

## 正 誤 表

P109 Table 1-3	Static position method → Static positioning method
P118 Table 3-3	Regresion coefficient of distrbution → Regression coefficient of distribution
P145 最下行	2 C測位よりも 3 C測位のほうが → 2 D測位よりも 3 D測位のほうが
P148 最下行	今回の 3 C測位による → 今回の 3 D測位による
P161 上11行	errorn → error
上14行	discribed → described
上17行	correhctions → corrections
	usedas → used as

# 経緯度レベルのディファレンシャルGPS測位に関する研究

本村紘治郎\*<sup>1</sup>

## Studies on Differential GPS of Correcting Latiudinal-and-Longitudinal Errors

Kojiro Motomura\*<sup>1</sup>

### 目 次

第1章 序論 .....	105
1.1 はじめに .....	105
1.2 GPSの概要 .....	105
1.2.1 GPSの測位原理 .....	105
1.2.2 誤差とDOP値 .....	106
1.2.3 誤差とDGPS .....	109
1.3 本研究の内容 .....	110
1.4 GPSに関する従来の研究など .....	110
第2章 衛星が少ない場合の測位実態 .....	111
2.1 はじめに .....	111
2.2 装置と方法 .....	111
2.3 結果と考察 .....	111
2.3.1 測位可能な時間と衛星の配置 .....	111
2.3.2 位置誤差の水平分布 .....	113
2.3.3 放射方向誤差の相対累積度数 .....	113
2.3.4 DOP値の相対度数分布と時系列変化 .....	114
2.4 まとめ .....	115
第3章 衛星の配置と位置誤差の分布 .....	116
3.1 はじめに .....	116
3.2 装置と方法 .....	116
3.3 結果と考察 .....	116
3.3.1 衛星の組み合わせによる測位精度とPRN-08の影響 .....	116
3.3.2 衛星の組み合わせと位置誤差の分布 .....	118
3.3.3 衛星の配置と位置誤差の分布 .....	119

水産大学校研究業績 第1555号, 1996年8月12日受付

Contribution from National Fisheries University No. 1555, Received Aug. 12, 1996.

\*<sup>1</sup> 水産大学校漁業学科航海学講座 (Laboratory of Navigation, Department of Fishery Science and Technology, National Fisheries University)

3.3.4	平滑化の効果	120
3.4	まとめ	123
<b>第4章</b>	<b>単独測位に現れたSAの影響</b>	<b>124</b>
4.1	はじめに	124
4.2	装置と方法	124
4.3	結果と考察	124
4.3.1	測位可能な時間	124
4.3.2	DOP値の分布	126
4.3.3	位置誤差の分布	127
4.3.4	速度誤差の分布	129
4.3.5	位置誤差, 速度誤差, 衛星の組み合わせ, DOP値の時系列変化	130
4.3.6	速度ベクトル情報の利用	132
4.4	まとめ	133
<b>第5章</b>	<b>経緯度レベルのDGPS測位の基礎的検討</b>	<b>134</b>
5.1	はじめに	134
5.2	装置と方法	134
5.3	結果と考察	135
5.3.1	移動局の位置誤差	135
5.3.2	補正効果の時系列的検討	139
5.3.3	衛星の組み合わせが異なる場合の補正結果	139
5.4	まとめ	141
<b>第6章</b>	<b>経緯度レベルのDGPS測位の漁場探査への応用</b>	<b>142</b>
6.1	はじめに	142
6.2	装置と方法	142
6.2.1	測位装置と測位方法	142
6.2.2	データの処理	144
6.3	結果と考察	145
6.3.1	移動局の位置誤差	145
6.3.2	補正効果の時系列的検討	146
6.3.3	レーザ測位とDGPS測位の測得率	148
6.3.4	DGPS測位の漁場探査における有効性について	149
6.4	まとめ	150
<b>第7章</b>	<b>経緯度レベルのDGPS測位の実用有効範囲</b>	<b>151</b>
7.1	はじめに	151
7.2	装置と方法	151
7.2.1	測位装置と測位方法	151
7.2.2	データの処理	153
7.3	結果と考察	154
7.3.1	高松港および神戸港停泊中のDGPS測位の結果	154
7.3.2	高松港出港中のDGPS測位の結果	155
7.3.3	沿岸航海中の方位距離による実測位置との比較	156
7.4	まとめ	158
<b>第8章</b>	<b>総括</b>	<b>159</b>
Summary		161
謝 辞		162
引用文献		162

## 第1章 序論

### 1.1 はじめに

古来より、水辺に定着した人々は、魚介類の採取や他の地方との交易のために船を利用した。船がある地を出発して次の目的地に至るには、位置と方向は常に必要な要素である。船から陸地を視認できる海域なら、位置と方向は容易に得られる。船がまだ小型の時代には、人々は陸地を視界内に保ちながら、あるいは島づたいに航海を続けた。このような沿岸航海の時代には、航海技術はあまり進歩しない<sup>1)</sup>。

航海技術の科学的な発展は、14世紀末に始まるヨーロッパのルネッサンス時代からである。以後、自然天体を利用した天文航法により、多くの航海者達が活躍した。しかし、画期的な航海技術の発達、近代の無線工学が生み出した電波測位システムや人工衛星を利用した測位システムの開発による<sup>2)</sup>。

1957年10月4日、史上初めての人工衛星スプートニク1号が旧ソビエト連邦により打ち上げられて以来、科学衛星や通信、気象、航行、測量、地球観測などに利用される実用衛星が数多く地球のまわりを周回している。人工衛星を利用した測位システムには、米国のNNSS(Navy Navigation Satellite System)、GPS(Global Positioning System)、そして、ロシアのGLONASS(Global Navigation Satellite System)がある。人工衛星を利用する測位方法は自然天体による方法に比べると、天候に左右されず、かつ地球上のどこでも測位に利用できる<sup>3)</sup>ので、NNSSやGPSは急速に普及した。

NNSSには、衛星の飛来時しか測位できないことや航空機のような高速移動体では利用できないことなどの短所があるが、GPSではNNSSの短所を改良して、全時間、全天候、全地球的に、高精度の位置測定が可能となった。さらに、高度や速度ベクトルも測定できるため、わが国では、1984年頃から利用されている。

しかし、高精度測位システムであっても、GPSの単独測位で得られた位置には、衛星に内蔵された時計の誤差、衛星の位置の誤差、電離層や対流圏を電波が伝搬するときの遅延誤差、受信機内部の誤差、マルチパス誤差などが含まれ、受信時のDOP(Dilution of Precision: 精度劣化係数)値が1.5のとき、位置誤差の2drms(Distance Root Mean Squareの2倍、95%確率誤差円の半径を表す)は約40mになる<sup>3)</sup>。さらに、米国が操作するSA(Selective Availability: 選択利用性)の人為的な誤差が加わり、位置誤差の2drms

は総合的に約90~100mに劣化する<sup>3)-5)</sup>。

以上の誤差を補正する有効な一つの手段は、既知の固定点(基地局)で観測された測定値を利用して、利用者(移動局)の位置の精度を高めるディファレンシャルGPS(Differential GPS: 以後、DGPSという)で、わが国でも疑似距離補正による本格的なDGPSのシステム化が検討されている。

このDGPSのシステムを利用するには、補正情報を受け取るための専用受信機が必要であるが、わが国の20t未満の沿岸小型漁船や小型の船舶では、装備の必要性や経済的な理由などから、DGPSのシステム完成後も引き続き、従来の単独測位が多く行われるであろうと考えられる。

このような沿岸小型漁船が偶然ある場所で好漁し、未確認であった天然礁の位置をGPSの単独測位で測定したとする。あるいは、沈船など船舶航行の障害物を発見し、GPSの単独測位でその位置を得たとする。漁業に関連の深い天然礁や船舶の航行を阻害する障害物の確認とその位置の高精度測定は、本格的なDGPS装置を搭載した調査船や関係機関の船舶で再度行われるであろう。しかし、その確認作業をできるだけ効率よく行うには、事前に資料として与えられる天然礁や沈船の単独測位による位置の誤差を何らかの方法で低減しておく必要がある。

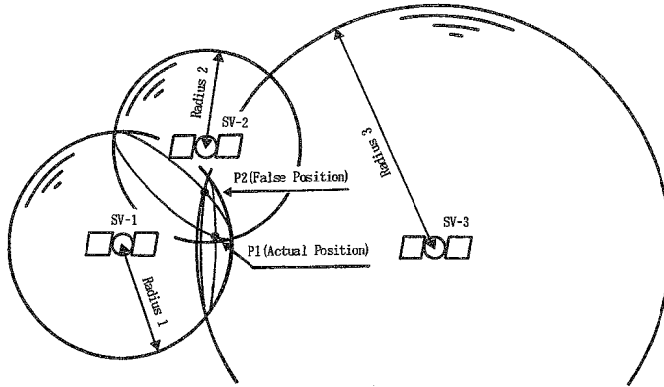
単独測位で既に得られた位置の精度を高める場合、基地局の測定値より求めた経緯度レベルの補正値を使って、位置誤差をオフラインで処理する位置補正方式のDGPS測位、すなわち、経緯度レベルのDGPS測位が有効である。この手法のDGPS測位は、他の手法のDGPS測位に比べて測位精度が劣ること、リアルタイムの補正を行っていくことなどのため、これまでほとんど論じられていないが、DGPS仕様でない受信機で測定された位置の誤差を低減できる。そこで本研究では、数多くの測定値に基づき、DGPS位置の測位精度と測得率の両面から経緯度レベルのDGPS測位について検討し、その実用有効性を明らかにした。

なお、本論文では、GPSとはシステムの一般的な呼称を意味することとし、GPS測位、GPS位置、GPS誤差とは、すべて単独受信機を用いた測位またはその結果を意味することにする。

## 1.2 GPSの概要

### 1.2.1 GPSの測位原理

GPSの位置測定方法は、1点測位法と干渉測位法がある<sup>6)</sup>。1点測位法は1観測点の測定データを利用して位置を求める方法であり、干渉測位法は2以上の観測点の相対的

Fig. 1-1 Concept of GPS positioning.<sup>4)</sup>

な位置関係を求めるものである。一般的な船位決定には、1点測位法が使用されるので、ここでは1点測位法について述べる。

Fig. 1-1にGPS測位の概念図を示す<sup>6)</sup>。電波が衛星から発射された時刻と、その電波を観測者の受信機で受信した時刻がわかれば、衛星と受信地点との距離を知ることができる。しかし、受信機の時計が衛星の時計に対して正確に同期していないことや、電離層や大気圏などを電波が通過する際の伝搬遅延のため、測定された距離は絶対距離にはならない。そのため、この距離を疑似距離と呼んでいる<sup>6) 7)</sup>。

衛星の位置は衛星から送られてくる軌道情報でわかるから、観測者は衛星を中心として、その衛星からの疑似距離を半径とする球面、すなわち位置の面のどこかにいることになる。同様にして、もう1つの衛星を中心として位置の球面を得る。2つの球面が交わった部分は円となり、観測者はこの円周のどこかにいる。この円周と、3個目の衛星により求めた球面は2点で交わるから、観測者の位置はこの2点のうちのどちらかである<sup>6) 7)</sup>。

GPS衛星は、常にアンテナを地球に向けて電波を発射するように姿勢を制御しながら、地球の表面から約20,187km上空の円軌道を周回している<sup>7)</sup>。したがって、2点のうちの一方は、衛星からの電波が受信できない場所になることと推測位置から遠いことのため、観測者の位置がどちらであるかは容易に判別できる<sup>6) 8)</sup>。

以上がGPSの測位原理で、3個の衛星で緯度、経度、高度を測定する三次元測位(以後、3D測位という)ができることになる。二次元測位(以後、2D測位という)の場合は、3番めの位置の球面を地球表面と考えるので、2個の衛星で緯度と経度が求められる。

しかし、実際には以下の理由で、3D測位では4個の衛星が、また、2D測位では3個の衛星が必要である。

受信機に使用されている時計は、衛星に使われている原子時計と同じものではなく水晶発信器であるから、両者は完全には同期していない。その結果、衛星と観測地点の距離に誤差を生じることになる。この問題を解決するためには、測位に利用する衛星をさらにもう1個増やして、時計の誤差を取り除く計算を受信機で行わなければならない。3D測位では、緯度、経度、高度のほかに時計の誤差が未知数となるから4個の衛星が、また、2D測位では、緯度、経度と時計の誤差であるから3個の衛星が必要になる<sup>6) 7) 9)</sup>。

### 1.2.2 誤差とDOP値

GPS位置に介入する自然的な誤差の要因は、

- (1)大気中あるいは電離層を通過するときの電波の伝搬速度の誤差、マルチパスなどにより衛星と観測者間の測定距離に誤差が介入すること
- (2)衛星から送られてくる軌道情報の位置と衛星の絶対位置が異なるため、位置の面の中心となる衛星の位置が正確でないこと

である<sup>4)</sup>。

これらの誤差を含む位置の面の交角の大小が、GPSの位置誤差に影響を与える。すなわち、同一の測距誤差や軌道誤差があっても、観測点上空の衛星の配置により、位置誤差の大きさは異なってくる。このことは、沿岸航行中の交叉方位法や、大洋航海において自然天体の同時観測により位置を決定する場合に、観測された地物あるいは天体の位置の線の交角の大小が実測位置の誤差に大きく影響することと同じである。

Table 1-1. GPS absolute error budget<sup>9)</sup>

Source		Error Budget (m, ft)
Space Segment	Clock Error	3,0m ( 10ft)
Control Segment	Ephemeris Error	2,7m ( 9ft)
Selective Availability (SA)		27,0m ( 90ft)
Atmospheric Effects	Ionospheric Delay	8,2m ( 27ft)
	Tropospheric Delay	1,8m ( 6ft)
User Segment	Receiver Noise	9,1m ( 30ft)
	Multipath	3,0m ( 10ft)
User Equivalent Range Error (UERE)		30,5m (100ft)
Navigation Accuracy, 2drms (DOP=1,5)		91,4m (300ft)

GPSの誤差には上記のような自然的なものだけでなく、SAによる人為的な誤差がある。SAとはSelective Availabilityの略で、わが国では選択利用性と訳されている。米国は国防上の理由で、GPS衛星の原子時計の周波数を変化させたり、不正確な軌道情報を観測者に送信させたりしてSAを実施している<sup>9) 10)</sup>。その結果、正確でない衛星位置と正確でない測距で求められた位置の面には誤差が含まれ、GPS位置の誤差となる。SAによる精度劣化は、後述するCEPで40m、2 drmsで100m前後に計画されている<sup>9) 9) 11) 12)</sup>。

GPSの絶対誤差の見積もり量<sup>9)</sup>をTable1-1に示す。このうち、User Equivalent Ranging Error(利用者等価測距誤差：以後、UEREという)は各項目の誤差の二乗和の平方根(Root Sum Square：以後、RSSという)のことで、測距誤差をD<sub>i</sub>とすると、UEREは次式で求められる。

$$UERE = \sqrt{\sum D_i^2} \dots\dots\dots (1.1)$$

一般に、GPSの測位精度は誤差を統計的に処理して評価される。精度評価には、おもに次の用語が用いられる<sup>9) 7)</sup>。

本研究では、2drmsとσを下記のように区別した。

- (1)CEP : Circular Error Probableの略で、50%確率誤差円の半径を表す。
- (2)SEP : Spherical Error Probableの略で、50%確率誤差球の半径を表す。
- (3)2 drms : Distance Root Mean Square (放射方向誤差の二乗平均の平方根) の2倍の値で、95%確率誤差円または球の半径を表す。経度方向誤差を X<sub>i</sub>、緯度方向誤差を Y<sub>i</sub>、データの数を N とすると、2 drms は次式で求められる。

$$2\ drms = 2 \sqrt{\frac{\sum (X_i^2 + Y_i^2)}{N}} \dots\dots\dots (1.2)$$

また、2 drms と CEP には次のような関係がある<sup>9)</sup>。

$$2\ drms = 2.5 \times CEP \dots\dots\dots (1.3)$$

- (4)σ : Standard Deviation (標準偏差) で平均位置まわりの分散を意味する。X<sub>i</sub>の平均を  $\bar{X}$ 、Y<sub>i</sub>

Table 1-2. The Concepts of DOP (Dilution of Precision)<sup>7) 16)</sup>

Kind of DOP	Concept
GDOP	Geometric of DOP
PDOP	DOP in Position in Three Dimensions
HDOP	DOP in Position in Two Horizontal Dimensions
VDOP	DOP in the Vertical Dimensions
TDOP	DOP in Time

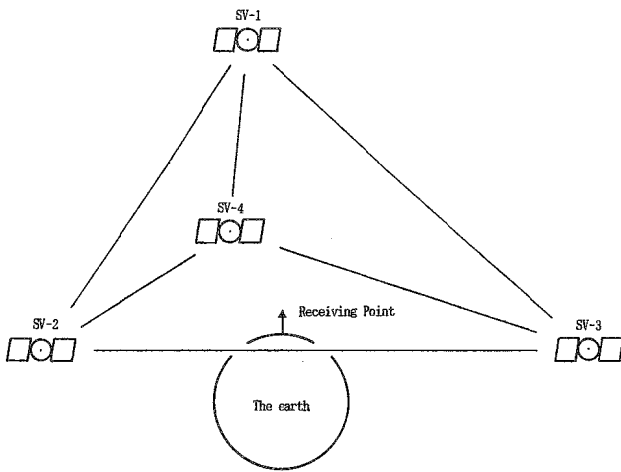


Fig. 1-2 GPS satellites arrangement with a low DOP value.<sup>15)</sup>

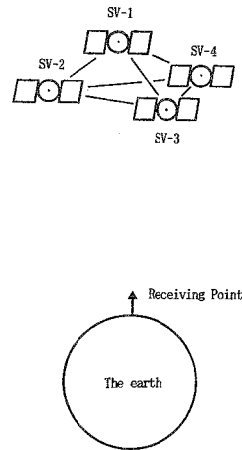


Fig. 1-3 GPS satellites arrangement with a High DOP value.<sup>15)</sup>

の平均を $\bar{Y}$ とすると、 $\sigma$ は次式で求められる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \{(X_i - \bar{X})^2 + (Y_i - \bar{Y})^2\}}{N}} \quad (1.4)$$

GPSの測位精度の表示は受信機メーカーにより異なるが<sup>13) 14)</sup>, DOP値が2.5以下のとき, SA解除時の2 drmsは約30m<sup>13) 14)</sup>, SA実施時の2 drmsは約100m<sup>15)</sup>と表示されたものが多い。

次に, DOP値について述べる。DOPとはDilution of Precisionの意味で, わが国では精度劣化係数と訳されている。すなわち, DOP値は50%確率誤差円の半径(CEP)がUEREの何倍になるかを示す係数で<sup>4)-6)</sup>, CEPとDOP値およびUEREの関係は次式のようになる。

$$CEP = DOP \times UERE \dots\dots\dots (1.5)$$

したがって, DOP値が小さいほど, 位置の精度は高くなるが, DOP値そのものが誤差の量を直接表すものではない。

DOP値の概念と種類をTable 1-2に示す<sup>7) 16)</sup>。このうちPDOP(Position Dilution of Precision)値は3D測位の場合に用いられ, 測位に利用されている4個の衛星を結んでできる4面体の形状を意味すると考えてよい。また, HDOP(Horizontal Dilution of Precision)値は2D測位の場合で, 3個の衛星と地球の中心を結んでできる4面体の形状を意味することになる。もし, 4衛星のすべてが同一平面上にあるか, または3衛星と地球の中心が同一平面上にあるなら, 有限体積の立体を構成することは不可能であるか

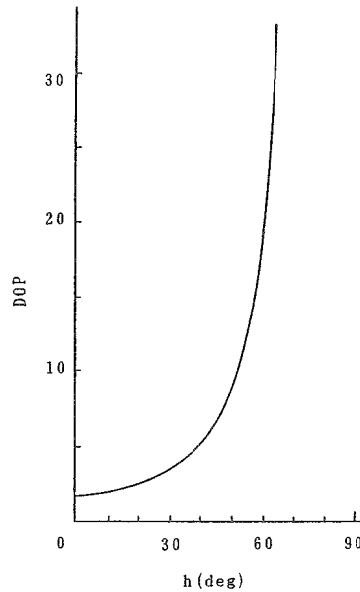
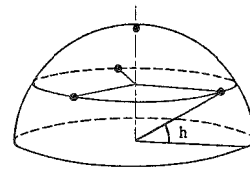


Fig. 1-4 Relation between the height (h degree) of three satellites and DOP.<sup>4)</sup>

ら位置計算を行えない。

測位に利用される衛星の配置とDOP値との関係を、3D測位の場合についてFig. 1-2およびFig. 1-3に示す<sup>10)</sup>。Fig. 1-2はDOP値が小さいときで、4衛星で形造られる4面体の体積が大きいほどDOP値は小さくなる。また、Fig. 1-3に示すように、4衛星が集まってくるとDOP値は大きくなる。DOP値が小さいほど位置の精度はよくなる。より小さなDOP値を得るためには、より体積の大きな4面体を4個の衛星で形造る必要がある。このことは、交叉方位法や天体の同時観測による位置決定の場合に、観測点から望む地物あるいは天体の相対的な配置が、実測位置の誤差に大きく影響することと同じである。

今、一例として、3D測位の衛星の配置とDOP値について述べる。天頂に1個の衛星があり、他の3個の衛星が同じ高度(h)圏上で、相対的な方位各を120°ずつ隔てて存在しているとす。その場合、3衛星の高度に対して、DOP値がどのように変化するかをFig. 1-4に示す<sup>9)</sup>。同図から、観測者の天頂に1衛星があり、他の3衛星はできるだけ高

度が低いことが、DOP値を小さくする条件となる。しかし、衛星からの電波が、大気圏や電離層を通過する距離が長くなるほど測距誤差が増大するため、低高度の衛星位置が必ずしも好都合とはならない。

1.2.3 誤差とDGPS

前節で述べたGPS位置の誤差で、利用者に最も大きく影響するのはSAによる誤差である。

SAによる誤差は、一般に2 drmsで100m前後といわれているが<sup>9) 9)-12)</sup>、定誤差ではないから定量的に取り除くことはできない。GPSの誤差を低減して、測位精度を高めるDGPS<sup>4) 17) 18)</sup>は、既知の固定点で観測されたGPSの測定誤差を用いて、同じ地域の利用者の測定値を補正し、GPSの位置精度を改善する技術で、SAの影響を受けた位置の精度を効果的に高めることができる。通常、既知固定点あるいはそこに装備された受信設備を基地局または基準局と呼び、利用者の受信機またはその設備を移動局と呼んでいる。

DGPSの種類をTable 1-3に示す<sup>19)</sup>。トランスロケーショ

Table 1-3. Type of DGPS<sup>19)</sup>

Translocation method	Position correction method Pseudo range correction method
Interferometric method	Static position method Kinematic positioning method

Table 1-4. DGPS error budget<sup>9)</sup>

Source		Range (mile)		
		0	100	500
Space Segment	Clock Error	0.0m (0.0ft)	0.0m (0.0ft)	0.0m (0.0ft)
Control Segment	Ephemeris Error	0.0m (0.0ft)	0.1m (0.3ft)	0.5m (1.5ft)
Selective Availability (SA)		0.0m (0.0ft)	0.0m (0.0ft)	0.0m (0.0ft)
Atmospheric Effects	Ionospheric	0.0m (0.0ft)	2.2m (7.2ft)	4.9m (16.0ft)
	Tropospheric	0.0m (0.0ft)	1.8m (6.0ft)	1.8m (6.0ft)
User Segment	Receiver Noise	0.9m (3.0ft)	0.9m (3.0ft)	0.9m (3.0ft)
	Multipath	0.0m (0.0ft)	0.0m (0.0ft)	0.0m (0.0ft)
URE (RMS)		0.9m (3.0ft)	3.0m (9.8ft)	5.3m (17.4ft)
Navigation Accuracy, 2drms (DOP=1, 5)		2.7m (9.0ft)	9.1m (30.0ft)	15.8m (52.0ft)



ン方式のうち、位置補正方式は基地局で観測された経緯度の誤差を用いて、移動局のGPS位置を補正する方法である。また、擬似距離補正方式は、基地局の緯度、経度およびジオイド高と軌道情報より、基地局と衛星間のほぼ正確な距離を計算で求め、観測された擬似距離との差を補正值として、移動局で得られた擬似距離を補正し、GPS位置の精度を高める方法である。船舶などの移動体の位置測定に利用されるのは、擬似距離補正方式である。

擬似距離補正方式によるDGPSの誤差の見積もり量をTable 1-4に示す<sup>3)</sup>。

### 1.3 本研究の内容

本研究では、単独測位の実態を明らかにするとともに、DGPS位置の精度と測得率の両面から、経緯度レベルのDGPS測位の実用有効性を明らかにすることを目的とした。

以下に、本論文の第2章から第8章までの概要を述べる。

第2章および第3章では、わが国でGPSが利用され始めた頃に行った測位実験の結果をもとに、衛星が少ない場合の測位可能な時間や位置誤差の水平分布、位置誤差の相対累積度数、DOP値の相対度数分布やDOP値の変化について明らかにした。また、観測点上空の衛星の幾何学的配置による位置誤差の分布特性についても明らかにした。

第4章では、過渡期において発生したSAの影響について、SAが解除されているときと実施されているときの測位結果を比較し、DOP値、位置誤差、速度誤差、およびその時系列的な変動などについて述べた。

以上のGPSの単独測位の実態を踏まえて、次に経緯度レベルのDGPS測位について検討した。

第5章では、二定点における単独測位の結果をもとに、一方の定点で得られた経緯度の誤差を補正值として、他方の定点の位置の精度を高める基礎的なDGPSの検討を行った。そして、この実験で得られた結果を基準として、第6章および第7章で、本手法のDGPS測位の実用性を評価した。

第6章では、第5章で述べたDGPS測位を沿岸魚礁域の漁場探査に応用し、その実用的な有効性について、精度と測得率の両面からレーザ測位と比較して論じた。

第7章では、港内で実施した経緯度レベルのDGPS測位の結果をもとに、基地局の有効カバーレッジエリアについて論ずるとともに、狭水道航行中、ジャイロコンパスとレーダにより測定された実測位置の精度についても検討した。

第8章は、全体の総括である。

### 1.4 GPSに関する従来の研究など

GPSはわが国で実用化される前から強い関心を持たれていたため、GPSに関する研究報告や文献は多い。それらを内容別に分類して整理すると、

- (1)測地系に関する文献
- (2)理論的な計算やシミュレーションに関する研究など
- (3)測位誤差や精度評価に関する研究など
- (4)SAの影響に関する研究など
- (5)DGPSに関する研究など
- (6)各分野への応用に関する研究など

が上げられる。

(1)については、衛星測地系と従来測地系に関するものである。GPSの開発当初にはWGS-72が採用されていたが、1987年1月10日からWGS-84が採用されているため、WGS測地系の理論や、WGS測地系から日本測地系に変換する方法について紹介されている<sup>20)~23)</sup>。

(2)については、わが国でGPSが普及される前からいくつかがみられ、利用者にとって事前の有益な資料であった<sup>24)~28)</sup>。

(3)については、実務に関わる分野からの報告が多く、測位データをもとに、主として位置精度評価やDOP値について述べられている<sup>29)~37)</sup>。事前に報告された理論的な計算やシミュレーションによる報告とは別に、単独測位の実態を解析している。

(4)については、定点観測の結果を解析したものが多く、SAの影響を受けたときの測位誤差分布、放射方向誤差の相対度数分布、DOP値の相対度数分布など過渡期のGPSの実態が述べられている<sup>10) 12) 38)~41)</sup>。

(5)については、定点におけるDGPS測位や移動体のDGPS測位による位置精度について検討し、有効性を評価したものが多<sup>3) 9) 17) 42)~49)</sup>。

(6)については、GPSやDGPSを各分野において、種々応用した結果についての報告<sup>19) 50)~72)</sup>で、いずれもGPSまたはDGPS利用の有効性を評価している。

DGPSに関する従来研究は、擬似距離補正法に関するものが多く、経緯度の誤差を低減する位置補正法のDGPS測位についてはほとんど論じられていない。そこで、経緯度レベルの誤差をオフラインで低減するDGPS測位について詳細に検討した<sup>73)~75)</sup>。DGPS仕様でない単独のGPS受信機で既に位置を得た場合、本研究の手法により後処理で精度が高められた位置は貴重な情報となる。

## 第2章 衛星が少ない場合の測位実態

### 2.1 はじめに

単独測位用の受信機でDGPS測位を行うには、単独測位の実態を全般的に把握しておく必要がある。

前章で述べたように、SAが実施されていないとき、GPSの誤差の要因は衛星に内蔵された時計の誤差、衛星の位置の誤差、電離層や対流圏中の電波伝搬遅延誤差、受信機の内部誤差、マルチパス誤差などで、単独測位で得られた位置には上記の誤差が総合されて現れる。この位置誤差の大きさはDOP値と密接な関連がある。また、衛星の数が少ない場合には、測位可能な時間が十分でない。

本章では、上記のような単独測位の実態を把握するため、わが国でGPSが普及し始めた頃の測位実験の結果をもとに、まず、衛星が少ない場合の測位実態について検討した。

### 2.2 装置と方法

実験に用いたGPS受信機は、水産大学校練習船天鷹丸(877国際総トン)に装備された1チャンネル高速シーケンシャル受信方式の受信機(日本無線、JLR-4000)である。

昭和62年7月4日から9月8日までの間、天鷹丸の運航計画にあわせて、下関市岬の町岸壁に係留中、適宜測位実験を行った。

本受信機には、DOPレベル機能、測位計算モード選択機能、衛星保持機能などのほか、各種の機能が組み込まれ、利用者は必要に応じて、適当なモードを選択できる<sup>76)</sup>。

測位可能な時間や測位精度に影響を与えるDOPレベル機能では、DOP値5以下、同10以下、同20以下および同99以下の4階級が設けられ、どれか1つを選択できる。この機能により、いずれかのDOPレベルを選択すると、DOP値が指定された範囲のとき、受信機は設定されたモードで測位計算を行う。測位中できるだけ多くのデータを得るために、おもにDOP値99以下の条件で、2D測位、または3D測位と2D測位の自動切り換え方式(以後、3D/2D測位という)を行った。

測位計算モードでは航法測位モードを、また、衛星保持機能では最適配置の衛星で測位計算がおこなわれるよう最適衛星選択モードを選択した。そのほか、平滑化機能では平滑化なし、平滑化時定数10秒、同30秒のいずれかを、適宜選択した。

受信機から5秒おきに出力されるデータを、RS232Cを

介してパーソナルコンピュータに取り込み、フロッピーディスクに記録した。また、受信機に表示された衛星の方位角と仰角を、5分間隔で読み取り野帳に記録した。

GPSの測位精度を評価するための基準となる位置(以後、評価基準位置という)として、15000分の1の海図から読み取ったGPSアンテナの位置を用いた。この場合には読み取り誤差(0.1mmにつき1.5m)が介入するが、総合的に考えてこの誤差は2m以下と判断されたので無視した。天鷹丸のアンテナ高さは海面上17mで、同船に係留していた専用岸壁の周囲には、仰角5°以上の衛星からの電波を妨げる受信障害物は存在しなかった。

GPSの測地系には、1987年1月10日以後、WGS-84が用いられている<sup>77)</sup>。本章では平滑化されていないGPS位置をWGS-84測地系から日本測地系に変換し、評価基準位置との差をGPS位置の誤差として解析した。

### 2.3 結果と考察

#### 2.3.1 測位可能な時間と衛星の配置

24時間の観測中、衛星が測位に利用された様子をFig. 2-1に示す。この測位実験を行った時期に運用されていた衛星は、PRN-03、06、08、09、11、12および13の7個であったが、PRN-09は8月中旬まで受信できなかったため、今回、おもに利用できたのは6個の衛星であった。

また、PRN-08では原子時計が故障して水晶発振器が作動していたため、PRN-08を測位計算に用いた場合、位置誤差が大きくなるといわれていた<sup>78)</sup>。しかし、Fig. 2-1に示すように、PRN-08を利用しないなら、測位可能な時間が1日につき約3時間も少なくなり、実務上好ましくない。そこで、GPSの有効な利用を図るため、PRN-08が利用された場合の測位精度についても検討した。これについては次章で詳しく述べることにする。

1日のうちの測位可能な時間と、暦日の経過にともなって測位開始時刻がずれていく様子をFig. 2-2に示す。同図には、1例として8月10日から16日までの1週間のデータを示した。8月14日、DOPレベルの設定をDOP値5以下からDOP値99以下に変更したため、14日以後、測位可能な時間が長くなった。

Fig. 2-2に示すように、1日のうちの測位可能な時間は、DOP値5以下のとき約1時間30分の測位が2回と約30分の測位が1回で、合計3時間30分であった。また、DOP値99以下のときは、概ね約10時間の測位、約5時間のブランク、

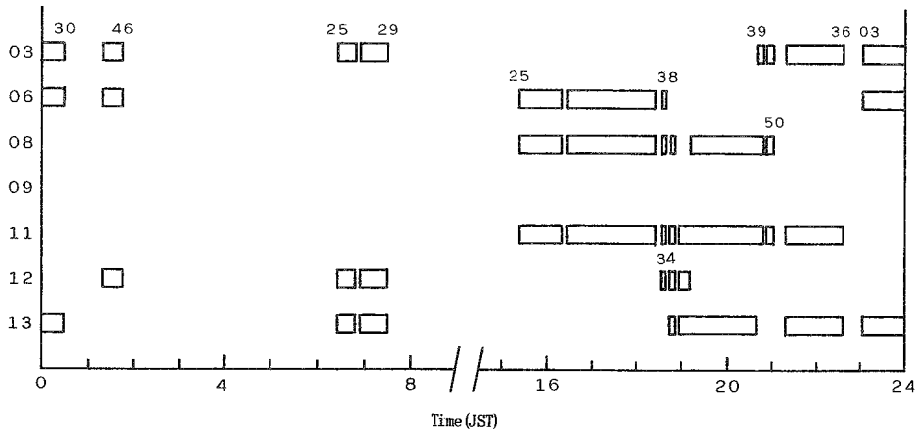


Fig. 2-1 Satellites used for positioning.

