関東南方域におけるロランCの精度評価

柳 川 三 郎*・柿 原 利 治*

Accuracy Evaluation on Loran-C in the Southern Sea Area
of Kanto District

Saburo YANAGAWA and Toshiharu KAKIHARA

Abstract

This study was conducted for the purpose of evaluating the accuracy of the observed Time Difference (TD) in Loran-C when the ground wave propagates on the surface included both land and sea.

The TD of W, X and Y in North West Pacific Chain GRI 9970 was measured at 50 points in southern Kanto area—Tokyo, Miura Peninsula and Izu islands.

The results obtained are summarized as follows;

- (1) Most of the standard deviations in the TD of W, X and Y which are obtained from the continuous observation at Tokyo monitor station are about $0.1 \mu\text{s}$. This means high repeatability accuracy in the line of position.
- (2) The more land distance included in propagation path is longer, the more lag of the arrival time from Loran-C station becomes larger.
- (3) Errors of the TD at spindle shaped Ō Sima increased in proportion to difference of mountain height on propagation path, and the average rate of increase was $0.1 \mu\text{s}/100\text{m}$.
- (4) Error of the TD by irregular terrain was reduced rapidly as going far off from coastal line.

はじめに

ロランCの測位精度は、位置の線の再現性と理論上の位置の線に対する観測された位置の線の相対的偏位量の両面から評価されることが望ましい。

位置の線の再現性は、地表波の安定性に関係し、定点における連続観測の結果から、標準偏差が $0.1 \mu\text{s}$ の極めて小さなばらつきであることが報告⁽¹⁾⁽²⁾されている。しかし、我が国沿岸域で観測される地表波の伝搬経路上には海陸が不規則に混在し、山岳地も広く分布することがあるために、伝搬速度は、伝搬経路が滑らかで、均一な大地インピーダンスの場合の二次位相係数による遅延現象の外に、導電率の異なる海陸境界面、あるいは地形の起伏によりひき起される位相の急激な変動⁽³⁾があるといわれている。これは位置の線の歪みとなって現われ、特に沿岸域における測位精度に影響を与える。米国ではこの点を重視し、実測並びに地表波伝搬理論により、沿岸域内における位置の線の補正作業⁽⁴⁾を進めている。

著者らは、北西太平洋9970チェーンを用い、主局から受信点までは海上伝搬で、X局からの同一伝搬経路上に海、山岳地帯、離島を含む関東南岸およびこれに続く伊豆諸島の陸上並びに海上において観測を行ない、海陸伝搬経路に伴う時間差に含まれる誤差の性状について検討し、若干の知見を得たので報告する。

* 正会員 東京水産大学（東京都港区港南4-5-7）

図1 陸上観測点、海上観測点およびX局からの地表波伝搬経路A, B

た時間差の誤差の変化を追って行くのに都合がよいからである。これらの測点位置は国土地理院 1/25,000 地形図から求めた。観測時間は、安定した地表波が受信できるとされる09時から18時までの日中に行ない、受信器の各警報ランプの消灯を確認して、受信状態が安定した後に測定した。各測点での観測時間は15分から40分程度であった。観測項目は、各局時間差、S/N 比、サイクルマッチングに要する時間等である。観測に際して、接地は大地あるいは海にとり、アンテナはなるべく高く設置するよう心掛けた。この観測に使用した受信器は日本無線 JNA-710 である。

1.2 海上観測

海上観測は陸上観測に先立ち、海陸境界面および離島付近の地表波の伝搬傾向をみるため、昭和55年11月15日から11月17日の昼間に、本学練習船青鷹丸を用いて、伊豆大島周辺の岡田港沖合、千波埼沖合、波浮港沖合の陸岸から2 km 以内の3海域で行なった。測定にあたっては、船を静止させた状態で各局の時間差を6回から10回観測し、同時に、六分儀による3物標の水平夾角測定を行なった。この観測に使用した受信器は、古野電気 LC-200 である。

2. 結 果

理論時間差の算出にあたり、測地系は WGS-72 に統一して行ない、電波伝搬速度、地球常数および局位置等は LORAN-C USER HANDBOOK⁽⁵⁾ に記載されている値を用いて、地表波が海上のみを伝搬した場合の時間差を求めた。さらに、観測時間差から理論時間差を引いた値を時間差誤差（以下誤差という）とした。

