

## 船底トランスデューサによる航走海底地殻変動観測の評価（速報）

佐藤まりこ，浅倉宜矢，齋藤宏彰：航法測地室

### Evaluation of sailing seafloor geodetic observation using acoustic transducer on the bottom of the vessel (preliminary report)

Mariko SATO, Takaya ASAKURA, Hiroaki SAITO: Geodesy and Geophysics Office

#### 1 はじめに

海上保安庁海洋情報部では，東京大学生産技術研究所の技術協力の下，GPS／音響結合方式による海底地殻変動観測の技術開発及び海底基準点の展開を行っている（藤田，2006）（第1図）．海底基準点は，三陸沖から室戸沖までの太平洋側に十数点設置されており，当庁所有の中型測量船「明洋」及び「海洋」による繰り返し観測を実施している．これまでに，宮城県沖，福島県沖，東海沖等における定常的な地殻変動や2005年の宮城県沖の地震（M7.2）に伴う地殻変動を検出することに成功している（例えば，藤田，2006）．

しかしながら，我々の観測では，測量船の船尾に観測機器を搭載した約8mの支柱を組立て，漂流による観測を行うため（畝見，2004），測線のコントロールができない上に，測線間の移動に観測時間の約半分を費やさなければならず，全ての観測点に対して十分な観測頻度で観測できているとは言い難い．このため，観測の効率化を図ることが大きな課題の一つとなっている．

この課題を解決する最も有力な方法として，音響トランスデューサの船底装備による航走観測が考えられる．音響トランスデューサの船底装備は，観測初期の2001年後半から検討されていたものの，現存の測量船の空きスペースに設置することが難しく実現には至らなかった（畝見，2004）．そして，今般，畝見（2004）の方法とは異なるが，測量船「明洋」のナローマルチビーム測深機の代替に併せて音響ト

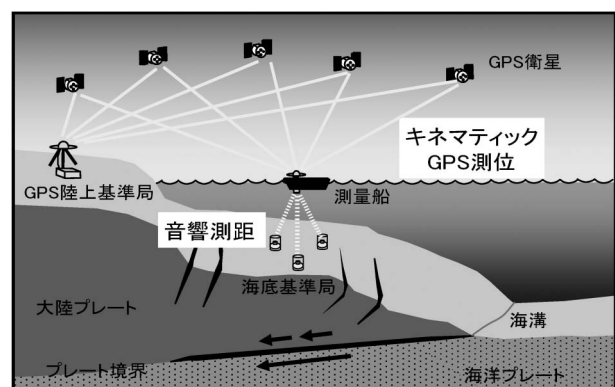
ランスデューサの船底装備を実現することができた（川井他，2009）．船底トランスデューサによる航走観測が実用化すれば，より短時間で高精度な観測が可能となり，更に信頼性の高い海底地殻変動データを取得することができると期待される．

本稿では，2008年3月と7月に実施した船底トランスデューサによるテスト観測の結果について速報する．

#### 2 音響トランスデューサの船底装備

音響トランスデューサの船底装備の詳細については，川井他（2009）にまとめられているので，ここではごく簡単に紹介する．従来の支柱式観測システムと今回改造した船底装備式観測システムを観測機器の写真とともに第2図に示す．

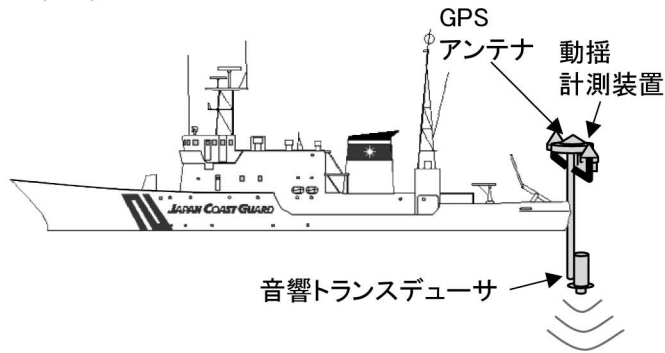
従来の支柱式観測システムでは，船尾に取り付け



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

(a) 支柱式観測システム(漂流観測)

