

GPS の測位精度 - VIII

海外の定点における測定(2)

久野 俊行, 合田 政次, 中根 重勝

Accuracies of Position Fixes Obtained by GPS-VIII

The Observation at Foreign Fixed Stations (2)

Toshiyuki KUNO, Masaji GODA, and Shigekatsu NAKANE

We have measured the usable time and got position fixes from overseas fixed stations for the past three years in order to evaluate the positioning accuracy of GPS.

We were able to receive positioning signals from only 6 satellites until 1989, but in October 1990, 15 GPS satellites became available. And the orbits of satellites have been corrected.

The usable time was 7~9 hours until 1989, but it came to be more than 18 and a half hours in 1990. Then we were generally able to get position fixes by 3D(three-dimensional positioning) and the high level of 2D3(two-dimensional positioning with three satellites). Therefore, position fixes of 2D2(two-dimensional positioning with two satellites) became hardly necessary.

The accuracy of position fixes went down once in 1989. In 1990, the standard deviations of D. lat(difference of latitude) and Dep(departure) were kept less than 45 meters. We may conclude that in spite of selective availability, the accuracy has been improved owing to the increasing number of GPS satellites and the correction of thier orbits.

Key words: GPS gloval positioing system; 選択利用性 selective availability
測位精度 accuracy of position fixes; 鶴洋丸 KAKUYO MARU

著者らは、衛星航法システム NAVSTAR/GPS (以下 GPS と記す) の海外の二定点での測位精度についても評価を行ってきた。¹⁾ その結果、測位可能時間は南へ行くほど短くなったが、衛星の配置はかなり良好であり、両地点とも三次元測位 (以下 3D と記す) が 40% を占めた。しかし、赤道に近い南半球の定点では、約 10% のデータが基準位置より 1 海里以上も偏位していた。

本報では、本学部練習船鶴洋丸の過去 3 年間の実習航海中に測定の機会を得た北半球の 1 地点と、南半球の 3 地点での測位可能時間と測位精度の評価を行った。

測定方法および資料

測定は本学部練習船鶴洋丸が 1988 年~90 年の実習航海中に寄港した 4 港、アブラ、シドニー、ホニアラおよびラバウルの各港において実施した。各港での基準位置は、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-84²⁾ に変換したものである。港名、測定年の略記号、測定年月日と基準位置を Table 1 に示す。ラバウルでは錨泊であったため、1 時間毎に陸上の 3 物標の方位を計って算出した位置を平均したものである。

使用した受信機は、日本無線機製 JLR-4000F で、これに高安定発振器 (NDM-13A) を接続し、2 衛星

Table 1. Observation positions (WGS-84)

Station		Year	Date	Latitude	Longitude
Harbor	Code				
Apra	A88	1988	24th ~ 25th Aug.	13° 27.608' N	144° 39.913' E
Apra	A89	1989	24th ~ 25th Aug.	13° 27.592' N	144° 39.917' E
Apra	A90	1990	31th Aug. ~ 1st Sep.	13° 27.767' N	144° 39.023' E
Honiara	H88	1988	16th ~ 20th Nov.	9° 25.744' S	159° 57.581' E
Rabaul	R90	1990	14th ~ 16th Nov.	4° 12.396' S	152° 10.902' E
Sydney	S88	1988	27th Nov. ~ 1st Dec.	33° 52.018' S	151° 11.772' E
Sydney	S89	1989	27th Nov. ~ 1st Dec.	33° 51.996' S	151° 11.832' E
Sydney	S90	1990	26th ~ 29th Nov.	33° 51.984' S	151° 11.781' E

による二次元測位 (以下 2D2 と記す) もできるようにしたものである。

受信機の使用モードについても, これまで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。また 2D2 でも, L レベルまで測位できるように受信機のソフトを改良し測定を行った。さらに, 受信機と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. 測位可能時間

88 年まで測位に利用できた衛星は, 衛星番号 3・6・9・11・12・13 号のブロック I と呼ばれる試験用の衛星 6 個であったが, その後ブロック II と呼ばれる運用型の衛星が順次打ち上げられ, 90 年には測位に利用できた衛星は 14~15 個となった。測定日数は, Table 1 のごとく寄港地によって差があったので, 測定日数が複数の場合は 1 日当りの平均を求めた。測定は 1 分間隔で行ったので, データ数を測位可能時間とみなすことができる。したがって, データ数より各次元での 1 日当りの測位可能時間とその割合を, 各レベル毎に求め Table 2 に示した。また, 各測点において測位に使用した各衛星の時間経過に伴う高度の変化を Fig. 1, 2, 3 に示した。

前報¹⁾では各地とも衛星数が 6 個で, 測位可能時間は 7~9 時間であった。A89 の測位可能時間は, S89 と較べて約 2 時間 30 分長いが, 2D2 の割合が多くて 3D のそれが少ないという, 前報¹⁾と同じ結果がみられた。A90 年では衛星数が 14 個となり, ほぼ 24 時

