

ロランC電波の陸上传播効果とその評価に基づく補正図の作成

小野房吉*・長森享二**

EFFECT OF LORAN C WAVE PROPAGATION ON LAND AND PREPARATION OF CORRECTION CHART BASED ON ITS EVALUATION

Fusakichi Ono,* Kyozi Nagamori**

Abstract

The LORAN C is a radio navigation aid system operated by the Coast Guard of the U.S.A., using long waves to measure the position of ships and airplanes. It gives hope for the usable range of ground waves allowing stable propagation up to a radius of 2,000km from a LORAN C station and permits a high-accuracy use over a wide area. However, a systematic error is caused in measured results if land is included in the wave-propagation route, and the accuracy of position measuring becomes lower. In this report, we analyze data from the LORAN C regarding the North-West Pacific chain that were obtained by the survey ship "SYOYO" during navigation in the sea south of Hatzuyo island and from Simizu port via Nozimazaki coast to Hatinohe coast. Also, the effects of land propagation waves included in incoming waves are evaluated and the preparation of the correction chart of the same chain in the Japanese waters based on the analyzed results are described.

Evaluation results

- (1) As a propagation speed of LC waves in the sea, $299.715\text{m}/\mu\text{s}$ (greater than the conventional value, $299.691\text{m}/\mu\text{s}$) is suitable.
- (2) The propagation speed of waves on land is less than that in the sea, and the wave-propagation time increases by 6 ns/km compared with that in the sea. A conversion of this value to the wave-propagation speed corresponds to $299.18\text{m}/\mu\text{s}$.

1. まえがき

ロランC電波 (100KHz, マルチパルス) の地表波は、伝播経路が海上か陸上かによって伝播速度が異なるから、これを利用する電波航法測位や、時計比較では、当該電波の伝播経路の特性を考慮した正確な補正が行われなければ、高精度は期待できない。しかし、この補正が正しく行われるならば、測位で $\pm 10\text{m}$ 、時計比較で50ns程度の精度は十分可能である。海上と陸上では導電率が異なるから、伝播速度が異っても当然なのであるが、従来これらの量的な評価は導電率を仮定した理論的推定以外にあまりなされていなかった。特

Received 25 September 1984

* 海洋情報課 Oceanographic Data and Information Division.

** 企画課 Planing Division

に広い海上では技術的困難もあって、実測データに基づく評価は殆どなされていなかった。今回、八丈島南方及び清水港から犬吠埼東方、金華山沖を経て津軽海峡に到る海域で取得したロランCデータ（1983、5～6測量船「昭洋」：船長・吉田弘正）を解析し、陸上伝播に起因したと思われる電波伝播時間の増加を検出するとともに、その量がほぼkm当たり6.0 nsであることがわかった。近畿地方から東北地方に到るかなり広い地域を通過した電波で、ほぼ一定の値を示したのである。当初、陸上の地形の影響を受けるはずであるから、一定にはなるまいと予想したのであるが、意外であった。この波長帯では、地形の影響を受けるとしても、その量は、もっと小さいオーダーのことと思われる。ただし電波の到来方向の至近距離に高山がある場合は、その効果が現われ、さらに補正値が大きくなるので注意が必要である。

2. 評価の方法

ロランC（以下LCと云う）北西太平洋チェーンは主局と、これに対して一定の関係で同期した電波を放射する四つの従局が、主局を中心にはほぼ対角線状に配置されているが、この全従局の時間差(TD)データが同時取得できる受信機で、データを取得することとし、このうち陸上伝播を含まない3局以上のデータ（双曲線方式データでは2）が取得できる海域でのデータで解析を行なうことにした。この考え方は、陸上伝播誤差を含まない三つのデータで測地位置を決定し、その位置を推定位置として、他の陸上伝播誤差を含むと思われるデータの(O-C)を求めれば、その量が誤差がなければ“0”あるとすれば、それはプラスで当該電波の陸上伝播距離に比例した量を示すであろうと云うことである。

3. データの取得海域及び受信収録装置

八丈島南方：経度が八丈島より東に当る海域は、全データに陸上伝播分が殆ど含まれないが、これより西に行くにしたがい、北海道(X)局からの伝播経路に、八丈島及び犬吠埼から房総半島にかけての陸上伝播分が次第に大きく含まれる。

八丈島—清水港：(X)局からの電波に関東、東北地方の陸上分が加わり陸上伝播距離は数100キロメートルに達する。

犬吠埼東方—津軽海峡：沖縄(Y)局からの到来電波に、北上するにしたがい、関東、東海、近畿及び東北地方の陸上伝播分が次第に増加し、八戸沖付近まで北上すると、900キロメートル近くになる。

受信収録装置：LR-719型、LC受信機(光電製作所)、HC-20型ハンドヘルドCPU(EPSON)、マイクロCMT収録

4. 測位原理

取得データを $TD_i (i=m, w, x, y, z)$ とし、各データにつき受信点 (λ_x, ϕ_x) の推定位置 (λ_0, ϕ_0) を与えて(O-C)を計算する。従局にED(Emission Delay)がある場合は、それも当然差し引く。この(O-C)に関し観測方程式は、測定基準パルスの主局発射時に対する同期誤差を ΔT としたとき、

