

GPS の測位精度 — I

陸上定点における測定

合田 政次, 中根 重勝, 久野 俊行

Accuracies of Position Fixes Obtained by GPS—I
The Observation at a Fixed Station on the Land

Masaji GODA, Shigekatsu NAKANE and Toshiyuki KUNO

The United States has been developing a GPS (Global Positioning System), and now we can make use of it too in Japan but the usable time is limited due to the incompleteness of the system.

We measured the usable time and took position fixes from our fixed station at Nagasaki in order to evaluate the positioning accuracy for about one month in Dec. 1986.

We received positioning signals from 6 satellites. The usable time at this station was about 6.5 hours of which high level positioning accounted for 45% in the first half of the month but only 17% in the latter half.

The positioning errors of 3H (three-dimensional high level positioning), 3M (three-dimensional middle level positioning) and 2H (two-dimensional high level positioning) were smaller than 100 meters. Even the positioning error of 2L (two-dimensional low level positioning), which was largest, was only about 181 meters (0.1 nautical mile). From the practical standpoint, 2L is sufficiently accurate to be used for the positioning of an ordinary ship sailing normally. Until the system is completed, if we use not only high level but also middle and low level, we will be able to prolong the usable time.

We measured the positioning signal at ten-minute intervals, so data were not as full as possible, and the evaluation of the positioning accuracy by combination of satellites was limited to only partial combinations. The positioning accuracy by combination of satellites (3·6·9·11) in the case of 3H and combination of satellites (3·11·13) on 2H and 2M was good by comparison with other combinations and these combinations had long usable times.

Key words 側位時間 usable time; 2次元側位 two-dimensional positioning; 3次元側位 three-dimensional positioning; PDOP; position dilution of precision; 衛星の組み合わせ combination of satellites

これまで船舶の位置を求めるために使われてきた電波航法システムには、ロランA、ロランC、デッカ、オメガ及びNNSSなどがある。これらは、いずれも特有の特長があるが、単一システムでは、何時でも、何処でも、そして高精度でという測位条件

を満足することはできなかった。従って、大洋を航海する船舶は、高精度の船位を得るためには、複数の電波測位装置を装備しなければならなかった。

これらの問題点を全て解消し得る次代の衛星航法システムとして、NAVSTAR/GPS (以下GPSと

記す)の開発が米国において続けられている。開発のスケジュールは既に第3段階のシステム展開にせまっており、二次元測位(以下2Dと記す)は1987年末、三次元測位(以下3Dと記す)は1988年末までに完成する予定となっているが¹⁾、スペースシャトルで衛星を打ち上げることになっているので、少々遅れるものと思われる。しかし、現段階でも、測位時間の制限はあるものの、利用可能で、受信装置も製作されている。本研究では、GPS航法システムによる測位精度について、陸上定点において測定し、評価した結果を報告する。

測定方法

GPS航法装置のアンテナを長崎大学水産学部の屋上に設置し、昭和61年12月1日から同27日までの間、受信可能時間帯の間、10分間隔で測定した。

基準位置(以下観測点と記す)は、アンテナ位置(1at 32° 46.964' N, Long 129° 52.075' E)を国土地理院発行の1/25,000の地図から求め、これをWGS-72測地系=日本測地系-補正值($\Delta lat - 0.197'$, $\Delta long + 0.143'$)により、WGS-72測地系(1at 32° 47.161' N, Long 129° 51.932' E)に変換したものをを用いた。

使用した受信機は日本無線(株)製JLR-4000で、受信周波数 $1575.42 \pm 1\text{MHz}$ 、C/A(Clear/Acquisition)コードの航法信号を4個の衛星から順次受信するシーケンシャル受信機である。測定は衛星数によって自動的に切り換えられ、4個以上の衛星が観測できる時は3Dを、3個の場合は2Dを行う。取扱説明書によるその他の性能は 1) 測位精度: 30m RMS, 2) 速度精度: 0.2kt, 3) 信号補捉: プログラム制御による自動補捉などとなっている。

受信機の使用モードは航行中の使用を想定して、航法モード及び最適衛星選択モードに設定して位置を測定した。今回は、測定位置の精度のみを対象とし、高度については今後の課題とした。