(a-1) 観測イメージ



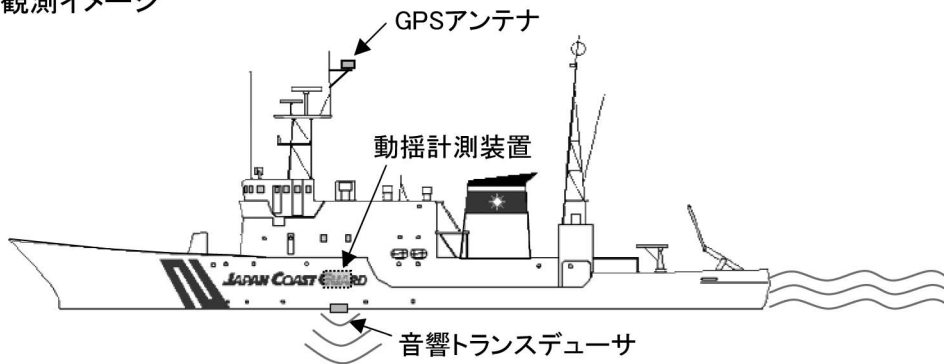
(a-2) 観測機器



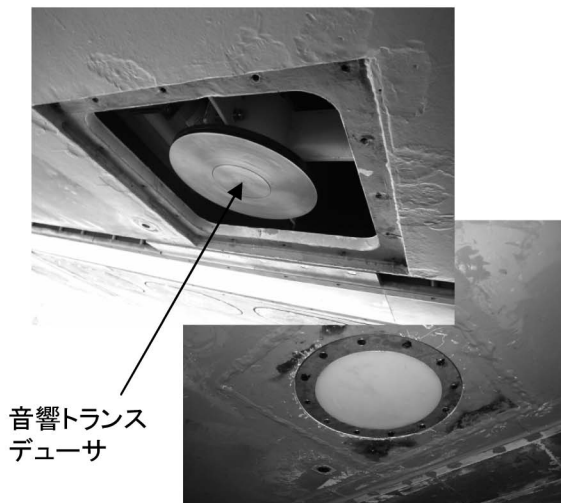
音響トランスデューサ

(b) 船底装備式観測システム(航走観測)

(b-1) 観測イメージ



(b-2) 音響トランスデューサ



音響トランスデューサ

(b-3) GPSアンテナ



GPSアンテナ

第2図 新旧観測システム：(a) 支柱式観測システム，(b) 船底装備式観測システム

Fig. 2 Old and new observation systems : (a) pole system, (b) hull system.

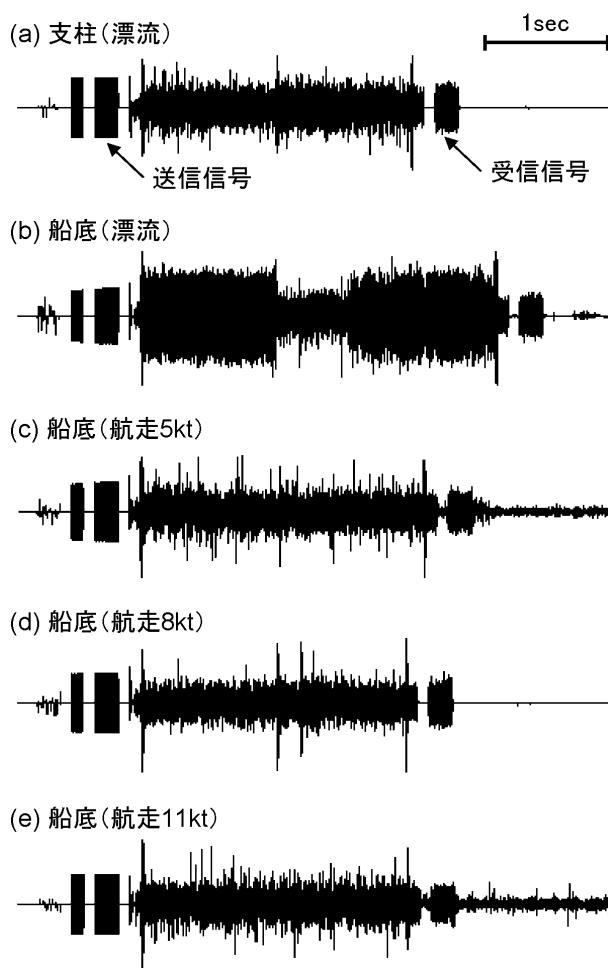
た約 8 m の支柱の上部に、測量船の位置を決定するための GPS アンテナと支柱の姿勢を把握するための動揺計測装置、支柱の下部に、音響トランスデューサを取り付けている。移動時には支柱に負荷がかからないよう、第 2 図 (a-2) のように音響トランスデューサを空中に引き上げて航行し、観測時には支柱を伸ばして音響トランスデューサを海中に入れ、漂流による音響測距観測を行っていた。この際、音響トランスデューサの上げ下げは人力で行っており、甲板作業の負荷も大きかった (畝見, 2004)。

そこで、今般の音響トランスデューサの船底装備に伴い、観測機器の設置場所を第 2 図 (b) のように変更した。今まで支柱上部に取り付けられていた GPS アンテナは測量船の前部マストに、動揺計測装置は船体中央 (重力計室) に常設した。また、音響トランスデューサは第 2 図 (b-2) のように船底に固定されており、設置後はカバーで覆い、中は清水で満たされている。これにより、観測の度に行っていた支柱の組み立てや、測線の移動時の音響トランスデューサの上げ下げの作業がなくなり、従来よりも人手をかけずに観測を行うことができるようになった。なお、GPS アンテナと音響トランスデューサの位置関係は、測量により求められている (川井他, 2009)。

