オメガ/VLF 航法システムの海上実験

田 口 一 夫*

Studies on the OMEGA Navigation System,
Experiments at the Sea

K. Taguchi

Abstract

The trans-Pacific experiment using OMEGA navigation system have been made from August to October 1969 by ship.

The receiving limits of four OMEGA signals using 10.2kHz were determined roughly, virtually the precise determination should be under various conditions.

The accuracy of the system in daytime were estimated in 3/4 n.m. in Juan de Fuca Strait and the adjacent waters off Japan. In the Ocean, the error were estimated for 0.5-3.0 n.m. by the astronomical fix and the interval of LOP's. If the ship proceed at constant speed and steady courses for few hours, the LOP's of OMEGA against the time will be intersect the course line at equal interval.

Since the VLF emission suddenly masked the aural signals of OMEGA, 10.2kHz and 13.6 kHz, and disturbed their recordings, at the southern waters of the Aleutian Islands, the records could not discriminate between the signals and the noise entirely.

The relative field intensity vs. distance from the transmitter (Haiku) along the course of great circle was obtained, being showed clearly variable in accordance with the theory.

1. 序 論

北太平洋航路上においてオメガ電波 (10-14 kHz) の伝搬上の諸問題と同システムによる船位精度を研究する目的で海上実験を行った。公表された海上実験の結果は主として北太平洋であり [6, 18, 22], ここは伝搬状況がかなり調査され, しかも信号の強度も充分とみなすことができる。一方, 太平洋ことに西太平洋は現オメガ局の主なカバー範囲外であるから, 充分なる測定値をうることができないと予想されていた。しかしながら, わが国における測定結果ではかなり安定した信号をえられた [4]。本論文はわが国から北米大陸

Fig. 1 Ship's course from Vancouver, B. C. to Yokohama, and the distribution of the fluctuated phase value, Sept - Oct. 1969. : roughly limit of the fluctuated cec range. AM, PM. morning & afternoon (UT). 10-30 : fluctuated range. random : for the random record unfixing LOP.

* 鹿児島大学水産学部 (鹿児島市下荒田町470)

西岸までの海域における信号伝搬状況を把握し、航海者の立場からシステムについての運用を研究することを目的とした。

2. 測定方法

測定項目 オメガ受信器(Tracor 社 7007 型)及び打点式記録器2台により、オメガ4局の位相、位相差、相対信号強度測定及び信号音の受信(図2)

使用船 第2とよ丸(自動車/小麦)
総屯数 12,400 トン、航海速度 16kt

期 間 昭和44年8月25日～10月3日

航 路 名古屋—Los Angeles—Vancouver, B. C.—横浜

記録器の要目	名称	紙幅	捲取速度
	Rustrak (内蔵)	1"	1"/h
	横河 ERB-6	200mm	25mm/h

Fig. 2 Measuring system of OMEGA signals

3. 測定結果とその考察

3.1 VLF 伝搬上の特異点

3.1.1 高緯度における VLF 受信妨害—雑音の急激増加

高緯度において VLF 信号は PCA をうけることが報告されているが、Aleutian 群島南方 (D. R. 45°-57'N, 178°-43'E) において、オメガ信号は異常なる妨害をうけた。雑音の急激なる増加のため、Sferics 灯は 3～4 分間点滅することなく輝き、これを数回にわたり繰返した。10.2kHz と 13.6kHz の信号音は雑音中に埋没し、両者の判別は聴音では不能であつた。この間の記録は位相、強度ともランダムに乱れた。この時の録音テープを名古屋大学空電研究所のソノグラフ(リオン製)によつて解析したのが図3であり、判定は同研究所鎌田哲夫教授の好意によつた。受信器のフィルタが狭帯域のため信号が切断されている。図のように妨害原因は主として VLF エミッションであつて、その為に信号が中断された。この種の磁気圏現象は Bering 海の冬期に多くみられること [1] から、北太平洋大圏航路上においてオメガ信号受信妨害が予想されるが、継続時間が短いから大きい誤差とならない。

Fig. 3 Spectrum of aural signals obtained by Tracor 7007. (10.2kHz, 0600Z, 26 Sept 1969, 45°-57'N, 178°-43'E) Showing VLF emission and atmospherics.