2.1 定点観測

表1にモニター測点における観測結果を示す。全観測期間を通じて、各警報ランプの点灯および10 μ s スリップは生じなかった。観測中、主局、W局、Y局からの伝搬経路上を台風や前線が横切ったこともあったが、時間差への影響はみられず、各局とも昼夜の別なく安定した地表波が受信できた。観測された時間差の標準偏差は、各局とも0.1 μ s であり、これは位置の線の再現性精度が高いことを示している。一方、誤差は平均値で X 3.0 μ s, Y 0.8 μ s, W 0.0 μ s と局ごとに異なっている。東京における双曲線の発散率は、0.1 μ s あたり X 16m, Y 31m,

1. 観 測 方 法

この観測はモニター点および各地域の陸上と海上において行われ、図1に陸上観測点、海上観測点およびX局からの地表波伝搬経路A, Bを示す。

1.1 陸上観測

1.1.1 定点観測

地表波の安定性は、東京水産大学 (35°-37'.42 N, 139°-45'.04 E) にモニター測点を設けて調査した。観測は、昭和56年7月29日0時から8月7日20時までの10日間に、北西太平洋9970チェーンのX-Y, Y-W, X-Wを順次選択して、時間差を15分間隔で連続測定し、プリンターで記録させた。受信器は古野電気 LC-500 である。

1.1.2 各地域の陸上観測

測点は、三浦半島南岸、伊豆大島、式根島、新島、神津島を結ぶ地域、および伊豆大島三原山（標高758m）、新島宮塚山（428m）、神津島天上山（571m）の山頂など計46点を定めた。これらを結ぶ地域に測点を設定した目的は、X局については大圏に近似した海陸の伝搬経路上に位置し、主局については海上伝搬であることから、X局からの経路上でのみ生じ

表1 モニター測点における観測結果

	観測日時	観測時間差 (μ S)	観測数 (%)	平均時間差 (μ S)	標準偏差 (μ S)	変動幅 (μ S)	誤差 (μ S)
X	7/29,0000 ~ 8/2,2400 8/7,0000 ~ 8/7,2000 140時間	35524.7 .6 .5 .4 .3 .2	1(0.2) 7(1.3) 139(24.8) 294(52.5) 114(20.3) 5(0.9)	35524.4	0.1	0.6	3.0
Y	7/29,0000 ~ 8/2,2400 8/5,0000 ~ 8/6,2100 165時間	60397.5 .4 .3 .2 .1 .0	3(0.5) 41(6.2) 254(38.5) 285(43.2) 74(11.1) 3(0.5)	60397.2	0.1	0.6	0.8
W	8/5,0000 ~ 8/6,2100 8/7,0000 ~ 8/7,2000 65時間	17450.3 .2 .1 .0 17449.9 .8 .7 .6	1(0.4) 20(7.7) 51(19.6) 93(35.8) 70(26.9) 19(7.3) 4(1.5) 2(0.8)	17450.0	0.1	0.8	0.0

W42mであるから、誤差の大きいXとYの組合せによる位置は、地形図上に定めた測点位置に対して188度方向へ481mの偏位となる。特にX誤差が大きい原因は、主、W、Y局からの伝

搬経路がほぼ海上であるのに対し、X局からの経路には252.5海里的の陸地が存在し、北海道を発して陸中海岸に上陸した地表波は、北上山地、仙台湾、阿武隈山地そして関東平野に至る経路上の大地インピーダンスが異なり、しかも起伏に富んだ地形上を経由していることによると考えられる。

2.2 陸上観測ならびに海上観測

表2(a)に地域別陸上観測結果を示す。表2(b)に伊豆大島沖合海上観測結果を示す。図2に伊豆大島におけるX誤差の分布を示す。陸上測点46のうち、警報ランプは点灯しなかったにもかかわらず、明らかに10 μ sスリップしている測点がYで4点、Wで12点あった。出現地域には偏在がなく、モニター測点よりむしろ信号受信条件としては恵れていることから、観測時の接地に問題があったのではないと思われる。以後10 μ sスリップした時間差は除いて処理した。

