

## GPSの測位精度—II 二定点における同時測定

合田政次, 久野俊行, 中根重勝

### Accuracies of Position Fixes Obtained by GPS—II Simultaneous Observation at Two Fixed Stations

Masaji GODA, Toshiyuki KUNO and Shigekatu NAKANE

Simultaneous measurements were taken at two fixed stations in Nagasaki in order to evaluate the positioning accuracy of GPS for ten days in Jan., 1987.

We received positioning signals from 6 satellites. The usable time at these stations was about 4.5 hours, 2 hours less than for the results reported in our previous paper. Two and three dimensional high level positioning accounted for 13~14% of the total time, i. e. about 40 minutes.

The positioning errors at Nagasaki University agreed with the results of our previous research. Even the positioning error of 2L (two-dimensional low level positioning), which was largest, was only about 167 meters. The positioning errors at Nagasaki maru were large, and the largest positioning error of 2L was about 281 meters.

As the data for high level positioning were few, we could not compare it in full with the positioning accuracy of combinations of satellites. Though the two fixed stations were quite near (about 9 kilometers), the combination of satellites or the number of satellites on positioning varied from observation to observation.

The displacement of the two fixed stations on positioning at the same time varied from moment to moment and there were many cases in which the direction or the distance of the displacement did not agree.

**Key words:** 同時測定 simultaneous observation; 測位時間 usable time; 2次元測位 two-dimensional positioning; 3次元測位 three-dimensional positioning; PDOP position dilution of precision

次代の衛星航法システムと言われ、その早期の完成が期待されている NAVSTAR/GPS (以下 GPS と略す) の測位精度を把握するため、著者らは陸上定点 (長崎大学) で約1ヶ月間にわたる測定を行い、その結果について報告した。<sup>1)</sup>

GPSによる測定では、観測点や時期により、測位可能な時間帯、衛星の組み合わせも異なる。

本報では、異なる二定点において同時に連続測定した結果について報告する。

#### 測定方法及び資料

測定は昭和62年1月5日~28日の期間に長崎大学水産学部、長崎港の柳埠頭に係留中の本学部練習船長

崎丸の二定点において10分間隔で行った。そのうち同時測定を行った10日間のデータについて評価した。長崎大学水産学部(以下A点と略す)の基準位置は前回の62年12月に行った測定(以下前回と略す)と同一地点(WGS-72測地系: lat 32° 47. 161' N, Long 129° 51. 932' E)であり, 長崎丸(以下B点と略す)の基準位置は同船のアンテナ位置(lat 32° 42. 127' N, Long 129° 50. 850' E)を海図(No. 202長崎港 1/10000)から求め, これをWGS-72測地系に変換したもの(lat 32° 42. 323' N, Long 129° 50. 707' E)を用いた。

使用した受信機はいずれも日本無線(株)製JLR-4000であり, その性能については既に前報<sup>1)</sup>で記述した。なお二定点での測位精度を検討するに際し, 受信機自体による誤差は測位誤差に比較して微小と考えられるので考慮しないものとした。

受信機の使用モードは前回と同様に航法モード, 最適衛星選択モードおよびLレベルモードに設定して測定を行った。

結果および考察

1 測位時間

受信できた衛星は, 前回と同一で, 個数は6個であった。二次元測位(以下2Dと記す)または三次元測位(以下3Dと記す)での測位時間と各衛星の組み合わせを, 上・中・下旬の各1日を選び測点別に