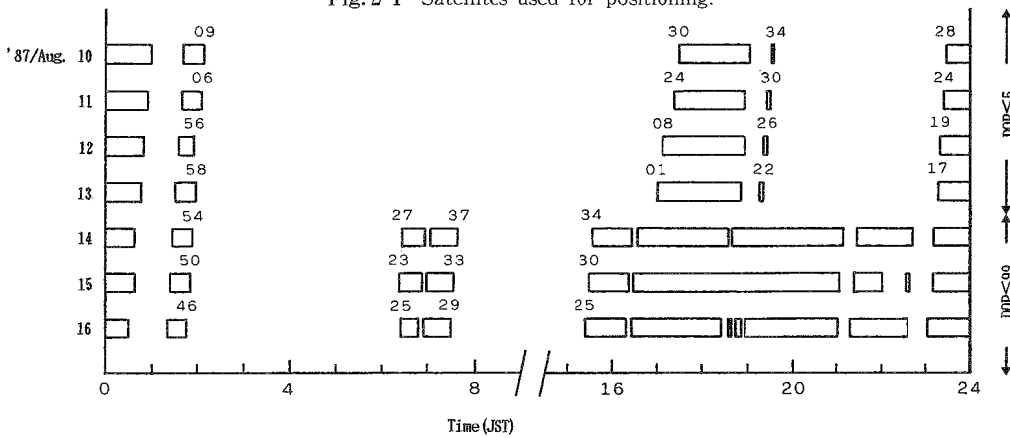


Fig. 2-2 Positionable period time.

次に約1時間の測位, 約8時間のブランクで, 合計約11時間であった。運用中の衛星の数が少ないため, 受信時のDOP値の範囲が99以下であっても, 1日のうちの測位可能な時間は約半日程度であった。

測位開始時刻は1日につき約4分ずつ早くなっている。衛星の公転周期は半恒星日で, ある衛星が受信点の上空に現れてから23時間56分4秒を経過すると再び同じ衛星が飛来する。この測位開始時刻のずれについては, 他の報告<sup>24)</sup>にも述べられているが, 本研究においても同様となった。

観測点上空の衛星の軌跡をFig. 2-3に示す。#を付した数字は衛星のPRN番号である。同図は, 受信点から見た衛星の方位角と仰角をもとに作成された。同図中, ●は1時間ごとの衛星の位置を示し, その近くに記入された数字は日本標準時である。同図より, 衛星の概略の配置を知ることができる。

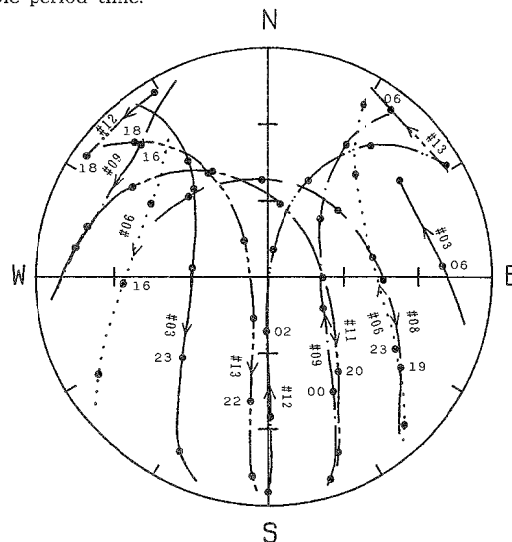


Fig. 2-3 Tracks of GPS Satellites.

Table 2-1. Mean, 2 drms and  $\sigma$  of position error  
 3 D [PRN-06・08・11・12]  
 2 D [PRN-03・06・12, PRN-03・06・13, PRN-06・08・11, PRN-06・11・13]

	DOP	Number of data	Mean error(m)		2 drms(m)	$\sigma$ (m)	Range(m)	
			North	East			Latitudinal	Longitudinal
3 D	1~ 5	572	+ 11.5	+ 28.4	133.2	59.2	218.5	373.9
	6~10	187	+ 27.7	- 48.4	247.0	110.1	184.8	635.9
	11~20	368	+ 41.1	+158.9	681.8	298.8	1488.1	920.0
	21~99	254	+122.8	+ 61.0	1555.2	765.4	4627.1	2539.6
2 D	1~ 5	6984	+ 0.5	+ 36.4	170.0	76.9	403.0	475.4
	6~10	2894	- 56.7	- 4.7	447.6	216.4	1220.7	909.4
	11~20	3926	- 55.2	+ 28.7	598.8	292.8	1689.6	1802.0
	21~99	2977	-214.4	-237.0	1788.8	835.4	5808.3	6525.5

3 D : Three Dimensional Positioning  
 2 D : Two Dimensional Positioning

2.3.2 位置誤差の水平分布

測位データから得られた位置誤差を統計的に処理し、その結果をTable 2-1に示す。3D測位では48時間観測のデータ、2D測位では下関に停泊中得られた全データである。いずれも平滑化をしていない。受信機のDOPレベル機能に基づき整理した。

利用できた衛星が少なかったため、得られたデータ数は必ずしも十分ではないが、平均位置誤差が小さいと2 drmsや $\sigma$ も小さく、当然、DOP値が小さいほど測位精度はよい。そして、2D測位よりも3D測位の場合の方が位置誤差の分布範囲が狭い傾向にある。

DOP値5以下のときの2 drms(3D測位では133.2m、2D測位では170.0m)は、取扱説明書<sup>6)</sup>に記載された値(DOP値5以下に換算して100m)より大きくなった。この頃は、C/AコードのUEREが6.7mと見積もられていた<sup>4)</sup>ので、このUEREで計算された測位精度と取扱説明書の測位精度は概ね同程度になる。しかし、これより新しい文献<sup>3)</sup>によれば、SAが実施されていないときのUEREは13.4mで、この値で計算された2 drmsとTable 2-1に示された2D測位による実験結果の2 drmsとの差は小さい。

Table 2-1のデータは衛星が6個のときのもので、DOP値5以下のデータは3D測位では全体の41.1%、2D測位では41.6%である。したがって、3D測位で得られた位置の約40%が約130m以下の精度に、また、2D測位では同じ割合で

約170m以下の精度になると考えられる。

各DOPレベルの平均位置誤差はそれぞれ異なった値を示しているため、衛星の数が少ない場合には、平均位置が絶対位置に近い位置にはならないと考えられる。

2.3.3 放射方向誤差の相対累積度数

測位精度を検討する場合には、位置誤差の水平分布だけでなく、アンテナからどれくらいの距離の範囲にどれくらいの数の位置の分布があるかも知る必要がある。そこで、24時間の観測データをもとに、DOP値5以下のときの放射方向誤差を1mごとにきざみ、その相対累積度数を調べた。その結果をFig. 2-4に示す。

同図に示されているように、3D測位の場合、得られた位置の50%がアンテナから29.3m以下の範囲に、また、95%がアンテナから70.0m以下の範囲に分布し、最も遠い位置はアンテナから123.6m離れていた。一方、2D測位では、得られた位置の50%がアンテナから46.2m以下の範囲に、また、95%がアンテナから112.4m以下の範囲に分布し、最も遠い位置はアンテナから271.6m離れていた。

したがって、DOP値5以下でGPS測位を行う場合、少なくとも得られた位置の半数は誤差約50m以下におさまると考えられる。

位置誤差の分布を検討した結果から判断すると、2D測位より3D測位の方が精度がよい。相対累積度数50%と95%の放射方向誤差の関係、また、3D測位と2D測位の位置精

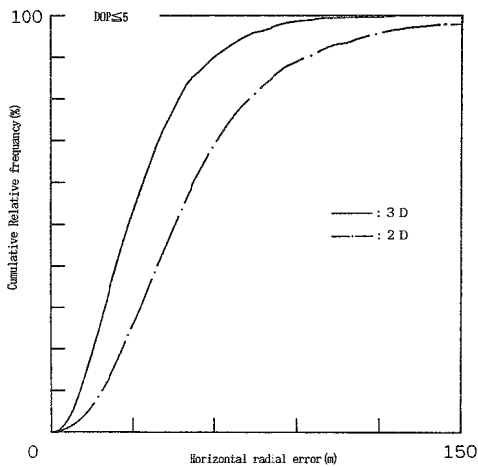


Fig. 2-4 Cumulative relative frequency distribution of horizontal radial error on three dimensional and two dimensional positioning (DOP ≤ 5).

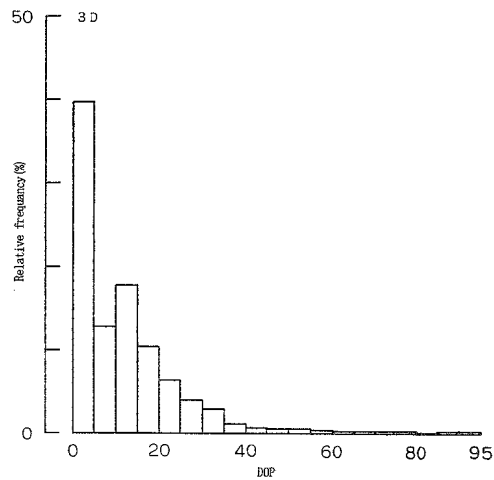


Fig. 2-5 Relative frequency distribution of DOP values on three dimensional positioning.

度の関係は、DOP値5以下の場合、次式で近似できた。

$$R_{95} = 2.4 \times R_{50} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$R_{2D} = 1.6 \times R_{3D} \dots\dots\dots (2.2)$$

- $R_{95}$  : 相対累積度数95%の放射方向誤差
- $R_{50}$  : 相対累積度数50%の放射方向誤差
- $R_{3D}$  : 3 D測位における相対累積度数50%,  
または95%の放射方向誤差
- $R_{2D}$  : 2 D測位における相対累積度数50%,  
または95%の放射方向誤差

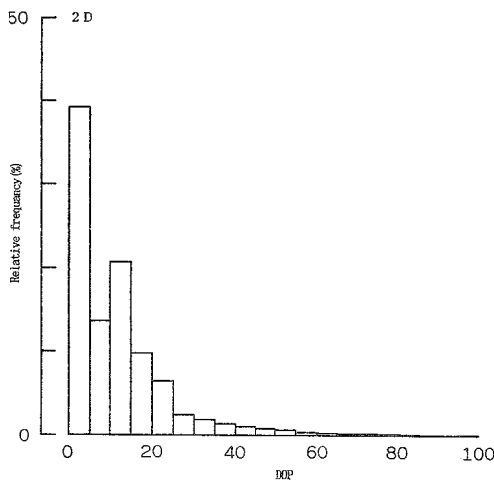


Fig. 2-6 Relative frequency distribution of DOP values on two dimensional positioning.

2.3.4 DOP値の相対度数分布と時系列変化

Table 2-1に示したとおり、DOP値と位置精度には関係があり、DOP値が小さいほど位置の精度はよい。そこで、24時間の観測に現れたDOP値を5ごとにきざみ、相対度数分布を調べた。その結果をFig. 2-5およびFig. 2-6に示す。Fig. 2-5は3 D測位の結果で、Fig. 2-6は2 D測位の結果である。

Table 2-1のデータとFig. 2-5およびFig. 2-6のデータは同じでないで、Fig. 2-5やFig. 2-6に示されたDOP値5以下の相対度数は、Table 2-1から求められるDOP値5以下の相対度数とはわずかに異なっている。DOP値5以下の出現率は、3 D測位の場合39.7%、2 D測位の場合39.2%で、両者とも他のDOP値にくらべて最も高いが、衛星が少ないとき

には、DOP値5以下の精度の高い位置が得られる確率は約40%である。

DOP値の相対累積度数を受信機のDOPレベルに対応させてみると、3 D測位では、DOP値5以下が39.7%、10以下が52.6%、20以下が81.0%であった。これに対し、2 D測位では5以下が39.2%、10以下が52.9%、20以下が83.4%であった。

したがって、受信機のDOPレベル機能をDOP値99以下として測位した場合、得られた位置の約20%が、DOP値21以上の比較的精度の悪い位置データになる。

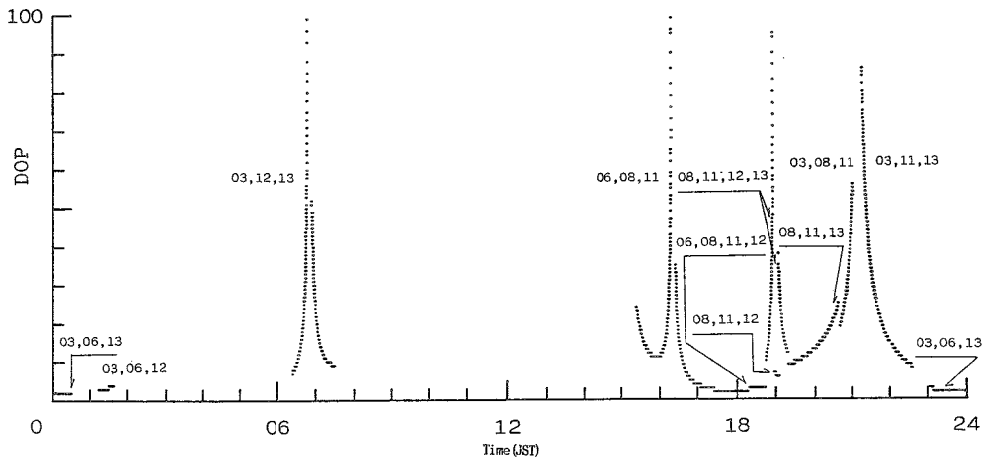


Fig. 2-7 Time series of variation of DOP values and set of satellites.

24時間の観測におけるDOP値の変化をFig. 2-7に示す。同図には、測位に利用された衛星のPRN番号もあわせて記入した。

DOP値が20以上の範囲では、上昇または下降の変化が急激である。DOP値は、受信点を中心とした天球上で、3D測位の場合は測位に利用されている4衛星を結んでできる四面体の体積、2D測位の場合は3衛星と地球の中心を結んでできる四面体の体積の大きさに影響される<sup>9)10)</sup>。すなわち、衛星の移動につれて、この体積が小さくなるとDOP値は大きくなり、体積が大きくなるとDOP値は小さくなる。開発途中のこの時期には、衛星が7個しかないため、DOP値が20以上の範囲では、体積が急激に変化していると考えられる。

DOP値が99に近い値になる現象は、午前中に1回、午後後に3回現れた。前者は2D測位の場合だけで、後者は3D測位の場合が1回と2D測位の場合が2回あった。

2D測位中、DOP値が99になり一時的に測位不可能となった時間は6～10分であった。

21時前後のPRN-03・08・11による2D測位で、DOP値が57になると、以後、測位不可能となっている。この例のように、DOP値が99になる前に測位不可能となったのは、それまで測位に利用されていたPRN-08が仰角5度以下となり、受信不可能になったからである。その後、PRN-13に代替されて配置状態がよくなると、再び測位が可能になった。

以上のように、2D測位が中断される現象は、衛星の配置上のバランスが悪くなりDOP値が一時的に99を超えた場合か、衛星の高度が低くなり他の衛星に代替されるまで測位が不可能になった場合である。

一方、3D測位中、DOP値が95になると約1分間測位を中断して、その後、約7分間2D測位を行った。そして、再び衛星の配置がよくなると再び3D測位を始めた。3D測位では、衛星の相対位置関係が悪くなくても、約1分後には2D測位を開始することが多かった。

Table 2-1に示されたDOPレベルごとの2 drmsと、Fig. 2-7に示されたDOP値の変化、衛星の組み合わせの変化を併せて検討すると、位置精度の変化を推察することができる。

## 2.4 まとめ

船用GPS受信機を用いた定点観測の結果から、運用されている衛星の数が7個のときの測位実態について検討した。その結果は次のように要約される。

- (1) PRN-03, 06, 08, 09, 11, 12, 13を用いた場合の、下関での1日における測位可能な時間の合計は、DOP値が5以下のときは約3.5時間、DOP値が99以下のときは約11時間であった。
- (2) 2D測位よりも3D測位の方が測位精度がよかった。
- (3) DOP値5以下の場合、3D測位の2 drmsは133m、2D測位の2 drmsは170mで、2D測位では、UEREが13.4mのときとほぼ一致する。
- (4) 3D測位2D測位とも、DOP値5以下の相対累積度数は約40%、10以下の相対累積度数は約50%、20以下の相対累積度数は約80%であった。
- (5) 衛星が少ないとき、DOP値が20以上になるとDOP値の変化は急激であった。

### 第3章 衛星の配置と位置誤差の分布

#### 3.1 はじめに

前章では、位置誤差を統計処理して、DOPレベルごとの誤差分布について検討した。しかし、GPSでは観測点上空の3個または4個の衛星の電波を受信して測位計算を行うので、衛星の組み合わせによっても測位精度は異なってくる。

GPSが普及し始めた頃の測位精度に関するいくつかの研究<sup>29)~31)</sup>では、位置誤差の水平分布により測位精度を評価するだけでなく、衛星の幾何学的配置と位置誤差の傾向について述べたものもある。このような衛星の配置と位置誤差の水平分布の傾向は、衛星の数が少ないほど、そしてDOP値が大きいくほどその傾向を把握しやすい。

本章では、衛星が少ないときの測位実験の結果をもとに、衛星の組み合わせや衛星の幾何学的配置と位置誤差の分布について検討した結果について述べる。

#### 3.2 装置と方法

本章で解析に用いたデータは前章の実験で得られたデータの一部で、実験の装置と方法は前章と同じである。8月下旬からPRN-09が受信可能になり、測位データの数も多くなったので、ここではおもに8月下旬から9月上旬までのデータを用いて解析した。また、本章では平滑化されたデータも含めてGPS位置をWGS-84測地系から日本測地系に

変換し、評価基準位置との差をGPS位置の誤差とした。

#### 3.3 結果と考察

##### 3.3.1 衛星の組み合わせによる測位精度とPRN-08の影響

DOP値5以下の測位における位置誤差の統計処理結果を、衛星の組み合わせ別にTable 3-1に示す。衛星の組み合わせによっては、データ数の少ないことがあったので、48時間の観測で得られたデータを用いた。同表には、95%確率誤差円の半径である2 drmsの小さい順に表した。衛星の組み合わせごとの位置誤差の統計処理の結果も、前章で述べたDOP値別の結果と同様、2D測位よりも3D測位の方が位置誤差の分布範囲が狭い。

Table 3-1に示された平均位置誤差や2 drmsは、衛星の組み合わせにより異なっている。同表中の衛星の組み合わせのうち、位置誤差の水平分布図の2例を、Fig. 3-1およびFig. 3-2に示す。図中、測位に利用された衛星の番号を記入した。また、これらの図の中心は評価基準位置、+は平均位置、平均位置を中心とする円の半径は $\sigma$ である。両図とも48時間観測のデータではなく、24時間観測の結果であるから、 $\sigma$ はTable 2-1の値と少し異なっている。

ところで、前章でも少し触れたが、PRN-08を利用して得られた位置には水晶発信器の誤差が悪影響を与える。しかし、この衛星を利用しないとすると、測位可能な時間が1日につき約3時間も短くなるので、PRN-08の利用が測位精度にどれほどの影響を与えるかについて検討した。

Table 3-1. Mean, 2drms and  $\sigma$  of position error by each set of satellites (DOP  $\leq$  5)

	Set of satellites	Number of data	Mean error (m)		2drms (m)	$\sigma$ (m)
			North	East		
3 D	06・08・11・12	661	+ 5.1	- 9.9	63.6	29.8
	08・09・11・12	788	+ 0.5	+ 9.4	85.2	41.5
2 D	03・06・13	1,931	+ 2.3	+11.2	97.4	47.3
	06・08・11	1,437	+29.1	+ 4.7	100.2	40.5
	06・08・09	292	-25.0	+41.9	142.4	51.9
	03・06・09	1,226	+44.9	+ 9.4	143.4	55.1
	03・06・12	479	+44.7	-21.7	183.4	77.1
	08・09・11	248	-71.4	+60.6	234.7	70.7
	08・11・12	123	-14.2	+81.2	258.8	99.9

3 D : Three Dimensional Positioning

2 D : Two Dimensional Positioning

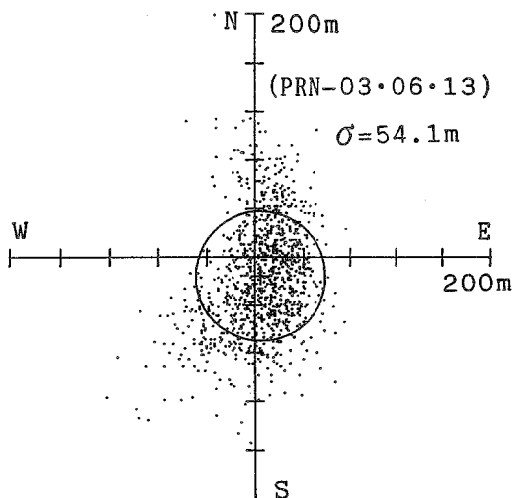


Fig.3-1 Position error distribution on set of PRN-03-06-13.

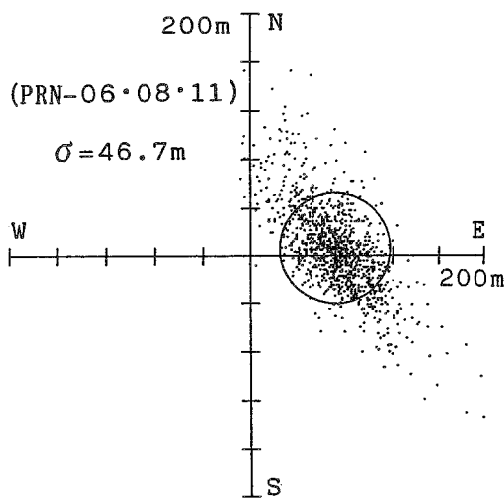


Fig.3-2 Position error distribution on set of PRN-06-08-11

Table3-1でも示したとおり、3D測位ではPRN-08が利用されているが、2D測位よりも誤差が小さい。2D測位においてPRN-08が利用されている場合、2 drmsが200mを超えたものが2例あるが、約140m以下のものも2例ある。また、PRN-08が利用されなかった方が2 drmsや $\sigma$ が大きい例もある。

さらに、Fig. 3-1とFig. 3-2では、PRN-08を利用した方が利用しなかった場合よりも $\sigma$ は小さく、誤差の分布範囲は狭い。48時間の観測結果と24時間の観測結果から判断して、PRN-08が著しく測位精度を劣化させる様子はほとんどないと考えられる。

以上のことから、DOP値5以下のGPS測位にPRN-08が

利用されても、位置誤差約260mの精度は期待できると考えられる。したがって、狭水道、内海、港内などのように、とくに高精度の位置を必要とする場合を除けば、PRN-08を意識する必要はないようである。

次に、DOP値21以上の場合におけるPRN-08の影響を検討した。2D測位のDOP値21以上についてTable 3-2に示す。

Table 3-1同様、Table 3-2においても、PRN-08が測位精度を劣化させている様子はみられない。Table 3-2に示すように、PRN-08を利用したときの誤差は、2 drmsの最大値で2091.0mである。この値は、DOP値21と99の間であるDOP値60でUEREを13.4mとしたときの2 drmsとほぼ一致する。したがって、DOP値21以上の測位の場合も、

Table 3-2 Mean, 2drms and  $\sigma$  of position error by each set of satellites ( $21 \leq DOP \leq 99$ )

Set of satellites	Number of data	Mean error(m)		2drms(m)	$\sigma$ (m)	Range (m)	
		North	East			Latitudinal	Longitudinal
06-08-13	271	-102.3	+204.6	1290.8	603.5	4455.1	2530.4
11-12-13	106	-149.7	+ 68.2	1534.2	767.1	5070.7	845.8
03-12-13	537	- 53.6	-112.9	1549.6	764.7	1643.4	5665.1
03-08-11	703	- 72.7	- 22.7	1794.0	893.8	4094.7	5620.4
03-11-13	1005	-374.4	-539.3	1924.0	703.2	3168.5	4864.2
08-11-13	355	-387.8	-418.4	2091.0	876.1	2767.4	3311.0



PRN-08が測位精度を大きく劣化させるとは考えにくい。

ここでは、PRN-08の影響について、DOP値5以下の測位結果とDOP値21以上の測位結果をあげて述べたが、DOP値6以上20以下のときの測位結果も、PRN-08の利用が位置誤差を大きく劣化させる様子はみられなかった。

衛星の健康状態に関する測位精度の報告<sup>9)</sup>では、良好な衛星のみによる最大位置誤差は39.1m、不良衛星が利用された場合の最大位置誤差は122.5mであったため、精度劣化が著しいと述べられている。しかし、本研究ではPRN-08を使用した場合の著しい精度劣化の現象はみられなかった。

以上より、GPS測位にPRN-08が利用されても、その位置を十分参考にすることができると考えられる。

3.3.2 衛星の組み合わせと位置誤差の分布

衛星の各組み合わせごとの位置誤差の分布状態をFig. 3-3に示す。DOP値が大きくなると、衛星の組み合わせによる位置誤差の分布傾向を把握しやすい。そこで、2D測位のDOP値21以上99以下で平滑化しない場合のデータを用いた。

それぞれの誤差は直線状に分布しているので、同図中、分布の回帰直線もあわせて示した。回帰直線は評価基準位置の近くを通っている。この組み合わせごとの分布は、それぞれがある一つの連続した測位中のものである。測位中、最適衛星選択モードにより衛星の組み合わせが変化した場合は、分布状態も変わる。

このような衛星の組み合わせと誤差分布の関係を把握しておけば、位置を得たときに、誤差の性格を推察することができる。

例えば、得られた位置がPRN-11・12・13の組み合わせによ

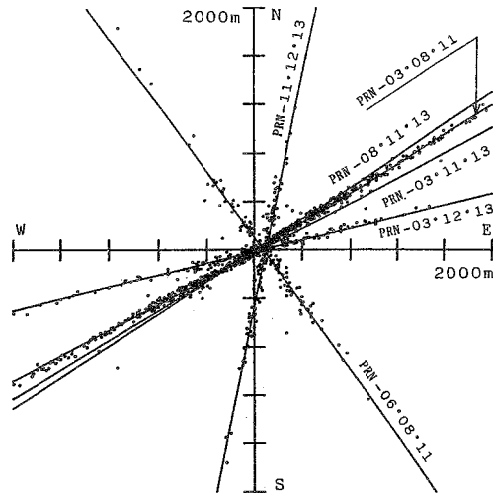


Fig. 3-3 Position error distribution on each set of satellites.

るものならば、ある程度の緯度誤差はあるかもしれないが、経度誤差は小さいであろうと推察できる。また、PRN-03・12・13の組み合わせでは、緯度誤差は小さいが、経度誤差は大きいであろうと推察できる。

緯度誤差をY、経度誤差をXとすると、この分布の回帰式を

$$Y = AX + B \dots\dots\dots (2.1)$$

で表すことができる。回帰係数A、BをTable 3-3に示す。定点観測であったため、回帰係数は実験期間中ほぼ一定で、

Table 3-3 Regression coefficient of distribution

(Regression formula :  $Y = AX + B$ )

Set of satellites	Regression coefficient		Coefficient of correlation
	A	B	
03・08・11	0.607	-0.009	0.996
03・11・13	0.522	-0.019	0.977
03・12・13	0.242	-0.008	0.989
06・08・11	-1.367	0.063	-0.985
08・11・13	0.654	-0.002	0.989
11・12・13	4.829	-0.269	0.980

大きな変化はなかった。

3.3.3 衛星の配置と位置誤差の分布

測位精度や位置誤差の分布の傾向が衛星の組み合わせにより異なることは、観測点上空の衛星の幾何学的配置と密接な関係がある。

測位に使用された衛星の配置とともに、位置誤差の分布を水平面図にして、Fig. 3-4から Fig. 3-6に示す。Fig. 3-4およびFig. 3-5はDOP値99以下で測位した場合で、衛星の配置はDOP値10およびDOP値80のときのものである。

また、Fig. 3-6はDOP値5以下の測位で、衛星の配置はDOP値5のときである。各図に共通していることは、位置誤差の分布は、各衛星を結んでできる四角形または三角形の最長辺に対しほぼ直角な方向で、かつ評価基準位置からみて低仰角の衛星の反対側にオフセットしている現象である。

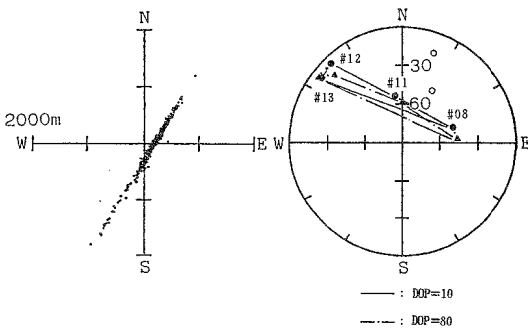


Fig. 3-4 Position error distribution on set of PRN-08・11・12・13.

