

鹿児島で受信した低緯度帯を東西伝搬する
オメガ電波の位相異常 (SPA)

田口一夫, 西 隆 昭

SPA in the OMEGA VLF Wave Propagation on
East-West over the Low Latitudes as Received at Kagoshima, Japan^{*1}

Kazuo Taguchi^{*2}, Takaaki Nishi^{*3},

Keywords: OMEGA navigation, VLF wave, East-West propagation, SPA,
propagation disturbance

Abstract

OMEGA navigation system uses VLF radio wave which shows the remarkable stability and long distant coverage in its propagational characteristics. The stability of radio wave, however, is sometimes disturbed with strong solar flare produced from sunspot. This disturbance makes the phase of VLF wave rapid phase change (SPA) that introduce the error in fixing. The phenomena has been studying by many researchers, but these studies has focused on the higher frequencies in VLF band that means do not made in OMEGA range.

This paper reveals that the propagation characteristics of SPA in OMEGA frequency, especially to analysis the relationship between the magnitude of SPA and solar zenith angle, solar X ray flare flux intensity on VLF propagation. The measurements were made both phase and field strength of OMEGA Hawaii and Reunion, 10.2kHz and 13.6kHz, during 1976 to 1981, at Kagoshima, Japan.

The major conclusion can be described as follows:

- 1) Occurrence frequency of SPA is proportional to the sunspot number,
- 2) Magnitude of SPA depends on the distance of propagation path, X-ray radiation below 8Å, and solar zenith angle,
- 3) SPA in OMEGA wave is not relates to the direction of propagation path.

^{*1}本研究は西隆昭の修士論文(鹿児島大学大学院水産学研究科1981年修了)を基に展開したものである。

^{*2}鹿児島大学水産学部海洋環境計測学研究室 (Laboratory of Marine Electronics, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890 Japan)

^{*3}日本無線株式会社 (Japan Radio Company Ltd., 1-1 Shimo-Renjaku 5, Mitaka, Tokyo, 181 Japan)

1 はじめに

地球・電離層間を導波管伝搬するオメガ電波の航法への応用は、高い安定性を示す電離層 D 領域の反射高さに依存している。しかし電離層生成の主因は太陽照射にあるから、電離層は照射の変化に敏感に対応するので、各種の擾乱が発生することはよく知られている¹⁾²⁾。したがって、伝搬路の全部あるいは一部が日照半球にあるときに擾乱が生ずるならば、反射高さも変化し、続いて測定位相も変化するから、船位に誤差が生じる。

すなわち、太陽黒点による SID に伴い、太陽フレアが発生し、放出された X 線により異常電離が生じる。ついで、急激に位相が変化した後、徐々に回復してゆくが (Fig. 1)、これを急始位相異常 (SPA) とよぶ、Swanson,³⁾ 大塩光夫⁴⁾。位相の変化および規模も大きいと、船位誤差への影響も著しい。SPA の宇宙空間物理学的研究は数編発表されているが¹⁾²⁾⁵⁾、それらは全体として、高い VLF 領域を対象としているので、オメガ航法に直接に適用するのは少々問題がある。

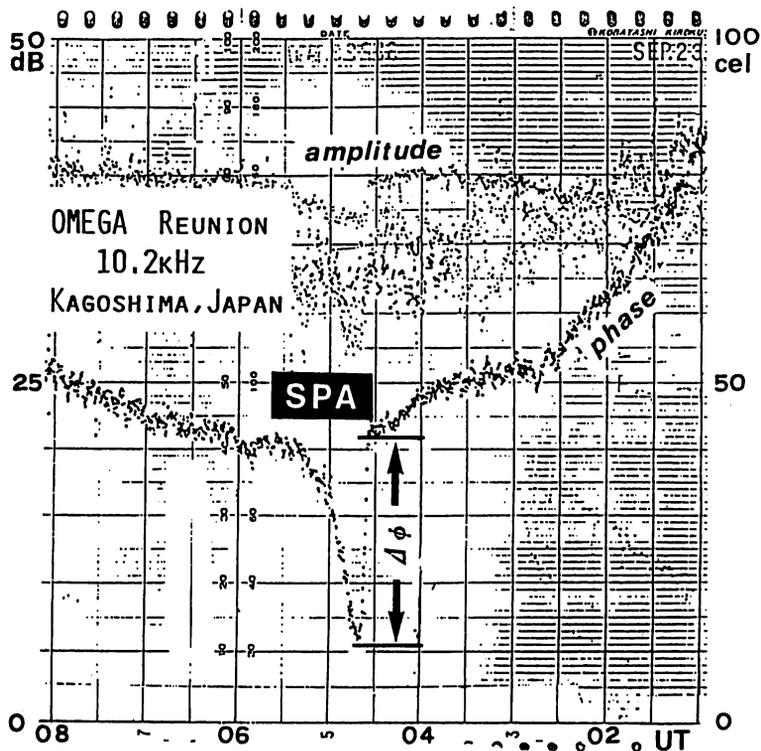


Fig. 1. Example of SPA on the record of OMEGA signal, phase and amplitude, 10.2kHz, OMEGA Reunion, Kagoshima

さらに、太陽フレアにより放出されたX線の中でも、軟X線による電離効果は、 $1-8\text{\AA}$ 領域が著しいとされるが⁵⁾、人工衛星による軟X線の測定領域は 20\AA まで拡張されたので、それらの電離効果についても、確かめる必要がある。

従来、オメガ電波の伝搬特性（減衰率）の方位依存性は、東方向または西方向では著しく異なり、このため多くの問題が生起している。ことにモード干渉によるサイクル・ジャンプは、鹿児島で受信したオメガ信号中、ハワイ局電波に頻発するので、特性が明かにされ、解

