鹿児島定点におけるオメガ信号の測定

田 口 一 夫*

Studies on the OMEGA Navigation System,
The Measurements of the OMEGA Signals at Kagoshima

K. Taguchi

Abstract

The experimental measurements on the propagational characteristics of the basic frequencies of Aldra and Haiku, 10.2kHz and 13.6kHz, have been made in fall 1968 and summer 1969, as a preliminary report.

For the navigation system, the author should considered that the random fluctuations of received signal (phase) were of interest as well as the stability of propagational characteristics of VLF was. Because they came into the error of LOP's, obtained from the record of the phase value. In the stability of 13.6kHz, Aldra was better than Haiku in fall, to the contrary the opposite phenomenon were occurred in summer. Difference between Kagoshima and Yokohama at receiving of Aldra, that is the latter was more stable than the former, and this might depend upon the path length over the Japan Sea. On the recording 13.6kHz was less than fluctuated than 10.2kHz, on the contrary the repeatability of 10.2kHz was better than that of 13.6kHz slightly.

Since the signal of Trinidad (13.6kHz) could received in fall at Kagoshima, its path length is 7,569 n.m., the signal of the opposite direction will be appear, when the station will transmits in normal power.

本研究の目的

オメガ/VLF 航法システムについては最近多くの発表がみられるに到つた。また VLF 電波の伝搬研究は古くからなされ、ことに最近は Budden, Wait らの導波管理論によつてかなり解明されたといえよう[11, 28]。

しかしながら実験の行なわれた海域は主として太平洋東部と大西洋であり、これら海域の伝搬状況はわが国で受信する場合と大きく異なっている。例えば伝搬経路、陸上伝搬、高緯度圏及びオーロラ圏通過などである。また VLF の伝搬に関する研究は 16kHz 以上の周波数域に関するものが多く[1, 2, 5], オメガ周波数の伝搬特性とかなり異なっているために、本システムに適用できない事例が多い。

しかもこれらの研究は下部電離層の宇宙物理的問題の解明を意図しているので、筆者の目的と

* 鹿児島大学水産学部 (鹿児島市下荒田町470)

する航法としての伝搬特性の研究とはかなり隔りがある。現在システムの評価試験は多方面から精力的に実施中であるが、伝搬範囲の広大なこと、目的の多様なことから、航法としての評価は未解決なことが多い。

以上の見地から、定点測定と海上測定によつて研究を開始した。

1. 序 論

本研究で定点測定を行なう目的は、現在の各送信局からの信号の位相変動を測定し、年間の変動特性の定常パターンをうることである。これの典型的なものとしては Swanson により開発されている空間波補正の式がある[17, 18]。しかしながら、ミクロ的変動と地域的な変動の一般化は不可能である。

オメガ電波にあつても異常型伝搬をはじめとして定誤差と思われる特性が測定されている。これはそのまま船位誤差に結びつくことでもあり、入念に研究の必要を感じている。

測定は受信器が1台のみのために、受信周波数は1周波である。また海上実験に使用の時間的空白などもあり、充分なる解明にはならないが、鹿児島定点にては一応の成果をうる事ができたと思われる。

2. 測定方法

使用受信器 TRACOR 7007 1台

受信周波数 10.2kHz, 13.6kHz

水晶発振器 エージング・レート 5×10^{-9} /日*

受信感度 $0.01 \mu V$

中間周波帯域幅 50cps

狭IF帯域巾 0.03cps

アンテナ TRACOR Mod. 599-81-8

垂直アンテナ・ステンレス製 10呎

実効高 (0.01m)

記録計 1台 横河 ERB 記録計
(6点打点)

アンテナを本学部鉄筋3階校舎屋上**にお
き図1のように位相差及び相対信号強度を打

Fig. 1 Measuring system of OMEGA signals

Table 1. Measuring data at Kagoshima.

