

GPS とロランCの陸上定点における相対誤差

合田 政次, 久野 俊行, 中根 重勝

Relative Error between GPS and Loran C at a Fixed Station on the Land

Masaji GODA, Toshiyuki KUNO and Shigekatu NAKANE

In order to put hybrid navigation with GPS and Loran C into practice, and to measure basic data for the accuracy of position fixes by Loran C, we evaluated the relative error between the position fixes obtained by the simultaneous measurement with GPS and Loran C at a fixed station (Nagasaki University) on the land.

There was constant error of about 600m southerly on Loran C. And the differences in distance from the observation position on Loran C to the relative position on Loran C to GPS in the case where the datum position was GPS were 30~60m on 3D (three-dimensional positioning) and 2D3 (two-dimensional positioning with three satellites). But there were distance differences of 0.1~0.2 nautical miles on 2D2 (two-dimensional positioning with two satellites).

When we corrected the GPS position by the displacement obtained from the observation at a fixed station and calculated the distance difference from the observation position on Loran C to the relative position on Loran C to GPS correction position, their errors were 10~40m except in the case of the middle level positioning of 2D2.

key words: GPS global positioning system; ロランC Loran C;

相対誤差 relative error; 陸上定点 fixed station on the land.

著者らは、これまで衛星航法システム NAVSTAR/GPS (以下 GPS と記す) の陸上定点における測位精度の評価を行ってきた。その結果、GPS による測位誤差 (平均偏位+標準偏差) は、本システム完成時における完全運用状態の三次元測位 (以下 3D と記す) では H レベルで 50~90m, M レベルで 60~120m, L レベルで 60~170m 程度であり、L レベルでも 0.1 海里未満にすぎず¹⁾、その測位精度は極めて優れている。

そこで著者らは、GPS とロランC システムによるハイブリッド航法を行うため、およびロランC システムの精度について基礎的知見を得るため、両システムによる位置の相対誤差を把握することを目的として、長崎大学における陸上定点と九州西岸海域において、それぞれ両システムの同時測定を行い評価

した。本報では、陸上定点における相対誤差について報告する。

測定方法および資料

測定は、1989年6月15日~同17日の間、GPS およびロランC のアンテナを本学部の屋上に設置して行った。基準位置は、GPS のアンテナ位置を国土地理院発行の 1/25000 の地図から求め (lat32° 46.964'N, Long129° 52.075'E), これを測地系 WGS-84 に変換したもの (lat32° 47.163'N, Long129° 51.935'E) を用いた。なおロランC 位置は測地系 WGS-72 に準拠しているため、これを測地系 WGS-84 に変換すると共にアンテナ位置の差についても修正を行った。

使用した GPS 受信機は、日本無線(株)製 JLR-4000

Fであり, ロランC受信機は(株)光電製作所製 LR-717全自動型ロランC専用受信機である。

GPS受信機の使用モードは, 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全レベルについて測定を行った。ロランCは9970チェーンのM局-X局(以下Xと記す), M局-Y局(以下Yと記す)の時間差値および緯度, 経度を測定した。両受信機とパーソナルコンピュータ(NEC PC-9801)を接続し, 両受信機から出力される緯度, 経度などのデータについて, GPSによる測位が可能な場合のみロランCのデータの取り込みを行う様にプログラムを改良して, 1分間隔でフロッピーディスクに記録した。なお, GPS衛星およびロランC局に異常のなかった事を確認し, 両システムの精度と両者の相対誤差を求めた。

結果および考察

1. GPSの測位精度

3日間の測定のうち, 16, 17の両日も03時46分から15~16分間, 3D(衛星番号3, 6, 9, 12)の測位結果が大きく偏位した。その平均偏位距離は16日の24.7海里と17日の15.4海里で, 最大値はそれぞれ49.6海里, 48.6海里にも達していた。これらはいずれも, それまでの3個の衛星(衛星番号3・6・9)での二次元測位(以下2D3と記す)の後, 4分間の測位中断を経て新たに12号衛星が加わったものである。これらの場合, 4~7分で最大偏位に達し, その後急速に偏位量が減少して回復した。その他の時間帯における12号衛星を使用しての測位では, 特に大きい偏位は見られない。従って, このように測位誤差が大きくなった原因としては, 12号衛星からの信号の精度の劣化によるものとは考えられず, その一因として, 受信機が1チャンネルのシーケンシャル受信方式であることがあげられる。この方式では1つの衛星について約1秒間の信号受信を行い, これを各衛星について順次繰り返すことにより測位を行う。従ってこの方式での最大の難点は1つの衛星の軌道データを収集している間は他の衛星の距離測定を行うことができないため, その間は測位が中断されてしまうことである。また衛星信号のS/N比が低下するにつれて, 1個の衛星を受信するのに必要な時間が1秒間では不足するようになる。この場合には各衛星について受信する時間も延びてしまうことになり, 測位誤差を生じ易い²⁾。これについて

