

## GPS の測位精度 - V 高安定発振器の利用について

合 田 政 次・久 野 俊 行・中 根 重 勝

### Accuracies of Position Fixes Obtained by GPS - V On the Use of High Stable Oscillator

Masaji GODA, Toshiyuki KUNO and Shigekatu NAKANE

In order to lengthen the usable time and evaluate the positioning accuracy of the GPS by means of two satellites, we made a measurement at three fixed stations in Japan with a GPS receiver connected with a high stable oscillator.

The usable time became about four hours longer at each station. Positioning accuracy was influenced by the accuracy of navigation messages from each satellite, so that we should not use an inaccurate satellite for positioning. By avoiding an inaccurate satellite, we attained almost the same fix accuracy as the low level positioning with three satellites.

Key words : GPS global positioning system ; 高安定発振器 high stable oscillator ; 精度劣化衛星 inaccurate satellite

著者らは、船舶における測位装置として、GPS を利用する立場より、その測位精度を把握するため、陸上定点での測定を行い、その結果について報告してきた<sup>1,2,3,4)</sup>。これらの測定により、本システム完成時における完全運用状態の三次元測位では、極めて高精度で測位可能なことが把握できた。

しかしながら、現時点において利用できる衛星数は6個であり、PDOP 値20以下で測位できる時間を測位時間とすれば、長崎では時期により多少の差はあるが、測位時間は数時間に限られる。

本報では、測位時間を延長するために、GPS 受信機に高安定発振器を接続して国内の三定点で連続測定を行い、2衛星しか受信できない場合の測位精度の評価を行った結果について報告する。

が長崎港に係留中(同年8月13日)に行った。

使用した受信機は、日本無線(株)製 JLR-4000F である。これは受信機 JLR-4000の改良型であり、高安定発振器 (NDM-13A)を接続することができる。それによって2衛星のみの受信でも2次元の測位が可能となり、測位時間を延長することができる。ただし、この場合の測位は原則として、PDOP 値が5以下の時に限られる。本受信機のその他の性能については JLR-4000と同一である。

基準位置は両船に設置したアンテナ位置を海図より求め、これを測地系 WGS-84に変換した値を用いた。各観測点の基準位置を Table 1 に示す。

Table 1. Observation positions (WGS-84)

	Latitude	Longitude
Hakodate	41° 47. 068' N	140° 43. 564' E
Hamada	34° 53. 434' N	132° 03. 718' E
Nagasaki	32° 42. 316' N	129° 50. 700' E

#### 測定方法および資料

測定は、本学部練習船長崎丸の実習航海中(昭和63年5月~6月)における寄港地2港、函館港(5月28日)と浜田港(6月1日)および練習船鶴洋丸

受信機の使用モードは、航法モード、最適衛星選択モードおよびLレベルモードに設定した。また、受信機にパーソナルコンピュータ(NEC PC-9801)を接続し、受信機から出力されるデータを1分間隔でフロッピーディスクに記録した。

### 結果および考察

#### 1. 測位時間

2個の衛星による二次元測位(以下2D2と記す)、3個の衛星による二次元測位(以下2D3と記す)および三次元測位(以下3Dと記す)での各レベルごとの測位時間とその割合をTable 2に示す。

全測位時間は函館と浜田では約12時間半であった

が、長崎ではそれより約2時間少なかった。しかし2D2はいずれも約4時間で、全体の約30%をしめた。既に前報<sup>4)</sup>で報告したように、長崎での測定時には8号衛星からの信号は受信できなくなっており、衛星数は6個に減少していた。従って函館、浜田の場合より、測位時間は2時間~2時間半減少した。全測位時間が減少したのは、2D3で1時間~1時間半、3Dで40~50分減少したことによるもので、2D2では測位に利用する衛星数が2個のみであるため、衛星の総数が6個でも7個でも測位時間はほとんど同じであった。

