航行用 100 kHz 電波帯の伝搬特性の 解析とそれらによる船位精度の改善…VI

—ロラン C…V—

田口 一夫*・松尾 晋*

Studies on the Both Propagation Characteristics of
Radio Waves in the 100kHz Navigation Band and
Improvement of Ship's Position by Them—VI
Loran C—V

K. Taguchi and S. Matsuo

Abstract

The Loran C, SS3 data of 1967-1971 were analysed as follows;

In the propagation route of Y rate over seawater, the constant deviations versus the distance from the master station were shown for linearly correlation, and the constant is $\pm 3.2 \mu\text{s}/100 \text{ n.m.}$ The deviation of X rate observed at Hiraiso was agreed with this constant in spite of the different area. The seasonal variation of the reflecting height was found at night and these stability was superior to that of day. The correlation between the field strength of X rate at Hiraiso and the $10 \mu\text{s}$ jumps could not be found at the present time.

Some modes of reflecting height in 100 kHz were accordance with season, latitude and the direction of the pass route. If the SWC value is decided in fix, these variations will over the accuracy of this system frequently.

Consequently, the Loran C SWC tables should be roughly correct by these condition above.

1. 序 論

1967 年来実施している (表 1) ロラン C, SS 3 チェンの測定結果によつて考察を行つたもので、主として南九州海域における伝搬特性を解明した。なお、伝搬方向及び距離の変化による特性をみるため、銚子、平磯にても測定し、これらもあわせて解析した。測定は、可視式受信器により、連続72時間、30分間隔で実施するのを原則とし、毎回各局を切替え受信する。解析は従来と同様の手法によつた。今回の考察は次の点に重点をおいた。

1) 南九州の4測点における Y レート、GG 波の定偏差特性と、夜間の主局地表波の限界。

* 鹿児島大学水産学部 (鹿児島市下荒田町 470)

Table 1. Loran C observation, SS 3 chain (year, season and position).

	Yamagawa	Tanegashima	Mejima	Koshikishima
Spring	67, 68, 69, 70, 71	—	—	—
Summer	68, 69, 71	67	67, 68	69
Autumn	70	—	—	70
Winter	69, 70, 71	69, 70, 71	—	—

- 2) GS_N , GS_D の特性から, 長距離伝搬する 100 kHz 波の昼夜における反射高さの推定。同様に
にしてその安定度, 季節変化, 反覆性。
- 3) 時間差値と電界強度の相関。

2. 測定結果と考察

2.1 Y レート GG 値の定偏差

測点群, 種子島, 山川, 甌島, 女島における GG 値の定偏差 (1967~1971) は表 2 である。これらは先に発表した[2~5], 定偏差と一致するもので, この結果はさらに重みをましたことになる。しかも種子島, 山川の値は, 本測定期間中ほぼ一定と見なせるし, 季節変化が見られない点が特徴といえよう。また甌島の測定で

Table 2. Constant deviations of ground wave, Y rate, obtained in the Southern Kyushu.

Yamagawa	Jan	Mar	Aug	Oct
1967	—	-2.9	—	—
1968	—	-2.4	-2.0	—
1969	-2.0	-1.1	+2.9	—
1970	-2.7	—	—	-2.9
1971	-1.5	-2.0	-2.8	—
Tanegashima				
1967	—	—	-4.2	—
1969	-4.0	—	—	—
1970	-3.7	—	—	—
1971	-1.0	—	—	—
Mejima				
1967	—	—	+1.4	—
1968	—	—	+1.4	—
Koshikishima				
1969	—	—	-0.6	—
1970	—	—	-2.0	—

Fig. 1 Configuration of Loran C, SS 3 chain and the sun rise/set line* showing by the curve.

* by Hiraiso Branch, Radio Research Laboratory.

は, 夜間読み取り値に $S_N G$ が現われ, GG であつても $10 \mu s$ 整数倍偏差 (以下ジャンプとよぶ) の発生回数が多い [2, 4]。甌島を除く 3 測点の Y レートは, 海上伝搬であるが, 甌島への主局経路は陸上伝搬約 23 哩を含む。

4 測点群の Y レートにおける距離関係は, 図 1 のように Y 従局からはほぼ同一円周上に位置し, また主局と女島を結ぶ大圏付近に沿つて配置されている。同測点群でえた GG 偏差 (表 2) を主局からの距離と, 定偏差値の極性を考慮してプロットすると, 図 2 のようにこれらの関係はほぼ直線となる。同様な観点から, 平磯測点の X レートの偏差値をこれに加えると, 同一線