Fig. 1に示した。また, 両観測点での平均測位時間とその比率を, 各レベル毎に示したものがTable 1である。

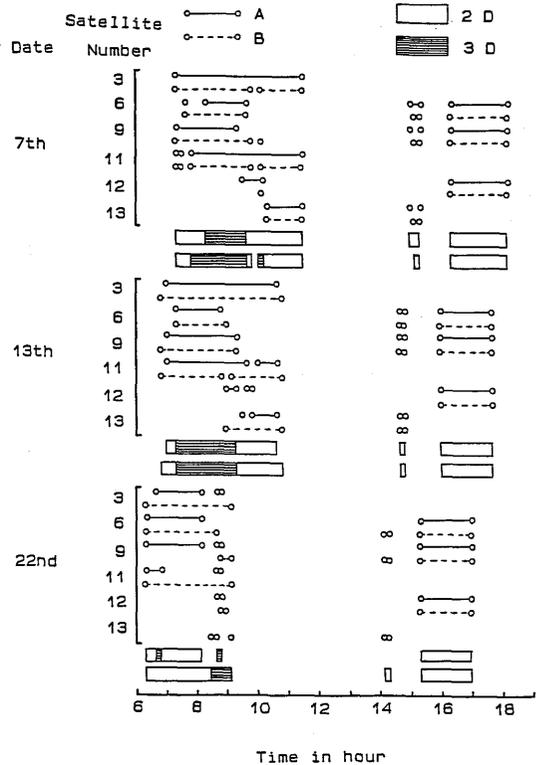


Fig. 1. The usable time of each satellite and the method of position fixing in Jan. 1987. 2D: two-dimensional positioning; 3D: three-dimensional positioning A: Nagasaki University; B: Nagasaki maru

Table 1. The usable time and the ratio of each level of 2D and 3D

	2 D				3 D				Tota				
	H	M	L	T	H	M	L	T	H	M	L	T	
A	Time (h-m)	0-35	1-46	1-15	3-36	0-03	0-10	0-44	0-57	0-38	1-56	1-59	4-33
	Percentage (%)	13	39	27	79	1	4	16	21	14	43	43	100
B	Time (h-m)	0-31	1-32	1-17	3-20	0-05	0-16	0-57	1-18	0-36	1-48	2-14	4-38
	Percentage (%)	11	33	3	72	2	6	20	28	13	39	48	100

A: Nagasaki Univ.; B: Nagasaki maru  
 2D: two-dimensional positioning; 3D: three-dimensional positioning  
 H: high level; M: middle level; L: low level; T: total

平均測位時間は両観測点とも約4時間30分であり、また、各レベル毎の測位時間の割合もほぼ同じであった。前回の結果と比較すると、受信できた衛星数に変化がないにもかかわらず、平均測位時間は約2時間短くなった。しかし、2Dと3Dの割合は両観測点とも70%台と20%台で、前回とほぼ同じであった。さらに、レベル毎の割合は、2DではMレベル(PDOP $\leq 10$ )が10%減少し、その分だけLレベル(PDOP $\leq 20$ )が増加している。一方、3DではHレベルがわずかに1~2%のみで、Mレベルも4~6%とそれぞれ著しく減少し、Lレベルが前回の2~3%から16~20%に増加した。また、Hレベルは2Dと3Dをあわせても13~14%、時間にして40分弱で、前回と比べると約1.5時間の減少である。

本システムの完成時には、PDOP値がおおむね6までの値のときをカバレッジとしている<sup>2)</sup>が、衛星数が少ない現状では、時期によってHレベルだけで

は測位時間が極めて短くなる。従って、M、Lレベルでの測位を評価し、有効に利用することが望ましい。

## 2 測位精度

同時測定を行った10日間のデータから、受信レベルが不明のもの(A点2個、B点5個)を除き、さらに観測点からの変緯、東西距(以下D.lat, Depと記す)が標準偏差の3倍( $3\sigma$ )以上のデータ(A点8個、B点2個)を棄却し、A点328個、B点339個について検討した。

### 2.1 各次元のレベル毎の精度

2D, 3Dのレベル毎のデータ数とD.lat, Depの平均値および標準偏差をTable 2に示した。また、観測点を原点として各レベルの平均位置と、その点を中心とする $\sigma$ の誤差楕円を、前回の結果とともにFig. 2に示した。また、A, B両観測点の平均位置

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

Dimension	Level	No. of Data	D. lat		Dep		Distance		
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
2D	H	39	0.1	28.4	21.6	50.6	21.7	58.0	
	M	131	19.9	65.6	15.7	88.7	25.4	110.3	
	L	85	-11.0	85.1	16.1	120.8	19.5	147.7	
	Total	255	6.6	70.1	16.7	96.1	18.0	119.0	
A	3D	H	6	-4.9	21.7	30.6	51.6	31.3	55.9
		M	13	-10.4	28.9	37.6	56.7	39.1	63.6
		L	54	-3.9	53.3	-3.4	87.5	5.2	102.4
	Total	73	-5.1	47.7	6.7	81.6	8.5	94.5	
Total		328	4.0	65.9	14.5	93.1	15.0	114.1	
2D	H	37	-6.6	48.6	30.8	78.9	31.7	92.6	
	M	115	21.2	92.9	55.6	112.6	59.4	146.0	
	L	94	-2.8	127.2	50.4	192.1	50.6	230.4	
	Total	246	7.8	103.3	49.9	144.5	50.4	177.6	
B	3D	H	6	-8.6	21.6	20.3	39.4	22.0	45.0
		M	22	-24.1	45.4	46.5	47.5	52.4	65.8
		L	65	2.4	77.4	7.6	136.1	7.8	156.6
	Total	93	-4.6	69.2	17.6	117.3	18.1	136.3	
Total		339	4.4	95.2	41.0	138.2	41.1	167.8	