### 3 船底トランスデューサによる音響測距テスト

2008年3月末、「相模湾」海底基準点において、船底トランスデューサを用いた2日間の音響測距テスト観測を行った。海況は2日もとも良好であった。テスト観測の目的は、従来と同じ漂流の状態でも音響測距観測を行い、得られた音響波形を確認することと、どのくらいの速力まで、航走して測距が可能なのかを調べることである。

第3図に船底トランスデューサによる音響波形 (測量船の速力：漂流, 5ノット, 8ノット, 11ノット) の例を、第4図にそれぞれの波形の受信信号の立ち上がりの拡大図と相関処理結果を示す。相関処理には、音響解析ソフト「sas ver.1.2.0」(富山, 2003) を使用した。また、参考として、従来の支柱式漂流観測の音響波形の例も併せて示した。第3図

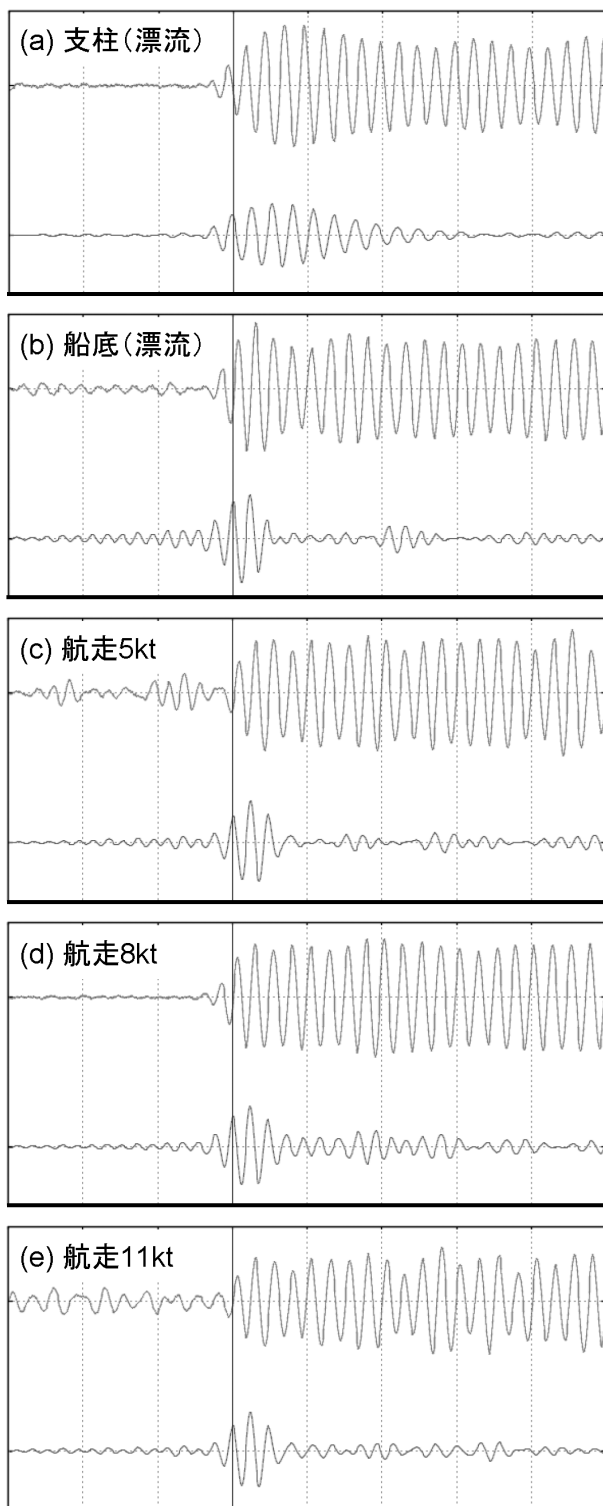


第3図 音響波形の例：(a) 支柱、漂流、(b) 船底、漂流、(c) 船底、航走 5 kt、(d) 船底、航走 8 kt、(e) 船底、航走 11 kt

Fig. 3 Examples of acoustic signal: (a) pole, drift, (b) hull, drift, (c) hull, 5 kt, (d) hull, 8 kt, (e) hull, 11 kt.

で、送信信号の前にある波形は海底局固有の識別信号、送信信号と受信信号の間の波形は、オートゲインコントロール機能により増幅された背景雑音と海底局からのヘッダー信号 (後部の約 102 ms) である (成田他, 2005)。したがって、第3図の各図の縦軸は同じスケールで描かれていないことに注意されたい。

音響測距テスト観測は、最大11ノットの速力まで行われたが、第3図、第4図から明らかのように、11ノットでも受信波形が明瞭に捉えられており、相関処理結果も漂流観測のときと比べて劣化している様子は見られない。これにより、良好な海況下であれば、11ノットで航走しながらでも音響測距観測ができることが確認できた。



第4図 受信波形と相関処理結果：(a) 支柱，漂流，(b) 船底，漂流，(c) 船底，航走 5 kt，(d) 船底，航走 8 kt，(e) 船底，航走 11 kt  
 Fig. 4 Received signals (upper) and results of cross correlation (lower) : (a) pole, drift, (b) hull, drift, (c) hull, 5 kt, (d) hull, 8 kt, (e) hull, 11 kt.