間受信が可能となった。しかし, 使用している受信機が一チャンネルのシーケンシャル受信機のために

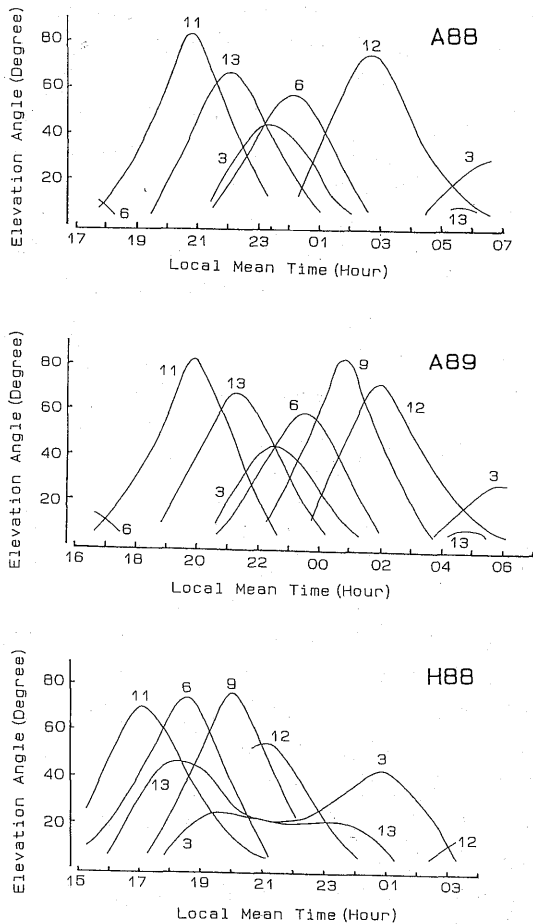


Fig. 1. Elevation angle of satellites observed at Apra and Honiara. The codes of these figures are shown for Table 1. Arabic numerals are satellite numbers.

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

Code		2D2				2D3				3 D				Total			
		H	M	L	T	H	M	L	T	H	M	L	T	H	M	L	T
A88	Time (h-m)	2-50	0-05	-	2-55	1-38	0-46	0-27	2-51	1-04	0-29	0-12	1-45	5-32	1-20	0-39	7-31
	Percentage (%)	38	1	-	39	22	10	6	38	14	6	3	23	74	17	9	100
A89	Time (h-m)	4-32	0-30	0-06	5-08	0-52	0-44	0-31	2-07	0-59	0-33	0-33	2-05	6-23	1-47	1-10	9-20
	Percentage (%)	49	5	1	55	9	8	6	23	10	6	6	22	68	19	13	100
A90	Time (h-m)	0-05	-	-	0-05	3-55	0-10	0-03	4-08	12-01	1-27	1-03	14-31	16-01	1-37	1-06	18-44
	Percentage (%)	0.4	-	-	0.4	21	1	0.3	22	64	8	6	78	85	9	6	100
H88	Time (h-m)	3-26	-	-	3-26	1-13	0-02	0-26	1-41	2-37	1-11	-	3-48	7-16	1-13	0-26	8-55
	Percentage (%)	38	-	-	38	14	1	5	20	29	13	-	42	81	14	5	100
R90	Time (h-m)	0-02	-	-	0-02	2-28	0-01	0-01	2-30	16-32	0-47	0-18	17-37	19-02	0-48	0-19	20-09
	Percentage (%)	0.2	-	-	0.2	12	0.1	0.1	12	82	4	2	88	94	4	2	100
S88	Time (h-m)	2-03	-	-	2-03	1-44	-	-	1-44	3-02	0-21	-	3-23	6-49	0-21	-	7-10
	Percentage (%)	29	-	-	29	24	-	-	24	42	5	-	47	95	5	-	100
S89	Time (h-m)	1-26	-	-	1-26	1-33	-	-	1-33	3-27	0-21	-	3-48	6-26	0-21	-	6-47
	Percentage (%)	21	-	-	21	23	-	-	23	51	5	-	56	95	5	-	100
S90	Time (h-m)	-	-	-	-	3-53	0-40	-	4-33	13-26	2-00	0-08	15-34	17-19	2-40	0-08	20-07
	Percentage (%)	-	-	-	-	20	3	-	23	66	10	1	77	86	13	1	100

The codes are shown for Table 1.

