

GPSの測位精度—VI

海外の二定点における測定

久野 俊行, 合田 政次, 中根 重勝

Accuracies of Position Fixes Obtained by GPS—VI
The Observation at Two Foreign Fixed Stations

Toshiyuki KUNO, Masaji GODA and Shigekatsu NAKANE

ABSTRACT

We measured the usable time and got position fixes from two foreign fixed stations in order to evaluate the positioning accuracy of GPS in terms of the difference in location between the stations.

We received positioning signals from 6 satellites and also obtained position fixes by means of two satellites. The usable time measured at Honiara and Sydney was shorter than that measured at Nagasaki, but three-dimensional positioning accounted for 40~50% of the total time and most of the data were on a high level.

We eliminated not a few data in both stations because their errors were larger than 1 nautical mile. These data accounted for 10% of the total number, especially in Honiara.

There were no obvious locality differences found in 2D3 (two-dimensional positioning by means of three satellites) and 3D (three-dimensional positioning), i. e. the positioning errors in them were smaller than 0.1 nautical mile. But we observed that there were some locality differences in the usable time and the arrangement of the satellites.

key words: GPS global positioning system ; 測位精度 accuracy of position fixes
鶴洋丸 KAKUYO MARU

著者らは、これまで衛星航法システム NAVSTAR/GPS (以下 GPS と記す) の日本国内における陸上定点での測位精度について評価を行ってきた^{1, 2, 3)}。その結果、システムが未完成で衛星数が少なく、それらの軌道上の配置の関係で、測定時期や測定する緯度によって測位可能時間に多少の差が認められたが、三次元測位 (以下 3D と記す)、3衛星による二次元測位 (以下 2D3 と記す) のいずれの場合も測位誤差に顕著な地域差は認められなかった。また、測位可能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測定を行った結果、受信可能な衛星が2個だけの場合 (以下 2D2 と記す) でも、Hレベルのみに限定されるが測位可能となり、

国内の各地とも測位可能時間が約4時間長くなった。またその精度は、2D3のLレベルの精度と同程度であった³⁾。

本報では、本学部練習船鶴洋丸の実習航海中に南半球の2地点で測定を行う機会を得たので、測位可能時間と測位精度の評価を行った。さらに長崎での測位結果と比較検討した結果について報告する。

測定方法および資料

測定は1988年10月~12月の間、本学部練習船鶴洋丸が実習航海中に寄港した2港、ホニアラ港 (11月16日~11月20日) とシドニー港 (11月27日~12月1

日)において実施した。両港での基準位置は, 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-84⁴⁾に変換した値を用いた。前報²⁾で函館, 浜田, 長崎をA点, B点, C点としたので, 本報ではホニアラをD点, シドニーをE点とした。両観測点の基準位置を Table 1 に示す。なおC点のそれも参考のために併記した。

使用した受信機は, 前報³⁾と同様に日本無線(株)製 JLR-4000F で, これに高安定発振器 (NDM-13A) を接続したものである。

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では通常Hレベルのみの測定であるが, Lレベルまで測位出来るように受信機のソフトを改良し, Lレベルモードに設定して測定を行った。さらに, 受信機とパーソナルコンピューター (NEC, 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

今回測位に利用できた衛星は, 従来通り衛星番号 3・6・9・11・12・13号の6個であった。ただし, E点において一度だけ運用テスト中と思われる1号衛星の信号も受信した。D, E点とも4日間測定したが, 各次元での1日当りの測位可能時間とその割

Table 1. Observation positions (WGS-84)

	Latitude	Longitude
D	9°25.744' S	159°57.581' E
E	33°52.018' S	151°11.772' E
C	32°42.316' N	129°50.700' E

D: Honiara; E: Sydney; C: Nagasaki

合を各レベル毎に求め, Table 2 に示した。両観測点とも2D2はLレベルに設定して測定したにもかかわらず, Lレベルの測位はなく, Mレベルでの測位が, D点の4日間のうち僅かに1回ずつ3回観測されただけであった。これらは測位可能時間に算入せず, Hレベルのみを示した。またD, EおよびCの各観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。