#### 4 船底トランスデューサによる局位置推定テスト

##### 4.1 テスト観測の概要

2008年3月の音響測距テストで、漂流・航走ともに船底トランスデューサによる音響測距観測が可能であったことを受け、2008年7月、「相模湾」、「東海沖1」及び「東海沖2」海底基準点において、海底局の位置推定のためのテスト観測を行った。テスト観測の目的は、従来の支柱式漂流観測、船底トランスデューサによる漂流観測及び航走観測という観測方法の違いによる局位置推定結果への影響と、その安定性を調べることである。

テスト観測で取得したデータを第1表に示す。

第1表 2007年7月の観測データ

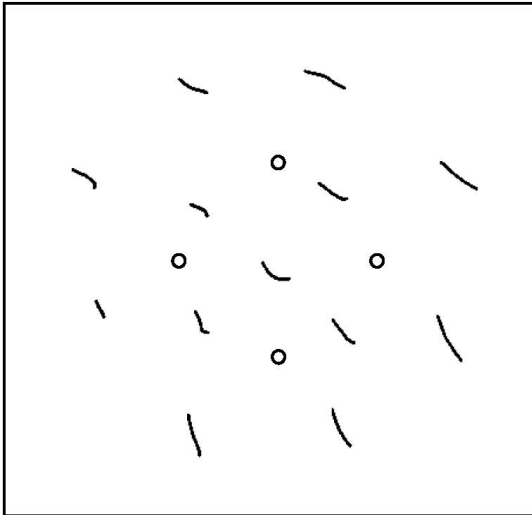
Table 1 List of numbers of data obtained in July, 2007.

観測点	支柱式漂流観測		船底式漂流観測		船底式航走観測	
	セット	データ	セット	データ	セット	データ
相模湾	4	4,137	4	4,146	4×2	10,027
東海沖1	-	-	-	-	4	5,744
東海沖2	4	5,524	-	-	4	5,768

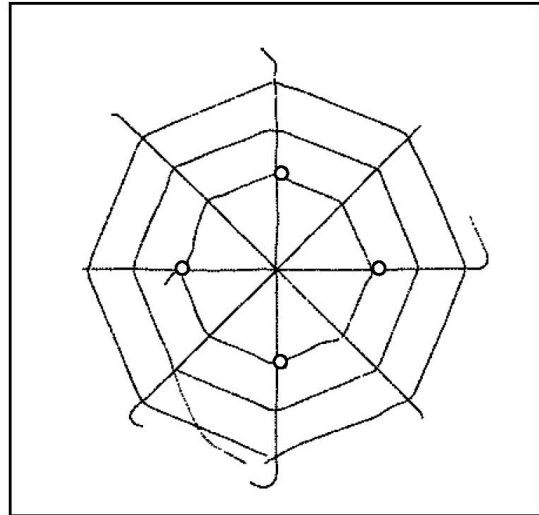
「相模湾」海底基準点では、支柱式漂流観測及び船底式漂流観測を4セットずつ、船底式航走観測を4セット×2回（計8セット）行った。支柱式漂流観測と船底式漂流観測は同時に行うことができないため、一測線ずつ交互に行った。「東海沖2」海底基準点では、支柱式漂流観測と船底式航走観測をそれぞれ4セット行った。「東海沖1」海底基準点では、観測日数の都合により、航走観測のみ4セット行った。ここで、「セット」とは、海底基準点を構成している複数の海底局に対してバランス良く観測するための観測量の最小単位（通常約1300ショット）であり、安定した局位置推定を行うため、通常、1海域につき、1度の航海で、4セットのデータを取得することを目標としている。

漂流観測と航走観測によるデータ配置（1セット）の例を第5図に示す。漂流観測では、流れがある場合には、流れ方向の数本の測線で同図の海域を覆うように流し、流れがない場合には、第5図(a)のような13点で約100ショットずつの測距観測を行うことにより、海底局に対してできるだけデータが

(a) 漂流観測



(b) 航走観測



第5図 音響測距データの配置例：(a) 漂流観測，(b) 航走観測。○は海底基準局を示す。

Fig. 5 Examples of the distribution of acoustic ranging data : (a) drifting observation, (b) sailing observation. Open circles show seafloor stations.