は, 米国海岸ガードによる定点試験においても, 使用衛星の切り換え時, 軌道データ取り込み時や新衛星の信号取り込み時には測位の中断が生じ, その後位置のジャンプがおきることが認められている³⁾。本測定の場合も同様の現象と考えられ, さらに電離層のじょう乱などの影響⁴⁾が加わったとも考えられる。

これらのデータ32個と, 2個の衛星による二次元測位(以下2D2と記す)で平均偏位距離2.6海里, 最大値4.2海里のデータ35個は正常な測位が行われなかったものとして除外した。これらが全データ(1155個)に対して占める割合は約6%であった。

上記のデータ67個を除いて, 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)および距離(以下Distと記す)の平均値および標準偏差を求めた。それらの計算結果をTable 1に示す。その際D.lat, Depのいずれかが標準偏差の3倍(3 σ)以上であったデータは棄却した。棄却データは49個(4%)で, その平均偏位距離は1500m(約0.8海里)であった。除外と棄却によるデータは116個で, 全データの約10%にあたる。

3Dおよび2D3の基準位置からの平均偏位と標準偏差は既に報告した結果¹⁾とほぼ同様であり, 測定期間中に特記すべき異常はなかったものと判断した。

2. ロランCの測位精度

16日の00時44分から翌朝10時頃までXにスリップ(-10~-430 μ sec)状態が続いた。この現象はGPSが測位可能になった同日の18時24分には正常な値を示していたが, 17日の00時36分から再び同様のスリップを生じ, その後測定終了時まで続いた。

ロランC自動受信機では地表波の受信可能範囲は約1500海里におよび, その伝搬経路上に陸上が存在すると1000海里付近からスリップの発生率が高くなる^{5,6)}。長崎とX局間の距離は大圏距離で約886海里であり, 地表波での測位が十分に可能であるが, そのうち約330海里が陸上伝搬の為, 夜間には陸上伝搬による信号の減衰が影響すると考えられる。本受信機はS/N比の低下で信号が雑音の中に埋没すると, 信号の追尾点の設定を10 μ secずつずらして信号検出をするから, 測定値に10 μ sec単位のスリップを生じる。スリップの発生回数は空間波や大気雑音に左右され, 日によって大きく異なる。本測定でのスリップは-10 μ secから-430 μ secまで, 回復することな

Table 1. The mean values and standard deviations of D. lat, Dep and Distance on each level (unit in meter)

Dimension	Level	No. of Data	D. lat		Dep		Distance	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
3 D	H	36	12.4	13.0	18.4	24.5	22.2	27.7
	M	13	31.6	31.4	19.6	53.7	37.2	62.2
	L	12	19.0	51.1	66.3	48.0	69.0	70.1
	Total	61	17.8	28.9	28.1	41.4	33.3	50.5
2 D 3	H	262	11.1	29.4	22.8	31.4	25.4	43.0
	M	212	-2.7	50.7	16.5	72.7	16.7	88.6
	L	180	14.4	80.5	-29.6	108.6	32.9	135.2
	Total	654	7.5	54.8	6.4	76.4	9.9	94.0
2 D 2	H	254	174.5	210.0	129.1	185.8	217.1	280.4
	M	66	59.6	157.2	21.1	219.1	63.2	269.7
	L	4	142.2	21.0	-156.4	114.7	211.4	116.6
	Total	324	150.7	204.1	103.6	198.9	182.9	285.0
Total	1039	52.8	138.7	38.0	134.4	65.1	193.1	