$$(O-C)_i = 4\phi' \cos Z_i + 4\lambda' \sin Z_i + \Delta T \quad (1)$$

ただし、 $\Delta\phi = \alpha\Delta\phi'$: 受信点と推定位置との緯度偏差

$\Delta\lambda = \gamma\Delta\lambda'$: 〃 経度偏差

α, γ : 単位変換係数

Z : 推定位置から見た電波発射局の北から東回りに測った計算方位

EFFECT OF LORAN C WAVE PROPAGATION ON LAND
 AND PREPARATION OF
 CORRECTION CHART BASED ON ITS EVALUATION

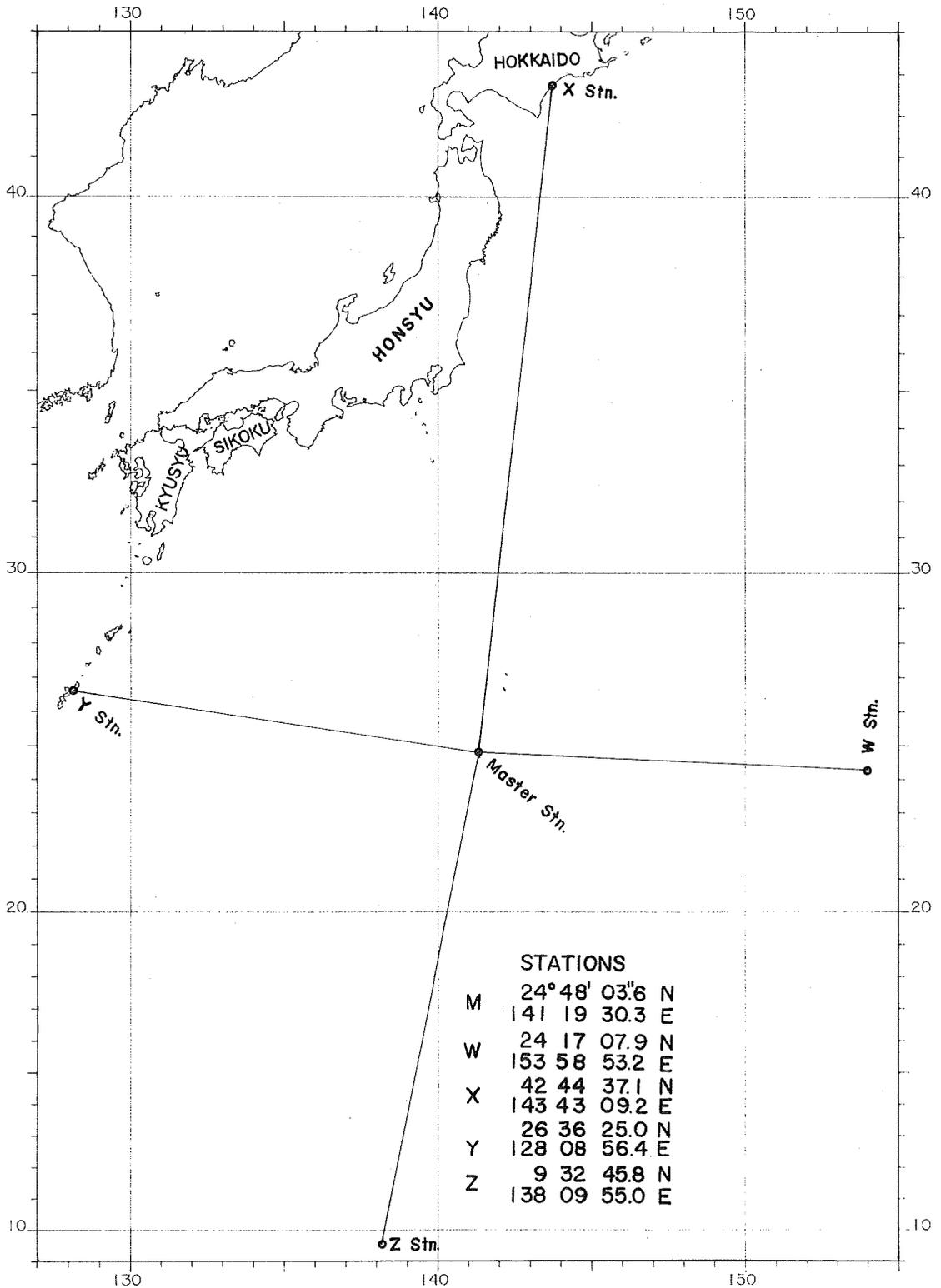


Figure 1 LORAN-C North West Pacific chain GRI 99700 μ s/sec.

この観測方程式で、未知数は $\Delta\lambda$, $\Delta\phi$, ΔT の3つであるから、互いに異った方向から到来した電波の取得データが少なくとも3つあると、すべての未知数の解が得られる。この場合3つ以上多ければ多いほどよい。

解き方： $\cos Z_i = a_i$, $\sin Z_i = b_i$, $1 = c_i$, $(O-C)_i = d_i$ と置き $[p a_i a_i]$, $[p b_i a_i]$, $[p c_i a_i]$

$[p d_i a_i]$, $[p d_i b_i]$, $[p c_i b_i]$, $[p d_i b_i]$, $[p c_i c_i]$, $[p d_i c_i]$ を計算する。