偏らないように努めている。一方、航走観測では、測線をコントロールできるため、意図的に均質になるよう測線を検討した。今回のテスト観測では、放射状の観測と、中心付近のデータ集中を緩和するための外周の観測を組み合わせる方法を採用した（第5図 (b)）。このほか、海底地形調査のようにジグザグに航走しながら空間的に均質にするという方法も考えられるが、その場合、東西方向又は南北方向に観測の時間差ができてしまい、海中の音速構造、風、流れ等の周辺環境の変化が局位置に悪影響を与える恐れがある。今回採用した「放射状+外周八角形」の手法は、時間的にも空間的にも、できるだけ同じ観測条件で海域全体を埋めるよう工夫したものである。第5図から明らかなように、漂流観測に比べ、空間的にはるかに均質かつ連続的にデータが取得できるようになったことが分かる。

また、航走観測の速力は、測線のパターンを決めると、1セットあたりのデータ数（1300ショット）、ショット間隔（10秒又は12秒）及び海底基準点の水深から自ずと決まり、「相模湾」（水深約1340 m）と「東海沖2」（水深約1560 m）では5.5ノット、「東海沖1」（水深約2400 m）では8ノットとなった。同様の考え方で、他の海底基準点における速力を計算したところ、全ての海底基準点について5～8

ノットの範囲にあり、この速力は測量船の運航の観点から見ても適当だと思われる。

なお、航走観測の測線配置及び速力については、今後の運用及び解析結果を見つつ、必要に応じて改善していきたい。

#### 4.2 データ解析の結果及びその評価

音響波形解析の結果については3と同様であるためここでは省略し、本節では、測量船の前部マストに設置したGPSアンテナによるキネマティックGPS (KGPS) の結果と海底局の局位置推定結果について報告する。なお、KGPS解析にはIT ver.3.5 (Colombo, 1998)、局位置解析にはSGOBS ver.3.3.2 (藤田他, 2004) を使用した。

##### 4.2.1 KGPSの結果

従来の支柱式観測では、GPS測位用のアンテナを船尾の支柱の上部に設置していたが、音響トランスデューサの船底装備に伴い、船底式観測システムでは、GPSアンテナを前部マストに設置した。いずれの場合においても、船体構造物によりGPS衛星からの搬送波が遮られる可能性があることに変わりはないが、航走観測中のマストについては天候や海況による船体振動等の影響を大きく受ける可能性があ

る。

今回のテスト観測では、我々が通常行っている高さ成分の評価（藤田・矢吹，2003）を見る限り，測位結果に特段の異常はなく，大きな問題はないと判断されるため，ここではこれ以上詳述しないが，測位結果に影響を及ぼす可能性がある要因については，今後も注意深く検討していきたい。

#### 4.2.2 局位置推定結果

##### (1) 観測方法の違いによる局位置解の安定性

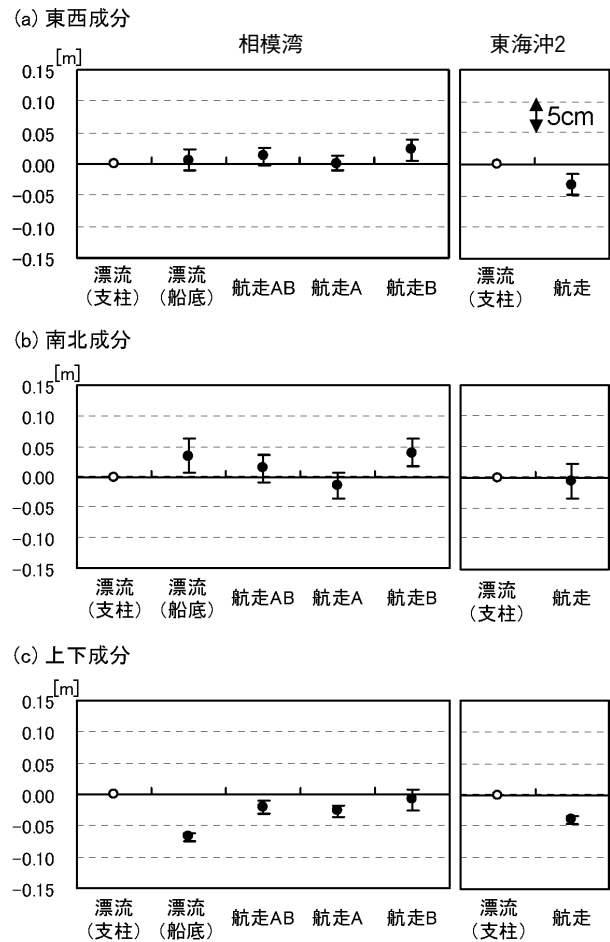
漂流観測と航走観測の両方を実施した「相模湾」及び「東海沖2」海底基準点について，それぞれの観測方法による局位置推定結果を比較し，観測方法の違いによる局位置解の安定性を評価した。