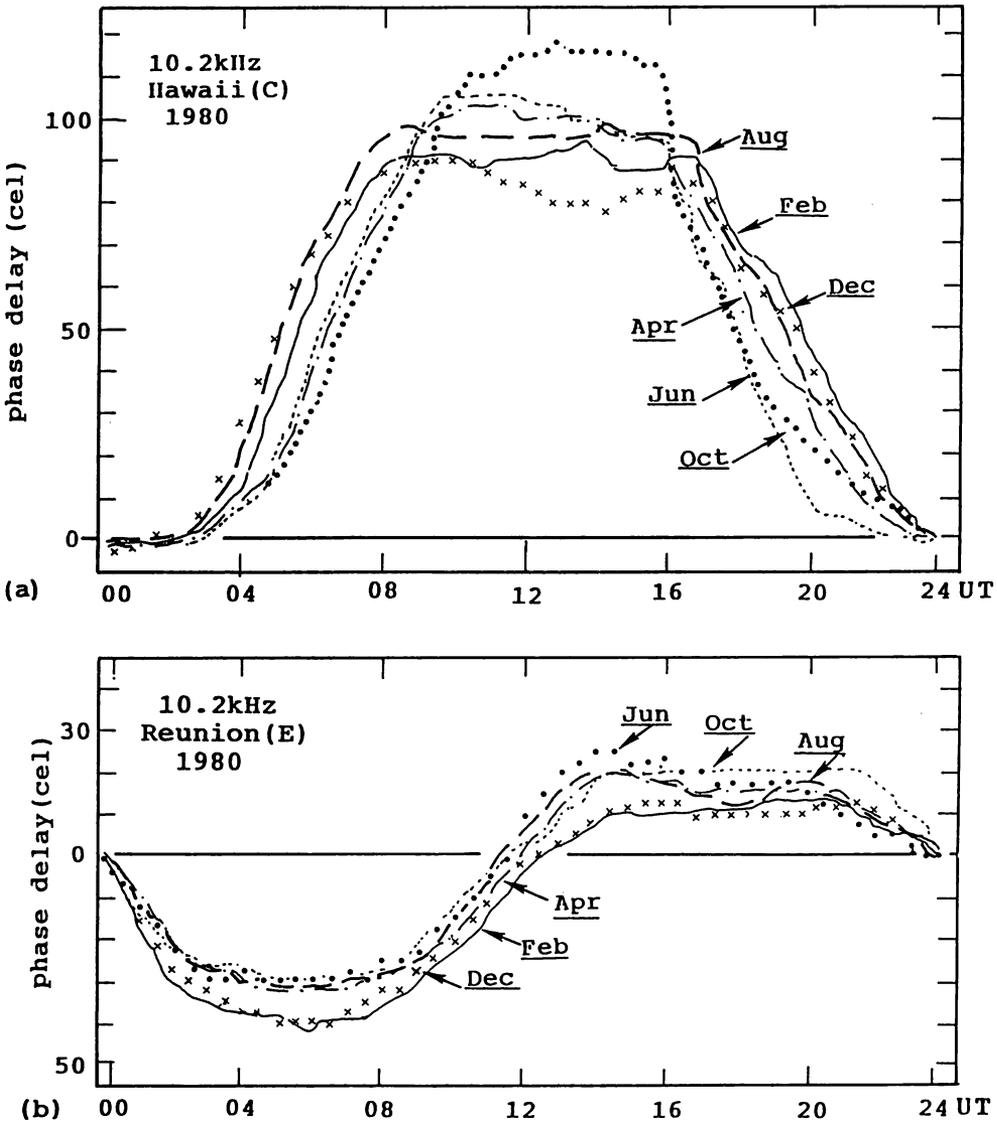


Fig. 2. Diurnal phase change, monthly mean during 1980, Kagoshima.
 (a) : OMEGA Hawaii, (b) : OMEGA Reunion

析が行なわれた⁶⁾。

しかしながら、SPA はジャンプに比較すれば、継続時間が一般に短いとはいえ、突発するために予知が不能であり、大きい誤差に発達する。しかも、発生の実実を時間で知ることが困難であるから、船位決定上は甚だ厄介である。さらにオメガ船位の決定では、位置の線を全方位にわたって使用するの、測定送信局の方位の影響を確かめる必要がある。ことに地磁気との効果は無視できないと考える。SPA の影響を知るためには、伝搬路の方位、ことに上述の東西方向にある、送信局について考慮が必要である。

SPA の大きさを正確に知るには、通常の位相日変曲線の安定性を確かめねばならない。Fig. 2 は1980年に鹿児島で $\rho-\rho$ 受信した、ハワイ (C) 局とレユニオン (E) 局の例で、1980年の奇数月の2月おきの位相日変化曲線である。それぞれの局の30分おきの位相をプロットしているが、概観して完全な日照時間帯すなわち伝搬路がすべて昼間では、極めて安定していることが分かる。

2 測定装置と資料処理

本研究室では、Fig. 3 の測定装置により常時オメガ局の信号、すなわち 10.2kHz, 13.6kHz および 11.3kHz の位相と電界強度を測定している。アンテナには 4 m のホイップ・アンテナ

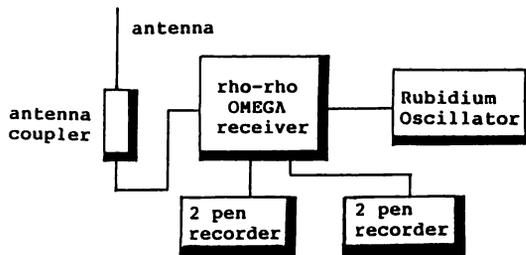


Fig. 3. Block diagram of the receiving equipment

Table 1. OMEGA stations and propagation parameters

station (code)	position		frequency (kHz)	dist to km (n.m.)
	lat	long		
Norway (A)	66°25'15" N	13°09'10" E	10.2, 13.6	7909.7 (4269.8)
Liberia (B)	6°18'19" N	10°39'44" W		15128.8 (8168.9)
Hawaii (C)	21°24'17" N	157°49'53" W		7090.8 (3828.7)
North Dakota (D)	46°21'52" N	98°20'06" W		10049.9 (5426.5)
Reunion (E)	20°58'27" S	55°17'24" E		9905.8 (5348.7)

ナを用い、ルビジウム (Rb) 発振器を時間標準とし、 $\rho-\rho$ 測定のおメガ受信機出力を打点記録した。多打点記録器は、毎時25mmの巻き取り速度で記録している。鹿児島から各送信局までの距離などの諸元を、Table 1 に示した。

受信機を収納したラック全体は、第1種接地を行なっているので、受信環境による雑音誘導は無視できる。なお、Rb 発振器のエージングによる位相日変化の修正は、毎世界時00時を基準として行なった。さらにエージング・レートは 1×10^{-11} より安定しているので、本解析には何ら問題ない。

主たる考察を行なう、C, E局の伝搬路はいずれも海面と見なせる。それらの地磁気水平分力との交角は、ハワイ局はほぼ平行、すなわち零であり、レユニオン局とは約50度である (Fig. 4)。

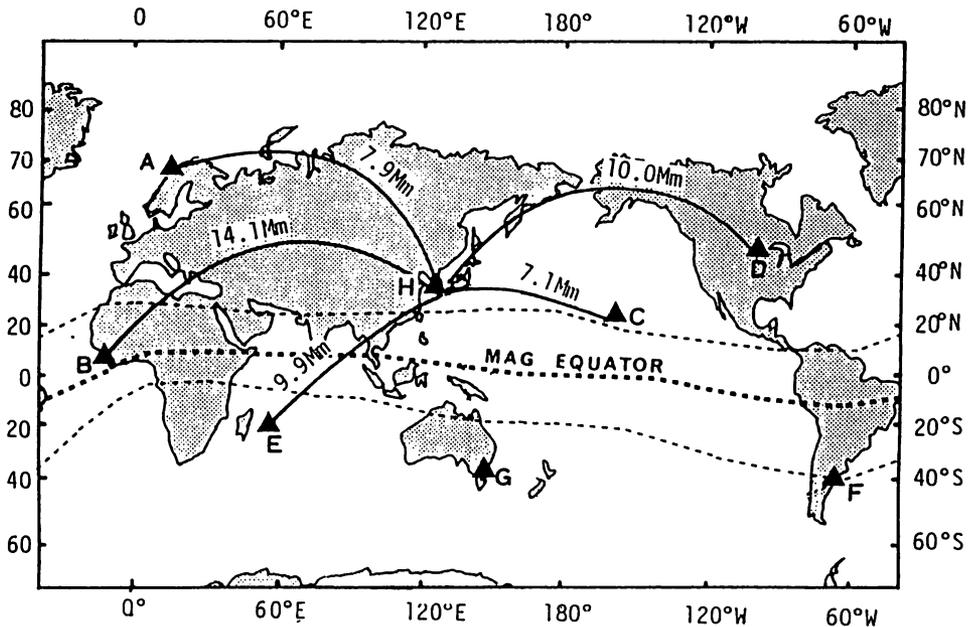


Fig. 4. Propagation paths of OMEGA signals to Kagoshima, Japan

オメガ電波の伝搬方向による減衰率は、10 kHzにおいて、東向きでは4.2 dB/Mm、西向きでは1.96 dB/Mmと大きく異なり⁷⁾⁸⁾、さらに伝搬モードによっても異なることから⁸⁾、これらは位相不安定の一因となる。しかし、SPAは日照半球下の比較的短時間の現象であるから、モード干渉による不安定位相があったとしても、短時間の作用では、影響は僅かである。またSPAによる位相と電界強度の不安定記録は、資料整理時には除去される。