両点での測位可能時間は, 赤道に近いD点では約9時間, さらに南半球の中緯度帯にあるE点では7時間10分で1時間45分の差がみられた。次元別では, D点において2D2の測位可能時間がE点より約1時間20分長く, 全体の38%を占めた。しかし両点ともにその割合が最も高いのは3Dであり, D点で42% (3時間48分), E点で47% (3時間23分)であった。2D3はD点で20%, E点で24%にすぎずともに約1時間40分であった。またレベル別では両点ともHレベルが多く, D点で80%, E点では95%を占め, 特にE点ではLレベルが全くなかった。一方北

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

Position		2D2					2D3				3D				Total			
		H	H	M	L	T	H	M	L	T	H	M	L	T	H	M	L	T
D	Time (h-m)	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	14	1	5	20	29	13	—	42	81	14	5	100				
E	Time (h-m)	2-03	1-44	—	—	1-44	3-02	0-21	—	3-23	6-49	0-21	—	7-10				
	Percentage (%)	29	24	—	—	24	42	5	—	47	95	5	—	100				
C	Time (h-m)	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	21	16	18	55	3	4	2	9	60	20	20	100				

D: Honiara; E: Sydney; C: Nagasaki

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

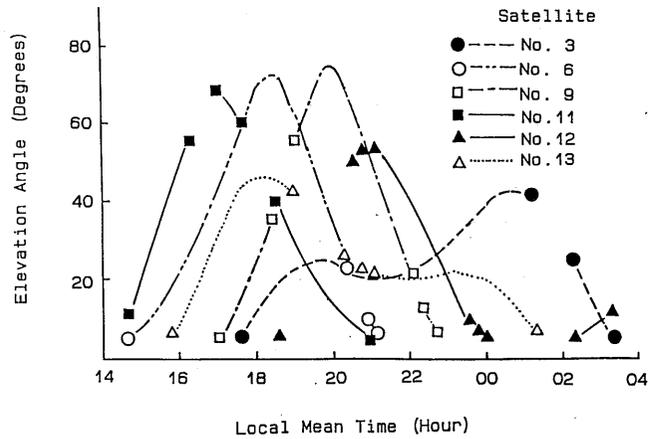


Fig. 1. Elevation angle of satellites observed at Honiara from 17th to 18th Nov. 1988.

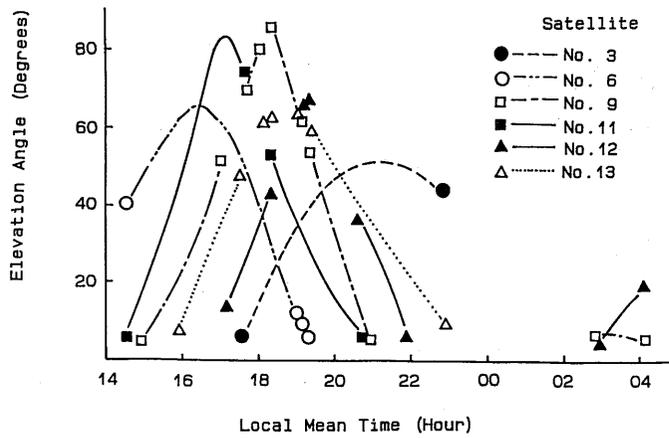


Fig. 2. Elevation angle of satellites observed at Sydney from 28th to 29th Nov. 1988.