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

3 D : three-dimensional positioning

2 D 3 : two-dimensional positioning with three satellites

2 D 2 : two-dimensional positioning with two satellites

く徐々に大きくなった。これは空間波領域へのスリップで信号の追尾点を設定できない状態であったものと考えられる。従って、スリップ状態の時間帯におけるデータは除外し、1日目283個、2日目270個のデータについてX、Yの時間差値とそれにより計算される緯度、経度の各平均値と標準偏差を求めた。これをTable 2に示す。その結果ロランCの定誤差はほぼ南方に600m程度でやや大きいものの、標準偏差は30m未満であり、位置のバラツキはGPS

の2 D 3のHレベルとほぼ同程度であった。しかしながら、測定データの約50%がスリップ状態であり、その発生について十分な注意が必要であろう。

3. 相対誤差

正常に測位できたデータのうち、両受信機で同時に測定できた場合のデータ491個について、対応するGPS位置を基準位置として相対誤差を求め、それらを次元別、レベル毎にD. lat, DepおよびDistの平

Table 2. The mean values and standard deviations of the time difference in μ sec and Loran-C positions

Date	No. of Data	Time difference (unit in μ sec)				Loran-C position			
		X		Y		Latitude		Longitude	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
June 16	283	37415.75	0.14	57058.41	0.08	32° 46.837'N	0.016'	129° 52.000'E	0.015'
							(29.6m)		(23.2m)
June 17	270	37415.72	0.10	57058.43	0.09	46.841	0.011	52.001	0.016
							(20.4m)		(24.8m)

SD : standard deviation

均値と標準偏差を算出した。なお2D2のLレベルはデータが1個のみであったから計算から除外した。またこの場合もD.lat, Depのいずれかが標準偏差の3倍(3 σ)以上であったデータは棄却した。棄却データは23個で, その平均偏位距離は1490m(約0.8海里)であった。これらの結果をTable 3に示す。

3Dと2D3ではロランC位置の緯度方向の偏位はいずれも南へ590~620mの範囲であった。2D2でも偏位方向は南であるが, その距離は780~920mで, かなり大きかった。経度方向への偏位は, 3D, 2D3は全て東で, その距離は3Dでは約75m, 2D3のH, Mレベルでは40~50m程度であったが, Lレベルではやや大きく120mであった。2D2では西へ偏位したが, その距離はHレベルでは40mにすぎないものの, Mレベルでは260mに達していた。

標準偏差は2D3のMレベルで, D.lat, Depともに60m程度であるが, Hレベルでは約半分の30m程度であり, 3DのHレベルとほぼ同程度であった。しかし, 2D3のLレベルではD.latで174m, Depで210mと, Mレベルの3~4倍に達し, 2D2では

Hレベルでもさらに大きくなった。このように2D2で標準偏差が大きくなった原因を検討するため, 相対誤差を求めるのに使用したGPSデータの測定位置の分布を, それぞれ次元別にプロットしたものがFig. 1~3である。すなわち, 3Dの位置はほぼ一定の範囲内にあるが, 2D3では, 数は少ないものの偏位の大きいデータがある。これらのデータはいずれも外側から平均位置へ収束したものであり, 全体に対する割合も少なく, またその大部分はLレベルであった。

しかしながら, 2D2では1/3程度のデータが発散しているため, 標準偏差が著しく大きくなった。また, 発散しているのは, 両日とも衛星番号11・13の組み合わせのものであり, その他の組み合わせではこの様な傾向はみられなかったこと, 位置の線の幾何学的な関係に基づく測位精度の劣化を表すPDOP値はいずれも3~7であったが, 11, 13の両衛星の高度が共に60度以上の高々度であった事が発散の一因と考えられる。

これまで, 測位精度は標準偏差の3倍(3 σ)での

Table 3. The mean values and standard deviations of D. lat, Dep and Distance between the Loranc position and GPS position on each level (unit in meter)

Dimension	Level	No. of Data	D. lat		Dep		Distance	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
3 D	H	36	-606.9	23.8	75.1	34.5	612.4	26.1
	M							
	L							
	Total	36	-606.9	23.8	75.1	34.5	612.4	26.1
2 D 3	H	64	-605.0	30.0	41.4	30.4	607.6	30.6
	M	96	-588.4	64.7	52.0	58.3	593.8	65.4
	L	30	-619.6	174.2	120.9	212.7	673.2	140.8
	Total	190	-598.9	85.7	59.3	99.5	611.0	79.8
2 D 2	H	234	-784.5	215.6	-40.4	176.0	801.3	234.0
	M	7	-915.7	239.8	-258.5	402.4	1007.9	338.8
	L							
	Total	241	-788.3	217.4	-46.1	190.1	807.1	240.2
Total		467	-697.3	190.4	5.8	160.4	712.4	205.0