上につてくる。なお同測点の主従局間の距離差は、286.5 哩であつて、4 測点群とは 60~100 哩の違いがある。従つて南九州測点群の Y 局からの距離はほぼ等しく、しかも均一な導電率をもつ海面であるから、従局からの伝搬経路の影響を無視する。主局からの距離変化に対する定偏差係数は、 $3.2 \mu\text{s}/100$ 哩であつて、約 650 哩を起点とするが、この係数をわが国全域に適用するには、さらに測定値を積み重ねた後にしたい。しかし平磯測点の例からみても、かなりの信頼性をもつと推定できよう。

時間差に定偏差が現われるのは、ロラン C 表算出時に用いる、伝搬速度が不適であることはいうまでもない。しかしながら上述の定偏差係数は大きいから、単純なる速度変化に起因するとみるのは適当とはいえない。また Johler ら [13] の 2 次位相定数によると、 $1.2 \sim 1.5 \mu\text{s}$ になつて、これとの関連と推定するには値が大きい。従つて本論では結果を示すに止める。

2.2 地表波の夜間における使用限界

地表波受信限界の判定は、測得時間差によるモードからきまるが、Y レートではそれが山川と女島間になると本報 IV [5] では推定した。しかし、山川—甕島における 2 回の同時測定結果から、夜間の地表波到達限界は、山川と甕島間にあると推定できる。このように測定値パターンが、地表波から空間波に移行する原因は、空間波の電界強度が地表波に対して大きくなり、目視測定では空間波の envelope を測定することによる。

電界強度対距離の理論曲線から [10]、空間波と地表波の電界強度を山川において求めるとき、問題となるのは主局からのものである。すなわち Y 局信号は、いかなる場合でも地表波は空間波よりも強大である。ところが主局からの夜間空間波は、1 回反射の時に地表波より 10 dB 大きく、 S_N モードの出現と相関があると推定できる。

この値を確かめるために、鹿児島で主局の電界強度を測定したところ、昼夜間の電界強度差は 4 dB (夏期) であつたが、アンテナ系をはじめとする、測定器*を含む測定法に疑問点が多くみられるので考察は次回にしたい。

2.3 伝搬モード別の空間波の反射高さの特性

海上伝搬の主局と、山川からみて東西、南北方向にある W、Z 局の空間波の伝搬モードは、昼間の GS_D 、夜間の GS_N である [4, 5]。ただ冬期の夜間には、主局の信号は空間波 (S_N) モードになる場合もある。測定パターンでは GS 値には $10 \mu\text{s}$ ジャンプが生じるが、一般的傾向として定偏差をもち、それらは S_N では $\oplus$ 側へ、 S_D では $\ominus$ 側に偏した。また日変化パターンとして、夜間の逆盃型、昼間の盃状をなすことにも言及し、後者の原因は電子密度の生成に關与する、太陽天頂角の変化に比例するものとして説明ができた。

一連の本測定パターンについて、明白に $10 \mu\text{s}$ ジャンプとみられるものを正值に引き直し、それらのパターンについて考察を行なつた。山川、種子島の同時観測では、W・Z 局の GS_D 、 GS_N

Fig. 2 Constant deviation of ground wave, X and Y rate vs. the distance of master station, over seawater.

* 協立電子: KNM 203 型による

それぞれのパタンの偏差量・極性は全く一致した。筆者は先に、X局の同現象を指摘したが[3], 同じく長距離伝搬をする場合には、その伝搬方向と無関係に両観測点が30~60海里離れていても、空間波の遅延量には距離差の影響がみられない。この結果、長波帯に対する電離層の反射効果は、高さおよび地球の彎曲をふくめて、X局からZ局まで、すなわち北緯37°から21°までは、ほぼ一定とみなしうる。

2.4 GS_D , GS_N の定偏差

上述の処理を行なつたこれらの値について、定偏差と変動範囲をまとめると表3になる。主として太陽天頂角によつて影響される。昼間の電子密度変化[6, 14]は、 GS_D 反射高さをきめ、両者は逆比例するのが通例である。しかしこのパターンから著しく外れることがあるが、この時に solar event との相関は見出せないように、原因については未だ不明である。電子密度に影響の大きい太陽黒点は、1967年から極大期（黒点は約110点平均）に入り、1971年には急減して極小期に入ったようである。本観測は1967年来実施しているから、ここでの測定値は太陽活動の活潑なる時期のものといえよう。