ここで p はデータの“重み”である。

これより正規方程式は

$$\begin{aligned} [p a_i a_i] \Delta\phi' + [p b_i a_i] \Delta\lambda' + [p c_i a_i] \Delta T &= [p d_i a_i] \\ [p a_i b_i] \Delta\phi' + [p b_i b_i] \Delta\lambda' + [p c_i b_i] \Delta T &= [p d_i b_i] \\ [p a_i c_i] \Delta\phi' + [p b_i c_i] \Delta\lambda' + [p c_i c_i] \Delta T &= [p d_i c_i] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\therefore \Delta\phi' = 1/D \begin{vmatrix} [p d_i a_i] & [p b_i a_i] & [p c_i a_i] \\ [p d_i b_i] & [p b_i b_i] & [p c_i b_i] \\ [p d_i c_i] & [p b_i c_i] & [p c_i c_i] \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$\Delta\lambda' = 1/D \begin{vmatrix} [p a_i a_i] & [p d_i a_i] & [p c_i a_i] \\ [p a_i b_i] & [p d_i b_i] & [p c_i b_i] \\ [p a_i c_i] & [p d_i c_i] & [p c_i c_i] \end{vmatrix} \quad (4)$$

$$\Delta T = 1/D \begin{vmatrix} [p a_i a_i] & [p b_i a_i] & [p d_i a_i] \\ [p a_i b_i] & [p b_i b_i] & [p d_i b_i] \\ [p a_i c_i] & [p b_i c_i] & [p d_i c_i] \end{vmatrix} \quad (5)$$

$$\text{ただし } D = \begin{vmatrix} [p a_i a_i] & [p b_i a_i] & [p c_i a_i] \\ [p a_i b_i] & [p b_i b_i] & [p c_i b_i] \\ [p a_i c_i] & [p b_i c_i] & [p c_i c_i] \end{vmatrix} \quad (6)$$

ここで、求めた $\Delta\phi'$, $\Delta\lambda'$ にそれぞれ、 $\alpha = 0.002697$, $\lambda = \alpha / \cos \phi_0$ の定数を乗じて経緯度単位の $\Delta\phi$, $\Delta\lambda$ に変換する。

従って受信点の経緯度 (λ_x , ϕ_x) は

$$\left. \begin{aligned} \lambda_x &= \lambda_0 + \Delta\lambda \\ \phi_x &= \phi_0 + \Delta\phi \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

この測位計算は、受信点の近傍で平面で近似しているから、推定位置と真の受信点が離れ過ぎている場合は、一回の計算では誤差が出るから、通常、逐次近似法による収斂計算を行なう。

“重み” p の与え方：この論文のテーマは測位ではなく、陸上伝播効果の評価である。従って、陸上伝播を含むデータについて $p = 0$ として解くが、参考までに、一般の測位計算で p をどのようにして与えるか考え方を述べておく。

確実に地表波が受信できる地点までは“1”、これを超えるデータについて実用的に次式で計算する。

$$p = (d_0/d)^n \quad (8)$$

ただし $p > 1$ のときは $p = 1$
 d_0 : 地表波が受信できる最大距離

ここで n の次数のとり方で p は急激にあるいは緩慢に減少する。

※ 取得データが双曲線データ（主局に対する従局の到来時間差）の場合は、主局データは取得されないが $TD_M = 0$ のデータとして計算にとりこむ。

5. 誤差分離の方法

観測方程式の未知数は3であるから、データが3個（双曲線データでは2個）で、すべて解け、4個目のデータに地表波伝播による誤差が含まれているとして、これを分離するには、そのデータに関して $p=0$ として扱えば、このデータは位置決定に寄与しないので、その他のデータに誤差がなければ、正確な位置は、それらのデータだけで求まり、そのデータに含まれる遅延誤差が(O-C)に反映してくる。もちろん、これはシステムの同期誤差も含むので必ずしも伝播誤差と1:1に対応しないが、この誤差は受信点の位置に関係がなく一定であると考えられるから、受信点の移動による変化分は伝播誤差と考えてよい。そこで、伝播誤差は分離しようとする局のデータについて、重みを“0”として前述の方法で位置を求め、その位置とデータに対応する局までの、電波伝播時間を計算し、次式を求める。

$$\delta_i = TD_i - ED_i - \tau_i + dT \quad (9)$$

6. 測地線、電波伝播時間、方位の計算に用いた諸式

(1) 二点の測地位置 (ϕ_1, λ_1) , (ϕ_2, λ_2) を与えて、その間の測地線の距離 d を求めること

$$\beta = \tan^{-1}(\tan \phi \cdot b/a) \quad (10)$$

$$\chi_{\text{rad}} = \cos^{-1} \{ \sin \beta_1 \cdot \sin \beta_2 + \cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2 \cdot \cos(\lambda_1 - \lambda_2) \} \quad (11)$$

$$A_0 = (\sin \beta_1 + \sin \beta_2) \quad (12)$$

$$B_0 = (\sin \beta_1 - \sin \beta_2) \quad (13)$$

$$P = (a-b)(x - \sin x) / \{ 4(1 - \cos x) \} \quad (14)$$

$$Q = (a-b)(x + \sin x) / \{ 4(1 + \cos x) \} \quad (15)$$

$$d = ax - A_0P - B_0Q \quad (16)$$

ただし、 a ; 地球の長半径、 b ; 地球の短半径
 λ, ϕ ; 測地経緯度

地球の長半径を km で与えれば(16)式は km 単位で求まる。

(2) 電波伝播時間 τ を求める実験式

$$\tau = d/v + \alpha d + \beta + \gamma/d \quad (\mu\text{s}) \quad (17)$$

ただし、 v ; 電波伝播速度 ($= .299715 \text{ km}/\mu\text{s}$)
 α ; ($= 0.002155 \mu\text{s}/\text{km}$)
 β ; ($= -0.4076 \mu\text{s}$)
 γ ; ($= 38.67 \mu\text{s} \cdot \text{km}$)