全観測点の誤差の平均値は、X2.7 μ s、Y-0.1 μ s、W-0.4 μ sとなり、Xが他局に対して大となるモニター測点結果と同傾向であった。一方、地域別に誤差の標準偏差をみると、伊豆大島におけるX誤差の標準偏差は0.6 μ sで、他の地域、他の局が0.1 μ sから0.3 μ sであるのに対して大きく、大島内の地域による誤差のばらつきがみられ、特に、同島北部の測点13では最小値1.4 μ s、南部の測点8で最大値4.1 μ sの誤差があった。島の北部で誤差が小さく、南部で大きくなる傾向は、大島ほどの顕著さはないが、新島および神津島でもみられた。この原因として、島を伝搬する地表波の経路が考えられる。起伏のある地形上を地表波が伝搬する際に反射、回折等の現象があるとされているが、ここでは、地表波は島内地表に沿って直進すると仮定した場合、大島三原山山頂を通る地表波は、X局からは真方位201度へ、主局からは350度へと、互いにほぼ反方向に向け島を縦断することになる。従って島の北部測点では島内主局経路上で、また南部測点ではX局経路上で生じる伝搬時間の遅れが前述の誤差傾向となって表われたと思われる。一方、山頂におけるX誤差は、三原山2.4 μ s、宮塚山2.9 μ s、

表2(a) 地域別陸上観測結果

	測点数	X			Y			W		
		誤差 (μ S)	標準偏差 (μ S)	10 μ Sスリップ 測点数	誤差 (μ S)	標準偏差 (μ S)	10 μ Sスリップ 測点数	誤差 (μ S)	標準偏差 (μ S)	10 μ Sスリップ 測点数
三浦	12	2.8	0.2	0	0.4	0.2	1	-0.3	0.1	5
伊豆大島	17	2.5	0.6	0	-0.3	0.3	2	-0.5	0.3	5
新島	12	2.7	0.3	0	-0.3	0.3	1	-0.4	0.2	2
式根島	1	2.8		0	-0.1		0	-0.4		0
神津島	4	3.1		0	-0.3		0	-0.3		0
合計	46	2.7	0.4	0	-0.1	0.3	4	-0.4	0.3	12

誤差 平均値

表2(b) 伊豆大島沖合海上観測結果

	X誤差 (μ S)	Y誤差 (μ S)	W誤差 (μ S)
岡田港沖合	1.3	-0.4	-1.0
千代崎沖合	3.3	0.1	0.0
波浮港沖合	2.5	0.2	-0.4

誤差 平均値

図2 伊豆大島におけるX誤差の分布

図3 伊豆大島における陸上伝搬距離差に対する各局の誤差

天上山 $2.6 \mu\text{s}$ であり、伊豆諸島の平均値 $2.6 \mu\text{s}$ 付近に前後していた。

岡田港沖合観測点は、X局からの電波が大島に進入する直前で、主局からの電波が同島を抜けた直後に位置し、千波崎沖合測点では、X局電波が島を抜けた直後で、主局電波が島に進入する直前に位置している。また波浮港沖合測点は両局からの電波が島の影響を受けることが少ない地理的な特徴を有している。海上測点は陸上測点と異なり、六分儀で位置を求めているため位置精度の面で差異はあるが、岡田港沖合、千波崎沖合、波浮港沖合測点にそれぞれ最も近い大島陸上測点13, 9, 3における誤差を比較した場合、海上測点結果とほぼ同量であり、今回の2 km 程度の離岸距離では、海陸導電率の境界面における位相変動、あるいは陸から海へ地表波が進む場合に起こるとされる陸上伝搬で生じた伝搬時間の遅れの回復現象⁽⁶⁾はみられなかった。

3. 考 察

3.1 伊豆大島における誤差の要因

図3に大島における陸上伝搬距離差に対する各局の誤差を示す。図4に大島における標高差に対する各局の誤差を示す。図中の3直線はW, X, Yそれぞれについての回帰直線である。