オメガ電波が導波管伝搬するときには、電離層反射高さの日変化により、位相速度も変化する。これにより、位相日変化曲線は台状変化するが (Fig. 2)、反射高さも季節変化するから、SPAの大きさととの関連を無視できない。同一SPAの大きさについて、伝搬路の向きが反対である、C, E局のそれらを比較する場合に、季節変化についての特別な考慮は必要ない。

3 解析の手順

太陽爆発による SID を引き金とし、電離層の異常電離による電子密度の急増が、導波管の上面、すなわち D 領域の反射高さを急激に低下させることが SPA の主要原因である。そこで、次の手順により SPA の特性を見出す。

- 1) SPA の発生数と太陽サイクル(黒点数)との相関関係
- 2) 電子密度と SPA の位相進み($\Delta\phi$)の大きさ
- 3) SPA の変化量を定めるパラメータとして次の事項を考察する
 - (1) 季節
 - (2) 時刻——天頂角 (χ)
 - (3) 軟 X 線
 - ①波長
 - ②強度
 - (4) 伝搬距離
 - (5) 伝搬方位
 - (6) 磁気緯度

SPA の大きさ $\Delta\phi$ に寄与するパラメータの考察

位相日変化 ϕ を定めるパラメータは上述のようであるが、SPA の継続時間は 10~180 分であり³⁾⁴⁾⁹⁾、長くてほとんどが 80 分以内と見なせる。この場合には、位相日変化のパラメータのうち、太陽天頂角 χ 、伝搬距離 d 、太陽の軟 X 線放射強度 F を考慮すればよい。

(1) 太陽天頂角

ここで、天頂角 χ の電離層への影響を考察する。電離層が均質平面で、理想的状態にあるとき、電子生成率は Chapman の電離層生成理論より次式で表わせる¹⁰⁾。

$$q = q_0 \cdot \cos \chi \dots\dots\dots(1)$$

q : 任意の χ に対する電子生成率

q_0 : $\chi = 0^\circ$ の時の電子生成率

SPA 現象は短時間のため、電子密度の増加だけを考えればよい。もし、SPA の継続時間が長くなれば、電子の再結合を考慮すべきであるが、本論に挙げた SPA はすべて 80 分以内であるから上式による。

両送信局からの伝搬路はかなり長いので、SPA 発生時刻における天頂角 χ の変化範囲も広がる。天頂角 χ の電離効果は著しいので、 χ の設定に当たっては十分に考慮せねばならない。そのために、天頂角の設定は、研究者により種々の方法を用いるが、考え方の基本は、伝搬路の各点における天頂角を求め、その平均によることが多い⁵⁾。本論文では、伝搬路の中点の値で代表させる簡便法による。それは、伝搬路が南北半球に跨り、しかも伝搬路における両半球の占める割合はほぼ等しい。地磁気垂直成分は相殺されると見なし、簡便法によっても支障ないと考えた。

電子生成率は電子密度を制御するので、オメガ電波の反射高さもまた、これによって決まる。それは SPA 大きさ $\Delta\phi$ を定めることにもなるので、式(1)の電子生成率 q における天頂角 χ の効果は次式で与えられる。

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 \cdot \cos\chi \dots\dots\dots(2)$$

$\Delta\phi$: 任意の χ に対する位相進みの大きさ

$\Delta\phi_0$: $\chi = 0^\circ$ の時の位相進みの大きさ

式(2)より位相進みの大きさ $\Delta\phi$ は、 $\cos\chi$ に比例することを示す。

(2) 伝搬距離

導波管伝搬するオメガ電波の位相日変化は、球面導波管理論より導かれた次式で表わせる¹¹⁾。

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \left(\frac{h}{2a} + \frac{\lambda^2}{16h^2} \right) \frac{\Delta h}{h} \quad [\text{rad}] \dots\dots\dots(3)$$

ϕ : 位相日変化の大きさ

d : 伝搬距離

λ : 波長

h : 実効反射高さ

a : 地球の半径

ここで、太陽フレアによる反射高さの低下は、必然的にSPAの大きさ $\Delta\phi$ を決めるから、式(3)は $\Delta\phi$ の算出に使用できる。 $\Delta\phi$ を決める要素として伝搬距離 d は大きい比重を持つ。

4 測定結果と考察

測定は1977-1981年の期間に、オメガ送信局のA,B,C,DおよびE局の10.2 kHzと13.6 kHzについて行なった。本論では、測点鹿児島に対して互いに反対方向にある、東方のハワイ(C)局と、西方のレユニオン(E局)を主として考察し、他の局の値は参照にとどめた。

4.1 太陽黒点数とSPA発生数

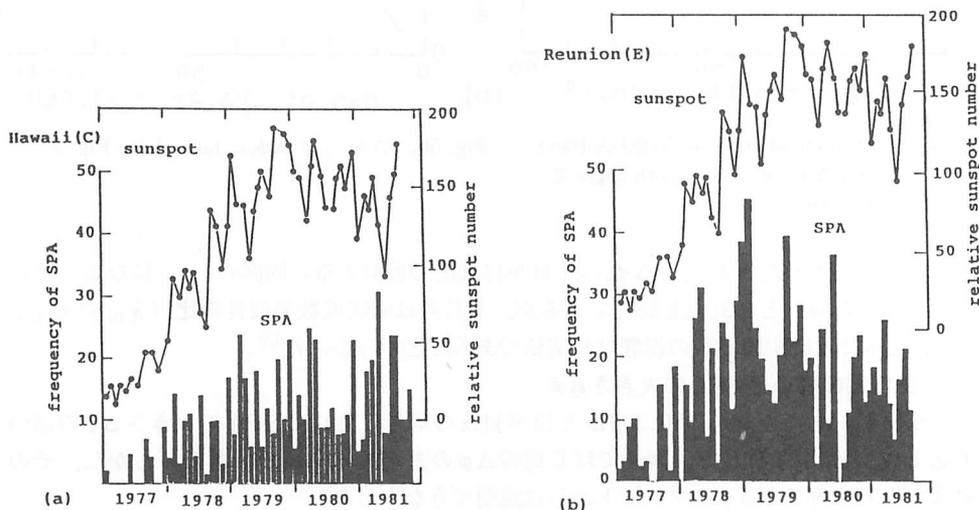


Fig. 5. Frequency of SPA on OMEGA Hawaii (a) and Norway (b), 1977-1981, 10.2kHz

SPA は太陽フレアにより VLF 電波の位相が急激に進む現象であるから、太陽活動と SPA 発生数とは比例関係にある。太陽活動の指標としての太陽黒点は、太陽フレアを伴うから、Solar Geophysical Data (S.G.D.) 記載の黒点数¹²⁾と鹿児島で測定したハワイ局とノルエー(A)局信号に見られた、SPA の数を1977-1981年の5年間にわたりプロットしたのが、Fig. 5である。ここでの SPA とは、その時の日変化曲線との偏位が5 cel 以上のものをいう (Fig. 1)。両局信号ともに、黒点数と SPA 数は比例している。

C局とE局の10.2 kHz 信号に表われた、SPA 発生数と太陽黒点数の相関係数は、それぞれC局は0.91, E局は0.73であった。両局の値に違いのある理由は、今後の解析で明らかになるが、E局の伝搬路が9.9 Mm と非常に長く、多くのパラメータが関与するためである。

