音響測距— GPS リンクによる海底地殻 変動観測システムの開発—

田 所 敬 一* 安 藤 雅 孝* 佐 藤 一 敏** 山 田 卓 司**
奥 田 隆* 片 尾 浩*** 岸 本 清 行****

Development of an Observation System for Ocean Bottom Crustal Deformation Using an Acoustic Ranging-GPS Link

Keiichi TADOKORO *, Masataka ANDO *, Kazutoshi SATO **,
Takuji YAMADA **, Takashi OKUDA *, Hiroshi KATAO ***
and Kiyoyuki KISHIMOTO ****

Abstract

We have developed an observation system for ocean bottom crustal deformation using an acoustic ranging-GPS link. A seafloor-positioning test at Suruga Bay revealed that our system can obtain the horizontal location of a sea-bottom station within 5 cm (95 % confidence interval) using accurate GPS positioning data. GPS positioning error is a major source of error in our whole system. We carried out experiments on kinematic GPS positioning with a long base line and a moving antenna to investigate its accuracy. The results of the experiments suggest that data with PDOP (Position Dilution of Precision) of 2 or less can reduce the GPS positioning error to 7 cm. The network of the observation system for ocean bottom crustal deformation may lead to advances in tectonic studies along subduction zones and contribute to predictions of interplate large earthquakes in the future.

Key words : ocean bottom crustal deformation, acoustic ranging, chirp wave, kinematic GPS, interplate earthquake

キーワード：海底地殻変動，音響測距，チャープ波，キネマティック GPS，プレート境界地震

I. はじめに

日本列島周辺には太平洋プレートやフィリピン海プレートが沈み込み，海溝沿いに巨大地震（た

とえば，南海地震や東南海地震）が発生する。その巨大地震の長期予知には，プレート間カップリングの時空間変化を知ることがひとつのカギになる。近年，国土地理院によって日本列島上の GPS

* 名古屋大学大学院理学研究科地震火山観測研究センター

** 京都大学大学院理学研究科

*** 京都大学防災研究所地震予知研究センター

**** 産業技術総合研究所

* Research Center for Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Nagoya University

** Graduate School of Science, Kyoto University

*** Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

**** National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

連続観測網 (GEONET) が整備された (宮崎・畑中, 1998) が, 日本列島周辺のプレート境界はそのほとんどが海底下に存在するため, 沈み込み帯での巨大地震の長期予知には陸上の観測点だけでは不十分である。また, 直前予知や巨大地震発生後の震源過程の研究についても同様のことがいえる。したがって, これらの研究には海底での地殻変動観測が不可欠である。また, 日本列島上の GPS 観測網を海域にまで広げることができれば, プレート運動そのものやプレート境界から内陸に至るまでの詳細な変動パターンが明らかになるものと期待される。

そこで我々は海底地殻変動観測システムの開発を行なっている。プレート運動に関係した変動をとらえるためには, 目標とするシステム全体の測定精度は数 cm 以下に設定しなくてはならない。本論文では, これまでの海底地殻変動観測システムの開発状況と現在の問題点を報告する。海底地殻変動を測定する装置の開発は, 現在, 国内外の複数のグループで並行して行なわれている (藤本, 1995; Spiess *et al.*, 1998; 浅田・矢吹, 2000; Asada and Yabuki, 2001; 藤本ほか, 2001)。

II. 海底地殻変動観測システムの概要

本システムは, 海底に設置したトランスデューサ (海底局) の位置を正確に決定するため, 観測船 (船上局) と海底局の間で精密音響測距を行い, さらに, 観測船の位置をキネマティック GPS 測位により精度良く決定しようというものである (図 1)。図 2 に音響測距の原理を示す。船上局から GPS タイムサーバで同期をとって測距信号を 3~5 秒毎に送信する (この時刻を 0 とする)。理論波形

図 1 海底地殻変動観測システムの概念図。

Fig. 1 Configuration of our observation system for ocean bottom crustal deformation.

図 2 音響測距原理の模式図。

Fig. 2 Schematic illustration showing the principle of acoustic ranging.