陸上伝搬距離差とは、二次局電波が伊豆大島に上陸してから同島測点に至るまでの距離と主局電波の上陸点から同測点に至るまでの距離の差を意味する。距離差に対する各局の誤差は極めて正の相関が高く、一次直線に回帰させると、切片は $X 2.6 \mu\text{s}$, $Y -0.2 \mu\text{s}$, $W -0.5 \mu\text{s}$ であり、局ごとに異なるが、直線の勾配は各局ともほぼ等しく、約 $0.06 \mu\text{s}/\text{km}$ である。この値は浜田らが日本全域から求めた平均的な値⁽⁷⁾の約10倍に当たる。また仮に、伊豆大島が平坦で、 $0.001 \text{ mhos}/\text{m}$ の導電率を有するとし、海陸導電

率の境界面での現象を考慮に入れない場合、伊豆大島における陸上伝搬距離差に対する誤差の変化率は $0.0064 \mu\text{s}/\text{km}$ ⁽⁸⁾ となり、今回得られた勾配の約1/10程度にしかならないことから、島の導電率による誤差というより、むしろ島内伝搬経路上地形の起伏等により生じた、いわゆる付加的二次位相係数⁽⁹⁾が大きく関与していると考えられる。

今回の場合、測点を主に海岸線付近に選び、主、二次局の島内通過距離の差が零になるよう考慮したから、切片の値は伊豆大島の影響を受ける前に存在した誤差に近似すると思われる。特に、主、二次局いずれからの経路も海上であるWとY局の切片の値が負となっているのは、理論時間差算出時に用いた海上電波伝搬速度と実際の

図4 伊豆大島における標高差に対する各局の誤差

図5 A, B両地表波伝搬経路に沿う陸上測点におけるX誤差の変化

海上伝搬速度とが異なっていたことを示すものであり、双曲線の発散率によっては場所により無視できない偏位量となるため、今後観測域を広げて、より正確な海上電波伝搬速度を決定する必要がある。

伊豆大島のような紡錘型地形をした島を地表波が伝搬する場合、島内伝搬経路上の起伏状態を表わす一方法として、経路上の最高標高を考え、二次局、主局それぞれの経路上の最高標高の差に対する各局の誤差をプロットすると、誤差は各局とも標高差 100m につき約 $0.1 \mu s$ の割合で変化し、山の高さも島内を地表波が伝搬する際の大きな誤差発生要因になっているといえる。

3.2 海上伝搬に伴う誤差の減衰

図5にA, B両地表波伝搬経路に沿う陸上測点におけるX誤差の変化を示す。A, B両経路は三浦半島南岸を起点とし、伊豆諸島に進むX局からの地表波伝搬経路を大圏に近似させたものである。A経路上測点に至る主局電波の経路はすべて海上で、A経路自体も三浦以後、伊豆大島南東岸を経て新島東岸まで海上である。三浦・大島間 29.3 海里で誤差は $2.7 \mu s$ から $2.5 \mu s$ へわずかな減少で、その後大島・新島間 20.6 海里で誤差の変化はなく三浦における誤差の大部分が洋上はるか49.9海里沖合まで残存していることを示している。このことは、陸上観測で得られた位置線のデータを基本にした同一伝搬経路上海上における位置の線の予測にディファレンシャル方式が極めて有効な場合があることを示すものでもある。A経路において誤差が緩慢な減少傾向を示す理由として、三浦測点に至るまでのX局からの伝搬経路上の地形起伏状態が関係していると考えられる。すなわち、地表波は東北地方の山岳地帯を伝搬後、一転して平坦な関東平野、東京湾を進み、丘陵地形の三浦に至っているため、山岳地で生じた位相の遅延量が平坦部で回復され、その限度付近まですでに達していたと考えられる。

一方、B経路の特徴は、伊豆大島三原山および神津島天上山の山頂を超え、両島を縦断していることにある。伊豆大島北岸から南岸にかけて誤差は急激に増加し、大島南岸で $4.1 \mu s$ あった誤差は、そこから 23.6 海里離れた式根島で $2.8 \mu s$ まで減少し、さらに海上 7 海里隔てた神津島天上山において $2.6 \mu s$ になり、A経路の新島測点とほぼ同じ値を示している。そして、神津島南岸で誤差は $3.2 \mu s$ に再び増加するという伊豆大島と同様な傾向を示した。図5では各測点における誤差間を直線で結んであるため、正しい誤差変化を表現しているとはいえないが、伊豆大島・式根島間の比較的短い海上伝搬で、伊豆大島縦断で生じた誤差が減少してゆく傾向はうかがえる。

