

## 電波航法の新しい測位原理(一般解)

小野房吉\*

### A NEW POSITIONING METHOD OF THE RADIO NAVIGATION SYSTEM (GENERAL SOLUTION)

Fusakichi Ono\*

*Received 1982 September 20*

#### Abstract

The hyperbolic navigation system deteriorates in accuracy conspicuously in proportion to its distance from the baseline, and it is difficult to fix a position near the line extended from the baseline. The defects are somewhat improved by the "RHO-RHO" navigation method. However, this method requires regular calibration based on any other method for accurate independent synchronization and maintenance of radio reference repetitive pulses at the transmitting and receiving stations. Therefore the "RHO-RHO" navigation method is useless as a single system.

In the devised radio navigation method, the synchronous error of reference repetitive pulses is sloved as unknown in the conversion of observed data to the geodetic position. That is, when the position is calculated from (O-C), the synchronous error of reference repetitive pulses is combined with longitude/latitude deviations between the receiving and estimated positions in the observation equation. Therefor the accuracy of the fixed position is never affected by the synchronous error of the reference repetitive pulses in this navigation method.

In this paper the applications based on the technique and the measured data are reported.

**Key words:** Radio navigation, Hyperbolic navigation, RHO-RHO navigation, General solution of Radio navigation.

#### 1. まえがき

一定の関係で同期して発射された、3局の電波の2組の到来時間差を測定して、受信点の位置を求める双曲線航法は、双曲線の発散により、又2局を結ぶ基線の延長線付近に近づくにつれて、著しい精度の低下が生じる、距離航法( $\rho\rho$ 航法とも言う)は、初めに位置が分っていなければならないこと、電波発射局の基準発振器に対する受信側の基準発振器の周波数偏差と、そのドリフトによって生じる測位誤差の増大のため、単独では測位装置



この方法は、ロラン、デッカ、オメガ等の電波航法システムのすべてに適用可能であるが、ここでは具体的にロランCシステムの取得データに関して説明する。

ロランCシステムは、一つの主局(M)に対して、これと一定の関係で同期した電波を放射する複数の従局で構成されている。それぞれの従局は主局に対してその局に特有な一定の Emission Delay (ED) で電波を放射していて、電波放射順にW, X, Y, Z等の符号を付して識別されている。今この電波を受信し、受信点の基準パルスに対して到来時を測定して、それぞれ  $TD_M, TD_W, TD_X, \dots$  を得たとする。

すると、これらのデータの内容は、それぞれ

$$TD_M = \tau_M + \Delta T \tag{4}$$

$$TD_W = \tau_W + ED_W + \Delta T \tag{5}$$

$$TD_X = \tau_X + ED_X + \Delta T \tag{6}$$

.....

ただし  $\tau_i$ : 送信局*i*から受信点までの電波伝搬時間

ED<sub>i</sub>: 主局に対するその従局の放射遅延時間 (局定数として前もって与えられる)

である。

これらの測定データについて、受信点の推定位置を与えて  $\tau'_i$  を計算し、 $(O-C)_i$  を計算する。すなわち

$$(O-C)_M = TD_M - \tau'_M \tag{7}$$

$$(O-C)_W = TD_W - \tau'_W - ED_W \tag{8}$$

$$(O-C)_X = TD_X - \tau'_X - ED_X \tag{9}$$

.....

この  $(O-C)_i$  について、観測方程式は、

$$\left. \begin{aligned} (O-C)_M &= \Delta\phi' \cos Z_M + \Delta\lambda' \sin Z_M + \Delta T \\ (O-C)_W &= \Delta\phi' \cos Z_W + \Delta\lambda' \sin Z_W + \Delta T \\ (O-C)_X &= \Delta\phi' \cos Z_X + \Delta\lambda' \sin Z_X + \Delta T \\ &\dots \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

ここで  $Z_i$  は、推定位置からみた放射局の方位であるからそれぞれの測地位置から計算できる。そこで未知数の係数を次のように置き、

$\cos Z_i = a_i, \sin Z_i = b_i, 1 = C_i, (O-C)_i = d_i$  と置き替え  $[a_i a_i], [b_i a_i], [c_i a_i], [d_i a_i], [b_i b_i], [c_i b_i], [d_i b_i], [c_i c_i], [d_i c_i]$  を計算すると