2D2: two-dimensional positioning with two satellites; 2D3: two-dimensional positioning with three satellites

3D: three-dimensional positioning

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

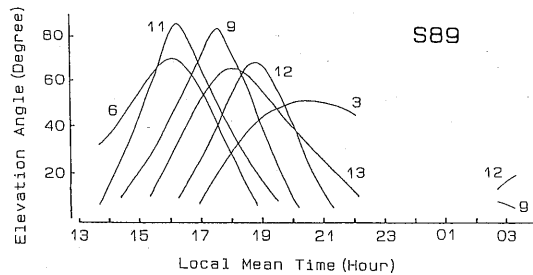
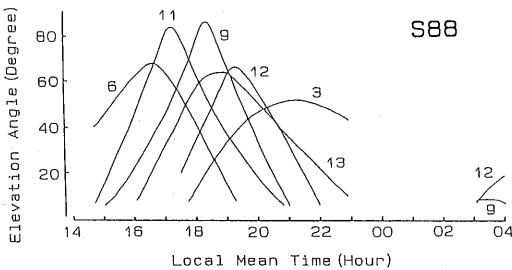


Fig. 2. Elevation angle of satellites observed at Sydney. The codes of these figures are shown for Table 1. Arabic numerals are satellite numbers.

使用する衛星が切り替わる場合には、測位が中断される³⁾ので実際の測位可能時間は約 18 時間 40 分であった。データをパソコンに取り込む際に、数秒間の中断でも 1 分間測定できなかったことになるので、実際の測位可能時間はさらに長いものと考えられる。

R90 では衛星数が A90 の時より 1 個多く 15 個となり、測位可能時間は A90 より少し長く約 20 時間であった。そのうち 88% (17 時間 37 分) が 3D で測位され、12% (2 時間 30 分) が 3 衛星による二次元測位 (以下 2D3 と記す) であった。2D2 では H レベルが 2 分測定されただけであった。各次元ともそのほとんどが H レベル (94%, 19 時間 2 分) であった。R90 と H88 は共に南半球の低緯度帯にあるが、衛星数の増加により 90 年には高次元、高レベルでの測位が可能となった。

S88 と S89 では各次元の占める割合も最大で約 9% 程度の増減があるだけで、レベル別でもほとんど同じであったが、測位可能時間に若干 (23 分) の差が認められた。S90 でも測位に利用できた衛星数は 15 個であり、測位可能時間は約 20 時間となり、S89 より約 13 時間増加し R90 とほぼ同じであった。しかし