4.2 周波数と SPA の大きさ $\Delta\phi$

周波数の違いが SPA の大きさ $\Delta\phi$ に及ぼす影響は、電離層の振る舞いを知る指標にもなるし、航法上の最適周波数の選択の観点でも興味がある。ハワイ局とレユニオン局信号の10.2 kHz と13.6 kHz について、1980年1月に生じた SPA 事象を、太陽天頂角 χ と対比させた (Fig. 6, 7)。この図から、送信局による違いは認められないが、SPA の大きさ $\Delta\phi$ は一般に13.6 kHz の方が10.2 kHz より小さい傾向を示す。

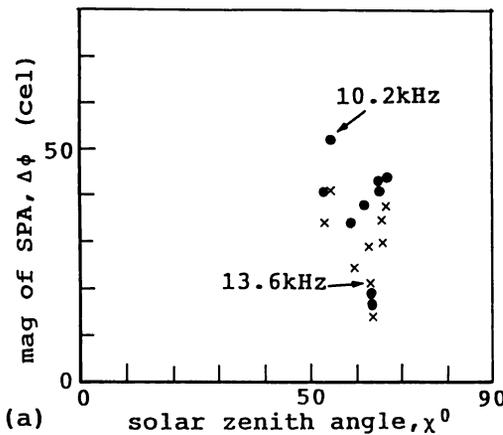


Fig. 6a. Magnitude of SPA on OMEGA Hawaii (C) $\Delta\phi$, vs. solar zenith angle χ , Jan 1980

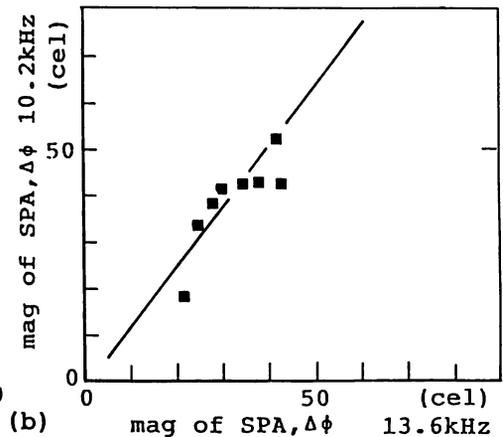


Fig. 6b. $\Delta\phi_{10.2}$ to $\Delta\phi_{13.6}$ taken from Fig. a

そこで両図に示した $\Delta\phi_{10.2}$ と $\Delta\phi_{13.6}$ を最小自乗法で近似すると両図の (b) になる。その勾配は1.30 (C局) と1.31 (E局) であるが、これらは両周波数の波長の比 ($\lambda_{10.2}/\lambda_{13.6}$) であり、 $\Delta\phi$ に及ぼす周波数の影響は無関係であることが分かった¹³⁾。

4.3 送信局の違いと SPA の大きさ $\Delta\phi$

ハワイ局とレユニオン局の10.2 kHz と13.6 kHz の信号に生じた SPA の大きさ $\Delta\phi$ の違いを Fig. 6, 7 により考察した。両図ではE局の $\Delta\phi$ の方が大きい傾向にある。しかし、その理由は太陽天頂角 χ と $\Delta\phi$ のプロットからは説明できなかった。

もっとも $\Delta\phi$ は、既に考察したように太陽天頂角、伝搬距離、太陽フレアの強度により変

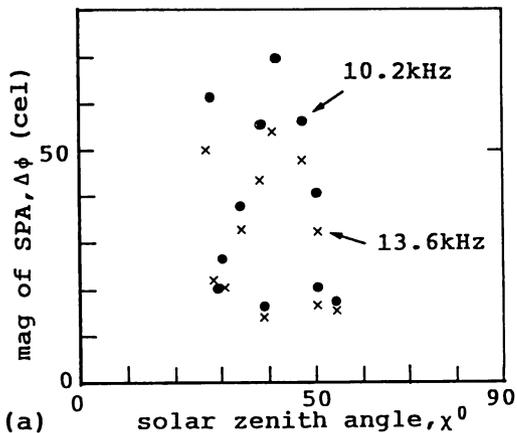


Fig. 7a. Magnitude of SPA on OMEGA Reunion (E) $\Delta\phi$, solar zenith angle χ , Jan 1980

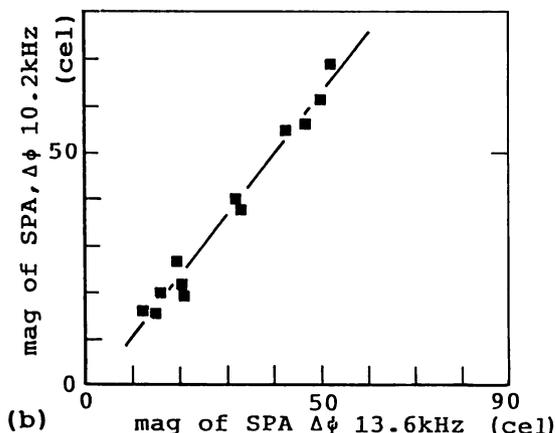


Fig. 7b. $\Delta\phi_{10.2}$ to $\Delta\phi_{13.6}$ taken from Fig. a

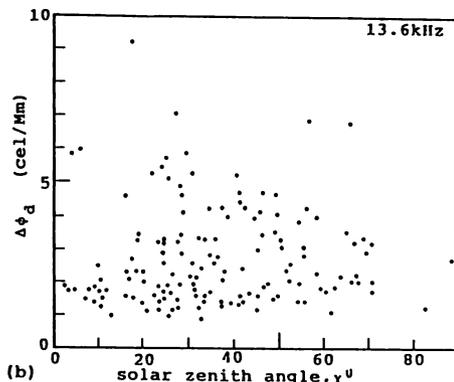
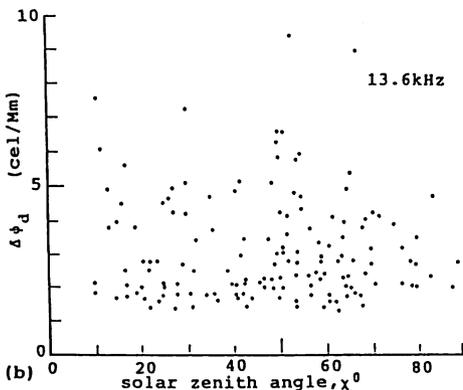
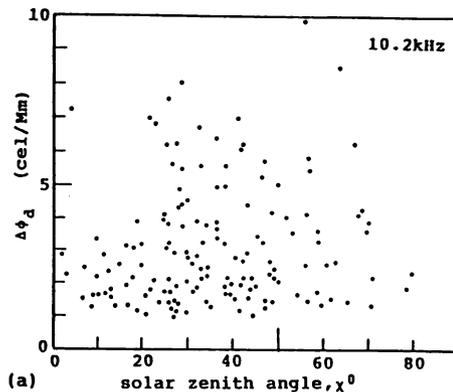
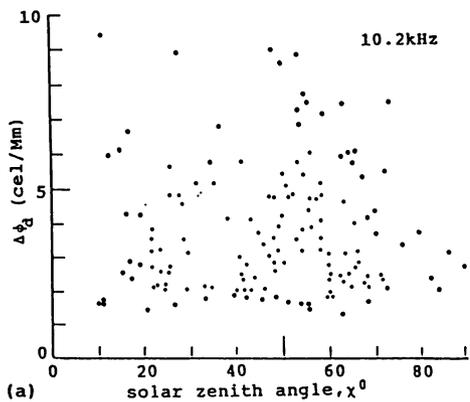


Fig. 8. Magnitude of SPA per Mm, $\Delta\phi_d$ vs solar zenith angle χ , OMEGA Hawaii (C), 10.2kHz, 1980