Transmitter	Frequency	Path	Power	Period
Aldra, Norway	13.6 kHz	4,270 n. m.	4 kW.	Nov., Dec. 1968 June-Aug. 1969
	10.2, 13.6 kHz	7,912 km.		
Trinidad	13.6 kHz	7,569 n. m. 14,026 km.	1 kW.	Nov. 1968
Haiku, Hawaii	13.6 kHz	3,828 n. m.	2 kW.	Nov., Dec. 1968 June-Aug. 1969
	10.2, 13.6 kHz	7,094 km.		

* 伝搬の誤差を無視する時には 2.3×10^{-11} まで調整可能。

** 北緯 $31^{\circ}-33'-52''$, 東経 $130^{\circ}-33'-35''$ 。

点記録させた。測定期間及び周波数は表 1 である。

3. 各局の信号とその伝搬経路

図 2 は鹿児島を中心とする各送信局への伝搬経路図である。Aldra (A)局からは北極オーロラ圏及び導電率の著しく低いツンドラ地帯をもつシベリア大陸を横断している。伝搬経路の約40%がオーロラ圏にある。Trinidad (B)局からも同様にカナダ大陸のツンドラを通過する。Haiku (C)局からは海面のみである。Forestport (D)局はB局と同一経路とみなしてよい。この中安定して受信できるものはA, C局であり, B局は図 3 のように 13.6kHz にて辛じて受信している。しかしD局は全く受信できない。ここでは Aldra, Haiku 局の信号について考察するが, これらの伝搬条件は上述の他に伝搬方向が西から東と東から西へと反対である。

Fig. 2 Configuration of OMEGA transmitters and receiving point, in the equi distance and azimuthal chart centered at Kagoshima.

Fig. 3 Trinidad was received at Kagoshima (dist. 7,569 n.m.) 1900 UT.

4. 測定結果とその考察

4.1 位相日変化パターン

4.1.1 実測値の概要

測定は表 1 のように 2 期にわけて行ない, その細目は表 2 の期間であり, 鹿児島で安定して受信できた Aldra, Haiku 局を対象にし, 測定周波数を秋期には 13.6kHz, 夏期には 10.2kHz と 13.6kHz とし, 原則として 1 週間ずつ交互に受信した。記録 (図 4) から発振器の aging を取り除くのに, JST 00時を基準として処理済み後, 30分ごとの位相変化を時間と共にプロットしたのが図 5 である。図中の矢印はそれぞれの地点における地上日出没時を示す。なおこのような位相値をうるには, まずその変動幅の少ないことが必要で

Fig. 4 Record of phase delay, Aldra and Haiku, at Kagoshima, 13.6kHz, 22 June 1969 (JST).

あり、変動の著しい場合は測定不能となる。これらを送信局別に、i) 周波数と、ii) 季節変化及び異常現象について述べる。なお夏期には相対受信強度も記録し、位相値と共に考察した。

図5の日変化パターンは多くの研究によつて解析されているパターン例の如くであり、Aldra, Haiku 局からの伝搬経路の特性を明確に示している。こうした典型的パターンはすべて導波管理論によつて説明できる[8]。

しかしながら、受信点ごとに特異変化をするパタンの存在があるが、今回は鹿児島におけるそれらを概観するに止め、詳細の解析はより多くの測定値をえた後の宿題としたい。なお、曲線上の縦線は逐日変動の大きさ(4.2 変動幅参照)を示し、長さは標準偏差である。

4.1.2 日変化パタンの考察

1) Haiku 局 伝搬経路がすべて海上で、しかもほぼ東西にある(大圏方位 80°)から、典型的台状パターンである。

位相遅れの大きさの最大は、13.6 kHz 秋期 $90\mu\text{s}$, 夏期 $81\mu\text{s}$, 10.2 kHz は夏期 $100\mu\text{s}$ である。電界強度*と位相日変化曲線との強い相関は余り認められない。phase step は著しくはないが生じることがある(後述, phasestep)。空間波補正表(1969年, Area 09, SWC表)とは1年間の違いがあるとはいえ、全般のパターンは酷似するが、部分的にはかなり異なっている。日出過渡期、ことに Haiku の日出後1時間半と鹿児島島の1時間前における位相値の標準偏差は著しく大きいから、日出時における予知の困難さを推察できよう。結局船位の誤差が増大し、図5bから約20cecとなる。

2) Aldra 局 位相日変化量の変化は Haiku 局よりも少ない、なだらかな曲線をえた。秋期の伝搬経路の日照時間は図5に示すように、わずかに3時間にしかすぎず、昼夜混在が極めて長

(a) Record of Aldra-Ref. and Haiku-Ref.