以上のことから、ロランC地表波が陸上伝搬から海上伝搬に移行した後の誤差減少率は、海上に出る直前の伝搬経路上地形の起伏に大きく左右されているといえよう。従って、沿岸域における測位精度の向上を計るためには、この減少現象を加味した補正が必要と思われる。

ま と め

東京における定点観測および三浦半島、伊豆諸島でロランC北西太平洋9970チェーンのW, X, Y各局の時間

差を測定し、次のような結果が得られた。

1. モニター測点における連続観測において、各局時間差の標準偏差は $0.1\mu\text{s}$ であり、位置の線の再現性精度は高かった。
2. 全陸上測点における誤差の平均値は、 $W-0.4\mu\text{s}$, $X2.7\mu\text{s}$, $Y-0.1\mu\text{s}$ であり、二次局から測点に至る伝搬経路上に多く陸上が存在するX局の時間差に含まれる誤差が大きかった。
3. 伊豆大島において、各局の誤差は、島内伝搬経路上の二次局と主局の標高の差と極めて相関が高かった。
4. 地表波が陸から出て海を進むうちに、誤差の減少現象があり、海上伝搬距離に対する誤差の減少率は海に出る以前の地形起伏により大きく異なる。特に、島頂越えにより急激に生じた誤差の減少は早かった。

終りに、この研究にあたり、受信器の便宜を計って戴いた古野電気(株)、海上観測の際、ご協力いただいた本学練習船青鷹丸船長はじめ航海士の方々、並びに陸上観測を手伝ってくれた学生藍原清、小野峰嗣両君に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 米沢弓雄他：ロランC自動受信指示器による観測結果に対する考察—I., 日本航海学会論文集, 59号, pp. 67~73, 昭和53年8月
- (2) S. Yanagawa et al: "Accuracy and repeatability of ship position in fishing grounds", Transactions of the Tokyo University of Fisheries, No. 4, pp. 21~30, March 1981.
- (3) J. R. Johler, L. A. Berry: "Loran-D phase corrections over inhomogeneous, irregular terrain", ESSA Technical Report IER 59-ITSA 56, November 1967.
- (4) John J. Speight: "DMAHTC support to national ocean survey Loran-C charting", Navigation, Vol. 29, No. 1, pp. 22~39, Spring 1982.
- (5) U. S. Coast Guard: "LORAN-C USER HANDBOOK", COMDTINST M16562.3 (old CG-462), May 1982.
- (6) B. G. Pressey: "Change of phase with distance of a low-frequency ground wave propagated across a coast-line", Proceedings I. E. E., paper No. 2082R, pp. 527~534, July 1956.
- (7) 斎藤清隆, 濱田悦之他：ロランCの陸上伝搬速度による補正とその効果について—Ⅲ—, 日本航海学会論文集, 67号, pp. 109~114, 昭和57年8月
- (8) Bernard Wieder: "Use of Loran-C over land", Program of 25th Anniversary Frequency Control Symposium, pp. 171~178, April 1971.
- (9) 同掲(4)

質 疑 応 答

田口一夫：大島における誤差は山の傾斜が影響していると思う。北はゆるやかな地形、南は急峻な崖、従って、北、南という形で一括処理でなく各測点ごとに整理したら、すっきりとなると思うが。

柿原利治：地表波が山を越える際に生じる誤差には経路上の傾斜も関係していると思いますが、今回は大島の地形を紡錘型に単純視したので標高のみを問題にしました。地域的な地形を加味した問題については、今後の研究課題にしたいと思っております。

田口一夫：海上伝搬距離の増加と誤差の関連では、大島と他の小島の地形(山の高さ)の影響があるはずなのにそれがみられないのは大島の磁場とかの関連を考慮すべきだと思うが。

柿原利治：御指摘の通り他の小島の影響がB経路の神津島南側でみられ観測されていますので、図を訂正して報告します。