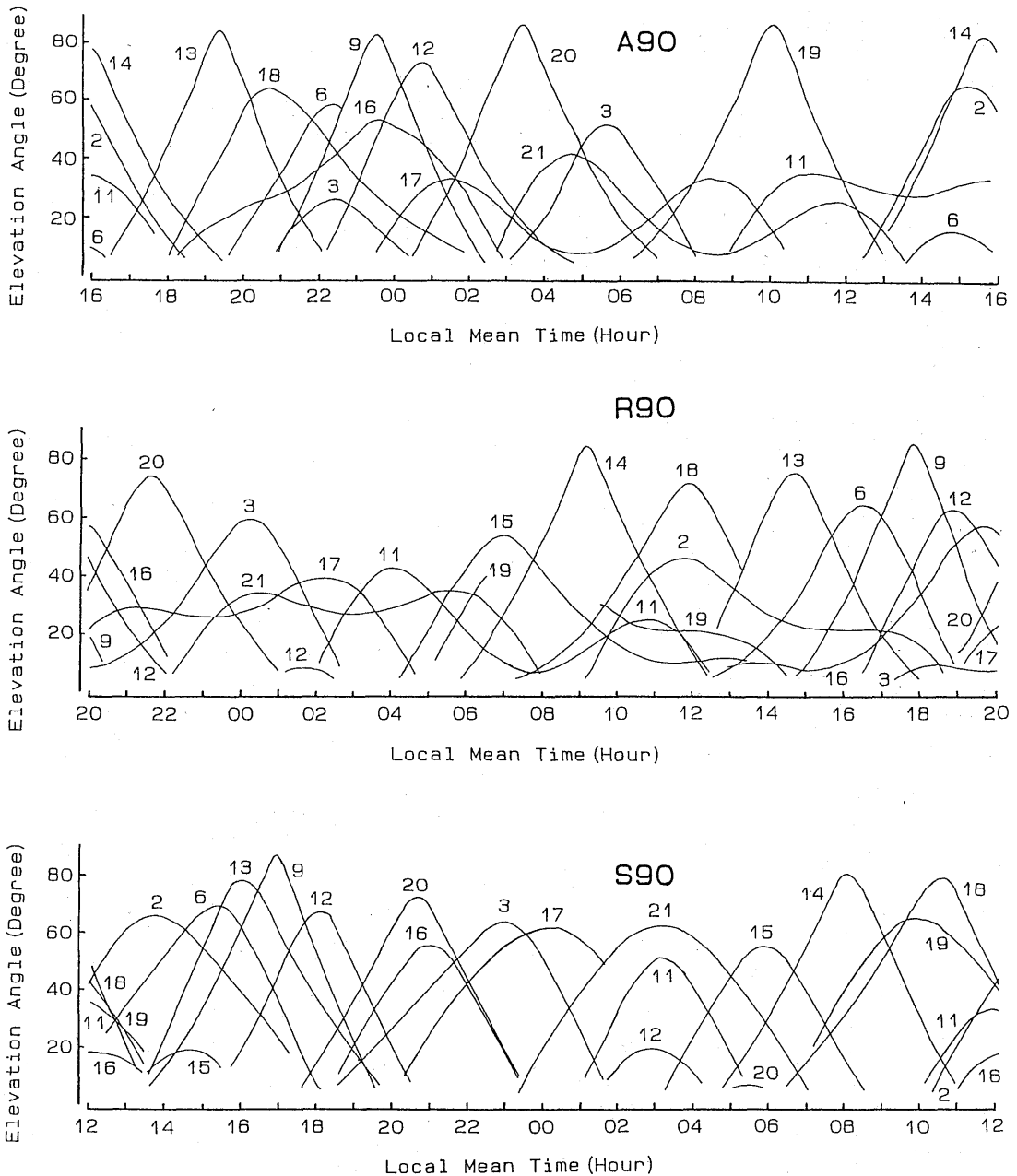


Fig. 3. Elevation angle of satellites observed at Apra, Rabaul and Sydney.
The codes of these figures are shown for Table 1.
Arabic numerals are satellite numbers.

次元別にみると 2D3 が約 2 時間多く、H レベルの占める割合は 86% で過去 3 年間のうち最も少なく、その割合は R90 よりも約 10% 少なかったが、北半球のほぼ同緯度にある長崎での測定の結果⁴⁾ とほぼ同じであった。また、L レベルでの測位は、S90 でわずか 1% (8 分) に過ぎなかった。

衛星数が少なかった 89 年までは各軌道上の配置がアンバランスである⁵⁾ ことにより地域差がみられたが、衛星の数が増加し、軌道の配置が改善されたため測位可能時間は全ての測点で 18 時間以上となった。しかも、その約 90% 以上が 2D3 の H レベル(以下 2D3-H と記す。その他の場合についても同様の方法で記

す) 以上の好条件で測位可能となり, 顕著な地域差もなかった。

2. 測位精度

これまでと同様に, 測位誤差が 1.0 海里以上のデータは正常な測位が行われなかったものとして除外し, 基準位置からの緯度方向の偏位 (変緯, 以下 D.lat と記す) と経度方向の偏位 (東西距, 以下 Dep と記す)

のいずれかが標準偏差の 3 倍 (3σ) 以上であったデータを棄却した。各測点における除外データ数, 棄却データ数および使用データ数とその割合を Table 3 に示す。また, 除外データを偏位量により区分し, それらの出現頻度を Table 4 に示した。

各測点とも, 88 年と 89 年には除外データが多く, なかでも A89 では約 45% が不良で, 2D2 に多く発生しているが, 3D-L でも 10 海里以上の誤差 (2%)

Table 3. The number of data and the ratio of usable data in different observation positions

Code	Dimension	Number of Data			Used	Percentage (%)
		Total	Eliminated	Rejected		
A88	2D2	175	9	21	145	82.9
	2D3	171	0	0	171	100.0
	3D	105	0	0	105	100.0
	Total	451	9	21	421	93.3
A89	2D2	308	232	0	76	24.7
	2D3	127	11	5	111	87.4
	3D	125	5	0	120	96.0
	Total	560	248	5	307	54.8
A90	2D2	5	0	0	5	100.0
	2D3	248	0	22	226	91.1
	3D	871	0	9	862	99.0
	Total	1124	0	31	1093	97.2
H88	2D2	826	166	90	570	69.0
	2D3	406	10	1	395	97.3
	3D	912	13	3	896	98.2
	Total	2144	189	94	1861	86.8
R90	2D2	4	4	0	0	0.0
	2D3	299	0	3	296	99.0
	3D	2114	0	10	2104	99.5
	Total	2417	4	13	2400	99.3
S88	2D2	492	17	18	457	92.9
	2D3	416	1	1	414	99.5
	3D	811	15	14	782	96.4
	Total	1719	33	33	1653	96.2
S89	2D2	345	0	38	307	89.0
	2D3	371	0	1	370	99.7
	3D	912	0	0	912	100.0
	Total	1628	0	39	1589	97.6
S90	2D2	nil			nil	
	2D3	821	0	49	772	94.0
	3D	2803	0	71	2732	97.5
	Total	3624	0	120	3504	96.7

The codes are shown for Table 1.