との相関処理（処理時間 T_{c1} ）によって時刻 T_1 に測距信号の検出を行なった海底局は、あらかじめ設定した遅延時間 T_b （0.5 秒）後に新たな測距信号を送信する。その信号は同様の相関処理（処理時間 T_{c2} ）により、船上局において時刻 $T_1+T_b+T_2$ に検出される。相関処理時間 T_{c1} と T_{c2} はあらかじめ分かっているので、 $(T_1+T_b+T_2) - (T_{c1}+T_b+T_{c2})$ を計算することより、往復走時 $T_1+T_2 - (T_{c1}+T_{c2})$ を求めることができる。なお、船上局での受信波形は、100 kHz の高速サンプリングでデータレコーダに収録している。

音響測距信号としては、信号幅 3.41ms、変調幅 8 ～ 12 kHz のチャープ波を用いている。チャープ波を用いたのは、相関ピークの検出に有利であること（長屋ほか、1994）と、測距信号の S/N 比が著しく悪く、ノイズに埋もれているような場合でも相関処理により確実に信号を認識できる利点がある（山田ほか、2000）という理由からである。なお、他のグループでは M 系列波を用いている（浅田・矢吹、2000；Asada and Yabuki, 2001；藤本ほか、2001）。我々のシステムでは、船体や海底などからの反射波を海底局からの測距信号であると誤認識しないために、船上局からはダウンチャープ波（周波数を 12 kHz から 8 kHz にリニアに変調したチャープ波）を送信し、海底局からの測距信号にはアップチャープ波（周波数を 8 kHz から 12 kHz にリニアに変調）を使用している。海底局からは、1 回の測距の際に 3 つのアップチャープ波を送信する。3 つの測距信号の送信間隔を変えることによって、複数の海底局の認識を行なっている。船上および海底両局では、各測距信号を 16 ビット、37.5 kHz サンプリングで A/D 変換した波形を相関処理に用いている。このサンプリング間隔は片道（船上局から海底局まで、あるいは、その逆）の測距分解能 4 cm に相当する。我々の用いているチャープ信号の中心周波数は 10 kHz であるが、システム中の演算部分の負担を軽くするために、サンプリング周波数を低くした。ノイズを加えた疑似測距信号を用いた数値シミュレーションによると、波形の相関処理を行なうことで、37.5 kHz という低速サンプリングでも測距

信号到達時刻の決定は正しく行なえることが確認されている（山田ほか、2000）。

キネマティック GPS 測位には Ashtech 社の Z-12, Z-Surveyor, あるいは JAVAD 社の LEGACY を用い、1 秒または 0.5 秒間隔でデータを取得している。解析には精密暦を導入し、解析ソフトウェア PNAV (Ashtech Precise Differential GPS Navigation and Surveying Software) を使用している。キネマティック測位によって決定されるのはアンテナの位置であるが、音響測距データを用いて海底局の位置を決定する際には、舷側に装備した長さ 6 ～ 10 m のポールの先に取り付けたトランスデューサの位置が必要となる。そこで、船の方位角とローリング、ピッチングも同時に測定し、船の動揺を考慮した補正を行なっている。

III. 開発過程と洋上での実験結果

新規にシステムを開発するにあたっては、その途上で種々の技術的な問題点が生じることが予想された。そこで、それらの問題点をひとつずつ解決するために、我々は表 1 に示すような段階と実験内容を設定して開発を行なってきた。

試作段階に関しては松尾ほか（1999）で詳しい報告がなされているので、ここでは簡単なまとめにとどめておく。岸壁間や小型船舶による沿岸（水深 100 m 弱）での音響測距実験は、岸壁や海面からの反射によるマルチパスの影響を大きく受けるため、音響測距精度の議論が難しい。しかしながら、実験現場の反射物の位置を考慮して、幾何学的考察から（多重）反射によると思われる測距結果を取り除くことによって、10 cm 程度の精度があることが確認された。

試作段階の結果を受け、2000 年 6 月からは実験段階に入った。実験段階では、主に水深 1000 ～ 1500 m 前後の洋上での試験により、キネマティック GPS 測位も含めたシステム全体の精度評価を行ない、精度向上のための改良を行なってきた。このほかにチャープ波を用いた測距の精度評価のための数値シミュレーション（山田ほか、2000）やキネマティック GPS 単独の精度評価実験も行なっている。GPS の精度評価実験に関しては次章

表 1 段階別の開発内容.

