

GPSによる浮体運動計測技術 (第3報：ダイナミックディファレンシャルGPS)

工藤 君明^{*1} 北野 義信^{*2}

GPSは人工衛星による新しい電波測位システムである。衛星からはLバンドの2つの周波数の電波が送信され、擬似雑音符号と呼ばれる乱数的な暗号の形で軌道情報等が送られている。地上の管制局はGPS衛星の軌道や原子時計を監視し、軌道情報を更新している。

実用衛星が打ち上げられるに伴い、利用者制限という測位精度の劣化が顕在化している。この利用者制限は衛星時計の精度劣化と衛星軌道情報の操作によって行われている。しかし、これによる誤差は陸上の受信機に共通であり、2点間で同時受信することにより大部分は消去できる。一方の受信機を既知点に置いて、衛星－受信機間の測距誤差を推定すれば、他点の位置を精度良く計測できることが期待できる。

本研究では、沖合い約3kmの浮体の水平運動を計測するためにダイナミックディファレンシャルGPS (dGPS) を開発し、従来の手法と比較検討した。1点測位では数十mの誤差となるが、dGPSでは2m以下の精度が得られた。また、本論では利用者制限による計測データの劣化特性を詳細に検討する。

キーワード：GPS, 測量, 1点測位, 相対測位, ディファレンシャルGPS, 擬似距離, 利用者制限

Positioning System for Moving Floater by GPS (3rd Report : Dynamic Differential GPS)

Kimiaki KUDO^{*3} Yoshinobu KITANO^{*4}

The GPS is a satellite-based positioning system currently under development. Each GPS satellite transmits two L-band radio frequencies which are modulated by two pseudo random noise codes and navigation message. Both the carrier frequencies and the modulations are controlled by on-board atomic clocks, the behavior of which is monitored and determined by the land-based control stations.

*1 海洋開発研究部

*3 Marine Research and Development Department

*2 日立造船情報システム(株)

*4 Hitachi Zosen Information Systems Co., Ltd.

Since the operational Block II satellites are launched, the intentional degradation of positioning accuracy, called SA (Selective Availability) becomes remarkable. The SA is implemented by a control of the broadcast ephemeris data and/or dithering of the satellite clocks. The errors caused by SA, however, are almost common at receivers not so far separated on the ground. If a reference receiver is fixed at the already known point, it is possible to estimate the pseudorange errors of satellites. So the pseudorange errors at unknown point can be eliminated and the position can be determined accurately.

In this report, dynamic differential GPS (dGPS) is developed to measure horizontal motions of the floating platform and compared with the results using the conventional measuring method. Point positioning of GPS has several ten meters of errors, but the accuracy of 2 m or less is obtained by dGPS.

The characteristics of pseudorange errors degraded by SA are examined in full detail.

Key word : GPS, survey, point positioning, relative positioning, differential GPS, pseudorange, Selective Availability

1 はじめに

1989年2月に本格実用衛星であるBlock II衛星が打ち上げられ、1990年6月現在Block I衛星6個、Block II衛星7個が配備され、3衛星以上の観測は1日17時間程度できるようになった。測位精度は、衛星配置が改善されたことにより、測量で用いられている干渉測位法では1ppm以下の精度が得られ、1点測位法においても約10mの精度で絶対位置を知ることができるようになった¹⁾。

しかし、1990年3月25日より、以前より予告されていたSA (Selective Availability: 利用者制限)が発動され、一般利用者の測位精度が劣化させられた。干渉測位法では大きな精度劣化はみられないが²⁾、1点測位ではSAの影響により、平均位置、変動成分ともに40m程度、またはそれ以上の誤差があることを確認した。

筆者らは、移動体の高精度測位について、SAが発動された場合の精度維持を目的に相対測位法による手法の開発を行っている¹⁾³⁾。移動体の位置を相対測位法を用いて求める方法として、ディファレンシャルGPS⁴⁾やトランスロケーション法⁵⁾等が研究開発されている。トランスロケーション法は複数の観測局で得られたデータを観測終了後持

ち寄り、擬似距離の二重差を観測量として解析処理を行うものである。これに対し、ディファレンシャルGPSでは、既に位置の分かっている基準局において、基準局と複数衛星との擬似距離誤差を推定し、これを移動局に送信する。移動局ではこの誤差情報をもとに、1点測位法と同様にリアルタイムで位置、及び速度を得ることができるという特長がある。ディファレンシャルGPSは主に港湾の運航管理等に開発されたものである。一方、測地学の分野では、ディファレンシャルという用語は、単に相対測位という一般的な意味しかもたず、用語に多少混乱がある。そこで、海洋科学技術の分野でのGPS相対測位法を用いた解析処理手法をダイナミックディファレンシャルGPS (dGPS) と呼ぶことを提案する。

本稿では、SA発動による1点測位精度の劣化、擬似距離データの特性を調査したので、その結果を報告する。さらに、dGPSを用いて山形県鶴岡市由良沖に係留されている浮体式海洋構造物ポセイダンの運動を計測した結果について報告する。

2 GPS 基準点

2.1 由良基準点の設置

相対測位法を用いて移動体の位置を求めるためには、基準点として位置が正確に分かった点が必要である。浮体式海洋構造物ポセイドンが設置されている由良周辺には、GPS観測に適する既知点はなく、新たに「由良基準点」を設けることにした。基準点の設置場所として、海洋科学技術センターの由良実験本部は南側に山が迫っているため上空の視通が悪く設置することはできない。そこで、視通の開けていること、実験本部付近で、夜間や雨天にも観測が容易に行えることを考慮し、山形県漁業協同組合由良支所屋上に設置することにした（写真 1）。「由良基準点」の座標を求めるために、漁協より約 8km 離れた場所にある三等三角点「千刈田」を既知点として、GPS基線解析により「由良基準点」の位置を求めた。「千刈田」の座標は東京測地系で求められている三角点成果をGPSが準拠しているWGS84系に変換して用いた。観測に用いたGPS受信機は、「千刈田」にTrimble 4000SL L1一周波受信機、「由良基準点」にTrimble 4000SD L1, L2 二周波受信機である。観測は1989年9月7日から2日間、衛星配置の良い時間帯を選び、約5時間30分計測した。解析はTrimble社の提供する解析ソフトウェアTRIMVEC™を用いた。4000SLは一周波受信機で

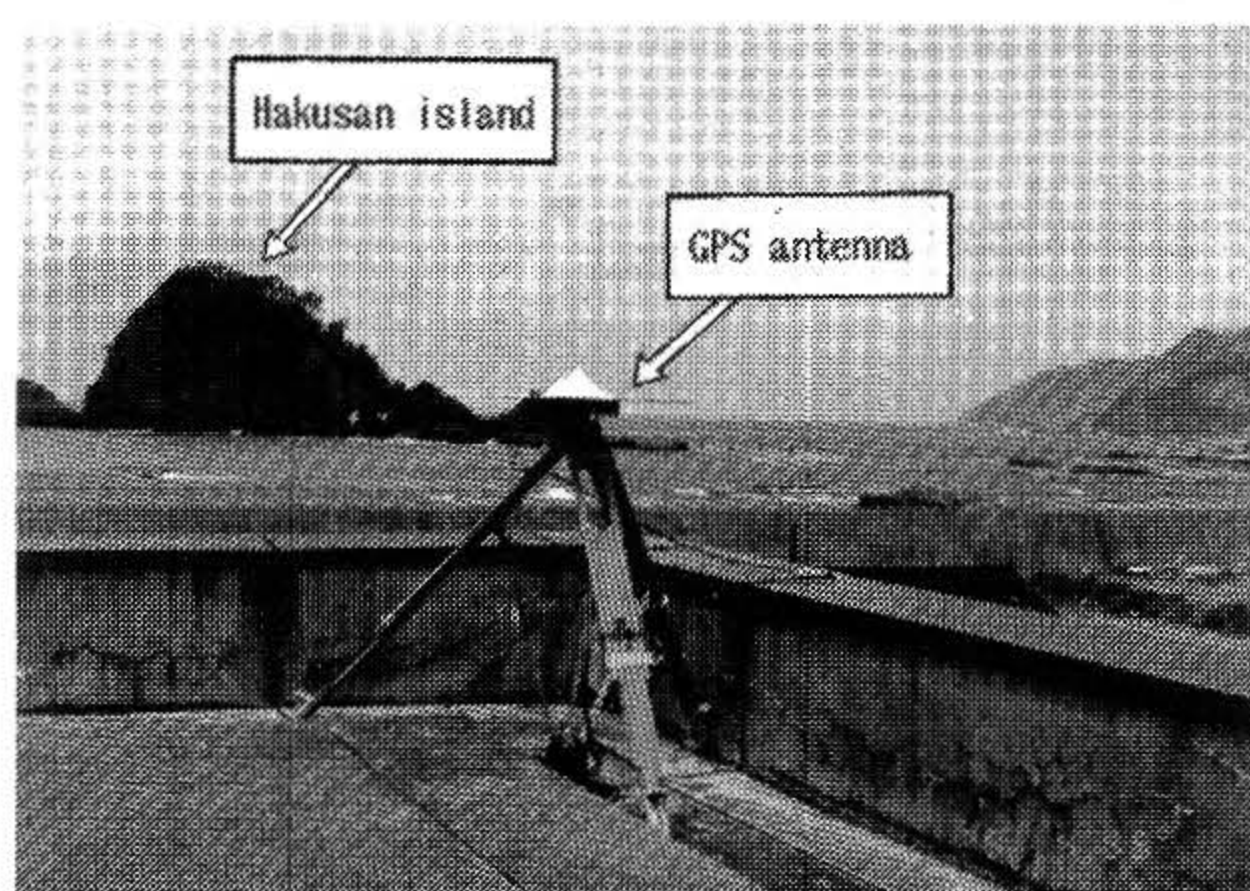


写真 1 山形県漁業協同組合由良支所屋上のGPSアンテナ

Photo 1 GPS antenna at the Yura branch of fishing cooperative of Yamagata pref.

あるので、L1一波の解析しか行うことができないが、約 10km 程度の基線長では、L1, L2 二周波の計測結果と同程度の精度で求められ、L1一周波の解析でも十分であることが確認されている¹⁾。2日間の平均をとり、「由良基準点」の座標を決定した。

2.2 主要基準点の座標

「由良基準点」をもとに、主要基準点として、「実験本部」、「赤灯台」、「倉泉岩灯標」の測位を行った（図 1）。まず、「由良基準点」と「赤灯台」のGPS基線解析により「赤灯台」の位置を求め、「由良基準点」、「赤灯台」を与点として、光波測距儀（EDM: Electro-optical Distance-Meter）により「実験本部」と「倉泉岩灯標」までの距離、角度を計測し位置を求めた。表 1 に以上の主要基準点の座標を示す。GPSによる座標は、WGS84系の緯度、経度、楕円体高さ（楕円体座標）が求められるので、これを東京測地系における楕円体座標に変換している。さらに、EDMによる平面測量の結果と結合するために、楕円体座標を平面に投影した日本平面直角座標系のX-Yに変換している。日本平面直角座標系は全国を19の地域に分割し、それぞれの地域に原点を設け、原点を通る子午線をX軸、これに直行する方向にY軸をとった平面直角座標系で、北、東を正の向きとして定義されている²⁾。なお、山形県は第10系に属している。EDMで計測した距離、角度よりX-Y平面上の座標を求め、東京測地系の緯度経度に変換している。

浮体式海洋構造物ポセイドンの位置は、実験本部にEDMを設置し、「倉泉岩灯標」を角度の基準としポセイドンまでの距離、水平角を計測した。海象、気象のおだやかな時期には、ポセイドンはほぼ一定の位置にあり、年間を通しての平均値をポセイドン基準位置としている³⁾。浮体運動の計測結果はdGPSとEDMの結果を比較するために、第10系原点を平行移動しポセイドン基準位置をローカルな原点とした平面直角座標系で表現している。

3 SA発動による1点測位精度の劣化

3.1 1点測位の精度

GPSは開発当初C/Aコード（Coarse and Acquisition）による1点測位は約100mの精度と

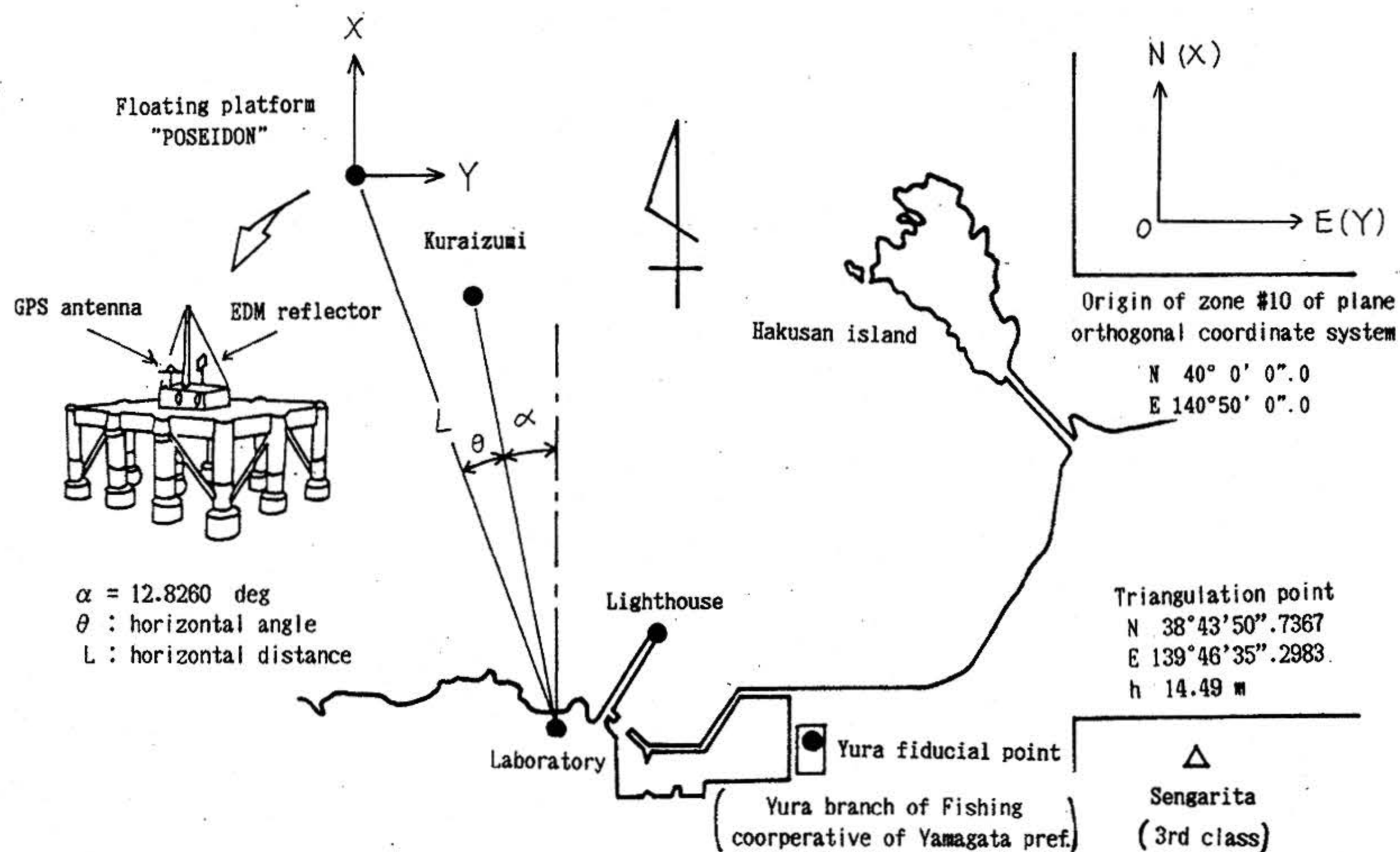


図 1 GPS, EDMにより測量した基準点位置

Fig. 1 Locations of the major marked points using GPS and EDM

表 1 主要基準点の座標

Table 1 Coordinates of major marked points

point name	WGS84	Tokyo datum	Plane orthogonal coordinate system
Yura fiducial point	N 38°43' 5".701 E 139°40' 53".313 h 66.974 m	N 38°42' 55".392 E 139°41' 5".230 h 11.921 m	X -141,964.991 m Y -99,869.792 m
Lighthouse	N 38°43' 10".913 E 139°40' 39".147 h 66.270 m	N 38°43' 0".605 E 139°40' 51".129 h 11.192 m	X -141,799.517 m Y -100,209.710 m
Laboratory	—	N 38°42' 54".888 E 139°40' 44".383	X -141,974.085 m Y -100,375.125 m
Kuraizumi	—	N 38°43' 17".583 E 139°40' 37".402	X -141,272.236 m Y -100,534.916 m
POSEIDON reference point	—	N 38°44' 14".196 E 139°40' 1".206	X -139,515.701 m Y -101,386.921 m