正規方程式は、

$$\left. \begin{aligned} [a_i a_i] \Delta\phi + [b_i a_i] \Delta\lambda' + [c_i a_i] \Delta T &= [d_i a_i] \\ [a_i b_i] \Delta\phi + [b_i b_i] \Delta\lambda' + [c_i b_i] \Delta T &= [d_i b_i] \\ [a_i c_i] \Delta\phi + [b_i c_i] \Delta\lambda' + [c_i c_i] \Delta T &= [d_i c_i] \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

となり、未知数の解は係数の行列式から全く機械的に求められる。

$$\Delta\phi' = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} [d_i a_i] & [b_i a_i] & [c_i a_i] \\ [d_i b_i] & [b_i b_i] & [c_i b_i] \\ [d_i c_i] & [b_i c_i] & [c_i c_i] \end{vmatrix} \tag{12}$$

$$\Delta\lambda' = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} [a_i a_i] & [d_i a_i] & [c_i a_i] \\ [a_i b_i] & [d_i b_i] & [c_i b_i] \\ [a_i c_i] & [d_i c_i] & [c_i c_i] \end{vmatrix} \tag{13}$$

$$\Delta T = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} [a_i a_i] & [b_i a_i] & [d_i a_i] \\ [a_i b_i] & [b_i b_i] & [d_i b_i] \\ [a_i c_i] & [b_i c_i] & [d_i c_i] \end{vmatrix} \quad (14)$$

$$\text{ただし } D = \begin{vmatrix} [a_i a_i] & [b_i a_i] & [c_i a_i] \\ [a_i b_i] & [b_i b_i] & [c_i b_i] \\ [a_i c_i] & [b_i c_i] & [c_i c_i] \end{vmatrix} \quad (15)$$

ここで求まる  $\Delta\varphi'$ ,  $\Delta\lambda'$  の単位は (0-C) と同じものであるから, これがマイクロ秒のとき,  $\Delta\varphi'$ ,  $\Delta\lambda'$  を緯度経度の度すなわち  $\Delta\varphi$ ,  $\Delta\lambda$  にするには

$$\Delta\varphi = \alpha \cdot \Delta\varphi' \quad \alpha : 0.002697 \quad (16)$$

$$\Delta\lambda = \gamma \cdot \Delta\lambda' \quad \gamma = \alpha / \cos \varphi_0 \quad (17)$$

これで度の小数となる. 従って受信点の緯度経度  $\varphi_x$ ,  $\lambda_x$  は

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x &= \varphi_0 + \Delta\varphi \\ \lambda_x &= \lambda_0 + \Delta\lambda \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

収斂計算を行なう場合は, ここで求めた  $\varphi_x$ ,  $\lambda_x$  を再び  $\varphi_0$ ,  $\lambda_0$  と置きなおし (0-C) 以下の再計算を行なう. なお, 以上の説明では述べなかったが, 観測方程式以前の問題として, 送信局と受信推定位置との測地線の距離, それを電波伝搬時間に換算すること, 推定位置から見た送信局の方位等は別に計算されなければならない.

### 3. 測地線, 電波伝搬時間, 方位の算式 (参考文献1による)

(1) 二点の測地位置 ( $\varphi_1$ ,  $\lambda_1$ ), ( $\varphi_2$ ,  $\lambda_2$ ) を与えて, その間の測地線の距離  $d$  を求めること

$$\beta = \tan^{-1}(\tan \varphi \cdot b/a) \quad (19)$$

$$\chi = \cos^{-1} \{ \sin \beta_1 \sin \beta_2 + \cos \beta_1 \cos \beta_2 \cos(\lambda_1 - \lambda_2) \} \quad (20)$$

$$\chi' = \chi \cdot \pi/180 \quad (21)$$

$$A_0 = (\sin \beta_1 + \sin \beta_2)^2 \quad (22)$$

$$B_0 = (\sin \beta_1 - \sin \beta_2)^2 \quad (23)$$

$$P = (a-b)(\chi' - \sin \chi) / \{4(1 + \cos \chi)\} \quad (24)$$

$$Q = (a-b)(\chi' + \sin \chi) / \{4(1 - \cos \chi)\} \quad (25)$$

$$d = a\chi' - A_0P - B_0Q \quad (26)$$

ただし  $a$ ; 地球の長半径 WGS-72では  $a = 6378.135$  (km)