2D2: two-dimensional positioning with two satellites; 2D3: two-dimensional positioning with three satellites
3D: three-dimensional positioning

Table 4. The number of eliminated data in different observation positions

Code	Error (NM)	2D2				2D3				3 D				Total			
		H	M	L	T	H	M	L	T	H	M	L	T	H	M	L	T
A88	1~ 2	4	5	—	9	0	0	0	0	0	0	0	0	4	5	0	9
	1~ 2	115	5	4	124	0	0	11	11	0	0	0	0	115	5	15	135
A89	2~ 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3~ 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5~10	49	0	0	49	0	0	0	0	0	0	0	0	49	0	0	49
	10~	39	18	2	59	0	0	0	0	0	0	5	5	39	18	7	203
	Total	203	23	6	232	0	0	11	11	0	0	5	5	203	23	22	248
A90	1~	0	—	—	0	0	0	—	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H88	1~ 2	8	0	—	8	1	0	0	1	0	5	—	5	9	5	0	14
	2~ 3	9	0	—	9	6	0	0	6	0	6	—	6	15	6	0	21
	3~ 5	2	0	—	2	0	0	0	0	0	2	—	2	2	2	0	4
	5~10	64	1	—	65	3	0	0	3	0	0	—	0	67	1	0	68
	10~	80	2	—	82	0	0	0	0	0	0	—	0	80	2	0	82
	Total	163	3	—	166	10	0	0	10	0	13	—	13	173	16	0	189
R90	10~	4	—	—	4	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4	
S88	1~ 2	17	—	—	17	1	—	—	1	0	0	—	0	18	0	—	18
	2~ 3	0	—	—	0	0	—	—	0	1	0	—	1	1	0	—	1
	3~ 5	0	—	—	0	0	—	—	0	0	0	—	0	0	0	—	0
	5~10	0	—	—	0	0	—	—	0	1	0	—	1	1	0	—	1
	10~	0	—	—	0	0	—	—	0	13	0	—	13	13	0	—	13
	Total	17	—	—	17	1	—	—	1	15	0	—	15	33	0	—	33
S89	1~	0	—	—	0	0	—	—	0	0	0	0	0	0	0	0	
S90	1~	—	—	—	—	0	0	—	0	0	0	0	0	0	0	0	

The codes are shown for Table 1.

2D2: two-dimensional positioning with two satellites; 2D3: two-dimensional positioning with three satellites

3D: three-dimensional positioning

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

がみられた。この原因としては、衛星の位置や軌道要素の誤差のほか、大きくずれた測位結果をそのまま推測位置として位置算出に使用することなどが考えられる。2衛星による測位の場合には、測位誤差が著しく大きくなることもあるので、特に注意しなければならない。

各次元別のレベル毎のデータ数と D.lat と Dep の平均値および標準偏差を示したのが Table 5 である。また各測点を原点として、各レベルの平均位置とその点を中心とする 1σ の誤差楕円を図示したものが Fig. 4, 5, 6 である。

A 点では、A88 より A89 の方が全般的に誤差が大きくなり、ことに東西方向のばらつきが増大し、平均位置も東方への偏位が大きくなっている。A90 は各レベルとも平均位置は A88 と同じであるが、誤差

楕円は著しく小さい。

S 点の S89 では、誤差や標準偏差の増大は A89 ほど著しくはないが、3D でばらつきがやや大きくなった。しかし、それも S90 では極めて小さくなって、精度が向上したことを示している。また、S90 の平均偏位（定誤差）は、いずれも東方へ 50~60m で、南北方向の偏位は 11m 以下に過ぎなかった。

R90 でも標準偏差は S90, A90 とほぼ同じ値ではあるが、平均位置は全て約 660m 西方へずれている。他の測点はいずれも東方へ偏位し、概ね 170m 以下であったのと比べ、かなりの違いがみられた。この原因として、測位に使用した目標の位置に何らかの誤差が含まれたためと考えられる。

Table 5. The mean values and standard deviations of D.lat, Dep and Distance for each level (unit in meter)