測位時間が数時間に限定されている現状において、それが4時間近く長くなることは、コスト面での問題はあがあるが、利用者にとってかなり有益なものである。

Table 2. The usable time and the ratio of each level

Observation	Position	2 D 2				2 D 3				3 D				Total			
		H	M	L	T	H	M	L	T	H	M	L	T	H	M	L	T
Hakodate	Time (h-m)	3-57		3-57		2-25	2-38	2-07	7-10	1-08	0-16	0-15	1-39	7-30	2-54	2-22	12-46
	Percentage (%)	31		31		19	21	16	56	9	2	2	13	59	23	18	100
Hamada	Time (h-m)	3-59		3-59		2-36	1-10	2-55	6-41	1-06	0-35	0-05	1-46	7-41	1-45	3-00	12-26
	Percentage (%)	32		32		21	9	23	53	9	5	1	15	62	14	24	100
Nagasaki	Time (h-m)	3-45		3-45		2-12	1-35	1-48	5-35	0-20	0-26	0-13	0-59	6-17	2-01	2-01	10-19
	Percentage (%)	36		36		21	16	18	55	3	4	2	9	60	20	20	100

2 D 2 : two-dimensional positioning with two satellites; 2 D 3 : two-dimensional positioning with three satellites

3 D : three-dimensional positioning

H : high level; M : middle level; L : low level; T : total

#### 2. 測位精度

測位精度を検討する場合、測定位置が基準位置から大きく偏位するデータがあると、それらがシステムの測位精度を不当に低下させる事もある。そこで、測位精度をより正しく推定するために、基準位置からの変緯(以下D.latと記す)と東西距(以下Depと記す)の標準偏差を求め、それらの値のいずれかの3倍(3σ)以上の誤差のあるデータを棄却した。これら棄却データは、各観測点とも全データの約3%であった。

函館での棄却データは20個であり、そのうち2D3が2個あったが、そのほかは全て2D2であった。8号衛星はルビジウム発振器の故障によって、水晶発振器で運用されているため、航法用としては測位誤差が大きくなる<sup>5)</sup>とされている。棄却データのうち8号衛星を含むものが13個であった。

浜田での棄却データは19個で、2D2が3個、2D3が14個、3Dが2個であった。ここでは2D3の棄却が多く、2D2での棄却が少ないことから、2D2でも比較的精度良く測位出来たものと考えら

れる。しかし、8号衛星を含むものは13個で函館と同数であった。

長崎では棄却数18個のうち2D2が8個、2D3、3Dが各々5個であった。

これら棄却されたデータの、基準位置からの平均偏位距離は、浜田、長崎では0.2海里であったが、函館では0.8海里であった。また最大値は浜田、長崎では0.3海里にすぎなかったが、函館では1.1海里に達していた。なお、これら棄却データは受信機が受信する衛星を切り換える前後に発生し、しかも数分間連続する事が多かった。米国コーストガードによる、定点における試験<sup>6)</sup>でも上記のような場合には測位の中断やジャンプが認められており、同様の現象と考えられる。また時間的に連続しているだけでなく、その位置の変化には方向性がみられ、すでに述べられている<sup>7,8)</sup>ような衛星の組み合わせによる分

布特性は2D2の場合にも生ずるものと考えられる。測定位置の分布の一例として、比較的その分布特性が顕著であった函館での衛星番号8と11の組み合わせ（以下番号のみを記す）および長崎での11・13について Fig. 1, 2 に示す。これらはいずれも時間の経過と共に北東方向へ偏位し、やがて2衛星とも高高度に達し、PDOP 値が5以上になり測定不能となった。

以下の2D2の測位精度は、前述のように棄却を行った上で算出した。それらを Table 3 に示す。また観測点を原点、平均位置を中心に偏位距離の標準偏差を半径とした場合の誤差円と測定位置の分布を Fig. 3, 4, 5 に示す。

浜田での測位誤差（平均偏位+標準偏差）は約121 mで、これは前報<sup>4)</sup>で報告した二次元測位のHレベル（以下2Hと記す、他の場合も同様に記す）と