$b$ ; 地球の短半径 "  $b = 6356.755$  (km)

$\varphi$ ; 測地緯度,  $\lambda$ ; 測地経度

(2) 電波伝搬時間を求める実験式 (時分科会資料78-4, 1972による)

$$\tau = d/V + \alpha d + \xi + \gamma/d \quad (\mu s) \quad (27)$$

ただし,  $V$ ; 電波伝搬速度 (=0.2996912 km/ $\mu s$ )

$\alpha$ ; (=0.002155  $\mu s/km$ )

$\xi$ ; (= -0.4076  $\mu s$ )

$\gamma$ ; (=38.67  $\mu s \cdot km$ )

(3) 方位: 位置 ( $\varphi_2$ ,  $\lambda_2$ ) から見た位置 ( $\varphi_1$ ,  $\lambda_1$ ) の北から時計回りに測った真方位  $Z$

$$\theta = \cos^{-1} \{ (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2 \cos \chi) / (\sin \chi \cos \varphi_2) \} \quad (28)$$

$$\left. \begin{aligned} Z = \theta & \quad \text{ただし } \sin(\lambda_1 - \lambda_2) \geq 0 \\ Z = 360 - \theta & \quad \sin(\lambda_1 - \lambda_2) < 0 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

(3), (10)式で $\Delta T$ を未知数としたことは、距離航法における距離測定の基本となる繰り返しパルスの初期位相が、どんな数値でもよいと言うことで、この意味は大きい、すなわち従来の距離航法では送受信点間の距離を測定して、受信点の経緯度を知ることであり、距離測定の基本として超高安定な原子発振器が不可欠であったが、これが普通の水晶発振器で足りると言うことである、又、双曲線航法は、主局電波の到来時から従局電波の到来時までの時間差を測定するもので、主局電波は従局電波の到来時を測定するための参照信号と考えれば、このデータは普通の水晶発振器を基準に測定した距離航法のデータと何ら変るところがない、言い替えれば(3), (10)式は双曲線航法データでもそのまま成立する。

さらに、従来の距離航法が、適用できる無線航行援助システムは、送信局電波の発射繰り返し周期が高安定なロランC又はオメガシステムに限られたが、受信側の基準発振器の安定度が低くてよいと言うことは、発射側の基準発振器も高安定でなくてよいと言うことであるから、これがロランA、デッカ等にも適用できることを意味する、われわれは、これまで双曲線航法と、距離航法とは原理的に異なる航法として理解し、取得データの測地座標への変換にあたっては、異なる数学で対応して来た、しかし、今やこれを分けて考える理由はなくなった。

#### 4. 適用例

従来の距離航法で取得したデータを、本原理で再計算すれば、基準発振器の初期位相誤差、ドリフト誤差が分離するから、距離航法の誤差評価が可能である、当部測量船「昭洋」には昭和56年度にNNSS- $\rho\rho$ ロランC複合測位システムが装備され稼動しているがこの取得データについて、この方法で再計算し誤差評価してみたのが第一表である。

この複合測位システムの考え方は、単独では測位装置として機能しない $\rho\rho$ 航法と、連続測位が困難なNNSS測位装置を組合せることによって、連続的に高精度な測位を目論んだものである、具体的には $\rho\rho$ ロランC測位を定期的にNNSS測位値で飛び修正する方法である。

この航法の素データは、15秒ごとに出力されているが、今回利用したのは、NNSS測位時刻に対応した $\rho\rho$ 航法データである、素データは、NNSS測位ごとに飛び修正されたものなので、そのままの形では不都合であるから、飛びがなかったように逆修正して滑らかなものとし、さらに従局についてはEDをつけ加えてデータとした、この結果を図示したのが第2図である、内容は $\Delta\varphi_N$ ,  $\Delta\lambda_N$ は(NNSS-New),  $\Delta\varphi$ ,  $\Delta\lambda_p$ は( $\rho\rho$ -New),  $\Delta T$ はデータから分離された基準パルスの同期誤差である。

この図で分ることは、NNSSの測位誤差が意外に大きいことである、この測定海域はロランC利用可能海域としては、最も条件のよい海域であり、ロランC測位値にこのように大きい誤差が生じることは、考えられないから、この殆んどはNNSS測位誤差と考えてよい、一方 $\rho\rho$ 測位誤差を見ると、約1日の間に基準発振器は約10 $\mu$ sドリフトして、大きい方の緯度誤差が20°程度である、NNSS測位誤差が、基準発振器のドリフト誤差をはるかに上廻っている。