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

3 D : three-dimensional positioning

2 D 3 : two-dimensional positioning with three satellites

2 D 2 : two-dimensional positioning with two satellites

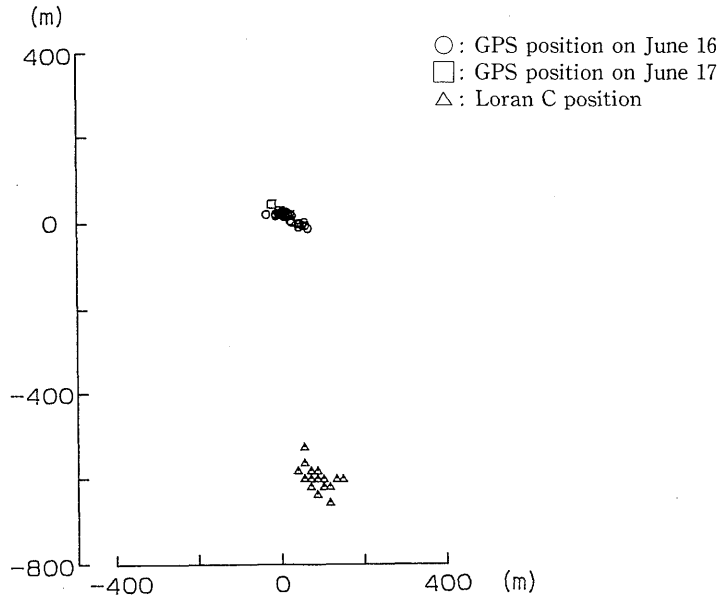


Fig. 1. Distribution of position fixes obtained by three-dimensional positioning of GPS and Loran C. point (0,0): observation position.

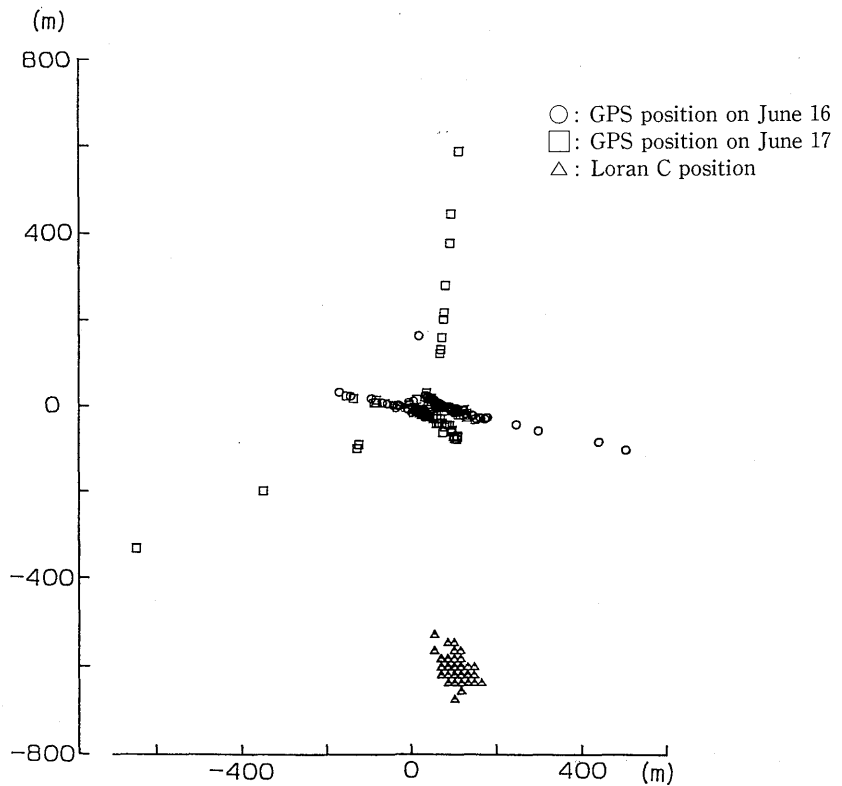


Fig. 2. Distribution of position fixes obtained by two-dimensional positioning with three satellites of GPS and Loran C. point (0,0): observation position.