3.1.2 送信局よりの距離による受信強度の変化

送信局から受信点までの距離の変化に対する電界強度の相関については多くの論文が発表されている [9, 10, 21]。本文では局からの最短距離(局の子午線上にある点)を東西に通過する場合の測定例により、この関係の解明を試みた。なお本受信器の相対電界強度(以後電界強度とよぶ)

出力は、信号と雑音の合成された形である。また VLF 受信器における S/N 比は極めて高いために、出力 25db 以上をもつて信号強度とすることができる[Baltzer 私信]。

Aldra 局(66°N, 13°E)の反対側経度は 167°W である。これと交わる航路は 49°N であり、距離は 3,900 浬となる。この経度線を挟み、東及び西側における24時間ずつ相対電界強度をプロットした。この実航程は約340 浬であり、信号の強度差は ± 5 db に入るから、この期間の昼夜間別強度の変化は認められない。また位相値記録にも干渉を認めることはできなかった。

Haiku 局(167.9°W)の子午線の北方約1,700 浬(緯度49.9°N)を東より西に通過した航路上において、局からの距離と相対電界強度をプロットした(図4)。船位は船用時の12時であり、すべて日中伝搬の電界強度である。このカーブは明らかに1次モードと2次モードの干渉を示している[9]。しかし Haiku 子午線に対し東方と西方では山と谷が互に逆となる。

Burgess によると[9]、10.2kHzが東むき日中伝搬をする時、2次モードの消滅点は約800 浬にあるとしている。しかし、既述の条件のように 25 db 以上を有効とすれば、約2,000 浬まで2次モードを認めることができるが、この距離を Haiku 局の距等圏上の値に換算すると(角度のみを考えると $\cos 45^\circ$) 約1,500 浬となる。以上の原因は伝搬方向の西むきによる高次モードの干渉と推定できよう。

同図における西むきの減衰率は約 8db/Mm と推定できるが、Watt [21] らによるとそれは 4.2 db/Mm である。しかし磁場の強さ、dip 角の違いなどのパラメータが考慮されていないから、この問題についての考察は次の機会にした

3.1.3 日没効果

定点における VLF 電波の遠距離伝搬時にみられる日没の効果による位相値の変化は、Crombie, Walker, 土屋 [11, 20, 2] らによって解析されている。

しかし海上実験のように移動中では、位相値変化が連続しているから、たとえ位相変化があつたとしても、微少変化は検出しえない、Aleutian 群島南方における Aldra, Haiku の ρ - ρ 曲線は針路がこれと平行するから、 ρ - ρ 記録の傾斜も少ないので、位相変化は明瞭に検出できる。しかし他局は鋭角をもつて交わるから、記録紙繰出速度を加速すれば、検出される可能性があるものの、低速度のため見出せなかった。

Fig. 4 Relative field strength vs. distance from transmitter, Vancouver, B. C. to Japan, Sept. 1969.

Fig. 5 Phase jumps due to the effect of sunset, southern waters off the Aleutian Islands, 27 Sept 1969.

Aldra の位相値急変は、受信点の日出没時と全く一致しているが、いわゆる位相ステップに相当するものであろう。図5において予想されるべき位相変化を点線で示したが、日没時 (U. T. 0430-0630) に約2時間影響をうけている。また位相値の変化量は約 $20\mu\text{s}$ であるが、他の測定例では日出時の効果は約1時間で回復し、変化量も $9\mu\text{s}$ であり、時間・振幅とも日没時の半分の効果である。ところが犬吠における 10.2kHz 本測定及び日本近海のような中緯度では、日出没時ともモード干渉が認められないことから〔土屋私信〕、本測定でみられた7例は一種の緯度効果と推定できよう。このように一時的に位相変化した場合には、現在の SWC 表にて計算の対象にならない。ここでは受信点の日出没時との相関を考えたが、Aldra 局は 180 度の経度差のため送信点の日出没時とも考えられる。今回は事例の報告に止めたい。

3.2 現オメガ局の受信可能範囲の推定

受信可能範囲とは、信号の安定度、即ち船位誤差の許容限界によつてきまる。さらに信号の同期可能限界も併せて考慮すべきものであるが、同期方式によつても異なることから、ここでは前者のみを対象とした。勿論受信するには送信局からの伝搬経路をはじめとして、季節、日照などの諸要因が影響するが、これらの諸条件を除いて、単純に記録できたことを判定規準とした。