Code	Dimension	Level	No. of Data	D.lat		Dep		Distance	
				Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
A88	2D2	H	145	-163.4	311.1	212.1	408.1	267.7	513.2
		H	98	60.4	26.1	149.5	29.4	161.2	39.3
		M	46	23.4	75.0	70.9	125.3	74.7	146.0
	2D3	L	27	-9.6	89.0	50.4	219.2	51.3	231.1
		H	64	50.8	15.8	154.6	6.5	162.7	17.1
		M	29	52.8	21.9	154.2	13.3	163.0	25.6
A89	3D	L	12	-7.7	55.1	32.3	141.3	33.2	151.7
		H	69	4.1	92.0	517.2	502.1	517.2	510.5
		M	7	-412.7	375.5	1310.3	665.9	1373.8	764.5
	2D3	H	50	-15.2	95.6	188.0	193.4	188.6	215.7
		M	44	-94.1	191.6	-113.7	577.9	147.6	608.8
		L	17	53.8	206.4	371.3	733.4	375.2	761.9
3D	H	59	-124.6	22.9	69.7	141.8	142.8	143.6	
	M	33	-123.5	97.7	108.2	317.4	164.2	332.1	
	L	28	-221.4	206.1	516.3	656.6	561.8	688.5	
A90	2D2	H	5	55.1	11.4	153.4	3.9	517.2	510.5
		H	218	82.1	16.2	161.1	14.7	169.5	29.4
		M	8	47.2	32.1	128.0	27.5	104.4	32.4
	3D	H	721	76.5	11.6	163.1	11.3	142.8	143.6
		M	33	78.3	22.2	166.7	16.2	164.2	332.1
		L	28	79.0	18.7	192.4	23.4	561.8	688.2
H88	2D2	H	570	-31.2	77.7	158.1	180.6	161.1	196.6
		H	287	-6.9	40.1	34.3	35.7	35.0	53.7
		M	8	-3.8	37.1	92.5	137.6	92.6	142.5
	2D3	L	100	25.7	30.9	180.6	109.7	182.4	114.0
		H	628	19.3	12.1	34.0	15.6	39.1	19.7
		M	268	16.1	45.2	13.4	84.2	20.9	95.6
R90	2D3	H	294	28.3	29.1	-650.6	15.8	651.2	33.1
		H	1983	51.1	31.4	-639.1	23.0	641.1	38.9
		M	88	40.4	35.1	-642.6	25.2	643.9	43.2
	3D	L	33	42.1	44.5	-659.2	30.1	660.5	53.7
		H	457	-99.7	95.4	98.8	125.7	140.4	157.8
		H	414	-22.9	16.5	46.1	68.5	51.5	70.5
S88	3D	H	698	12.1	33.4	48.2	67.2	49.7	75.0
		M	84	26.4	21.7	58.8	34.7	64.5	40.9
	2D2	H	307	-10.4	54.7	84.0	144.0	84.6	154.0
		H	370	22.3	28.3	61.9	28.0	65.8	39.8
S89	3D	H	826	15.8	41.9	53.1	53.9	55.4	68.3
		M	86	53.8	55.5	66.6	50.7	85.6	75.2
		H	676	-2.6	12.0	52.0	13.3	52.1	17.9
	2D3	M	71	-4.1	5.2	52.2	25.1	52.4	25.6
		H	2382	-6.9	12.0	50.4	11.3	50.9	16.5
		M	334	-4.1	14.1	51.2	14.0	51.4	19.9
S90	3D	L	15	-10.7	26.4	58.4	27.4	59.4	38.0

The codes are shown for Table 1.

2D2: two-dimensional positioning with two satellites; 2D3: two-dimensional positioning with three satellites

