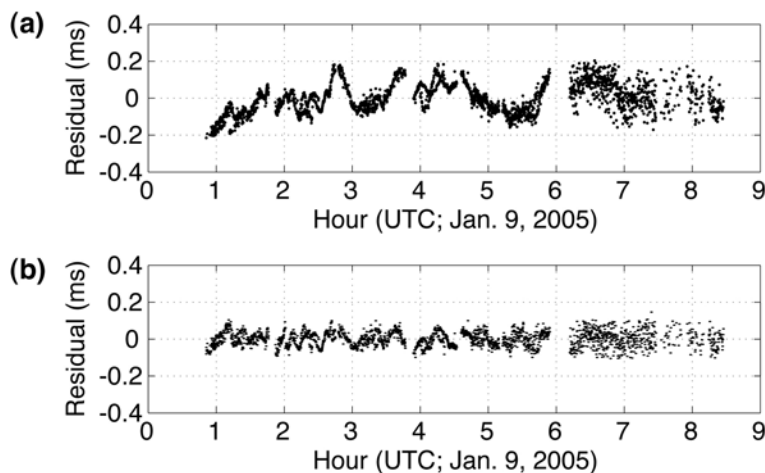


図 11 海中音速値を補正しない場合 (a) と補正した場合 (b) での走時残差の違い

(b) では 150 ショットごとに音速補正係数を決定している。例として 2005 年 1 月観測時の走時残差を示す。

5) キネマティック GPS 測位精度評価実験

キネマティック GPS 測位は、通常 10km 程度以内の短い基線で行われる。ところが、熊野海盆付近で GPS / 音響結合方式による海底地殻変動観測を行うためには、50km を超える長い基線でのキネマティック測位が必要となる。KMS サイトの場合、尾鷲に基準局を設置した場合の基線長は約 65km である。また、南海トラフ中軸近くでは基線長は 100km を超える。

キネマティック解析用のソフトウェアである Geodetics 社の RTD (Real Time Dynamics) ⁸⁾ は、1 エポックごとにアンビギュイティを求めて独立した解を出力する優れたソフト

ウェアである。しかし、RTDの仕様書上で測位精度が保証されているのは、基線長 50km までである（2 周波使用時）。この制限を超えている熊野灘においても RTD で正確なキネマティック測位が可能であることを確認する必要がある。

そこで、スライダーを用いたキネマティック GPS 測位精度評価実験を行なった。本実験は立命館大学理工学部および京都大学防災研究所地震予知研究センターとの共同研究であり、大阪大学理学研究科、大山田西小学校（桑名）、市原小学校（永源寺）の協力を得て実施した。名古屋大学屋上に全長約 10m のスライダーを設置し、その上でアンテナを往復運動させた（写真 4）。基準局は名古屋大学から 30～150km の地点 5 ヶ所に設置した（図 12）。移動しているアンテナの「真の位置」をモニターするために、スライダーから約 20m 離れた地点にも基準局を設置した。なお、真の位置の決定精度は ±5mm 以下であった。GPS 受信機は iCGRS および Z-surveyor を使用し、原子時計（ルビジウム発振器）を取り付けた。アンテナにはチョークリング付きのものを使用した。エポック間隔は 1 秒とした。実験期間は 2004 年 3 月 13～25 日および 7 月 2～10 日で、測位条件の良い可視衛星数が 9 個の時間帯に実験を行なった。この時の PDOP は約 1.7 であった。基準局座標は Bernese 4.2 を用いて決定した。

実験結果を図 13 に示す。基線長が 30km の場合は、全エポックの座標が真の位置に決定された。ところが、基線長が 60km を超えると真の位置から外れたところに決定されるエポックが現れ始め、基線長が延びるにつれて真の位置から外れるエポック数が増大した。したがって、RTD は約 50km 以下の基線では優れた解析能力を持つが、基線長が 50km を超える熊野灘でのキネマティック解析には適さないと結論づけられる。なお、この実験結果は RTD の仕様書に記載されている測位精度を否定するものではないことを断っておく。

基線が長い場合、陸上実験だけではなく実海域（熊野灘）での観測船の測位でも異常な測位結果が生じていた（図 14）。この時の GPS 基準局は三重県鳥羽市に設置しており、基線長は約 100km である。可視衛星数は 7 個、PDOP および VDOP は共に 2～3 であり、測位条件は比較的良好であった。図 14 では 13 時 28 分頃から上下成分の座標に 50～100cm のステップが生じている。観測船（に取り付けた GPS アンテナ）の上下成分座標は海面に強く拘束されているため、急激なステップが生じることは不自然であり、異常な測位結果と言える。