測位精度を示す係数として表示されるPDOP値は、Hレベル(PDOP ≤ 5)・Mレベル(PDOP ≤ 10)・Lレベル(PDOP ≤ 20)の3段階に分けられ、要求精度に応じたレベルに設定できる。これまでに行われた測位精度の評価は全てHレベルに関するもので^{2), 3), 4)} M・Lレベルについては報告されていない。当初1987年末には、2Dならば24時間(常時)測定が可能となる計画であったが、スペースシャ

トルの事故により計画が遅れている状況であるから、M・L両レベルの評価も行い、その精度を把握しておくことは利用時間の大幅な拡大になるので、本研究では各レベルの測位精度を検討するため、PDOP値はLレベルに設定して全レベルについて測定を行った。

なお、衛星軌道暦は1日に1度、衛星管理地上局により更新される。この軌道暦が収集されてから1日以上経過すると、軌道暦が過去のデータになったとして、表示部に“ALMANAC”の警報が出される。このため1日に1度受信者が手動により軌道暦を更新する必要がある。従って、都合によりこの軌道暦が更新できなかった場合のデータは除外して、測位精度を検討した。

結果および考察

1 測位時間

測定期間内において、1日のうち2Dまたは3Dの測位が可能であった時間(測位時間)と、その間に受信できた各衛星の組み合わせを上・中・下旬の各1日についてFig.1に示した。また17日以降Hレベルでの測位時間の減少が顕著であったので、16

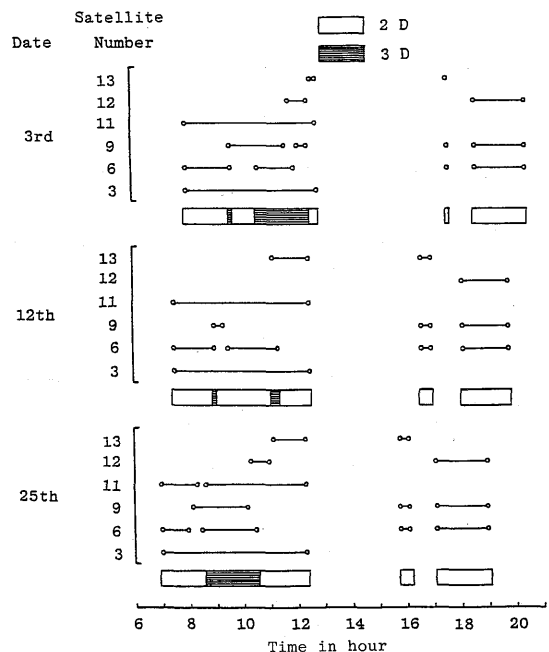


Fig. 1. The usable time of each satellite and the method of position fixing in Dec. 1986.
2D: two-dimensional positioning;
3D: three-dimensional positioning.

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

		2 D				3 D				Total			
		H	M	L	T	H	M	L	T	H	M	L	T
Time (h-m)	The first half	1-50	2-00	49	4-39	1-02	31	09	1-42	2-52	2-31	58	6-21
	The latter half	51	3-06	1-03	5-00	19	1-19	11	1-49	1-10	4-25	1-14	6-49
Percentage (%)	The first half	29	31	13	73	16	8	2	27	45	40	15	100
	The latter half	12	45	15	73	5	19	3	27	17	65	18	100

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

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

日以前と以後に分けて、各レベルごとの2Dと3D及び合計の、平均測位時間と、比率をTable 1に示す。測位時間は全期間を通じてほとんど変化なく約6時間30分であった。前半は6時間21分のうち、2Hが29%、3Hが16%で、Hレベルでの測位時間は45%であったが、後半は測位時間6時間49分のうち、2Hが12%、3Hが5%のみのわずかに17%に減少した。一方、Mレベルは前半の40%から後半には65%となったが、Lレベルは3%増加したのみで、Hレベルの減少分がMレベルの増加分に相当する。従って、M、Lレベルでの測位が有効でないと、利用可能時間が大幅に減少することになる。

このようにHレベルが減少しMレベルが増加した主な原因は、衛星数が少なく、かつ衛星の軌道周期が12時間でないため、同時に4個の衛星が測定できる時間帯がずれることによるものである。