両モードの定偏差量とその極性には季節変化がみられ、これらは電子密度と高さとの分布プロファイルと一致する。天頂角と比例しない夜間電子密度によつてきまる、各レートでの GS_N 値は安定であり、しかも定偏差と極性も一致している、これとは反対に、 GS_D 値のうち夏と冬の定偏差は比較的一定であるが、春にはランダムとなる。また表3において、一般に GS_D の変動幅の比較的大きいのは、逆盃状パタンのためであり、通常の変動幅とは異なるものである。

2.4.1 昼間空間波 (S_D)

伝搬距離がほぼ等しく、方向が東西・南北であるW・Zレートについて比較する。両者は伝搬経路に特長があつて、Wレートは東西のため、冬期の天頂角は最も大きい。このことを模式的にみると、Zレートの冬期偏差値はWレートと同様であるが、夏季には伝搬経路の midpoint 付近に太陽赤緯があるから、天頂角

Table 3. Constant deviations of GS_N and GS_D of each rate, SS 3.

Yamagawa						
		GS_D			GS_N	
			dev. range		dev. range	
W rate	Winter	1969	-4.2	4.1	+4.0	2.4
		1970	-2.5	5.8	+4.8	2.0
		1971	-4.2	5.2	+3.3	4.9
	Spring	1967	—	—	-8.6	—
		1968	+1.5	—	+6.1	—
		1969	-2.8	5.6	+5.2	5.2
		1970	+2.5	3.0	+3.2	2.5
		1971	-7.3	4.1	+4.3	4.5
	Summer	1968	-8.6	3.3	+4.5	2.6
		1969	-7.8	2.5	+6.0	2.8
		1971	+2.0	—	-4.0	—
	Autumn	1970	+0.5	2.0	+4.4	6.0
X rate	Winter	1969	-3.0	4.2	+5.0	3.3
		1970	-3.1	3.9	-2.0	3.5
	Spring	1968	-4.1	—	+4.5	1.5
		1969	-3.6	4.7	+6.0	3.3
		1970	+5.0	4.0	+6.8	3.0
		1971	-3.0	3.7	+6.0	3.9
	Summer	1968	-5.5	2.5	+7.2	2.5
		1969	-6.0	2.6	+8.6	2.9
		1971	+3.0	—	+3.0	—
Z rate	Winter	1969	-5.8	5.2	+6.0	3.4
		1970	-5.2	5.7	—	—
		1971	-5.3	3.8	+5.4	5.0
	Spring	1967	-8.4	—	-5.0	—
		1968	+2.7	—	-3.7	—
		1969	-6.5	6.2	+7.1	3.0
		1971	+2.6	3.3	+5.7	2.7
		Summer	1968	+2.6	2.0	+8.0
	1969		-6.0	2.6	+8.6	2.9
	1971		+2.3	—	-4.5	—
	Autumn	1970	+0.3	2.7	+5.9	1.1
	Tanegashima					
W		1969	-4.8	4.2	+4.6	4.0
		1970	-4.3	4.3	+3.1	3.0
		1971	-6.5	4.2	+3.7	2.4
X	Winter	1969	-3.1	3.3	+4.0	2.7
		1970	-3.8	5.6	-3.3	5.2
Z		1969	-6.0	4.8	+5.7	3.3
		1970	-4.7	4.2	+6.0	3.3
		1971	-5.8	3.8	+5.6	1.6

は零である。しかも送受信点を通る日出没線には、ほとんど時差が生じないから、既述の電離層プロファイルは経路（地表面）に対して完全に凸となる。

W 局 GS_D の冬の値 $\ominus 3.8 \mu s$ は、反射高さの約 4 km 低下に相当するが、夏の値 $\ominus 8.2 \mu s$ は約 9 km 低下となる。この差は、電子密度の季節変化に起因することはいうまでもない[12]。これらの値から、夏冬の反射高さは山川において約 69 km と 82 km で、この差は 13 km となるが、Deeks[9] および Gregory ら [12] による、季節的変化に起因する反射高さの差は約 7 km である。これら（ことに緯度 $45^\circ N$, $44^\circ S$ ）と本測点位置は、太陽黒点変化などの違いから、直接比較はできない。