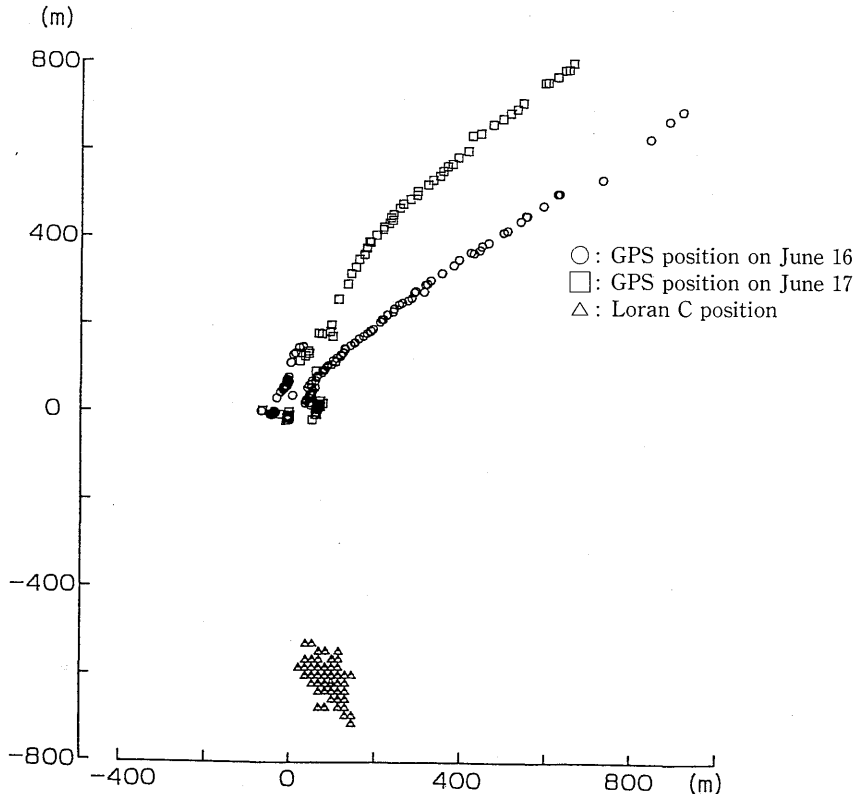


Fig. 3. Distribution of position fixes obtained by two-dimensional positioning with two satellites of GPS and Loran C.
point (0, 0): observation position.

棄却を行ったうえで評価してきたが、2D2はもちろん2D3のLレベルでも、衛星の組み合わせによっては、本測定の場合のような発散がある。従って、両システム間の相対誤差をより正確に求めるには、発散するデータが含まれない2D3のMレベルまでを使用することが望ましいと考えられる。

Table 3の相対誤差の算出に用いたGPS位置の偏位量を求め、Table 4に示した。Table 3の相対誤差にTable 4のGPSの平均偏位量を補正すれば、ロランCの偏位量になるはずである。そこで、補正して求めたロランCの偏位量（以下補正值 G_0 と記す）と実測による偏位量（以下実測値と記す）とを、D.latとDepに分けてそれぞれの平均値をTable 5に示した。なおロランCの実測値は日によってわずかながら差があるので測定日ごとに区分した。また、Table 1の平均偏位量を補正した結果（以下補正值 G_1 と記す）も併せて記載した。補正值 G_0 は、ロランCと対応した個々の測定におけるGPS位置の平均値から求めたものであるから、実測値とほぼ一致す

る。しかし、海上測定に適用する場合は、陸上定点との同時測定が常に可能な訳ではなく、最寄りの陸上定点で別に測定したGPSの測定結果を補正值として利用することになる。従って、今回の測定でも補正值 G_1 が実用上の補正に近いものと考えられるが、両者のバラツキの影響が加わることで、データ数が少ないことのために、補正值 G_1 は補正值 G_0 より実測値との差が大きくなっている。従って、海上における補正值としては、補正值 G_1 よりも更に多数のデータによる結果を用いるべきであろうと考えられる。

今回の測定結果を用いれば、3DのHレベルで10m、2D3で40m程度の誤差でロランCの精度が把握出来よう。なお、2D2のHレベルでは2D3のLレベルとほぼ同じであったが、Mレベルでは430m程度の誤差が含まれることになる点に留意すべきである。