本受信機では1つの衛星について約1秒間の信号受信を行い測位をする。従って、4個の衛星について受信が完了するまでには約4秒を要する⁵⁾。衛星信号の信号対雑音比が低下するにつれて探索、捕捉に要する時間が多少増加しても、約5秒程度で測位情報が更新される。しかし、本研究では約1ヶ月間の連続測定を目的としたので、測位間隔を10分としたため、突然、位置が大きくずれた場合でも、その前後の位置情報のマイクロな変化については検出できなかった。現在は1日の約1/4の測位可能時間であるから、少なくとも1分間隔程度で測位情報を収集し、突然の大きな偏位が生じた前後の変化について検討する必要がある。

2 測位精度

測定した総数1023個のデータから、位置が8.3海里、31.6海里と大きくずれていた2個と、受信レベルが記録されなかった9個のデータを棄却して、残り1012個のデータについて、緯度、経度の偏位量(以下D. lat, D. longと記す)の平均値及び標準偏差を求めた。またD. longを東西距(以下Depと記す)に換算し、D. latとDepの標準偏差のうち、大きい方の値の3倍(3 σ)以上の誤差のあるデータ9個を棄却して、1003個のデータについて検討を行った。

2.1 2D, 3Dのレベル毎の精度

2D, 3Dのレベル毎のデータ数とD. lat, Depの平均値及び標準偏差を示したものがTable 2で、それを観測点からの平均偏位とともに図示したものがFig. 2*である。また各区分の平均偏位をまとめて図示したものがFig. 3である。平均偏位は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。)でESE方向に0.0235海里(約44m)で、3Hでは同方向に0.0149海里(約28m)であった。2D, 3Dいずれの場合も、Hレベルの偏位はほぼ同方向であるが、距離が大きく、M, Lレベルでは3Lの約14mから2Lの約23mの範囲であるが、方向は3LのみがWNW方向、他はいずれもNNE~ENE方向であった。即ち、HレベルではD. Longが大きく、D. latは小さいが、M, Lレベルでは両者がほぼ同程度である。しかし3LではD. Longの符号が反対となっている。D. latの標準偏差は、3H, 3M, 2Hではいずれも50m以下であり、Depの標準偏差は40m以下であった。

*標準偏差のマイナス側は省略した。以下の各図も同様に図示した。

Table 2. The mean values and standard deviations of D. lat and Dep for each level on 2D and 3D

Dimension	Level	No. of Data	D. lat		Dep	
			Mean NM (Meter)	SD NM (Meter)	Mean NM (Meter)	SD NM (Meter)
2 D	H	206	-0.0055 (10.2)	0.0246 (45.6)	0.0227 (42.0)	0.0213 (39.4)
	M	393	0.0102 (18.9)	0.0337 (62.4)	0.0057 (10.6)	0.0421 (78.0)
	L	128	0.0039 (7.2)	0.0489 (90.6)	0.0119 (22.0)	0.0698 (129.3)
	Total	727	0.0047 (8.7)	0.0353 (65.4)	0.0116 (21.5)	0.0446 (82.6)
3 D	H	103	-0.0025 (4.6)	0.0087 (16.1)	0.0147 (27.2)	0.0075 (13.9)
	M	148	0.0043 (8.0)	0.0188 (34.8)	0.0070 (13.0)	0.0148 (27.4)
	L	25	0.0018 (3.3)	0.0568 (105.2)	-0.0071 (13.1)	0.0335 (62.0)
	Total	276	0.0016 (3.0)	0.0225 (41.7)	0.0086 (15.9)	0.0166 (30.7)
Total	Total	1003	0.0038 (7.0)	0.0323 (59.8)	0.0108 (20.0)	0.0390 (72.2)