(b) Experimental phase difference, Aldra-Haiku, and its theoretical value deduced from SWC table of 1969.

Fig. 5 Diurnal phase delay curves and their fluctuations (standard deviation) at Kagoshima, 13.6kHz, Oct-Nov 1968.

* 本受信器の電界強度値は、25dB 以上の場合しか使用できないが、一般的傾向を知る参考には用いることができる。

い。位相変化は日没時と一致するものの、測定期間の北極圏は常に夜であるから、D層の昼夜移動はほとんどみられない。理論的には日照時間のみを考慮したD層を考えるならば、台状パタンの頂部が夜間の長さに比例して、平坦となるはずである[13]。しかしながら図5のように崩れた曲線は、16kHz (GBR 信号) の測定例[3, 4]にみられるオーロラ地帯の擾乱によるものと考ええる。ということはS.W.C. 表の精度の宿命とみるべきであろうが、A-C ペアは全オメガ局が完成したとしても、わが国近海で使用する有用なペアであるから、これの予知は今後の努力目標としたい。

図5の位相変化量は $43\mu\text{s}$ であり、これを1次モードのみとして[29], [7]の諸元を用いて計算すると、電離層高さの変化は9.3kmにしかない[13]。このようなことから一層ならかな曲線となる。

夏期, Aldra の夜間はわずかに2時間であり、その間も薄明状態が持続する。さらにオーロラ圏は24時間日照がみられると共にD層自体の高さも中緯度よりも低いことが報告されている[3, 4]。従つて位相遅れは減少する筈である。しかし、実測パタンの変化量は秋よりも大きく、現在では解明不能である。

3) Cycle slipping 及び phase step

電界強度を連続記録できた夏期分について考察した。Cycle slipping は今期間中は、両周波とも一度も認めることはできなかった。犬吠にて観測された13.6kHzの本現象はHaiku局であるか、鹿児島では遠距離のため減衰量などがきくことから、現われなかつたものと推定できるが、測定例が不充分のため解析は行なわない。

Phase step 伝搬のモード干渉は13.6kHzのみにみられた[土屋私信]。これの顕著なのはHaiku局よりAldra局であつて、受信点鹿児島電界強度は日出時の2時間前に大きい落込み、ついで1時間前と2回発生するが、日没時は余り明瞭な現象はみられない。こうしたモード干渉があるにも拘らず位相ステップは発生していない。これに反しHaiku局の日出時電界強度はわずかに減少するのみであつたが、位相は明らかにステップしている。

4.1.3 位相パタンの安定度一周波数による変化

10.2kHzと13.6kHzの日変化パタンの安定度については、夏期の測定値しかないが、概略次のようである。ただ後述する変動幅が著しく大きい場合、ことに10.2kHzではパターンを描くことが不可能であり、そのため対象パタンの数が著しく減少したために正確なるパターンを表わしてはいない。

Aldra局 Haiku局に比し、10.2kHzが安定している。ことに7月1日~15日の値ではかなり安定し平均値の $\pm 10\text{cec}$ に入るものが多い。

Haiku局 両周波数に起因する差を明確に認めることはできないし、定つたパターンを描けるほど安定した値ともいえない、即ち分散が著しい。強いていえることは、S.W.C. パターンはかなり修正する必要があることを、まれに10.2kHzがまとまつたパターンをとることである。