Fig. 9. Magnitude of SPA per Mm, $\Delta\phi_d$ vs solar zenith angle χ , OMEGA Reunion (E), 10.2kHz, 1980

化するので、式 (3) に示す伝搬距離の違いを考察すべきである。そこで両局の信号に表われた SPA の大きさ $\Delta\phi$ を、単位伝搬距離 (Mm) で除して $\Delta\phi_d$ とし、太陽天頂角 χ と対比させた。一例として、1980年に測定した両局の両周波数ごとの例を Fig. 8, 9 に示す。この結果、ここでの分布パターンは、周波数ごとにかなり近似していることが分かった。

4.4 SPA の大きさ $\Delta\phi$ と太陽天頂角 χ

太陽天頂角 χ の大小が、距離効果を考えた $\Delta\phi_d$ に与える影響を見るのに、 χ の大きいノルウェー局と χ の小さいレユニオン局のそれぞれの $\Delta\phi_d$ プロットした (Fig. 10)。

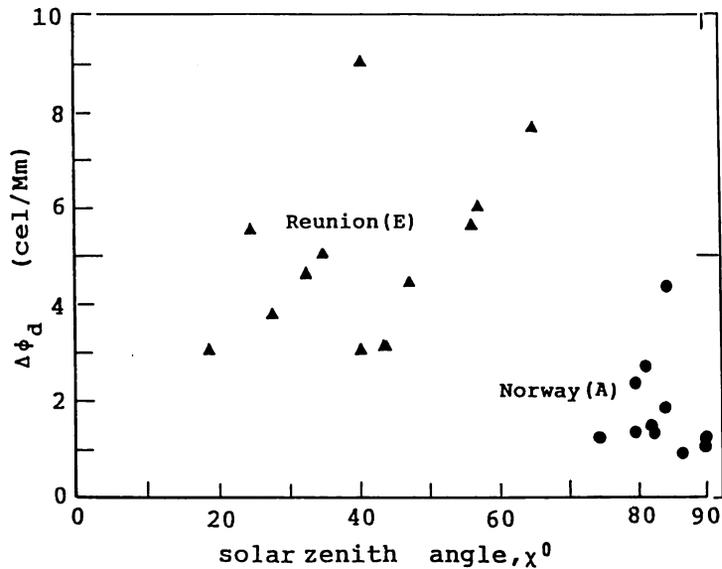


Fig. 10. Magnitude of SPA per distance (Mm) vs. to solar zenith angle χ , 10.2kHz

ノルウェー局の伝搬路は、ほとんどが導電率の低い大地で、しかも磁気的にもかなり高緯度帯のために、オーロラ帯の占有比率も大きいから、通常の位相日変化を論ずる場合には、種々のパラメータの考慮が必要である。しかし、短時間の現象である SPA では、太陽天頂角 χ のみを考えればよい。Fig. 10 ではレユニオン局のように χ が小さいと、 $\Delta\phi_d$ が大きくなる。この影響をより明確にするために、次の考察に入る。

4.5 SPA 規格化係数

鹿児島で受信している 5 オメガ送信局からの信号に、同時刻に生じた SPA の大きさ $\Delta\phi_d$ と、太陽天頂角 χ をプロットして (Fig. 11), 両者の関係を定める一般式を求めた。もちろん、太陽位置により、SPA が生じえない局信号も多いが、SPA 規格化の精度を上げるためにこれらの事象は省いた。

10.2 kHz — 1981年中に、5 信号のすべてに見られた SPA は 20 事象であり、式の係数は付録 Table 1 にあげた。この中より 3 例を Fig. 11 に示すが、図中の黒点が測定値である。 χ が 90° 以上の値は省いた。最小自乗法により求めた曲線は、 χ に対する $\Delta\phi_d$ の変化を表わす¹³⁾。それぞれは、

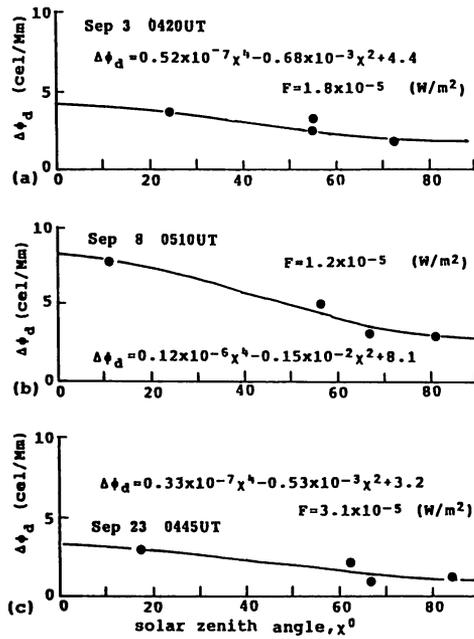


Fig. 11. SPAs on five OMEGA signals (A, B, C, D, E), $\Delta\phi_d$ to solar zenith angle χ , 10.2kHz, 1980
 F: intensity of solar flare flux

$$\Delta\phi_d = 0.52 \times 10^{-7} \chi^4 - 0.68 \times 10^{-3} \chi^2 + 4.4 \dots\dots\dots (a)$$

$$\Delta\phi_d = 0.12 \times 10^{-6} \chi^4 - 0.15 \times 10^{-2} \chi^2 + 8.1 \dots\dots\dots (b)$$

$$\Delta\phi_d = 0.33 \times 10^{-7} \chi^4 - 0.53 \times 10^{-3} \chi^2 + 3.2 \dots\dots\dots (c)$$

となる。3例共に χ と $\Delta\phi_d$ は逆比例している。

しかしながら、事象別にSPAの大きさ $\Delta\phi_d$ を比べると、太陽天頂角 χ_0 における値は、(a) 4.4 (cel/Mm), (b) 8.1 (cel/Mm), (c) 3.2 (cel/Mm)のように異なっている。

その原因として、軟X線放射強度 F を考慮する必要がある。上記3例の強度 F は、(a) 1.8×10^{-5} (W/m²), (b) 3.1×10^{-5} (W/m²), (c) 3.8×10^{-5} (W/m²)と、かなりの違いがある。したがって、考察すべき $\Delta\phi_d$ の違いは、軟X線放射強度の差に起因するといえる。ここでの20事象すべてについて $\Delta\phi_d$ を求め、太陽軟X線放射強度 F との相関を調べた結果を挙げた(付録 Table 2)。相関係数は0.77となり両者には相関のあることが明らかにできた。

太陽フレアの強弱、すなわち軟X線放射線強度 F の異なった、任意のSPAを比較するためには、 $\Delta\phi_d$ を太陽天頂角 χ による、規格化係数 $\rho(\chi)$ を用いることで、SPAの大きさ $\Delta\phi_d$ の推定を、かなり正確にできると考えた。Fig. 13では、同一SPAに対する天頂角 χ

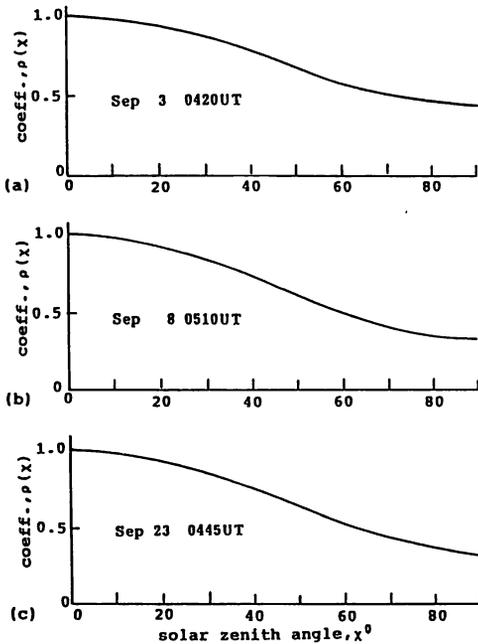


Fig. 12. Normalizing coefficient $\rho(X)$ produced from Appendix (Table 1) for 10.2kHz based on $X = 0^\circ$