Table 1 Contents of each phase for developing our observation system.

段階	内容
試作段階	水槽試験：小型水槽での動作試験 岸壁試験：距離 10m ～ 100m 程度の岸壁間測距 沿岸試験：水深 100m 弱の海底-船上間測距
実験段階	洋上試験：水深 1000m 前後の海底-船上間測距 (串本沖, 鳥羽沖, 浜島沖, 駿河湾) 数値シミュレーション：チャープ波による測距精度の評価 GPS 精度評価：宇治-名古屋間長基線, 三河湾内一周移動
実用段階	(水深 3000m 以上の海域での) 繰り返し・常時測距 複数海底局同時測距による海底地殻変動観測網の完成

で報告することとし、本章では洋上試験の結果を報告する。洋上試験は串本沖, 鳥羽沖, 浜島沖, 駿河湾で計 4 回行なった。ここでは、10 月に行なった駿河湾での試験の様子と、そのデータによる海底局位置決定結果、システム全体の精度を報告する。

駿河湾での試験は、2000 年 10 月 23 ～ 24 日に静岡県水産試験場の駿河丸 (134 t) を使用させていただいて行なった。海底局は水深約 1450 m (船に装備されている音響測深機による) の海底に 1 台設置した。また、キネマティック GPS 測位の基準局は、試験海域から約 150 km 離れた名古屋大学理学研究科屋上に設置した。海底局の位置決定精度を上げるための工夫として、船をドリフトさせながら海底局の両側数本の測線上で面的に測距を行なった (図 3)。たとえ測線分布が海底局に対して非対称であっても、海底局の両側に測線を設けて面的に測距していれば、精度良く海底局の位置決定ができることが明らかになっている (山田ほか, 2000)。測距の結果、水深よりも明らかに短い距離や長い距離を示すデータがいくつか得られたが、これらは測距エラーであると考えられる。そこで、海底局の位置決定には測距エラーを除いた結果だけを用いた (図 4)。また、図 4 から分かるように、上下方向のキネマティック GPS 測位結果が船の動揺以上に大きくばらついていたため、GPS 測位結果の RMS エラーが 5 m 以内のときに

図 3 駿河湾における測距試験の際の航跡図。
▲は海底局の投入位置を示す。

Fig. 3 Trajectory of observation vessel during the acoustic ranging test in the Suruga Bay. Solid triangle indicates the location of sea-bottom station.

得られた音響測距データだけを抽出して最初のデータセットとした。このデータセットを用いて、船側-海底のトランスデューサ間距離の残差二乗和が最小になるように海底局の位置を決定した。その後、測距残差の大きいデータをさらに削除した新しいデータセットを作り、同様の方法で海底局の位置を決定しなおし、これを最終結果とした。音速構造は 1 次元構造を仮定し、最適な音速値

図4 海底局の位置決定に使用した音響測距データ（上段）およびキネマティック GPS 測位の結果（基準局からの距離；下段）。
明らかな音響測距エラーは取り除いてある。データが不連続になるところは、測線が変わったことを意味する。

Fig. 4 Data set of acoustic ranging (top) and kinematic GPS measurement (distances from the reference station; bottom) used for positioning the sea-bottom station.
Obvious errors of acoustic ranging are removed from the data set. Data are discontinuously displayed at the end of each observation line.