WGS84 h : ellipsoid height

Tokyo datum h : height above mean sea level

予想されていたが、試験の結果、測位精度は20～40m、速度で毎秒1m以下となることが判明した。そこで、米国政府はそのような測位情報を誰にでも利用できるようにすることの可否を見直すことになり、SAの導入が検討されてきた。本格実用衛星であるBlock II衛星では、精度を操作できるようにし、キーを持った特定の利用者にだけ、10～20mの測位精度が得られるようにしている。SAは衛星より送信されている軌道情報の誤差を大きくすること、また衛星時計に揺らぎを与えること、等の方法で測位精度を劣化させるといわれている⁸⁾。

1990年3月25日より、以前より予告されていたSAが発動され、測位精度が劣化させられた。図2にSA発動前後の1点測位の精度を示す。1点測位結果はGPS受信機より出力される値を用いている。観測は「由良基準点」で行い、2章で述べた成果からの誤差を表示している。SA発動前は、平均

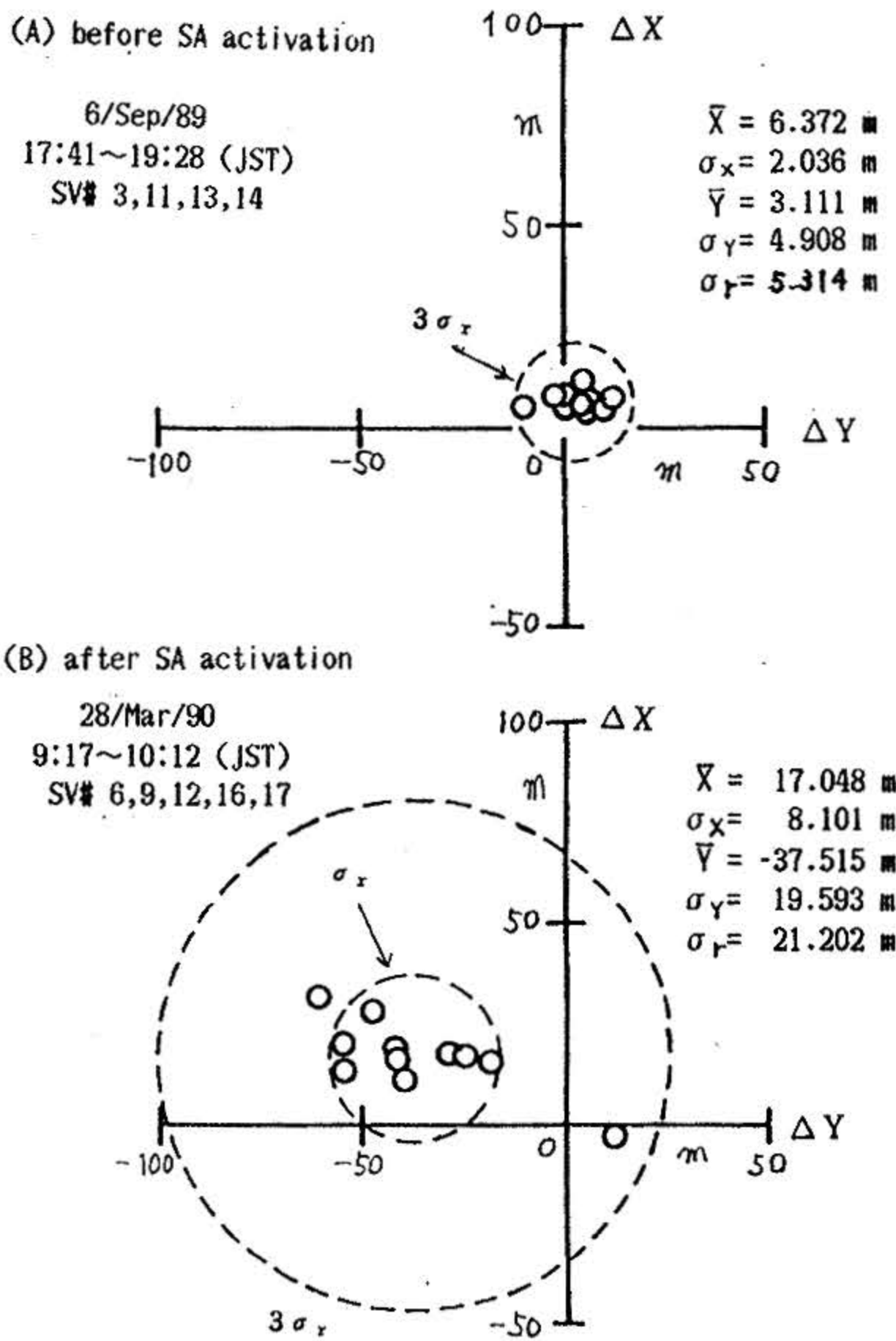


図2 SA発動前後の1点測位の精度
Fig. 2 Point positioning accuracy before and after SA activation

位置で5～6 m、変動成分が10m程度であった。しかし、SAが発動された1990年3月28日の結果は、平均位置が20～40mずれ、さらに、変動成分も40m程度となっている。

3.2 擬似距離データの特性

1点測位では衛星と受信機間の擬似距離を計測し位置を求めている。SAの発動により擬似距離データがどのように変化し測位結果に影響を及ぼしているのか、既に位置の分かっている「由良基準点」を利用し調査した。データサンプリング間隔は受信機のデータ更新能力より3秒とし、擬似距離と時刻データを記録している。

GPS衛星は22,000km上空を毎秒4kmの速度で移動しているため、擬似距離データの数値の桁は大きくなる。これに対し、擬似距離の変動成分は数十mである。そこで、放送暦より衛星位置を推定して受信機－衛星間の距離を計算して求めた値と観測によって得た擬似距離との差（O－C：観測値－計算値）をとり、擬似距離の変動成分を拡大して調査する。

衛星iの座標を（X_i, Y_i, Z_i）i=1, N（N：観測された衛星数）、基準局Rの座標を（X_r, Y_r, Z_r）とする。衛星iの座標は、衛星より送信される軌道情報を用いて計算することができるが、SAが発動された場合、軌道情報にも誤差が含まれている。基準局Rの座標は既に分かっているので、放送暦を用いて衛星iと基準局Rの距離の計算値を求め、計測された擬似距離との差（O－C）_(i,R)を求める。擬似距離の観測値ρ_(i,R)には、電離層と対流圏の電波伝搬遅延、受信機時計と衛星時計のずれが含まれている。

$$\begin{aligned} \rho_{(i,R)} = & \rho^*_{(i,R)} + C \cdot \Delta\tau_{t(i)} \\ & + C \cdot \Delta\tau_{t(R)} + C \cdot \Delta\tau_A(i,R) \\ & \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに、ρ*_(i,R)は衛星iと受信機Rとの距離の計算値で、次式で求められる。

$$\begin{aligned} \rho^*_{(i,R)} = & [\{ X_i(t_s) - X_R(t_r) \}^2 \\ & + \{ Y_i(t_s) - Y_R(t_r) \}^2 \\ & + \{ Z_i(t_s) - Z_R(t_r) \}^2]^{1/2} \\ & \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

t_r : 電波受信時刻
 $t_s = t_r - \rho * (i, R) / C$: 電波発射時刻
 $\Delta \tau_t$: 衛星*i*の時計のGPS時系からのずれ
 $\Delta \tau_{t(R)}$: 受信機Rの時計のGPS時系からのずれ
 $\Delta \tau_{A(i, R)}$: 衛星*i*と受信機R間の電離層と対流圏による遅延やその他の誤差
 C : 光速

衛星時計のGPS時刻系からのずれ $\Delta \tau_{t(i)}$ は2次式で表現され、その補正係数 a_0, a_1, a_2 は衛星より送信されている。

$$\begin{aligned} \Delta \tau_{t(i)} = & a_{0(i)} + a_{1(i)}(t_r - t_{0c(i)}) \\ & + a_{2(i)}(t_r - t_{0c(i)})^2 \\ & \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここに、 t_{0c} は衛星より送信される時計補正のための基準時刻である。

1点測位では、衛星時計のずれは(3)式を用いて補正し、受信機時計のずれは測位計算の過程で未知数として求める。電離層対流圏の電波伝搬遅延は数学モデルにより補正している。ここでは、SAが1点測位精度に与える影響を調査するために、擬似距離より衛星時計のずれを補正した量を観測量として用いる。(1)式、(2)式より $(O-C)_{(i, R)}$ は次式で求められる。

$$\begin{aligned} (O-C)_{(i, R)} = & C \cdot \Delta \tau_{t(R)} + C \cdot \Delta \tau_{A(i, R)} \\ = & \rho_{(i, R)} - C \cdot \Delta \tau_{t(i)} \\ & - [\{X_i(t_s) - X_R(t_r)\}^2 \\ & + \{Y_i(t_s) - Y_R(t_r)\}^2 \\ & + \{Z_i(t_s) - Z_R(t_r)\}^2]^{1/2} \dots\dots(4) \end{aligned}$$

$(O-C)_{(i, R)}$ には受信機時計のずれと電離層、対流圏による電波伝搬遅延やその他の誤差が含まれている。

SAは軌道情報や衛星時計を操作し精度を落とすとされているので、軌道情報に誤差があれば、たとえ擬似距離の計測値が正しくても、 $(O-C)$ に軌道情報の誤差が現れる。

図 3に1990年3月28日に計測した擬似距離の

$(O-C)$ 、トレンド除去後の $\Delta(O-C)$ 、パワースペクトル、自己相関関数を各衛星について示す。なお、図 3-1～3-3はBlock I 衛星、図3-4、3-5はBlock II 衛星である。 $(O-C)$ には、Block I, IIともに各衛星にはほぼ共通のオフセット、トレンドが見られる。Block I 衛星 (SV # 6, 9, 12) の $(O-C)$ の変化はほぼ直線であるのに対し、Block II (SV # 16, 17) 衛星の $(O-C)$ はSAの影響と考えられる揺らぎが重ね合わされている。

$(O-C)$ の揺らぎの成分を拡大し、さらに細かく調査するために、トレンドを除去し、パワースペクトル、自己相関関数を求めた。 $(O-C)$ は直線でトレンド除去しただけでは、自己相関関数が0に収束しないので、ここではトレンドを衛星時計と同様に、2次式で近似した。

$$(O-C) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \Delta(O-C)$$

図中、 b_0, b_1, b_2 は2次式の係数であり、全衛星についてほぼ同一となっている。

Block I 衛星 (SV # 6, 9, 12) では振幅 2m 程度の高周波成分が卓越している。SV # 12は観測開始と同時に南側より昇り始め、観測開始後数分間は衛星の高度角が低いためにノイズが大きく、その周期は約 35 秒である。スペクトルにはこの周波数の成分が卓越している。SV # 9にはこのような成分はみられず、ほぼホワイトノイズとなっている。

Block II 衛星 (SV # 16, 17) ではSAの影響と考えられる、振幅約 10m で周期が 12分程度の揺らぎが卓越し、その上にBlock I 衛星と同様の高周波成分が見られる。SV # 16とSV # 17ではこの大きな揺らぎの周波数、時系列の変化がやや異なっており、SAのかけかたが衛星ごとに違うことが推定される。SAによる擬似距離誤差の特性は二次のガウス-マルコフ過程であるといわれている。この場合、信号波形は正弦波にノイズが重ね合わさったものとなり、また、自己相関関数は振動しながら指数関数的に減衰することになる。結果から判断すると、SAは確かに二次のガウス-マルコフ過程であるように思われる。

GPS受信機は、計測した擬似距離をもとに1点測位法による測位計算を行い位置を求め、同時に

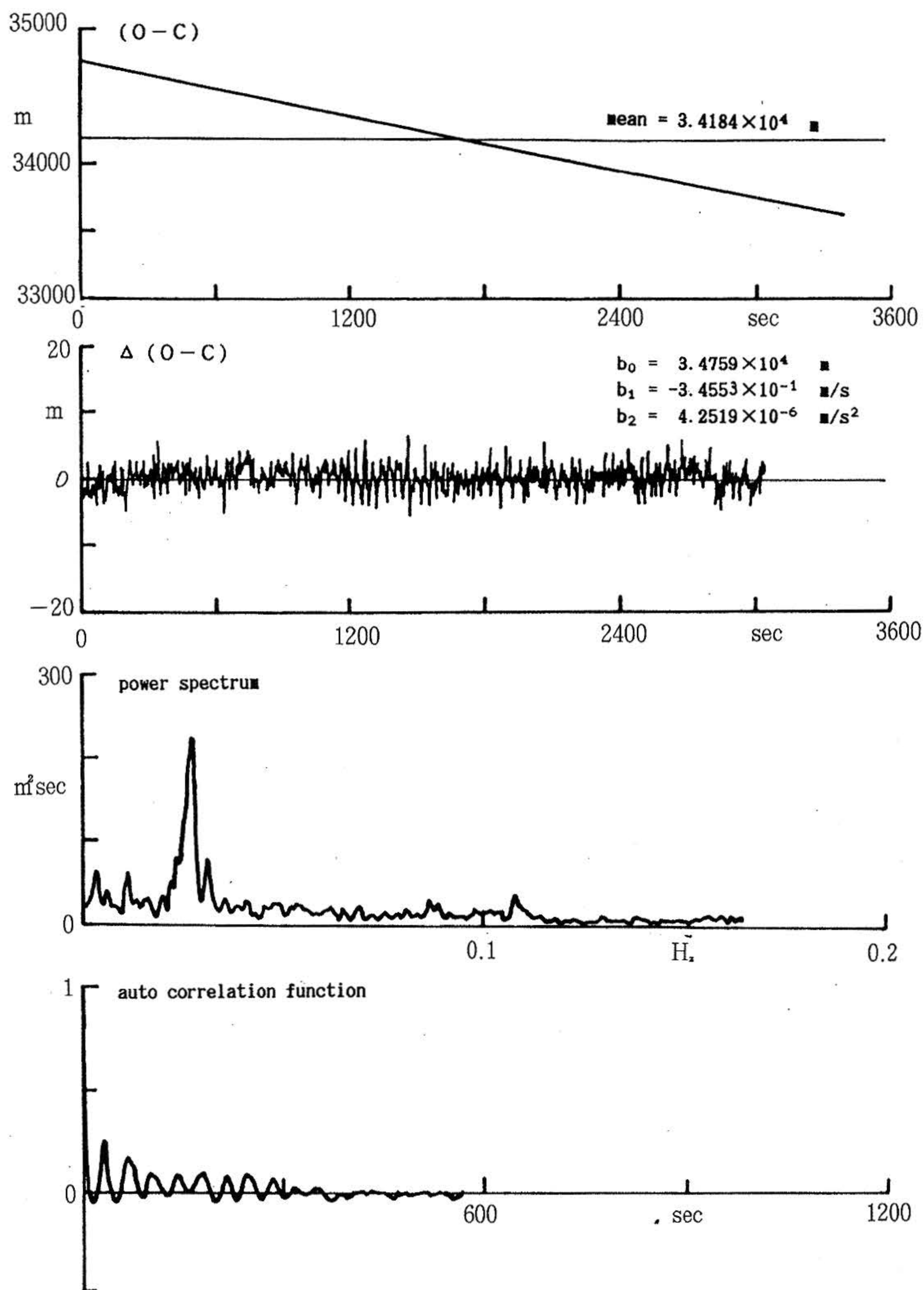


図 3-1 トレンド除去前後の擬似距離の時系列, パワースペクトル, 自己相関関数 (Block I SV # 6)