(3) 真方位：位置 (ϕ_2, λ_2) からみた位置 (ϕ_1, λ_1) の北から東回りに測った真方位 Z

$$\theta = \cos^{-1} \{ (\sin \phi_1 - \sin \phi_2 \cdot \cos x) / (\sin x \cdot \cos \phi_2) \} \quad (18)$$

$$Z = \theta \quad \text{ただし、} \quad \sin(\lambda_1 - \lambda_2) \geq 0$$

$$Z = 2\pi - \theta \quad \sin(\lambda_1 - \lambda_2) < 0$$

x は2点間の角距離で(11)式で求めた値をそのまま使う。

TABLE 1. Example of calculations :Estimation of land propagation effect at LORAN-C waves "Y&Z"

Coordinate :TOKYO Datum

Sea area :East to HATTINOHE

Date M D H M S	*---measurement (μ SEC.)-----*					Latitude ° ' "	Longitude ° ' "	SD m	REF. μ SEC.	*- SYSTEM ERROR			(μ SEC.)---*			Velocity KM/μ S
	M	W	X	Y	Z					M	W	X	Y	Z		
05/2819:55:00	0.0	16623.7	33009.5	60563.9	86505.9	38 48.602	142 12.228	0	-5194.27	0.02	0.04	-0.00	4.10	45.77	.299715	
05/2820:01:00	0.0	16621.0	32995.5	60563.1	86506.1	38 49.709	142 12.631	2	-5201.21	0.02	0.04	-0.00	4.11	45.92	.299715	
05/2820:06:00	0.0	16618.1	32981.5	60562.2	86506.3	38 50.804	142 13.090	1	-5208.10	0.02	0.04	-0.00	4.15	46.07	.299715	
05/2820:10:00	0.0	16615.3	32967.7	60561.3	86506.6	38 51.890	142 13.513	3	-5214.92	0.02	0.04	-0.00	4.15	46.20	.299715	
05/2820:16:00	0.0	16612.7	32953.8	60560.7	86506.8	38 52.993	142 13.854	1	-5221.82	0.02	0.05	-0.01	4.14	46.33	.299715	
05/2820:21:00	0.0	16609.9	32940.0	60559.9	86506.9	38 54.067	142 14.299	1	-5228.56	0.02	0.05	-0.01	4.23	46.46	.299715	
05/2820:26:00	0.0	16607.1	32926.4	60559.1	86507.2	38 55.135	142 14.745	2	-5235.28	0.02	0.05	-0.01	4.29	46.57	.299715	
05/2820:31:00	0.0	16604.4	32912.5	60558.2	86507.3	38 56.230	142 15.138	2	-5242.14	0.02	0.04	-0.01	4.32	46.67	.299715	
05/2820:36:00	0.0	16601.8	32899.1	60557.1	86507.5	38 57.284	142 15.523	1	-5248.76	0.02	0.04	-0.01	4.35	46.77	.299715	
05/2820:41:00	0.0	16599.2	32885.6	60556.8	86507.7	38 58.351	142 15.907	2	-5255.44	0.02	0.04	-0.01	4.33	46.87	.299715	
05/2820:46:00	0.0	16596.6	32872.0	60556.2	86507.8	38 59.418	142 16.300	0	-5262.13	0.02	0.04	-0.00	4.42	46.96	.299715	
05/2820:51:00	0.0	16594.0	32858.4	60554.6	86507.9	39 0.496	142 16.683	2	-5268.88	0.02	0.04	-0.00	4.56	47.04	.299715	
05/2820:56:00	0.0	16591.4	32844.6	60554.0	86508.1	39 1.583	142 17.071	2	-5275.72	0.02	0.04	-0.00	4.54	47.11	.299715	
05/2821:01:00	0.0	16588.7	32830.9	60553.4	86508.2	39 2.659	142 17.471	2	-5282.46	0.02	0.04	-0.01	4.59	47.19	.299715	
05/2821:06:00	0.0	16586.0	32817.3	60551.9	86508.3	39 3.727	142 17.894	4	-5289.19	0.02	0.04	-0.01	4.68	47.25	.299715	
05/2821:11:00	0.0	16583.4	32803.7	60551.7	86508.4	39 4.795	142 18.292	1	-5295.88	0.02	0.04	-0.01	4.61	47.30	.299715	
05/2821:16:00	0.0	16580.8	32789.9	60551.2	86508.6	39 5.879	142 18.695	1	-5302.68	0.02	0.04	-0.01	4.68	47.35	.299715	
05/2821:20:00	0.0	16578.1	32776.1	60549.8	86508.7	39 6.969	142 19.099	0	-5309.53	0.02	0.04	-0.01	4.81	47.38	.299715	
05/2821:26:00	0.0	16575.6	32762.0	60548.3	86508.8	39 8.084	142 19.460	3	-5316.51	0.02	0.04	-0.01	4.82	47.41	.299715	
05/2821:31:00	0.0	16573.0	32748.2	60547.5	86509.0	39 9.168	142 19.855	5	-5323.31	0.03	0.04	-0.01	4.73	47.44	.299715	