支柱式漂流観測，船底式漂流観測，船底式航走観測により推定された局位置を第6図に示す。第6図の縦軸の値は，それぞれの海域における支柱式漂流観測の結果を基準（ゼロ）として，相対値をプロットしている。エラーバーは，海底局ごとの局位置の差の自乗平均値であり，海底局間の相対位置関係のばらつきを示している（藤田他，2004）。「相模湾」海底基準点における船底式航走観測は4セットの観測を2回行ったので，それぞれの結果を「航走A」，「航走B」とし，これらをまとめた8セットを一括して解析した解も「航走AB」として併せて示した。

図から，支柱式漂流観測と船底式漂流観測，航走観測の差はいずれも5 cm以内である。このばらつきは現在の位置決定精度の範囲内だと考えられ，支柱式/船底式，漂流/航走といった観測形態による有意な差は見られない。

一方，「相模湾」海底基準点の航走A，航走Bは，同じ観測方法による局位置解であるにもかかわらず，南北成分に5 cm程度の差が見られる。このばらつきは，現在の観測精度の範囲内と言えなくはないが，今後の検討課題として，漂流観測と航走観測の観測期間の違いについて，以下に指摘しておく。

従来の漂流観測では，1日で1～2セットしか観測できなかったため，4セット解は，複数日（通常2～4日以上）にわたるデータを用いて導出していた。これにより，例えば音速度構造の空間不均質等



第6図 観測方法の違いによる局位置推定結果の比較（基準：支柱式漂流観測）：(a) 東西成分，(b) 南北成分，(c) 上下成分

Fig. 6 Comparison of the positioning results due to differences of observation methods : (a) EW component, (b) NS component, (c) UD component for the result of drifting observations.

が，その複数日にわたる条件の違いにより，統計的に相殺されるという効果も期待された（石川他，2006）。しかしながら，航走観測では，観測効率が向上し，4セットデータを16時間程度で取得できるようになったことにより，逆に，音速度構造を含む種々の不均質な要素によるバイアス的な誤差が，位置推定結果に表れてしまう可能性がある。今後，このような観点から，航走観測をあえて複数日に分けて行う方法等についても評価，検討していきたい。

##### (2) サブセット解による局位置解の安定性

次に，上記4セット解を一つの単位と考え，これをそのデータの一部を使用して導出した解（ここで

は「サブセット解」と呼ぶ)と比較することにより、漂流観測と航走観測の局位置の安定性を評価した。評価には、今回のテスト観測で得られた局位置解に加え、2006年度及び2007年度に「相模湾」、「東海沖1」及び「東海沖2」海底基準点で得られた支柱式漂流観測によるデータから求められた局位置解を使用した(第2表)。比較に用いたサブセット解は、3, 2, 1セットのデータを使用して求めた局位置である。各観測の4セット解を基準(原点)とした時のサブセット解の局位置推定結果を、第7図(水平成分)及び第8図(上下成分)に示す。

第7図及び第8図から、漂流観測、航走観測ともにセット数が増えるにつれて、4セット解に対する局位置のばらつきが小さくなっていることが分かる。

さらに注目すべきこととして、航走観測は、漂流観測に比べて、ばらつきの度合いが明らかに小さいという結果が得られた。

まず、第7図(a)~(c)から分かるように、漂流観測のサブセット解では、セット数が少なくなるにつれ、4セット解との差が10cmを超えるものが多くなり、1セット解では20cmを超える場合もある。これまでは、このような検討に基づき、安定した観測結果を得るためには1海域あたり4セット分のデータが必要であるとして観測を行ってきた。しかしながら、第7図(d)~(f)より、航走観測では、1セット解であっても、その差が10cm以内に収まっていることが分かる。このように、航走観測の実現により、データの空間的配置バランスが向上し、従来よりも少ないセット数でも安定した観測結果が得

られるようになった。

また、第8図より、上下成分(高さ)についても、かなりの安定性向上が見られることから、今後我々の観測手法による高さ変動検出の可能性をも期待させる。

7月のテスト観測では、比較的海況が良かったため、今後様々な海況での結果をしてみる必要はあるが、サブセット解の安定性の向上は、更なる観測時間の短縮の可能性を示唆していると考えられる。