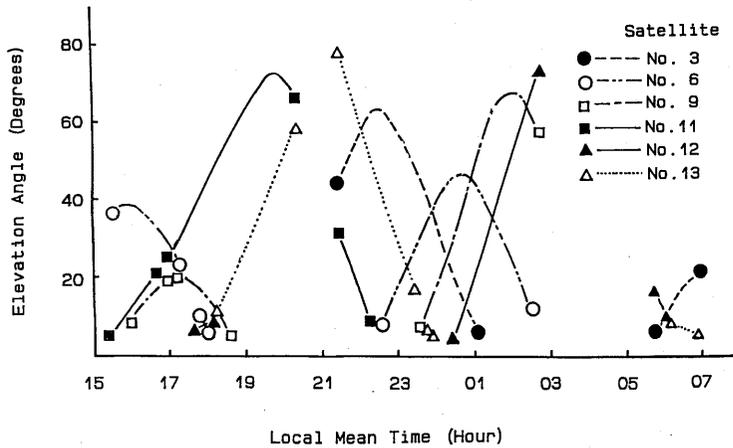


Fig. 3. Elevation angle of satellites observed at Nagasaki from 13th to 14th Aug. 1988.

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

Dimension	Number of Data				Percentage (%)	
	Total	Eliminated	Rejected	Used		
D	2 D 2	826	166	90	570	69
	2 D 3	406	10	1	395	97
	3 D	912	13	3	896	98
	Total	2144	189	94	1861	87
E	2 D 2	492	17	18	457	93
	2 D 3	416	1	1	414	99
	3 D	811	15	14	782	96
	Total	1719	33	33	1653	96
C	2 D 2	225	—	8	217	96
	2 D 3	335	—	4	331	99
	3 D	59	—	5	54	92
	Total	619	—	17	602	97

D: Honiara; E: Sydney; C: Nagasaki

半球のC点では測位可能時間は10時間を越えて、E点より約3時間長かった。しかし、3Dは約1時間で9%にすぎず、2D3が5時間35分で55%を占めていた。また、Hレベルは60%にすぎなかった。今回の測定中にはD、E点とも測位可能な衛星が同じ時間帯に集中することが多く、時には全衛星から受信、測位可能なこともあったが、その反面まったく測位出来ない時間が長かった。また一チャンネルの受信機では使用する衛星が切り替わる場合には、測位の中断が発生することもある⁹⁾が、D、E点では特に顕著に現れ、3Dの場合には、使用する衛星が数分毎に切り替わることもあった。

これらのことから北半球より南下につれて測位可能時間は減少していくが、衛星の幾何学的配置(PDOP値)は良好になっていくものと考えられる。これは、本システムが未完成であるため衛星数が少なく、各軌道上の配置がアンバランスである⁹⁾ことによるものである。

2. 測位精度

今回の測位データの中には測定位置が基準位置から大きくずれたものが多かった。これまでの測定結果より、測位誤差は2D3、3Dでは0.1海里程度であったので、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た。また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)のいずれかが標準偏差の3倍(3 σ)以上であったデータを棄却した。各観測点における

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。D点では、約10%が除外され、棄却データと合わせると約13%が使用できなかった。その出現する時間は、測定時間帯の始めと終わり頃に数分間ずつ現れる。しかし時には約1時間連続したこともあった。この傾向はほとんど毎日同様に出現していた。またE点では、使用出来ないデータの割合は4%にすぎなかったが、除外数と棄却数は同数であった。それらは測定時間帯の始め頃に多く現れていた。一方、C点では除外データはなく、3%の棄却データが測定時間帯の始め頃に現れただけであった。各観測点とも測定時間帯の始め頃に大きな誤差のデータが出現していることの原因としては、前の時間帯の終わり頃に得られた位置データがそのまま記憶されており、それを推測位置として計算に使用されることによるものと考えられる。

2.1 レベル毎の精度

D、E点については、測定した4日間のデータについて検討を行った。なおC点については1日分のデータである。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ものがTable 4である。また各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1 σ の誤差楕円を図示したものがFig. 4である。

2D2の場合、平均位置はC点では北東へ偏していたのに対し、D、E点では南東の方向に偏していたが、平均位置+標準偏差で表す測位誤差はいずれ

Table 4. The mean values and standard deviations of D. lat, Dep and Distance for each level (unit in meter)