05/2821:36:00	0.0	16570.3	32734.5	60547.0	86509.1	39 10.253	142 20.252	3	-5330.13	0.02	0.04	-0.01	4.67	47.47	.299715	
05/2821:41:00	0.0	16567.5	32720.5	60546.5	86509.3	39 11.348	142 20.728	2	-5337.01	0.02	0.03	-0.01	4.70	47.51	.299715	
05/2821:46:00	0.0	16564.8	32706.3	60544.8	86509.4	39 12.459	142 21.134	1	-5344.00	0.02	0.03	-0.01	4.77	47.56	.299715	
05/2821:51:00	0.0	16562.2	32692.3	60544.2	86509.4	39 13.564	142 21.518	0	-5350.93	0.02	0.04	-0.01	4.67	47.59	.299715	
05/2821:56:00	0.0	16559.7	32678.5	60543.7	86509.6	39 14.658	142 21.895	4	-5357.79	0.02	0.04	-0.01	4.66	47.61	.299715	
05/2822:01:00	0.0	16556.9	32664.5	60542.1	86509.6	39 15.753	142 22.355	3	-5364.68	0.02	0.03	-0.01	4.74	47.64	.299715	
05/2822:06:00	0.0	16553.8	32651.0	60541.6	86509.9	39 16.792	142 22.906	1	-5371.27	0.02	0.03	-0.01	4.63	47.66	.299715	
05/2822:11:00	0.0	16550.7	32637.5	60542.0	86510.1	39 17.823	142 23.520	0	-5377.81	0.02	0.03	-0.01	4.49	47.68	.299715	
05/2822:16:00	0.0	16547.2	32624.1	60542.2	86510.4	39 18.841	142 24.218	1	-5384.32	0.02	0.03	-0.01	4.48	47.72	.299715	
05/2822:21:00	0.0	16544.2	32610.4	60542.3	86510.7	39 19.896	142 24.757	1	-5390.99	0.02	0.03	-0.01	4.47	47.75	.299715	
05/2822:25:00	0.0	16541.7	32596.4	60541.3	86510.8	39 21.004	142 25.137	1	-5397.94	0.02	0.03	-0.01	4.55	47.80	.299715	
05/2822:31:00	0.0	16539.5	32582.5	60539.0	86510.9	39 22.117	142 25.387	3	-5404.90	0.01	0.03	-0.01	4.61	47.86	.299715	
05/2822:35:00	0.0	16537.6	32568.5	60537.2	86511.1	39 23.246	142 25.583	1	-5411.89	0.01	0.03	-0.00	4.49	47.91	.299715	
05/2822:41:00	0.0	16535.7	32554.5	60537.2	86511.2	39 24.374	142 25.765	3	-5418.92	0.01	0.02	-0.00	4.35	47.99	.299715	
05/2822:46:00	0.0	16534.7	32541.2	60534.2	86511.0	39 25.497	142 25.651	2	-5425.80	0.01	0.03	-0.01	4.58	48.09	.299715	
05/2822:51:00	0.0	16534.9	32528.6	60529.0	86510.8	39 26.602	142 25.181	0	-5432.47	0.01	0.03	-0.01	4.66	48.13	.299715	
05/2822:56:00	0.0	16535.2	32516.1	60525.9	86510.6	39 27.704	142 24.669	2	-5439.07	0.01	0.02	-0.01	4.43	48.18	.299715	
05/2823:01:00	0.0	16535.1	32503.6	60523.2	86510.3	39 28.795	142 24.272	2	-5445.69	0.02	0.02	-0.01	4.38	48.23	.299715	
05/2823:06:00	0.0	16535.4	32491.2	60519.9	86510.2	39 29.894	142 23.779	8	-5452.30	0.02	0.03	-0.01	4.49	48.25	.299715	
05/2823:11:00	0.0	16535.4	32478.9	60516.6	86509.9	39 30.959	142 23.380	3	-5458.74	0.03	0.04	-0.02	4.65	48.30	.299715	
05/2823:15:00	0.0	16535.4	32466.9	60512.0	86509.8	39 32.020	142 22.968	7	-5465.15	0.02	0.03	-0.02	4.79	48.31	.299715	
05/2823:21:00	0.0	16535.7	32454.9	60508.2	86509.5	39 33.077	142 22.496	4	-5471.51	0.03	0.04	-0.02	4.67	48.34	.299715	
05/2823:26:00	0.0	16535.7	32443.0	60506.5	86509.2	39 34.122	142 22.092	3	-5477.84	0.03	0.04	-0.02	4.51	48.36	.299715	
05/2823:31:00	0.0	16535.9	32431.2	60503.4	86509.2	39 35.168	142 21.628	6	-5484.14	0.02	0.04	-0.01	4.72	48.36	.299715	
05/2823:36:00	0.0	16536.0	32419.4	60499.2	86508.7	39 36.209	142 21.202	2	-5490.43	0.03	0.04	-0.02	4.97	48.40	.299715	