H : high; M : middle; L : low; SD:standard deviation; NM : nautical mile

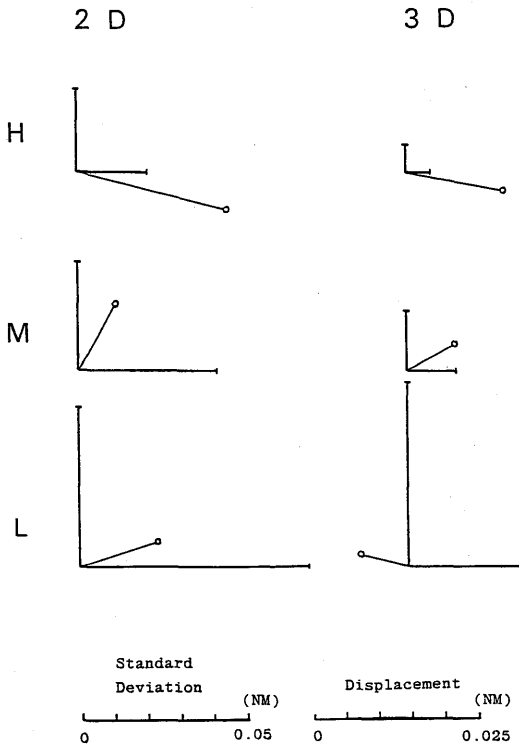


Fig. 2. The mean displacement (segment of a line with a circle) from the observation position (origin) and standard deviations of difference of latitude (D.lat:vertical axis) and departure (Dep:horizontal axis).
 2D: two-dimensional positioning;
 3D: three dimensional positioning
 H: high level; M: middle level; L: low level

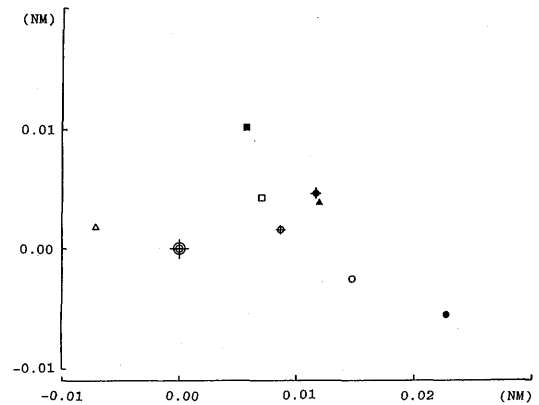


Fig. 3. Distribution of position fixes obtained by GPS at each level on 2D and 3D.
 ⊕ : observation position; ⊕ : mean position of 3D (three-dimensional positioning)
 ● : mean position of 2D (two-dimensional positioning)
 ○ : high level of 3D; □ : middle level of 3D;
 △ : low level of 3D
 ● : high level of 2D; ■ : middle level of 2D;
 ▲ : low level of 2D

2 H の場合でも観測点からの位置誤差 (平均偏位+標準偏差) は約100m にすぎず 2 H, 3 H, 3 M による測位は, いずれも高精度と言えよう。

2 M では D. lat, Dep の標準偏差は約62m, 78m で, H レベルのそれよりやや増大するが, 位置誤差は約120m で, これも他の航法装置によるものよりも高精度と言えよう。

同様にして求められた2L, 3Lでも位置誤差はそれぞれ160mと122mで、いずれも0.1海里未満であった。実用上、漁業における要求精度は、底曳網の場合でも0.1海里と言われ⁶⁾、2L, 3Lにおける位置も特別な目的で使用する場合は除けば、十分に使用可能な精度であると言えよう。

これまで洋上航行中の船舶が各種測位装置の評価を行う場合、その基準位置となるものがなく、天測位置との相対評価、あるいは各種計器間での相対評価が出来るにすぎなかった。しかし、本システムの2H, 3H, 3Mによる測定位置に、定誤差を補正できれば、これを基準位置として陸上定点で測位精度を評価する場合と同等の評価が可能となろう。

2.2 衛星の組み合わせによる精度

現在打上げられている衛星数は7個であるが、今回測定できたのは6個であった。そのうち3~4個からの信号を受信して位置が決定される。この場合に利用される衛星の組み合わせは2Dで20通り、3Dでは15通りとなる。これらの衛星の組み合わせによる精度は、個々の衛星からの測位信号の優劣ではなく、地球のまわりに配置されている各衛星を観測点からどんな方位、仰角で見るかにより決ってくる。また衛星の軌道周期は11時間57分58.3秒であり、観