4.2 測定値の変動幅

本システムの船位精度は伝搬の点からは、空間波の位相変化の反覆性(安定性)と記録の読取り精度の2者によるものである。前者は4.1にて考察する標準偏差であるから本節では後者を考えるが、記録の実例(図4)に示される変動こそが問題なのである。記録は細線またはある程度変動している(変動幅とよぶ)。これは位相速度の変化に起因し、伝搬経路の状況によると説明されている[19]。変動がある場合の位相値はその平均をとることになるから、位置の線はある程度の誤差界を有する。これらの変動状況は主として伝搬条件に起因し、時として基準発振器の

aging がきいてくることがある。本研究の目的から、このことは無視しても差支えないとした。

実測記録上において、変動幅を 0, 10, 20, 30 cec 及びそれ以上の 5 段階に分け、それらの継続時間を JST によつて表わし、その中の代表例を図 6 としてあげた。これらの図より、約 1 週間ごとに変動幅を%で示したのが表 2 であり、次の結果がえられた。

Table 2. Classification of fluctuated range of phase value (receiving points, frequency and season).

Transmitter			Aldra-Ref.					Haiku-Ref.				
Fluctuated range in cec			0-0	2-10	10-20	20-30	30-	0-2	2-10	10-20	20-30	30-
	Period	Frequency	%					%				
Kagoshima	May 30-June 17, 1969(35 days)	10.2 kHz	4.1	6.8	12.1	17.1	59.8	24.1	26.5	13.6	13.2	22.8
	June 21-Aug 8, 1969(26 days)	13.6 kHz	20.7	26.3	21.3	13.4	8.3	86.0	6.3	5.8	0.3	1.5
	Nov 15-Dec 2, 1968(23 days)	13.6 kHz	74.3	18.9	5.0	0.3	1.5	—	—	—	—	—
	Nov 22-Dec 2, 1968(10 days)	13.6 kHz	—	—	—	—	—	64.0	8.8	3.8	3.3	13.1
Yokohama	Aug 23-Aug 25, 1969(3 days)	13.6 kHz	69.5	25.0	5.5	—	—	94.3	5.7	—	—	—

i) 周波数 13.6kHz は 10.2kHz よりも変動が少ない。ことに Haiku 局において変動幅 0 ~ 2, 2 ~ 10cec* を許容範囲とみると、13.6kHz のそれらは90%以上を占める。記録の安定度は電界強度と雑音、すなわち S/N 比によつてきまる[7]。また前者は減衰率をもつとも大きく影響するが[31]、これら両者の特長を勘案して 10.2kHz が決定された[19]。しかしながら、記録上からは 13.6kHz が秀れた安定性をもつことが明らかになった。ただ、システムとした場合は、再現性も重要な考慮事項であるが、既述のように現在までの実験からは明確に 10.2kHz の再現性が秀れていると立証できない。従つて、筆者としては Baltzer も指摘しているように[9]、13.6kHz をシステムの基本周波数とすべきであると思う。

ii) 季節変化と送信局 対象となる周波数は 13.6kHz であるが、夏季と秋季の値は Aldra 局と Haiku 局では全く反対の現象を呈している。すなわち Aldra 局は冬期に安定（許容範囲は 93%）、Haiku 局は夏期に安定した。10.2kHz では Aldra 局は、30 cec 以上の変動が 60% 以上であり、使用に耐えない。Haiku 局とても許容範囲に収まるのは 40~60% で、精度は著しく劣る。よつて A-C ペアの変動も上述の値以上となるから、鹿児島における誤差はかなり増大する*。

* 10.2kHz の A-C ペア（日本近傍）のレーン幅は約 13.4 哩。

** A-C ペアの 13.6kHz の変動幅は A, C それぞれの変動幅の和をこえている。(1968年秋) 位相差における aging rate のような改善効果は見出せない。

Fig. 6 The variation of phase fluctuation vs. time (JST) based on frequency and seasonal change at Kagoshima.