Fig. 3-1 Time history of pseudorange before and after trend elimination, power spectrum and autocorrelation function (Block I SV #6)

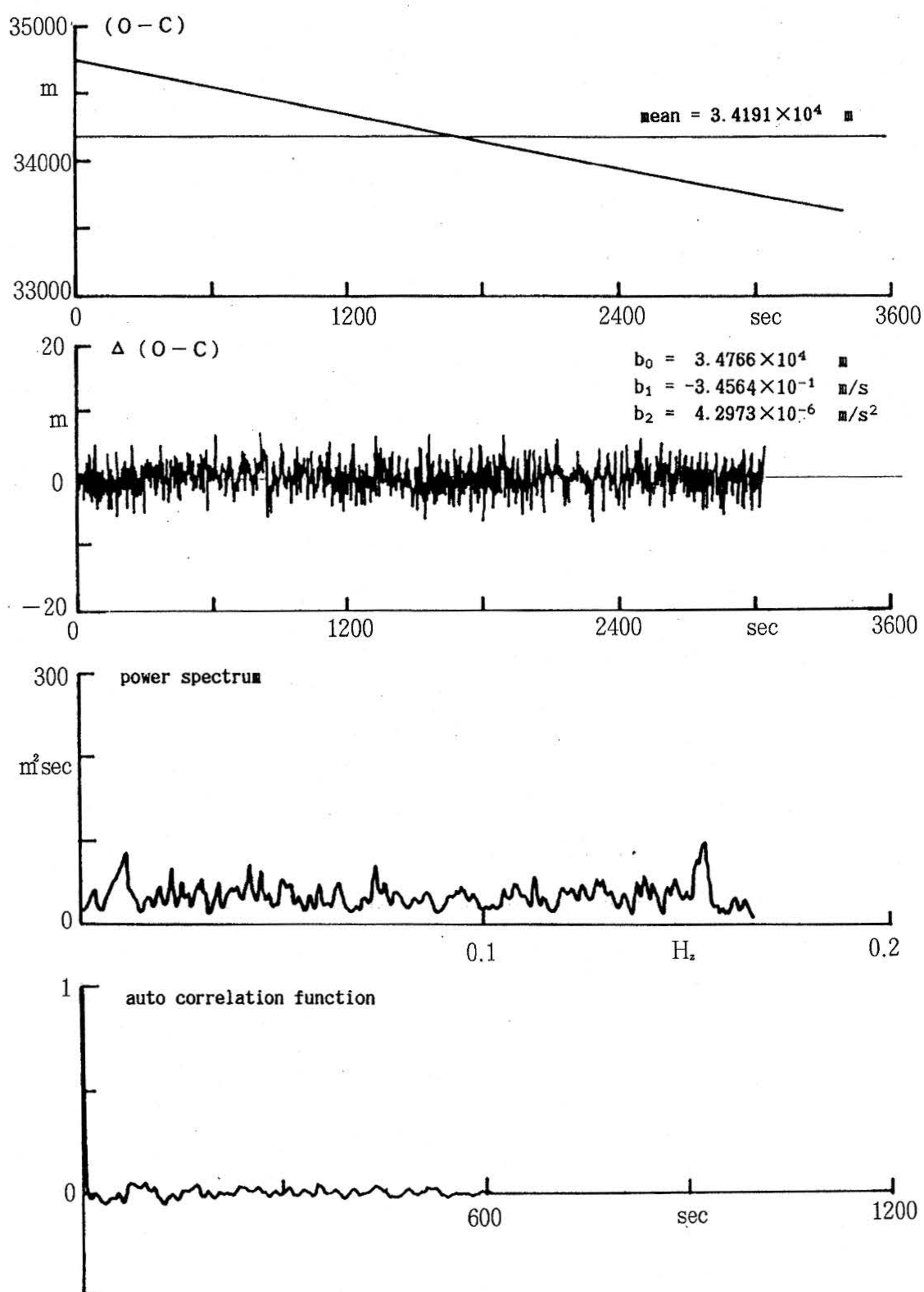


図 3-2 トレンド除去前後の擬似距離の時系列, パワースペクトル, 自己相関関数 (Block I SV # 9)

Fig. 3-2 Time history of pseudorange before and after trend elimination, power spectrum and autocorrelation function (Block I SV#9)

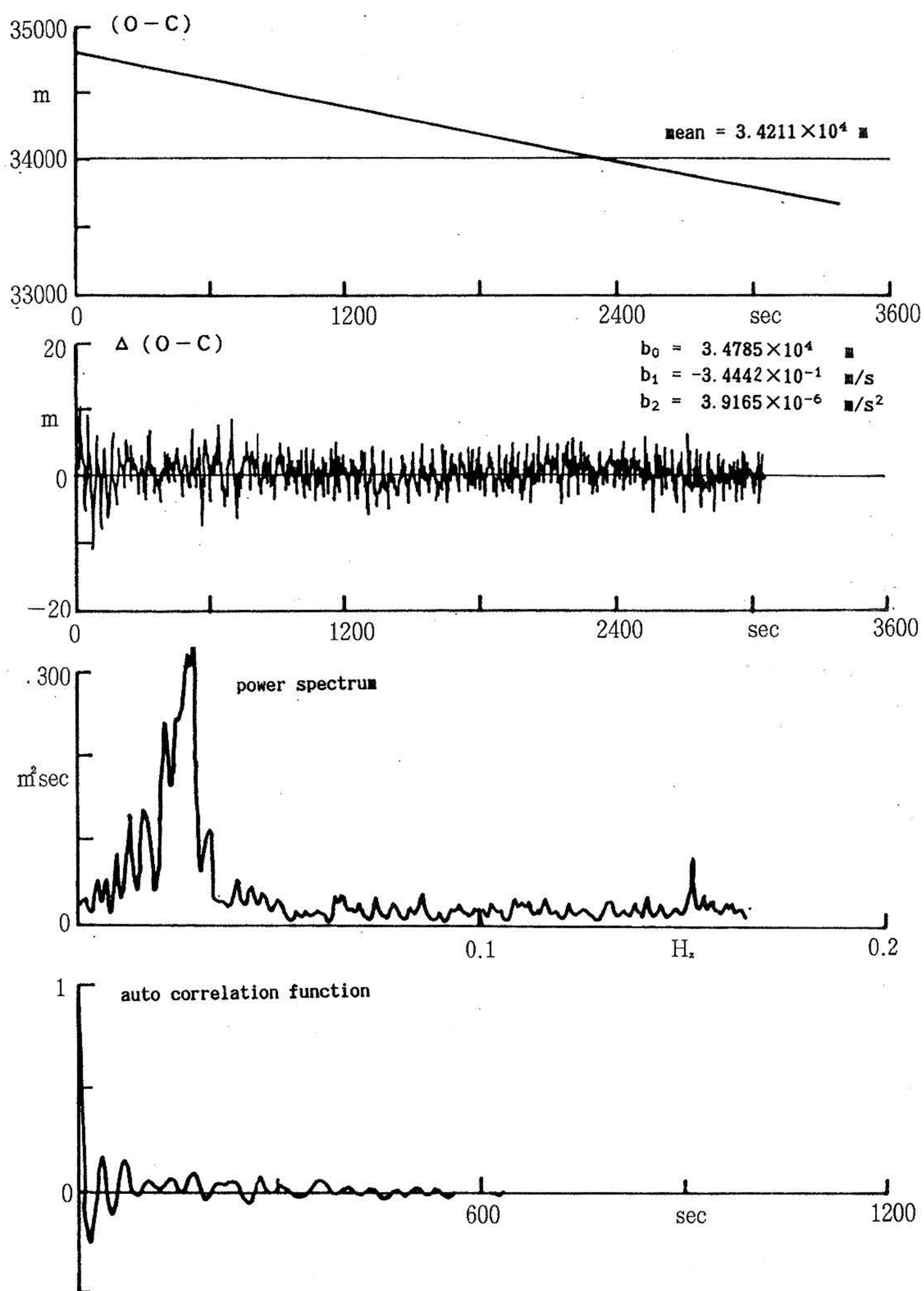


図 3-3 トレンド除去前後の擬似距離の時系列, パワースペクトル, 自己相関関数 (Block I SV # 12)

Fig. 3-3 Time history of pseudorange before and after trend elimination, power spectrum and autocorrelation function (Block I SV #12)

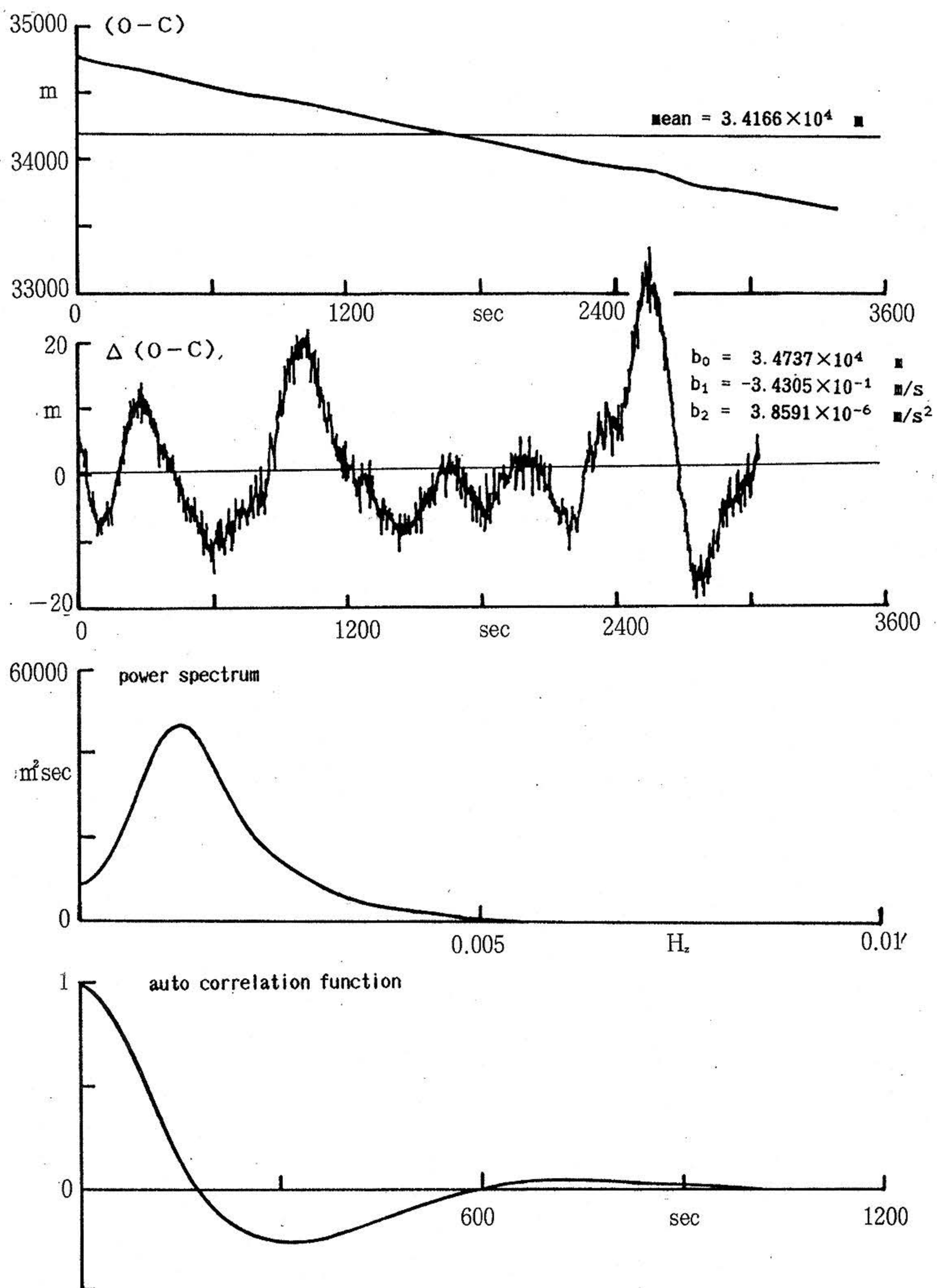


図 3-4 トレンド除去前後の擬似距離の時系列, パワースペクトル, 自己相関関数 (Block II SV # 16)

Fig. 3-4 Time history of pseudorange before and after trend elimination, power spectrum and autocorrelation function (Block II SV #16)

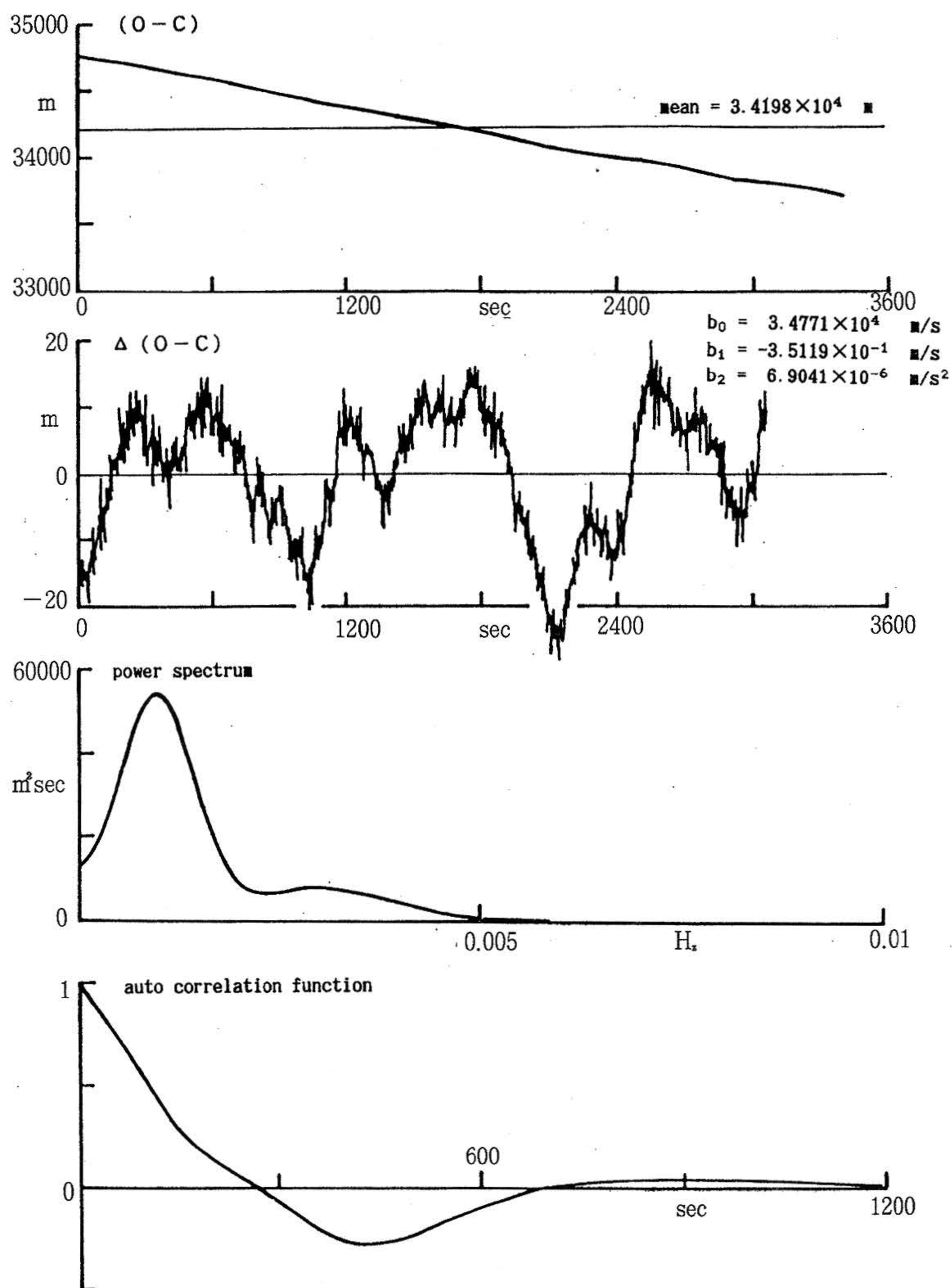


図 3-5 トレンド除去前後の擬似距離の時系列, パワースペクトル, 自己相関関数 (Block II SV # 17)