測点の上空通過は毎日約4分早くなる⁷⁾。

今回測定出来た衛星の組み合わせと2D, 3D及び各レベル毎のデータ数を Table 3 に示した。これらのうち今回はデータ数が10個以上のものについて検討した。各組み合わせによる、2D, 3Dの各レベル毎の D. lat, Dep の平均値及び標準偏差を Table 4 に示す。また観測点を中心にして、平均偏位と D. lat, Dep の標準偏差を Fig. 4-1~4-3 に示し、各平均偏位の分布を Fig. 5 に示した。

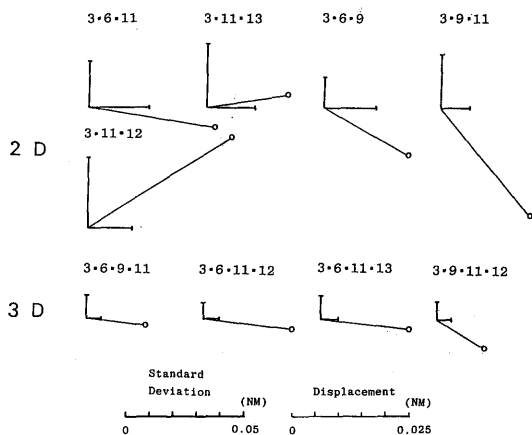


Fig. 4-1. The mean displacement (segment of a line with a circle) from the observation position (origin) and standard deviations of difference of latitude (D.lat:vertical axis) and departure (Dep:horizontal axis) by combination of satellites (Arabic numerals are satellites number) at High level.
2D : two-dimensional positioning;
3D : three-dimensional positioning

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

	Combination of Satellites						Level				
	3	6	9	11	12	13	H	M	L	Total	
2D	●	●	●				22			22	
	●	●		●			73	71	31	175	
	●		●	●			50	9	5	64	
	●			●	●		21	8		29	
	●			●		●	30	84	8	122	
		●	●	●			5	2	2	9	
		●	●		●		1	162	82	245	
			●	●		●		57		57	
			●	●		●		4		4	
				●	●	●					
						Total	206	393	128	727	
3D	●	●	●	●			37	146	19	202	
	●	●		●	●		29			29	
	●	●		●		●	15			15	
	●		●	●	●		15			15	
	●		●	●	●	●	7			7	
		●		●	●	●		1	4	5	
			●	●	●	●			1	1	
			●	●	●	●		1	1	2	
				●	●	●					
							Total	103	148	25	276

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

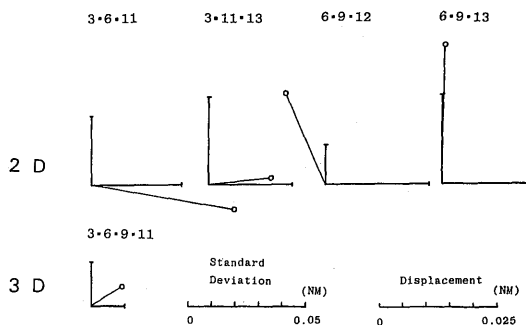


Fig. 4-2. The mean displacement (segment of a line with a circle) from the observation position (origin) and standard deviations of difference of latitude (D.lat:vertical axis) and departure (Dep:horizontal axis) by combination of satellites (Arabic numerals are satellites number) at Middle level.
2D : two-dimensional positioning;
3D : three-dimensional positioning

Table 4. The mean values and standard deviations of D. lat and Dep by combination of satellites at each level on 2D and 3D