### 5 航走観測についての展望

2008年3月及び7月のテスト観測結果から、良好な海況下では船底トランスデューサによる航走観測は実施可能で、従来よりも安定した局位置解が得られることが示された。

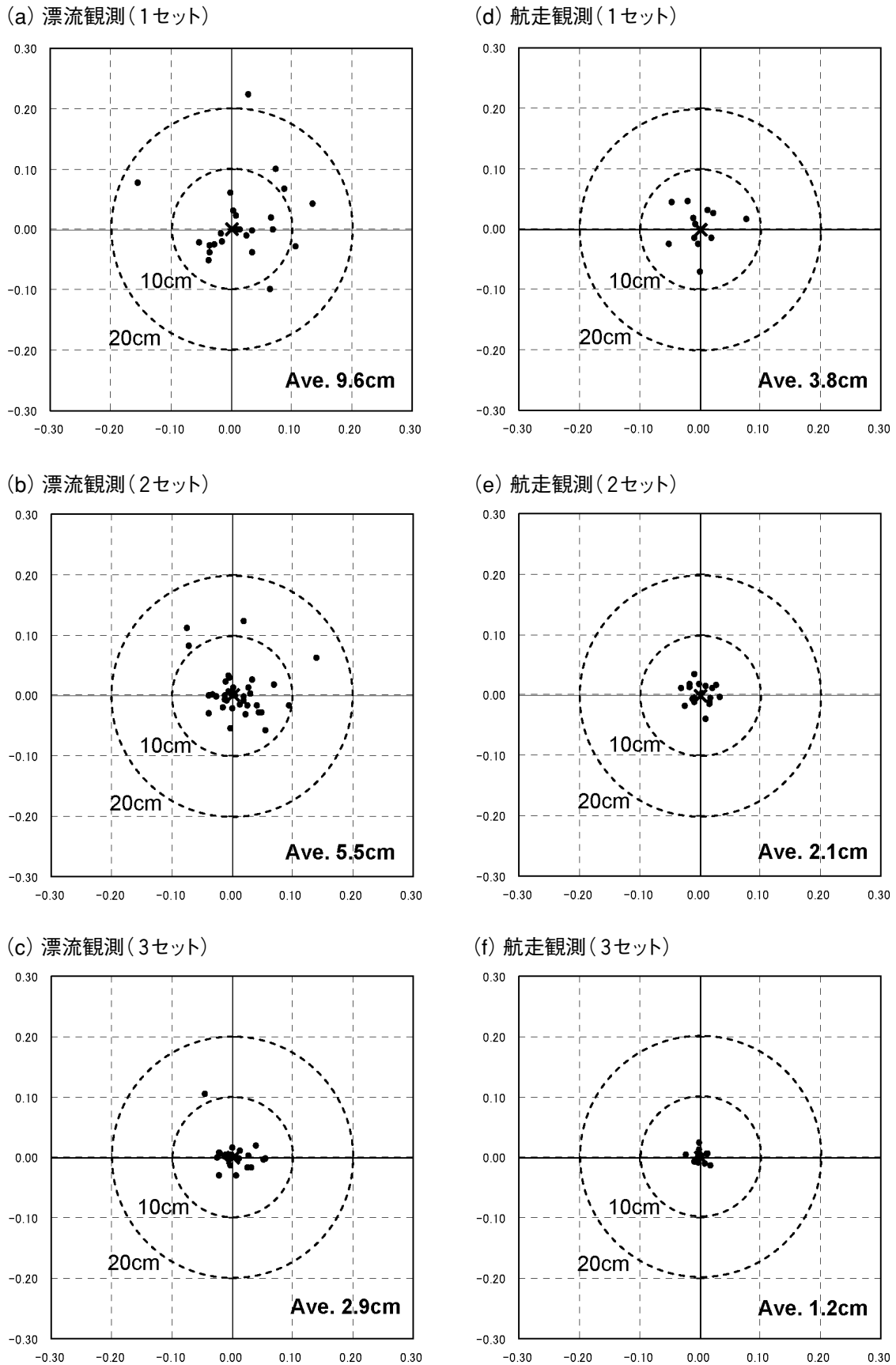
航走観測の実現により、昼夜問わず24時間観測を行うことができ、測量船の行動を有効に使うことができるとともに、測線間の移動(トランスデューサの上げ下げを含む)に要していた時間を観測にあてることができるため、1海域あたりの観測時間を従来の16時間×2日(計32時間)から16時間に低減することができる。ただし、先に述べたように、連続した16時間で観測を終えてしまうことは、海中音速構造の空間的不均質や一方向からの風が観測時間を通してあった場合、海底局の局位置推定結果にバイアス的な誤差を与える可能性があるため、観測時間の設定については今後の観測データを見つつ、慎重に検討する必要がある。

また、航走観測では、測線を自由にコントロールすることができるため、以前よりも海底局に対して

第2表 サブセット解の安定性評価に使用した観測データ

Table 2 List of numbers of data used the stability evaluation of positioning results using data subsets.