A: Nagasaki Univ.; B: Nagasaki maru

H: high; M: middle; l: low; SD: standard deviation

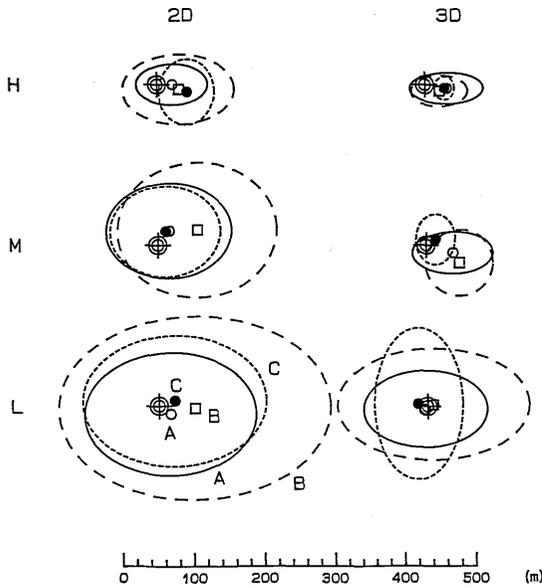


Fig. 2. The mean position and error ellipses of 1  $\sigma$ .  
 2D: two-dimensional positioning; 3D: three dimensional positioning  
 H: high level; M: middle level; L: low level  
 A: Nagasaki Univ. (Jan. 1987); B: Nagasakimaru  
 C: Nagasaki Univ. (Dec. 1986)  
 ⊙: observation position

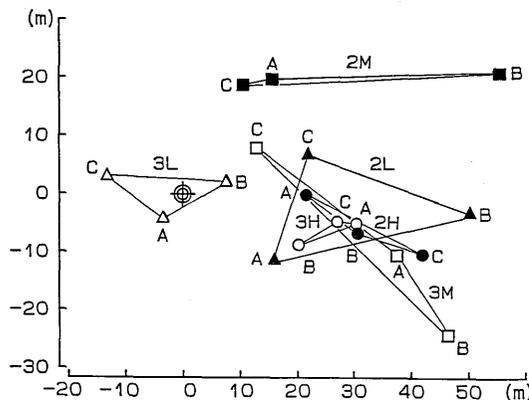


Fig. 3. Triangles by the mean position for each level of 2D and 3D.  
 ⊙: observation position  
 ○: high level of 3D (three-dimensional positioning);  
 □: middle level of 3D; △: low level of 3D;  
 ●: high level of 2D (two-dimensional positioning);  
 ■: middle level of 2D; ▲: low level of 2D  
 A: Nagasaki Univ. (Jan. 1987); B: Nagasakimaru;  
 C: Nagasaki Univ. (Dec. 1986)

(図載の符号 A と B) および A 点における前回の平均位置 (図載の符号 C) を 2D と 3D に分けて, 同レベルのものを結び三角形で示したものが Fig. 3 である。すなわち, AB は同時測定による 2 定点間の相対誤差, AC は同一点における時期別の相対誤差をあらわす。

2D の H レベル (以下 2H と記す。その他の場合についても同様の方法で記す), 3H の平均位置はほぼ東方へ約 20~40m の範囲に集まり三角形は小さく偏平である。2M では D. lat はほとんど同じであるが, B が大きく東偏し, 3M では, A, B とも SE 方向に偏位し, AC 間の差が大きい。2L は AC, AB 間の差がともに大きく面積も最大で, 時期と場所による差が最も大きい, その間の距離は約 20~40m にすぎない。3L では観測点からの偏位量は小さいが三角形はやや大きく, 平均位置が西偏したのはこの A, C のみである。レベルにより三角形の形は異なっているが, 各レベルの平均位置は南北方向  $\pm 20$ m, 西側 15m, 東側 50m の範囲に存在している。また, 2L では A と C の D. lat の符号が反対となり, 3M の A は南東方向へ大きく偏位して, その D. lat, Dep とともに時期により差があることを示している。