Fig. 3-5 Time history of pseudorange before and after trend elimination, power spectrum and autocorrelation function (Block II SV #17)

受信機時計のずれを計算している。図4にGPS受信機(4000 SD)の出力する受信機時計のずれ、トレンド除去後のずれ、パワースペクトル、自己相関関数を示す。図4では、受信機時計のずれに光速を乗じ距離に換算して表示している。1 msecの時計のずれは約300kmに相当する。受信機時計のずれの2次式の係数は(O-C)のそれに良く対応している。(O-C)のトレンドは受信機時計のずれによるものであることが分かる。トレンド除去後の受信機時計のずれにはBlock II衛星のO-Cの揺らぎの周波数に対応する変動成分が現れている。これは、Block II衛星の擬似距離がSAにより揺らされるため、受信機自身の時計が揺らいでいるとして計算されてしまうためである。

図5に受信機時計補正後の擬似距離(SV # 6, 17)を示す。図中、Trimble社の観測データファイルに含まれている観測量Distanceも同時に表示している。擬似距離に受信機時計の補正を行えば、図3-1~3-5のO-Cに見られたオフセット、トレンドは除去される。しかし、GPS受信機は、Block II衛星のみにみられた揺らぎも受信機時計のずれと解釈してしまうため、Block I衛星(SV # 6)にもこの影響が現れてくる。これは、Block Iの他の衛星(SV # 9, 12)についても同様である。

擬似距離の補正值とDistanceには差がみられる。擬似距離には受信機時計のみの補正を行い、電離層、対流圏の補正は行っていないので、両者の平均値に差が生じたと考えている。Distanceは擬似距離より受信機時計、電離層、対流圏の補正を行い、さらに平滑化処理を行ったものと考えられる。

SAの影響の無いBlock Iの衛星だけの場合、受信機時計の遅れは共通の未知数として扱われ、衛星4個による1点測位解を求める過程で消去される。しかし、SAの発動によって、Block II衛星の擬似距離に長周期の揺らぎがあり、さらにBlock II衛星同士でも揺らぎの性質が異なるため、受信機共通の誤差として消去されず、この結果1点測位の精度が劣化していると考えられる。

4 浮体運動の計測

4.1 計測の概要

GPSによる計測期間中、EDMによる計測、音

響測位システム(APS: Acoustic Positioning System)による計測を併せて行った。APSは40 kHzの超音波を用いて、ポセイドンに取り付けられているフレキシブルライザー管の海中挙動を計測するために開発された測位システムで、浮体の動揺も計測することができる⁹⁾。

ポセイドン計測器室屋上にGPS受信機アンテナ、EDM反射鏡を設置し同時計測を行った(写真2, 3)。EDM反射鏡は実験本部からの視通の関係により、陸上に近い側に、GPSアンテナは上空の視通の関係より沖側に配置している。図6にこれらの配置と座標系を示す。GPSでは、WGS84系における緯度、経度、高さが求められる。すなわち、地球上の三次元的絶対位置が求められる。一方、EDMでは平面直角座標系で求められ、GPS、EDMの計測結果を比較するために、GPSの計測結果を平面直角座標系に変換し、浮体の水平面内の運動の比較を行った。GPS、EDMの計測結果は、アンテナ、反射鏡の設置点の運動で、浮体の船首揺等の回転成分は求めることができない。また、アンテナと反射鏡間の距離は約7m離れており、両者を直接比較するには不具合を生じる。そこで、方位ジャイロによる船首方位角の平均値を用いて、浮体中央の運動に変換している。

APSでは浮体固定座標系(x, y)で浮体の運動が求められる。浮体固定座標系は浮体中央の喫水面上に原点をとり、浮体の長手方向にx軸、幅方向にy軸、鉛直上方向にz軸をとっている。図7にAPSによる計測結果の例を示す。図7は浮体から見た海底に固定した音響発振器の相対位置を表している。発振器は海底に固定されているためx, y, zの変動は、相対的な浮体の動揺であると見なすことができる。海底固定の音響発振器があと2つあれば、浮体の位置を計測することが可能であるが、このシステムはこの時点ではうまく作動していなかったため、以下では平均値に基づいて議論を進める。APSでは浮体の水平面内の運動、すなわち、xの変動には浮体の前後揺に船首揺の影響が含まれ、yの変動には浮体の左右揺に船首揺の影響が含まれ、直接時系列でGPSと比較することはできない。そこで、APSの計測結果を5分ごとに平均($\bar{x}$, $\bar{y}$)を取ると、浮体の平均位置の変位(ΔX , ΔY)に応じて音響発振器の位置も変化し

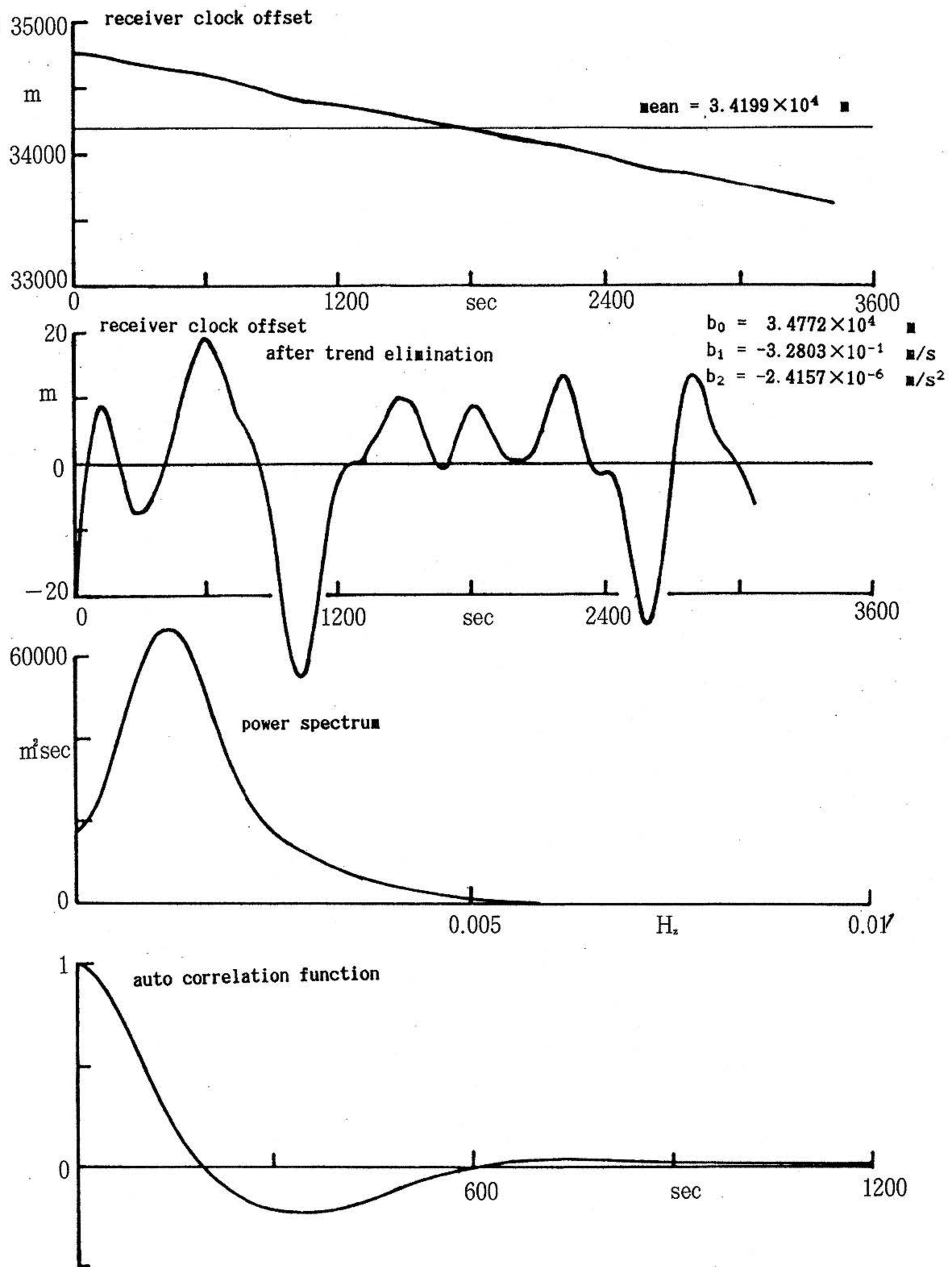


図 4 トレンド除去前後の受信機時計のずれ, パワースペクトル, 自己相関関数
 Fig. 4 Time history of receiver clock offset before and after trend elimination, power spectrum and autocorrelation function

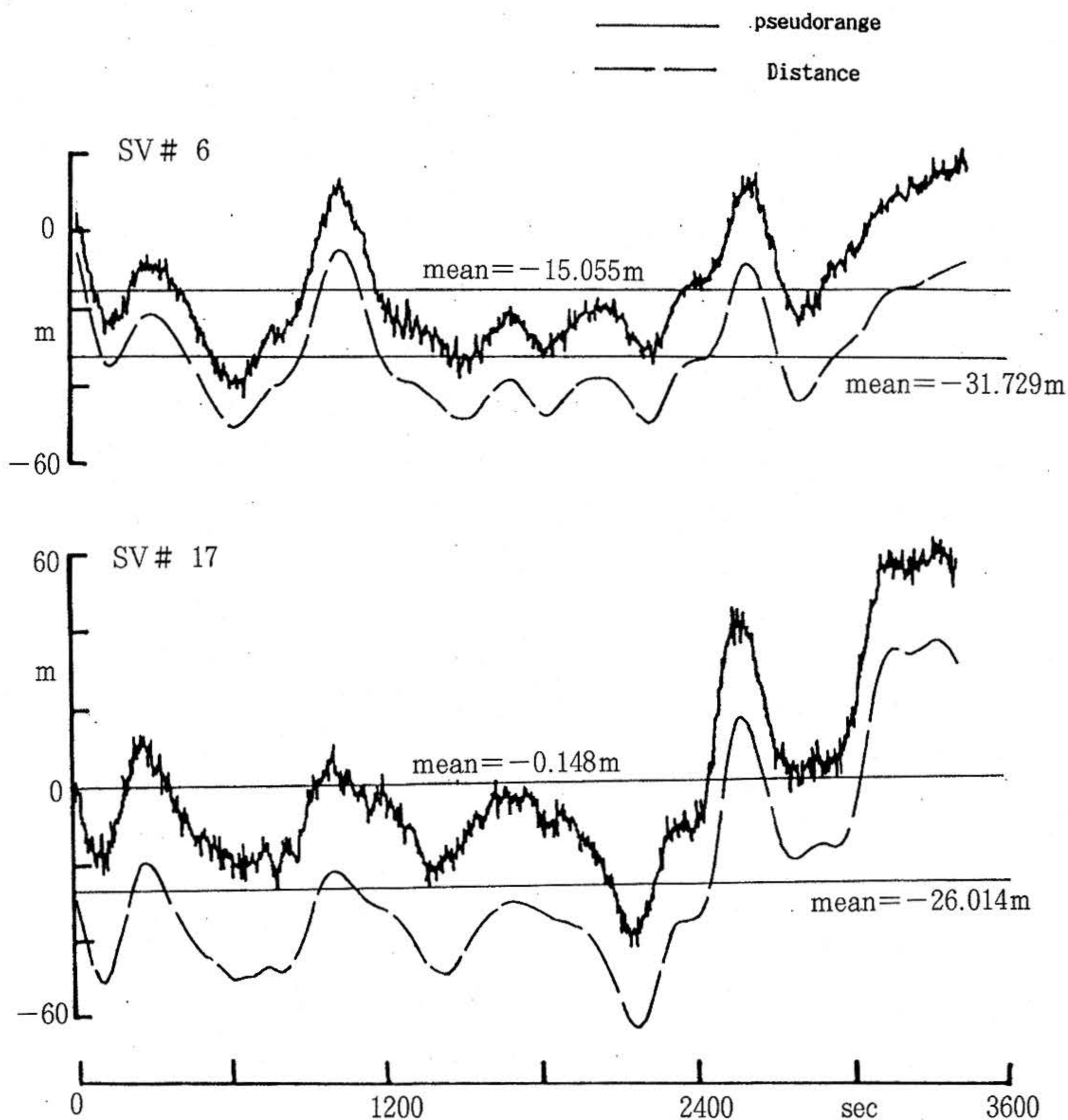


図 5 受信機時計補正後の擬似距離とTrimble 4000SDの観測量Distance
Fig. 5 Pseudorange and observable Distance of Trimble 4000SD after correction of receiver clock offset

て見えることになる。浮体固定座標から平面直角座標に座標変換を行い、平均的な浮体の移動量を

$$\begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_g \\ X_g \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(6)$$

求めることができる。

4.2 観測スケジュール

図 8にTrimble 社提供の観測計画作成プログラム TRIMPLAN™を用いて計算した1990年3月26日由良上空における、GPS衛星の見え方を示す。Block I 衛星 (SV # 3, 6, 9, 11, 12, 13) 6個, Block II 衛星 (SV # 2, 14, 16, 17, 18, 19, 20) 7個, 計13個の衛星が打ち上げられており, 1日17時間程度3衛星以上の測位が可能である。また, 高精度測位が可能4衛星以上は1日11時間程度観測できる。表2に観測スケジュールを示す。浮体運動の計測では, 測位精度向上のため, 5衛星を