Dimension	Level	No. of Data	D. lat		Dep		Distance		
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
D	2 D 2	H	570	-31.2	77.7	158.1	180.6	161.1	196.6
	2 D 3	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
		L	100	25.7	30.9	180.6	109.7	182.4	114.0
	Total	395	1.4	40.4	72.5	91.2	72.5	99.7	
	3 D	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
		Total	896	18.3	26.7	27.8	48.7	33.3	55.5
	Total	1861	-0.4	54.7	77.2	126.8	77.2	138.1	
	E	2 D 2	H	457	-99.7	95.4	98.8	125.7	140.4
2 D 3		H	414	-22.9	16.5	46.1	68.5	51.5	70.5
3 D		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
		Total	782	13.6	32.6	49.3	64.6	51.1	72.4
Total		1653	-26.8	73.0	62.2	89.6	67.7	115.6	
C	2 D 2	H	217	61.3	68.4	36.0	89.5	71.1	112.6
	2 D 3	H	132	29.6	21.8	8.8	30.4	30.9	37.4
		M	94	0.2	49.0	23.4	77.2	23.4	91.4
		L	105	2.3	54.6	-44.9	74.8	45.0	92.6
	Total	331	12.6	44.7	-4.1	68.0	13.3	81.4	
	3 D	H	20	44.7	5.7	-27.1	12.7	52.3	13.9
		M	26	44.0	18.5	2.5	25.5	44.1	31.5
		L	8	53.6	24.9	-0.5	87.7	53.6	91.2
		Total	54	45.7	16.3	-8.9	39.8	46.6	43.0
	Total	602	33.1	57.8	9.9	77.1	34.5	96.4	

D: Honiara; E: Sydney; C: Nagasaki
 H: high; M: nibble; L: low; SD: standard deviation

も0.1~0.2海里であり、前報³⁾の結果とほぼ一致した。

2 D 3, 3 Dの場合、平均位置はレベルによって、緯度方向のバラツキはあるが約30m以内である。しかし、経度方向の偏位は大きく、D点の2 D 3のLレベル（以下2 D 3-Lと記す。他の場合も同様に記す）では約180m東偏していた。またいずれの場合もDepの標準偏差がD. latのそれよりも大きく、D点の2 D 3-Hを除くと誤差楕円はほとんど横長の形状となっている。2 D 2を除く測位誤差は、M, Lレベルでは100m以上であり、特に大きいのはD点

の2 D 3-M, 2 D 3-Lで240~300mであった。HレベルではE点の2 D 3で122mとなった他は約60~90mにすぎなかった。しかし全般的にC点より平均偏位、標準偏差とも増大する傾向がみられる。

2. 2 衛星の組み合わせによる精度

各点で測定出来た衛星の組み合わせと各レベル毎のデータ数を Table 5, 6, 7 に示す。これらのうち、D, E点でデータ数が100個以上のものについてD. lat, Depの平均値および標準偏差を求め Table 8 に示した。