7. 実測データによる電波伝播誤差の評価結果

電子計算機による計算例を第1表に示す。SDは決定位置をもとに計算した各データの(O-C)の標準偏差をメートルに換算した値、REF. は(5)式から決定された ΔT である。SYSTEM ERROR の欄は各局データの(O-C)そのものである。Z局のデータから $50\mu s$ 近い偏差が分離されているが、これは送受信点間の距離が3,000kmをはるかに超えており、明らかに空間波による遅延である。電波伝播速度は従来、 $0.2996912\text{km}/\mu s$ が採用されていたが、陸上伝播が含まれない海域でのデータから(O-C)が最少になる伝播速度を求めたところ、表記のようになったので、暫定的にこの値を採用した。

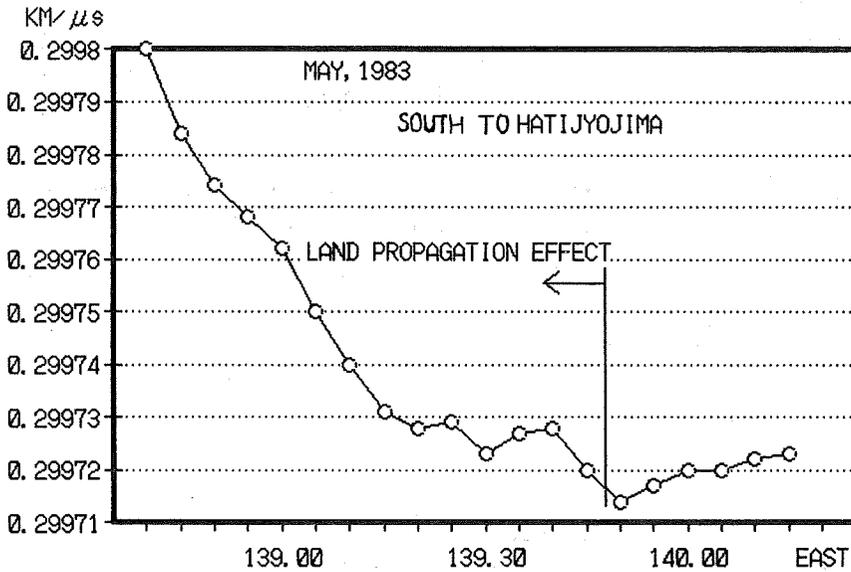


Figure 2 The wave propagation speed where (O-C) is minimized is obtained. A rise near $139^{\circ} 40'$ E seems affected by the Hatizyo island and a steep rise in the west of the island by the land from Inobozaki to Boso peninsula.

※ 電波伝播速度 0.2996912 は標準大気屈折率が 1.000338 に相当し、 0.299712 は 1.000268 に相当する。因みに理科年表では波長により異なるが 1.00027 程度を与えている。

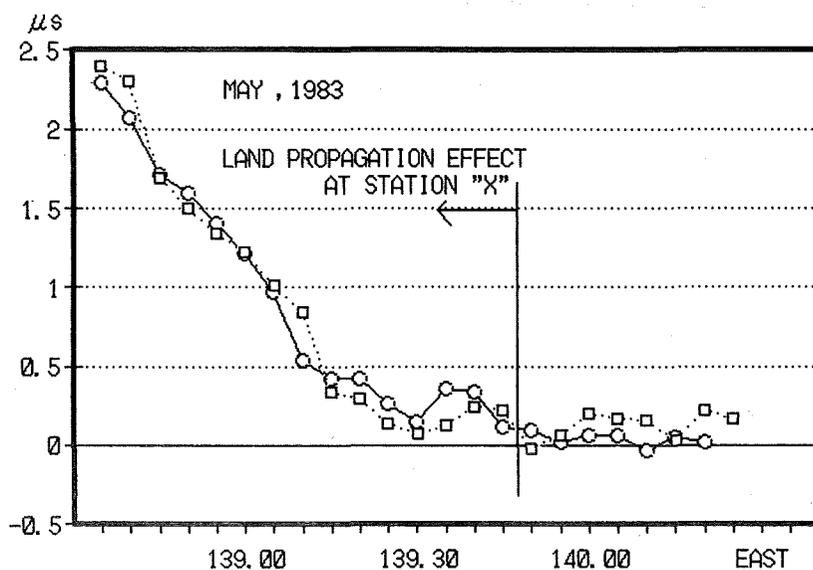


Figure 3 Increase of a delay of LC wave propagation on land. A rise near $139^{\circ} 40' E$ seems affected by the Hatizyo island and a rise in the west of the same island by the Boso peninsula. A circle (\circ) shows the navigation to the west and box (\square) shows the navigation to the east. Note the reproducibility in accordance with locations.

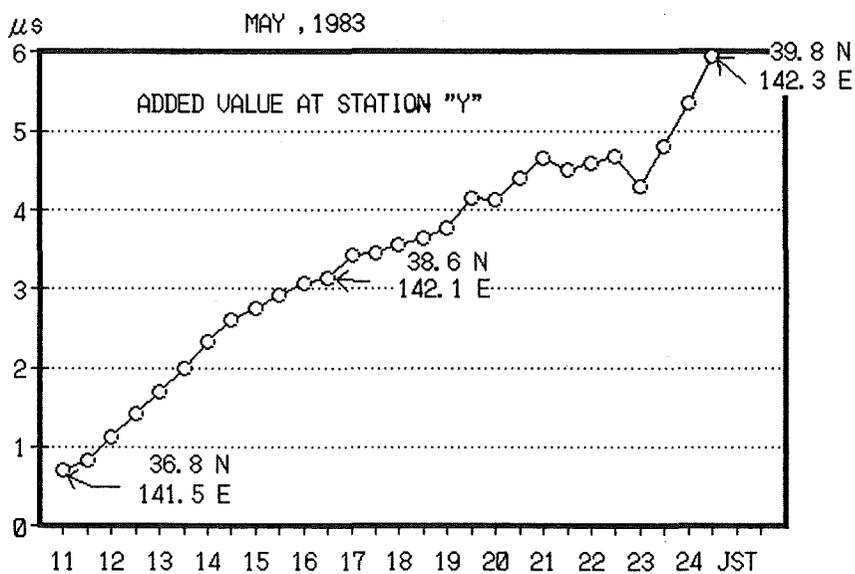


Figure 4 Increase of a delay by LC propagation on land. Data in the north navigation in the east sea off east Japan.