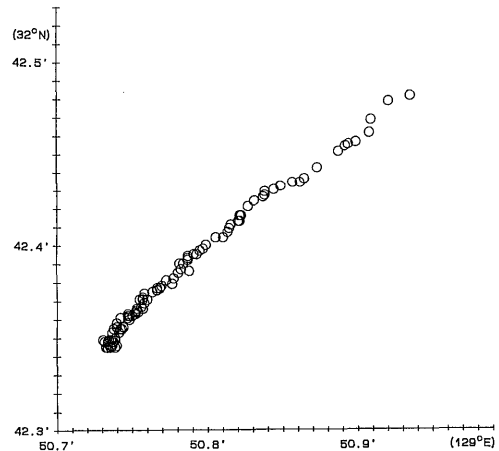
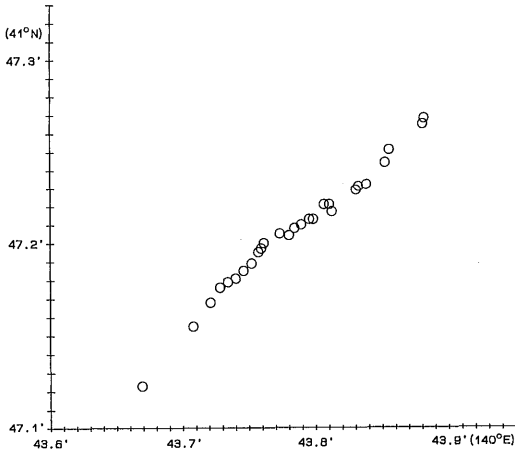


Fig. 1 . Distribution of position fixes obtained by two satellites at Hakodate. (satellite Nos. 8 and 11)

Fig. 2 . Distribution of position fixes obtained by two satellites at Nagasaki. (satellite Nos. 11 and 13)

Table 3 . The mean values and standard deviations of D. lat, Dep and Distance for 2 D 2 (unit in meter)

Observation Position	No. of Data	D. lat		Dep		Distance	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Hakodate	219	-190.9	321.9	449.6	520.0	488.4	611.6
Hamada	236	15.7	35.9	30.4	79.5	34.2	87.2
Nagasaki	217	61.3	68.4	36.0	89.5	71.1	112.6

2 D 2 : two-dimensional positioning with two satellites  
SD : standard deviation

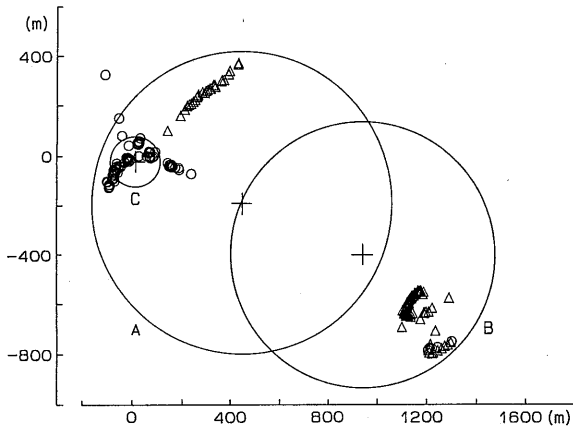


Fig. 3. Distribution of position fixes obtained by combination of satellites, the mean position and error circles of  $1\sigma$  at Hakodate.  
 Triangle : used No. 8 satellite  
 Circle : unused No. 8 satellite  
 A : all data ; B : used No. 8 satellite  
 C : unused No. 8 satellite

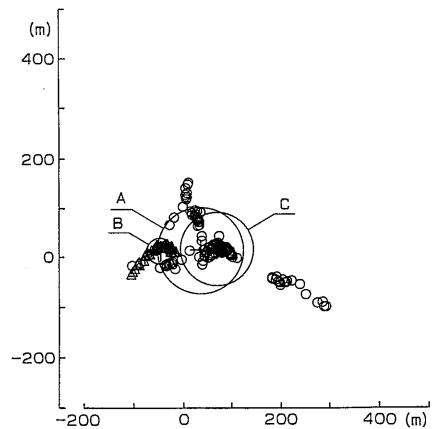


Fig. 4. Distribution of position fixes obtained by combination of satellites, the mean position and error circles of  $1\sigma$  at Hamada.  
 Triangle : used No. 8 satellite  
 Circle : unused No. 8 satellite  
 A : all data ; B : used No. 8 satellite  
 C : unused No. 8 satellite

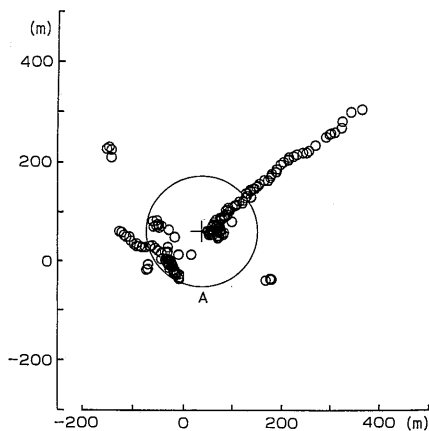


Fig. 5. Distribution of position fixes obtained by combination of satellites, the mean position and error circle of  $1\sigma$  at Nagasaki.