標準偏差について A と B を比較すると, Fig 2 に示したように, 3H で B の方が小さく, 3M ではほぼ等しいが, その他はいずれも A の方が小さかった。また, いずれも Dep の標準偏差が D. lat のそれよりも大きく, 横長の誤差楕円となった。A と C では偏位量はほぼ同じであるが, 2H で A の D. lat の標準偏差が半減し, Dep のそれが増加したことで, 3H と 3M ではデータ数が少ないので断定はできないが, とともに A の標準偏差が大きくなった。従って, C では 2M と 2L のみが横長の誤差楕円であったが, A では全部横長の誤差楕円となった。

測定した位置の誤差 (平均偏位  $\pm$  標準偏差: 以下測位誤差と略す) は, 3H を除けば各レベルとも B が最も大きく, 特に 2L では 281m で約 0.15 海里であった。このように測位誤差が大きくなったのは, Dep の標準偏差が 192m におよんだことが影響している。その一因として長崎丸の係留岸壁がほぼ東西方向であるため, 風潮により船体が移動する事が考えられるが, その距離は数メートル以下であり, 無視してよい。「ある衛星から来る電波にシンチレーションが起きると, 電波の位相が変動するので, GPS 測位では誤差

の原因となる。<sup>\*1</sup>」ことから、4個の衛星で測定する3Dの場合よりも、3個の衛星で測位する2Dの方が影響が大きいためと考えられる。また、田口<sup>3)</sup>によれば「デッキ電波のようなLF波では鋼船の船体が垂直円形ループアンテナとなり電波を再放射すると、電波の位相が変化することによる誤差が考えられる。この対策としては最も誤差の少ない位置にアンテナを設置すべきであり、アンテナ位置の選定が重要である。」ので、使用電波の周波数は異なるが、アンテナ位置による受信波の変動について検討する必要がある。さらに、米国コastsガードによる、定点における試験<sup>4)</sup>によれば、使用衛星の切換え時、軌道データ取込み時や新しい衛星の信号取込み時には、測位の中断やジャン

プが認められ、衛星の仰角が低いときには測位誤差が増加している。従って、今回の測定では測位可能な時間が大幅に減少したことから、仰角の低い衛星が多かったことや衛星の組み合わせが変化する機会が多かったために、測位誤差が増大したものと考えられる。

2.2 衛星の組み合わせによる精度

衛星の組み合わせと各レベル毎のデータ数をTable 3, Table 4に示した。これらのうちデータ数が10個以上のものについて、D. lat, Depの平均値及び標準偏差を求めTable 5, Table 6に示し、それらの分布状態をFig. 4に示した。

Table 3. Number of position fixes taken by combination of satellites at each level on Nagasaki University

	Combination of Satellites					Level				
	3	6	9	11	12	13	H	M	L	Total
2 D	●	●	●				33	4	3	40
	●	●		●			1	7	6	14
	●	●				●	2			2
	●		●	●			3	14	1	18
	●			●	●		5			5
	●			●		●	7	31		38
	●				●	●	1			1
		●	●	●					8	8
		●	●		●		72	36		108
		●	●			●	21			21
	Total					39	131	85		255
3 D	●	●	●	●			3	44		47
	●	●		●	●		3	2		5
	●	●		●		●	1	2		3
	●		●	●	●		2	5	8	15
	●		●	●		●			1	1
	●		●		●	●	1			1
	●			●	●	●			1	1
		Total					6	13	54	

2D: Two-dimensional positioning; 3D: Three-dimensional positioning H: high; M: middle; L: low

Table 4. Number of position fixes taken by combination of satellites at each level on Nagasaki maru