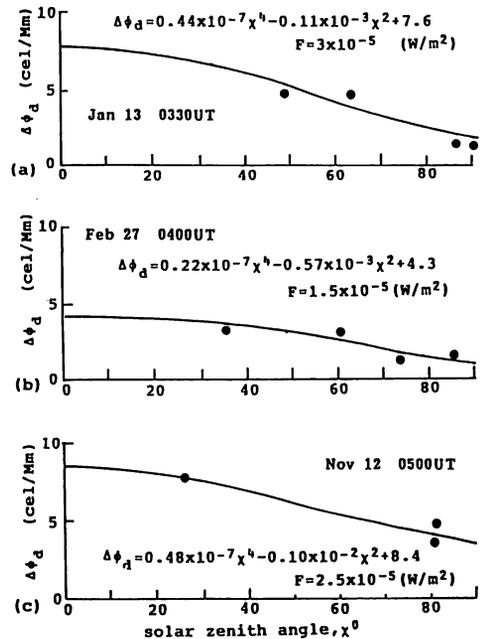


Fig. 13. SPAs on five OMEGA signals (A, B, C, D, E), $\Delta\phi_d$ to solar zenith angle X , 13.6kHz, 1980

の変化に対応させた測定値を求め、これらに適した実験式を示した。この場合、 $X = 0^\circ$ を基準にして、SPA発生時の X における予測SPAを得るための係数(規格化係数 $\rho(X)$ とよぶ)を示す。測得した20事象のそれぞれの係数をまとめたのがFig. 14である。

13.6 kHz ---ここでは10.2 kHzに用いたのと同様な処理を行なった。5局信号のすべてにSPAが発生した例は34事象である。その中の3例をFig. 13に示す。すなわち、太陽天頂角 X とSPAの大きさ $\Delta\phi_d$ は逆比例関係であって、強度 F によりSPAの大きさ $\Delta\phi$ に差が生じる。34事象のまとめが付録 Table 2 であり、相関係数 $r=0.79$ は10.2 kHzの場合とほぼ一致した。13.6 kHzにおける、 $X = 0^\circ$ とした時のまとめの規格化係数 $\rho(X)$ はFig. 14である。

上記の4枚の図のまとめとして、規格化の基準を $\rho(0^\circ) = 1$ とにおいて、両周波数の係数の曲線は X が20度を越えるあたりより次第に外れるので、周波数効果も考慮すべきことを示唆している。

以上の結果より、SPAの大きさ $\Delta\phi_d$ は次式で表すことができる。

$$\Delta\phi_d = \Delta\phi_0 \cdot \rho(X)$$

$\Delta\phi_d$: 任意の X におけるSPAの大きさ

$\Delta\phi_0$: $X = 0^\circ$ におけるSPAの大きさ

$\rho(X)$: 規格化係数

理想的電離層では $\rho(X) = \cos X$ であるが、 $\cos X$ をプロットすると、 $0^\circ < X < 60^\circ$ では、

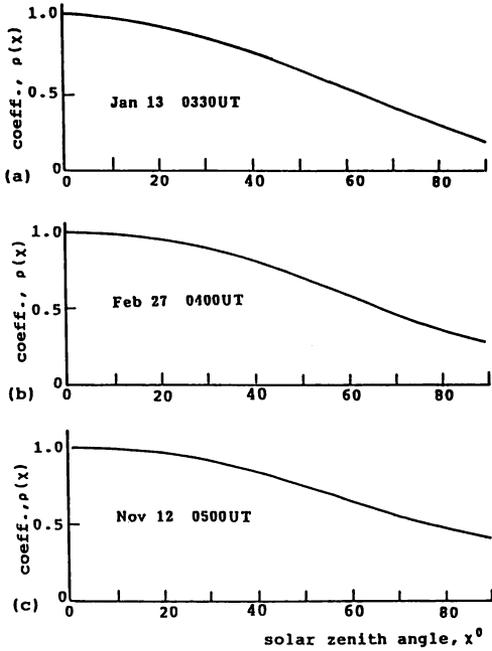


Fig. 14. Normalizing coefficient $\rho(\chi)$ produced from Appendix (Table 2) for 13.6kHz based on $\chi = 0^\circ$

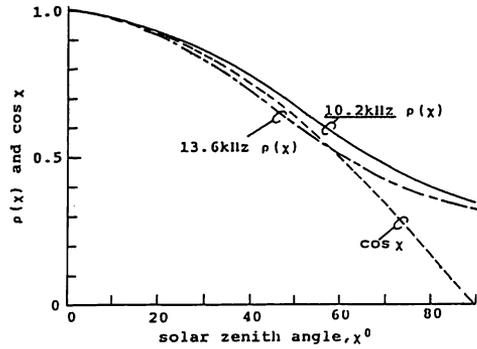


Fig. 15. Normalizing coefficient $\rho(\chi)$ produced for frequency 10.2kHz & 13.6kHz based on $\chi = 0^\circ$

$\rho(\chi)$ とほぼ一致した値をとるが、 60° 以上では大きく逸れる。この原因として考えられるのは、電離層における電子の生成と再結合の効果であろう。また、太陽天頂角 χ は地上における太陽の出没を基準にしたものである。しかし、電離層高さの日照時間は地上より遙かに長いから、太陽天頂角 χ をもって、電離度を代表させるのは適当でない。

4.6 太陽軟X線放射強度とSPA

既に述べたように、SPAは波長 $1-100\text{\AA}$ の太陽軟X線により生起する。しかしながら、そのSPAの大きさ $\Delta\phi_d$ は軟X線の波長により相違することが報じられているので⁵⁾、本資料もそれによる効果を確認する。

太陽の軟X線放射の波長分布とSPA

太陽軟X線放射強度 F は NOAA 発行の S.G.D. によるが、人工衛星 Solard II のセンサの測定波長域は、 $0.5-3.0\text{\AA}$ 、 $1-8\text{\AA}$ 、 $2-10\text{\AA}$ 、 $8-16\text{\AA}$ 、 $44-60\text{\AA}$ である。

1978-1979年において測定したハワイ局信号のSPAの大きさ $\Delta\phi_d$ と太陽軟X線放射強度 F の関係について考察した。 $\Delta\phi_d$ を軟X線の波長別に描いたのが Fig. 18 である。波長別の $0.5-3\text{\AA}$ 、 $1-8\text{\AA}$ 、 $2-10\text{\AA}$ 、 $8-20\text{\AA}$ 、 $44-60\text{\AA}$ について、1978-1979年に得たSPAと、そのときの太陽軟X線放射強度 F との関係をもとめたのが Table 2 である。この結果から、SPA発生に寄与するのはX線の波長 8\AA 以下の領域であることが分かった。ことに $0.5-3\text{\AA}$ では、 $1-8\text{\AA}$ の場合よりも太陽軟X線放射強度 F が2桁弱くても、 $\Delta\phi_d$ は大きい。