3点に共通する組み合わせは2 D 2の3・13と6・

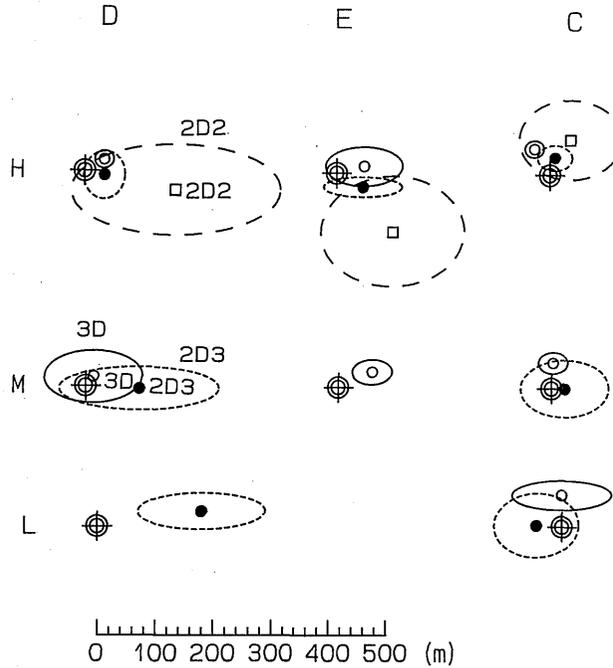


Fig. 4. The mean position and error ellipses of 1σ .
 2D2: two-dimensional positioning with two satellites
 2D3: two-dimensional positioning with three satellites
 3D: three-dimensional positioning
 H: high level; M: middle level; L: low level
 D: Honiara; E: Sydney; C: Nagasaki
 ⊕: observation position

Table 5. Number of position fixes taken by combination of satellites for each level at Honiara

	Combination of Satellites						Level				Unusable Data
	3	6	9	11	12	13	H	M	L	Total	
2 D 2	●				●		24			24	188
	●					●	305			305	
		●		●			131			131	68
		●				●	110			110	
						Total	570			570	256
2 D 3	●				●	●	287			287	11
		●		●		●		6	100	106	
			●	●		●		2		2	
				Total			287	8	100	395	11
3 D	●	●	●	●			242			242	
	●	●	●			●	172			172	
	●	●		●		●	108			108	
	●	●			●	●	6			6	
	●		●	●	●			4		4	
	●		●	●		●	4			4	
	●		●	●	●	●	10	261		271	16
		●	●	●		●	86	3		89	
			Total			628	268		896	16	

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

Table 6. Number of position fixes taken by combination of satellites for each level at Sydney

	Combination of Satellites						Level				Unusable Data
	3	6	9	11	12	13	H	M	L	Total	
2 D 2	●					●	226			226	
		●			●		15			15	35
			●		●		40			40	
			●			●	176			176	
						Total	457			457	35
2 D 3	●				●	●	225			225	
		●		●			124			124	2
			●	●			49			49	
				●	●	●	16			16	
						Total	414			414	2
3 D	●	●	●	●			78			78	
	●	●	●		●		55			55	
	●	●		●	●		38			38	
	●	●			●	●	25			25	
	●		●	●	●		18			18	
	●		●	●		●	273	15		288	29
	●		●		●	●		58		58	
	●			●	●	●	47			47	
		●	●	●	●	●	133	11		144	
		●		●	●	●	31			31	
					Total	698	84		782	29	

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

Table 7. Number of position fixes taken by combination of satellites for each level at Nagasaki

	Combination of Satellites						Level				Unusable Data
	3	6	9	11	12	13	H	M	L	Total	
2 D 2	●				●		17			17	
	●					●	48			48	
		●	●				14			14	
		●		●			32			32	
			●	●			4			4	
			●		●		12			12	
					●	●	90			90	8
					Total	217			217	8	
2 D 3	●	●	●				38			38	
	●	●				●	59			59	
	●			●		●		11	42	53	1
		●	●	●				48	12	60	
		●	●		●			30	50	80	1
			●	●	●	●	9	5	1	15	2
					Total	132	94	105	331	4	
3 D	●	●	●		●		7	21	4	32	5
	●	●	●			●		5	4	9	
		●	●	●	●		13			13	
					Total	20	26	8	54	5	

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

Table 8. The mean values and standard deviation of D. lat, Dep and Distance by combination of satellites for each level at Honiara and Sydney (unit in meter)