Table 4. The mean values and standard deviations of D. lat, Dep and Distance of the GPS data used for calculating relative error between the Loran-C position and GPS position on each level (unit in meter)

Dimension	Level	No. of Data	D. lat		Dep		Distance	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
3 D	H	36	12.4	13.0	18.4	24.5	22.2	27.7
	M							
	L							
	Total	36	12.4	13.0	18.4	24.5	22.2	27.7
2 D 3	H	64	3.6	18.9	69.1	24.8	69.2	31.2
	M	96	-10.7	58.9	59.7	53.9	60.7	79.8
	L	30	20.1	170.6	-15.0	217.4	25.1	276.4
	Total	190	-1.0	80.3	51.1	98.8	51.1	127.3
2 D 2	H	234	182.3	210.1	143.9	178.0	232.3	275.4
	M	8	389.4	270.5	433.7	448.6	582.9	523.8
	L							
	Total	242	189.2	214.9	153.5	197.9	243.6	292.1
Total		468	98.4	187.9	101.5	164.8	141.4	249.9

H : high ; M : middle ; L : low ; SD : standard deviation
 3 D : three-dimensional positioning
 2 D 3 : two-dimensional positioning with three satellites
 2 D 2 : two-dimensional positioning with two satellites

Table 5. The mean values of D. lat and Dep of Loran-C position obtained by correction for GPS and Loran-C observation positions

Dimension	Level	Correction (G ₀)		Correction (G ₁)	
		D. lat	Dep	D. lat	Dep
3 D	H	-594.5	93.5	-594.5	93.5
2 D 3	H	-601.4	110.5	-593.9	64.2
	M	-599.1	111.7	-591.1	68.5
	L	-599.5	105.9	-605.2	91.3
2 D 2	H	-602.2	103.5	-610.0	88.7
	M	-526.3	175.2	-856.1	-237.4
LORAN-C	June 16	-603.8	100.6		
	June 17	-596.3	102.1		

H : high ; M : middle ; L : low
 3 D : three-dimensional positioning
 2 D 3 : two-dimensional positioning with three satellites
 2 D 2 : two-dimensional positioning with two satellites
 Correction (G₀): correction value for (Table 3+Table 4)
 Correction (G₁): correction value for (Table 3+Table 1)

ま と め

陸上定点でGPSとロランCの同時測定を行い、それぞれの測位精度と同時にGPS位置を基準としたロランC位置の相対誤差を求めた。

その結果、GPSの測位誤差は3Dで50~140m、2D3で70~170mであり、これまでの測位結果とほぼ同程度であった。従って、測定期間中のGPS衛星には異常はなく、航走中の解析に使用出来るものと判断した。

ロランCでは、測定データの約50%がスリップ状態であった。これは陸上での測定であった事と手動による修正を全く行わなかったためであり、ロランC局の異常ではなかった。スリップ状態のデータを除いた場合の測位誤差は、ほぼ南方に600m程度で、その標準偏差は30m未満であった。

GPS位置を基準にしてロランC位置の相対誤差を求めると、3Dと2D3では、ロランCの実測位置と30~60m程度の差で求められるが、2D2では0.1~0.2海里の差が生じた。また定点測定でのGPS位置の偏位量を修正して相対誤差を求めれば、2D2のMレベル以外では、ロランCの実測位置とほぼ

10~40mの差で一致した。従って、相対誤差をより正確に求めるには、2D3のMレベルまでを使用することが望ましい。また相対誤差に最寄りの陸上定点での測定により求めたGPSの偏位量を補正する事により、ほぼ正確なロランCの偏位量が得られる。

参 考 文 献

- 1) 合田政次 他2名(1989): GPSの定点における測位精度, 日本航海学会誌 航海, 102, 27-33
- 2) 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
- 3) 木村小一(1986): 船の科学, 5, 87-91, 東京, 船舶技術協会
- 4) 木村小一(1987): 一周波数受信のGPS測位に対する電離層伝搬遅延の影響, 日本航海論集, 76, 77-85
- 5) 吉村浩 他2名(1982): ロランCシステムの評価-II, 南西太平洋における漂泊中の相対誤差について, 本誌, 53, 19-25
- 6) 合田政次 他2名(1982): ロランCシステムの評価-III, 日本海沿岸海域における9970チェーンの航走中の精度, 本誌, 53, 27-32