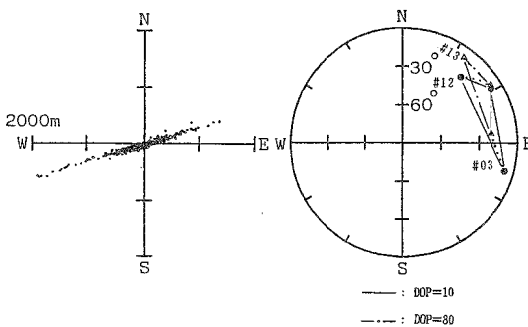


Fig. 3-5 Position error distribution on set of PRN-03・12・13.

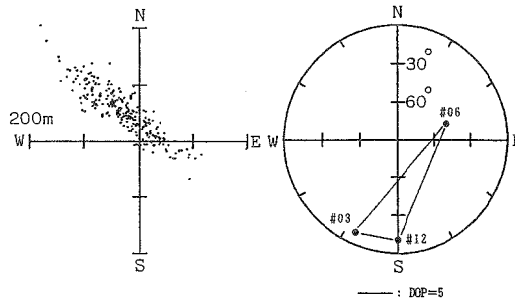


Fig. 3-6 Position error distribution on set of PRN-03・06・12.

GPS測位では、衛星からの電波の到達時間を測定して衛星からの疑似距離を求め、衛星を中心として半径が疑似距離の球面を位置の面としている。衛星の位置情報に誤差があったり、また、疑似距離の誤差が変化すると、球面の位置や大きさも変化する。最長辺の両端に位置する衛星により作られる2個の球面の交わる部分は最長辺に直交する円になるが、この円の大きさや位置が疑似距離の誤差によりいくらか変化する。その影響を受けると、水平位置誤差は最長辺に直角な直線の付近に分布することになる。また、低仰角の衛星からの電波は、電離層や対流圏中の伝搬経路が長く、遅延量が大きくなるので、図のようなオフセット現象が起こると考えられる<sup>27)</sup>。

観測点上空の衛星の配置状態により、位置誤差の分布には一定の傾向がみられた。測位に利用できる衛星数が少ないときには、理想的な配置の衛星を選択できる可能性は少ない。そのため、DOP値が大きくなり位置の精度は悪くなるが、各衛星の位置および幾何学的多角形の形状を知ることにより、位置誤差の分布傾向や位置誤差の性格を推察できる。

衛星の配置と誤差分布の傾向については、奥田も同様のことを述べている<sup>30)</sup>。また、松野らが述べているように、衛星が移動して衛星により形作られる多角形の最長辺の方向が変化するなら、当然、誤差分布の回帰直線の傾きもFig. 3-7<sup>34)</sup>のように変化する。しかし、本研究の過程では、衛星の移動にともなう位置誤差分布傾向の大きな変化はみられなかった。

以上のように、衛星の配置と誤差分布に関係があることから、経緯度レベルのDGPS測位において移動局の位置を補正できるのは、基地局と移動局で同一時刻、同一衛星の組み合わせの場合に限られることが明らかになった。

3.3.4 平滑化の効果

実験に使用した受信機には、位置誤差を小さく抑えるための平滑化の機能がある。この機能は移動体が移動しているときには、その運動に追従できないことがあるが、低速力のときや定点における測位では精度向上に効果がある。

平滑化したときの全データによる位置誤差の統計処理結果をTable 3-4に示す。前章のTable 2-1と比較すると平滑化の効果を知ることができる。

平滑化しないならば、当然DOP値が小さい程位置の精度はよい。しかし、平滑化すると時定数に応じて2drmsや $\sigma$ は小さくなり、誤差の分布範囲は、1~2段階小さいDOPレベルにおける測位結果とほぼ同程度になっている。例えば、DOP値5以下で10秒の時定数により平滑化すると、平滑化なしの場合よりも2drmsや $\sigma$ は小さくなっている。また、DOP値6以上10以下のとき平滑化時定数を10秒とすると、DOP値5以下の平滑化なしの場合とほぼ同様である。時定数30秒ではさらにより効果が現われている。

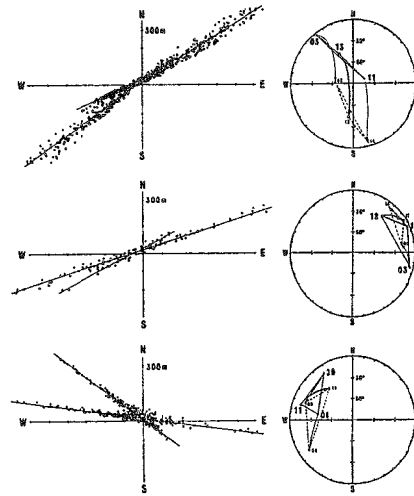


Fig.3-7. Changes of trends of position error distribution with movements of satellites.

Table 3-4. Mean, 2 drms,  $\sigma$  and range of position error on smoothing

3 D [PRN-06・08・11・12, PRN-08・11・12・13]  
2 D [PRN-03・08・11, PRN-03・11・13, PRN-03・12・13, PRN-08・11・12, PRN-08・11・13, PRN-11・12・13]

Time constant of smooting	DOP	Number of data	Mean error(m)		2drms (m)	$\sigma$ (m)	Range(m)		
			North	East			Latitudinal	Longitudinal	
3 D	10 sec	1~ 5	369	- 5.5	+ 45.3	115.6	35.6	150.0	160.6
	6~10	-	-	-	-	-	-	-	-
	11~20	108	- 21.3	+ 42.4	477.2	233.9	1025.8	815.3	
	21~99	126	+ 32.6	+ 82.2	914.8	448.8	1762.7	1401.1	
10 sec	1~ 5	1201	- 5.9	+ 12.3	83.4	39.3	168.3	226.2	
	6~10	2004	- 39.7	- 18.8	177.0	76.8	279.3	525.3	
	11~20	1994	- 72.8	- 46.4	420.8	191.9	869.5	936.8	
	21~99	1160	+302.6	-257.5	1533.8	655.9	3294.7	3874.2	
2 D	30sec	1~ 5	533	+ 9.3	+ 18.9	69.0	27.3	103.6	172.2
	6~10	1341	- 38.8	+ 25.2	152.4	60.6	201.6	318.1	
	11~20	674	-127.6	+172.5	202.0	99.0	98.0	458.2	
	21~99	532	- 10.3	+ 57.7	565.2	276.5	1006.4	1190.7	

3 D : Three Dimensional Positioning

2 D : Two Dimesional Positioning

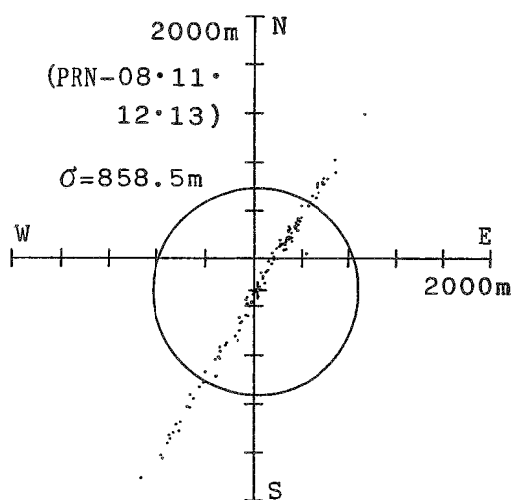


Fig. 3-8. Distribution of three dimensional positioning error when time constant of smoothing is 0 sec.

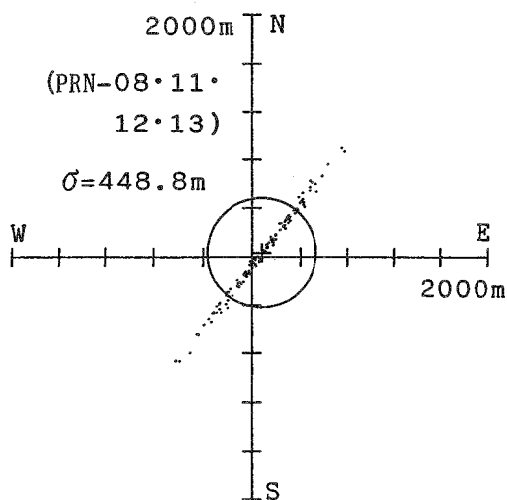


Fig. 3-9. Distribution of three dimensional positioning error when time constant of smoothing is 10sec.

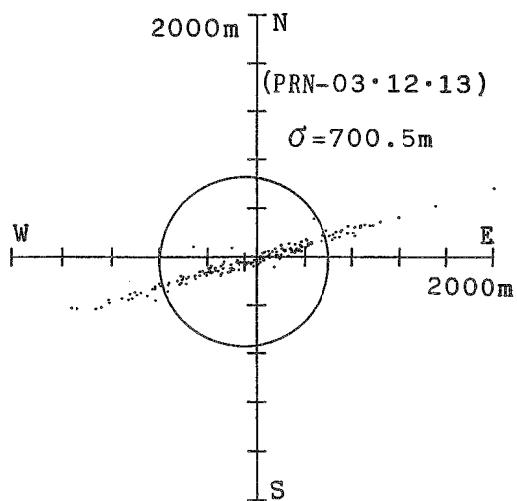


Fig. 3-10. Distribution of two dimensional positioning error when time constant of smoothing is 0 sec.

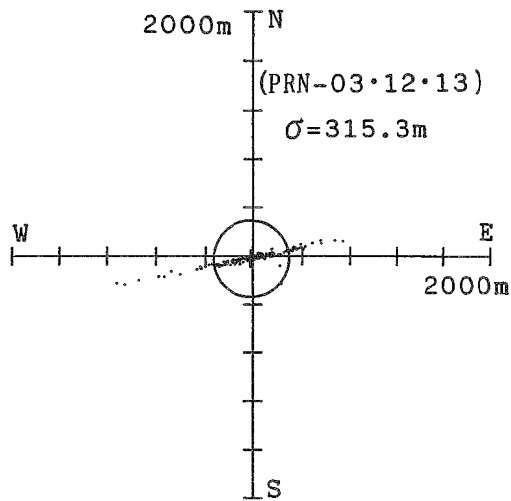


Fig. 3-11. Distribution of two dimensional positioning error when time constant of smoothing is 10sec.

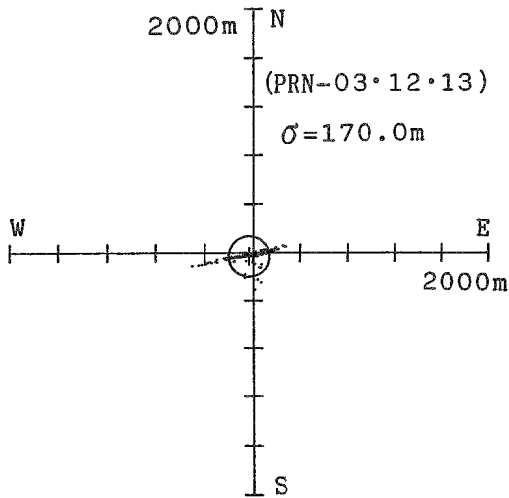


Fig. 3-12. Distribution of two dimensional positioning error when time constant of smoothing is 30sec.

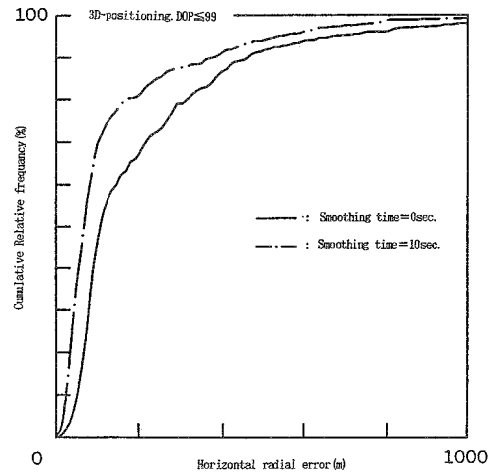


Fig. 3-13. Cumulative relative frequency distribution of horizontal radial error on three dimensional positioning ( $DOP \leq 99$ ).

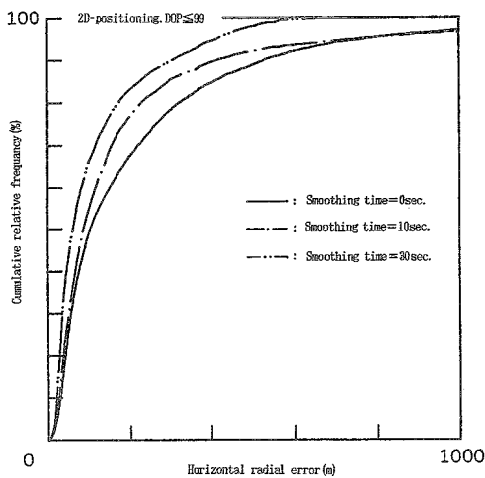


Fig. 3-14. Cumulative relative frequency distribution of horizontal radial error on two dimensional positioning ( $DOP \leq 99$ ).

Fig. 3-8からFig. 3-12に、DOP値21以上の位置誤差の分布を、平滑化の時定数別に示す。例として、3D測位ではPRN-08・11・12・13の組み合わせを、また、2D測位ではPRN-03・12・13の組み合わせを選んだ。Fig. 3-1およびFig. 3-2と同様、図の中心は評価基準位置、+は平均位置、平均位置を中心とする円の半径は $\sigma$ である。さらに、放射方向誤差の相対累積度数を曲線でFig. 3-13およびFig. 3-14に示す。Fig. 3-13は3D測位、Fig. 3-14は2D測位の場合である。Fig. 3-8からFig. 3-14に示したとおり、平滑化時定数を大きくすれば、誤差の分布範囲は狭くなり、位置精度が向上することがわかる。平滑化しなかった場合には、3D測位2D測位とも得られた位置の約80%がアンテナからほぼ300m以下に分布したが、平滑化した場合には約80%がアンテナから約200m以下に分布した。

GPSで測位するとき、位置精度を上げるためにDOP値の範囲を小さくすると、測位可能な時間が短くなる。しかし、平滑化機能とDOPレベル機能をうまく利用すると、DOP値が5以下にならない場合でも、利用者の望む精度の位置が長時間得られることになる。そこで、測位の次元、DOPレベル、平滑化時定数の三者を組み合わせる測位モードを作成した。

Table 3-5. Positioning mode with 2 drms

2 drms(m)		Positioning mode				
< 100		2H30,	2H10			
100 ≤ < 200		3H10,	3H0,	2M30,	2H0,	2M10
200 ≤ < 500		2L30,	3M0,	2L10,	2M0,	3L10
500 ≤ < 1000		2LL30,	2L0,	3L0,	3LL10	
1000 ≤ < 2000		2LL10,	3LL0,	2LL0		

Table 3-6. CEP and 2 drms of position error (DOP ≤ 99)

		Time constant of smothing		
		0 sec	10 sec	30 sec
3 D	CEP(m)	108	67	—
	2 drms(m)	660	540	—
2 D	CEP(m)	104	85	60
	2 drms(m)	770	750	415

測位モードを同程度の2 drmsで整理してTable 3-5に示す。同じ2 drmsのグループの中では、2 drmsが小さい順に測位モードを示した。測位モードの記号で、最初の数字は測位の次元を、次のアルファベットはDOPレベルを示す。HはDOP値5以下、Mは6～10、Lは11～20、LLは21～99である。また、最後の数字は平滑化時定数で、0は平滑化なし、10は時定数10秒、30は同30秒である。

DOP値99以下の場合における、3 D測位と2 D測位のCEPおよび2 drmsをTable 3-6に示す。衛星数が少ない場合には、前述の(1,3)式はあてはまらなかった。平滑化の効果は3 D測位によく現れている。3 D測位の場合、時定数10秒で平滑化すると、平滑化しない場合にくらべて、CEPは約40%、2 drmsは約20%小さくなった。2 D測位では、時定数10秒で平滑化した効果は3 D測位ほどよくはないが、時定数を30秒にすると、CEP、2 drmsとも40～45%小さくなった。

### 3.4 まとめ

衛星数が7個の状態における位置誤差の分布特性、放射方向誤差の相対累積度数、さらにDOP値について検討した。その結果は次のように要約される。

- (1)沿岸水域や狭水道以外の水域なら、PRN-08を利用して得られた位置は利用可能な精度である。また、この衛星を利用すると、測位可能な時間が約3時間長くなる。
- (2)測位に利用された各衛星の配置を知ることにより、位置誤差分布の傾向を推察できる。
- (3)平滑化すると、平滑化しない場合にくらべて、さらに多くのGPS位置がアンテナ付近に分布した。

## 第4章 単独測位に現れたSAの影響

### 4.1 はじめに

第2章で述べたように、GPSが利用され始めた頃は運用されていた衛星数が少なく、測位可能な時間や測位精度は十分ではなかった。しかし、その後のシステムの進展に伴い、利用できる衛星の数は1991年には16個、1993年の1月には20個に増加し、測位可能な時間は大幅に延長され、また、DOP値が小さくなった。

ところが、1990年3月25日以降、米国の国防上の理由でブロックII衛星にSAが操作され、SA実施時にはGPS位置に人為的な誤差が含まれるようになった。このSAの計画段階では、利用者の位置の精度は2 drmsで約100mに劣化すると公表されていた<sup>11)</sup>。SAは1990年8月の、イラクのクウェート侵攻に端を発した湾岸戦争の間、一時的に中断されていたが、戦争終結後しばらくして再び実施された。

SAに関する文献はそう多くない<sup>10) 12) 38)~41)</sup>。そこで、単独測位に現れるSAの実態を調べるため、約15ヶ月の間、測位実験を繰り返し行った。

本章では、システムの完成が近い時期の測位可能な時間、DOP値の傾向、SAの影響を受けた位置誤差、速度誤差について検討した結果を述べる。

### 4.2 装置と方法

1991年10月から1993年1月までの間、水産大学校において、適宜測位実験を行った。

実験に用いたGPS受信機は、1チャンネル高速シーケン

シャル受信方式の受信機(日本無線、JLR-4100)である。受信機の機能の設定では航法測位モード、最適衛星選択モード、平滑化停止を選択し、DOP値のレベルを5以下または99以下とした。そして、2D測位、または3D/2D測位のいずれかで測位を行った。

GPS位置の精度を評価するための基準位置として、水産大学校三学科共用実験棟の4階屋上に設置されたGPSアンテナの位置(34° 03.9605'N, 130° 53.7050'E)を、7500分の1の海図から読み取った。この評価基準位置には、海図の精度や読み取り誤差などが介入するが、これらの誤差は総合的に判断して、約2m以下と考えられたので無視した。

評価基準位置の周辺には、衛星からの電波を遮蔽する障害物として、アンテナから北東、東及び西南西方向に、仰角がそれぞれ約6°、9°、14°の山が存在する。

受信機から5秒ごとに出力されるデータを、パーソナルコンピュータに取りこみ、フロッピー・ディスクに記録した。そして、24時間の観測データを1グループとして、グループごとに解析をおこなった。

### 4.3 結果と考察

#### 4.3.1 測位可能な時間

GPSが実用化された初期の実験<sup>31)</sup>では、受信率が低く、一日の測位可能な時間は合計で約11時間であった。また、合田ら<sup>32)</sup>が、ほぼ同じ時期におこなった実験の結果では約9時間であった。これは、それぞれの観測点の周囲の電波遮蔽物の状況の差と考えられる。システムの完成が近づき、衛星数が増加してくると、一日の測位可能な時間は長くな

Table 4-1. Positionable period time in 24 hours.

Exp. No.	Date	DOP	Positionable period time(h-m)		
			2D	3D	Total
1	'91/Oct. 16~17	<99	23-04		23-04
2	'92/Jan. 15~16	<99	22-55		22-55
3	May. 12~13	<5	23-38		23-38
4	Dec. 23~24	<99	9-54	13-37	23-31
5	Dec. 28~29	<99	23-27		23-27
6	Dec. 30~31	<5	23-17		23-17
7	'93/Jan. 7~8	<5	13-56	8-30	22-26

った。前述したように、今回の測位実験で受信された衛星の数は16~20個であった。

24時間のうちの測位可能な時間をTable 4-1に、そのうちの一例を時系列でFig. 4-1に示す。同図の上部には24時間の測位状況を示し、下部にそのうちの2時間分を拡大して表した。この例では、測位不可能な時間は約3分間が2ヶ所、1分間以下が1ヶ所認められるが、他の実験結果では約40分のももあった。24時間の表示では連続してGPS測位が可能のようにみえるが、測位不可能な時間が約3分と短かかったため、この図では表せなかった。

実験によって1時間程度の違いはあるが、最近の測位可

能な時間は、DOP値の範囲を99以下にしたとき、2D測位および3D/2D測位ともに約23時間30分である。また、2D測位でDOP値を5以下にしたときは、約23時間15分である。GPSが開発された当初は、衛星15個で2D測位が、衛星18個で3D測位が、ほぼ24時間測位可能と理論計算のもとで予測されていた<sup>20)</sup>が、アンテナ周囲の地形、建築物、構造物など実験場所周囲の条件により、測位可能な時間は短くなると考えられる。

3D/2D測位の場合、DOP値が99以下では3D測位は57.9%、2D測位は42.1%で3D測位が多いが、DOP値が5以下では3D測位は37.9%、2D測位は62.1%で2D測位が

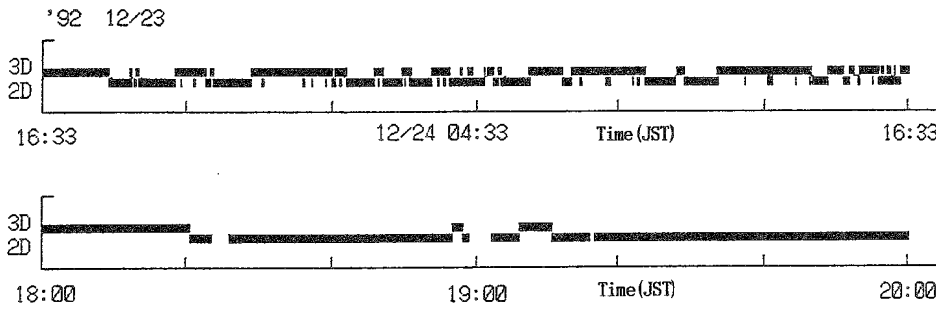


Fig.4-1. Positionable period time.

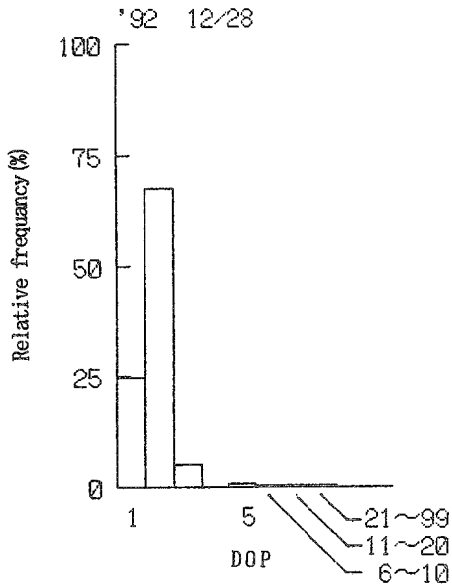


Fig.4-2. Relative frequency distribution of DOP values on two dimensional positioning.

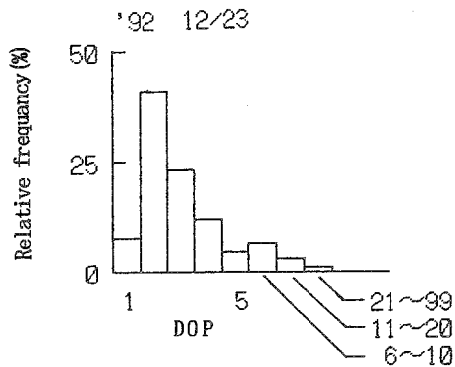


Fig.4-3. Relative frequency distribution of DOP values on automatic changing mode of three and two dimensional positionings.



多かった。

4.3.2 DOP値の分布

2D測位におけるDOP値の相対度数分布をFig. 4-2に示す。同図によれば、2D測位ではDOP値2の実測データが最も多い。相対累積度数では、DOP値2以下が92.5%、DOP値3以下が97.7%、DOP値5以下が98.8%であった。

同様にして、3D/2D測位のDOP値の相対度数分布をFig. 4-3に示す。この測位方法では、DOP値2以下が48.8%、DOP値3以下が81.5%、DOP値5以下が94.3%であった。つまり、衛星数が17個の状態では、得られたデータの約95%がDOP値5以下になると考えられる。

3D/2D測位でもDOP値2の相対度数が最も高いが、2D測位におけるDOP値2の相対度数ほど高くはない。しかし、DOP値3の相対度数は、2D測位のDOP値3にくらべて18.3%高くなっている。そこで、この3D/2D測位で得られたデータを3D測位と2D測位に分けて、DOP値ごとの相対度数を調べてみた。その結果をFig. 4-4に示す。

Fig. 4-4の上部は2D測位、下部は3D測位である。2D測位におけるDOP値2の相対度数は3D/2D測位のデータの26.6%で、Fig. 4-2と同様、他のDOP値にくらべて顕著に高い。しかし、3D測位では、DOP値3の相対度数が最も高い。本研究の一過程で、3D測位中、受信機のDOPレベル機能をDOP値5以下に設定すると、DOP値3の相対度数とその両隣(DOP値2とDOP値4)の相対度数との差はさらに小さ

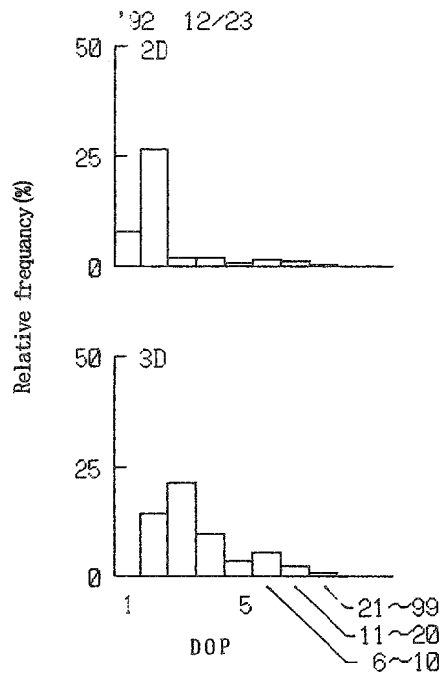


Fig. 4-4 Relative frequency distribution of DOP values of three and two dimensional positionings.