さて、NNSS- $\rho\rho$ 複合測位装置では、以上のNNSS測位を正確であるとして $\rho\rho$ 測位値を、この値に強制的に修正してしまうので第3図のような不自然な飛びを2~4時間ごとに生じることになる、NNSS- $\rho\rho$ 複合測位装置は、NNSS測位が正確で誤差がないと言う前提で開発された測位の自動化、省力化のための装置であるから航走中におけるNNSS測位精度がこのように低下する現状では、その能力を十分に発揮し得ないことになる、何れにしても、現段階では、この測位装置で取得された素データは、そのまま最終的航跡図とするには相当

無理があり、帰投後熟練技術者による修正作業がかかせない。

ところで航跡図の不自然の飛びは事後処理である程度の改善が期待できるが、不連続な航跡図となることで最も困るのは、それが海上重力測定精度を低下させることである。本来、海上重力測定におけるエトヴェス補正は、船速の瞬時値によって行われるべきで、これが帰投後の後処理では、精度の改善は望むべくもない。真の自動化、省力化とりわけ海上重力測定のオンライン処理による高精度化のために、この航法装置の一日も早い改善が期待される。なお、この例で利用したロランCシステムは北西太平洋チェーンのうち第1表に示した次の各局である。

Table 1 Loran-C Stations (Reference No.3)

Station	Latitude	Longitude	Emissiondelay
9970 M(硫黄島)	24 48 03.6 N	141 19 30.3 E	$\mu$ s 0.00
9970 X(北海道)	42 44 37.1 N	143 43 09.2 E	36685.12
9970 Y(沖 繩)	26 36 25.0 N	128 08 56.4 E	59463.18

Table 2 Comparison of the new positioning method with the rest positioning method

DATE TIME	NNSS		DATA			$\rho-\rho$		New		$\Delta T$
	LAT.	LONG.	TDM	TDx	TDy	LAT.	LONG.	LAT.	LONG.	
Aug. 1981	34°	139°				34°	139°	34°	139°	
d h m s	' "	' "	$\mu$ s	$\mu$ s		' "	' "	' "	' "	$\mu$ s
17 21 06 00	37 22.8	27 08.4	3688.9	39940.4	64140.6	37 43.4	27 13.9	37 36.3	27 09.3	+2.87
22 29 36	33 55.2	13 45.0	3680.9	39985.9	64069.2	34 18.2	12 58.7	34 12.1	12 56.7	+2.22
18 00 14 48	21 51.6	01 18.0	3618.1	40077.4	63975.0	22 0.5	01 15.7	21 57.3	01 15.3	+1.15
		138°					138°		138°	
00 54 00	20 12.0	54 43.2	3616.2	40099.4	63938.6	20 26.3	53 59.4	20 25.7	53 59.3	+0.19
02 40 00	21 30.0	30 56.4	3652.2	40140.2	63849.1	21 36.9	30 51.7	21 36.1	30 52.0	+0.25
03 22 24	20 12.6	20 44.4	3658.1	40169.9	63800.3	20 13.1	20 12.7	20 14.8	20 11.6	-0.50
05 10 00	23 5.4	05 51.6	3695.9	40187.2	63752.6	22 57.4	05 32.3	22 59.0	05 31.1	-0.43
06 55 36	24 54.0	08 27.0	3703.6	40170.0	63769.5	24 56.3	07 58.8	25 0.1	07 56.0	-0.99
08 21 12	25 9.6	12 10.2	3697.6	40159.7	63785.6	25 0.6	12 6.1	25 6.4	12 2.4	-1.53
10 06 48	24 55.8	24 51.0	3678.6	40131.6	63834.2	24 54.6	24 36.9	25 3.4	24 32.4	-2.49
12 01 12	25 1.8	37 7.2	3663.1	40105.4	63880.4	25 0.0	36 11.9	25 11.0	36 7.9	-3.31
12 48 00	25 4.8	44 22.2	3651.4	40086.9	63913.1	24 56.7	44 33.9	25 10.8	44 30.9	-4.46
		139°					139°		139°	
14 34 48	24 11.4	01 24.0	3628.1	40056.4	63976.6	24 22.1	00 48.9	24 37.5	00 50.3	-5.41
14 50 00	23 0.0	03 57.0	3617.2	40059.1	63982.7	23 1.9	03 27.6	23 16.5	03 30.1	-5.25
17 06 00	16 43.2	11 22.8	3570.1	40079.8	63991.9	16 42.1	11 19.2	16 56.8	11 25.7	-5.72
18 53 12	20 57.6	03 50.4	3603.6	40070.4	63973.0	20 52.5	03 14.6	21 10.2	03 17.8	-6.37
20 15 36	23 28.8	03 57.0	3616.9	40052.5	63987.0	23 24.2	04 31.9	23 43.9	04 35.9	-7.12