3D: three-dimensional positioning

H: high level; M: middle level; L: low level; SD: standard deviation

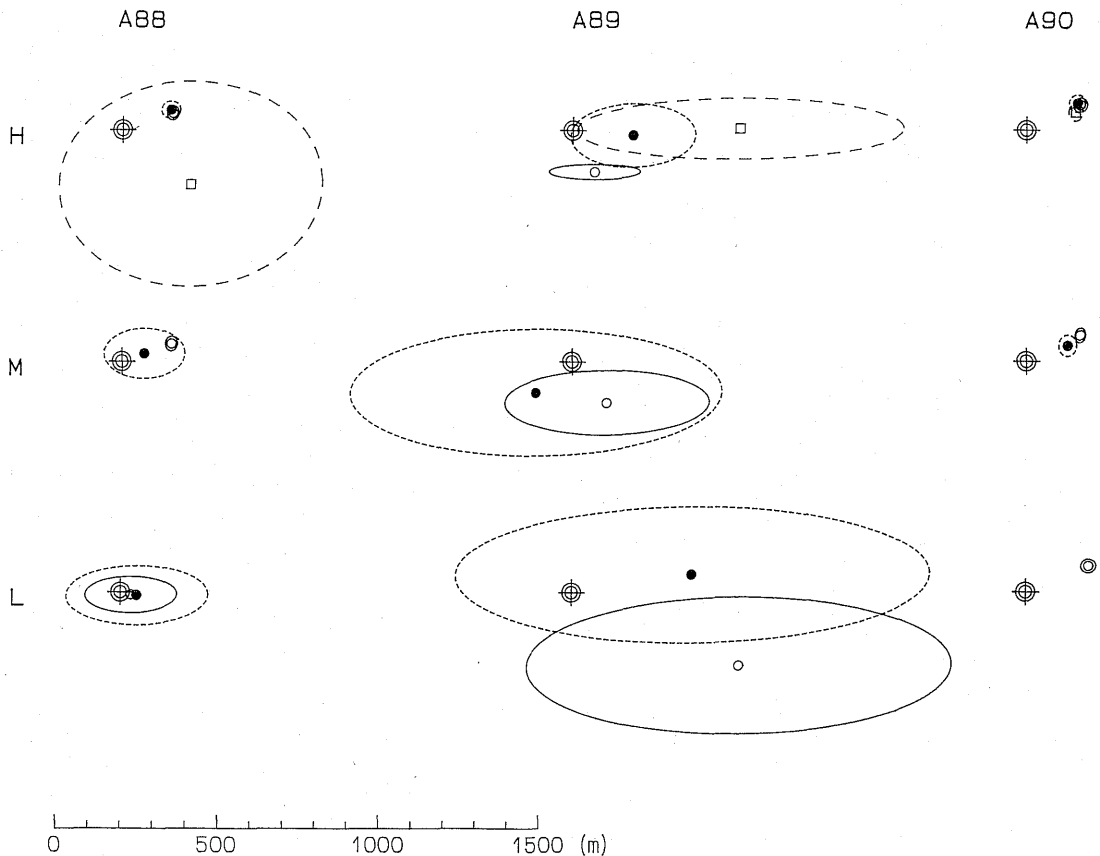


Fig. 4. The mean position and error ellipses of 1σ at Apra.
 The codes of these figures are shown for Table 1.
 2D2: two-dimensional positioning with two satellites
 2D3: two-dimensional positioning with three satellites
 3D: three-dimensional positioning
 H: high level; M: middle level; L: low level
 ⊕: observation position
 open circle and solid line: 3D; solid circle and dotted line: 2D3
 square and broken line: 2D2

ま と め

過去3年間に測定できた海外の定点, 北半球の低緯度帯に位置するグアム・アブラ港, 南半球の中緯度帯に位置するシドニー港と南半球の低緯度帯に位置するホニアラ港・ラバウル港におけるGPSの測位可能時間と測位精度の検討を行った。89年までは測位に利用できた衛星数が6個であったが, 90年には15個になると共に, 衛星軌道の変更も行われてきた。

その結果, 1989年までの2年間においては衛星の数が少なく, それらの軌道もアンバランスのため, 測位可能時間に地域差が認められた。つまり南下す

るにつれて短くなる傾向を示し, 89年のS点ではA点よりも約2時間短くなったが, 一方衛星が集中するため3Dでのそれは1~2時間長くなった。しかし, 90年には各測点とも測位可能時間は18時間30分以上となり, しかも北半球における3D測位可能時間が南半球のそれよりも増大した。2D3でもほとんどがHレベルで測位でき, 2D2の必要性はほとんど無くなった。

測位精度は, 88年にはかなり良かったものの, 89年には一旦低下した。ことに精度劣化衛星が存在したため2D2では, 平均偏位と標準偏差とも急激に大きくなった。その傾向は3Dでの測位可能時間が短い