ほぼ同じ値であった。長崎での測位誤差は約184 mで、これは同じく前報<sup>1)</sup>で報告した2 Lよりも約50 m大きい。これらは2 D 2の測位誤差としてほぼ妥当な値である。しかし、函館では約1100 mと極めて大きな値で、2 D 3の各レベルと比較してかなりの差がみられた。

その一因として、8号衛星の精度劣化による影響が考えられる。そこで、函館と浜田での測定結果について、衛星の組み合わせにより、8号衛星が使用さ

れているか否かで分類して、計算した結果を Table 4, 5に示し、Fig. 3, 4にはそれぞれの測定位置の分布と誤差円も併せて図示した。

8号衛星が使用されていない場合の測位精度は Table 4および Fig. 3, 4に示した様に、両地間にほとんど差はなく、その測位誤差は函館で約131 m、浜田で約145 mであった。これらの値は、前報<sup>1)</sup>における2 Lと比較すると、函館では約30 m小さく、浜田では約10 m大きい、いずれも2 Lと同程度と言えよう。

8号衛星を使用した場合の測位誤差は、Table 5および Fig. 3, 4に示した様に、函館と浜田とでは大きく異なり、函館では約1562 m、浜田では約74 mであった。浜田での値は前報<sup>1)</sup>における3 Lよりも約10 m大きいのみであり、2 Lの約1/2にすぎない。しかし函館での値は8号衛星を使用しない場合の10倍以上であった。この様に函館と浜田とで測位誤差が異なった原因として、函館での測定時には8号衛星がかなり劣化していたが、浜田に寄港したときは一時的に回復したことが考えられる。しかし、衛星の監視、制御は米国によって行われており、それらに関する情報の詳細は不明な点が多い。

衛星から送信されてくる軌道情報は、それ以前の軌道追跡データに基づく予報軌道であるため、時間の経過と共に軌道情報が現実の軌道から多少ずれた

Table 4. The mean values and standard deviations of D. lat, Dep and Distance for 2 D 2 unused No. 8 satellite (unit in meter)

Observation Position	No. of Data	D. lat		Dep		Distance	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Hakodate	111	-24.6	49.7	17.1	88.1	30.0	101.2
Hamada	153	16.5	39.6	68.1	63.5	70.1	74.8

2 D 2 : two-dimensional positioning with two satellites  
SD : standard deviation

Table 5. The mean values and standard deviations of D. lat, Dep and Distance for 2 D 2 used No. 8 satellite (unit in meter)

Observation Position	No. of Data	D. lat		Dep		Distance	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Hakodate	118	-402.3	382.6	940.1	380.4	1022.6	539.5
Hamada	79	14.2	12.3	-48.4	20.3	50.4	23.7

2 D 2 : two-dimensional positioning with two satellites  
SD : standard deviation

ものになっていく<sup>9)</sup>。定位置での測位誤差は測位計算に使用した軌道要素の正確さに左右され、予報軌道情報を基に計算される衛星位置誤差、衛星内時計誤差、受信機内時計誤差、さらに電波伝搬の遅延誤差などが含まれる。函館と浜田とで測位誤差が異なった原因を検討するため、8号衛星自体の精度には変化がなかったものとして、両地で共通していた6号衛星と8号衛星の軌跡を Fig. 6 に示す。測定場所により衛星の方位角と仰角は多少異なる。函館では、前述の衛星位置誤差や衛星内時計誤差等に加えて、6号、8号衛星ともに仰角が5度、7度と低高度から測位が開始され、電波伝搬の遅延誤差の影響も大きかったものと考えられる。一方浜田では、8号衛星の仰角が函館よりも12度高い19度から開始されている。これによって多少とも電波伝搬の遅延誤差が減少し、さらに、8号衛星の軌道情報誤差、高安定発振器の誤差、衛星の水晶発振器の不安定さから生じる偶然誤差などが変化し、互いに相殺されたのではないとも考えられる。