	Combination of Satellites					Level					
	3	6	9	11	12	13	H	M	L	Total	
2 D	●	●	●				28	2	2	32	
	●	●		●				7	8	15	
	●		●	●			5	10	2	17	
	●			●	●			5	34	39	
	●			●		●	3		6	9	
		●	●	●		●	72	42		114	
		●	●			●	19			19	
			●	●		●	1			1	
		Total					37	115	94		246
	3 D	●	●	●	●				8	52	60
●		●	●		●		2			2	
●		●	●			●		2		2	
●		●		●		●			2	2	
●			●	●	●		2	10	8	20	
●			●	●		●	2	2	3	7	
	Total					6	13	54		73	

2D: two-dimensional positioning; 3D: three-dimensional positioning H: high; M: middle; L: low

\*1 GPSの測地利用および応用に関するシンポジウム集録  
熊谷 博 他1名(1987):GPS測位に及ぼす電離圏の影響  
(b)電波シンチレーション

Table 5. The mean values and standard deviations of D. lat, Dep and Distance by combination of satellites at each level of 2D and 3D at Nagasaki University in Jan., 1987 (unit in meter)

Dimension	Level	No. in Fig. 4	Combination Satellite No.	D. lat		Dep		Distance	
				Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
2 D	High	1	3 • 6 • 9	1.0	26.6	13.9	50.8	13.9	57.3
		2	3 • 9 • 11	-20.4	72.3	18.0	75.7	27.2	104.7
	Middle	3	6 • 9 • 12	22.6	37.5	25.2	98.0	33.9	104.9
		4	6 • 9 • 13	60.8	74.9	-2.4	68.3	60.7	101.3
	Low	5	3 • 11 • 13	-40.1	103.3	-3.1	77.4	40.2	129.1
		3	6 • 9 • 12	27.5	52.1	10.3	140.3	29.3	149.5
3 D	Low	1	3 • 6 • 9 • 11	0.7	50.1	-16.2	83.8	16.1	97.6

SD: standard deviation

Table 6. The mean values and standard deviations of D. lat, Dep and Distance by combination of satellites at each level of 2D and 3D at Nagasaki maru (unit in meter)

Dimension	Level	No. in Fig. 4	Combination Satellite No.	D. lat		Dep		Distance	
				Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
2 D	High	1	3 • 6 • 9	-10.9	50.1	25.3	86.1	27.4	99.7
		2	3 • 9 • 11	-135.2	72.5	91.9	112.4	163.5	133.8
	Middle	3	6 • 9 • 12	15.3	42.5	66.1	104.9	67.8	113.1
		4	6 • 12 • 13	100.7	78.3	-23.2	88.2	103.3	117.9
	Low	5	3 • 11 • 13	19.0	157.3	48.7	140.7	52.2	211.0
		3	6 • 9 • 12	13.8	87.9	34.7	224.9	37.4	241.4
3 D	Middle	2	3 • 9 • 11 • 12	-22.2	35.4	73.2	36.1	76.7	50.6
	Low	1	3 • 6 • 9 • 11	8.0	73.5	-13.3	120.7	15.6	141.2

SD: standard deviation

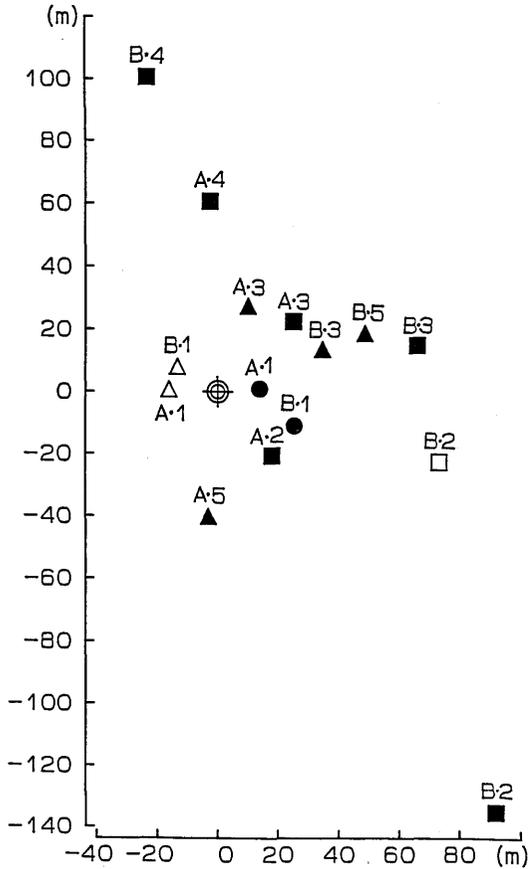


Fig. 4. Distribution of position fixes obtained by combination of satellites.  
 ⊗: observation position  
 □: middle level of 3D (three-dimensional positioning);  
 △: low level of 3D; ●: high level of 2D (two-dimensional positioning)  
 ■: middle level of 2D; ▲: low level of 2D  
 A: Nagasaki Univ. (Jan. 1987); B: Nagasaki maru  
 Numbers refer to combinations shown in Tables 5 and 6