(1485 m/s) をサーチした。解析の結果、海底局の水平方向位置が 11 cm の誤差で決定できた (図 5)。ここでの「誤差」とは、海底局位置決定の際の 95%信頼区間のことを指す。実験段階の最初に行なった串本沖での測距結果による海底局の水平方向位置決定誤差は 20 cm であった (田所ほか, 2000) ことから、我々のシステムの精度は確実に上昇しているといえる。ところが、前述のとおり、駿河湾の試験ではキネマティック GPS 測位の精度が著しく悪かった (図 4)。特に、上下方向にばらつきやサイクルスリップが見られる。この原因は基線長が長すぎたことにあると考えられる。そこで、GPS 測位の RMS エラーが 1 m 以内のときの測距結果をデータセットとして既述の手続きで海底局位置を決定したところ、その誤差が 5 cm に改善した (図 5)。海底局位置決定誤差には音響測

図5 キネマティック GPS 測位の RMS エラーによるデータセットの選別と海底局位置決定誤差の関係。
横軸は、最初のデータセットを作成する際の RMS エラーの上限値を示す。

Fig. 5 Graph showing location errors of the sea-bottom station for each data set selected on the basis of RMS errors in the kinematic GPS measurement.
The horizontal axis shows the upper limit of GPS positioning error for each initial data set.

距誤差と GPS の測位誤差の両方が含まれているが、この結果から、現段階での海底局位置決定誤差要因の大部分は GPS にあることが分かった。ただし、GPS 測位の RMS エラーが十分に小さいデータだけを用いることはデータ数の減少につながるため、GPS 測位誤差が大きいことは深刻な問題である。この問題がクリアできれば、実用段階へ移行することができると考えられる。

IV. キネマティック GPS 測位精度評価実験

前章で述べたように、海底地殻変動観測システムの精度を大きく左右する要因は、100 km を越えるような長基線でのキネマティック GPS の測位精度であることが分かった。南海トラフなど近くにリファレンス点のない海洋上では、基線長は 100 ~ 200 km と長くなる。従来、キネマティック GPS では 10 km 以内という短い基線上で解析されてきたため、長基線での誤差の見積もりがされていない。また、観測船が南海トラフなどの現場海域にたどり着くまでに長距離の移動を必要とする。このための誤差が蓄積される可能性も考えられる。以上のことから、我々は長基線と移動にともなう

キネマティック GPS による測位精度を評価するための実験を実施した（図 6）。

まず、長基線でのキネマティック GPS 測位精度評価実験として、2000 年 6 月 9 日に、京都府宇治市の京都大学防災研究所地震予知研究センター新館屋上を基地局とし、愛知県名古屋市の名古屋大学理学研究科屋上を移動局とした実験を行なった。これら 2 点間の基線長はおよそ 110 km である。移動局側には 5 つの三脚を約 20 m 間隔で L 字型に配置した。衛星捕捉が途絶えないようにアンテナを水平に手で持ち、これらの三脚間をゆっくりと移動させ、三脚に固定してから 10 分間静止させた。次に、2000 年 7 月 18 日に、三河湾内においてキネマティック GPS 測位移動実験を行なった。基地局を三河湾内の三谷漁港に設置し、一色、泉、河和の 3 漁港に固定三脚の陸上基準点を設置した。これらの漁港を順次船で回り、アンテナを陸上基準点に 30 分ほど静止したまま放置した。両実験とも、観測に用いた受信機は Ashtech 社の Z-12 で、サンプリング間隔は 1 秒である。

精密暦を導入し、ソフトウェア PNAV を用いて解析した結果、両実験とも以下のような結果が得られた：宇治-名古屋実験の場合、基線長が長かったものの、その移動距離は小さかった。この実験では、アンテナ固定後の初期位置は事前に求めておいた真の値から 3 cm 程度ずれた位置に決定された。一方、三河湾における実験では、基線長が短かったものの、その移動距離は実際の洋上での移動距離に匹敵するほど長かった。この場合、アンテナ固定後の初期値は真の値から 7 cm 程度のずれを生じていた。いずれの実験でも衛星配置は安定しており、位置精度低下率の指標となる PDOP（Position Dilution of Precision）は 2 前後と理想的な値であった。また、陸上での観測とは異なり、洋上では GPS 衛星から送られてくる電波を遮断する障害物はほとんど存在しない。したがって、衛星配置が極めて良ければ（PDOP 2）、洋上での GPS 測位精度は常に 7 cm 程度以内であると考えられる。しかしながら、基線長が長くなると、同時に捕捉できた衛星の数が少なくなり、それが原因で衛星配置にばらつきが生じて PDOP

図 6 キネマティック GPS 実験の際の基地局と移動局。

Fig. 6 Map showing locations of base and rover stations for the two kinematic GPS experiments.