Table 4-2. Mean, 2drms,  $\sigma$  and range corresponding to each of DOP or DOP range on two dimensional positioning error under the condition that SA was off

DOP	Number of data	Mean error(m)		2drms(m)	$\sigma$ (m)	Range(m)	
		North	East			Latitudinal	Longitudinal
1	2647	+16.7	+10.5	50.4	15.9	68.1	30.8
2	12015	+12.6	+ 6.4	49.0	20.1	105.4	89.7
3	1407	+ 4.8	+ 5.2	47.6	22.7	49.5	11.2
4	269	+ 4.0	+ 2.9	39.6	19.2	14.8	5.6
5	53	- 1.9	+ 5.2	16.0	5.7	16.5	2.8
6~99	217	+35.1	+ 4.3	95.6	31.8	102.0	15.4
$\leq 2$	14662	+13.3	+ 7.1	49.4	19.5	105.4	89.7
$\leq 3$	16069	+12.6	+ 6.9	49.2	20.0	109.2	89.7
$\leq 4$	16338	+12.4	+ 6.8	49.0	20.0	109.2	89.7
$\leq 5$	16391	+12.4	+ 6.8	49.0	20.0	109.2	89.7
$\leq 99$	16608	+12.7	+ 6.7	49.8	20.4	118.5	89.7

Table 4-3. Mean, 2drms,  $\sigma$  and range corresponding to each of DOP or DOP range on two dimensional positioning error under the condition that SA was on

DOP	Number of data	Mean error(m)		2drms(m)	$\sigma$ (m)	Range(m)	
		North	East			Latitudinal	Longitudinal
1	2916	+ 14.0	+ 2.4	76.8	35.7	153.6	120.6
2	13182	+ 10.1	+ 6.6	87.4	41.9	255.1	215.9
3	634	- 51.1	+ 44.6	397.2	186.5	580.5	426.2
4	228	-129.8	+126.7	591.6	233.3	441.7	503.3
5	52	-238.3	+251.9	916.8	296.0	465.9	497.7
≤ 2	16098	+ 10.8	+ 5.9	85.6	40.9	253.1	215.9
≤ 3	16732	+ 8.4	+ 7.3	114.2	55.9	580.5	440.2
≤ 4	16960	+ 6.6	+ 8.9	132.6	65.3	589.4	577.6
≤ 5	17012	+ 5.8	+ 9.7	142.0	70.0	621.1	602.8

くなる例もあった。このことから、3D測位よりも2D測位の方がDOP値が小さい値を示すことがわかる。

#### 4.3.3 位置誤差の分布

2D測位の位置誤差を、DOP値別に統計処理してTable 4-2およびTable 4-3に示す。Table 4-2はSAが解除されているとき、Table 4-3はSAが実施されているときである。そのうち、4例ずつの位置誤差の水平分布をFig. 4-5およびFig. 4-6に示す。Fig. 4-5はSAが解除されているとき、Fig. 4-6はSAが実施されているときである。

Table 4-2によれば、SAが解除されているときの位置誤差の全体的な傾向は、数が多いDOP値2のデータの影響を受けている。また、データのほとんどを占めるDOP値5以下の誤差の2drmsは49.0mであるが、DOP値が6以上になるとデータ数が少ないにもかかわらず、2drmsは95.6mとほぼ2倍になった。そのほか、誤差の平均値や $\sigma$ もDOP値5以下にくらべて大きくなっている。

第2章および第3章で述べたとおり、2D測位より3D測位の方が位置誤差の2drms値は小さい。したがって、SAが解除されているときに2D測位ではDOP値の範囲を3以下に、3D測位では5以下に設定すると、誤差50m以下の位置が多く得られると考えられる。また、保存されたデータを、後日、何らかの解析に利用するようとき、2D測位ではDOP値3以下のデータを、3D測位ではDOP値5以下のデータを用いるなら、精度のよい測位データを多く利用できると考

えられる。

一方、SAが実施されているときの位置誤差の水平分布では、Table 4-3に示すように、DOP値2のときの2drmsおよび $\sigma$ はそれぞれ約87mおよび約42mで、SAが解除されているときの約1.8~2倍になっている。DOP値3では、drms、 $\sigma$ とも200m近い値になった。この原因は、Fig. 4-6のうちのDOP値3の誤差分布に示すように、データ数が少ないにもかかわらず、評価基準位置の北側と南東側に大きな誤差が現れたためである。このような大きな誤差を、SAにより導入する計画があったとされている<sup>12)</sup>ことから、SAが実施されているときには、位置誤差が500mを超えこともあると考えられる。Table 4-3の中で、DOP値3, 4, 5のときの統計的精度が悪いのはこの誤差が原因である。

Table 4-2とTable 4-3の平均位置誤差をくらべてみると、測位時のDOP値が2以下なら、SAが実施されているときの平均位置とSAが解除されているときの平均位置の差は、緯度方向で2.5m、経度方向で1.2mである。しかし、DOP値が3以上になると、SAが実施されているときの平均位置は、SAが解除されているときの平均位置から大きく離れている。したがって、SAが実施されていても、DOP値2以下のときの平均位置は精度がよいと考えられる。今回、位置誤差の平均値は24時間の位置データから得られたが、平均値を求めるための最小限のデータ数を把握すれば、SAが実施されているときの定点測位において、極めて有益であると考えられる。

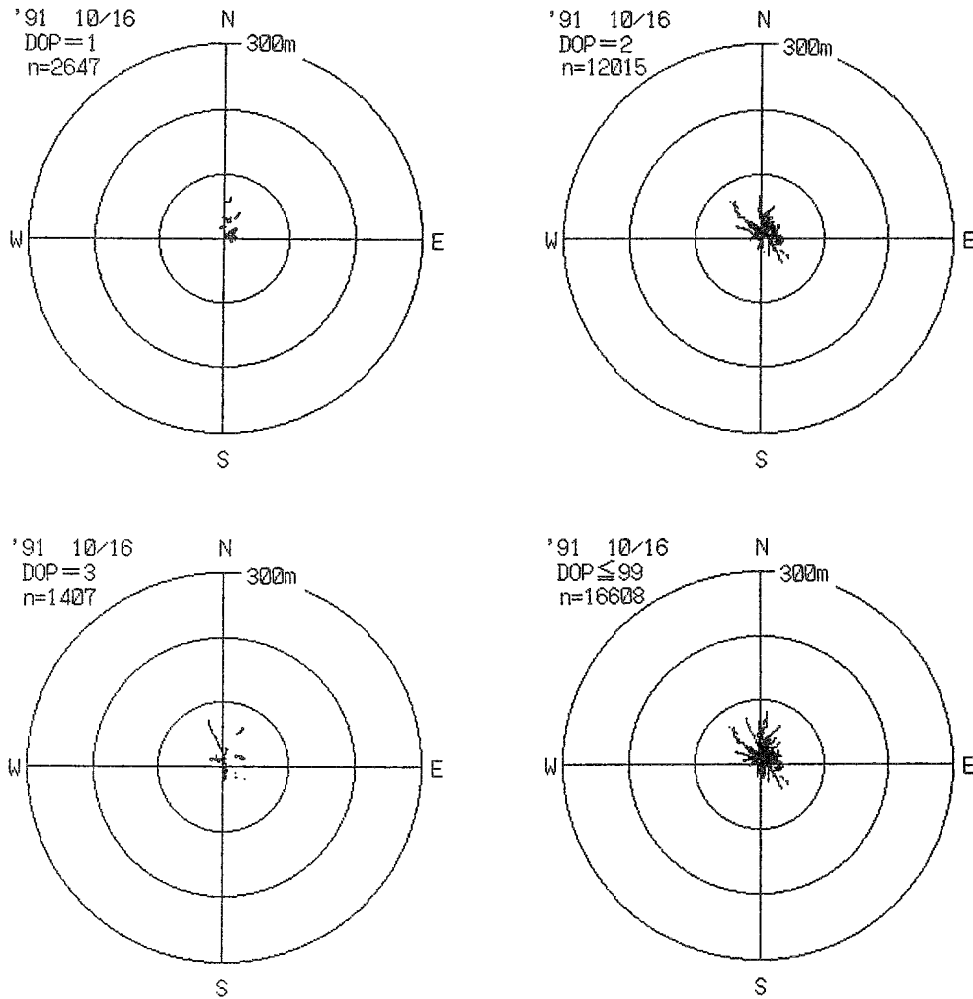


Fig. 4-5. Position error distribution under the condition that SA was off.

次に、放射方向誤差を5 mごとにきざみ、階級ごとの相対度数分布をFig. 4-7に示す。同図の左部分はSAが解除されているとき、また、右部分はSAが実施されているときである。

SAが解除されているときは、評価基準位置から15 m以上20 m未満の放射方向誤差が最も多く22.3%であった。また、20 m未満の放射方向誤差の相対累積度数は49.7%、45 m未満の放射方向誤差の相対累積度数は95.1%であった。これらの値はTable 4-2に示された2 drmsや、(1.3)式から得られる50%誤差界の半径とほぼ一致している。

一方、SAが実施されているときは、評価基準位置から30 m以上40 m未満の放射方向誤差が最も多くなっている。35 m未満の放射方向誤差の相対累積度数は54.3%、80 m未満の放射方向誤差の相対累積度数は94.5%であった。SAが解除されているときと同様、これらの値もまた、Table 4-3に示されたDOP値2以下の2 drmsや50%確率誤差円の半径とほぼ一致している。DOP値が3以上になると、Table 4-3の2 drmsは相対累積度数を検討して得られた80 mより著しく大きくなった。これは、Fig. 4-6において、DOP値3あるいはDOP値5以下の図に示されたような、100 m以上の誤差が

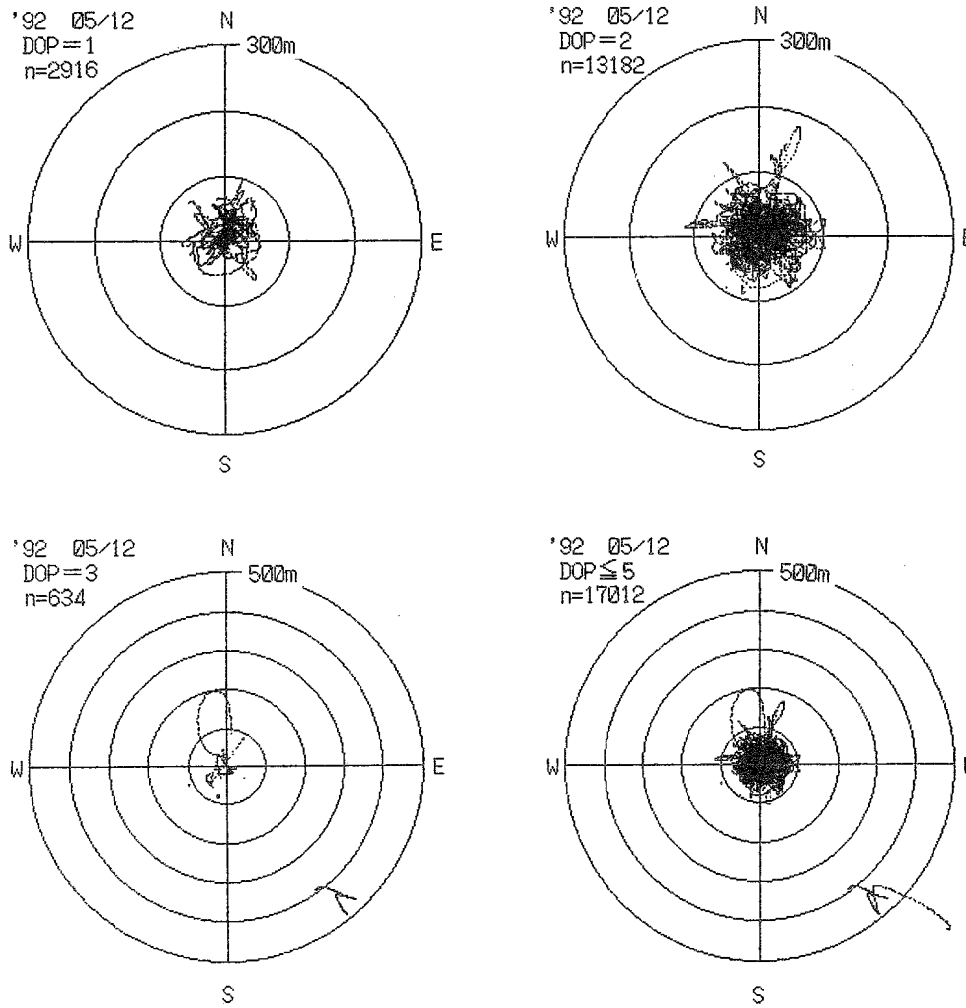


Fig.4-6. Position error distribution under the condition that SA was on.

現れたためである。しかし、Fig. 4-7の右部分でわかるように、SAが実施されている場合、評価基準位置から半径100m以下の範囲には、GPS位置の97.4%が分布していて、Table 4-3と同図から、全体的な傾向としては、ほぼ計画通りのSA<sup>39) 9) 11) 12)</sup>が実施されていると考えられる。

4.3.4 速度誤差の分布

GPSの速度ベクトルは、位置データとは別に、電波のドップラー周波数を測定して得られるが、定点観測で検出された速度は、当然、速度誤差となる。速度ベクトルの速度

誤差を0.1m/secごとにきざみ、階級ごとの相対度数分布をFig. 4-8に示す。同図の左部分はSAが解除されているとき、右部分はSAが実施されているときである。

SAが解除されているときは、0.1m/sec未満の速度誤差の相対度数が最も高く92.1%となった。一方、SAが実施されているときの速度誤差は、Fig. 4-8の右部分に示されているように、0.1m/sec未満は8.4%で、0.2m/sec以上が多かった。SA実施時の速度誤差については報告<sup>37) 38)</sup>があるが、本研究の結果もほぼ同様であった。

速度ベクトルの方向については、今回はデータをみただ

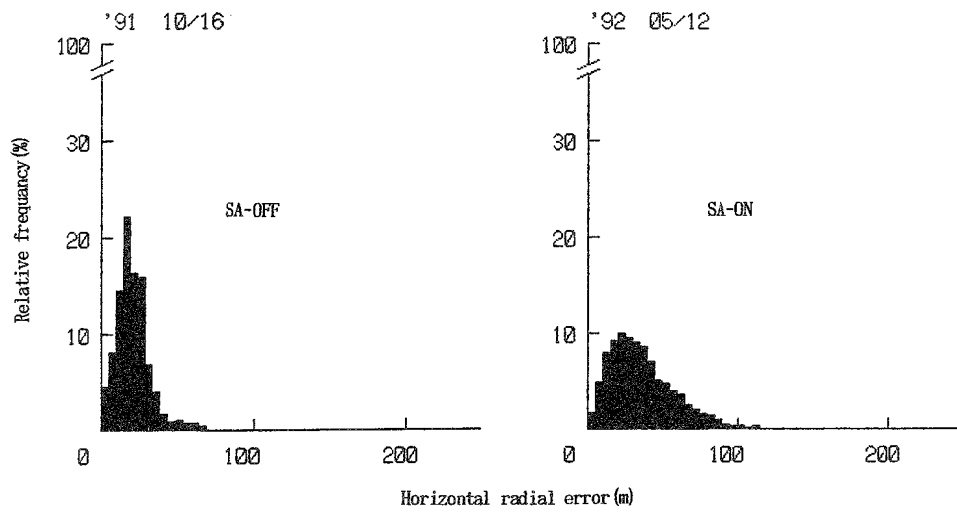


Fig.4-7. Relative frequency distribution of horizontal radial errors.

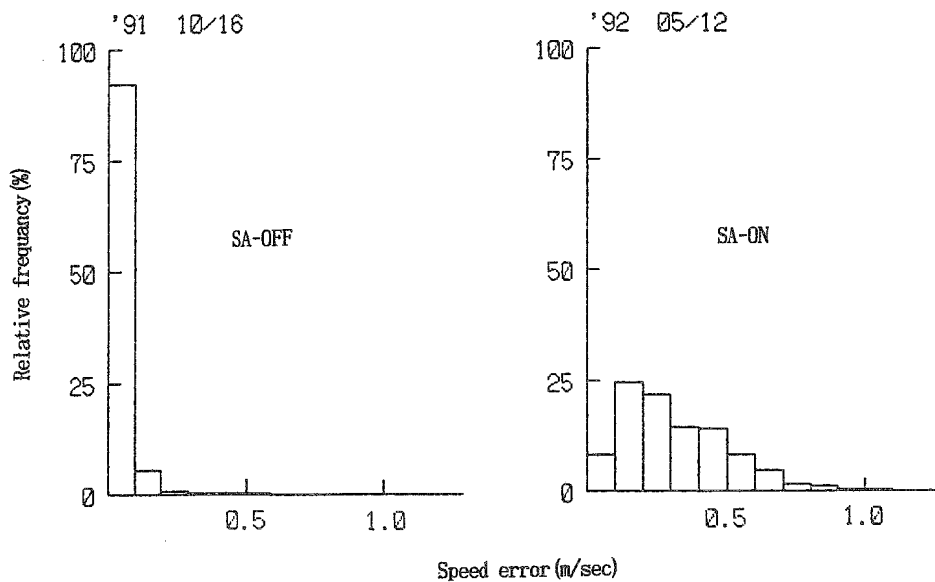


Fig.4-8. Relative frequency distribution of speed errors.

けで詳しく検討していないが、定点観測でありながら方向が示されているため、ベクトルの方向についても調べてみる必要がある、今後の課題としたい。

#### 4.3.5 位置誤差、速度誤差、衛星の組み合わせ、DOP値の時系列変化

SAが解除されているときの、緯度誤差、経度誤差、放射方向誤差および速度誤差の変化と、衛星の組み合わせやDOP値の変化を時系列表示してFig.4-9に示す。

位置誤差の分布特性が観測者上空の衛星の配置によることについては、すでに検討されている<sup>30)~33)</sup>が、Fig.4-9からも、衛星の組み合わせの変化による位置のジャンプや、

DOP値の変化と位置誤差の変化の様子を窺うことができる。とくに、同図の11時前後において、DOP値が徐々に上昇すると、それに伴って位置誤差や速度誤差も大きくなっている。

GPSの速度ベクトルについては、いくつかの報告<sup>10) 30-38)</sup>がある。Fig. 4-9によれば、衛星の組み合わせの変化の有無にかかわらず、DOP値が3以下であれば、位置誤差が大きくなることはあっても、速度誤差の変化はほとんどない。そして、速度誤差は約0.05m/sec以下が多かった。しかし、DOP値が4以上になると、速度誤差は約0.15m/secを超えることが多い。DOP値が5以上になると、さらに大きな速度誤差が現れている。前節で述べたことと併せて考えると、システムの完成後、SAが解除されるようなことがあれば、DOP値が3以下のときの速度ベクトルは精度の高い対地速度として、有効に利用できると考えられる。

同様に、SAが実施されているときの、緯度誤差、経度誤差、放射方向誤差および速度誤差の変化と、衛星の組み合わせやDOP値の変化をFig. 4-10に示す。

同図から、SAによる誤差の変動を知ることができる。緯度誤差、経度誤差、放射方向誤差、速度誤差ともに振幅の小さい変動と、大きい変動とがみられる。振幅の小さいものは衛星内部の原子時計に関するSA、大きいものは軌道情報に関するSAである<sup>10)</sup>。原子時計による誤差は約7~10分の周期的な変動であり、軌道情報による誤差は約1.5~2時間以上の周期的な変動である。軌道情報の誤差の変動の場合、位置の球面の中心が変化するため、オフセットして振幅が大きくなると考えられる。これに短い周期の原子時計の変動が上乗せして、SAによる誤差はFig. 4-10のような特徴のある変動になると考えられる。

また、測位中、衛星の組み合わせがひんばんに変わると、位置誤差は大きくなる傾向が何度か認められた。これとは別に、DOP値が急激に上昇して大きな誤差が現れることもあった。この誤差については片山<sup>10)</sup>が述べている。片山の報告によると、大きな誤差は1992年1月で終わったときされているが、本研究では同年1月、5月、12月の実験でもみられた。

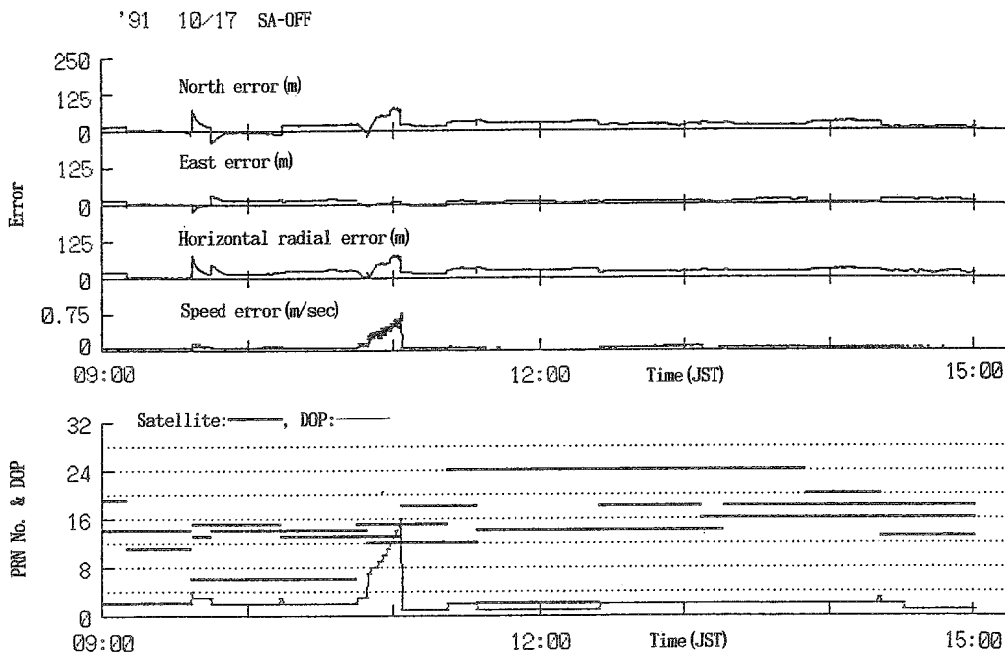


Fig. 4-9. Curves showing time series of position errors and speed errors under the condition that SA was off. Lower portion of this figure shows set of satellites and DOP values.

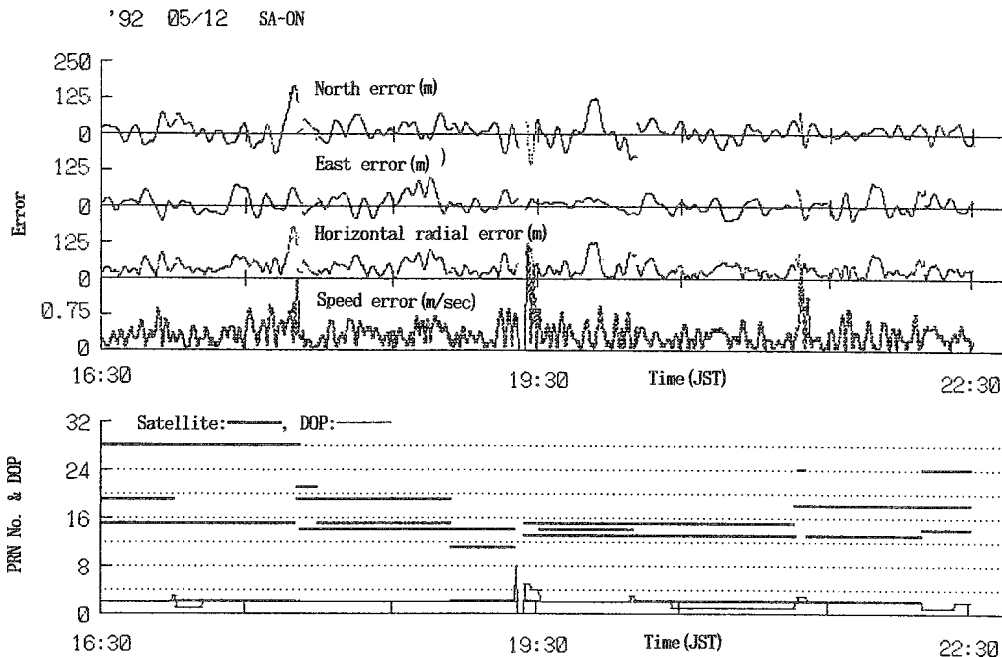


Fig. 4-10. Curves showing time series of position errors and speed errors under the condition that SA was on. Lower portion of this figure shows set of satellites and DOP values.

#### 4.3.6 速度ベクトル情報の利用

前に述べたように、GPS受信機から得られる位置データと速度ベクトルデータはそれぞれ別の測定系で得られる。速度と方向を知りたい場合には、一般に速度ベクトルデータが利用されるが、一方、単位時間(秒)あたりのGPS位置の変化量がわかるなら、速度ベクトルを位置データからも求めることができる。位置変化から得られた速度ベクトルの情報を海潮流の測定に利用した例<sup>7)</sup>がある。そこで、定点観測の位置データと速度データをもとに、速度誤差について検討した。

定点観測において速度ベクトルが現れるなら、そのまま速度ベクトルの誤差となる。これとは別に、GPS位置の経緯度が定点観測にもかかわらず変化するなら、単位時間(秒)あたりの位置の変化を水平面における速度ベクトルの誤差と考えることもできる。このような二つの方法で得られる速度ベクトルの有効性を調べるため、速度データの速度誤差と位置変化による速度誤差を比較した。それぞれの速度誤差とともに、緯度方向成分および経度方向成分の速度誤

差を、時系列にしてFig. 4-11に示す。Fig. 4-11の上部はSAが解除されているとき、下部はSAが実施されているときである。図を見やすくするために、2 m/sec以上の速度誤差は現れないようにした。

SAが解除されているときは、速度データの速度誤差はほとんど現れていない。一方、位置変化の速度誤差は、たびたび約0.37 m/secが現れている。これは、緯度または経度の5秒間の偏位量の多くが、0.001分であったからである。ときどき、現れる大きな速度誤差は、衛星の組み合わせが変わり、位置が大きくジャンプしたためである。

SAが実施されているとき、速度データの速度誤差の変動の傾向と、位置変化から得られた速度誤差の変動の傾向は類似している。これは、受信機内部の位置計算ソフトで、測位誤差を速度データにより平滑化していることが原因の一つと考えられる。

位置変化より速度ベクトルを求めるには、時刻の異なる2つの位置が必要である。この2つの位置のどちらにも異なった誤差が入ると速度ベクトルの誤差になる。このことから、位置変化より求めた速度誤差には速度ベクトルデー

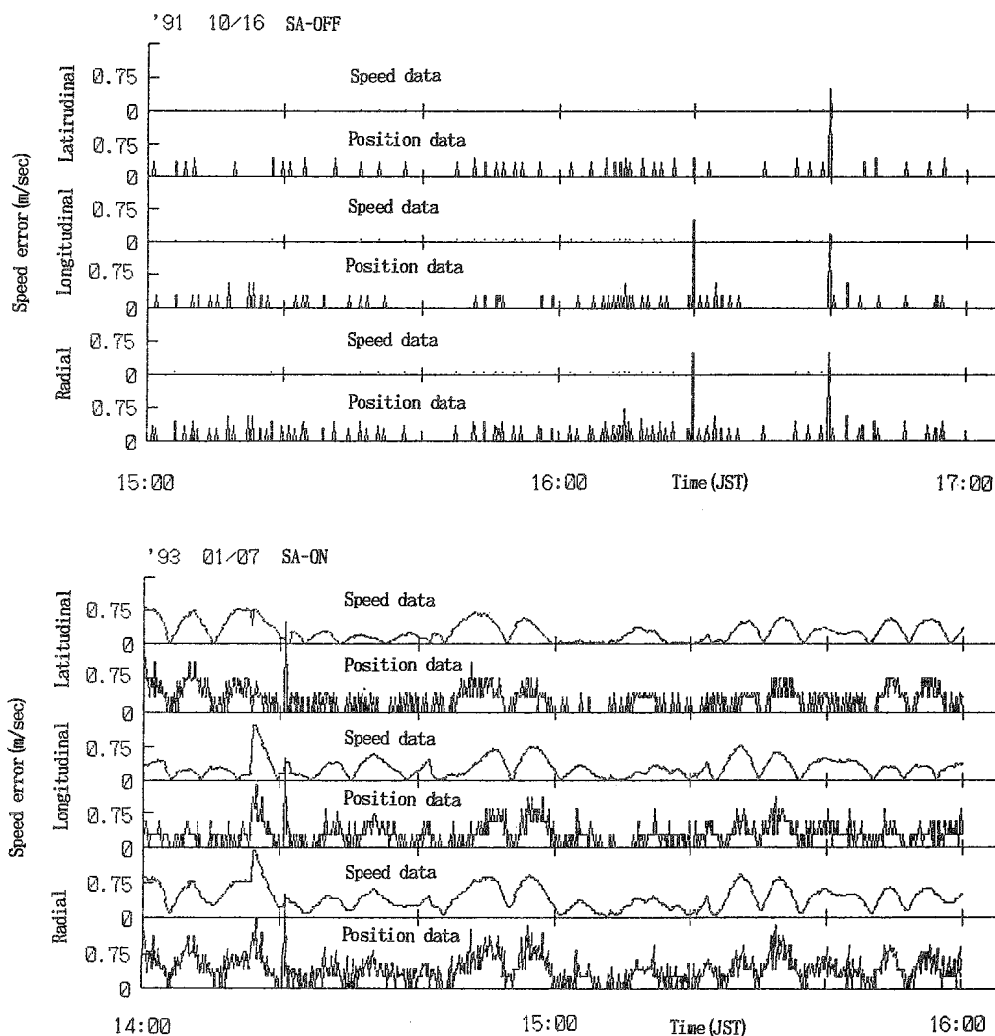


Fig.4-11. Comparison of variation of speed errors based on speed data and that of speed errors calculated with position data.

タよりも大きな誤差が含まれると考えられ、これを漁業計測に利用することは避けた方がよいと考えられる。

#### 4.4 まとめ

SAが解除されているときと実施されているときの測位実態を調べた。その結果は次のとおり要約される。

- (1)衛星が17個のときの測位可能な時間は、概ね23時間30分であった。
- (2)2D測位ではDOP値2のデータが最も多く、3D測位

ではDOP値3のデータが最も多かった。

- (3)DOP値2以下では、SAが解除されているときと実施されているときの平均位置の差は約3mであった。
- (4)DOP値5以下で測位した場合、SAが解除されているときの2drmsは約50m、SAが実施されているときの2drmsは約140mであった。
- (5)SAが解除されているとき、DOP値3以下で得られた速度データは精度がよい。
- (6)位置の変化から計算された速度ベクトルは誤差が大きく、速度情報として利用できない。



## 第5章 経緯度レベルのDGPS測位の基礎的検討

### 5.1 はじめに

1990年3月25日以降、ブロックII衛星に適用されているSAのため、GPSの単独測位による位置精度は、前章で述べたとおり、2 drmsで約100m以上劣化している。そして、これまでの研究<sup>10) 38)~41)</sup>により、SAによる誤差はランダムで、定量的に除去できないことも確認された。したがって、秒オーダの間隔で高精度の位置が必要な場合には、GPSの位置精度を向上させるDGPSが有効な測位方法となる。

第1章でも述べたように、DGPSはトランスロケーション方式と干渉測位方式に大別される<sup>18) 19)</sup>。このうち、トランスロケーション方式には

- ・疑似距離を補正する方法
- ・経緯度を補正する方法

の2方法がある<sup>19) 42)</sup>が、通常、DGPSといえば疑似距離の補正値を無線通信で伝送し、移動局の位置の精度をリアルタイムで高める手法をさす。DGPSの研究報告も疑似距離補正のDGPS<sup>19) 43) 47) 49) 69)~71)</sup>について検討したものが多し。

わが国でも、最近、DGPSのシステム化が検討されている。しかし、このシステムを利用するには、補正情報専用の受信機が必要で、わが国の20t未満の沿岸小型漁船や小型の船舶では、装備の必要性や経済的な理由などから、システムの完成後も引き続き、従来の単独測位が主流となると思われる。このような小型船で測定された位置の精度を後で高

めるときには、基地局で記録された測定値を使って、経緯度の誤差をオフラインで処理するDGPSが有効な手段となる。

そこで、まず、この経緯度レベルの簡易なDGPS測位の有効性を基礎的に評価するため、2定点で単独測位を行い、一方の定点で観測された測定値を利用して、もう一方の定点の位置の補正を試みた。本章では、その補正効果について述べる。

### 5.2 装置と方法

2定点のうち、1点を補正値を測定するための基地局、他の1点を移動局とした。

実験の期日、受信機の型式、測位方法および受信機の設置場所をTable 5-1に示す。

実験に使用された受信機の型式は、GPSの運用初期に開発された1チャンネル高速シーケンシャル受信機(日本無線、JLR-4000F)、同機種を改良した受信機(同、JLR-4100)、5チャンネル多重受信機(同、JLR-4110)の3種類で、1機種につき2台ずつ、合計6台を使用した。以下それぞれを、1CH初期型、1CH改良型、5CH型と呼ぶことにする。

同じ機種を受信機2台のうち、1台を基地局に、残りの1台を移動局に設置して、2D測位と3D測位を行った。基地局と移動局のアンテナ間の直線距離は6回の実験のうち、5回が約14kmで、1回が約32mであった。

両局のアンテナ位置を7500分の1の海図、または15000分の1の海図から読み取り、補正値を得るための基準の位置やDGPSの精度評価のための基準の位置とした。この場合には、実尺度で約2m程度の読み取り誤差が介入するが、

Table 5-1. Method of experiment

Date	Type of GPS receiver	Dimension	Reference station	Remote receiver
'93/Feb. 12(24hours)	1-channel receiver : JLR-4000F(JRC)	2 D	N. F. U	Tenyo-maru
13(24hours)	(initial type)	3 D	N. F. U	Tenyo-maru
'93/Mar. 12(24hours)	1-channel receiver : JLR-4100(JRC)	2 D	N. F. U	Tenyo-maru
'93/Dec. 15(24hours)	(improved type)	3 D	N. F. U	N. F. U
'93/Apr. 13(12hours)	5-channel receiver : JLR-4110(JRC)	2 D	N. F. U	Tenyo-maru
14(12hours)		3 D	N. F. U	Tenyo-maru

N. F. U : National Fisheries University

2 D : Two Dimensional Positioning

3 D : Three Dimensional Positioning

ここでは無視することとした。

水産大学の周辺には、アンテナから北東、東および南西方向に、仰角がそれぞれ約6°, 9°, 14°の山が存在する。また、天鷹丸が係留していた下関市岬ノ町専用岸壁の周辺には、仰角約5°以上の受信障害物は存在しない。