なお、Fig. 2 に各レベル毎の平均位置と誤差楕円を示したが、それらと著しく傾向の異なった2Mの衛星番号3・9・11 (以下番号のみを記す)、6・9・13および2Lの3・11・13の両観測点における平均位置と誤差楕円をFig. 5に示した。

A点での組み合わせは、前回とは多少異なり、3Dの6・11・12・13、9・11・12・13は出現しなくなり、新たに3・9・12・13が出現した。2Dでは9・11・13がなくなり、3・6・13、3・12・13が出現した。また、データ数は10個未満であるが、A点だけに出現した

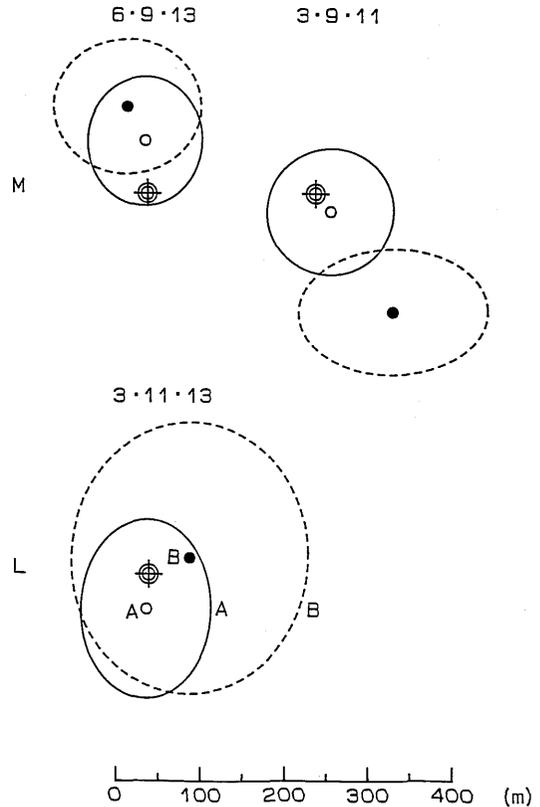


Fig. 5. The mean position and an error ellipses of 1  $\sigma$  for combination of satellites.

⊗: observation position  
 M: middle level; L: low level  
 A: Nagasaki Univ. (Jan. 1987); B: Nagasaki maru

組み合わせが3Dで3組、2Dで3組あり、B点だけのものが3Dで2組、2Dで1組みられた。両観測点とも3Dのデータが少なく、特にH、Mレベルのデータ数は少ない。2Dでも両観測点で測定できたHレベルは3・6・9のみであった。

B点はA点から192度、距離4.9海里(約9km)の地点であり、Fig. 1に示したように、両観測点での測位の開始、終了時刻にはほとんど差がない。また、衛星の高度は約20,000 kmであり、両観測点から衛星を見る場合の視覚角は約0.015度にすぎない。それにもかかわらず、測位に利用する衛星が異なる場合や、同時刻でもA点では3Dで測定できたのにB点では2Dのことがあった。これは両観測点とも周囲が山に囲まれた地形であるから、衛星が近くの山の陰になったことによるものと考えられる。

A点において、前回と同レベルで同一組み合わせ

の3Lの3・6・9・11は平均位置および標準偏差ともに前回より小さくなり、その測位誤差は114mで、2Hの3・6・9でも測位誤差は減少したが、その他の2M、2Lでは前回とほぼ同精度であった。B点では、全体的に測位誤差が大きく、最小の2Hの3・6・9でも約127m、最大の2Mの3・9・11は約300mであった。同レベルで同一組み合わせの場合の比較では、B点の方がA点よりも40~165m大きかった。これはB点ではH、Lレベルの標準偏差が大きく、Mレベルの偏位量が大きいことによる。