Deeks の研究した 79~88 km 領域の電子密度は、冬期の値が夏期より大きく、本測定で得た W , X , Z 局の値はともに同一傾向である。それは上述の発生原因から説明できるし、各局偏差値の相違は、伝搬経路の反射層の構造に起因すると推定した。すなわち、太陽出没線と経路が直角に交わるならば、電子密度変化による反射高度のプロファイル面は、時間経過があつても常に地面に対して凸のままで移動してゆく。こうした条件下での入射角は最大となるから、より高い高度が反射面となる。また出没線と経路が平行の場合は反対であつて、高度が低いことはいうまでもない。この模型モデルでは考察が不充分であるから、若井ら[1]の描いた、SS3 チェンに主体をおく、太陽出没線を用いた。図1はその中の1例であり、1月の W レートの経路と出没線は直角に近いが、7月には小さい夾角となる。よつて、前者の電離層の入射角は大きく、後者は小さくなるから、これに比例した反射高さは、表3にあげる偏差量をきめるものである。

以上のことから、 W レートの冬期の偏差値が夏期より小さいのは、天頂角に比例した電離度の低下であり、斜め入射の不安定反射によるものと説明できる。 Z レートの冬期は、 W レートと同様であるが、夏期は既述の天頂角条件にあるから、反射高度はより低くなるべきであるにも拘らず、偏差量はこれに反しているから、現在解析不能である。

2.4.2 夜間の空間波 (GS_N)

GS_N パタンの特長として、i) 南北伝搬の $X \cdot Z$ レートは、東西伝搬の W レートよりその偏差値は大きい。ii) 各レートの変動幅は、 GS_D パタンより狭くて安定度がよく $\pm 1 \mu s$ に収まる。盃状パタンはほとんど出現しない。iii) 偏差量は冬期に最小、夏期に最大である。

表3のように、夜間においても、反射高さの季節変化がみられるが、従来こうした夜間電子密度に関する知見は少ないので、今後の測定によつて考察をまとめる予定である。夏と冬の偏差量の差を高度に換算すると、約 3~5 km ($2 \sim 4 \mu s$) となる。既述のように、太陽黒点数との相関をうるには、今後4年間の測定を必要とするであろう。季節変化による高度変化は[9]、高さによる電子密度分布にかなり近いものである。しかし全般的な反射高さは Deeks の値よりも高く、さらにロランC表の 91 km より高くなるが、これは本測点が南にあることによる緯度変化のためであろう。

2.4.3 各モードの偏差値からみた、システム運用の考察

以上のように、 $GS_N \cdot GS_D$ 偏差にみられる季節変化、及び緯度変化の影響からも推察できるように、この結果から本航法システムの精度を[10] 大きくこえる誤差が予期される。しかも SID などの擾乱現象により偏差は検出しえないが、同現象の継続時間の長短によつては、十分に影響することが推測される[1, 14]。しかしながら夜間値にみられるように、安定度に秀れるから、 $10 \mu s$ 偏差の修正を行えば、ランデブー誤差を $1 \mu s$ 前後に収めることができる。

2.5 電界強度と時間差

LF 帯の航法システムにおいて、CW 信号の電界強度と信号の伝達時間（位相）とは密接に関

連しているが[6, 7], パルス信号では何等の相関もみられない。この原因は, 測定方式からみても当然であり, Doherty の実験[11] によつても明らかである。

可視式受信器で最も問題されている $10\mu\text{s}$ 偏差の解明に, 電界強度との関連をえようとして, 平磯にて実験を行なつた。電界強度測定器[1] は, SS3 のパルス送信フォーマットを切替える, タイミング・ゲート・ユニットをもち, 6 打点の記録計に記録させている。この測定法によれば, 地表波と空間波の判別はできないが, 既述の一般型電測計と異なり, 各レートごとに明確な電界強度をうることができる。空間波の 1, 2 回反射した強度を昼, 夜間ごとに, Norton の計算式に基づく図 [10] より求めることはできるが, 上記電測結果との関連をえるようにするのは困難である。また電子密度変化に比例する電界強度は, それら D 領域の資料なくては解析できない。従つてここでは, 平均的電界強度変化パターンによつて, $10\mu\text{s}$ 偏差原因を検討した。

空間波より地表波の卓越する昼間値のみを対象としたが, 測定期間中の記録の 1 例を図 3 にあげる。図は捲取り速度 25 mm/h の記録よりのスケッチであるが, 測定中の 5 月 20 日 1630 (JST) に SID の発生を検出しているのを, 参考として SID の前後にえた時間差のプロット図を併記した。

Fig. 3 The amplitude of SS3 chain vs. JST obtained by Hiraio Branch, Radio Research Laboratory. And the Loran C readings of Y rate.