Aldra 局は Greenland の ice cap のために妨害されて shadow ができ、その中に含まれるアメリカ合衆国西岸は受信不能であつて、 150°W 以西及び Vancouver, B. C. 附近より以北に到りその影響から回復する〔13〕といわれるが、今回の測定ではこの範囲は東に狭ばまり、Juan de Fuca 海峡及び 136°W 附近に拡張できよう。勿論これは季節・時刻によつて変化することはいうまでもない。わが国でも Haiku 局と共に受信できる唯一のオメガ・ペアである。カナダ西岸近くにて変動が少量みられるのみで、わが国まで安定して受信できる。これはアンテナの輻射効率と送信出力にもよるが、伝搬経路が北極圏越えの南北方向、ついで西から東へと変る伝搬方向が原因と思われる。

Haiku 局は北太平洋全域で受信可能ではあるが、同地の子午線を通過すると変動幅が急に増加することは、電界強度値の変化と強い相関がある。また夜間変動幅の大きいことは、局からの距離が他局に比し近いから、高次モードの干渉によるものと推定できる。

Haiku 局からほぼ同距離にある東西の両点、例えば9月19日と9月27日をみると、東方では24時間中変動幅はほとんどみられないが、西方では $5\sim 30\text{cec}$ となる。図2において、変動幅の変化を午前・午後に分け、数字は各局あたりの変動値 (cec) である。

Trinidad, Forestport 局 伝搬経路がほぼ一致しているから、変動の状態も同様である。しかしながら前者は後者よりも約 1,600 哩も遠いが、送信出力は約 $\frac{3}{4}\text{kW}$ 大きい。このために 180° 附近の海域では Trinidad の変動幅が 3cec であるのに、Forestport は 30cec と大きい差がでてくる。これからも変動幅を少なくするには出力の改善が重要であることが推定できる。

以上のような各局ごとの変動幅に加えて発振器の aging がきいてくる相対航法システム〔3, 15, 16〕では、レーン幅が2倍であるから、変動幅もそれに比例することになり、結局使用範囲が制限される。

3.3 オメガ航法システムの誤差

3.3.1 本誤差の概論

双曲線航法システムにおける船位誤差の原因については多くの研究が発表されているが、これらの中幾何学的要因に基づくものについては、数式にてまとまるものであることはいうまでもない〔8〕。本論ではさらに機器の誤差なども無視して、伝搬によるもののみを考察する。従つて船位誤差というよりは、位置の線の誤差と表現したい。なお有効なる位置の線の交叉がえられたも

のは船位誤差とする。

また現在の本システムは未完成のために、使用範囲も制限されているから、常に交叉が可能ではなく、従つて1本の位置の線しか測定できない場合が多い。そこで次の方法により精度を推定した。即ち、針路・速力及び外力の条件が一定の場合、対地速力も一定であるから、航走による位相値の変化も一定である[5, 7, 22]。これはコース・ラインと交わる位置の線の間隔が等しいことを意味するから、不等間隔の生じた程度により、位置の線の誤差量が決定できる（即ち SWC 表の一定偏差を含めて）。上述の条件を考慮した場合に、これらはすべて空間波補正值表の不備によるものといえよう。勿論、伝搬のランダムの変動（例えば SPA など）ある場合には、系統外誤差として表われる。以上の観点から位置の線の発散をいれれば、精度を表わすには絶対値よりは%又は cec にて表示する方が妥当である。ただし、一般的な表現として湮にても附加表示をした。

さらに位相追従方式をとる本システムの受信記録方式にあつては、ロラン・システムの測定のように目視による平均値を使用するのではなく、プロットされた位相値の平均値によるべきである。この為には、1個の位相値と共にその記録の変動幅を考えねばならない[4]。とすると、本節では平均値としての位相値が、SWC 修正を行つても除去できない系統的及びランダム誤差の限界を究めることになつてくる。前者は SWC 予報の計算式の改善によつて、ある程度の精度を期待できるが、微細変化及び地方的変動の予知は早急には解決できない。後者にあつては、VLF の伝搬の擾乱特性をきわめることによらねばならない。

3.3.2 海上実験

上述のように本航法システムの誤差は、i) 空間波補正值と、ii) 変動幅による誤差界によつてきまる。前者は実測位相日変化値と SWC 表との差である。しかし海上実験では、これと航走による位相値が重複しているから、結局基準位置との照合があつてこそ絶対誤差の決定ができる。さらにこれは天測及び他の航法援助機器の精度との関連できめられねばならない。