### 2.3 測位の経時変化

1日の時間経過に伴う変化について検討するため、A、B両観測点で衛星の組み合わせが最も異なっていた21日と、一日中ほぼ同じ組み合わせであった26日を選び、観測点からの偏位の方向と距離を測定時刻毎に示したものがFig. 6である。

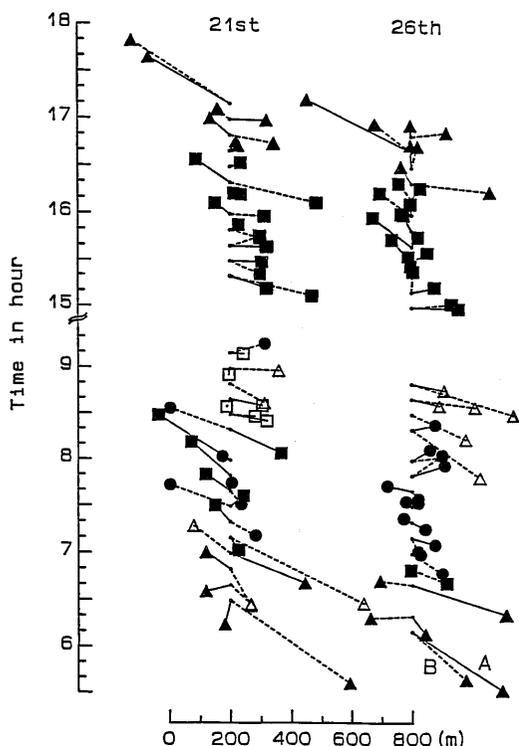


Fig. 6. The change of displacement with time.  
 □: middle level of 3D (three-dimensional positioning);  
 △: low level of 3D; ●: high level of 2D (two-dimensional positioning)  
 ■: middle level of 2D; ▲: low level of 2D  
 A: Nagasaki Univ. (Jan. 1987); B: Nagasaki maru

21日の午後および26日の衛星の組み合わせはほぼ同じであるが、観測点により偏位の方向や距離が異なるのは、測位の始めと終りの頃および連続測位中でも次のレベルに変化する頃であった。しかし、通常は方向が異なっても距離は小さかった。

衛星の組み合わせが異なっていた21日の午前中では、偏位方向が同じものはほとんど見られず、B点での偏位距離が大きく、その最大値は南東方向に約524mである。

高精度の船位測定が可能なGPSではあるが、定点でも測定位置は時々刻々変化し、時には数海里~十数海里の誤差を含む位置を表示する場合がある。通常の航海中には一定時間間隔で船位を求めるから、測定位置に含まれている誤差に気付かないでそのまま利用される。大洋航行中や表示位置を連続プロットしている場合などには、それほど問題とはならないが、沿岸航行中の視界不良時に使用する場合には、危険におちいることも考えられる。従って、今後さらにそのような大きな誤差の発生頻度や大きさについても把握しておくことが必要である。

### ま と め

長崎の二定点において、10日間の同時測定を行った結果、受信できた衛星は両観測点とも6個であり、平均測位時間は約4時間30分であった。これは前報の場合より約2時間短かく、特にHレベルは2D、3Dあわせて13~14%、時間にして約40分間であった。

A点における測位誤差は前報の場合とほぼ同程度であり、最大の2Lでも約167mであった。B点における位置誤差は大きく、最大の2Lでは約281mであった。

衛星の組み合わせによる精度については、Hレベルのデータが少なく十分な比較はできなかった。また両観測点の距離が近い(約9km)にもかかわらず、測位に利用した衛星番号や衛星数が異なる場合がみられた。

同一時刻における測位の偏位量は両観測点とも時々刻々化し、その偏位の方向または距離が一致しないことが多い。

本研究に際し、測定に御協力いただいた長崎丸船長矢田殖朗教授をはじめ乗組員各位、受信機(JLR-

4000) およびプリンター (NKG-22) を使用させて頂いた日本無線 (株) 長崎営業所の各位に深甚の謝意を表す。

### 引用文献

- 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) 木村小一 (1986): 船の科学, 7, 96-101, 東京,  
船舶技術協会
- 3) 田口一夫 (1986): ロランCとデッカ電波の伝搬-I  
II, 日本航海学会誌 航海, 93, 93-100
- 4) 木村小一 (1986): 船の科学, 5, 87-91, 東京,  
船舶技術協会