このように両者から, SID 期間中の $10\mu\text{s}$ 偏差と電界強度の相関を認めることができない。ただこの場合は測定時間とのズレも考えられる。さらに CRT 上の瞬間的な映像と, 積分的電界強度変化との相関を求めること自体に, 問題があるのかもしれない。従つて現段階で, 電界強度変化のみを考えるならば, むしろ相関がないとした方が妥当と思われる。また平磯の地理的環境も加えるべきであるから, 結論は今後に予定した。この結果から, 筆者らは $10\mu\text{s}$ 偏差の発生原因の解明は, パルス信号を形成する, 各種周波数のエンベロープ自体の歪を考慮すべきと推定したい。

3. 結 論

- 1) 南九州測点群への海上伝搬の Y レート, GG 値の定偏差は, 主局からの距離によつて直線的变化をする。この係数 ($3.2\mu s/100$ 浬) は X レートの偏差 (平磯) にも適用できた。
- 2) 太陽活動の最盛期間である 1967~1971 の GS_D , GS_N の測定から, 次のことが指摘できる。
 - 2.1) 反射高さの季節変化と, GS_D 各レートの偏差値の違いは, 太陽出没線移動による電子密度プロファイルに起因すると推定できる。
 - 2.2) 夜間電離層の反射高さにも季節変化があり安定度は昼間より秀れる。また伝搬経路により違いがあるから, 電離層の南北傾斜を示唆するものである。
- 3) 電界強度の変化と時間差の相関, ことに $10\mu s$ 偏差との関係を見い出すことはできなかった。電測計の機能によるものか, 本来無関係であるかは現在明らかにできない。

謝 辞

本測定にあたり, 次の方々の援助, 協力, 教示を頂いたことを記し, 心から感謝するものである。

施設の使用を許可され, 御助力を頂いた郵政省電波研究所, 山川観測所及び平磯支所。ことに貴重なる資料の提供と討論の機会を下された若井 登, 藤井 周, 大内長七の諸氏。観測の都度, 受信器の貸与と整備を頂いている日本無線株式会社および同社鹿児島出張所, 株式会社東京計器北九州営業所の諸氏。測定及び資料整理の本学部練習船南星丸乗組員一同, 東郷俊子嬢, 本教室卒論学生一同。

参 考 文 献

- [1] 藤井, 大内, 若井: Loran C (100 kHz) 電波強度に現われた SID, 第3回 IASY シンポジウム, 277-286.
- [2] 田口ほか: 航行用 100 kHz 電波帯の伝播特性の解析とそれらによる船位精度の改善—I, ロラン C—I, 本会誌39号, 7 (1968), 101-110.
- [3] — II, — II, 鹿大水紀要17巻, 12 (1968), 29-44.
- [4] — III, — III, 本会誌40号, 12 (1969), 89-95.
- [5] — IV, — IV, 本会誌42号, (1971), 119-126.
- [6] BELROSE, J. S.: The oblique reflection of CW low frequency radio waves from the ionosphere, AGARDograph 74, (1964), 149-165.
- [7] BELROSE, J. S.: Low and very low frequency radio wave propagation, AGARD lecture series 29, (1968), 115p.
- [8] DAVIES, K.: The ground wave, CRPL Summer Course, (1965), 4.1-4.21.
- [9] DEEKS, D. G.: D-region electron distributions in middle latitudes deduced from the reflexion of long radio waves, Proc. Roy. Soc. London, A, 291 (1966), 413-437.
- [10] DICKSON, W. T.: Engineering evaluation of the LORAN-C navigation system (Final report), (1959), Jansky and Bailey, INC., U. S. A.
- [11] DOHERTY, R. H.: Oblique incidence pulse measurements at 100 kc/s, AGARDograph 74, (1964), Pergamon Press, 133-148.
- [12] GREGORY, J. B. and MANSON, A.H.: Seasonal variations of electron densities—I, J. Atmos. Terres. Phy., 31 (1969), 683-701.

- [13] JOHLER, J. R., KELLAR, W. J. and WALTERS, L. C.: Phase of the low radio-frequency ground wave, NBS Circular 573, (1956), 38p.
- [14] MAY, B. R.: D-region electron density distributions deduced from the reflection of low and VLF radio waves, Proc. Ground-Based Radio Wave Propagation Studies of the Lower Ionosphere, (1967), 442-458.
- [15] U. S. COAST GUARD: An analysis of the envelope-to-cycle discrepancy in the Loran C system, U. S. Coast Guard Engineering report No. L-31, 1 Apr, (1961), 14p.

〔質問〕

測定に際しグラウンドウェーブとスカイウェーブの分離はどうして区別しているのか。

(木村小一)

〔解答〕

定点における測定では、各モードの計算時間差は算出できる。安定した波形を CRT 上で測つても、それが地表波とは限らないから、上記の算出間差フィルタによればよい。