が 2 を越える場合があることが予想される。実際、駿河湾での実験で GPS の測位精度が悪かったのは、このような不安定な時間帯に音響距離データが集中していたためであると考えられる。衛星配置は時間とともに変化するので、海底地殻変動観測においては、衛星配置が安定している時間帯を予報暦などで事前に選んでから観測するか、あるいは後処理する段階でその時間帯を抽出して解析する必要がある。

V. ま と め

音響測距とキネマティック GPS 測位をリンクさせた海底地殻変動観測システムを開発してきた結果、現段階では GPS 測位誤差が小さければ海底局の水平位置が 5 cm の誤差で決定可能である。ただし、この誤差は一回の観測によるランダム誤差である。繰り返し測定した場合の系統誤差の評価

は、今後の実験で行なう必要がある。本装置の開発は、繰り返し測距や複数海底局同時測距を行なう実用段階へ早期に移行するべきである。そのために、現段階では測距が行なえなかった場合や測距結果が明らかに誤りであると分かった場合の波形確認用に用いている 100 kHz サンプリングで収録した波形を積極的に利用して、後処理によって相関をとり、精度向上に役立てたいと考えている。また、海中の音速構造も測距誤差に影響を及ぼす。特に、測距に 1 日程度の時間を要する場合、測線によって表層の音速構造が変化し、その影響が音速の水平不均質性として現れることが予想される。数値シミュレーションによると、音速構造に水平不均質性がある場合の海底局位置決定誤差は、ない場合のそれに比べて 3 倍近くにもなることが明らかになった (山田ほか, 2000)。そのため、今後は CTD (Conductivity-Temperature-Depth profiler) による時空間的に精密な音速プロファイルの取得も行なう予定である。そのデータにもとづいて、音速構造の日変化や海流による影響を吟味し、測距精度の向上に努める計画である。

キネマティック GPS 測位に関する実験によって、衛星配置が極めて良ければ (PDOP 2), 100 km 以内の基線長で観測船を測位した場合、その精度は 7 cm であることが分かった。基線長と測位精度の関係をさらに詳しく調べるために、基線長別 (たとえば 10, 50, 100, 150, 200 km) の精度評価実験も行なう予定である。このような実験は、海底地殻変動観測だけでなく、GPS を利用した地震計 (強震計) の開発といった他の研究課題にも貢献できるはずである。海溝近くでの測位を考慮すると、さらに長い基線長 (150 ~ 200 km) での測位が必要になる。長基線キネマティック GPS 測位を対象とした解析ソフトウェアとしては KINGS (辻井ほか, 1997) があり、現在、高精度測位が可能な基線長を 100 km に広げようと実験が行なわれている。また、Colombo (2000) が洋上や極地方、砂漠などでの観測などを視野に入れて基線長 1000 km での実用を目指して解析ソフトウェアの開発に取り組んでいる。しかし、い

ずれの場合も移動局 (観測船) を囲むような基地局の配置が望ましく、南海トラフのように四方に基地局を確保できない場合には測位精度が著しく低くなる可能性が高い。そこで、測位誤差軽減の工夫として、基地局と観測海域の間に GPS アンテナを搭載したブイまたは小舟をいくつか浮かべ、それぞれの間では短基線でのキネマティック測位・解析を行ない、その後、各基線を繋いでひとつの長基線測位を完成させるといった中継方式を考える必要があろう。