Dimension	Level	No. in Fig. 5	Combination Satellite Number	D. lat		Dep	
				Mean	SD	Mean	SD
				NM (Meter)	NM (Meter)	NM (Meter)	NM (Meter)
2 D	High	1	3 · 6 · 9	-0.0096 (17.8)	0.0128 (23.7)	0.0182 (33.7)	0.0223 (41.3)
		2	3 · 6 · 11	-0.0040 (7.4)	0.0194 (35.9)	0.0269 (49.8)	0.0256 (47.4)
		3	3 · 9 · 11	-0.0222 (41.1)	0.0225 (41.7)	0.0193 (35.7)	0.0122 (22.6)
		4	3 · 11 · 12	0.0190 (35.2)	0.0295 (54.6)	0.0304 (56.3)	0.0189 (35.0)
		5	3 · 11 · 13	0.0027 (5.0)	0.0267 (49.4)	0.0171 (31.7)	0.0204 (37.8)
	Middle	2	3 · 6 · 11	-0.0051 (9.4)	0.0291 (53.9)	0.0305 (56.5)	0.0387 (71.7)
		5	3 · 11 · 13	0.0014 (2.6)	0.0372 (68.9)	0.0134 (24.8)	0.0356 (65.9)
		6	6 · 9 · 12	0.0193 (35.7)	0.0170 (31.5)	-0.0085 (15.7)	0.0446 (82.6)
		7	6 · 9 · 13	0.0295 (54.6)	0.0379 (70.2)	0.0005 (0.9)	0.0366 (67.8)
	Low	2	3 · 6 · 11	0.0022 (4.1)	0.0694 (128.5)	0.0287 (53.2)	0.0678 (125.6)
6		6 · 9 · 12	0.0110 (20.4)	0.0281 (52.0)	0.0034 (6.3)	0.0729 (135.0)	
3 D	High	1	3 · 6 · 9 · 11	-0.0013 (2.4)	0.0096 (17.8)	0.0126 (23.3)	0.0062 (11.5)
		2	3 · 6 · 11 · 12	-0.0020 (3.7)	0.0067 (12.4)	0.0189 (35.0)	0.0070 (13.0)
		3	3 · 6 · 11 · 13	-0.0017 (3.1)	0.0096 (17.8)	0.0191 (35.4)	0.0077 (14.3)
		4	3 · 9 · 11 · 12	-0.0057 (10.6)	0.0074 (13.7)	0.0101 (18.7)	0.0062 (11.5)
	Middle	1	3 · 6 · 9 · 11	0.0040 (7.4)	0.0183 (33.9)	0.0066 (12.2)	0.0143 (26.5)
		1	3 · 6 · 9 · 11	0.0122 (22.6)	0.0496 (91.9)	-0.0061 (11.3)	0.0310 (57.4)

SD : standard deviation; NM:nautical mile

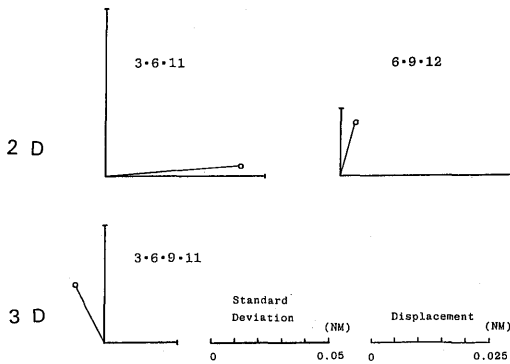


Fig. 4-3. The mean displacement (segment of a line with a circle) from the observation position (origin) and standard deviations of difference of latitude (D.lat:vertical axis) and departure (Dep:horizontal axis) by combination of satellites (Arabic numerals are satellites number) at Low level.
2D: two-dimensional positioning;
3D: three-dimensional positioning

3 Hでは, 3 · 6 · 9 · 11 (衛星の組み合わせをあらわす衛星番号。以下同様に番号のみを記す) が最も多く約36%, 3 · 6 · 11 · 12が約28%を占め, 3 · 6 · 11 · 13と3 · 9 · 11 · 12はともに約15%であった。これらによる位置はいずれも SE~ESE 方向に偏位し, 平均偏位はいずれも36m 以下であった。D. lat

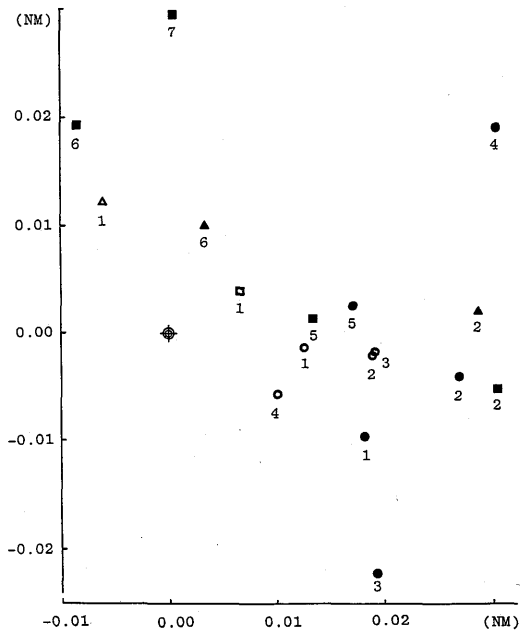


Fig. 5. Distribution of position fixes obtained by combination of satellites.