1CH型では5秒間隔で、5CH型では4秒間隔で出力されるデータを、RS-232Cを介してパーソナルコンピュータに取り込み、フロッピィディスクに保存した。得られたデータのうち、基地局と移動局で同一時刻、同一衛星の組み合わせのデータを解析に用いた。そして、基地局で得られたGPS位置の緯度誤差、経度誤差を補正值として、移動局のGPS位置を次式により補正し、DGPS位置を求めた。

$$Lat_{ud} = Lat_{ug} + (Lat_r - Lat_{rg}) \dots\dots\dots (5.1)$$

$$Long_{ud} = Long_{ug} + (Long_r - Long_{rg}) \dots\dots\dots (5.2)$$

- $Lat_{ud}$  : 移動局の DGPS 緯度 (度分)
- $Long_{ud}$  : " DGPS 経度 (度分)
- $Lat_{ug}$  : " GPS 緯度 (度分)
- $Long_{ug}$  : " GPS 経度 (度分)
- $Lat_r$  : 基地局の緯度 (度分)
- $Long_r$  : " 経度 (度分)
- $Lat_{rg}$  : " GPS 緯度 (度分)
- $Long_{rg}$  : " GPS 経度 (度分)

DGPS位置の精度評価のため、移動局のアンテナ位置を評価基準位置として、評価基準位置とGPS位置、およびDGPS位置の差を誤差とした。

### 5.3 結果と考察

#### 5.3.1 移動局の位置誤差

移動局の位置誤差の水平分布をFig. 5-1からFig. 5-3に示す。Fig. 5-1は1CH初期型、Fig. 5-2は1CH改良型、Fig. 5-3は5CH型である。各図の上部はGPS測位、下部はDGPS測位、左は2D測位、右は3D測位の結果である。数値的に把握しやすいように、データ数(n)、平均位置誤差( $\overline{\Delta l}$ ,  $\overline{\Delta L}$ )、2 drms、 $\sigma$ の値もあわせて記入した。使用した受信機により、補正後の誤差の分布範囲が異なるため、分布図の最大半径を300m、または100mとした。

GPS位置の誤差分布の様子は、Fig. 5-1の1CH初期型のみ、Fig. 5-2およびFig. 5-3とくらべて若干異なっているが、この原因はそれぞれの受信機の位置計算ソフトの差異によ

るものと考えられる。また、補正されたDGPS誤差の分布にも受信機の機種により特徴がみられる。とくに、5CH型を用いた3D測位の場合に最も効果的な補正の結果が現れている。そこで、各機種ごとにDGPSの検討を試みた。

まず、1CH初期型では、DGPS誤差の2 drmsは2D測位よりも3D測位のほうが小さくなってはいるが、単独測位によるGPS誤差にくらべて、DGPS誤差の2 drmsは大きくなった。

次に、1CH改良型では、2D測位3D測位とも、DGPS誤差の多くは中心付近に集まり、1CH初期型より誤差の分布範囲は狭い。しかし、そのいくつかは放射方向にすじ状の分布をなし、100mを超えたものもある。また、2D測位のDGPS位置の平均誤差は、単独測位の平均位置誤差よりも大きい。この実験では、3D測位におけるGPS両局のアンテナ間の距離は32.2mで、2D測位のときのGPS両局のアンテナ間の距離にくらべて短かったが、2 drmsや $\sigma$ にその影響は現れてないようである。

5CH型によるDGPS誤差の水平分布図には、1CH型の受信機を用いたDGPS測位にくらべて2D測位3D測位とも、効果的な補正の結果が現れている。平均位置誤差、2 drms、 $\sigma$ も1CH型にくらべて非常に小さい。また、2 drmsは、3D測位のDGPSの方が2D測位のDGPSよりも小さくなっている。3D測位によるDGPS位置7101点のうち、40m以上の放射方向誤差は2点のみで、それ以外の放射方向誤差はほとんど20m以下におさまった。

放射方向誤差を5mごとにきざみ、階級ごとの相対度数分布を、3D測位についてFig. 5-4に示す。同図の上部はGPS測位の結果、下部はDGPS測位の結果である。また、左から順に、1CH初期型、1CH改良型、5CH型による結果を示す。同図より、アンテナ位置からどれくらいの距離の範囲に、どれくらいの位置の分布があるかを知ることができる。

1CH初期型では、GPS測位もDGPS測位も同様の傾向を示し、DGPSの効果は全くみられない。また、1CH改良型のDGPS測位では、35m未満の放射方向誤差は94.9%であったが、Fig. 5-2にみられたように、すじ状の誤差分布がみられることと、DGPSにより補正された位置の数が少ないことをあわせて考えると、この場合もDGPS測位は有効でないと考えられる。5CH型の3D測位によるDGPSでは、10m未満の放射方向誤差は76.4%、15m未満は92.4%、20m未満は97.1%で、他の場合にくらべて最も効果的な補正ができた。

したがって、5CH型の受信機で3D測位によりDGPS位置を得た場合、20m以上の誤差が出現する確率は極めて小

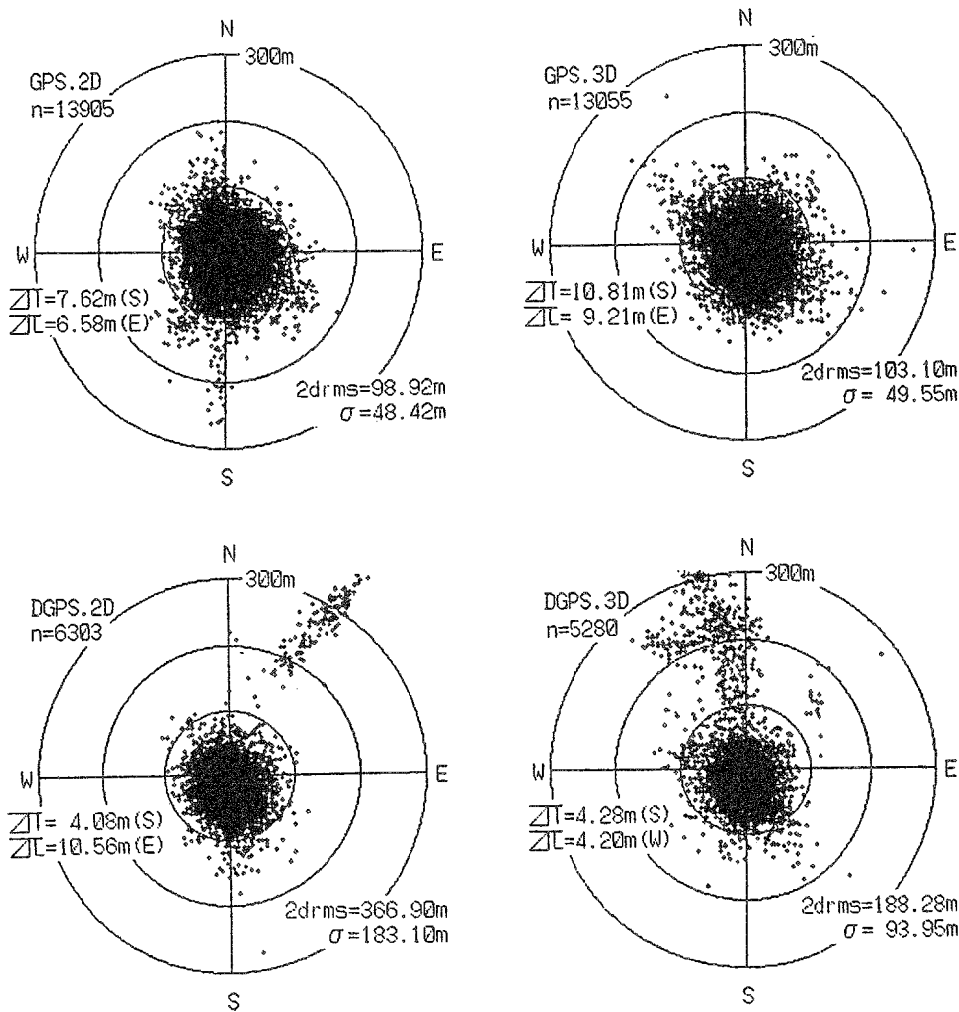


Fig.5-1. Position error distribution by GPS and residual distribution by DGPS using 1-channel receivers of initial type.

さいと考えられる。2drmsや $\sigma$ についてみると、5CH型によるDGPS測位の結果は、SAが実施されていないときに行われた1CH改良型による単独測位<sup>39)</sup>にくらべて、約3倍、精度が改善されている。

この実験では、2機種種の1CH型受信機と1機種種の5CH型受信機を用いたが、6CH以上の受信機で3D測位を行った場合には、さらに精度の高いDGPS測位が期待できるであろうと推察される。

ところで、DGPS測位の有効性を検討する場合には、これ

まで述べた位置精度だけでなく、単独測位とDGPS測位の有効なデータの数についても調べる必要がある。Fig.5-1からFig.5-3に示された位置データの数をみると、1CH型では初期型改良型とも単独測位のデータ数に対してDGPS位置のデータ数が少ない。また、5CH型では、2D測位のDGPS位置のデータ数が少ない。

以上のようなDGPS位置の精度とデータ数について考察した結果を述べる。

1CH型では、観測点上空の衛星からの信号を高速切り

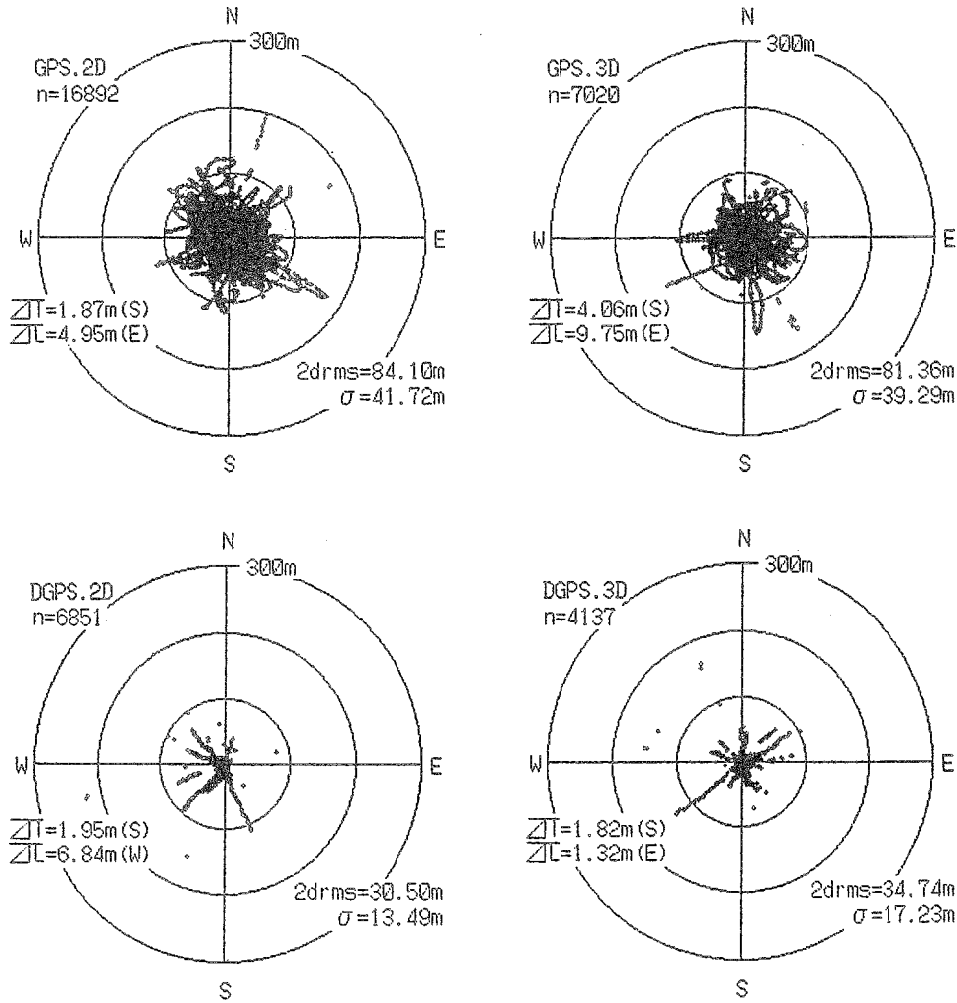


Fig.5-2. Position error distribution by GPS and residual distribution by DGPS using 1-channel receivers of improved type.

換えしてサンプリングを行う。そのため、基地局と移動局で捕捉される衛星の順番が異なると、受信機内部の処理手順も異なってくる。一方、5CH型では、上空の5衛星からの信号を同時に受信できる。GPS両局における1CH型受信機の非同期生や特性差など、受信機の内部誤差の差が、5CH型の受信機よりも大きく現れたと考えられる。

また、1CH型受信機では1衛星4msのサンプリングであるため、S/N（信号対雑音比）が劣化し、S/Nの低い信号は受信できないことがある<sup>9) 7) 14)</sup>。その結果、GPS両局で捕

捉された衛星の組み合わせが異なり、単独測位のデータ数に対し、DGPS測位のデータ数が少なくなったと考えられる。

5CH型によるDGPS位置のデータ数が、2D測位の方が3D測位よりも少ない原因の一つに、基地局と移動局の周囲の地形が異なっていることが考えられる。受信機が測位計算を行うとき、DOP値が最小となるようなバランスのよい配置の衛星を選択する。したがって、2D測位の場合には3衛星で作られる三角形の面積が最大になるよう、低高度の衛星を補足する。基地局周辺にはアンテナからの仰角6°~14°

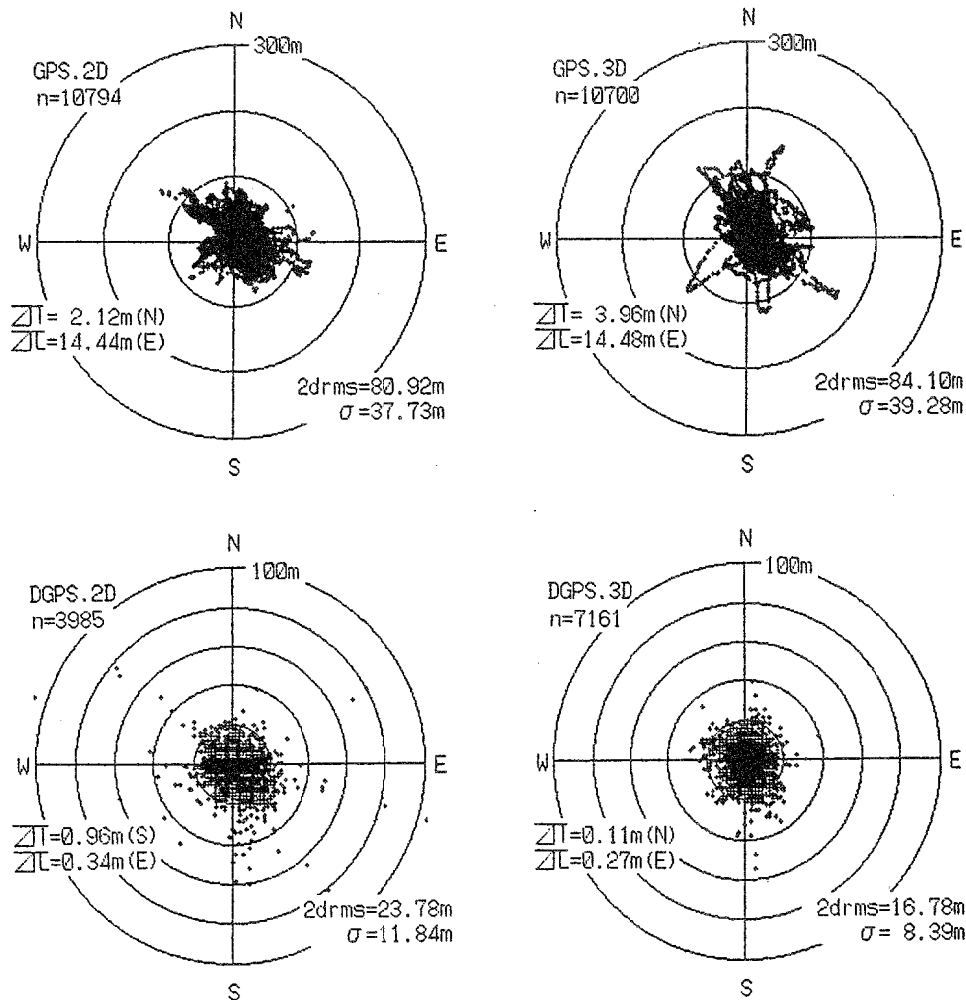


Fig.5-3. Position error distribution by GPS and residual distribution by DGPS using 5-channel receivers.

の山が至近に存在し、その方向にある低高度の衛星からの電波は遮断される。

一方、移動局周辺では、基地局周辺の山ほど仰角の高い障害物は存在しない。そのため、移動局で低高度の衛星が補足されたとしても、基地局の視野内に存在しないことがある。つまり、2D測位の場合には、両局で補足された衛星の組み合わせが度々異なり、DGPS位置のデータ数が少なくなったと考えられる。このほか、1CH型の受信機に関して前述したように、GPS両局の受信機の処理手順の違いなど

も原因の一つとして考えられる。

3D測位の場合には、4衛星で作られる四面体の体積が最大となるように、バランスよく衛星を補足して測位計算を行うが、2D測位の場合ほど低高度の衛星が選択されることが少ないのであろうと考えられる。このことから、2D測位よりも3D測位の方がDGPS位置の測得率が高くなったと考えられる。

今回の実験結果から、経緯度レベルのDGPS測位を行う場合、5CH型の受信機による3D測位が最も効果的であった。

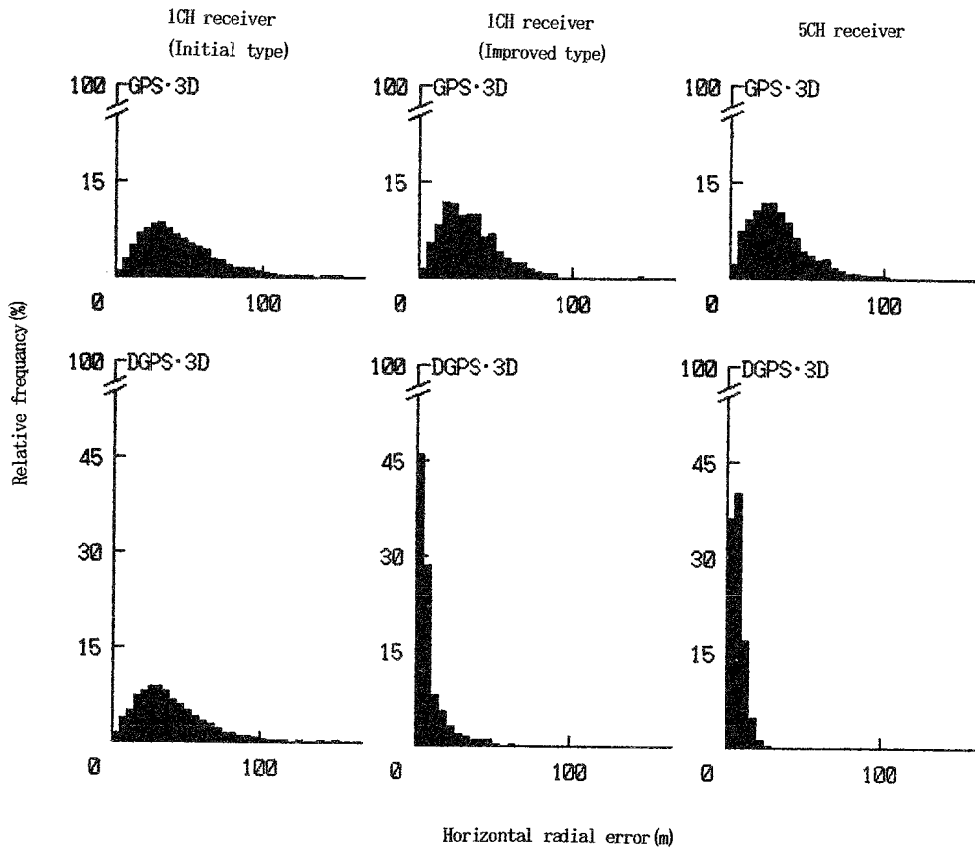


Fig.5-4. Relative frequency distribution of horizontal radial errors by GPS and that of residual by DGPS on three dimensional positioning.

5.3.2 補正効果の時系列的検討

補正効果が最もよく現れた5CH型の3D測位のデータを用いて、移動局のGPS位置が補正された様子を時系列的にFig.5-5に示す。測位に使用された衛星の組み合わせと、測位中のDOP値の変化もあわせて示した。SAのため緯度誤差および経度誤差が波状の曲線になっているが、時系列で表示されたGPS両局の誤差の変動はほぼ一致し、移動局の位置のほとんどは誤差20m以下に補正された様子を知ることができる。

衛星の組み合わせが変化したときに、基地局で位置のジャンプが緯度方向に現れたが、移動局ではその現象はみられない。両局の誤差の差はDGPSに残留として現れる。この原因のおもなものは、海図から読み取った両局のアンテナ位置の誤差、両局の受信機の内部誤差、両局で発生したマ

ルチパス誤差と考えられる。電波が電離層や対流層を通過する際の伝搬遅延誤差がDGPSにおよぼす影響は、両局の距離が約14kmと比較的近いため、ほとんどないと考えてよい。以上の誤差のうち、利用者が簡易な方法で改善できることはマルチパスを防ぐことである。その対策として、アンテナの水平面より低い位置からの電波を遮断する簡単な装置を取り付けるなら、さらに精度のよいDGPS測位が期待できると考えられる。

5.3.3 衛星の組み合わせが異なる場合の補正結果

経緯度レベルのDGPS測位では、GPS両局で測位に使用された衛星が同一時刻に同一組み合わせであるときのデータを使わなければならない。したがって、実験時のデータとして、衛星の番号を記録しておく必要があるが、受信機によっては、その番号が出力端子から出力されないものがあ

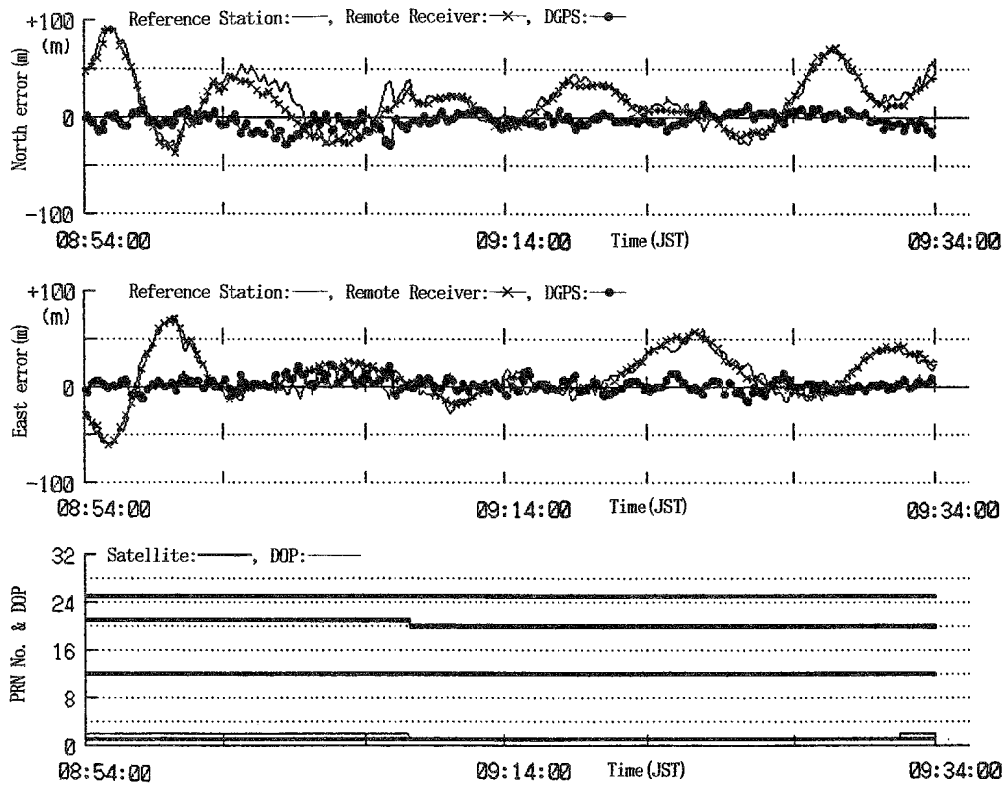


Fig. 5-5. Curves showing time series of North(upper) and East(center) errors on three dimensional positioning by GPS and DGPS using 5-channel receivers. Lower portion of this figure shows set of satellites and DOP values.

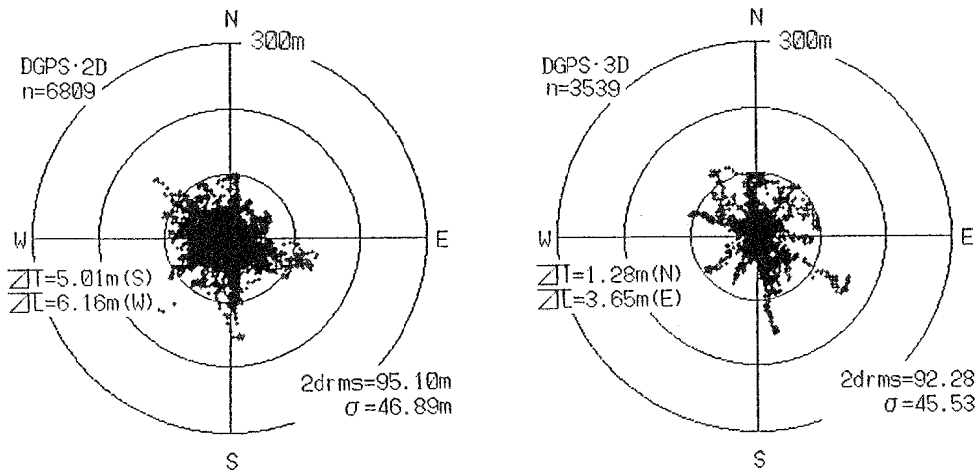


Fig. 5-6. Position error distribution by DGPS when the satellites were not in the same set between reference station and remote receiver.

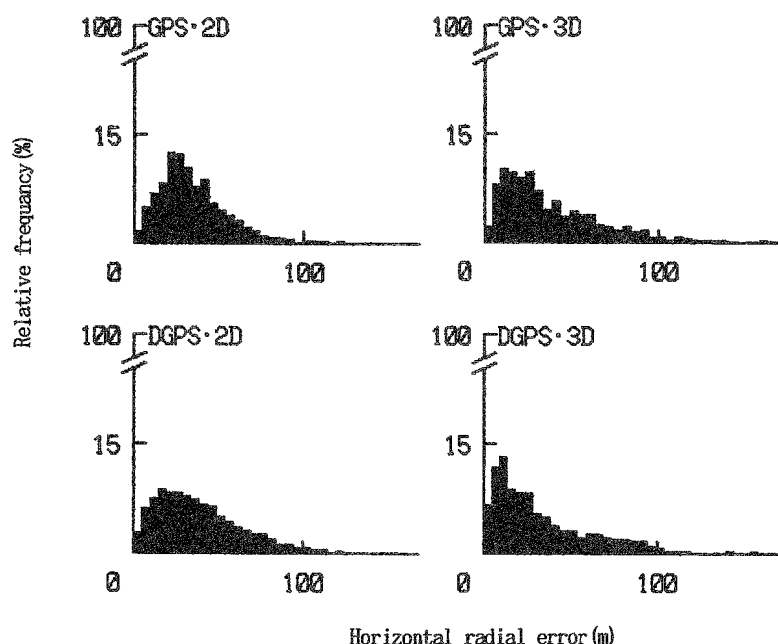


Fig.5-7. Relative frequency distribution of horizontal radial residual by DGPS when the satellites were not in the same set between reference station and remote receiver.

る。このような仕様の受信機でDGPS測位を行う場合には、衛星番号が出力されるような特別仕様に改善するか、または、受信機に表示される衛星番号を、連続的に目視で読み取り、実験野帳などに筆記する必要がある。しかし、読み取り・記録の作業には手間と労力を要し、長時間の実験には不向きである。

そこで、使用した衛星の番号が得られない場合を想定して、衛星の組み合わせを無視した場合の補正を試みた。使用したデータは最も効果的に補正された5CH型により得られたものである。その場合の位置誤差の水平分布をFig. 5-6に、また、放射方向誤差の相対度数分布をFig. 5-7に示す。両図とも、左部分は2D測位、右部分は3D測位である。また、Fig. 5-7の上部はGPS測位を下部はDGPS測位を示す。これらの図によれば、DGPS誤差はGPS誤差と同様、広い範囲に分布している。同時に、上記の図とFig. 5-3およびFig. 5-4を比較しても明らかなように、GPS両局の衛星の組み合わせが同一時刻に同一でない場合には、位置の補正によるDGPS測位は適切でないことが本実験でも確認された。

#### 5.4 まとめ

市販されている3種類の船用GPS受信機により、経緯度レベルの補正による簡易なDGPSについて基礎的な検討を行った。その結果は次のように要約される。

- (1) 単独測位用の受信機を用いて行う経緯度レベルのDGPS測位では、受信チャンネル数の多いGPS受信機による三次元測位が効果的であった。
- (2) SAの影響を受けた単独測位では、最大誤差は164.5m、誤差の2 drmsは84.1mであった。
- (3) 3D測位による経緯度レベルのDGPS測位では最大誤差は51.8m、誤差の2 drmsは16.8mに軽減された。
- (4) 移動局のDGPS位置の誤差は、おもに基地局の位置の誤差、両局の受信機特性の差、マルチパスの影響を受ける。



## 第6章 経緯度レベルのDGPS測位の 漁場探査への応用

### 6.1 はじめに

GPSの単独測位では、SAの影響を受けると100m以上の誤差も多く現れる。そのため、沿岸魚礁域の漁場探査(魚礁調査)では、調査船の船位測定にレーザ測位がよく行われる。

このレーザ測位の場合、レーザセンサの設置に全調査海域を見通すことができる好条件の場所を必ずしも確保できないこと、レーザの測距能力、レーザ測位のアルゴリズムによる一時的なトラッキングのミス、雨霧など天候が不順などときにはレーザが妨害されることなどで、連続測位が中断されることがある。さらに、陸上追尾局の設置作業に伴う悪条件—山頂や岩場の海岸に設置されることが多く、装置や機材の運搬が困難であること、設置場所の足場が悪いことなど—の無視できない問題もかかえていた。

そこで、単独測位用のGPS受信機を利用してレーザ測位

の短所を補うことを目的として、経緯度レベルのDGPS測位の漁場探査への応用を試みた。

前章で述べたとおり、経緯度レベルのDGPS測位を定点で行った場合、2 drmsは17m程度に軽減された。したがって、漁場探査の場合も同程度の精度が得られ、さらにDGPS位置の測得率も高いなら、本手法のDGPS測位はオフラインで行われるレーザ測位の補助的な手段として応用できる。

本章では、沿岸の魚礁調査で実施したレーザ測位と比較して、経緯度レベルのDGPS測位の精度と漁場探査における実用性について述べる。

### 6.2 装置と方法

#### 6.2.1 測位装置と測位方法

調査船は水産大学校練習船天鷹丸(877国際総トン、全長57.1m)であった。

魚礁調査海域をFig.6-1に示す。調査海域は山口県長門市

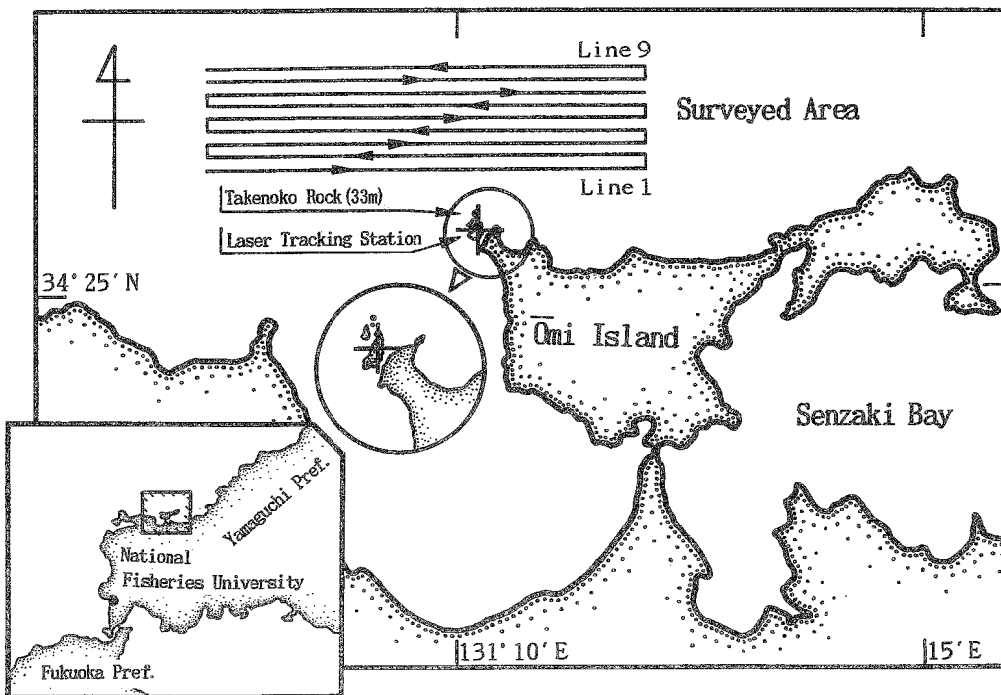


Fig.6-1. Surveyed area off Senzaki.