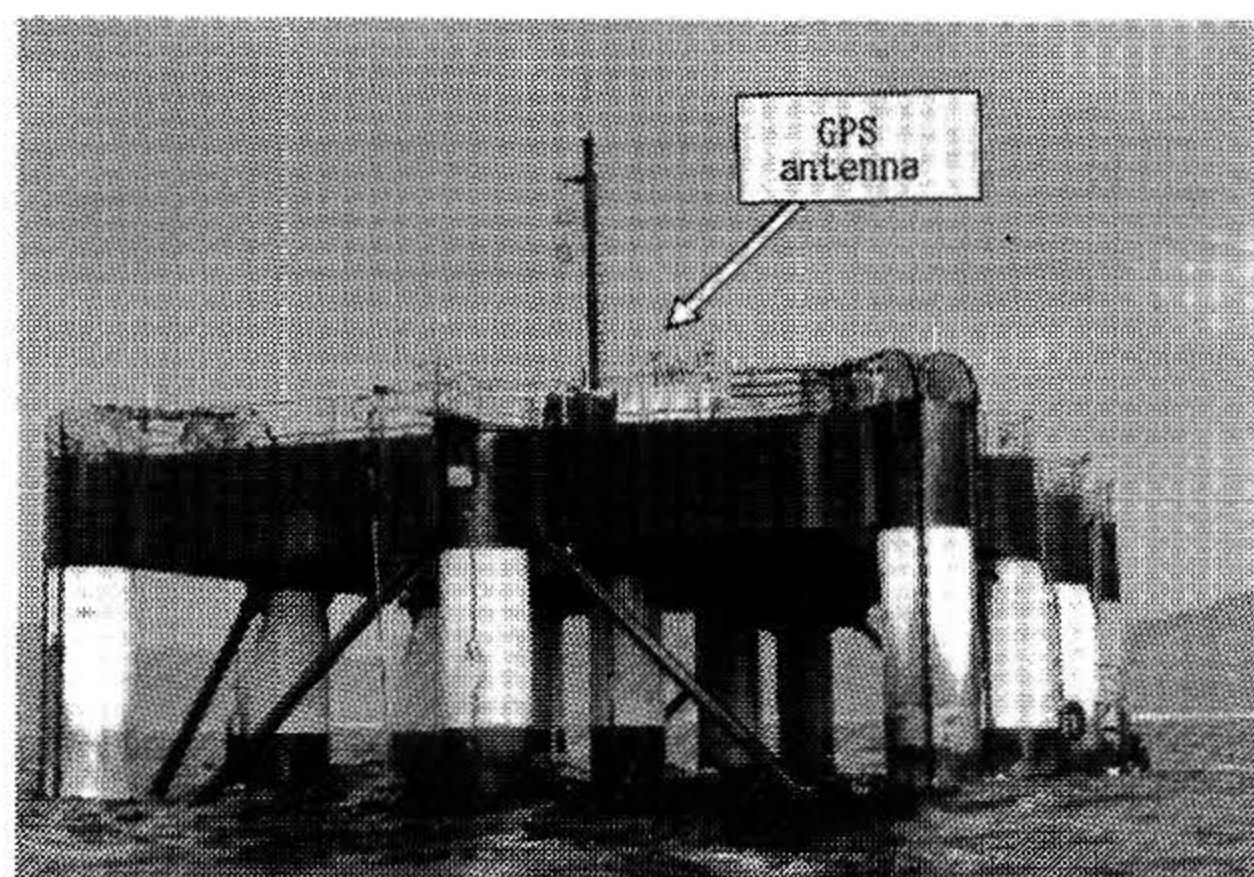


写真 2 浮体式海洋構造物ポセイドン
Photo 2 Floating platform POSEIDON

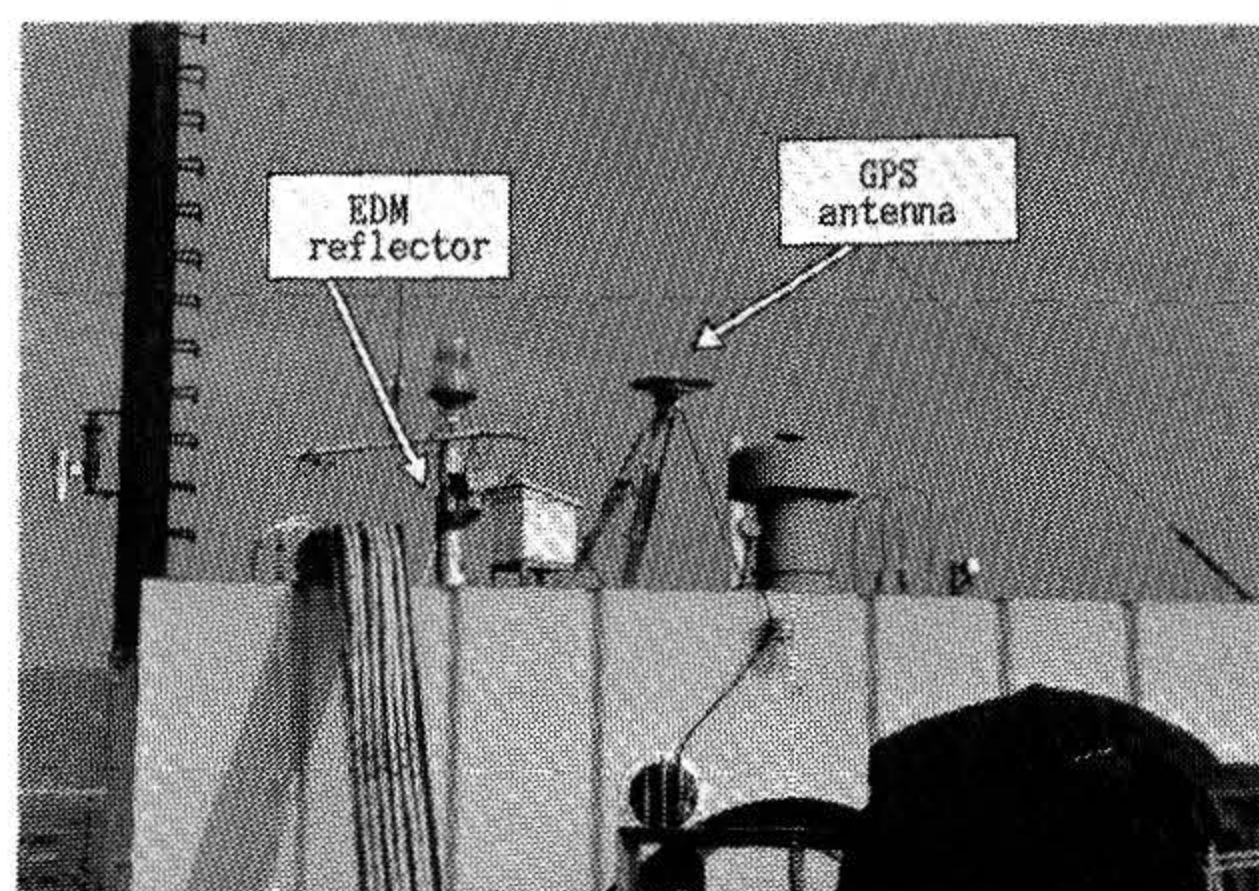


写真 3 ポセイドン上のGPSアンテナ
Photo 3 GPS antenna on the POSEIDON

同時観測できる時間帯を選んで計測を行った。セッション番号は先頭の2桁が観測日で、1月1日からの通日を用いている。最後の1桁は、その観測日における観測番号である。APSでは定時計測の他にGPSの観測時間帯に合わせて臨時計測を行った。

データサンプリング間隔は、受信機の日データ更新能力より3秒とした。この場合、受信機内のメモリーは約3時間分のデータを記録することができる。

図9にGPS観測期間中の波浪、風速、船首方位角を示す。GPS観測期間中は全般的に穏やかな海象条件であったが、3月29日午前にかなり静穏になった後、午後より風がやや強くなり風浪が発達した。

4.3 dGPSによる浮体運動計測結果

まず、SA発動下におけるdGPSの効果を確認す

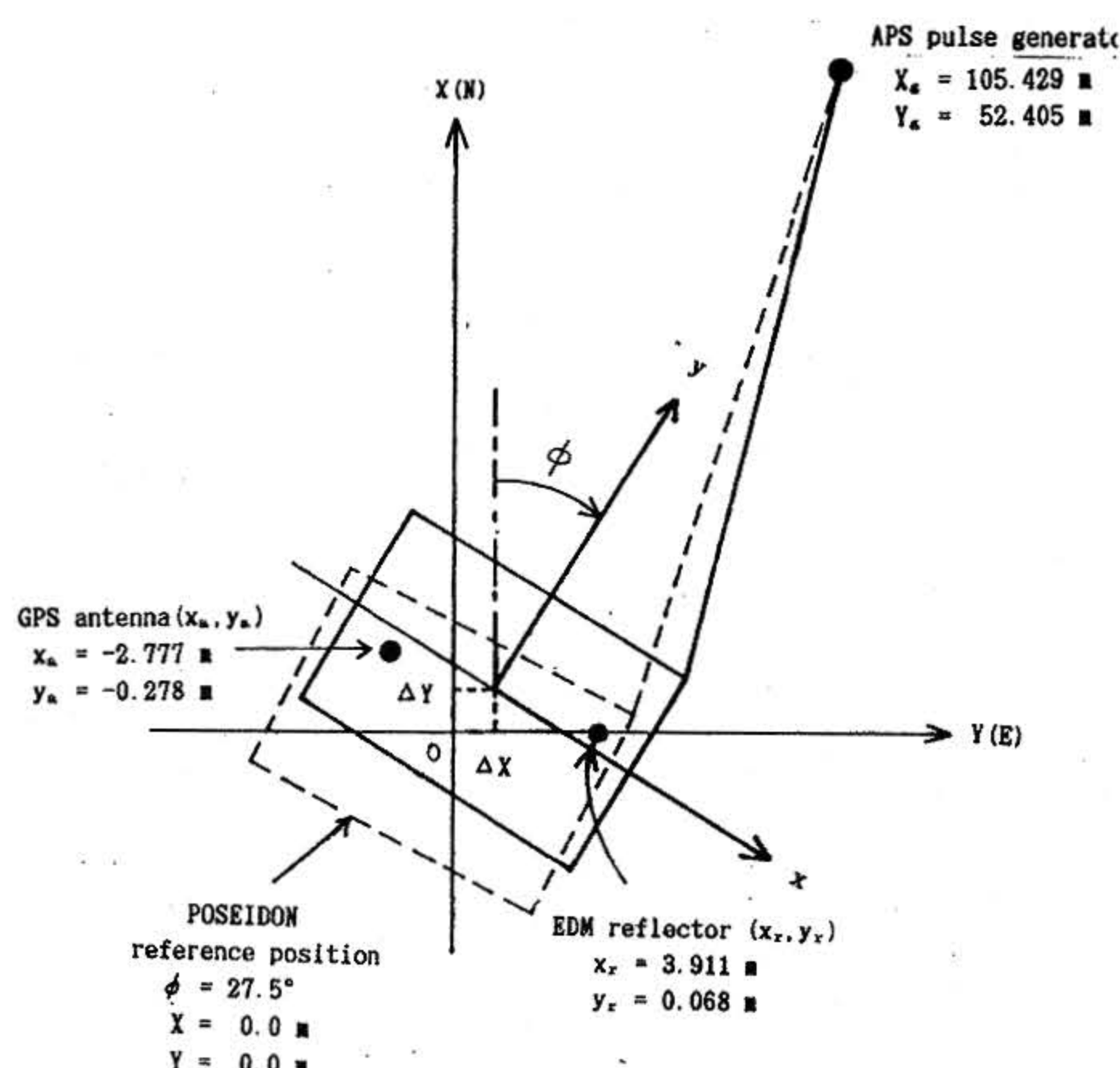


図 6 浮体上のGPSアンテナとEDM反射鏡、海底音響発振器の位置、および浮体の変位
Fig. 6 Positions of GPS antenna and EDM reflector on platform, APS pulse generator at sea bottom, and offset of platform

るために1点測位結果との比較を行った。図10にdGPSによる解析結果とGPS受信機が300秒ごとに出力する1点測位結果を比較して示す。図中、EDMによる計測結果もあわせて表示している。縦軸は、気象、海象条件が穏やかなときの浮体の平均位置であるポセイドン基準位置からの変位を平面直角座標系で表示している。3.1でも述べたように、1点測位結果は、浮体がほとんど動いていないにもかかわらず、平均位置が20~30mずれ、15m程度変動している。dGPSによる解析結果とEDMによる計測結果は良く一致しており、SAが発動されてもdGPSにより共通誤差として消去されていることがわかる。

図10では1点測位結果と比較するために、縦軸のスケールが1目盛り20mと大きく、浮体の細かい運動はわからない。図11-1~11-6に縦軸のスケールを拡大して、dGPSによる解析結果をEDM、APSによる計測結果と比較して示す。全体的にdGPS、EDM、APSの計測結果は良く一致している。しかし、セッション86-3やセッション87-2の東西方向の成分等の結果では、EDM、APSの計

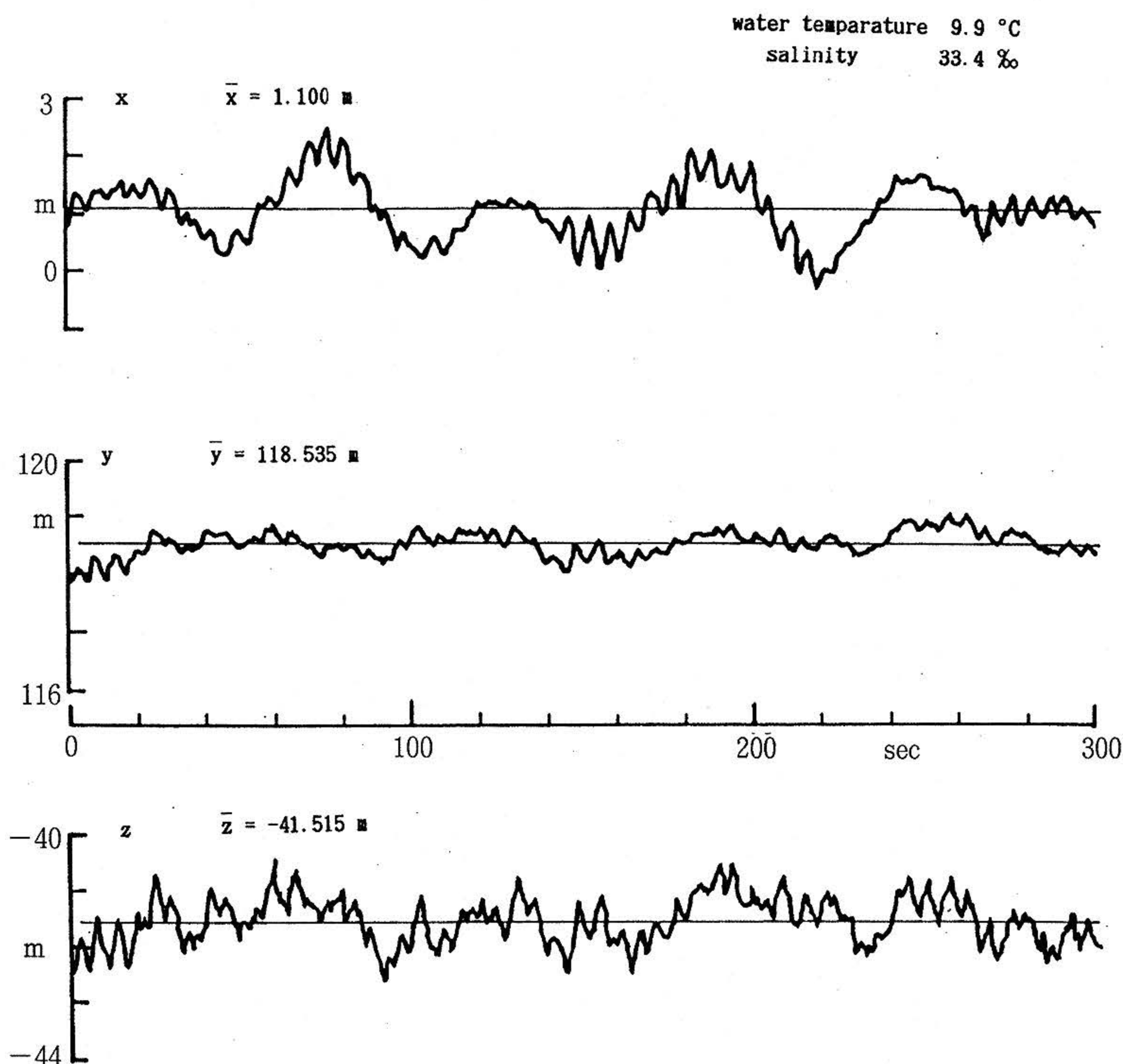


図 7 ポセイドンから見たAPS発振器の位置変化 : 90/3/28 9:15~9:20
Fig. 7 Position variations of APS pulse generator at sea bottom relative to the platform : 28/Mar/90 9:15~9:20