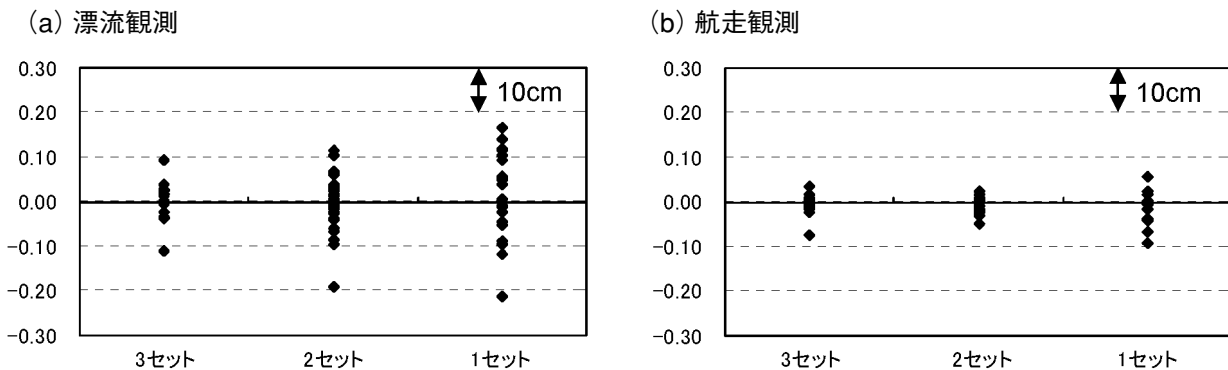
漂流観測				航走観測			
観測年月	観測点	セット数	データ数	観測年月	観測点	セット数	データ数
2006年8月	東海沖1	4	5,270	2008年7月	相模湾	4×2	10,027
2007年9月	相模湾	4	7,816	2008年7月	東海沖2	4	5,768
2008年1月	東海沖2	4	5,336	2008年7月	東海沖1	4	5,744
2008年4月	相模湾	4	3,736				
2008年7月	相模湾	4	4,137				
2008年7月	東海沖2	4	5,524				



第7図 サブセット解による水平成分の局位置推定結果 (基準: 4セット解): (a)~(c) 漂流観測, (d)~(f) 航走観測

Fig. 7 Horizontal positions using data subsets relative to those using all data: (a)~(c) drifting observation, (d)~(f) sailing observation.





第 8 図 サブセット解による上下成分の局位置推定結果（基準：4 セット解）：(a) 漂流観測，(b) 航走観測

Fig. 8 Vertical positions using data subsets relative to those using all data : (a) drifting observation, (b) sailing observation.

バランスよくデータを取ることが容易になった。海底地殻変動観測の主要誤差要因である海中音速構造の誤差は、観測データのバランスを良くすることで水平位置への影響をかなり低減することができるため（佐藤・藤田，2004），航走観測の実現により，海中音速構造の誤差を受けにくくなり，海底局の局位置決定精度が向上すると期待される。ただし，海中音速構造の空間的不均質による影響は残ってしまうため，将来的に更なる精度向上を目指すためには，この影響を低減させるような対策が必要である。

### 6 おわりに

音響トランスデューサの船底装備により，観測初期から念願であった航走観測が可能となりつつある。評価に用いたデータが少ないため，今後も海況や海域による影響を注意深く評価していく必要があるが，航走観測の実現により，従来よりも短時間で安定した観測結果が得られるようになると期待される。これは，1 海域あたりの観測回数の増加と観測精度の向上を意味しており，海底地殻変動観測の大きな進展が期待される。今後の航走観測データの蓄積により，最適な航走観測手法を確立し，更なる効率化・高精度化を目指していきたい。

### 謝辞

船底トランスデューサのテスト観測は，航法測地室衛星測地担当職員，測量船「明洋」乗組員及び東

京大学生産技術研究所浅田研究室の各氏の協力の下に行われたものであり，記して感謝いたします。24 時間観測に伴う局位置解析ソフトの改修にあたり，松本良浩氏にご尽力いただいたので感謝いたします。航走観測の評価及び本稿の作成にあたり，藤田雅之氏には大変有意義な助言をいただいたので，深く感謝いたします。

### 参 考 文 献

Colombo, O. L: Long-Distance Kinematic GPS, in "GPS for Geodesy 2nd Edition", Springer 537-568, (1998).

藤田雅之，矢吹哲一朗：海底地殻変動観測における K-GPS 解析結果の評価手法について，海洋情報部技報，**21**，62-66，(2003)。

藤田雅之，佐藤まりこ，矢吹哲一朗：海底地殻変動観測における局位置解析ソフトウェアの開発，海洋情報部技報，**22**，50-56，(2004)。

藤田雅之：GPS／音響測距結合方式による海底地殻変動観測～海上保安庁の取り組み（レビュー）～，海洋情報部研究報告，**42**，1-14，(2006)。

石川直史，藤田雅之，松本良浩：海底局位置決定に与える海中水温構造の影響，海洋情報部研究報告，**42**，15-29，(2006)。

川井仁一，浅倉宜矢，松本良浩：測量船「明洋」への海底地殻変動観測用送受波器の船底装備に

- ついて, 海洋情報部技報, 27, 50-55 (2009)
- 成田誉孝, 畝見潤一郎, 望月将志: 海底地殻変動観測における機器の現状とその運用について, 海洋情報部技報, 23, 53-60, (2005).
- 佐藤まりこ, 藤田雅之: 海底地殻変動観測における海中音速誤差の局位置への影響について, 海洋情報部技報, 22, 42-49, (2004).
- 富山新一: 海底地殻変動観測における音響解析, 海洋情報部技報, 21, 67-72, (2003).
- 畝見潤一郎: 海底地殻変動観測の現状と諸問題について, 海洋情報部技報, 22, 33-41, (2004).