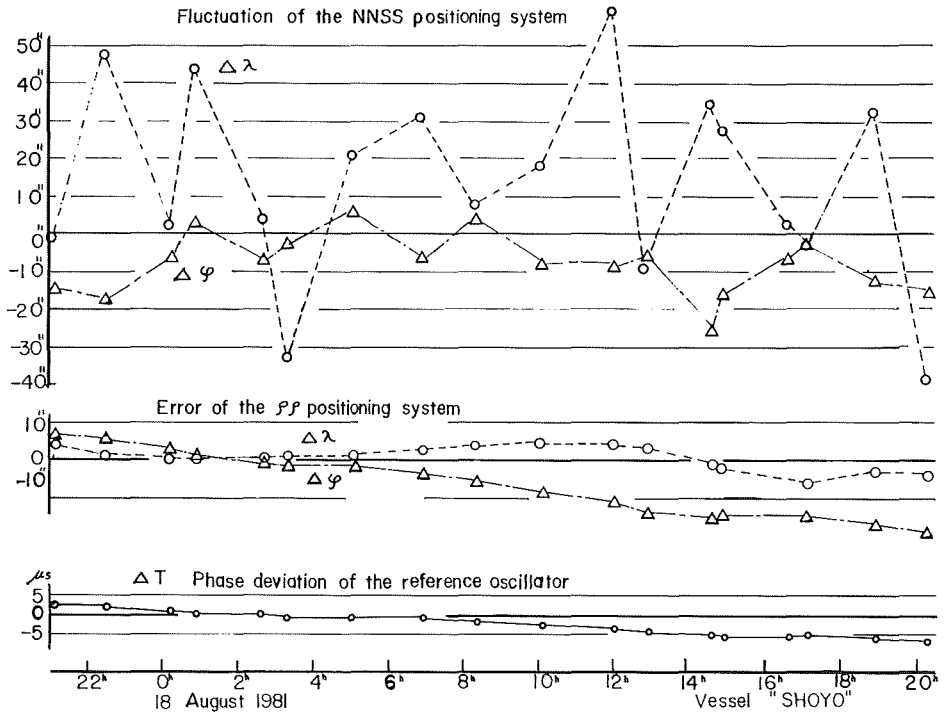


Figure 2 Comparison of the new positioning method with the rest positioning method.