測結果には変動成分が少ないが、dGPSによる解析結果には、周期+数分、両振幅2m程度の変動成分が見られる。これは、SAによる擬似距離の揺らぎの成分が完全には除かれていないのではないかと考えられるが、セッション87-3には周期約70秒、両振幅で1m程度の変動がみられており、EDMによる計測結果も1m程度のばらつきがあることから、浮体の長周期運動を検出している可能性がある。なお、浮体の前後揺、左右揺の固有周期はそれぞれ129秒、143秒であり、船首揺の固有周期は73秒である。

図 12にGPS、EDM、APSの各セッションのデータを平均し、GPSによる計測期間中の浮体の平均

位置の変化を示す。dGPSとEDM、APSとの差は1m~2m以内で、定性的にも良く一致している。3月29日には東風が吹き始め、12時頃最高10 m/s、その後徐々に収まっている。浮体は風の影響で西に3m程度流され、もとの基準位置にもどろうとしている。音響測位システムの解析結果では、有義波高1mでは平均水平移動量が2m、標準偏差で0.3m程度の値が計測されており⁹⁾、dGPSにより妥当な結果が得られたものと考えている。

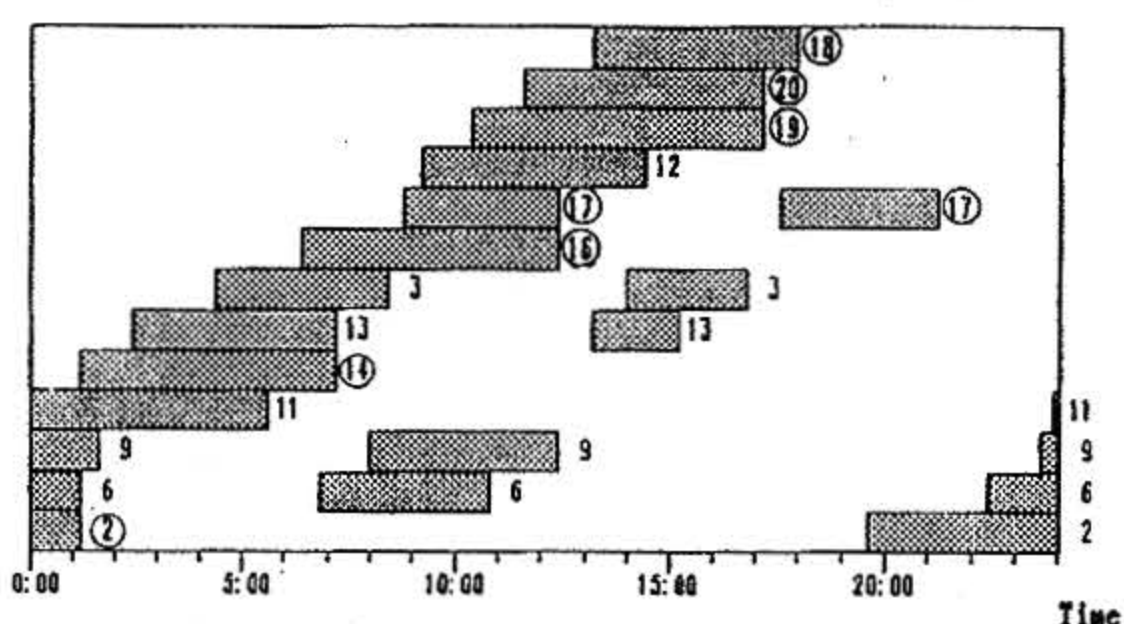
6 おわりに

dGPSを用いて浮体式海洋構造物ポセイダンの長周期水平運動を高精度で計測するために、山形

表 2 観測スケジュール (日本標準時)
Table 2 Observation schedule (JST)

date	session	GPS		APS
		start / stop	observed SV#	start / stop
3/27	86-2	10:45 / 11:45	9, 12, 16, 17, 19	———
	86-3	13:45 / 14:45	3, 12, 13, 18, 19	13:44 / 14:34
3/28	87-1	9:15 / 10:15	6, 9, 12, 16, 17	9:15 / 10:05
	87-2	11:00 / 12:00	9, 12, 16, 17, 19	11:00 / 11:50
	87-3	13:30 / 14:30	3, 12, 13, 18, 19	13:30 / 13:41 14:19 / 14:30
3/29	88-1	9:15 / 10:15	6, 9, 12, 16, 17	9:15 / 9:26 10:04 / 10:15
	88-2	11:00 / 12:00	9, 12, 13, 18, 19	11:00 / 11:11 11:49 / 12:00
	88-3	13:30 / 14:30	3, 12, 13, 18, 19	13:30 / 13:41
3/30	89-1	0:00 / 1:15	2, 6, 9, 11, 14	0:42 / 1:14
	89-2	4:15 / 5:30	3, 11, 13, 14, 16	———
	89-3	9:00 / 10:00	6, 9, 12, 16, 17	9:00 / 9:32

Satellites



Number of Satellites

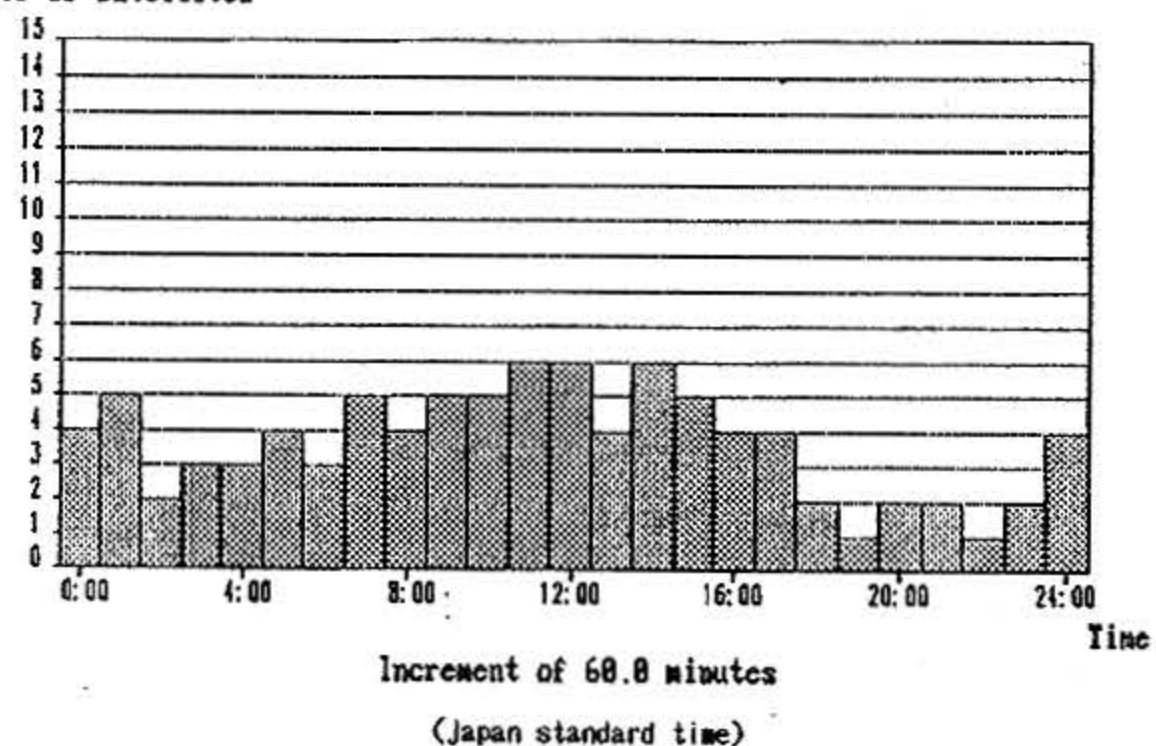


図 8 1990年3月26日由良におけるGPS
衛星の見える方。円で囲んだものは
Block II衛星

Fig. 8 GPS satellites visibility at
Yura on 26 Mar. 1990. SVs
encircled are Block II satellites

県漁業協同組合由良支所屋上に「由良基準点」を設置した。「由良基準点」を基準にGPS, EDMを用いて由良実験本部, および, その周辺に基準点を設けた。その結果, GPS, EDM, APSによる浮体運動計測結果を統一された座標系 (日本平面直角座標系) で表現できるようになった。

「由良基準点」を用いて, SA発動下における1点測位の精度, 擬似距離誤差の特性を調査した。計測された擬似距離には, 衛星より送信される軌道情報, または, 衛星時計の精度が劣化されたため長周期の揺らぎがあり, 1点測位の精度は平均位置が20~40mずれ, 変動成分も40m程度となっている。

dGPSにより浮体運動の計測を行った。dGPSによる解析結果はEDM, APSの計測結果と定性的に良く一致し, 2m程度の精度で浮体の位置を求められることが分かった。dGPSでは既知点で求めた擬似距離誤差を用いて, 未知点の誤差を補正できるため, SAが発動された状況においても, 高い精度を維持することができる。

最後に, 本研究に用いたGPS測位システムの一部は, 日本自転車振興会の補助金を得て製作したものであることを付記します。運輸省船舶技術研

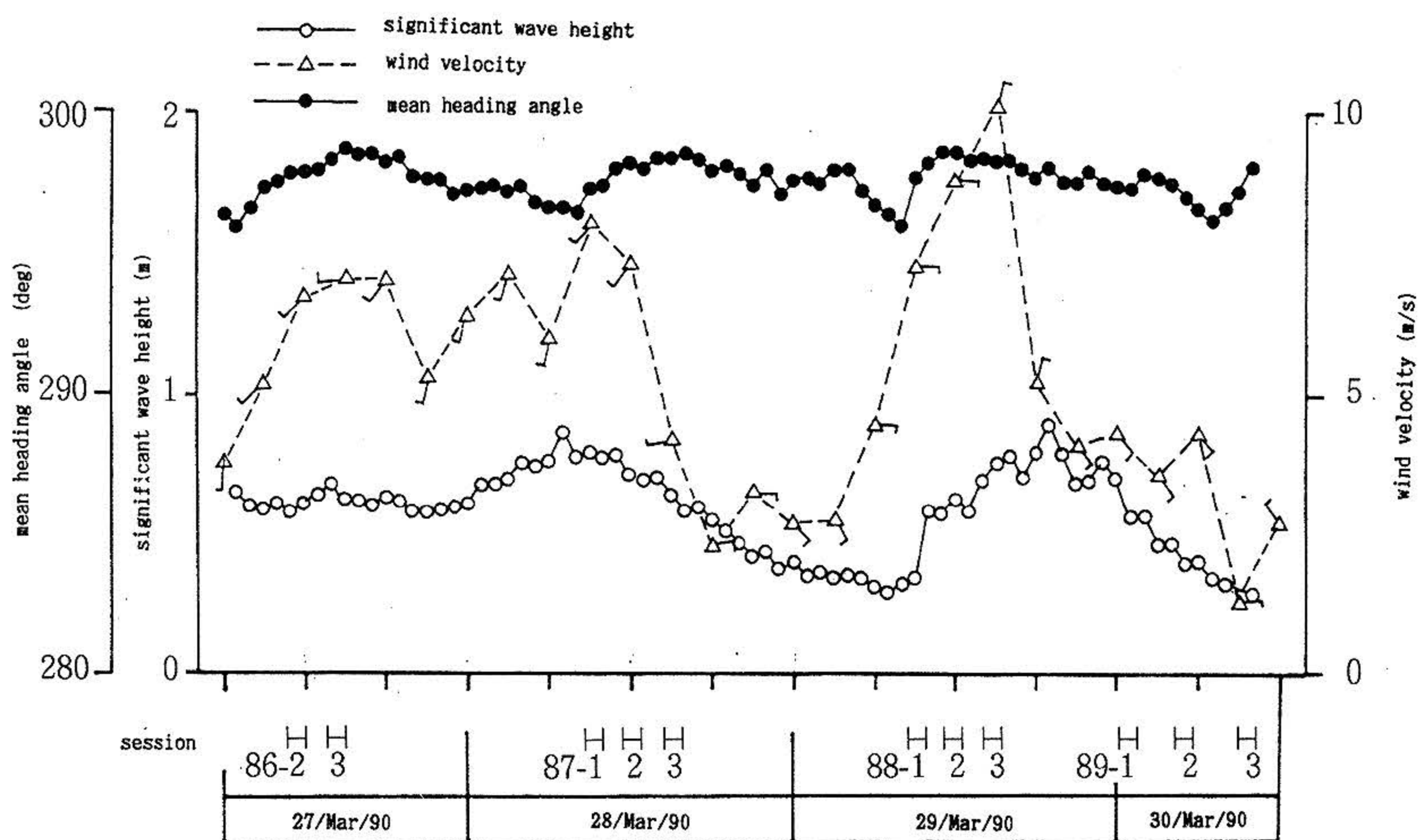


図 9 GPS観測セッションと海象条件

Fig. 9 GPS observation sessions and sea condition

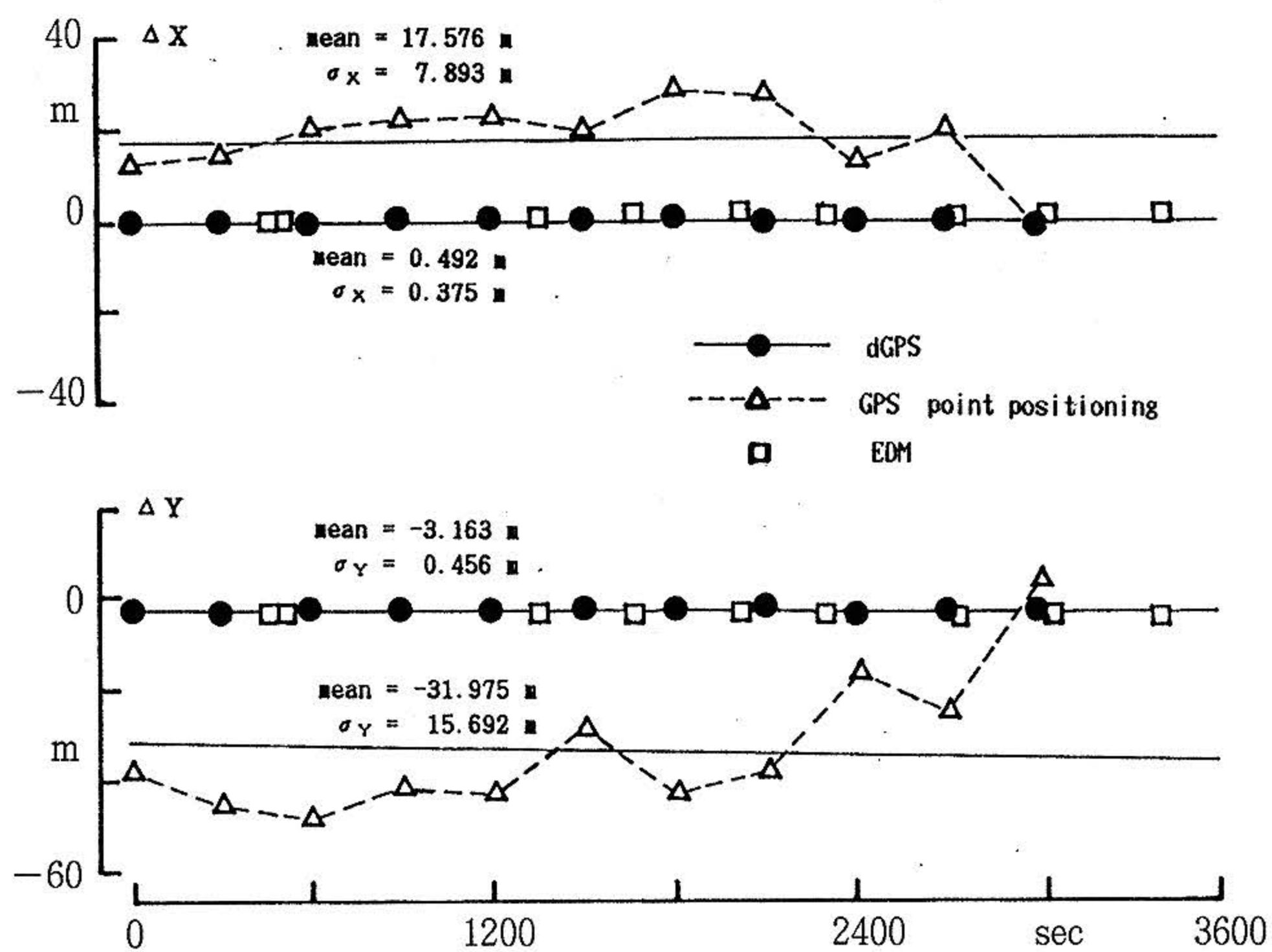


図 10 dGPSと1点測位結果の比較: セッション 87-1 (90/3/28)