青海島の約0.5～2海里沖合で、水深は約60～70mであった。同海域に、緯度線に平行な調査ラインを南から200m間隔で17本設定し、1993年8月4日にライン1～7の調査を、翌5日に残りのライン8～17の調査を、約4ノットの船速で行った。ライン10の調査開始直後、レーザ測位装置に事故が発生したため、有効なレーザ測位を行うことができたのは、ライン1～9であった。

レーザ測位装置(クルップアトラスエレクトロニクス、POLARFIX)は、レーザセンサの位置を原点として、測位目標である反射プリズムの位置を極座標で求めることができる。測距精度は $\pm 0.1\text{m} \pm 0.3\text{m}/\text{km}$ 、測角精度は $\pm 0.015^\circ$ といわれ<sup>78) 79)</sup>、絶対位置に極めて近い位置を連続して得られることから、水産大学校が行う魚礁調査では、調査船の位置測定によく使用される。

測位目標である反射プリズムを調査船に取り付けるときには、船体動揺の影響を受けにくく、かつ、マスト、煙突などの船体構造物によりレーザの光路が遮蔽されないような場所を選ぶ必要がある。今回、陸上追尾局(レーザセンサおよびコントロールユニット)は調査海域の南であること、ある調査ラインの調査を終えて天鷹丸が次の調査ラインに移るときの回頭時に船首は北向きになることを考慮して、反射プリズムを船尾の国旗掲揚用ポール(鋼鉄製、直径約6cm)に取り付けた。

レーザ位置測定のため陸上追尾局を青海島北西端より約100m西沖の無人島上に設置し(Fig. 6-1の+印)、レーザセ

ンサの設置された基点から反射プリズムまでの距離と、相対方位(あらかじめ設定された基準線からの偏角)を自動追尾で測定した。同時にサンプリングタイム10秒間隔で、これらのデータを船上局(データ受信装置およびインタフェースユニット)のRS232Cよりパーソナルコンピュータに取り込み、フロッピーディスクに記録した。測定距離は約1～5kmの範囲であった。また、調査の前後、電話の時報によりレーザ測位装置の内装時計の誤差を調べ、データ処理の際に補正した。

陸上追尾局の北および北西の方向に、「竹の子岩(海拔33m)」、小島、水上岩などレーザの光路を遮蔽する障害物があった。

一方、DGPS測位では、補正値を得るための基地局のGPS受信機を水産大学校電波計器実験室の受信機とし、移動局のGPS受信機を天鷹丸に搭載された受信機とした。これら2台の受信機は、いずれも一般的な5チャンネル型船用GPS受信機(日本無線、JLR-4110)である。測位にあたり、DOPのレベルを、本受信機のDOPレベル機能の最大範囲であるDOP値20以下に設定し、8月4日に3D測位を、翌5日に2D測位を行なった。

それぞれの受信機から4秒間隔で出力される測位時刻、緯度、経度、高度、針路、速度、DOP値、衛星番号、信号レベル、ステータスなどのデータを、RS232Cよりパーソナルコンピュータに取り込み、フロッピーディスクに記録した。そして、これらのデータを、後日、オフラインにより

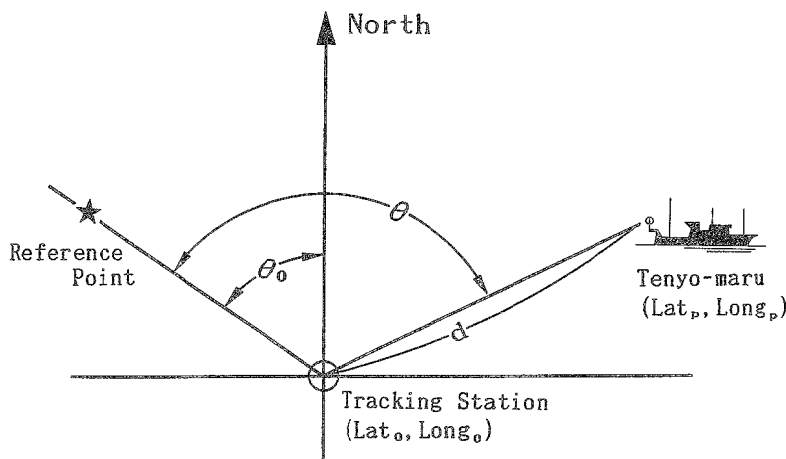


Fig.6-2. Finding the position of an unknown point with the laser position fixing system.

DGPS処理した。

基地局のアンテナ高さは平均海面より32mで、その周辺には、北東、東、南西の各方向に、仰角がそれぞれ約6°、9°、14°の山がある。また、天鷹丸のGPSアンテナ高さは海面より17mで、調査海域の南にある青島に天鷹丸が最も接近した場合に、島頂の仰角が約9°となった。GPS両局のアンテナ間の直線距離は、約46~51kmの範囲であった。

調査期間中の天候は曇一時小雨、風向は北北東~東北東、風力はビューフォート風力階級2~3、海況1~2であった。

6.2.2 データの処理

レーザ測位装置の測位原理をFig. 6-2に示す。同図から分かるように、反射プリズムの経緯度は次式より求められる。

$$Lat_p = Lat_o + d \cdot \cos(\theta - \theta_o) / M_{la} \dots\dots\dots (6.1)$$

$$Long_p = Long_o + d \cdot \sin(\theta - \theta_o) / M_{lo} \dots\dots\dots (6.2)$$

Lat<sub>p</sub> : 反射プリズムの緯度(度分)

Long<sub>p</sub> : 反射プリズムの経度(度分)

Lat<sub>o</sub> : 基点の緯度(度分)

Long<sub>o</sub> : 基点の経度(度分)

M<sub>la</sub> : Lat<sub>p</sub>における緯度1分の長さ(m)

M<sub>lo</sub> : Lat<sub>p</sub>における経度1分の長さ(m)

θ<sub>o</sub> : 基準線の方位角(度)

θ : 基準線から測定した反射プリズムの偏角(度)

d : 基点から反射プリズムまでの距離(m)

そこで、反射プリズムと天鷹丸のGPSアンテナとの位置関係およびジャイロコンパスによる船首方位データから、GPSアンテナの経緯度を求め、その位置をGPS単独測位とDGPS測位それぞれの位置誤差を得るための評価基準位置とした。このようにして得られた天鷹丸のGPSアンテナ位置を、以後、レーザ位置と呼ぶことにする。また、明らかに異常値と判断されたレーザ測位のデータをすべて解析から除外した。

DGPSの補正値を得るための基準位置として、7500分の1の海図から読み取った基地局のアンテナ位置(34°03,9605'N, 130°53,7050'E:日本測地系)を用いた。この場合、海図の精度や読み取り誤差(0,1mmに対し75cm)などが関係するが、これらによる誤差は総合的に判断して2m以下と考えられたので無視した。そして、GPS両局のデータのうち、同じ時刻に同じ衛星の組み合わせで測位されたときのデータを

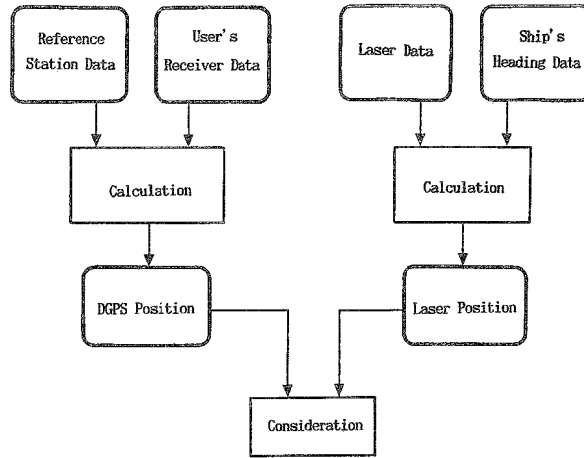


Fig. 6-3. A flow in processing position data.

用いて、第5章と同様、天鷹丸の位置を次式により補正し、DGPS位置とした。

$$Lat_{id} = Lat_{ig} + (Lat_r - Lat_{rg}) \dots\dots\dots (6.3)$$

$$Long_{id} = Long_{ig} + (Long_r - Long_{rg}) \dots\dots\dots (6.4)$$

Lat<sub>id</sub> : 天鷹丸のDGPS緯度(度分)

Long<sub>id</sub> : " DGPS経度(度分)

Lat<sub>ig</sub> : " GPS緯度(度分)

Long<sub>ig</sub> : " GPS経度(度分)

Lat<sub>r</sub> : 基地局の緯度(度分)

Long<sub>r</sub> : " 経度(度分)

Lat<sub>rg</sub> : " GPS緯度(度分)

Long<sub>rg</sub> : " GPS経度(度分)

位置データの処理手順をFig. 6-3に示す。

位置誤差を得るために比較するレーザ位置、GPS位置およびDGPS位置は同一時刻のものでなければならないが、レーザ測位のデータは10秒間隔で、また、GPSデータは4秒間隔で得られたため、レーザ位置とGPS位置およびDGPS位置の時刻が同じでないことがあった。その場合には、レーザ位置の時刻と同じ時刻のGPS位置およびDGPS位置を、比例計算で求め内挿した。内挿による誤差はほとんどないと考えてよい。そして、レーザ位置とGPS位置およびDGPS位置との差を、GPS誤差およびDGPS誤差とした。3D測位のDGPS位置4190個のうちレーザ位置と比較できたものは658個、2D測位の場合は4459個のうち424個であった。

### 6.3 結果と考察

#### 6.3.1 移動局の位置誤差

移動局で得られた位置誤差の水平分布をFig.6-4に示す。同図の上部はGPS測位、下部はDGPSによる補正後、左は3D測位、右は2D測位の結果である。同図中、レーザ測位と比較できたGPS位置およびDGPS位置の数(n)、平均位置誤差( $\overline{ZI}$ ,  $\overline{ZL}$ ), 2drmsも併せて記入した。同図によれば、おもにSAの影響を受けたGPS誤差は約150mに及んでいるものもあるが、DGPSによる補正の効果は現れている。そして、2C測位よりも3C測位のほうがDGPS誤差の分布範

囲が若干狭い。DGPS誤差の平均値は極めて小さいが、これらには2m以下とみなした基地局の位置誤差が含まれるので、上述の平均値から±2m内に、この誤差の除かれた平均値があると考えられる。

次に、DOP値では、移動局の3D測位のデータのうち、DOP値1は62.2%、DOP値2は37.5%であった。2D測位の場合は、DOP値1が78.9%、DOP値2が16.6%であった。また、DOP値の平均は、3D測位の場合も2D測位の場合も1.4であった。

移動局の放射方向誤差を5mごとにきざみ、相対度数分布をFig.6-5に示す。Fig.6-4と同様、上部はGPS測位、下部はDGPSによる補正後、左は3D測位、右は2D測位の結

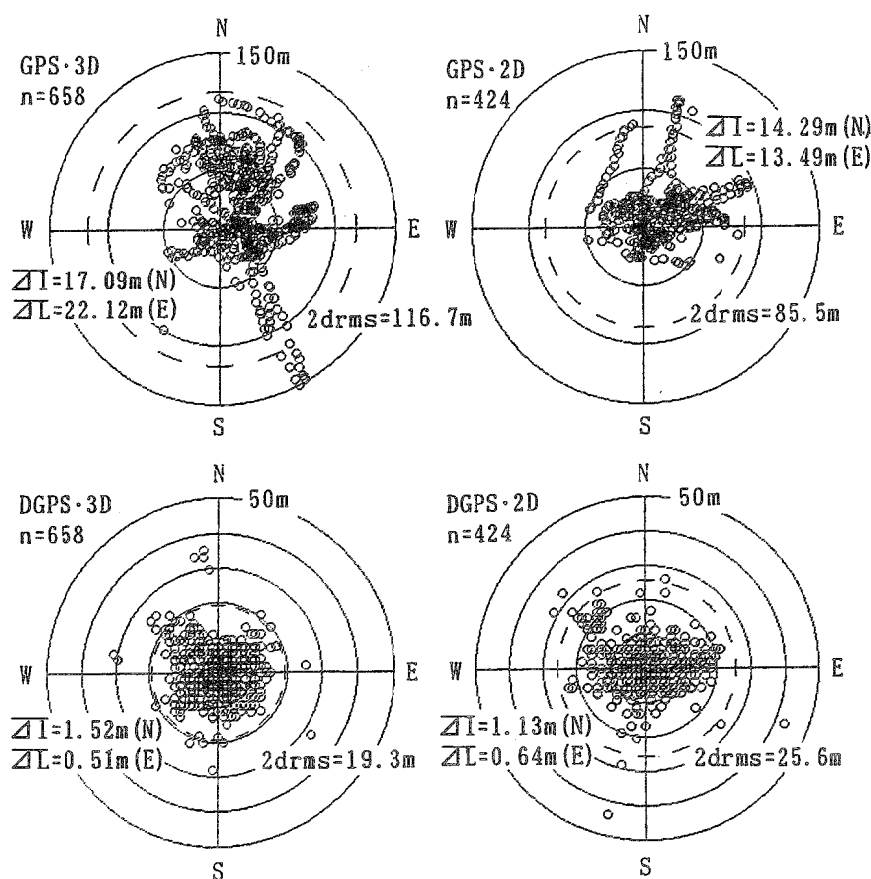


Fig.6-4. Position error distribution by GPS and DGPS.

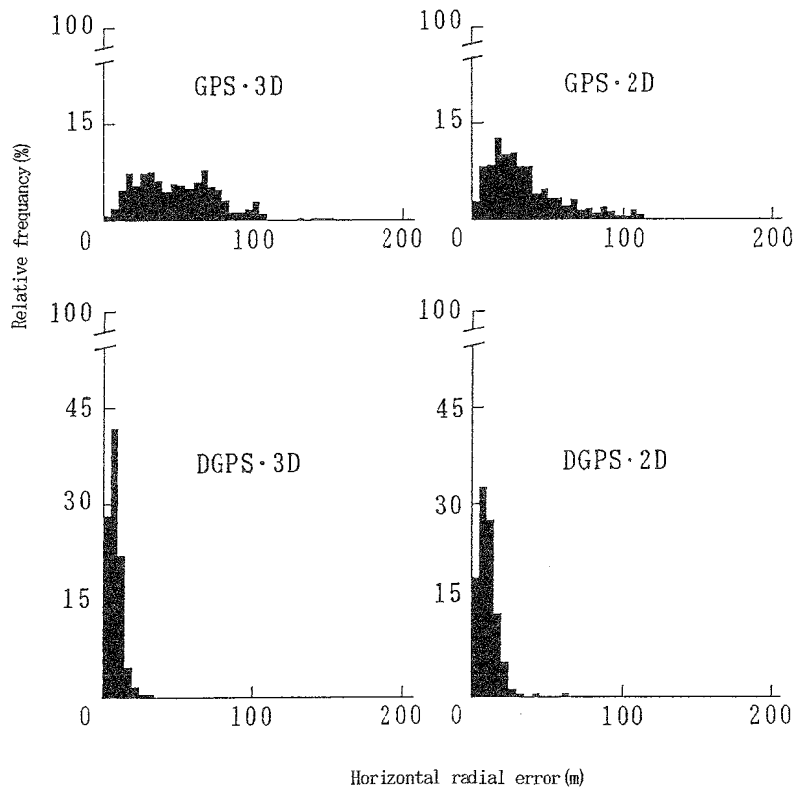


Fig. 6-5. Relative frequency distribution of horizontal radial errors by GPS and DGPS.

果である。3D測位のDGPSで、5 m以上10 m未満の放射方向誤差の相対度数が最も大きく、41.8%であった。

また、放射方向誤差の相対累積度数では、3D測位によるDGPSの場合、5 m未満が28.3%、10 m未満が70.1%、15 m未満が92.1%、20 m未満が97.0%であった。これに対し、2D測位のDGPSでは、5 m未満が18.6%、10 m未満が51.4%、15 m未満が79.0%、20 m未満が92.0%であった。

3D測位のDGPS位置の分布密度は、アンテナから5 m未満の範囲では2.4個/m<sup>2</sup>、5 m以上10 m未満では1.2個/m<sup>2</sup>、10 m以上15 m未満では0.4個/m<sup>2</sup>、15 m以上20 m未満では0.1個/m<sup>2</sup>であった。つまり、3D測位のDGPS位置は、アンテナから半径5 m以上10 m未満の範囲に最も多く分布したが、分布密度はアンテナから5 m未満の中心付近が高いことになる。

Fig. 6-4およびFig. 6-5でわかるように、3D測位のDGPS

では40 m以上の放射方向誤差は見られないが、2D測位のDGPSでは約60 mに及ぶものがある。誤差分布を全体的にみると、定点におけるDGPS測位の結果<sup>73)</sup>と同様、今回も2D測位よりも3D測位の方がDGPS誤差の分布範囲は狭い傾向にあった。

2D測位では、受信機に入力されるアンテナ高さの誤差が測位精度に影響を及ぼす<sup>28)</sup>。したがって、基地局においては、3D測位により得られる高度データの平均値を使って、検討を試みるのも一つの方法であろう。また、移動局においては、潮位による水面の高さの差による影響を調べてみる必要がある。これらについては、今後の課題にしたいと考えている。

### 6.3.2 補正効果の時系列的検討

移動局のGPS位置が補正された様子を、測位に使用され

た衛星の組み合わせとともに時系列的にFig.6-6に示す。同図は3D測位の場合である。レーザ位置と比較できた場合だけであること、調査ラインと調査ラインの間やDGPS処理ができなかったときは表示されていないことなどのため、完全な時系列表示ではないが、補正の様子を概ね知ることができる。同図の縦軸は位置誤差を、横軸はデータ番号を示す。最下部の横軸は、各調査ラインの範囲である。補正効

果を見やすくするため、基地局の緯度誤差を北に、経度誤差を東にそれぞれ50mずらした。GPS両局の緯度誤差、経度誤差の変動が大きな波状になっているが、これは主としてSAによるものである。両局の誤差の変動はほぼ同様で、GPS位置のほとんどが誤差20m以下に補正されたことを示している。

調査ライン2から調査ライン3に移る場合を除いて、調

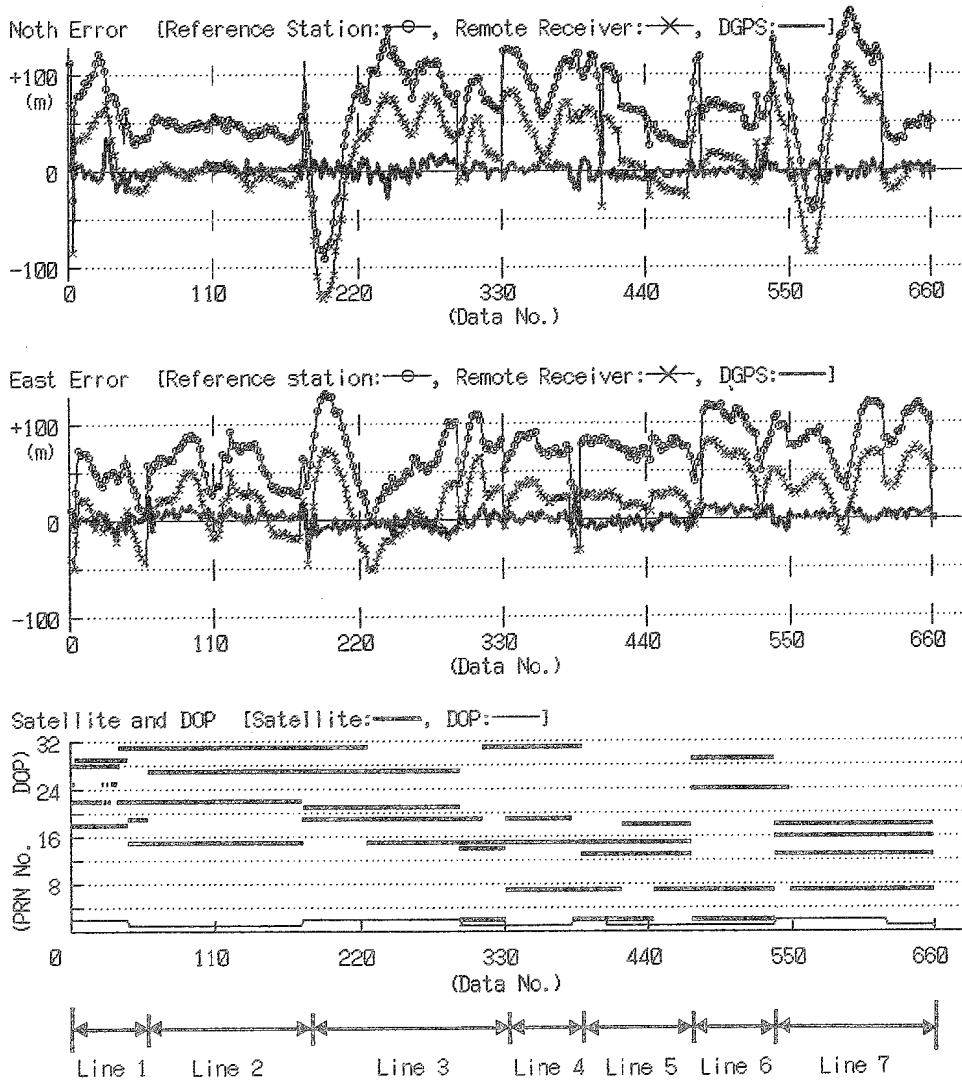


Fig. 6-6. Curves showing time series of North(upper) and East(center) errors by GPS and that of residual by DGPS. Lower portion of this figure shows satellites set and PDOP values.

査ラインと調査ラインの間で、衛星の組み合わせが変わっている。これはある一本の調査ラインの観測を終えて次の調査ラインに入るまで、時間的に約30分を要したためと考えられる。衛星の組み合わせが変わった場合のDGPS誤差の変化を、調査ラインごとに見ると、DGPS誤差が大きくなる場合とそうでない場合とがある。とくに、データ番号23~34番のように、短時間(約3分間)に何度か衛星が切り替わる場合には、DGPS誤差が大きくなる傾向が見られる。

このようなDGPS誤差の要因として、DGPS測位では、補正値を求めるための基地局のアンテナ位置の誤差、GPS両局それぞれの受信機の内部の誤差の違い、マルチパスなどが考えられる。また、レーザ測位では、基点位置の誤差、測位装置内部の誤差、レーザ測位データをもとに得られたGPSアンテナ位置の水平誤差、内装時計補正の誤差などが考えられる。

定点のDGPS測位の結果<sup>73)</sup>では、5チャンネル型受信機によるDGPS測位の2 drmsは16.8mで、また、柿原ら<sup>69)</sup>が海上航走時にDGPS仕様の受信機を用いて行った測位実験の2 drmsは15.1mであった。今回の2 drmsはこれらよりも大きい値を示しているが、上述のDGPS誤差要因を総合的に考慮すると、今回の3C測位によるDGPSの2 drmsは、17m

程度とみなしてよいのではないかと考えられる。

また、この定点DGPS測位<sup>73)</sup>では、受信機のチャンネル数が多くなるほど2 drmsは小さくなるという結果を得た。経緯度レベルのDGPSの測位精度は擬似距離補正によるDGPS<sup>69) 71)</sup>にくらべて劣っているが、最近、受信機内部のソフトの改良が進み、受信チャンネル数も増加しているので、例えば8チャンネル型受信機などを利用すれば、経緯度レベルのDGPSの測位精度はさらに向上するのではないかと考えられる。

基地局と移動局で、測位に使用された衛星が異なる場合の位置の補正についても検討を試みたが、2 drmsが97.3mで水平位置誤差分布に補正の効果は見られなかった。また、放射方向誤差の相対度数分布にも、緯度誤差および経度誤差の時系列的な検討でも補正の効果は認められず、測位に使用された衛星が異なる場合は、経緯度レベルのDGPS測位の効果を期待できないことが本実験でも確認された。

### 6.3.3 レーザ測位とDGPS測位の測得率

漁業調査や海洋調査を行う場合には、連続的な測位が要求されるが、レーザ測位にしてもDGPS測位にしても、設定

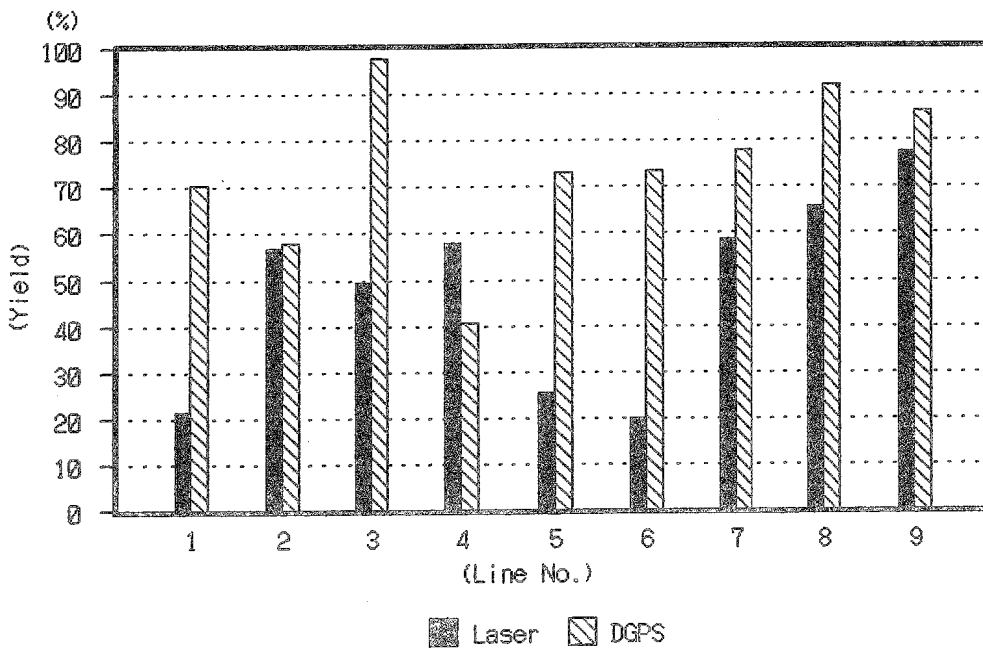


Fig.6-7. Comparison of yield of DGPS positioning and that of laser positioning.

されたサンプリングタイムどおりに位置が得られるとは限らない。そこで、サンプリングタイムどおりに得られたとした場合の位置の個数に対する実際の測得位置の個数の割合、すなわち位置の測得率を調べた。その結果をFig. 6-7に示す。

レーザ測位とDGPS測位の位置の測得率を各調査ラインごとにみると、ライン4を除いてすべてDGPS位置の方がレーザ位置より高い。総合的にみても、レーザ測位の測得率は48.0%、DGPS測位の測得率は75.2%で、DGPS測位の方が位置の測得率が高かった。

一般に、レーザ測位を行う場合には、レーザセンサの周囲に遮蔽物がないこと、天候の影響を受けないことなどが前提とされる。そのような場合には、装置の性能<sup>79)</sup>から、約90%以上の高い測得率を得る。今回、レーザ位置の測得率が低かった原因は、陸上追尾局の北および北西方向の水上岩や島により光路が遮蔽されたこと、調査ライン1、2、3の東西両端付近では船体構造物により光路が遮蔽されたこと、船体回頭時に一時的に反射プリズムを見逃したこと、断続的な霧雨によりレーザが妨害されたことなどである。とくに、ライン1、5、6では、霧雨のため、測得率が著しく低くなった。

経緯度レベルのDGPS測位を行うときには、GPS両局の単独測位で得られたデータのうち、同一測位時刻、同一衛星の組み合わせのものを用いる。ところが、両局それぞれの周囲の地形、建築物、構造物、受信信号のレベルなどの相違、両局のアンテナの距離、そのほか様々な条件により、捕捉される衛星の組み合わせが両局で異なることがある。そのようなときには、本手法のDGPS測位を行うことは不可能で、いくばくかの空白時間が発生する。

基地局周辺では南西方向に存在する仰角約14°の山により、低高度の衛星の電波が遮蔽されるが、海上の移動局周辺にはさほど高い障害物は存在せず、好条件で衛星からの電波を受信できる。今回、衛星の仰角と方位角のデータを取り込めなかったため断定できないが、DGPS測位の測得率が75.2%であった主な原因は、第5章で述べたように、移動局で受信された低高度の衛星からの電波が基地局では受信されなかったため、GPS両局で衛星の組み合わせが異なることがあったからであろうと考えられる。

6.3.4 DGPS測位の漁場探査における有効性について

ライン1とライン7を調査中の天鷹丸の航跡の一部をFig. 6-8に示す。レーザ位置と同時刻のGPS位置およびDGPS位置を、30秒または1分間隔で記入した。同図には記入して

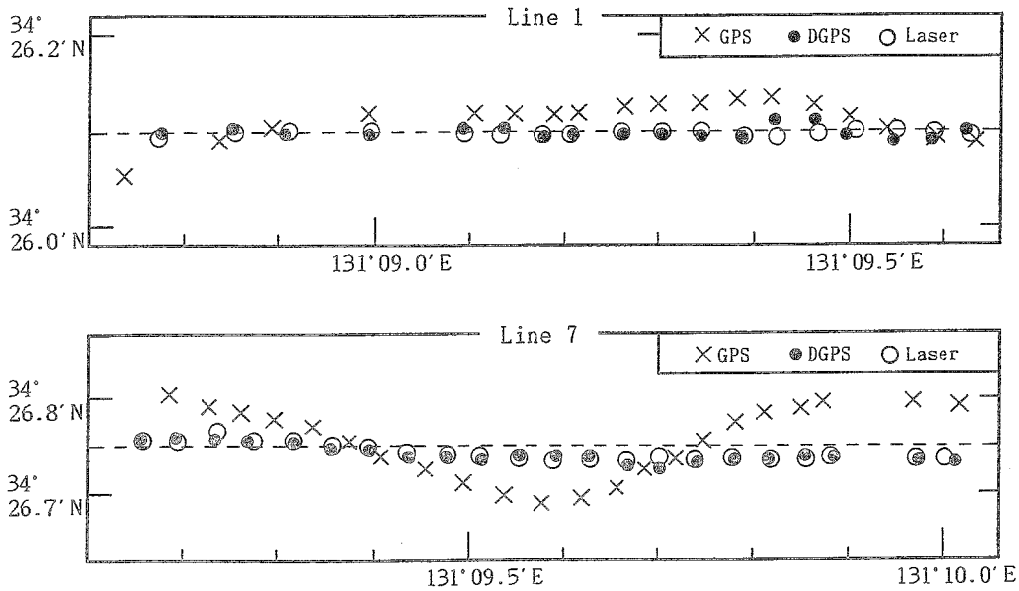


Fig. 6-8. Examples of positions fixed by GPS, DGPS and laser positioning system in surveyed area.