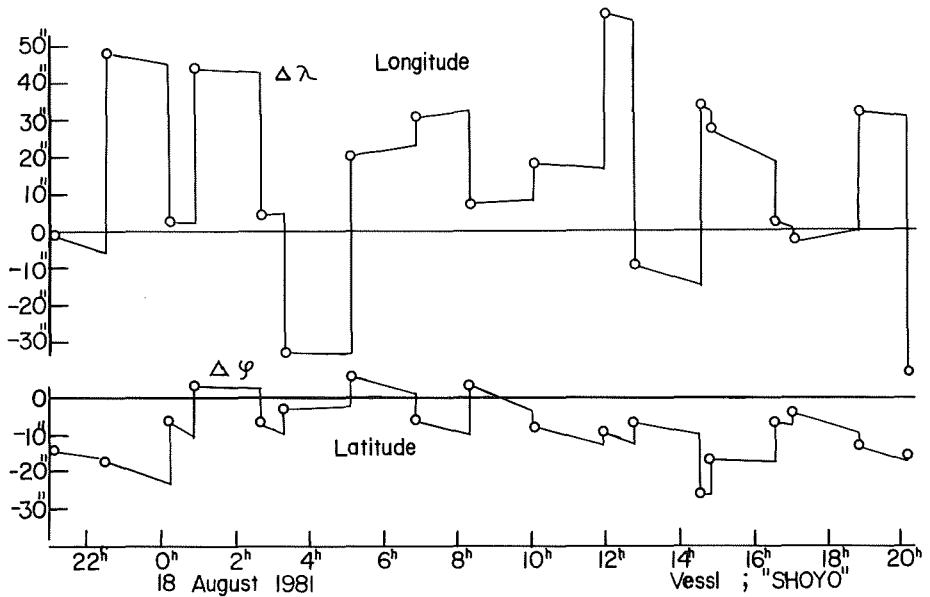


Figure 3 Step deviation of the hybrid positioning system "NNSS- $\rho\rho$ "

## 5. 結び

筆者は、この方式を電波航法の一般解、従来の双曲線及び距離航法における手法を特殊解と考えたい。何となれば、双曲線航法における二組の時間差データは、この方法の参照基準パルスの位相が、主局電波の到来時に一致した特別な場合の従局データと全く同じであり、主局データとしてゼロを加え三つのデータとして扱えば、この方式にそのまま取込むことができるし、二組の距離データで解ける距離航法は、この方法で、 $\Delta T$ が既知である特別な場合と考えてよいからである。 $\Delta T$ が別の何らかの方法で測定され与えられれば、この方法においてもデータは二つでよい。距離航法における基準パルスの位相は本来未知のものであり、この測位でデータが二つだけでよいのは、比較基準パルスの独立同期が確立している特別な場合だけであって、一般的に二つだけでよいと言うのはあたらない。

以上述べたように、この測位原理は新しい方法と言っても、従来の無線航行援助システムにそのまま適用できるものであり、その点では新しい投資を必要とするものではない。従来の無線航行援助システムをより広い地域でより精度高く、しかも安価に利用する方法であり、システムの投資効果を高める方法であると理解していただければ幸いである。従来の双曲線データと距離データを全く同じ数学で解いた結果、それぞれの長所を合せ持つことになったが、さらに加えて基準発振器の位相誤差を分離する考え方は、従来は不可能と考えられた航走中における高精度な時計比較、周波数比較に新たな道を開いたものであり、その方面への利用が期待される。

しかし、何と云ってもこの航法原理の特徴が発揮できるのは、デッカシステムへの適用である。このシステムは発射側の基準周波数が高安定でないから、従来の距離航法の考え方では適用が不可能であったが、この航法を適用すれば、基線の延長線付近の利用に対して大きな効果が生じよう。

この航法と云えども、送受信点間の距離が増大し、空間波の利用区域に入れば、その影響を受ける。ロランC北西太平洋チェーンの場合、主局を中心に四つの従局が対角線状に配置されており、合計五つのデータが取得できるが、システムの周辺部では最遠部の一〜二局は地表波の利用可能距離2,000kmを超えるので、空間波データとなる。従って五つのデータを無差別に取り入れれば、残り三局分が地表波データであるにもかかわらず誤差が大きくなることが考えられる。このような場合人為的に局の選択をすることは有効であるが、それでは測位の自動化にならない。そこでこのような場合には、データの劣化は伝搬距離に比例するから、測位計算に距離・発射電力等の関数として「重み」を取り入れ一定の距離を超えたデータについては、重みを下げて取り入れることにすれば、空間波の混入による精度の低下を押えることができ、局の選択も必要としない完全自動のロランC受信機が実現できる。

最後に、NNSS- $\rho\rho$ 複合測位装置のデータ解析にあたって助言を頂いた海洋研究室、岡田貢研究官に深く感謝する。

## 参 考 文 献

- Charles Kirkland 1964 : Loran Coordinate Computation, *Informal manuscript report No. N-1-64 Marine Sciences Department U.S. Naval Oceanographic Office.*
- Coast Guard 1980 : *Radionavigation Systems* PP. 30-57 Department of Transportation.
- Grant, S.T. 1973 : RHO-RHO Loran-C Combined with Satellite navigation for offshore surveys, *International Hydrogr. Review*, 50, 2.
- 小野房吉 1981 : 双曲線航法受信機による距離航法, 水路部研究報告, 第16号, 122-137.
- 岡田貢・打田明雄 1982 : 長距離電波測位装置とその精度, 水路部研究報告, 第17号, 317-333.