Dimension	Level	Combination Satellite No.	D. lat		Dep		Distance		
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
D	2 D 2	H	3・13	-80.2	33.7	58.0	45.5	99.0	56.6
			6・11	-29.6	43.1	398.4	211.4	399.5	215.7
			6・13	68.8	23.8	193.9	53.1	205.7	58.2
	2 D 3	H	3・12・13	-6.9	40.1	34.3	35.7	35.0	53.7
		L	6・11・13	25.7	30.9	180.6	109.7	182.4	114.0
	3 D		3・6・9・11	28.3	7.7	38.4	16.0	47.7	17.8
		H	3・6・9・13	9.0	10.3	26.0	14.4	27.5	17.7
			3・6・11・13	18.8	4.0	34.1	6.7	38.9	7.8
		M	3・9・12・13	15.6	45.6	13.3	85.3	20.5	98.8
	E	2 D 2	H	3・13	-181.3	42.5	75.1	57.1	196.2
			9・12	-37.6	36.2	162.8	68.5	167.1	77.5
2 D 3		H	3・12・13	-25.7	19.3	-1.5	25.9	25.7	32.3
			6・9・11	-16.8	4.9	68.4	37.0	70.4	37.3
3 D		H	3・9・11・13	22.7	48.4	49.1	103.8	54.1	114.5
			6・9・11・13	-7.4	6.4	49.9	16.4	50.4	17.6

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

D: Honiara; E: Sydney; SD: standard deviation

11の2組しかなく、かなりの違いがみられた。D、E点では2 D 2の3・13、2 D 3の3・12・13の組み合わせが、それぞれ使用データの50%以上を占めた。一方除外あるいは棄却データも、特定の組み合わせに集中していた。例えば2 D 2の6・11の組み合わせでは、D点で測位出来たデータ数の34%、E点では70%が、またD点の3・12では実に212個のうち93%が除外および棄却データとなった。この様に場所によっては測定できる衛星の組み合わせが異なったり、3点に共通する組み合わせが2 D 2の3・13と6・11の2組しかないのは衛星軌道の傾斜角がそれぞれ60度であるため⁹⁾組み合わせには地域差が生ずるものと考えられる。組み合わせ別の平均偏位は、2 D 2と2 D 3のLレベルを除けば、いずれも0.05海里(約93m)以内で、標準偏差は緯度方向で50m未満、経度方向では100m未満で、誤差楕円は全て横長の形状を示した。なお、その最大値はD点における2 D 2の6・11で211mとなったが、他の組み合わせではデータ数の少ないものを除けばいずれも110m以下であった。

ま と め

ホニアラおよびシドニーにおいて、GPSシステム

の測定を行い、測位可能時間と測位精度について検討した。両点で測定できた衛星は6個であった。2衛星による測定も行ったが、M、Lレベルによる測位データはほとんどなかった。測位可能時間は、ホニアラでは約9時間、シドニーでは約7時間で、長崎での10時間と比べ南へ行くほど短くなった。その反面、D、E点では同時に受信できる衛星数が多いために、三次元測位が40%以上を占め、衛星の配置もかなり良好でHレベルが80%~90%を占めた。

今回の測定では基準位置から大きく離れたデータが多く、ホニアラでは全体の約10%が1海里以上離れていた。

3~4衛星による測位では、測位誤差にあまり顕著な地域差はみられなかったが、測位可能時間や衛星の配置にはかなりの差があった。

2衛星による測位では、ホニアラで約30%、シドニーで約7%使用出来ないデータがあり、測位可能時間は2~3時間半延長されるものの、その使用に当たっては特に注意しなければならない。

しかし、その出現する時間帯や衛星の組み合わせには特長がみられたから使用する際には考慮することができる。

今後の課題として、システムの精度を劣化させる

という情報もあり、誤差の大きいデータの出現する時間帯や衛星の組み合わせ、その偏位量などについて詳細な検討を続ける必要がある。

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。

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 3 名 (1989) : GPS の測位精度— IV, 三定点における測定, 本誌, **65**, 45-53
- 3) 合田政次 他 2 名 (1989) : GPS の測位精度— V, 高安定発振器の利用について, 本誌, **66**, 31-36
- 4) 木村小一 (1988) : 船の科学, **1**, 104-108, 東京, 船舶技術協会
- 5) 木村小一 (1986) : 船の科学, **5**, 87-91, 東京, 船舶技術協会
- 6) 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