いないが、レーザ測位が中断されたときであってもGPS位置およびDGPS位置は得られていた。あらかじめ設定した調査ラインを破線で示す。同図より、GPS位置に現れたSAの影響とDGPSによる補正の効果が認められる。

3 D測位のDGPS位置には40m近い誤差が現れることがある。しかし、漁場探査を行う場合、調査ラインを直線で設定することが多く、Fig. 6-8に示されたライン1の左から13点目と14点目のDGPS位置のように、連続性から比較的離れた位置は大きめの誤差を含んでいると容易に判断できる。また、4ノット程度の船速なら、10秒間の航程が約20.6mであるから、得られた位置を15~30秒の間隔で選択すれば、船位の記入において、それらの位置が時系列的に前後するような矛盾は起こらないであろう。

ところで、魚礁設置などの海中土木建設工事では、位置誤差1m以下の精度が望まれる。一方、魚礁設置後の探査では、計量魚群探知機を使用した魚群密度の計測や魚群行動の観測など、集魚効果を調査することが多く、位置誤差20m以下の精度で満足できる。したがって、位置誤差1m以下の精度が要求されるときにはレーザ測位を行い、20m程度の誤差が許容される場合、レーザ位置の測得率の低下が懸念される場合、漁場探査海域までの距離がレーザ測位装置の測距能力を超えている場合には、DGPS測位を行うことにより、レーザ測位の短所が補われ、効果的な船位測定ができると考えられる。

また、漁場探査の場合だけでなく、DGPS仕様でない受信機を備えた船が、偶然、発見した天然礁の位置を正確に知りたい場合にも、本手法のDGPSを応用できるであろう。このようなときには、受信機に表示された位置と測位に利用された衛星の組み合わせを、秒オーダの時刻とともに記録しておき、付近の基地局の測定値を利用して補正を行えば、誤差約20m以下の精度の位置を得ることも可能である。

経緯度レベルのDGPS測位の場合、精度は擬似距離補正法<sup>69) 71)</sup>にくらべて劣っている。しかし、測位の目的、海域、測位時の天候、測位精度、位置の測得率、測位装置の性能および費用などを考慮してレーザ測位と比較すると、本手法のDGPS測位は、沿岸や沖合の漁場探査における船位測定方法として実用的で、将来、本格的なDGPSが実現した後も応用できると考えられた。

## 6.4 ま と め

魚礁調査中のレーザ測位にあわせて、経緯度レベルのDGPS測位を行い、測位精度と漁場探査における有効性について検討した。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) 単独測位ではSAの影響を受けて最大誤差が約150mにおよび、2 drmsは116.7mであった。
- (2) 3 D測位のDGPS位置の誤差は40m以下、2 drmsは19.3mで、経緯度レベルのDGPS測位は約4ノットの速力で航行中の船舶の位置補正に有効である。
- (3) 経緯度レベルのDGPS測位は、障害物の存在や不順な天候など、不利な条件下で行われるレーザ測位を補助できる。
- (4) 経緯度レベルのDGPS測位は、沿岸や沖合の漁業、また、そのような海域の漁場探査における船位測定方法として有効である。

## 第7章 経緯度レベルのDGPS測位の 実用有効範囲

### 7.1 はじめに

これまで報告された経緯度レベルのDGPS測位<sup>70) 73) 74)</sup>では、基地局から移動局までの距離が約30海里以下と比較的に近い。DGPSで位置を求める場合、要求精度にもよるが、基地局を中心とした利用範囲は広いほど実用的である。米国の疑似距離補正によるDGPSのシステムでは、100～300海里程度の間隔で沿岸に基地局が配置され、この場合のDGPS位置の精度は2 drmsで約9 mとされている<sup>3)</sup>。

疑似距離補正のDGPSに利用される受信機はチャンネル数が多く、両局で捕捉された衛星のなかから、共通のものを選択して疑似距離を補正し測位計算を行う。一方、経緯度レベルのDGPS測位では、基地局で測定された位置の誤差が補正值となるので、基地局と同じ衛星の組み合わせで得られた移動局の位置しか経緯度の補正を行えない。第3章で述べたように、衛星の配置により位置誤差の分布傾向が異なるからである。両局の衛星の組み合わせが同じになるかどうかは、周辺の地形や建物などの状況にもよるが、両局の距離も影響する。

そこで、基地局から約160海里隔たった高松港と約220海里隔たった神戸港で天鷹丸が岸壁係留中、経緯度レベルのDGPS測位を行い、定点観測によりDGPS測位の実用有効範囲を測位精度と測得率の両面から検討した。さらに、天鷹丸が瀬戸内海の狭水道を航行中に得られたDGPS位置と地物のジャイロコンパス方位とレーダ距離によって得られた実測位置の精度を比較した。

本章では、経緯度レベルのDGPS測位の基地局からの実用有効範囲と、沿岸航海でよく行われる船位決定法の精度について述べる。

### 7.2 装置と方法

#### 7.2.1 測位装置と測位方法

本章のDGPS測位において使用された受信機は、定点におけるDGPS測位<sup>73)</sup>で、最も効果的な補正ができた5チャンネル多重受信方式の船用GPS受信機(日本無線, JLR-4110)である。

測位実験の概要をTable 7-1に、また、DGPS測位を行った海域をFig. 7-1に示す。基地局のGPS受信機を水産大学校

電波計器実験室の受信機とし、移動局のGPS受信機を同校練習船天鷹丸の受信機とした。そして、天鷹丸の第50次航海の途中、高松港で2 D測位、神戸港で3 D測位の定点観測を行った。いずれも岸壁係留中であつた。また、移動中の観測では、来島海峡航行中と高松港出港中に3 D測位によりDGPS測位を行った。

測位にあたり、DOP値のレベルを、本受信機のDOP値選択機能の最大範囲であるDOP値20以下に設定し、4秒間隔で出力される測位時刻、緯度、経度、高度、針路、速度、DOP値、衛星番号、信号レベル、ステータスなどのデータを、RS232Cを介してパーソナルコンピュータに取り込み、フロッピディスクに記録した。この方法で得られたGPS両局のデータを用いて、天鷹丸の位置をオフラインで補正した。

補正值を求めるための基地局の位置は、水産大学校に設置されたGPSアンテナの位置(日本測地系で34°03.9604' N, 130°53.7031' E)とした。このアンテナ位置は、レーザ測距儀(アトラス・エレクトロニク・ジャパン・リミテッド, アトラス LARA90-20)で測定された下関市吉見港北防波堤灯台からの距離と、見通し線の方位から求められた。レーザ測距儀の測距誤差は5 cm以下<sup>31)</sup>であり、方位誤差を0.1°以下とすると、総合的に判断されたアンテナ位置の誤差は1.5 m以下で、この誤差を無視することにした。

基地局のアンテナ高さは平均海面より32 mで、その周辺には、北東、東、南西の各方向に、仰角がそれぞれ約6°, 9°, 14°の山がある。

次に、高松港および神戸港停泊中に実施した移動局のDGPS位置の精度評価のため、天鷹丸のGPSアンテナ位置をそれぞれ10000分の1および11000分の1の海図から読み取った。この場合にも、約2 mの読み取り誤差を無視した。

天鷹丸のGPSアンテナ高さは海面より17 mで、高松港の天鷹丸の周辺には、東方向に屋島(293 m)、北西方向に女木島(216 m)、そして南方向の岸壁上にコンクリート製の構造物が存在したが、仰角が10°を超えるような電波遮蔽物はなかった。神戸港では天鷹丸の至近に高層建築物や高架道路が存在した。

来島海峡航行中、方位と距離による実測位置を求めるため、沿岸の顕著な地物のジャイロコンパス(横河北辰電機, CMZ-300)方位とレーダ(日本無線, JMA-850-9CA, 3 cm波)距離を測定した。測定上の誤差を小さくするため、目標として、方位変化が少なく移動局からの距離が1海里以下にある地物をできるだけ選んだ。さらに、目標までの距離にあわせて、レーダ画面のレンジを0.5～1.5海里的範囲で

Table 7-1. Method of experiment

	Date	Dimension	Reference Station	User's Receiver
Fixed station	'93/July 9	2 D	N, F, U.	Tenyou-maru (Takamatsu port)
	July 11	3 D	N, F, U.	Tenyou-maru (Kobe port)
Moving condition	'93/July 9	3 D	N, F, U.	Tenyou-maru (Kurushima channel)
	July 11	3 D	N, F, U.	Tenyou-maru (Takamatsu port)

N, F, U. : National Fisheries University

2 D : Two dimensional positioning

3 D : Three dimensional positioning

適宜選択した。そして、レーダ距離の測定者が0.01海里の精度で距離を測定できたと判断した瞬時に合図を行い、同時に時刻と地物のジャイロコンパス方位を読み取った。この場合のサンプリングタイムは約30秒または約1分間隔とした。

なお、ジャイロエラーとレーダ距離の定誤差については、下関港、高松港および神戸港の停泊中に測定し、それぞれ+0.3°と+20mを得た。

来島海峡航行中の天候は霧、風向NNE、風力2、海況1、視程2、潮流は南流の初期、流速は3~4ノットであった。また、高松港出港中の天候は晴、風向NNE、風力1、海況1、視程5であった。

GPS両局間の直線距離は、基地局から来島海峡までが約195km(約105海里)、基地局から高松港までが約295km(約160海里)、基地局から神戸港までが約400km(約220海里)である。

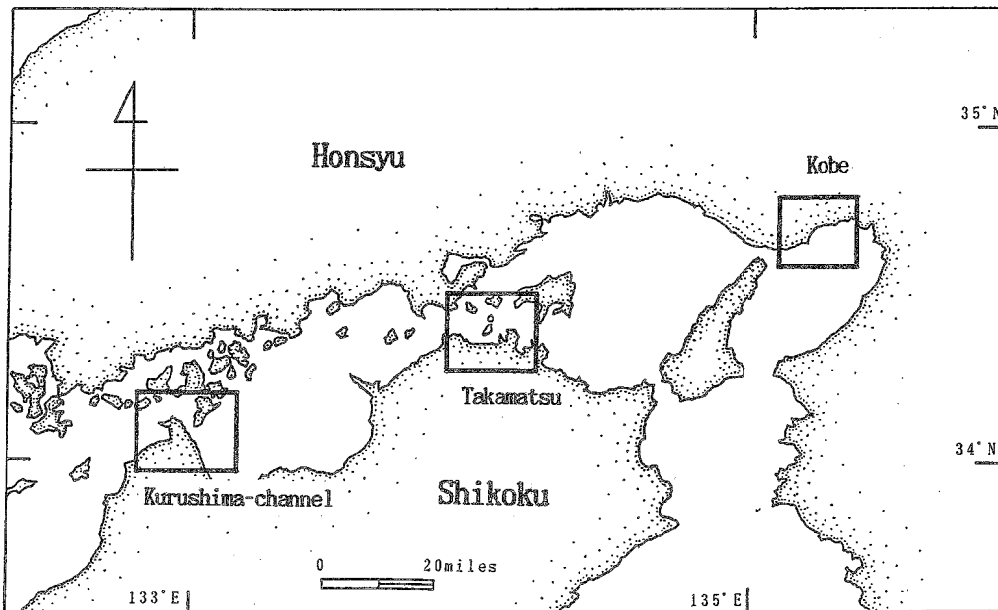


Fig. 7-1. Seto Inland Sea, areas of DGPS positioning.

7.2.2 データの処理

GPS両局で得られたデータのうち、同じ時刻に同じ衛星の組み合わせで測位されたときのデータを用いて、天鷹丸の位置を第6章の(6-3)式および(6-4)式により補正しDGPS位置とした。そして、海図から読み取った天鷹丸のGPSアンテナ位置を基準にして、GPS誤差およびDGPS誤差を求めた。

次に、来島海峡航行中に測定した顕著な地物のジャイロコンパス方位とレーダ距離による実測位置を、15000分の1

の海図上に作図し、地物利用による位置の経緯度を求めた。この位置を以後、ジャイロ・レーダ位置ということにする。

ジャイロ・レーダ位置とDGPS位置を比較するには、両者の測位時刻の同時性が必要である。両者の時刻が同じでない場合には、ジャイロ・レーダ位置の時刻と同じ時刻のDGPS位置を比例計算で求め内挿した。内挿による誤差はほとんどないと考えてよい。

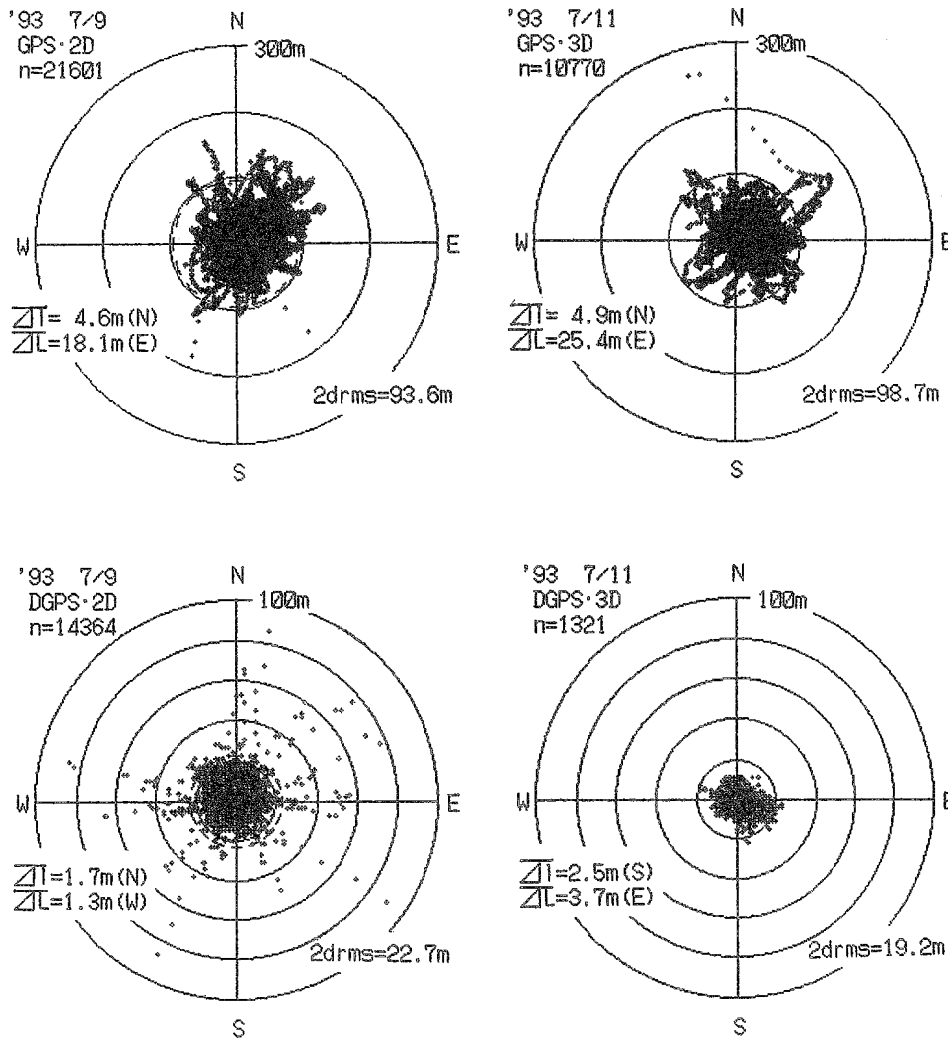


Fig. 7-2. Position error distribution by GPS and DGPS.

### 7.3 結果と考察

第5章と第6章では、2 drms 20 m以下の精度と66.9%の測得率が得られたことを述べた。そこで、衛星数が増えたことや基地局アンテナ周辺の地形を考慮した上で、DGPS誤差の2 drms 20 m以下の測位精度と、70%以上の測得率が期待できることを限界と仮定して、経緯度レベルのDGPS測位の実用的な有効範囲を検査した。

#### 7.3.1 高松港および神戸港停泊中の DGPS 測位の結果

高松港および神戸港における測位結果を、位置誤差の水平分布にしてFig. 7-2に、また、放射方向誤差の相対度数分布にしてFig. 7-3に示す。両図とも、上部は単独測位を下部はDGPS測位の結果を示す。また、左は高松港の2D測位、右は神戸港の3D測位の結果である。Fig. 7-2には、GPS位置、DGPS位置のデータ数(n)、平均位置誤差( $\overline{|\Delta l|}$ ,  $\overline{|\Delta L|}$ ),

2 drmsもあわせて記入した。

高松港の2D測位では、比較的広い範囲にDGPS誤差が分布している。この傾向は第5章および第6章で述べたことと同様である。一方、神戸港の3D測位では、基地局からの距離が高松港よりも遠いにも関わらず、2 drmsは高松港より小さく19.2 mになった。

放射方向誤差の相対累積度数も、第5章および第6章と同様の傾向<sup>73) 74)</sup>を示し、DGPS測位では、5 m未満が約30%、10 m未満が約70%、15 m未満が約90%であった。

下関、高松、神戸における単独測位の平均位置は、海図から読み取ったアンテナ位置より、それぞれ約20 m, 18 m, 25 m東に偏位している。この偏位量は単独測位の誤差となるが、DGPS測位によりほとんど相殺された。しかし、完全ではなく残差があったため、高松では1.3 m西、神戸では3.7 m東の平均位置誤差として現れた。また、精度評価の基準としたアンテナ位置の読み取り誤差の影響なども考えられ、

このような誤差が高松港や神戸港の2 drmsにいくらか影響していることも考えられる。

以上より、DGPS測位による経緯度の補正は、精度の点では基地局から神戸港の距離までは効果的であったと考えられる。しかし、同じデータを使って測得率の検討を行うには基地局のデータ数が十分でなかったため、高松港で、3D測位によりDGPS測位を行ったとした場合の、測位精度や位置の測得率について考察した。

まず、測位精度について述べる。第5章の定点におけるDGPS測位や第6章の漁場探査の場合、3D測位のDGPS誤差の2 drmsは2D測位のときの0.70~0.75倍の大きさである<sup>73) 74)</sup>。これを用いると、高松港の3D測位によるDGPS誤差の2 drmsは16~17 mになる。この値は下関における定点DGPSの結果<sup>73)</sup>と比較すると、ほぼ同じかまたは少しよい。しかし、下関のDGPS誤差の2 drms 16.8 m<sup>73)</sup>と神戸港の2 drms 19.2 mの差が基地局からの距離によるものとする、高松港では3D測位のDGPS誤差の2 drmsは18.5 mになる。したがって、高松港の3D測位によるDGPS誤差の2 drmsは16~18.5 mの範囲であろうと考えられるが、ここでは最

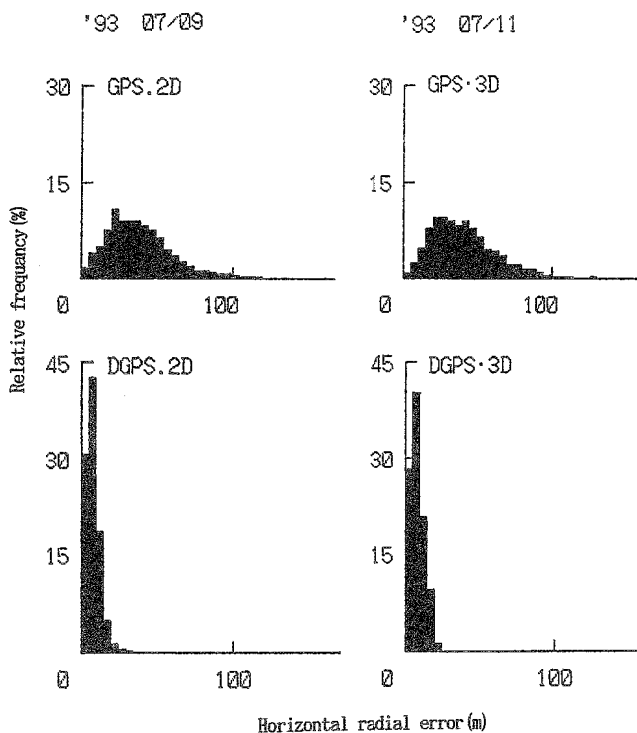


Fig. 7-3. Relative frequency distribution of horizontal radial errors by GPS and DGPS.

大の18.5mを用いることにした。

神戸港のDGPS誤差の2 drms値は、下関の場合より2.4m大きい。この精度劣化の原因が基地局からの距離の増加なら、100海里あたり約1mの劣化となり、柿原ら<sup>22)</sup>の測位結果に近い。

次に、測位時間、サンプリングタイムおよび実際に得られたDGPS位置の個数をもとに測得率について検討した。

高松港では、2D測位で行われたDGPS位置の測得率は66.5%であった。これまでの実験結果では<sup>73) 74)</sup>、経緯度レベルのDGPS測位の場合、3D測位の測得率が2D測位よりも勝

っていた。第5章で述べたように、下関における定点DGPS測位<sup>73)</sup>の場合、3D測位の測得率は2D測位の約1.8倍である。また、第6章で述べた漁場探査<sup>74)</sup>におけるデータを検討したところ、3D測位によるDGPS位置の測得率は2D測位の場合の1.2倍であった。この例を高松港にあてはめると、同港における2D測位のDGPS位置の測得率は66.5%であるから、3D測位を行えば測得率は約80%を期待できることになる。後述するが、同港港内を航行中に行われたDGPS測位の結果では、測得率は約77%であった。

### 7.3.2 高松港出港中のDGPS測位の結果

高松港出港中のGPS位置とDGPS位置による天鷹丸の航跡をFig. 7-4に示す。同図より航行中の単独測位による位置誤差の様子が概ねわかる。GPS位置とDGPS位置の差は最大で68.7mであった。

同図に示すように、高松港出港直後約3分間、DGPS位置が得られなかった。GPS両局周辺の地形の影響か両局間の距離の影響を受けて、移動局で測位に利用された衛星の組み合わせが基地局で利用された衛星の組み合わせと同じにならなかったことが原因と思われる。

このDGPS測位は、7月11日10時09分28秒から10時24分36秒までの間実施された。サンプリングタイムは4秒、単独測位のデータは228個、DGPS測位のデータは176個であったから、測得率は77.2%である。高松港停泊中の3D測位によるDGPS位置の測得率は、同港内航行中の測得率に近い。

以上のことから、水産大学校に基地局を設置して行った経緯度レベルのDGPS測位は、神戸港ではデータ不足のため有効範囲と断定できないが、高松港までは有効範囲とみなすことができる。したがって、基地局を中心とした距離約160海里を半径とする海域は、基地局の有効なカバーレ

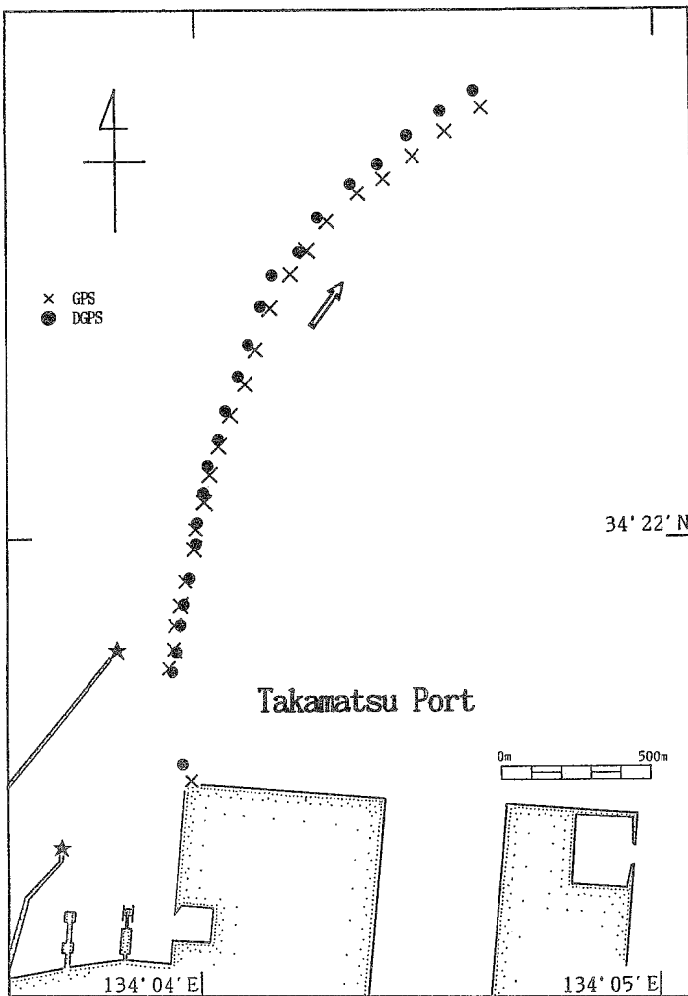


Fig. 7-4. Positions fixed by GPS, DGPS, and gyro-compass and radar in Takamatsu port.

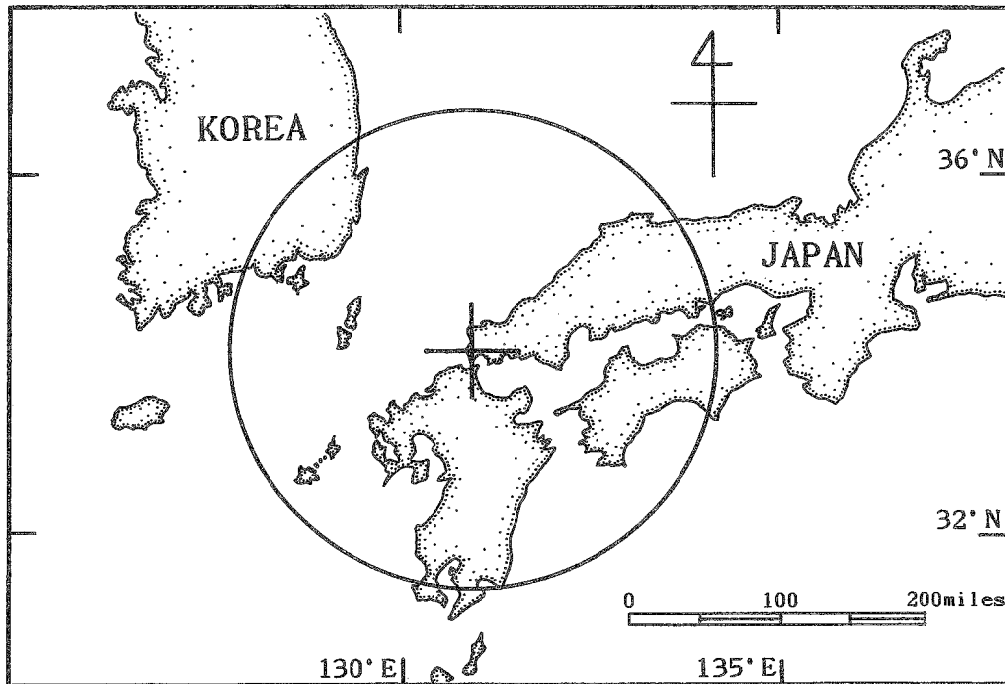


Fig. 7-5. DGPS coverage area when the reference station was located at National Fisheries University.