写真 4 実験に用いたスライダと GPS アンテナ

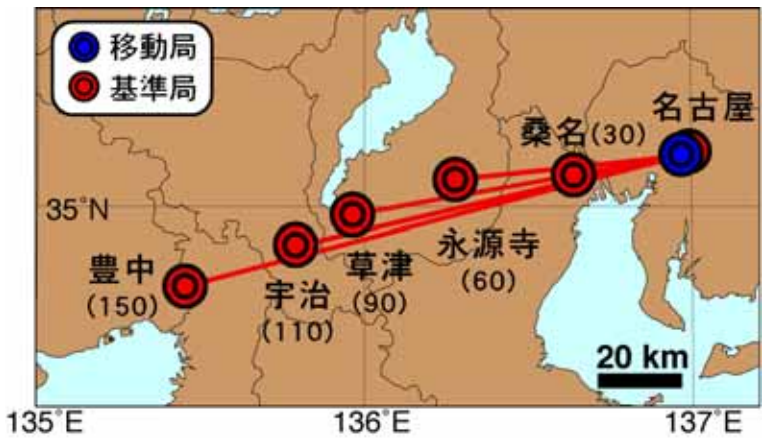


図 12 キネマティック GPS 測位精度実験における移動局と基準局の配置
括弧内の数値は移動局からの基線長 (単位 km)。

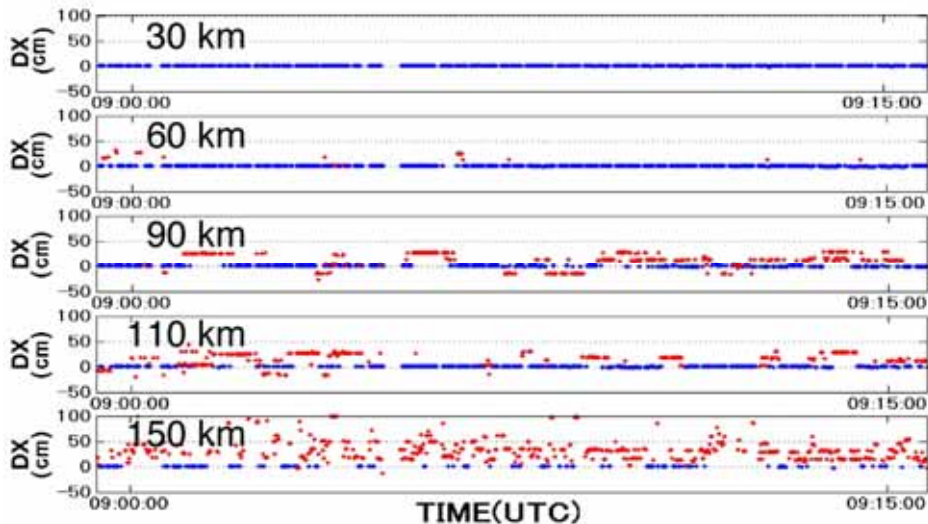


図 13 キネマティック GPS 測位精度実験の結果
例として 2004 年 3 月 18 日の結果を示す。縦軸は座標値 (東西成分) の真の位置との差。真の位置に決まったエポックを青で、真の位置から外れたエポックを赤で表す。