- ⊕ : observation position
 - : high level of 3D (three-dimensional positioning); □ : middle level of 3D
 - △ : low level of 3D; ● high of 2D (two-dimensional positioning)
 - : middle level of 2D; ▲:low level of 2D
- Numbers refer to combinations shown in Table 4

の標準偏差は12m~18m, Depの標準偏差は, 12m~14mでいずれも極めて安定していた。以上のように3Hではいずれも高精度ではあるが, 9号衛星が含まれる場合と6号衛星が含まれる場合を比較すると, 前者の方が多少精度がよくなっている。このことは衛星そのものの原因と言うよりも軌道の関係によるものとも考えられるが, 期間を置いた測定により解明する必要がある。

2Hでは, 3・6・11が最も多く35.4%, 以下3・9・11, 次いで3・11・13の順であった。これらによる位置はNE~SE方向に偏位し, 3Hの場合よりバラツキが大きい。特に3・11・12と3・9・11による位置は, 南北に約80m離れていた。平均偏位はいずれもほぼ68m以下であり, D. lat, Depの標準偏差は各々55m, 47m以下であった。2Hの場合, 3・6・9が最も精度が良いが, 3Hの場合と同様に9号と12号の軌道が原因かどうかについて解明する必要がある。

3Mでは3・6・9・11が全体の98.6%を占めた。その位置はNE方向で, 平均偏位は約14m, 標準偏差はDepよりD. latが大きく約34mであった。3Hと比較するとD. lat, Depともに標準偏差は2倍近く大きくなっているが, 取扱説明書の精度30m RMSはほぼ満足している。

2Mの平均偏位は6号と9号衛星が受信できる場合はNorth方向に約55m, その他はEast方向に約57m以下の偏位で, D. lat, Depの標準偏差は各々70m, 83m以下であった。この場合でも位置誤差は約152m以下であり, 0.1海里以内に納まっている。

3L, 2Lのデータは少なく, 各々の9.1%, 17.6%であった。そのうち3Lでは3・6・9・11, 2Lでは3・6・11と6・9・12が大部分を占めた。3Lの位置誤差は約134mで, これは2Mとほぼ同様の精度である。2Lの3・6・11で約234m, 6・9・12では約164mであったが, これらの場合でも0.1海里程度の誤差を見込んで使用すれば, 他のシステムに比べ十分有効な測位ができる。

また同じ組み合わせにおける各レベルでの精度は, 3Dの3・6・9・11, 2Dの3・6・11によるものが得られた。6・9・12ではHレベルのデータが1個しかないため, M, Lレベルだけであった。これらをFig.6に示した。3・6・9・11のH, Mレベルは各々45~57m, Lレベルでは134mの位置誤差であった。これらは3D全体とほぼ同程度の精度であるが, 位置誤差は2~4m小さかった。このよ