ジェリアとなる。

水産大学校を中心とした半径160海里の海域を、カバーレッジエリアの一例としてFig. 7-5に示す。この範囲では、GPSの単独測位で得られた位置の誤差を約20m以下に軽減し、位置の精度を向上させることができる。

### 7.3.3 沿岸航海中の方位距離による実測位置との比較

沿岸航海の船位決定方法として、クロスベアリング、方位と距離による測位方法、または距離による測位方法が一般に用いられる。これらの測位方法による位置の誤差は停泊中なら求めやすいが、航行中では把握しにくい。そこで、経緯度レベルのDGPS測位を応用して、来島海峡航行中に、測位目標の方位と距離から得られた位置の精度評価を試みた。

来島海峡航行中の天鷹丸の航跡をFig. 7-6に示す。○印で示すジャイロ・レーダ位置は、顕著な水上岩、灯台などのジャイロコンパス方位と、顕著な岸線、岬角までのレーダ距離をもとに海図に作図して得られた。

DGPS位置を基準にして、ジャイロ・レーダ位置誤差の水

平分布と、放射方向誤差の相対度数分布をFig. 7-7に示す。

同図によれば、ジャイロ・レーダ位置誤差の2 drmsは48.2mである。また、放射方向誤差の相対度数は、20m以上25m未満のときが最も大きく25.0%、その相対累積度数は、25m未満のとき60.7%、40m未満のとき96.4%であった。この中には、当然DGPSの誤差の影響が含まれる。来島海峡におけるDGPSの精度を基地局からの距離に応じて求めると、2 drmsは18.0mである。

次に、ジャイロ・レーダ位置の誤差について考察を加えた。ジャイロ・レーダ位置には、ジャイロエラーとレーダ測距の定誤差を取り除いても、方位と距離測定上の誤差、測定時刻の誤差、海図の精度、作図上の誤差および経緯度読み取り上の誤差が介入する。

天鷹丸は来島海峡を速力10~12ノットで航行した。この場合、物標の方位測定誤差は船が停止しているときよりも大きくなりやすい。しかし、方位測定に利用したレピータコンパスのカード外周の目盛りの1°に相当する円弧の長さは1.6mmであり、熟練者の観測なら方位測定誤差が0.3°を超えることはない<sup>83)</sup>と考えられる。1海里離れた目標の方位

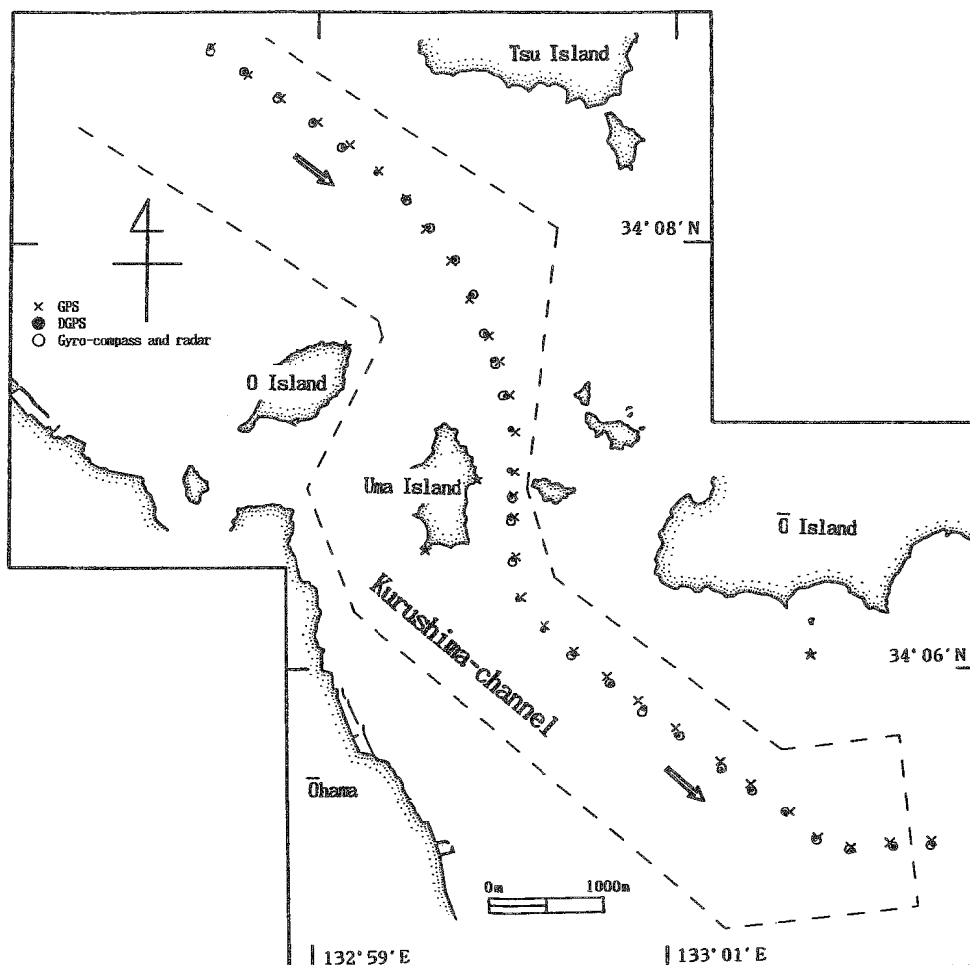


Fig.7-6. Positions fixed by GPS, DGPS, and gyro-compass and radar in Kurushima-Channel.

測定誤差が $0.3^\circ$ なら、約10mの偏位誤差が観測者の位置に介入する。

レーダ測距のときは、目標までの距離に応じて、0.5海里レンジか1海里レンジが多く使用された。測距に使用したレーダの画面を0.5海里レンジとしたとき、距離マーカの半径は0.01海里につき3.7mm変化する。また、1輝点につき2.5mの誤差である。さらに、測距による最大の誤差を距離の0.2%<sup>34)</sup>に見積もった。

そこで、ジャイロコンパスによる方位読み取り誤差を約 $0.3^\circ$ 以下とし、測定時刻の誤差を約0.5秒以下、レーダ距離読み取りの誤差、海図編纂上の誤差、海図の海岸線とレー

ダ映像の整合の度合いによる誤差などを総合すると、方位と距離測定上の誤差は放射方向誤差で約30m以下と考えられる。

また、作図上の誤差、さらにジャイロコンパスの設置場所とレーダのスキャナの設置場所の違いによる誤差などを約10mに見積もると、来島海峡航行中のジャイロ・レーダ位置の誤差の95%は、ほぼ40m以下になると考えられ、この値は狭水道航行中の船位誤差の一参考値になると考えられる。

奥田ら<sup>36)</sup>の研究においても、方位とレーダ距離で得た位置を基準にGPSの精度を評価した場合、GPS位置誤差には



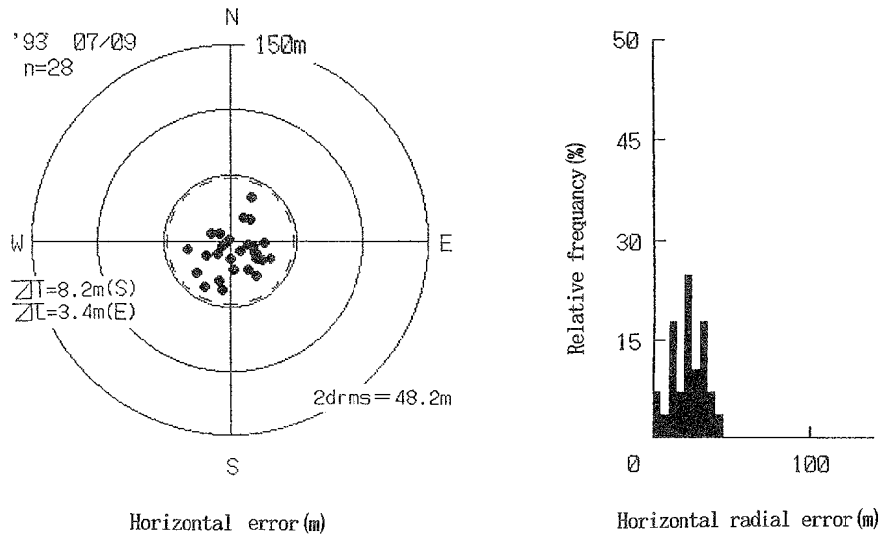


Fig. 7-7. Distribution of errors of position fixed by bearing with gyro-compass and Distance with radar.

レーダの距離誤差の影響が現れたと述べている。また、長岡ら<sup>7)</sup>は経緯度レベルのDGPS測位で得られた位置を基準にして、航空管制用レーダのバイアス誤差の更正に利用し、よい結果を得ている。

来島海峡航行中のジャイロ・レーダ位置は、2名の熟練した観測者ができるだけ精度よく観測した方位と距離のデータを用いて求められた。しかし、沿岸航海における一般の実務では、船位決定作業を1名で行い、しかも、観測者の技量にともなって、測位目標の方位変化の大小や距離による偏位誤差などが、コンパスやレーダの誤差とともに位置誤差に影響する。そのため、ジャイロ・レーダ位置の誤差をさらに大きく見積もる必要がある。

以上述べたとおり、経緯度レベルのDGPS測位では、通常の沿岸航海において、ジャイロコンパスやレーダを使用した船位決定方法より、精度のよい位置が得られることが明らかになった。来島海峡航行中のDGPS測位は、7月9日09時19分32秒から10時03分48秒まで行われた。4秒のサンプリングタイムで単独測位のデータは665個、DGPS測位のデータは663個であったから、DGPS位置の測得率は極めて高く、99.7%であった。

#### 7.4 まとめ

経緯度レベルのDGPS測位における基地局のカバーレッジエリアを求め、その海域を航行中、沿岸地物の方位と距離で得られた船位の誤差を検討した。その結果は次のように要約される。

- (1)経緯度レベルのDGPS測位において、基地局のカバーレッジエリアは、基地局から少なくとも半径160海里の範囲までは有効であることが確認された。
- (2)カバーレッジエリア内では、2 drms 18.5mの測位精度と80%以上の測得率が期待できる。
- (3)経緯度レベルのDGPS測位で得られた位置は、ジャイロ・レーダ位置より精度が高い。

## 第8章 総 括

単独測位用のGPS受信機を利用し、基地局で観測された経緯度の誤差を補正值として移動局の位置の精度を高める、経緯度レベルのDGPS測位に関する研究を行った。

この方法でDGPS測位を効果的に行うには、まず、GPSの単独測位の実態を十分知っておく必要がある。そこで、1987年から汎用的な船用GPS受信機を利用して単独測位の実験を行い、測位可能な時間、衛星の組み合わせや配置による測位精度と位置誤差分布の特徴、DOP値別の位置誤差の分布状況、DOP値の時系列的な変動を把握した。この時期のGPSには、まだSAが実施されていなかったため、測位精度に関する基礎的な資料が得られた。とくに、観測者上空の衛星の配置による位置誤差の分布傾向により、経緯度レベルのDGPS測位が、同一時刻、同一衛星の組み合わせのときしか行えないことが確かめられた。また、DOP値3以下のときに得られた速度データは、0.1 m/sec以下のものが約92%で、精度がよいことがわかった。

その後、1990年3月25日以降、ブロックII衛星に操作されているSAの影響を調べるため、約15ヶ月間にわたり、繰り返し測位実験を行った。そして、SAが解除されているときと実施されているときの位置誤差の分布、速度誤差の分布、緯度誤差、経度誤差、速度誤差の時系列的な変動やその周期などを調べ、SAによる誤差の実態について検討した。

SAが解除されているときの2 drmsは約50 m程度であった。この測位精度は取扱説明書に記載された値より悪いが、測位に利用できた衛星の数が少なかったためと考えられた。SAの計画段階では、SAの影響を受けると誤差の2 drmsは約100 mに劣化すると公表されていた<sup>11)</sup>が、測位実験の結果では、時折600 m以上の位置誤差が現れたり、2 drmsが140 mを超えることがあるなど、公表値より大きな誤差も現れた。また、SAが解除されているときと実施されているときの平均位置の差は、DOP値が2以下では、約3 mであることもわかった。

以上のような単独受信機によるGPS測位の実態を把握した後、経緯度レベルのDGPS測位について検討した。

まず、二定点で測位実験を行い、一方の定点(基地局)で得られた経緯度の誤差を補正值として、他の定点(移動局)の位置を補正し、停止中の移動局の位置誤差の分布を調べた。その結果、受信チャンネル数の多いGPS受信機を用いて行った三次元測位の場合が、最も効果的に補正された。この場合、約85 mであった単独測位による位置誤差の2 drmsは、DGPSにより16.8 mに軽減されたため、以後、

この2 drms値を基準として、経緯度レベルのDGPS測位の有効性を評価した。

次に、経緯度レベルのDGPS測位を漁場探査中の船位測定に応用し、同時に行ったレーザ測位と実用性を比較した。レーザ測位の場合、cmオーダーの誤差で測位精度は極めてよいが、遮蔽物のほか、トラッキングのミス、そして、雨や霧などの不順な天候による追尾障害、また陸上局設置上の困難性などの問題があった。一方、DGPS測位にはレーザ測位のような問題は発生しない。漁場探査中のDGPS誤差の2 drmsは19.3 mであったが、DGPS位置に含まれる各種の誤差を考察すると、このときの2 drmsは約17 mと考えられた。漁場探査には、数cmの位置精度が要求されるものから数10 mの精度でよいものまで種々あるが、約20 mの位置誤差が許される場合、経緯度レベルのDGPS測位は、レーザ測位より実用上はるかに有効であると考えられた。

本研究の最終目標として、経緯度レベルのDGPS測位の実用有効範囲を確かめた。まず、基地局を設置した下関から約160海里離れた高松港と約220海里離れた神戸港の岸壁に、水産大学校練習船天鷹丸が係留中、DGPS測位を行い、基地局の有効カバーレッジエリアについて検討した。高松港では2 D測位によりDGPS測位を行ったが、その結果と神戸港の3 D測位のDGPS誤差をあわせて考察すると、高松港停泊中に3 D測位によりDGPS測位を行った場合、DGPS位置の誤差の2 drmsは18.5 m、測得率は約80%が期待できると考えられた。

次に、高松港を速力約12ノット以下で出港中、DGPS測位を行い、天鷹丸の航跡を検討した。このときの測得率は77.2%で、基地局を中心とした半径約160海里以内の範囲では、経緯度レベルのDGPS測位は実用上有効であると考えられた。

このカバーレッジエリア内の来島海峡を航行中に、沿岸地物を望むジャイロコンパス方位とレーダ距離による測位と、経緯度レベルのDGPS測位を行い、両者を比較して、沿岸地物の方位距離による実測位置の精度を検討した。そして、来島海峡のような狭水道航行中に、地物の方位と距離による測位方法で得られた位置の誤差について、一つの参考値を得ることができた。

現在、わが国でもリアルタイムDGPSが検討され、平成7年末から実験が開始される予定である。これとは別に、北九州の関門地区ではDGPSを行う団体組織がすでに活動し、cmオーダーの精度のDGPS測位が浚渫工事に利用されている<sup>85) 86)</sup>。

しかし、関係機関によるDGPSのシステムが完成された

としても、沿岸の小型漁船や小型の船舶、また、一般船舶でも、装備上の問題や経済的な理由から、従来の単独測位を行うことが多いと考えられる。これまでほとんど論じられることのなかった本手法のDGPS測位は、今後も単独測位の受信機しか搭載していない船舶で測定された位置の誤

差を、後処理によって約20 m以下に軽減する場合に有効で、偶然知った天然礁や、沈船のような航行障害物の位置の精度を向上させる場合などに利用できる。

## Summary

### Studies on Differential GRS of Correcting Latitudinal-and-Longitudinal errors

The use of differential GPS (hereinafter referred as DGPS) can improve the accuracy of the GPS positions under the influence of intentionally operated Selective Availability (hereinafter referred to as SA). One of the simpler and more economical methods DGPS is the introduction of an off-line system of DGPS on correcting latitudinal-and -longitudinal errors (hereinafter referred to as position-correction DGPS) by using general marine GPS receivers. Thus, the present research focuses on the efficiency of the position-correction DGPS.

Prior to investigating the efficiency of DGPS positioning, the statistical nature of the single GPS data was investigated. The data used have been collected since 1986. The data under the influence of SA-on were compared with those of SA-off. The results obtained in the present studies showed occasionally larger error than the nominal values under the influence of SA-on ; maximum horizontal error is more than 600m, or 2 drms (radius of 95% probability error circle) exceeds 100m. Taking the results obtained above into consideration, the position-correction DGPS data were collected and the validity was described below.

Firstly, the position data were collected at two different fixed points whose positions are known. Latitudinal-and-longitudinal deviations from the true position at one fixed point (reference station) were used as corrections, and then the positions observed simultaneously at the other fixed point (subject to be used as the mobile station in practical use) were corrected. The results showed that most effective correction was found by the three dimensional positioning method using a 5-receiving-channel GPS receiver. In this case, the error decreased down to 16.8m in terms of 2drms.

Secondly, the position-correction DGPS were applied to positioning of a research ship at a fishing ground. The corrected positions were compared with those determined simultaneously with a laser positioning method. The DGPS error of position of the research ship 19.3m in terms of 2drms. If about a 20m position error is allowable in research at a fishing ground, the position-correction DGPS is much more effective than laser positioning in practical use, because larger probabilities of data acquisition in the position-correction DGPS are expected.

Lastly, the available range, which is the upper limit of distance between the mobile and reference stations for the practical and effective use of the position-correction DGPS, were tested. The position-correction DGPS measurements were carried out when the ship was moored in two ports were 160 nautical miles away from the reference station. From the experimental results, it is concluded that as long as the distance between the reference and the mobile stations is in the range of within 160 nautical miles, the DGPS errors anticipated are 17-19m in terms of 2drms.

The results obtained here suggest that the application of the position-correction DGPS is effective for reducing position errors down to less than 20m in the range of 160 nautical miles from the reference station.

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、終始温かい御指導をいただくとともに、本論文の御校閲をいただいた東京水産大学海洋生産学科教授濱田悦之博士に謹んで感謝の意を申し上げます。さらに、本論文の取りまとめにあたり、種々のご指導をいただいた同教授佐藤 要博士、同教授小池孝和博士、同教授中村善彦博士、同助教授柿原利治博士、そして多くの激励の言葉をいただいた同講師酒井久治博士、同助手武田誠一博士に厚くお礼申し上げます。

また、本論文を御校閲していただいた上、適切な御助言をいただいた水産大学校教授杉原滋彦博士、中田 裕教授に厚く御礼申し上げます。とくに、中田 裕教授には、終始温かい御理解と有益な御助言、御激励をいただくとともに、数多くの便宜を図っていただき、御高配に対し厚く御礼申し上げます。

次に、本研究に御理解をいただき、GPS受信機を快く貸与していただいた株式会社ジェーアールシーエス、特機営業部部長田中 力氏、同部次長磯辺 敏氏、適切な御助言をいただいた同社三鷹製作所北條晴正氏、GPSに関する情報を提供していただいた同社鹿児島支店佐古秀美氏に厚く御礼申し上げます。

以上の方々に加えて、水産大学校練習船耕洋丸および天鷹丸の乗組員の方々に御礼申し上げます。著者は本研究を始めた当時、天鷹丸の次席一等航海士であったが、研究を遂行するにあたり、練習船の方々には多くの御協力をいただいた。水産大学校練習船天鷹丸隅川芳雄元船長、同耕洋丸乾 栄一前船長、同耕洋丸久保田勝彦船長、水産庁九州漁業調整事務所白鷗丸長友洪太船長、水産庁北海道区水産研究所北光丸貞包弘之船長には、研究を進めるにあたり多くの便宜を図っていただいた。さらに、耕洋丸田測清春首席一等航海士、耕洋丸実籾 了専任教官、天鷹丸水谷壮太郎首席一等航海士の三氏には、共同研究者として数々の貴重な御助言をいただいた。以上の方々と、耕洋丸および天鷹丸の乗組員の方々に心より御礼申し上げます。

最後になりましたが、データの収集に惜しみない御協力をいただいた水産大学校漁業学科昭和60年度入学生諸君、同専攻科船舶運航課程平成5年度入学生諸君、新潟県立海洋高等学校伊藤 東助手、水産大学校漁業機器学講座平成5年度学生諸君、さらに本論文の作成に種々ご協力いただいた漁業学科平成3年度入学生入野寿就君、同平成5年度入学生川上千鶴君、日影忠久君、同平成6年度入学生小貫真理子君、小室美保子君、木村愛子君に厚く御礼申し上げます。

## 引用文献

- 1) 飯田嘉郎：1984. 航海術史. 東京. 出光書店. pp1-21
- 2) 飯田嘉郎：1984. 航海術史. 東京. 出光書店. pp444-484
- 3) A. Brown：1989. Extended Differential GPS. Journal of ION. 36. NO4. pp265-285
- 4) 木村小一：1987. NAVSTAR/GPSの開発とそのシステム. NAVSTAR/GPS<全世界測位システム>. 東京. ジャパン・インダストリアル・パブリッシング. pp3-41
- 5) 緒方 勇, 木村小一：衛星航法 NAVSTAR/GPS とその利用.
- 6) 村田一郎：1986. 位置の計算. GPS—人工衛星による精密測位システム—. 初版. 東京. 日本測量協会. pp129-145
- 7) 西谷芳雄：1991. 衛星航法システムとその受信装置. 電波計器. 東京. 成山堂. pp285-330
- 8) 斉藤真幸：1990. GPSの基礎知識. エレクトロニクスライフ5月号. pp154-157
- 9) 斉藤真幸：1990. GPSの基礎知識. エレクトロニクスライフ10月号. pp152-155
- 10) 片山 晋：1992. GPSの選択利用性(SA)の観測. 日本航海学会誌. 113. pp4-11
- 11) D. Olsen：1989-90. The Federal Radionavigation Plan and Its Impact on International Radio Navigation Planning. Journal of ION. 36. NO4. pp323-335
- 12) 木村小一：1991. GPSにおける選択利用性について. 日本航海学会誌. 109. pp27-33
- 13) 斉藤真幸：1990. GPSの基礎知識. エレクトロニクスライフ8月号. pp148-153
- 14) 飯島幸人：1987. GPS電波の受信と位置の決定. NAVSTAR/GPS<全世界測位システム>. 東京. ジャパン・インダストリアル・パブリッシング. pp50-67
- 15) 例えば, 日本無線：1994. JLR-4110-MKII (GPS航法装置取扱説明書)
- 16) 斉藤真幸：1990. GPSの基礎知識. エレクトロニクスライフ9月号. pp155-159
- 17) R. Kalafus et al：1986. Special Committee 104 Recommendations for Differential GPS Service. Journal of ION. 33. NO1. pp26-41
- 18) 田中寅夫：1986. 誤差要因. GPS—人工衛星による精密測位システム—. 初版. 東京. 日本測量協会. pp147-168

- 19) 加瀬順一, 林 正吾, 菊岡 仁: 1992. ディファレンシャルGPSとその応用. 日本航海学会誌. 111. pp42-50
- 20) 金沢輝男: 1986. 海図と測地系. 日本航海学会誌. 88. pp81-86
- 21) 村上 亮: 1986. 衛星や観測点の位置をどう表すか. GPS-人工衛星による精密測位システム- 初版. 東京. 日本測量協会. pp69-88
- 22) 金沢輝男: 海図等に記載する測地系変換補正量の計算方法. pp76-81
- 23) R. B. Langley (木村小一抄訳): 1992. GPSのための基本的測地学. 造船技術. 297. pp55-61
- 24) 西 周次: 1982. フェイズII GPSの利用可能時間と測位精度の解析. 日本航海学会論文集. 66. pp57-65
- 25) 木村小一: 1985. 双曲線航法と衛星航法のGDOP. 日本航海学会論文集. 72. pp41-48
- 26) 大久保 博, 佐藤俊昭: 1986. フェイズIII GPSの計算機シミュレーションによる解析. 日本航海学会論文集. 74. pp89-97
- 27) 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. 日本航海学会論文集. 72. pp77-85
- 28) 柿原利治, 若木 毅, 柳川三郎: 1988. アンテナ高さ誤差がGPS測位精度に及ぼす影響. 日本航海学会論文集. 79. pp33-38
- 29) 隅川芳雄, 長友洪太, 貞包弘之, 実藤 了, 水谷壮太: 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. 90. pp58-63
- 30) 奥田邦晴: 1987. 船舶用GPS受信装置の測位精度について. 日本航海学会誌. 94. pp39-43
- 31) 本村絃治郎, 実藤 了, 水谷壮太郎, 長友洪太, 大村千之: 1988. GPSの測位精度-I-定点における測位結果-I. 日本航海学会誌. 96. pp39-46
- 32) 実藤 了, 本村絃治郎, 水谷壮太郎: 1988. GPS航法の定点観測結果について. 日本航海学会誌. 97. pp77-82
- 33) 安田明生, 平田 誠, 奥田邦晴, 今津隼馬: 1988. GPSにおけるGDOPと測位誤差分布について. 日本航海学会論文集. 79. pp25-31
- 34) 松野保久, 山中有一, 嶋田起宜, 内山正樹, 日高正康: 1989. GPSの測位結果について一定点および航走中-I. 航海学会誌. 102. pp17-26
- 35) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: 1989. GPSの定点における測位精度. 日本航海学会誌. 102. pp27-33
- 36) 奥田成幸, 岡本康裕: 1992. 狭水道におけるGPSの受信状況. 日本航海学会誌. 111. pp9-18
- 37) 荒井 修: 1992. GPSのドップラ効果による速度計測について. 日本航海学会誌. 113. pp39-45
- 38) 林 忠夫: 1992. 漁労におけるGPSの利用. 日本航海学会誌. 111. pp19-29
- 39) 中田 裕, 本村絃治郎, 田淵清春, 濱田悦之: 1993. GPSの測位精度-II-最近の測位結果とSAの影響-I. 水産大学校研究報告. 41, NO4. pp179-191
- 40) R. Conley: 1993. GPS Performance: What Is Normal?. Journal of ION. 40. NO3. pp261-281
- 41) 坂本有隣: 1992. 函館におけるGPSの測位結果. 日本航海学会誌. 111. pp51-61
- 42) 福島登志夫: 1986. トランスロケーション法. GPS-人工衛星による精密測位システム- 初版. 東京. 日本測量協会. pp169-194
- 43) 柿原利治, 若木 毅, 柳川三郎: 1988. 一点測位用受信機によるディファレンシャルGPSの効果について. 東京水産大研報. 75, NO2. pp87-93
- 44) D. Pietraszewski et al: 1988. U. S. Coast Guard Differential GPS Navigation Field Test Findings. Journal of ION. 35, NO1. pp55-72
- 45) G. T. Kremer et al: 1990. The Effect of Selective Availability on Differential GPS Corrections. Journal of ION. 37, NO1. pp39-52.
- 46) D. H. Alsip: 1992-93. The Coast Guard's Differential GPS Program. Journal of ION. 39, NO4. pp345-361
- 47) V. Ashkenazi et al: 1993. Wide-Area Differential GPS: A Performance Study. Journal of ION. 40, NO3. pp297-319
- 48) 木村小一: 1994. ディファレンシャルGPS (DGPS)の動向. 日本航海学会誌. 121. pp21-30
- 49) H. El-saadawy: 1994. The Impact of DGPS on Land, Marine and Air Navigation in Egypt. Journal of Navigation. 47, NO3. pp332-337
- 50) 柿原利治, 若木 毅, 柳川三郎: 1987. GPSを利用した海上におけるロランC電波伝搬誤差の推定. 東京水産大学研究報告. 74, NO2. pp107-114
- 51) 福島登志夫: 1987. GPS衛星の海洋開発への利用. NAVSTAR/GPS <全世界測位システム>. pp68-77
- 52) 福島登志夫: 1988. GPSと水路業務. 日本航海学会誌. 102. pp13-16.
- 53) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: 1990. GPSとロランC

- の陸上定点における相対誤差. 長崎大学研究報告. 68. pp53-60
- 54) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: 1990. 五島灘におけるGPSとロランC9970チェーンの相対誤差. 日本航海学会誌. 106. pp1-8
- 55) 増島宏明, 花房元顕, 河内 尚, 佐藤志郎, 菊岡 仁: 1991. GPSの利用について-旋回実験の結果報告-. 日本航海学会誌. 109. pp8-16
- 56) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: 1991. GPSを用いての表層流の測定. 日本航海学会誌. 110. pp21-24
- 57) 工藤君明, 寺尾 裕, 中村 仁: 1992. GPS精密測位漂流ブイシステムによる海水流動の調査研究. 海洋調査技術. 3, NO1. pp21-31
- 58) 寺尾 裕, 工藤君明, 増山 豊: 1992. 舟艇の操縦性へのGPS利用について. 海洋科学技術センター試験研究報告. 27. pp89-99
- 59) 河島茂男: 1992. GPS方式による測位センサー. 日本航海学会誌. 111. pp30-37
- 60) 本橋 実: 1992. GPSを利用したカーナビゲーションシステム. 日本航海学会誌. 111. pp38-41
- 61) 東海林明, 並木由美子: 1992. GPSを用いた海図プロッタの利用について. 日本航海学会誌. 112. pp60-66
- 62) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: 1992. GPSを用いての旋回圏の測定. 日本航海学会誌. 114. pp32-37
- 63) 惟村和直: 1992. GPS航空利用の最近の話題と実験. 日本航海学会誌. 114. pp49-57
- 64) 小林弘明, 新井康夫, 奥田成幸, 石橋 篤, 岡本康裕: 1993. DGPSの有効性評価とその応用. 第88回航海学会講演予稿集. pp28
- 65) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: 1993. GPSを用いての海流の測定. 日本航海学会誌. 118. pp9-14
- 66) 星野尾一明: 1993. 航空におけるGPSの利用について. 日本航海学会誌. 118. pp55-62
- 67) 久野俊行, 合田政次, 中根重勝: 1994. 北太平洋におけるGPSとロランC9970チェーンの相対誤差. 日本航海学会誌. 121. pp31-35
- 68) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: 1994. GPSを用いての旋回圏の測定-II. 日本航海学会誌. 121. pp36-39
- 69) 柿原 利治, 武田誠一, 峰 雄二, 佐藤 要: 1994. 海上航走時におけるDGPSの効果について. 日本航海学会論文集. 90. pp53-61
- 70) 長岡 栄, 天井 治: 1994. GPSを用いた航空管制用レーダの校正のための飛行実験. 日本航海学会論文集. 90. pp63-72
- 71) 加来信之, 北館勝彦: 1994. DGPSによる空港面監視システムの基礎実験. 日本航海学会論文集. 90. pp81-88
- 72) 鈴木 治, 森島清忠: 1995. 小型高速艇の緊急時における避航操船に関する考察. 日本航海学会論文集. 92. pp77-84
- 73) 本村紘治郎, 中田 裕, 田淵清春, 内田和良, 濱口正人, 下川伸也, 堀田俊治, 濱田悦之: 1994. GPSの測位精度-III-3種類のGPS受信機による二定点ディファレンシャルGPSの補正効果-. 水産大学校研究報告. 42, NO3. pp119-130
- 74) 本村紘治郎, 中田 裕, 内田和良, 濱野 明: 1995. 緯経度補正によるディファレンシャルGPSの漁場探査における有効性について. 日本航海学会論文集. 92. pp9-17
- 75) 本村紘治郎, 中田 裕, 伊藤 東, 水谷壮太郎, 久保田勝彦, 濱田悦之: 1995. 狭い水域における簡易なDGPSの有効性について. 水産大学校研究報告. 43, NO4. pp151-159
- 76) 日本無線: 1985. JLR-4000F(GPS 航法装置取扱説明書)
- 77) A. Isobe: 1993. Report of ADCP data analysis in CREAMS '93. Proceedings of the CREAMS '94 INTERNATIONAL SYMPOSIUM. pp4-7
- 78) KRUPP ATLAS ELEKTORNIK GMBH: 1986. ATLAS POLARFIX Operating Instructions
- 79) 進藤一俊: 1987. 自動追尾方式レーザ測位システム. 最新の海底調査-その7. pp35-42
- 80) Ingo HARRE: 1990. Accuracy Evaluation of Polar Positioning Systems Taking Polarfix as an Example. International Hydrographic Review. LX VII (1). pp37-59
- 81) J. Riegi: 1992. LR90-2 USER'S MANUAL
- 82) 柿原利治, 武田誠一, 宮本佳則, 野田 明, 峰 雄二: 1995. 基準局・移動局間距離とDGPS測位精度について. 日本航海学会論文集. 93, pp1-6
- 83) 鮫島直人: 1954. 船位誤差論. 初版. 東京. 天然社. pp107-115
- 84) 笠原包道: 1978. レーダ航法. 初版. 東京. 海文堂. pp65-66
- 85) 海上測量技術高度化協議会: 1995. GPS海上測量システム
- 86) 運輸省第四港湾建設局下関機械整備事務所: 1995. 港湾工事が変わるGPS測位装置