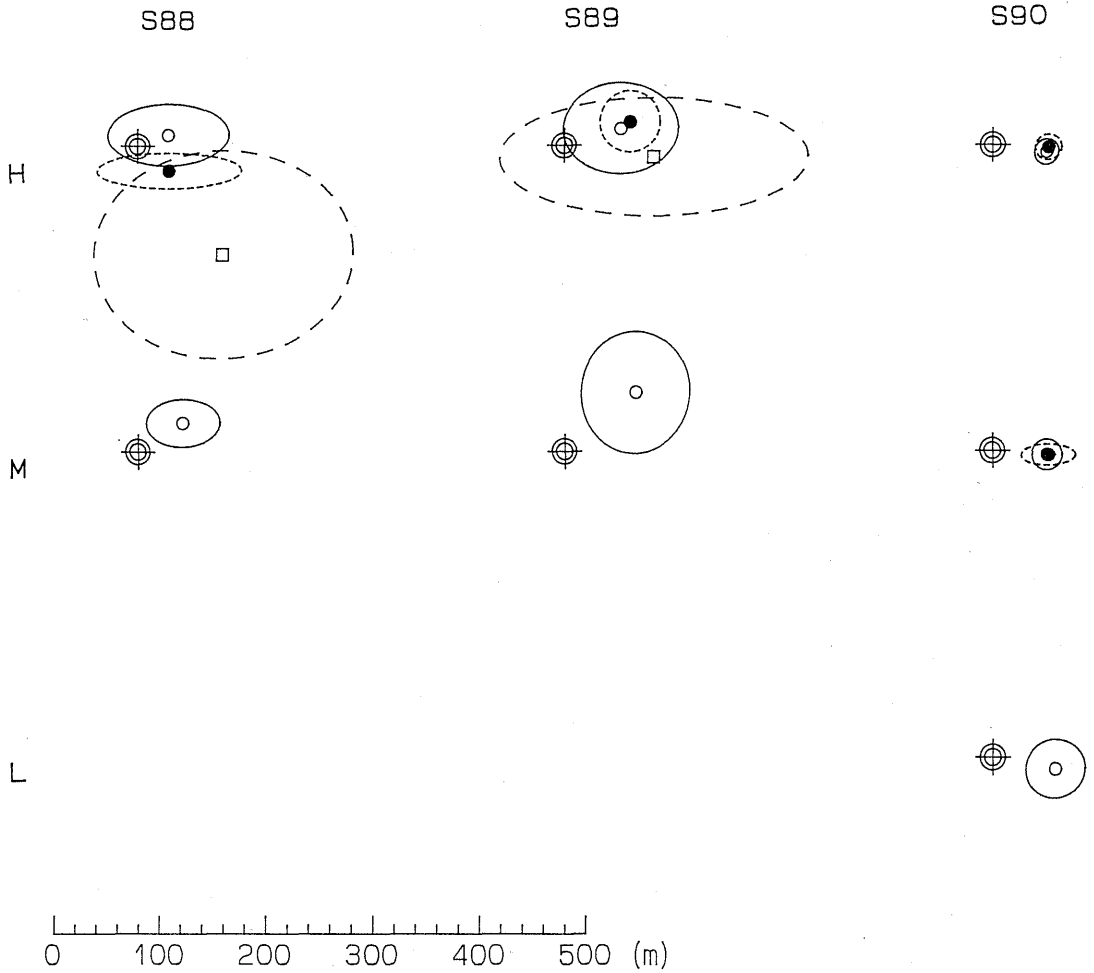


Fig. 5. The mean position and error ellipses of 1σ at Sydney. The codes of these figures are shown for Table 1.
 2D2: two-dimensional positioning with two satellites
 2D3: two-dimensional positioning with three satellites
 3D: three-dimensional positioning
 H: high level; M: middle level; L: low level
 ⊕: observation position
 open circle and solid line: 3D; solid circle and dotted line: 2D3
 square and broken line: 2D2

北半球で著しかった。しかし、その後衛星数の増加に伴い精度が向上し、90年には2D3でも標準偏差が45m以下となった。一方、米国の政策により、選択利用性が実施され、測位精度を低下させる方策が実施された⁶⁾が、衛星数の増加と軌道上の配置の修正により、既報⁴⁾の長崎の結果と同じようにかえって精度が向上した。今後、更に衛星が増加し、精度も改善されるであろうが、測点によって平均偏位が異なることもあり、衛星等の詳細な情報が入手できない現

状では更に定期的な定点測定を行い、その時点での精度や偏位量などについて十分把握しておかねばならない。

本研究にあたり、測定に御協力いただいた鶴洋丸船長秋重祐章助教授および乗組員各位に深甚の謝意を表す。

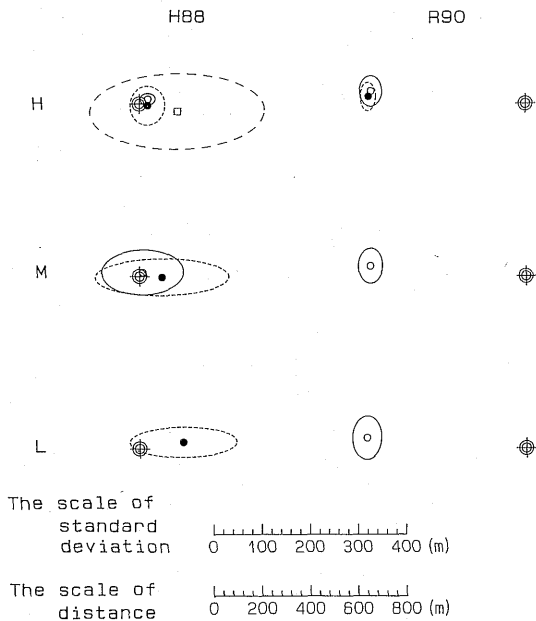


Fig. 6. The mean position and error ellipses of 1σ at Honiara and Rabaul. The codes of these figures are shown for Table 1.

2D2: two-dimensional positioning with two satellites

2D3: two-dimensional positioning with three satellites

3D: three-dimensional positioning

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

⊕: observation position

open circle and solid line: 3D; solid circle

and dotted line: 2D3; square and broken line: 2D2

参 考 文 献

- 1) 久野俊行 他2名 (1990): GPS の測位精度-VI, 海外の二定点における測定, 本誌, 67, 21-29.
- 2) 木村小一 (1988): 船の科学, 1, 104-108, 船舶技術協会, 東京.
- 3) 木村小一 (1986): 船の科学, 5, 87-91, 船舶技術協会, 東京.
- 4) 合田政次 他2名 (1990): GPS の測位精度-VII, 陸上定点における測定(2), 本誌, 69, 43-48.
- 5) 日本測地学会編 (1986): GPS-人工衛星による精密測位システム一, 69-88, 日本測量協会, 東京.
- 6) 木村小一 (1990): 船の科学, 9, 81-85, 船舶技術協会, 東京.