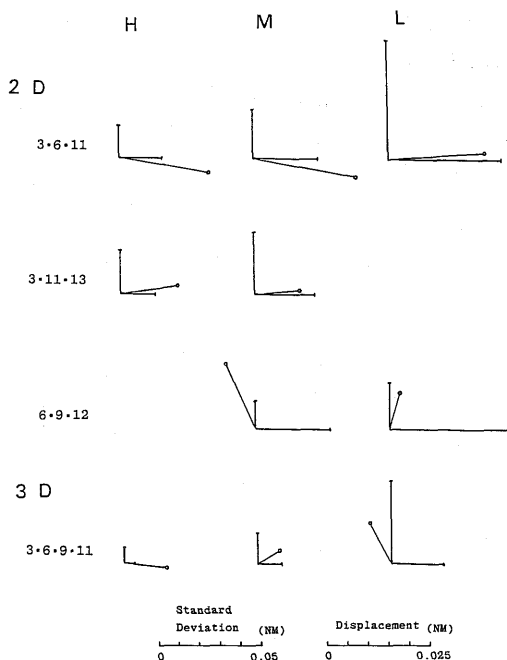


Fig. 6. The mean displacement (segment of a line with a circle) from the observation position (origin) and standard deviations of difference of latitude (D.lat:vertical axis) and departure (Dep:horizontal axis) at different levels for combination of satellites (Arabic numerals are satellites number).
2D: two-dimensional positioning;
3D: three-dimensional positioning
H: high level; M: middle level; L: low level

うに3・6・9・11では, 平均偏位はレベルによる差が, 偏位方向はHレベルではEast方向であるのに対し, LレベルではNorth方向になっていた。またLレベルでは標準偏差が著しく大きくなっている。3・6・11の位置誤差は110~234mで, これらは2D全体に比較して6~53m大きい。6・9・12では, Hレベルは不明であるが, M, Lの位置誤差は128~164mで2M全体とほぼ同程度であり, 2L全体より約17m小さかった。しかし偏位方向は他の組み合わせの場合と異なり, ともにNorth方向であった。また両レベルとも, 他の組み合わせに比べDepの標準偏差はほぼ同程度であるが, D. latのそれは特に小さかった。

ま と め

GPSの約一ヶ月にわたる定点観測の結果, 現時

点では6個の衛星からの信号が受信でき、測位時間は約6時間30分であった。しかしながら月の前半はHレベルが45%であったが、後半には17%に急減した。従って、M, Lレベルでの測位を利用しなければ、利用可能時間が著しく短縮されることがある。

3H, 3Mの位置誤差は50~60mにすぎないが、2H, 2Mではそれらのほぼ2倍であった。また、3Lの位置誤差は約136mで、2Mよりも多少大きくなっている。しかしながら、位置誤差の最も大きい2Lでも約181m、すなわち約0.1海里にすぎず、一般船舶の航行には、実用上十分有効な測位情報として利用できる。

衛星の組み合わせと測位精度の関係については、同一組み合わせで測位できる時間が、観測点と時期によって異なるから、今回の結果は長崎におけるこの時期に限られたものであるが、その位置誤差が最も小さかったのは、衛星番号3・9・11・12の3Hで、約39mであった。また、測位時間が最も長かった3・6・9・11の3Hでもほぼ同程度であった。2Dの場合でも、同様の傾向がみられ、長時間測定できた組み合わせの間には顕著な差はみられなかった。

今後の問題点としては、衛星の軌道周期が約11時間58分で、衛星数が少なく、測位時刻、衛星の組み合わせ、各衛星の方位角と仰角などが1年間の周期で変化するので、それにもなって測位精度も変動するものと考えられるから、再現性については、年単位での測定による比較検討が必要である。また

PDOP値は、観測点から見る各衛星の方位角と仰角によって変化するから、これらのデータも併せて検討する必要がある。今回は10分間隔の測定であったが、少なくとも1分間隔程度で測定を行い、測定位置が大きく偏位した場合、それらの出現頻度や出現状況についても詳細な検討が必要である。

本研究に際し、データ収集の為のプリンター(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る。

引用文献

- 1) 木村小一 (1986): GPSの民間航空への応用とその問題点, 日本航海学会誌 航海, **89**, 15-22
- 2) 山田耕司 他5名 (1986): GPS航法装置, 日本無線技報, **24**, 16-23
- 3) 木村小一 (1985): 衛星航法システムの現状と将来, 日本航海学会誌 航海, **84**, 8-13
- 4) 隅川芳雄 他4名 (1986): GPS航法装置の定点における測位精度について, 日本航海学会誌 航海, **90**, 58-63
- 5) 関根兆五 (1986): GPSの概要と受信機について, 日本航海学会誌 航海, **90**, 42-49
- 6) 中根重勝 (1984): 水中物体追跡装置の開発に関する研究, 本誌, **58**, 1-76
- 7) 木村小一 (1986): 船の科学, **7**, 96-101, 東京, 船舶技術協会