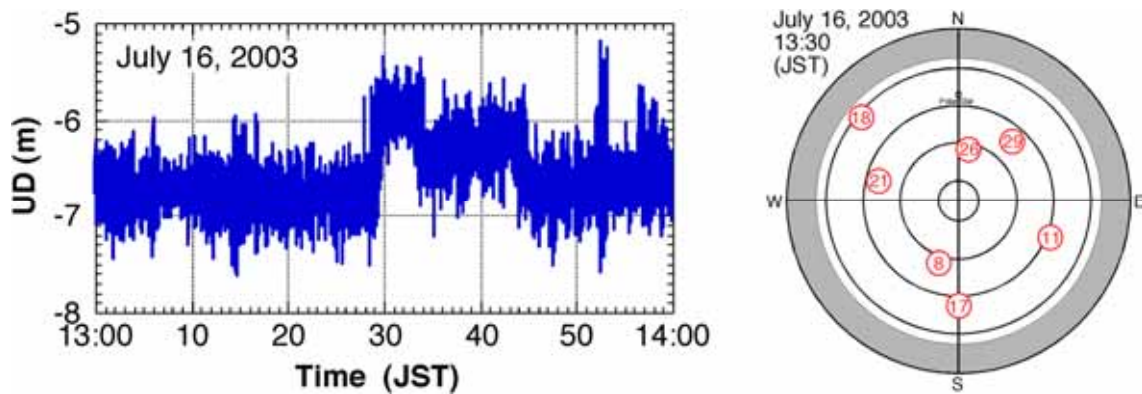


図 14 (左) 熊野灘における観測船の測位結果 (上下成分) に見られる異常値
(右) 13時30分時点のスカイプロット
丸の中の数字は衛星番号。

6) キネマティック GPS ソフトウェアの開発

海底局位置決定精度の向上には、キネマティック GPS 測位の精度を上げることが不可欠である。前述のとおり、熊野灘のように基線長が約 50km 以上になると、RTD では座標値にステップが生じるなど、測位精度が低下することが確認されている。ステップの部分を除けば問題はないが、過去の測定では数時間程度継続してステップが生じた例もあった。そのような時間帯に取得した音響測距データは海底局位置決定に使用できず、データ数が減少することで位置決定精度も低下する。長基線でのキネマティック GPS 測位への対応策として、測位精度が高いと評価している GrafNav を現在は使用しているが、市販品のためソフトウェアのソースを書き換えることができず、技術開発研究には最適とは言えない。したがって、50km を超える基線でのキネマティック GPS 解析に有効なソフトウェアを独自に開発することが望ましく、その開発を開始した。

本年度は、ソフトウェア開発の第一段階として、アンビギュイティ²の決定方法について検討した。基線長約 13km でのスタティック測位のデータを用いた検討により、L1³ や電離層フリー線形結合 (L3 あるいは LC)⁴ よりもナローレーン (NL)⁵ の方がアンビギュイティ決定に優れていることが分かった。キネマティック測位では、長時間のデータを用いたアンビギュイティ決定は効率的ではないため、最初の 20 エポック (20 秒) のみでアンビギュイティを決定するアルゴリズムを採用した。この際、NL だけでは不安定であるため、L1 疑似距離⁶ も併せて用いることにした。ただし、決定されるアンビギ

² アンビギュイティ GPS衛星とアンテナとの距離を搬送波の位相で測定する際、いくつ目の波を受信したかが判断できず、波長の整数倍の誤差が生じる。これをアンビギュイティとよぶ。「整数値バイアス」ともいう。

³ L1 GPS衛星からは2種類の搬送波が出されており、それぞれL1 およびL2 とよばれる。L1 の周波数は 1575.42MHzで、波長に直すと約 19cmとなる。

⁴ 電離層フリー結合 (L3 あるいは LC) GPS測位では、L1 とL2 の搬送波位相 (それぞれ n_1 、 n_2 とする) を $n_1 + n_2$ (n_1 および n_2 は定数) の形で線形結合した量を用いることがある。電離層フリー結合とは、電離層の影響を消去するように $n_1 = 1$ 、 $n_2 = -f_2/f_1$ (f_1 および f_2 はそれぞれL1、L2の周波数) を係数とした線形結合。L3 あるいは LC という記号を用いる。

⁵ ナローレーン (NL) $n_1 = 1$ 、 $n_2 = 1$ とした線形結合。NL という記号を用いる。

⁶ 疑似距離 受信機の時計で測定したGPS信号の到達時刻を用いて算出した衛星-受信機間の距離。受

ユイティはフロートである。以上の検討結果をもとにしてソフトウェアを試作し、動作試験を行なった。

今後、整数値のアンビギュイティ決定、電離層遅延⁷の軽減、サイクルスリップ⁸の検出と補正、衛星軌道の補正などの方法を確立する必要がある。また、将来的に利用可能となる第3の周波数(L5)⁹も用いたアンビギュイティ決定についても検討する必要がある。

信機と衛星の時計を完全に同期させることは実際上不可能であるため、この距離は見かけ上の距離となる。

⁷ **電離層遅延** 衛星から出された信号(電波)の伝搬が電離層中の電子によって影響を受ける現象。

⁸ **サイクルスリップ** 衛星からの電波が遮断された場合、継続してカウントしてきた位相が途切れて整数分の不確定性が新たに生じる現象。サイクルスリップがあると、測位結果に大きな誤差が生じる。

⁹ **第3の周波数(L5)** 将来打ち上げられる衛星に搭載される周波数 1176.45Mhzの新しい信号。この信号もあわせて用いることにより、測位精度の向上が期待されている。

(d) 結論ならびに今後の課題

平成 16 年度は下記の研究項目を実施した：

- 1) 船上局の高度化
- 2) 熊野灘における海底局網の構築
- 3) 熊野灘における海底局のくり返し測定
- 4) 音速構造トモグラフィ手法を用いた海中音速構造の不均質性の評価と補正法確立
- 5) キネマティック GPS 測位精度評価実験
- 6) キネマティック GPS ソフトウェアの開発