固定点 わが国（鹿児島、名古屋、横浜）で測定した日変化位相値カーブと SWC 表の位相値を比較すれば、精度を決めることができる。実測値を SWC 表にて改正後の位置の線の誤差は、10.2 kHz, 昼間値の場合の誤差は 8 月 23 日—横浜 $\oplus 1.2'$, 8 月 26 日—観音崎 $\oplus 1.2'$, 8 月 27 日—名古屋 $\oplus 1.4'$ となつた。

Juan de Fuca 海峡内にてのレーダによる船位は B-C ペアにて約 0.7~1.7 湮となり、1.3~1.5 湮が多かつた。海峡内では VLF の recovery effect がきくから、Vancouver 島西方沖にてのオメガ(B-C) とロランAの位置の線を記入したのが図 3 である。午後の値とはいえいづれも日中伝搬であるし、ロランAの精度もかなり良好とみなせるにも拘らず、オメガ位置とそれらの距離差は1.7~3.0湮である。

Fig. 6 OMEGA line of position and LORAN fixes off the Vancouver Island.

コース・ライン上の1時間ごとのオメガ位置の線の間隔はすべて12.7浬となり、4時間にわたり一定である。翌日の昼間に30分間隔でロランA船位とオメガ船位(A-B, C-D)を求め。これらを比較したところ、ロランA位置は不等間隔(平均値よりの偏差 ± 0.6 浬)となつたが、オメガ船位の偏差は ± 0.3 浬以内になり安定度に秀れていることを示した。

わが国東方沖合にての測定例が図7であり、その読取値とロランC(SS3レート)との組合せが図8である。ここでもオメガ位置

Fig. 7 Record in the of evening, 40°N, 154°E.

Fig. 8 OMEGA line of position and LORAN C fixes off Japan.

の線の間隔はほぼ等しい。この図は受信点が日中であるが、SWC 値は日没過渡期に大きく変動するから[4, 19], 日中・過渡期・夜間におけるそれぞれ2時間の値を、15分おきに算出したのが(表1)である。なお測定海面は風力7~8で本船は小麦満載であつた。

しかし針路・風向、風速は一定であつたから、これらの影響よりもSWC表の精度を考慮すべきである。日中のそれらの値は、バラツキなくほぼ一定であり、4時間ごとの航程には0.6浬の違いがあつたが、風浪が主原因と考えてもよいから、かなりよい安定性を示していると思なせる。これに対し過渡期である0800U.T.はSWC表の台状変化の経過途中であつた。この場合の平均値からの誤差は08-09-10時において0.7~1.7浬であつたが、同一手法をすれば日中ではほぼ零となる。

結 論

初秋の北太平洋横断実験(10.2kHz 使用)では次の結果がえられた。

- 1) Aleutian 群島附近では短時間ではあるが、頻発する VLF emission により、信号が著しく妨害され、その間はシステムとして使用不可能となつた。
- 2) 送信局からの距離と受信強度との相関は、Haiku 局にては著しく、東又は西方への伝搬方向の相違が検出された。又は約2,000 浬近傍まで10.2kHzの高次モード波の影響がみられる。これらは変動幅となり、船位誤差界の大きさをきめる。
- 3) 船位誤差はSWC表の予報技術によつてきまるが、昼間では少くとも0.5浬以上、過渡期には2~3浬以上と推定できる。
- 4) 日没時において位相値が一時的にステップ変化した。その効果は日没時が大きい。

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 OMEGA Project, 前 Manager, Capt. M. X. Polk, 討論と受信器の調整に便宜を下された TRACOR Inc. の Dr. O. J. Baltzer と Mr. Friedrich 討論の機会を与えられた Mr. E. R. Swanson 乗船の便宜を下された神戸汽船株式会社大谷常務, 西 海務部長, 浅田囁

託, 第2とよた丸村上船長及び航海士一同, 記録の解析を心よく引受けられた名古屋大学空電研究所鎌田教授, 常に暖かい援助と御教示を頂いた電波研究所犬吠電波観測所中島所長と所員御一同, 関商事, 大東運輸横浜支店の関係者一同及び本学部本教室卒論学生一同。