8. 陸上伝播距離の計算

第4図を第1図のロランC局配置図と対照して見ると伝播経路に含まれる陸上距離に比例して電波伝播時間が増加しているらしいことが分かる。ある点から発射した電波が実際にどのような経路を辿って、他の点に到達するか分からないが、一応電波は測地線（地球上2点を結ぶ最短距離）に沿って伝播すると考え、これに含まれる陸上距離を計算し、増分を評価することにする。

陸上距離は適当地図にコンパスを当てて、概略求めることができるが、一般に地図上に測地線を引くと直線とはならないから、ロランCチェーン全体が入るような小尺の図からこのような方法で求めても誤差が大きく精度が期待できない。ここではもっと正確に陸上距離を求めることにする。とはいっても、伝播時間の増分は陸地10km当たり0.1 μ sより小さいので ± 5 kmを越えなければ十分である。当部佐藤航法測地課長は、このような目的に使用できる地図データファイル形式及び測地線上に含まれる陸上距離を電子計算機で求めるアルゴリズムを開発した。そこで、ここではこのプログラムを使って陸上距離を計算した。使用した地図データファイルは経緯度を2'×2'のマスキュラに切り、そのブロック全部が海の時“0”、陸の時“1”、南側が連続して海で北側が陸の時“3”、南側が連続して陸で北側が海の時“4”、前記以外の海陸混合の時“2”とコードしファイル化したものである。この地図データファイル上で、2点を結ぶ測地線のブロック毎に変わる方位線をA点からB点まで追跡し、次々に方位線が切る陸とコードされたマスキュラの陸距離をブロック毎に計算しそれを全部積算して陸上距離を求める。(詳しくは文献(1), (2)を参照されたい)

この方法で求めた陸上部分の距離は、原理的に ± 2 km程度の誤差を含むが、この場合問題にならない。

9. 陸上伝播による増分の評価

前記の方法で求めた各点の陸上距離に対応した、電波伝播時間の増分から、増加率を計算したところ第2表のとおりとなり、ほぼ一定の値を示すことが分かった。なお増加率のうち5.1は一つだけ離れているので不採用とした。

Table 2 Outline of the land propagation distance at each point and increment

Stn.	Latitude	Longitude	Land D.	Increase	Rate of Inc.	Average
	N	E	km	μ s	ns/km	ns/km
Y	37.8°	141.9	447	2.69	6.0	6.0 \pm 0.05
	38.9	142.2	664	4.02	6.1	
	39.1	142.3	740	4.67	6.3	
	39.4	142.4	809	4.13	5.1	
	39.6	142.3	853	5.25	6.1	
	40.0	142.2	913	5.52	6.0	

ここではX局による評価例は掲げないが、ほぼ同様な結果であったことを付記しておく。

10. 陸上固定点における測定との整合性

海上保安庁の下里水路観測所（以後 SHO とよぶ：所在地・和歌山県那智勝浦町）は、L C北西太平洋チェーン5局のうち一局のみ、大きく陸上伝播部分が含まれる受信点に位置し、陸上伝播の影響を評価するのに都合の良い配置になっている。しかも SHO では測地衛星ラジオスの、国際共同観測に必要な協定世界時を維持するため、年間を通してロランC電波の受信を行っている。ここでの受信データのうち、北海道（X局）からの到来電波には、約880kmの陸上部分がふくまれている。このO-Cから陸上伝播による増加率を計

算してみると下表のようになり、前節の評価値によく一致していることが分かる。

下里水路観測所 $\phi = 33^{\circ} 34' 39''$ N

$\lambda = 135 56 12$ E

Table 3 Land distance at the Simosato Hydrographic Observatory and increase ratio of the wave propagation time based on the effect

LC Stn.	Measured	Cal	Land D.	Rate Of Inc.
	μs	μs	km	ns/km
W Stn.	18387.25	-0.04	0	
X Stn.	37088.18	5.25	880	6.0

($v=0.299715\text{km}/\mu s$)

11. ロランC受信位相の季節変動

ロランCシステムを高精度で利用するためには、季節変動についても評価しておく必要がある。電波は海上や陸上の大気中を伝播して受信点に到達し、伝播経路の状況は気象条件によって日々変化するから、電波伝播速度に日周変動や季節変動が考えられるわけである。この量が大きいのか小さいのか、補正できる性質のものか、そうでないものか？これらのことはロランCシステムを出来るだけ有効に利用するため、ぜひとも知っておくべき情報の一つである。このような情報は、固定点における長期の連続測定から知ることができる。