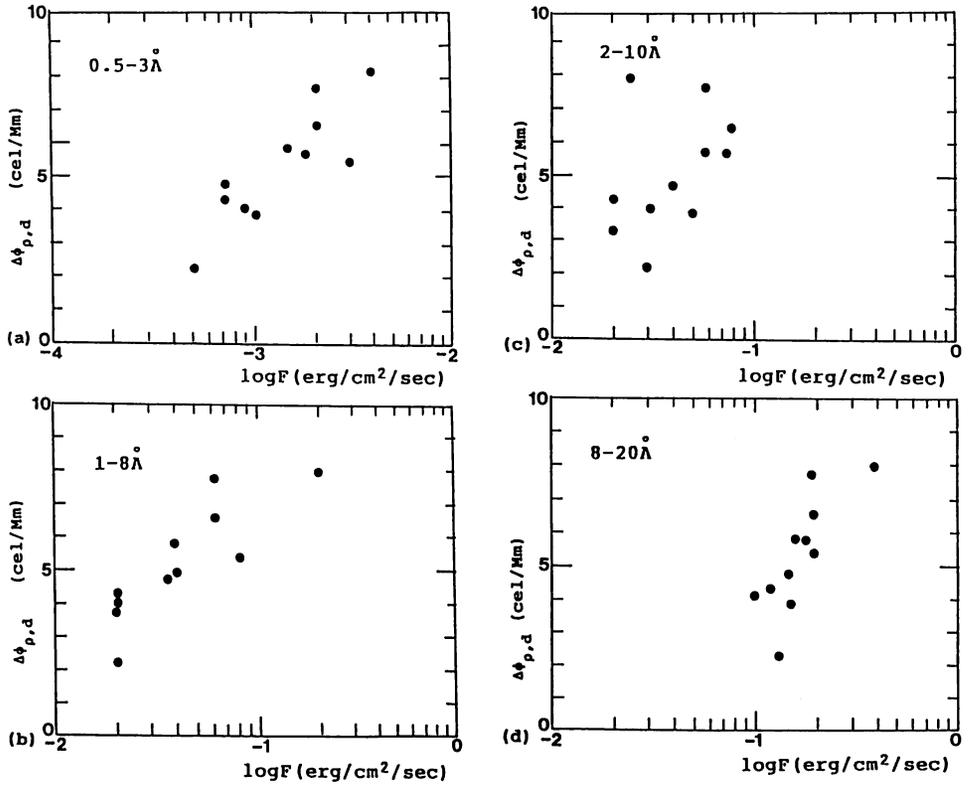


Fig. 16. Relationship between the magnitude of SPA $\Delta\phi_d$ and the wavelength of solar X-ray, OMEGA Hawaii, 10.2kHz, 1978-1979

Table 2. Relationship between the magnitude of SPA, and the intensity of solar flare flux F . OMEGA Hawaii, 10.2kHz, 1978-1979

$$\Delta\phi_{p,d} = a \log F + b$$

wavelength (Å)	a	b	correlation coefficient
0.5 - 3	5.3	20.8	0.87
1 - 8	5.0	12.2	0.80
2 - 10	1.6	7.6	0.18
8 - 20	10.2	13.3	0.83
44 - 60	5.5	3.7	0.51

$\Delta\phi_{p,d}$: (mag. of SPA)/(dist(Mm)) is normalized by coefficient
solar flux is made by SMS-GOES
 r : correlation coefficient

4.7 伝搬方位と SPA

先に伝搬方位の SPA への寄与を確かめたが, 明らかな関係を見出せなかった。ここでは, 規格化した SPA の大きさ $\Delta\phi$ と太陽軟 X 線放射強度 F とをもって, ハワイ局とレユニオン局の信号について再度検討する。太陽軟 X 線放射強度 F^* は人工衛星 SMS-GOES の電離箱で測定した波長 $1-8 \text{ \AA}$ 領域のものである。これら $\Delta\phi_{p,d}$ と F を Fig. 17, 18 に示し, 1977-1980年の全ての事象の回帰曲線を Table 3 にまとめた。C局とE局の区別なく, 現象はかなり酷似していて, 相関係数は相当に高く, 10.2 kHz と 13.6 kHz の周波数差を示す勾配は, 先の考察のようである。この結果, 主題の伝搬方位の SPA への影響はないといえよう。

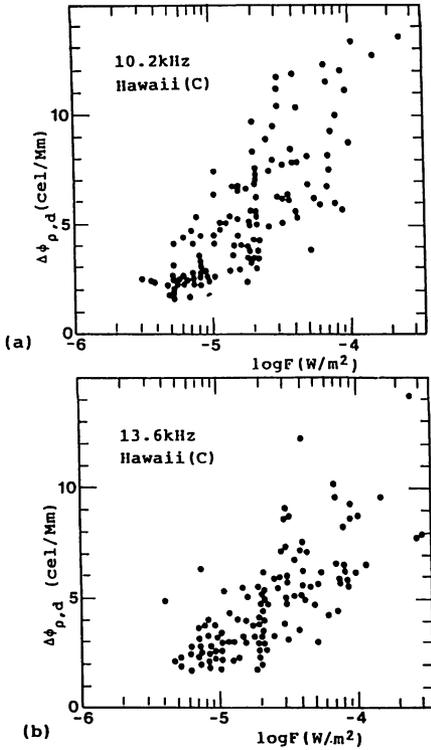


Fig. 17. Relationship between the normalized magnitude of SPA per Mm $\Delta\phi_{p,d}$ for Hawaii and the intensity of solar flare F , $1-8\text{\AA}$, 1980

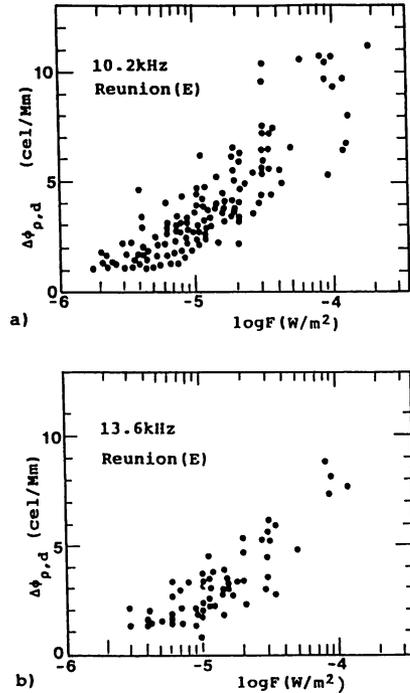


Fig. 18. Relationship between the normalized magnitude of SPA per Mm $\Delta\phi_{p,d}$ for Reunion and the intensity of solar flare F , $1-8\text{\AA}$, 1980

*太陽軟 X 線放射強度 F の単位が, SOLORD と GOES で異なっているが, 波長に力点を置いたので, 統一しなかった。

Table 3. Magnitude of SPA, $\Delta \phi_{\rho_d}$ vs. the intensity of solar X-ray flux
 $\Delta \phi_{\rho_d} = a \log F + b$

year	transmitter	frequency(kHz)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>
1977	Hawaii, C	10.2	6.5	36.0	0.96
1978	Hawaii, C	10.2	4.6	26.0	0.81
1979	Hawaii, C	10.2	6.6	37.1	0.89
1979	Hawaii, C	13.6	4.2	24.3	0.80
1977	Reunion, E	10.2	4.6	25.8	0.31
1978	Reunion, E	10.2	3.2	18.5	0.73
1979	Reunion, E	10.2	4.9	27.8	0.87
1979	Reunion, E	13.6	4.5	25.1	0.88
1980	Hawaii, C	10.2	6.4	36.5	0.77
1980	Hawaii, C	13.6	5.0	27.9	0.80
1980	Reunion, E	10.2	6.1	33.9	0.92
1980	Reunion, E	13.6	4.6	25.8	0.89

$\Delta \phi_{\rho_d}$: (mag. of SPA)/(dist(Mm)) is normalized by coefficient solar flux is made by SMS-GOES
r : correlation coefficient