従って2 D 2 では、精度劣化衛星を使用すべきで

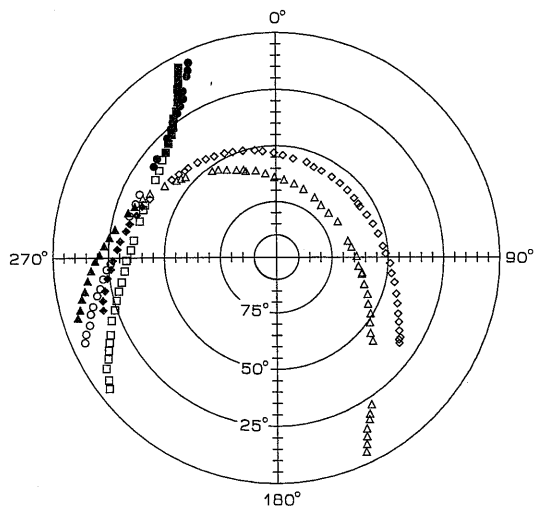


Fig. 6. The tracks of two satellites at two observation positions.

- Solid circle : satellite No. 6 (used for positioning at Hakodate)
- Open circle : satellite No. 6 (unused for positioning at Hakodate)
- Solid triangle : satellite No. 8 (used for positioning at Hakodate)
- Open triangle : satellite No. 8 (unused for positioning at Hakodate)
- Solid square : satellite No. 6 (used for positioning at Hamada)
- Open square : satellite No. 6 (unused for positioning at Hamada)
- Solid rhomb : satellite No. 8 (used for positioning at Hamada)
- Open rhomb : satellite No. 8 (unused for positioning at Hamada)

はなく、正常な衛星のみを使用すれば2 D 3のLレベル程度の精度で測位できるものと言えよう。

### まとめ

測位時間を延長するために、GPS 受信機に高安定発振器を接続して、国内の三定点で連続測定を行い、2衛星での測位結果について検討した。その結果、各地ともに測位時間が約4時間長くなり、衛星の総数が6個でも7個でも、ほとんど変化は見られなかった。

測位精度は各衛星からの情報の精度に影響されるので、正常な衛星のみを使用すれば、一般に、3衛星による測位のLレベル程度の精度で測位できる。

既に8号衛星は信号の送信を停止したが、6号衛星は8号衛星よりも古い衛星であり、今後も順次、精度劣化衛星が出現すると考えられる。2衛星による測位は、精度劣化衛星を使用した場合には、航法用に使用すべきではない。しかし、精度劣化衛星を使用したことによる影響は、使用する衛星数が増加するにつれて減少し、4衛星による測位では、ほとんど影響しない。

本研究にあたり、測定に御協力いただいた長崎丸船長矢田殖朗教授、並びに鶴洋丸船長秋重祐章助教および両船の乗組員各位に深甚の謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 合田政次 他2名(1987) : GPS の測位精度 - I, 陸上定点における測定, 本誌, **62**, 33-40
- 2) 合田政次 他2名(1988) : GPS の測位精度 - II, 二定点における同時測定, 本誌, **63**, 55-63
- 3) 久野俊行 他3名(1988) : GPS の測位精度 - III, 同型受信機による同時測定, 本誌, **64**, 17-22
- 4) 合田政次 他3名(1989) : GPS の測位精度 - IV, 三定点における測定, 本誌, **65**, 45-53
- 5) 木村小一(1987) : 造船技術, **5**, 41-79, 東京, (株)ジャパン・インダストリアル・パブリッシング
- 6) 木村小一(1986) : 船の科学, **5**, 87-91, 東京, 船舶技術協会
- 7) 奥田那晴(1987) : 船舶用 GPS 受信装置の測位精度について, 日本航海学会誌 航海, **94**, 39-43
- 8) 本村紘治郎 他4名(1988) : GPS の測位精度 - I, 定点における測位結果, 日本航海学会誌 航海, **96**, 39-46
- 9) 日本測地学会編(1986) : GPS - 人工衛星による精密測位システム -, 69-88, 東京, 日本測量協会