夏期の Aldra 局信号は、既述オーロラ帯（伝搬経路の 40%）通過があり、さらに夏季に頻発する Solar proton event の影響が大きいと考える。

iii) 伝搬経路 鹿児島における 13.6kHz 及び 10.2kHz 測定値と、犬吠電波観測所 及び 横浜（新子安農林省サイロ岸壁）の測定値はほぼ同時期にえたと見なせるにも拘らず、変動幅は表 2 のように大きい差がある。

犬吠の値は Rb 標準を使用したため、ここから省いたが、その影響はほとんどみられない。また鹿児島測定の伝搬環境を検討するのに、山川にて 1 週間の比較測定を実施したが、両者の差を認めることはできなかった。従つてこの差は伝搬経路によるものであろう。一方海上伝搬のみの Haiku 局の値は両地ともほぼ近似している。さらに横浜は国電線路に近接しているために、その効果（千葉沖避泊の記録を対比）を考えると、鹿児島測定の変動の大きいことがさらに強調される。

Aldra 局から横浜、鹿児島の大圏距離はほぼ近似しているし、通過する経路（シベリア大陸）の導電率にも大差がない[16, 17]。しかしながら、前者へは沿海州より日本海を横断するが、後者は朝鮮半島を縦断して半島南岸からさらに九州をも通過する。海上伝搬の距離差は約 500 哩であるが、LF 伝搬の recovery effect は VLF においても等しく効果があると推察できる[12]。

一方 Aldra 局に比し、Haiku 局は海上伝搬、距離などの点からも秀れているにも拘らず、信号の変動幅が劣る場合がみられる。これは西むき伝搬というような伝搬方向の違いによる減衰の影響[20, 31]によるものと思われるが今後の研究にまきたい。

5. 結 論

これらの考察を要約すると次のようになる。i) 10.2kHz は 13.6kHz よりも日変化の再現性は少しく秀れているから、予知が容易である。しかしながら変動幅が大きく、誤差の範囲も広くなり、時としては全く受信不能となる。さらに聴音による判別は、雑音に埋没するために制限されることが多く、(時間によつて著しく相違がある)このため伝搬範囲というか、使用範囲も狭くなる。ii) 13.6kHz は記録の安定度、聴音、S/N 比範囲など、すべてに秀れているが、再現性に少々問題がある。これらのことから航法としては、変動幅が大きくても再現性が秀れる 10.2 kHz を主とするか、安定性は $\pm 20\text{cec}$ (1968 年秋) と劣るが、使用範囲の広い 13.6kHz を選ぶかということになる、ただ送信出力が増大（電界強度の増大）した場合には、変動幅の改善が予期されるから、本格システム運用まで推論するのは尚早とも思われる。

夏期の Aldra 信号の変動幅では ρ - ρ 航法に使用できないが、recovery effect が現われる可能性があることから、これらの結論は後日にしたい。

Trinidad 局が受信できたことは、本システム完成時の正規出力になると、逆回りの干渉が懸念される。

謝 辞

本研究は次の各位の援助と協力によつてなされたことを記し、心から感謝するものである。

最大の援助を頂いた米国海軍 PM-9 前 Manager の Capt. Polk, 討論と御教示を下された TRACOR Inc. の Dr. Baltzer. 討論の機会を下された Mr. Swanson. 常に暖かい援助と御教示を頂いた郵政省犬吠電波観測所中島所長と所員御一同、関商事関係者一同、本学部学生佐多逸朗、及び本教室卒論学生一同。