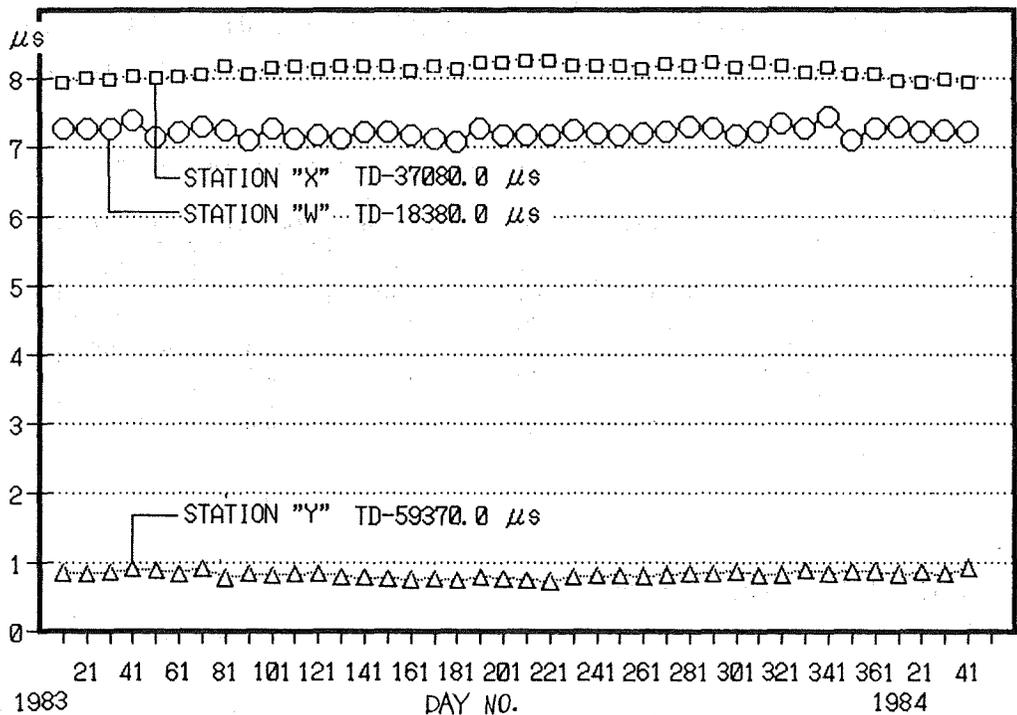


Figure 5 Seasonal Variation of LORAN C in phase observed at the Simosato Hydrographic Observatory.

下里水路部観測所における測定結果を更に、詳しく調べてみることにする。第5図はSHOにおける1983年の1年間におけるロランC到来時間差測定結果をプロットしたものである。SHOのロランC受信値は、普通の航海用のLC受信機で主局に対する従局W, X, Yの到来時間差及び受信点の比較基準に対する時間差を連続測定し、毎30分値をプリントアウトする形で取得されている。この24時間平均値を10日毎にプロットしたのがこれらの図である。

これを見ると、ロランC地表波の季節的な受信位相変動は、いずれの局も $\pm 0.15\mu\text{s}$ より小さいらしいことがうなづける。最もこの結果は、たまたま1年間のものであり、本図の信頼性の確認は、なお数年間のデータの蓄積を待たねばならない。

12. 陸上伝播補正図の作成

第2表の結果は、全国的なものではなく、一時期の部分的なものであり、これだけで一般的なことを云うには、多少強引のそしりを免れないが、この結果は部分的といっても近畿地方から東の本州を縦断する形のかなり広い地域が関与し、季節変化は少ないのであるから、それがほぼ一定の値を示したと云うことは一般化しても、大勢において、間違いはないとおもわれる。そこで、以上の結果をもとにLC北西太平洋チェーン(GRI 9970)の日本付近におけるLC地表波陸上伝播補正図を作成した。本図の原計算は経緯度の $5' \times 5'$ で実行しMTにファイルした。更に細かい補正値が必要な場合には連絡されたい。

特定の経緯度格子点からロランC局までの測地線に含まれる陸上距離は前述の方法でもとめた。求めた陸上距離(km)に6nsを乗じて補正値を計算した。図W~Yは双曲線航法用受信機で取得したデータに対する補正値で、主局対応陸上距離が差し引かれている。補正は取得データから対応する本図の数値を減ずる。図Mは主局電波を受信して時計比較を行う場合の補正値であり、計算電波伝播時間に本図の数値を加えたものが実際の電波伝播時間となる。

13. あとがき

ここで作成した補正図は、キメが粗く、精度的に十分とはいえないが、それでも補正の大きい海域では、1桁程度の測位精度の改善が得られるものと思う。このことは注意深い読者なら、すでにお気づきでしょうが、もう一度図を見て頂きましょうか。東海地方から九州にかけての西日本南方洋上でX局、東北から北海道にかけての東日本東方海上でのY局の補正値が、数 μs に達する大きなものとなっている。従って、もしこれらの海域で、陸上伝播による補正が無視されるなら、それによる測位値の系統誤差は数100メートルから1,000メートルに達してもおかしくありません。ここで作成した補正図が出来ただけおおくの方々の目にとまり、テストされることを願っている。そして、その評価結果がお聞かせ頂けるなら筆者として、これに過ぐる喜びはありません。

本論文の結果は、特定海域、特定日時のものであって、決してこれでよしと考えているわけではありません。正確にはなお長期、広域的な調査による検証が必要と考えます。こうした調査の実施は、従来の電波航法あるいは、時計比較の精度を飛躍的に向上させ、航行援助システムの投資効果を高めると考えるので、更に本格的な調査による細かいオーダーでの議論が望まれる。

本稿の作成にあたって、二点を結ぶ測地線上に含まれる陸上部分の算定には、当部佐藤航法測地課長、海上におけるデータの取得には測量船「昭洋」の観測科の皆様、データ取得収録装置については光電製作所の関係者に大変お世話になりました。ここに厚く感謝致します。

参 考 文 献

- 佐藤典彦 1967 : テッカ海図の計算, HITACユーザー研究会第4回大会記念論文集, 159~176ページ.
- 佐藤典彦 1969 : デジタル型計算機による地図の読みとり, HITACユーザー研究会第6回大会記念論文集, 209~233ページ.
- Grant, S. T. 1973 : RHO-RHO Loran C Combined With Satellite Navigation for offshore Surveys. International Hydrogr. Review, 50, 2.
- Corst Guard 1980 : Radio Navigation System pp. 30~37, Department of Transportation
- 小野房吉 1983 : 電波航法の新しい測位原理 (一般解) 水路部研究報告, 第18号 133~144ページ
- 小野房吉 1984 : 電波航法の新しい測位原理と測位精度の評価, 航海学会誌「航海」第79号 35~40ページ