本海底地殻変動観測システムの実用化を受けて、将来的に日本列島を取り囲むような海底地殻変動観測網 (安藤, 1998) が構築されることにより、沈み込み帯のテクトニクス、プレート境界巨大地震の予知・研究が大きく進歩することが期待される。

謝 辞

名古屋大学理学研究科の平原和朗教授、宮島力雄技官、Bambang Setyadji 氏、宮川幸治氏、林 宏和氏、京都大学防災研究所の橋本 学助教授、名古屋大学理学部の大井陽一氏には、GPS 観測・データ収録にご協力いただきました。京都大学防災研究所の松尾成光技官、平野憲雄技官、細 善信技官には、一連の観測に必要な器具の製作や観測への参加でご協力いただきました。洋上試験では以下の方々にお世話になりました：和歌山県水産試験場の田中嘉治場長、渡辺勇二郎総務研修部長、加来靖弘元場長、調査船「きのくに」乗組員の方々、鳥羽商船高等専門学校の中村武史助教授、練習船「鳥羽丸」乗組員の方々、三重県水産技術センターの丹羽誠所長、調査船「あさま丸」乗組員の方々、三重県立水産高校の西岡清春教諭、実習船「はまゆう」乗組員の方々、静岡県水産試験場の幡谷雅之資源海洋研究室長、調査船「駿丸」乗組員の方々。三河湾での GPS 移動実験の際には、三谷漁業協同組合の小田恭三組合長、「光運丸」船主の竹内運利氏にご協力いただきました。また、東京大学生産技術研究所の浅田 昭教授および匿名の査読者からは有益な助言を頂きました。ここに記して感謝いたします。

文 献

- 浅田 昭・矢吹哲一郎 (2000): 海底音響基準ネット. 生産研究, 52, 293-296.
Asada, A. and Yabuki, T. (2001): Centimeter-level

- positioning on the seafloor. *Proc. Japan Academy*, **77**, 7-12.
- 安藤雅孝 (1998): 南海トラフ巨大地震の地震予知. 月刊地球, 号外, **20**, 71-76.
- Colombo, O.L. (2000): Speeding up filter convergence in high precision, very large area kinematic navigation. *IMA Hot Topics Workshop*.
- 藤本博巳 (1995): 海底精密音響測距: 水平方向の海底地殻変動観測. 海洋調査技術, **7**, 1-9.
- 藤本博巳・金澤敏彦・小泉金一郎・長田幸仁・三浦 哲 (2001): 海底地殻変動観測システムと音響測距. 月刊地球, **23**, 27-32.
- 松尾成光・平野憲雄・片尾 浩・安藤雅孝 (1999): 超音波を利用した精密音響測距装置の開発. 東京大学地震研究所技術報告, **5**, 65-73.
- 宮崎真一・畑中雄樹 (1998): 国土地理院 GPS 連続観測システムの概要. 気象研究ノート, **192**, 105-132.
- Spiess, F.N., Chadwell, C.D., Hildebrand, J.A., Young, L.A., Purcell Jr., G.H. and Dragert, H. (1998): Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies. *Phys. Earth Planes. Inter.*, **108**, 101-112.
- 田所敬一・山田卓司・佐藤一敏・安藤雅孝・片尾 浩・松尾成光・平野憲雄 (2000): 海底地殻変動観測システムの開発: (3) 実測例. 2000 年日本地震学会講演予稿集, C44.
- 辻井利昭・張替正敏・村田正秋 (1997): キネマティック GPS ソフトウェア KINGS の開発と伊豆諸島地域の地殻変動観測への適用. 測地学会誌, **43**, 91-105.
- 長屋好治・矢吹哲一朗・小野房吉・浅田 昭・田尻克之 (1994): 水路部における海底地殻変動観測への取り組み. 月刊地球, **16**, 309-314.
- 山田卓司・田所敬一・佐藤一敏・安藤雅孝 (2000): 海底地殻変動観測システムの開発: (2) 音響測距測定誤差の定量的評価. 2000 年日本地震学会講演予稿集, C43.
- (2001 年 4 月 16 日受付, 2001 年 6 月 14 日受理)