Fig. 10 Position variations measured using dGPS, GPS point positioning and EDM: session 87-1 (28/Mar/90)

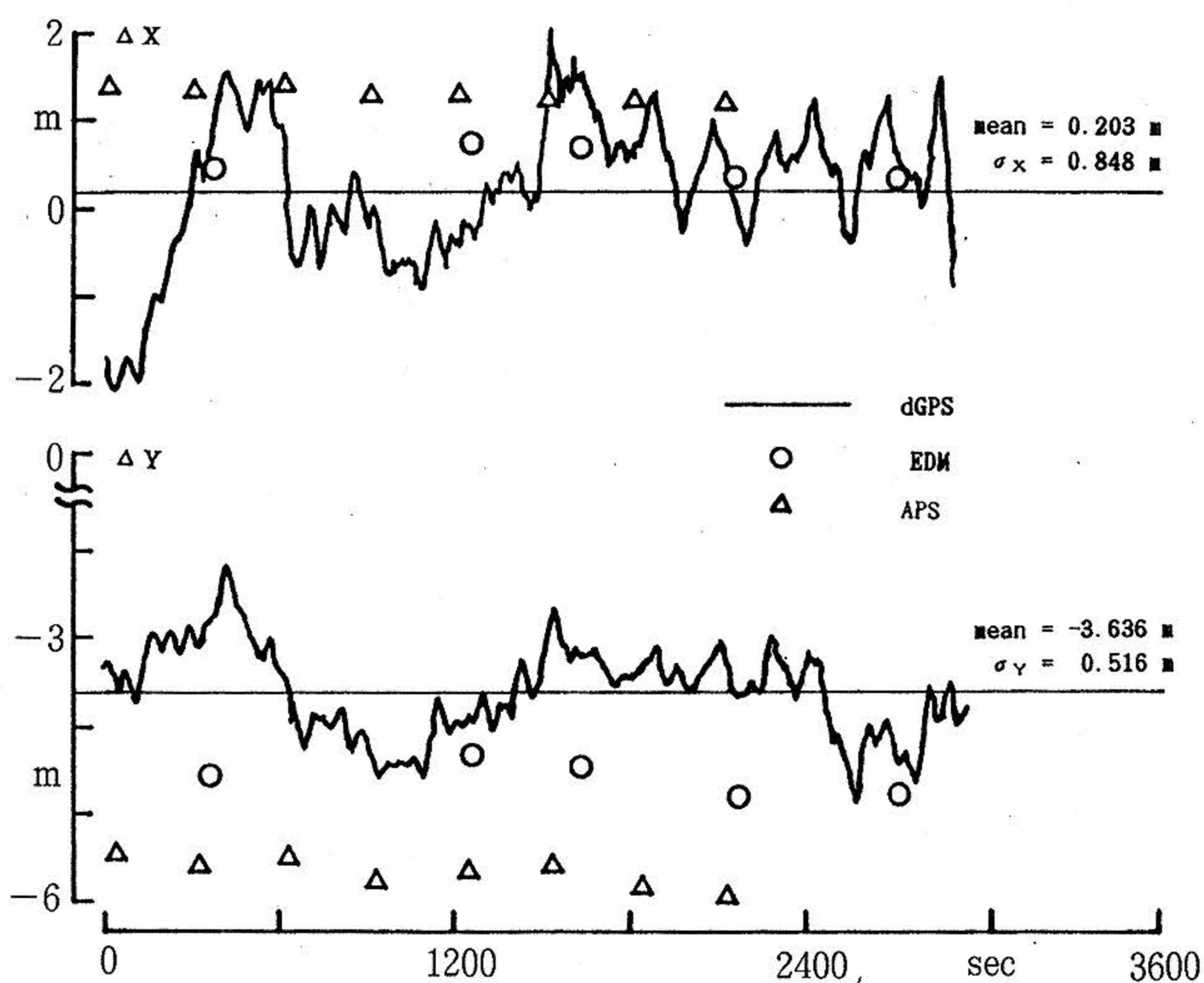


図 11-1 dGPSによる浮体運動計測結果: セッション 86-3 (90/3/27)

Fig. 11-1 Position variations of floating platform using dGPS compared with EDM and APS: session 86-3 (27/Mar/90)

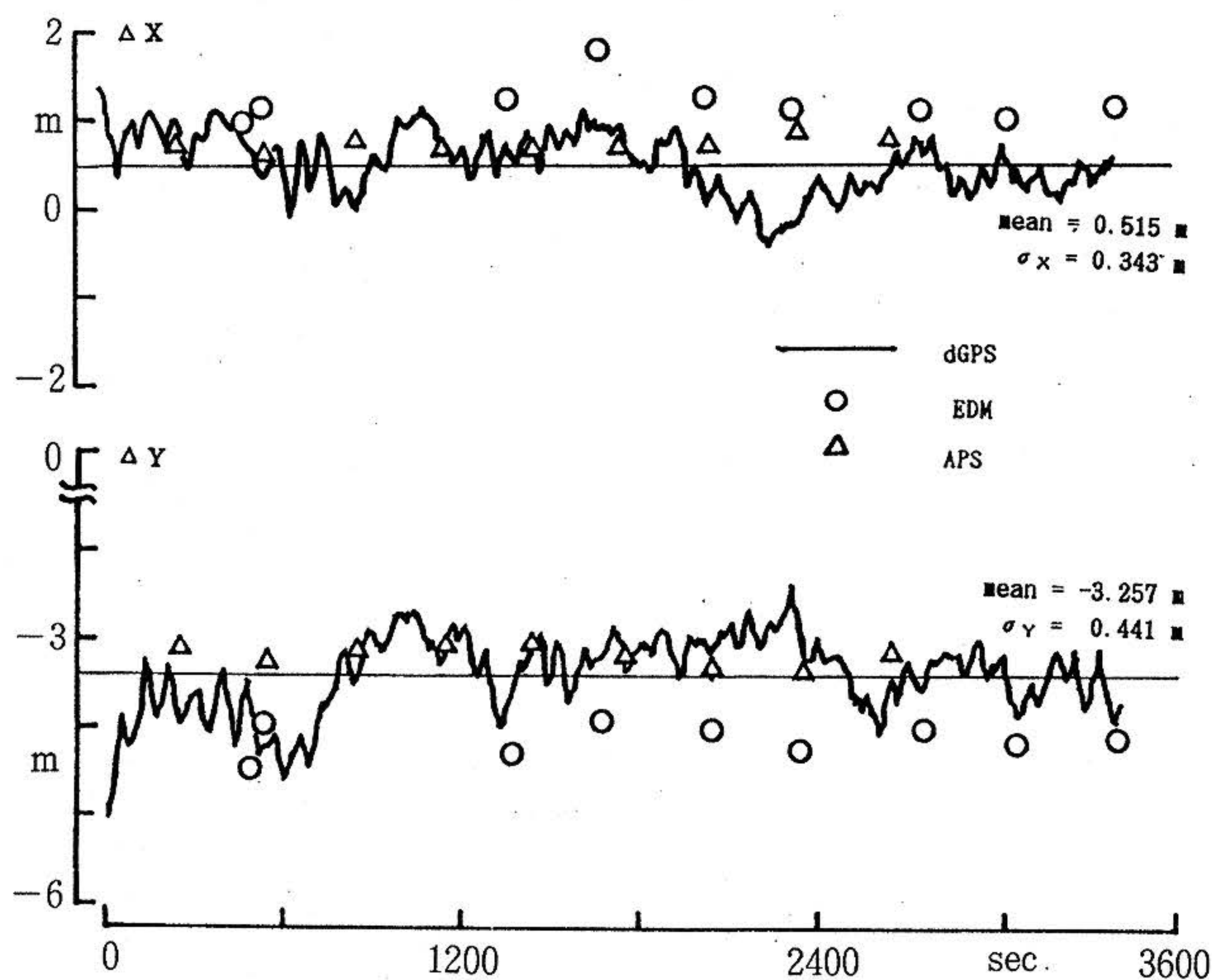


図 11-2 dGPSによる浮体運動計測結果: セッション 87-1 (90/3/28)

Fig. 11-2 Position variations of floating platform using dGPS compared with EDM and APS: session 87-1 (28/Mar/90)

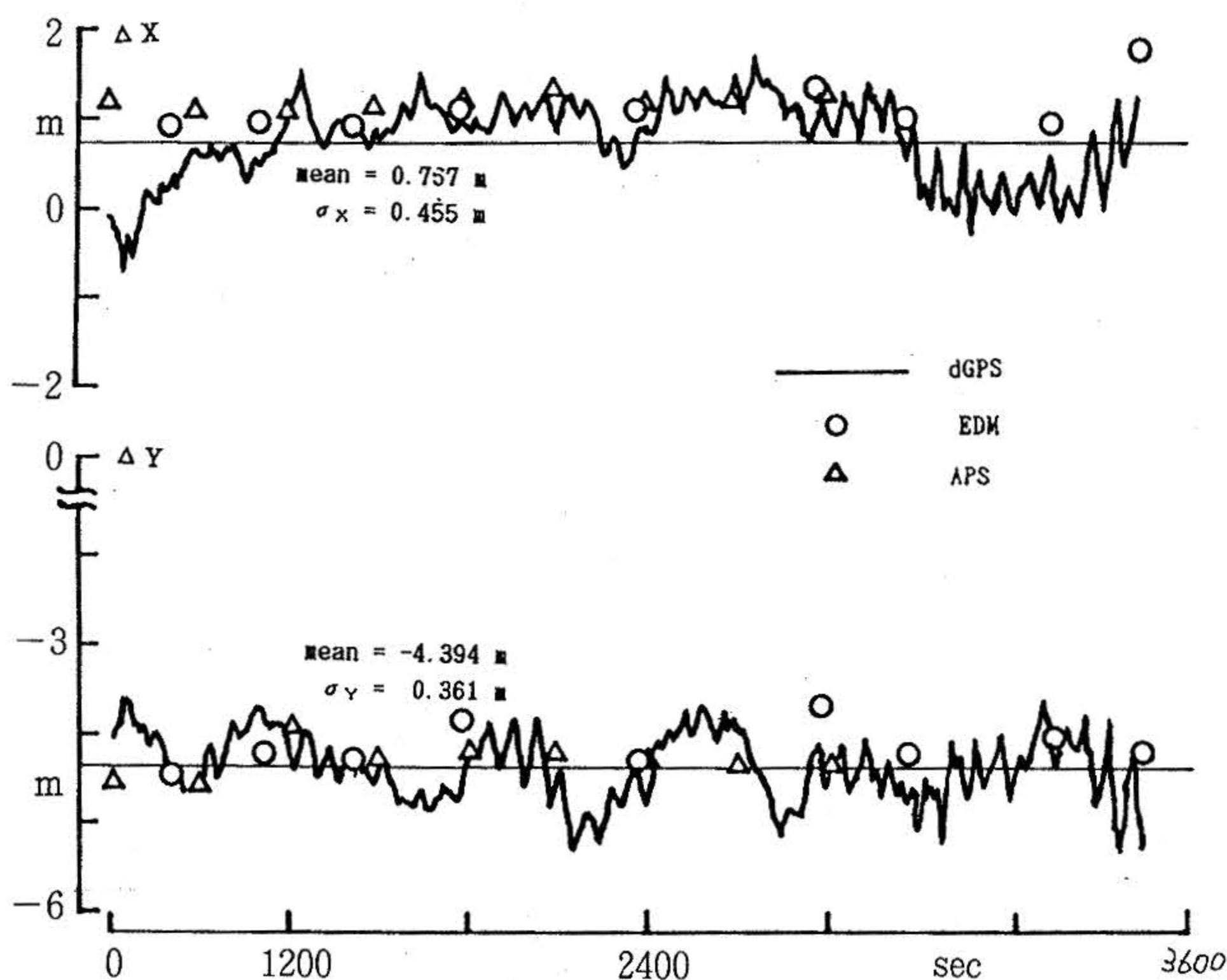


図 11-3 dGPSによる浮体運動計測結果: セッション 87-2 (90/3/28)

Fig. 11-3 Position variations of floating platform using dGPS compared with EDM and APS: session 87-2 (28/Mar/90)