参考文献

- [1] 石井, 桜沢: 太平洋横断通路における NPG-18.6kc/s 信号の長期振幅変動について, 電波研季報, Vol. 10, # 47, (March 1964), 50-55.
- [2] 石井, 山田, 土屋, 寺島, 柳谷: 太平洋横断通路における NBA, WWVL, NPG 信号の日変化, 電波研季報, Vol. 12, # 63, (Sept 1966), 283-290.
- [3] 石井, 山田: 極地帯を伝搬する長波 (GBR-16kHz) の位相日変化 (I), 電波研季報, Vol. 13, # 64/65, (Jan/Mar 1967), 12-19.
- [4] 石井, 山田, 寺島: 極地帯を伝搬する長波 (GBR-16kHz) の位相日変化 (II), 電波研季報, Vol. 13, # 66 (May 1967), 55-62.
- [5] 桜沢, 浅井, 石井: 遠距離における VLF 波の電界強度測定結果, 電波研季報, Vol. 8, # 34, (Jan. 1962), 21-30.
- [6] 桜沢, 石井: VLF 遠距離伝搬波の位相日変化, 電波研季報, Vol. 10, # 46, (Jan. 1964), 10-15.
- [7] 田口一夫: オメガ/VLF 航法システムの海上実験, 本会誌第43号 (1970), 113-120.
- [8] 中島敏夫: 私信 44.8.4
- [9] BALTZER, O. J.: OMEGA navigational instrumentation for special shipboard applications, "Marine Sciences Instrumentation", vol. 4, Jan (1968), Plenum Press, 161-167.
- [10] BELROSE, J. S.: The oblique reflection of CW low-frequency radio waves from the ionosphere, "AGARD ograph 74", (1964), Pergamon Press, 149-165.
- [11] BUDDEN, K. G.: "The wave-guide mode theory of wave propagation", (1961), Logos Press.
- [12] BURGESS, B. and WALKER, D.: OMEGA-Errors due to propagation variations, Paper of Intern. Symposium on Maritime Navigation, Sept 24-26 (1969), 7p.
- [13] CHILTON, C. J., CROMBIE, D. D. and JEAN, A. G.: Phase variation in V. L. F. propagation, "AGARD ograph 74", (1964), Pergamon Press, 257-290.
- [14] CROMBIE, D. D.: Further observations of sunrise and sunset fading of very-low-frequency signals, Radio Sci., 1, #1, Jan (1966), 47-51.
- [15] HERITAGE, J.: A study of signal versus distance data at VLF, VLF symposium record 4, (1957), 77.
- [16] MORGAN, R. R. and MAXWELL, E. L.: Omega navigational system conductivity map, NRL report, DECO Electronics, I.S.C., Dec (1965), 120p.
- [17] MORGAN, R. R.: World-Wide VLF effective-conductivity map, NRL report, Westinghouse Electric Co., Science and Technology Depart, Jan (1968), 24p and 6 sheets.
- [18] NORTRONICS; OMEGA propagation correction technique study, NELC Tech. Docu. 26, Mar 29 (1968).
- [19] PIERCE, J. A., PALMER, W., WATT, A. D. and WOODWARD, R. H.: Omega, a world navigational system, AD 630900, Pickard and Burns Electronics, May (1966), 364p.
- [20] PIERCE, J. A.: Omega, IEEE Trans. AES-1, 3, Dec (1965), 206-215.
- [21] RIES, G.: Diurnal phase change of VLF signals propagated over long paths, Radio Sci. 2, #4, April (1967), 379-385.
- [22] STOUT, C. C.: OMEGA-Implementation plans and receiver development, Paper of Intern. Symposium on Maritime Navigation, Sept 24-26 (1969), 21p.
- [23] SWANSON, E. R.: Electromagnetic field strength measurements at 10.2 kilocycles per second, NEL Research report 1239, Sept 17 (1964), 34p.
- [24] SWANSON, E. R.: Omega in the Atlantic (1963-1965), AD 630008, Jan (1966), 30p.
- [25] TRACOR, INC.: Installation and operation manual, OMEGA navigation system, Mod. 7007 and 7007B, May (1969).
- [26] U. S. NAVAL ELECTRONIC LAB. CENTER: Introduction to preliminary hourly OMEGA phase difference data program, Re., March 20 (1968), 8p.
- [27] U. S. NAVAL OCEANO. OFFICE: OMEGA lattice table and sky wave correction table, Area 09, (computer out).
- [28] WAIT, J. R.: "Electromagnetic waves in stratified media", (1962), Pergamon Press.
- [29] WAIT, J. R.: Diurnal change of ionospheric heights deduced from phase velocity measurements at VLF, Proc. IRE 47, 998.
- [30] WAIT, J. R.: Applications and limitations of the mode theory of long wave radio propagation, M. F., L. F., and V. L. F. Radio Propagation, IEE Conf. Pub. #36, Nov (1967), 57-62.
- [31] WATT, A. D. and CROGHAN, R. D.: Comparison of observed VLF attenuation rates and excitation factors with theory, Radio Sci., 68D, 1, Jan (1964), 1-9.
- [32] WATT, A. D.: "VLF radio engineering", (1967), Pergamon Press, 369-374.