参考文献

- [1] 鎌田哲夫: 私信, 44年12月.
- [2] 土屋, 山田, 中島, 緒方: VLF (18.6kHz) 遠距離伝搬波の日出没効果, 電波研季報, vol. 14, #73, (July 1968), 443-450.
- [3] 田口一夫: オメガ航法システム, 航海28号, (1968), 41-50.
- [4] 田口一夫: 鹿児島定点におけるオメガ信号の測定, 本会誌第43号, (1970), 105-112.
- [5] BALTZER, O. J.: OMEGA test results: DC-6 aircraft flight to Bermuda, September 1968, Tech. paper of S. C. Inc. (1969).
- [6] BERNSTELN, R., RUPPERT, G. N. and BOWING, C. O.: Precise positioning of a ship at sea utilizing VLF transmissions-Method and Results, Proc. of 24th Ann. meeting of the Inst. of Navigation (USA), June 19-21 (1968), 26p.
- [7] BLACKBAND, W. T.: Effects of the ionosphere on VLF navigational aids, J. of Res. NBS, Radio Propagation, 65D, #6, Nov-Dec (1961), 575-580.
- [8] BRAFF, R. and BRAVERMAN, N.: VLF multi-range navigation-fix error contours, AD 621677, National Aviation Facilities Experimental Center, May (1965), 64p.
- [9] BURGESS, B.: The influence of propagation conditions on the design of V. L. F. radio wave long-range navigation aids, Paper of Intern. Cong. Long-Range Sea, Air and Space Navigation, 1-6, (1965), 1-17.
- [10] CHILTON, C. J.: Phase variations in VLF propagation, "AGARDograph 74", (1963), Pergamon Press, 257.
- [11] CROMBIE, D. D.: Periodic fading of VLF signals received over long paths at sunrise and sunset, Radio Sci. J. Res. NBS 68D, 1, 27-34.
- [12] CROMBIE, D. D.: Further observations of sunrise and sunset fading of very-low-frequency signals, Radio Sci. 1-1, Jan (1966), 47-51.
- [13] POLK, M. X.: Private communication, Aug 4 (1969).
- [14] RISE, G.: Diurnal phase change of VLF signals propagated over long paths, Radio Sci, 2-4, April (1967), 374-385.
- [15] SILVERMAN, M.: Oceanography application of very low frequency radio navigation in the Indian Ocean, Trans. Ocean Sci. and Ocean Eng., (1965), 320-333.
- [16] STANBROUGH, J. H.: Long-range relative navigation by means of VLF transmissions, Deep Sea Research, 11, (1964), 249-255.
- [17] STOUT, C. C.: OMEGA-Implementation plans and receiver development, Paper of Intern. Symposium on Maritime Navigation, (1969), 21p.
- [18] SWANSON, E. R.: OMEGA in the Atlantic, NEL Res. & Develop. report 1350, 10 Jan (1966), 28p.
- [19] U. S. NAVAL OCEANO. OFFICE: OMEGA skywave correction table, area 04, 09, (computer print out).
- [20] WALKER, D.: Phase steps and amplitude fading of VLF singals at dawn and dusk, Radio Sci., 69D, 11, Nov (1965), 1435-1443.

- [21] WATT, A. D. and CROGHAN : Comparison of observed VLF attenuation rates and excitation factors with theory, Radio Sci. 68D, #1, Jan (1964), 1-9.
- [22] ZUCCARO, A and RONA, P. A. : OMEGA navigation performances off northwest Africa during operation, 267, April 23-May 28 1968, Tech. report of the Hudson Lab. of Columbia Univ., #153, 36p.

Table 1 The interval of successive LOP (A-C) using 10.2kHz
every 15 minutes. 40.5°N, 154.0°E.

Dusk		Night		Day	
UT	diff. in dist. n. m.	UT	diff. in dist. n. m.	UT	diff. in dist. n. m.
0800	S. T. 1800	1400	S. T. 2400	0100	S. T. 1100
0815	1.6	1415	3.0	0115	3.1
0830	1.8	1430	4.4	0130	3.2
0845	3.0	1445	1.4	0145	3.1
0900	2.9 9.3	1500	5.1 13.9	0200	3.1 12.5
0915	2.9	1515	2.4	0215	3.6
0930	2.1	1530	3.3	0230	2.6
0945	1.8	1545	2.5	0245	3.6
1000	2.1 8.9	1600	2.4 13.9	0300	3.3 13.1