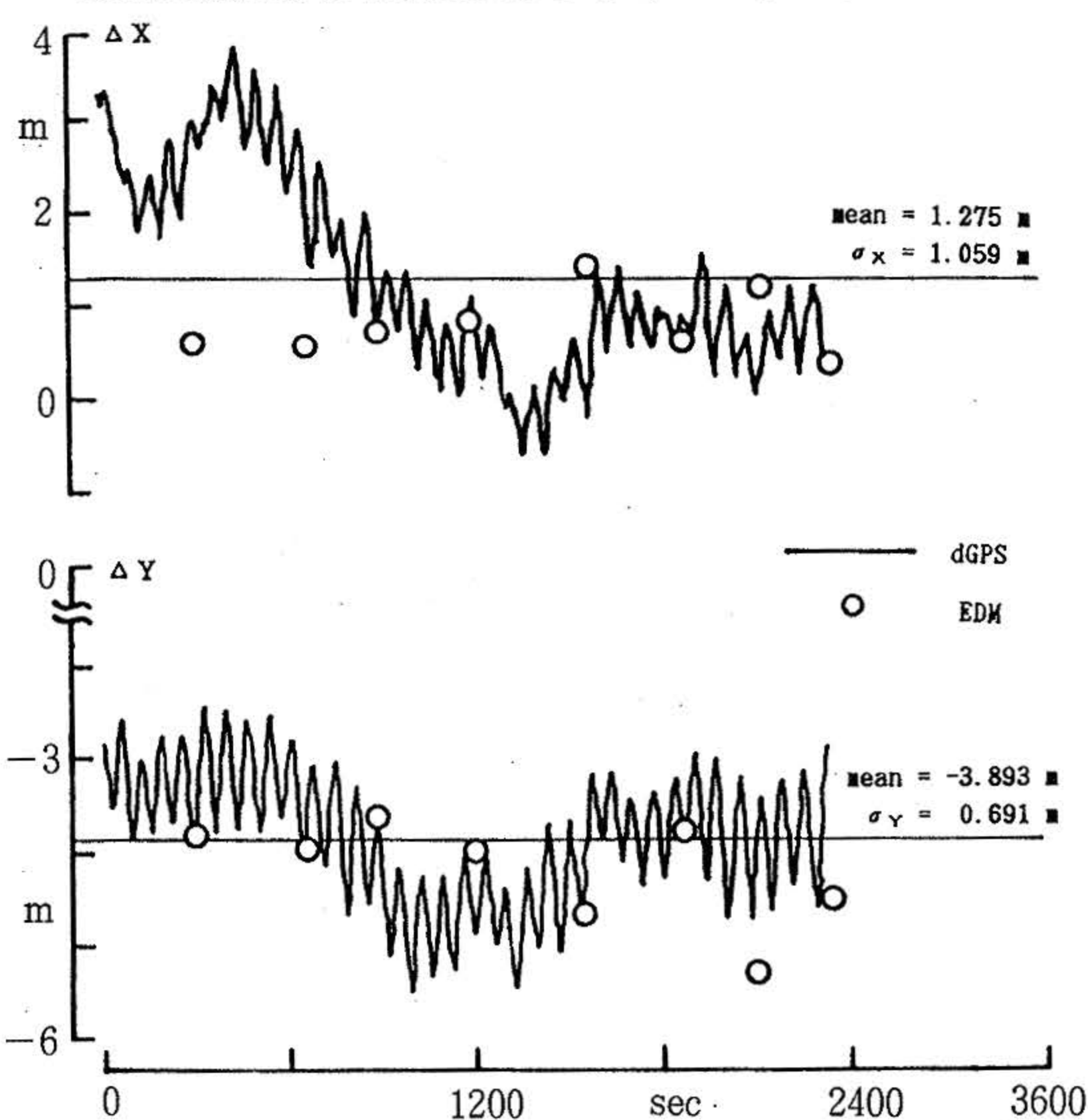


図 11-4 dGPSによる浮体運動計測結果: セッション 87-3 (90/3/28)

Fig. 11-4 Position variations of floating platform using dGPS compared with EDM and APS: session 87-3 (28/Mar/90)

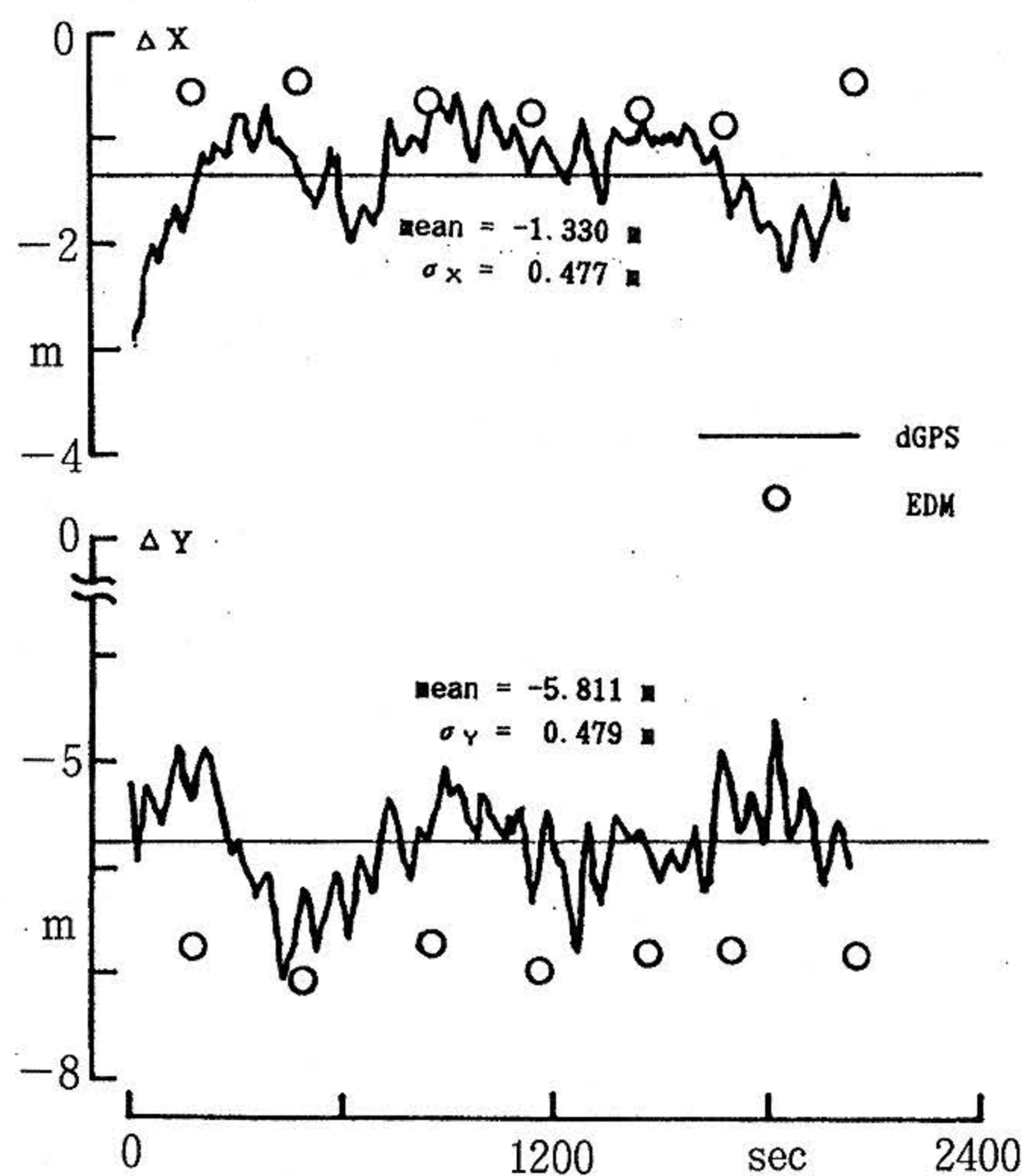


図 11-5 dGPSによる浮体運動計測結果: セッション 88-1 (90/3/29)
 Fig. 11-5 Position variations of floating platform using dGPS compared with EDM: session 88-1 (29/Mar/90)

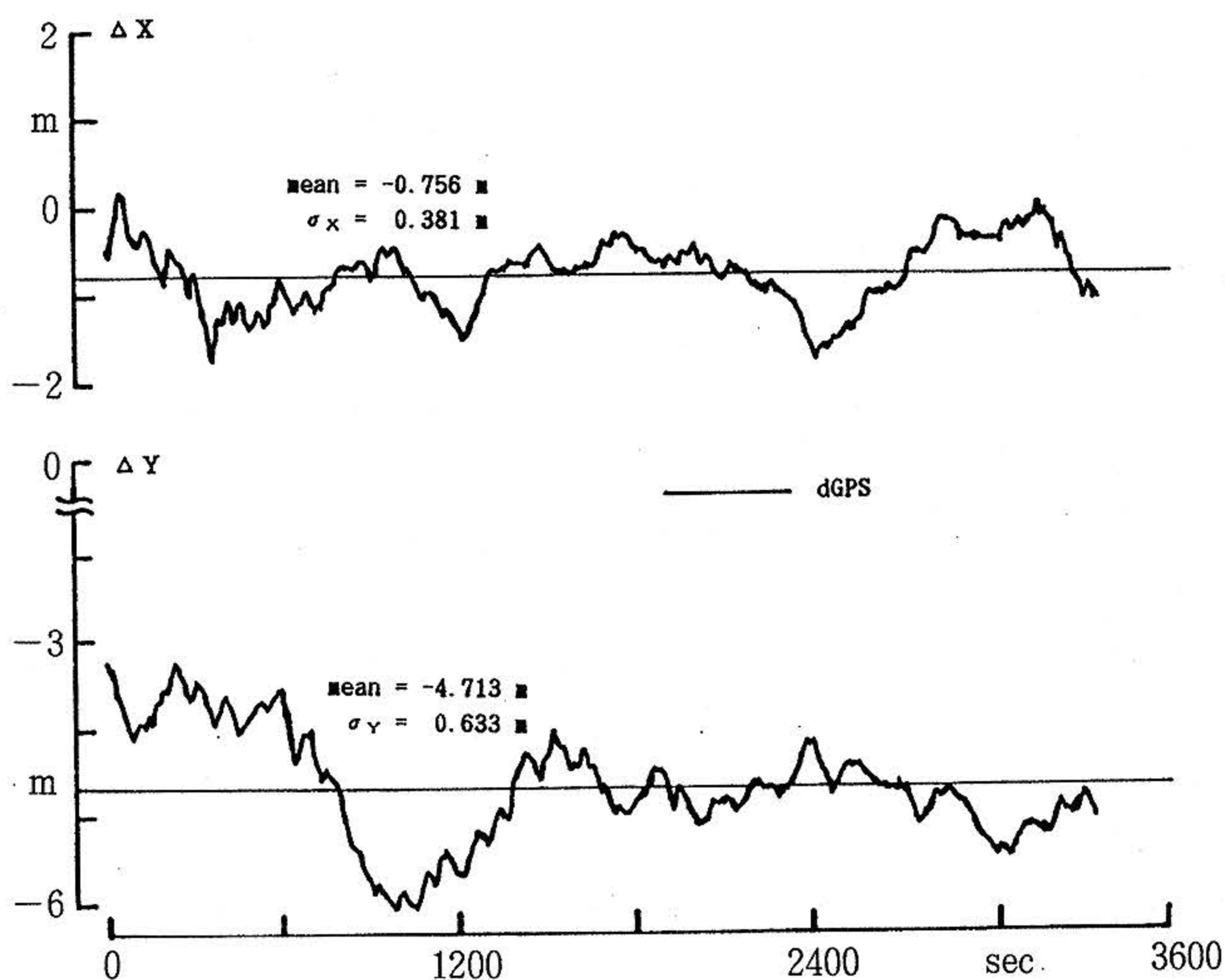


図 11-6 dGPSによる浮体運動計測結果: セッション 89-3 (90/3/30)
 Fig. 11-6 Position variations of floating platform using dGPS: session 89-3 (30/Mar/90)

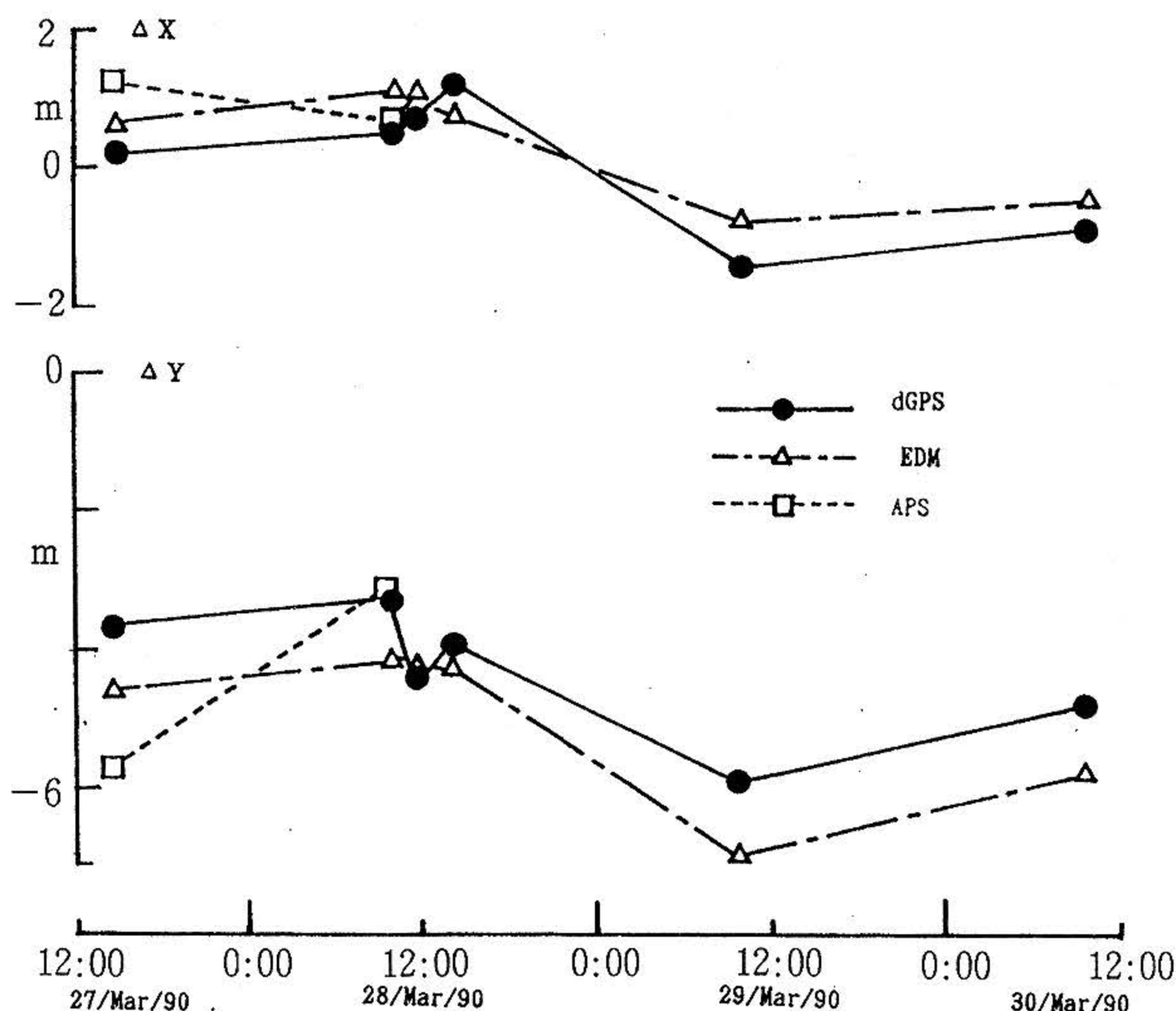


図 12 浮体の平均位置の変化

Fig. 12 Mean offsets of floating platform

究所海洋開発工学部安全性研究室長 大川 豊氏
には実験海域の風向風速データの提供をしてい
たきました。GPS観測の際ご協力いただきました
山形県漁業協同組合由良支所各位にお礼申し上げ
ます。

参考文献

- 1) 工藤君明, 北野義信: “GPSによる浮体運動計測技術 (第二報)”, 海洋科学技術センター試験研究報告第23号, pp 99-124, (1989)
- 2) GPS検討会: “GPSニュースレター第69号”, (1990)
- 3) 工藤君明, 北野義信: “GPSによる浮体運動計測技術 (第一報)”, 海洋科学技術センター試験研究報告第22号, pp 63-83, (1989)
- 4) Quill, j: “U. S. Coast Guard Differential GPS System Development”, Radio Technical Commission for Maritime Services Assembly

Meeting, April/May, (1986)

- 5) 金沢輝雄, 仙石 新, 淵田晃一: “GPSトランスロケーション法による船位の決定”, 海洋調査技術, pp 43-47, (1989)
- 6) 細野武庸, 井内 登: “基準点測量”, 社団法人日本測量協会, p 328, (1987)
- 7) 安田哲也, 工藤君明, 岡本恒男, 五嶋泰洋: “海域実験にともなうフレキシブルライザー管の設計手法”, 海洋科学技術センター試験研究報告第23号, pp 75-98, (1989)
- 8) “GPS bulletin board”, USNO, Nov. (1989)
- 9) 工藤君明, 岡本恒男, 木下 篤: “フレキシブルライザー管の海中挙動計測システムの研究開発”, 海洋科学技術センター試験研究報告第22号, pp 85-101, (1989)

(原稿受理: 1990年6月18日)