このうち 3) では、同一海底局の測定を 3 回実施した。各測定で得られたデータを用いて海底ベンチマークの位置決定を行なった結果、くり返し観測精度が 3~7cm であることを確認した。7 月の測定では、短期的（約 5 日間）ではあるが 3cm のくり返し観測精度を達成した。今後、本業務の目標である 2~3cm の精度での海底ベンチマーク位置決定を安定して行うことを目指す。

また、2004 年 9 月 5 日に発生した紀伊半島南東沖地震に伴う水平変動を観測した。KMS サイトで観測された地震時の水平変動は、南南東方向に約 21cm であった。GPS / 音響測距結合方式によって地震時の海底地殻変動が観測されたのは世界で初めてである。この地震に関しては、断層面モデル（走向や傾斜）を僅かに変えても陸上での観測結果は説明できるが、海底地殻変動の観測結果は説明できなくなる。このことから、海域で発生する地震のメカニズムを解明する上で、陸上での観測のみならず海底での地殻変動観測が有効であると言える。

本年度の観測では、2~3 ノットの速さで航走しながら予定した測線上で音響測距を行なった。そのため、各海底局に対して偏りのない測距データを得ることができた。今回使用した三重県科学技術振興センターの「あさま」のようなノイズの小さい「海底地殻変動専用観測船」を建造することも必要であろう。

4) では、昨年度実施した CTD 同時測定データを解析し、黒潮本流域では長波長の不均質が、反流域では短波長の不均質がそれぞれ卓越していることを明らかにした。数値シミュレーションの結果、短波長不均質が卓越している反流域と、そもそも不均質性が小さい本流域の潮流平行方向での音響測距では、海底局位置決定の際のバイアス誤差が比較的小さいことが明らかになった。また、CTD 測定で得られた海中音速構造に最大約 0.1% の補正係数を掛けるという解析方法も確立した。

5) については、陸上での実験により、熊野灘のような長基線（約 50km 以上）でのキネマティック解析には RTD が有効ではないことが確認された。そこで、本業務では Waypoint 社のソフトウェア GrafNav を用いてキネマティック解析を行うことにした。

(e) 引用文献

- 1) Sato, K., M. Hashimoto, and Y. Hoso, Development of a monitoring technique of anomalous crustal deformations preceding large earthquakes with the application of kinematic GPS, IUGG2003, G01/03P/D-022, 2003.
- 2) DelGrosso, V. A., New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations), J. Acoust. Soc. Am., 56, 1,084-1,091, 1974.
- 3) 国土地理院、紀伊半島南東沖の地震に伴う断層モデル、第 161 回地震予知連絡会資料、2004。
- 4) 東京大学地震研究所、9月5日の紀伊半島南東沖地震(本震:Mj7.4)の再解析、EIC 地震学ノート No.153
(http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2004/EIC153.html)、2004。
- 5) 防災科学技術研究所、2004年9月5日紀伊半島南東沖の地震特集
(<http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/se-off-kii0409/>)、2004。
- 6) Toda, S., and R. S. Stein, Response of the San Andreas fault to the 1983 Coalinga-Nunez Earthquakes: An application of interaction-based probabilities for Parkfield, J. Geophys. Res., 107, doi:10.1029/2001JB000172, 2002.
- 7) Yada, K, R. Ikuta, M. Ando, T. Okuda, K. Tadokoro, M. Kuno, S. Sugimoto, and K. Takatani, Spatial variations in Acoustic velocity at Kuroshio region for the accurate ocean-bottom positioning, Eos Trans. AGU, 85(47), Fall Meet. Suppl., Abstract G21A-0147, 2004.
- 8) Bock, Y., Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning System, J. Geophys. Res., 105, 28,223-28,253, 2000.