要 約

以上の結果, 次のことをまとめた。

- 1 SPA 発生数は太陽活動に大きく影響され, 正比例関係にある。
- 2 SPA の大きさ $\Delta \phi$ には, 主として伝搬距離 *d*, 太陽天頂角 χ および 8 Å 以下の軟 X 線放射強度 *F* が寄与する。
- 3 SPA の大きさに関与する太陽天頂角の影響を除く, 規格化係数 $\rho(\chi)$ の採用は, 太陽天頂角が 60° 以上では適切でない。これはモデル化した電子密度に用いる $\cos \chi$ を適用できないことを意味する。また $\rho(\chi)$ は周波数ごとに決めるべきである。
- 4 オメガ周波数帯の SPA の大きさは伝搬方位とは無関係である。

謝 辞

本研究を行なうに当たり, 種々ご教示を頂いた名古屋市立保育短期大学山下享子教授に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 大塩光夫 (1969) : 電離層突然擾乱, 電波研究所季報, 15, 333-339.
- 2) E. R. Swanson(1965) : The Omega navigation system, Navigation(US), 12, 24-35.
- 3) E. R. Swanson(1973) : A synoptic study of Sudden Phase Anomalies (SPAs) effective VLF navigation and timing, Proc 5th PTTI Meeting, NASA, (Washington, D. C.).
- 4) 大塩光夫 (1977) : 太陽 X 線フレアにより惹起された電離層 D 領域擾乱 (I) および (II), 郵政省

電波研究所企画部研究論文, 1-284.

- 5) Y. Muraoka, H. Murata and T. Sato (1977) : The quantitative relationship between VLF phase deviations and 1-8Å solar X-ray fluxes during solar flares, J. Atmospheric and Terrestrial Physics, 39, 787-792.
- 6) K. Taguchi, M. Suenaga and M. Yamashita (1988) : Transequatorial OMEGA wave reception in the Western Pacific and Australia, Proc of Annual Meeting of Int'l OMEGA Assoc. 13, 22, 1-6.
- 7) A.D. Watt and R. D. Croghan (1964) : Comparison of observed VLF attenuation rates and excitation factors with theory, Radio Sci., 68D, 1-9.
- 8) A.D. Watt (1967) : "VLF Radio Engineering", pp 333-339, (Pergamon Press, New York).
- 9) 田口一夫 (1983) : "オメガ航法の理論と実務" pp 79-82, (成山堂書店, 東京)
- 10) S. Chapman (1931) : The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth, Proc Phys Soc, 43, 23-24.
- 11) J.R. Wait and K.P. Spies (1964) : Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves, NBS Tech Note 300, 1-94.
- 12) NOAA: Solar Geophysical Data, Prompt report I, 1977-1981.
- 13) 菊地 崇, 寺島良子, 大谷 晃 (1980) : オメガ VLF 電波の赤道斜め横断11000km伝搬特性, 電波研究所季報, 26, 835-853.

付 録

Table 1. Magnitude of SPA per distance (Mm) vs. the intensity of solar X-ray flux F , 1-8Å, 1980, 10.2kHz

$$\Delta \phi_d = a \chi^4 \times 10^{-8} + b \chi^2 \times 10^{-3} + c$$

date	time (UT)	$\Delta \phi_d$ (cel/Mm)			F (W/m ²) $\times 10^{-5}$	date	time (UT)	$\Delta \phi_d$ (cel/Mm)			F (W/m ²) $\times 10^{-5}$
		a	b	c				a	b	c	
JAN. 13	03 30	4.5	1.2	8.8	3.0	OCT. 13	04 15	24	0.4	4.1	1.8
JAN. 27	23 40	11.9	1.8	9.7		OCT. 14	06 15	2.9	10.3	10.3	30.0
JAN. 28	03 10	57	1.3	7.5		NOV. 3	02 10	4.8	7.0	7.0	2.0
FEB. 27	04 00	1.4	0.5	4.7	1.5	NOV. 7	02 10	4.7	13.3	13.3	25.0
JUN. 29	02 40	5.7	1.0	61	3.5	NOV. 13	01 10	0.0	4.8	4.8	5.5
SEP. 3	02 20	5.2	0.7	4.4	1.8	NOV. 13	03 20	2.3	4.7	4.7	0.6
SEP. 4	02 15	27.7	3.5	1.3	6.0	NOV. 13	05 20	2.8	4.6	4.6	0.4
SEP. 8	05 10	11.9	1.5	8.1	3.0	NOV. 16	05 45	4.9	7.1	7.1	3.0
SEP. 23	04 45	3.2	5.3	3.2	1.2	NOV. 19	04 50	4.5	9.0	9.0	7.5
OCT. 11	04 10	4.2	0.9	6.5	3.8	DEC. 12	05 10	36	7.7	7.7	4.5

Table 2. Magnitude of SPA per distance (Mm) vs. the intensity of solar X-ray flux F , 1-8Å, 1980, 13.6kHz, for Station A, B, C, D, and E

$$\Delta\phi_d = a\chi^4 \times 10^{-8} + b\chi \times 10^{-3} + c$$

date	time (UT)	$\Delta\phi_d$ (cel/Mm)			F (W/m ²) $\times 10^{-5}$	date	time (UT)	$\Delta\phi_d$ (cel/Mm)			F (W/m ²) $\times 10^{-5}$
		a	b	c				a	b	c	
JAN. 13	03 30	1.3	-1.1	7.6	3.0	JUN. 7	03 20	29	-2.5	7.1	5.0
JAN. 27	03 50	4.0	-0.9	7.0		JUN. 21	01 20	11	-1.6	7.7	2.8
JAN. 28	03 10	3.4	-0.8	5.3		JUN. 23	04 00	16	-1.3	3.5	2.1
FEB. 27	04 00	2.2	-0.6	4.3	1.5	SEP. 3	04 15	4.6	-0.7	3.7	1.8
APR. 3	01 30	5.1	-0.9	4.9	2.0	SEP. 4	02 00	3.3	-0.8	5.0	6.0
APR. 5	04 00	3.0	-0.5	4.0	1.0	SEP. 8	05 30	8.4	-1.2	6.3	3.0
APR. 6	04 20	4.2	-0.6	6.2		OCT. 11	04 05	9.0	-0.9	5.3	3.8
APR. 7	05 35	5.7	-0.7	6.1	9.0	OCT. 13	04 20	2.0	-0.4	3.2	1.8
APR. 8	03 10	7.8	-1.1	6.4	4.0	OCT. 14	06 10	5.3	-0.9	7.7	30
APR. 13	04 20	6.1	-0.7	3.9	1.3	NOV. 3	02 10	2.5	-0.6	4.8	2.0
APR. 26	03 30	1.3	-1.2	4.5	2.0	NOV. 4	02 00	2.3	-0.6	5.3	2.5
MAY. 8	01 00	3.1	-0.4	4.0		NOV. 6	03 50	3.0	-1.0	1.2	90
MAY. 11	04 20	3.5	-4.5	2.9		NOV. 7	02 10	11	-2.3	1.4	25
MAY. 11	23 45	8.1	-1.0	4.0		NOV. 12	05 00	4.8	-1.0	8.7	20
MAY. 18	01 10	2.3	-1.7	5.1	0.4	NOV. 19	04 50	6.9	-1.5	9.5	7.5
MAY. 28	02 20	5.8	-0.7	3.1	0.4	OCT. 12	05 10	2.6	-0.7	6.3	4.5
MAY. 28	23 45	9.1	-1.3	6.1	7.0						
MAY. 29	05 30	5.5	-0.6	2.7	1.9						