(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
Nishimura, S., M. Ando, and K. Tadokoro	Numerical simulation for the improvement of the offshore resolution by using ocean-bottom crustal deformation data	Phys. Earth Planet. Inter.	2005年 (印刷中)
田所敬一・矢田和幸・高谷和典・奥田隆・安藤雅孝・杉本慎吾	熊野海盆における海底地殻変動観測	地球惑星科学合同大会	2004年 5月12日
矢田和幸・安藤雅孝・田所敬一・奥田隆・杉本慎吾・高谷和典・久野正博	海水音速構造の不均質性と海底位置決定精度について	地球惑星科学合同大会	2004年 5月12日

3.1.3. 音速構造トモグラフィ手法を用いた 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

高谷和典・安藤雅孝・田所敬一・奥田隆・杉本慎吾・矢田和幸	海底地殻変動観測に向けた移動体による kinematic GPS の精度評価実験	地球惑星科学合同大会	2004 年 5 月 12 日
田所敬一・安藤雅孝・奥田隆・矢田和幸・高谷和典・杉本慎吾・生田領野	熊野海盆におけるくり返し海底地殻変動観測	日本地震学会秋季大会	2004 年 10 月 9 日
生田領野・杉本慎吾・安藤雅孝・田所敬一・奥田隆・矢田和幸・高谷和典	海中音速構造の時間変化を考慮した海底音響局測位解析	日本地震学会秋季大会	2004 年 10 月 9 日
矢田和幸・生田領野・安藤雅孝・奥田隆・田所敬一・久野正博・杉本慎吾・高谷和典	黒潮海域における海中音速構造の空間変化と海底位置決定精度	日本地震学会秋季大会	2004 年 10 月 9 日
高谷和典・安藤雅孝・田所敬一・奥田隆・生田領野・杉本慎吾・矢田和幸	海底地殻変動観測にむけた kinematic GPS の精度評価	日本測地学会第 102 回講演会	2004 年 10 月 28 日
Tadokoro, K., M. Ando, T. Okuda, R. Ikuta, S. Sugimoto, K. Yada, and K. Takatani	A System for Observing Sea-floor Deformation: System Configuration and the Monitoring at the Nankai Margin, Japan	AGU Fall Meeting	2004 年 12 月 14 日
Ikuta, R., M. Ando, K. Tadokoro, T. Okuda, G. M. Besana, S. Sugimoto, K. Takatani, and K. Yada	Ocean floor positioning considering temporal variation in acoustic velocity	AGU Fall Meeting	2004 年 12 月 14 日
K. Takatani, M. Ando, K. Tadokoro, T. Okuda, R. Ikuta, S. Sugimoto, and K. Yada	Accuracy Evaluation of Kinematic GPS with a Moving Object for Observing Sea-floor Crustal Deformation	AGU Fall Meeting	2004 年 12 月 14 日

3.1.3. 音速構造トモグラフィ手法を用いた 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

Yada, K, R. Ikuta, M. Ando, T. Okuda, K. Tadokoro, M. Kuno, S. Sugimoto, and K. Takatani	Spatial variations in Acoustic velocity at Kuroshio region for the accurate ocean-bottom positioning	AGU Fall Meeting	2004 年 12 月 14 日
Xu, P., M. Ando, and K. Tadokoro	New approaches to precise seafloor geodetic deformation measurement	Earth Planets Space	(投稿中)

(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) 海底地殻変動用海底局・海上局等の開発

測定精度向上のための海底局と海上局の電子回路の改良および海上での音響測定手法の開発を行う。現行の音響トランスデューサーの帯域幅をさらに増し、信号到達時間読みとり精度向上を試みる。これにより、1 回の読みとり精度が数 cm 程度向上することが期待できる。

また、東北大学と共同で、複数のキネマティック GPS 解析ソフトを比較し、解析ソフトの特性を明らかにする。さらに、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。

(b) 海底地殻変動観測の実施およびデータ解析

熊野海盆にて、海底地殻変動観測を実施するための観測計画の立案、現場での観測手順の決定、観測の実施および観測後のデータ解析を行う。平成 16 年度に得られた測定精度向上を詳細に評価するため、1-2 月に 1 回の観測を実施する。平成 16 年度は 2004 年 紀伊半島沖地震に伴うと考えられる地殻変動が検出されたが、本年度は、プレート相対運動による変動の 1 年間の変化を検出できるように努める。

(c) キネマティック GPS 解析ソフトの開発

陸上から離れた洋上で測定可能なキネマティック GPS ソフトの開発を引き続き行う。

(d) 温度・圧力計測機器および海洋音速構造測定手法の開発

音速構造トモグラフィと海底位置決定精度向上に必要な、長期間安定に測定可能な温度・圧力測定装置および海洋音速構造測定手法を開発し、実海域で測定を試みる。

(e) 海水音速構造の時間的および空間的变化の研究

海域では海流が数ノットの数をもつため、音速構造は時間的にも空間的にも変化する。この変化を適切に捉え、海底局位置決定の補正をするためには、ドプラー流速計を用いて、音速変化の大きい表層の流速や方向を連続的に測定し、時間空間変化を精度良く推定する必要があり、その観測研究を行う。

(f) 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、中間的などとりまとめを行う。