

# 電波シンチレーションの発生頻度および空間スケールに関する統計的研究

小山孝一郎・金子 透\*・平尾 邦雄  
奥沢 隆\*\*

(1983年12月3日受理)

## Study of equatorial scintillation using equator-orbiting satellite HINOTORI

By

Koh-ichiro OYAMA, Tohru KANEKO\*, Kunio HIRAO  
and Takashi OKUZAWA\*\*

**Abstract** : U.V. and S band radio waves of Japan's 7th scientific satellite 'HINOTORI' were received at midlatitude station (Kagoshima Space Center). Occurrence frequency and the spatial scale of the radio wave scintillation were studied in terms of local time, season, Kp index, solar radio flux ( $F_{10.7}$ ) and sunspot number ( $R_z$ ). The data used were obtained from Feb. 1981 to Apr. 1982. The analysis is mainly summarized as follows.

- (1) V and U band scintillation occurrence showed a clear maximum in June and small humps in August and September, while S band showed the minimum occurrence in June. The spatial scale of the scintillation became maximum in March for U and V band and in April for S band.
- (2) Scintillation occurrence and the scale increased, showed maximum activity and finally decreased as solar flux ( $F_{10.7}$ ), Kp index (Kp) and sunspot number ( $R_z$ ) increased. The scintillation occurrence suddenly increased when  $Kp > 6$  and  $F_{10.7} > 280$ . The scale of the scintillation had more clear Kp,  $F_{10.7}$  and  $R_z$  dependence for S band radio frequency.
- (3) There is a faint tendency that scintillation occurrence decreased as Kp increased before midnight and increased after

---

\*京都セラミック株式会社 \*\*電気通信大学

midnight.

- (4) Scintillation activity became maximum at midnight and took a small second maximum in early morning (6 hours in Local time).

## 概 要

第7号科学衛星「ひのとり」のV, UおよびS波帯の3つのビーコンおよびTM電波のシンチレーションを解析し、電離層プラズマ不規則構造の空間スケールおよび発生頻度を季節、地方時および太陽電波束などの地球物理パラメータ依存性について統計的に研究した。使ったデータは1981年2月から1982年2月の一年間に捉えられたシンチレーション電波である。解析の結果は下のように要約される。

- (1) V, U波帯のシンチレーション電波発生は6月に最大をとり、S波帯は3~4月および9~10月に最大をとる。
- (2) 太陽黒点数  $R_z$ , 太陽電波束  $F_{10.7}$  に対する発生頻度は  $F_{10.7} = 180 \sim 240$ ,  $R_z = 140 \sim 180$  でゆるやかな最大を取り、その後  $F_{10.7} > 280$  では急激な発生頻度および空間スケールの増大がみられる。 $K_p \leq 6$  では明瞭な依存性はみられず、 $K_p > 6$  で急激な発生頻度および空間スケールの増大がみられる。
- (3) 発生頻度は真夜中前は  $K_p$  の増加と共に小さくなり、真夜中後はむしろ  $K_p$  の増加と共に増加する。

### 1. まえがき

内之浦で科学衛星からのテレメータ電波を受信していると図1のように往々にこれらの電波が乱される事に気づく。これらの現象ははげしい時にはGHz帯のSバンドにも及び、時には科学データとして使えない時がある。いわゆる電波シンチレーションと呼ぶ現象である。電波シンチレーションそのものは古くから知られているが注目を集めるようになったのはプラズマバブルと呼ばれる赤道帯電離層に発生する電子密度の薄い領域との関係があきらかにされてからである (Woodman and La Hoz, 1976)。即ち電波シンチレーションは衛星電波が電離層プラズマ中に生じたプラズマバブル中のプラズマ密度不規則領域を通過する時に生じる事が見い出され、衛星では空間的にも時間的にも測定に制限があるプラズマバブル現象を地上から電波によって探ろうとしているわけである (例えば, Tsunoda, 1980)。

本稿は未だ数例しか報告されていないアジアゾーンでの電波シンチレーション発生頻度およびそのスケールと地方時、季節、 $K_p$  インデックス、太陽黒点数および太陽電波強度との関連を調べると同時に、これによってプラズマバブル発生に関する統計的研究と合わせてでき得ればプラズマバブル生成の機構そのものに対する考察をも試みようとした報告の一

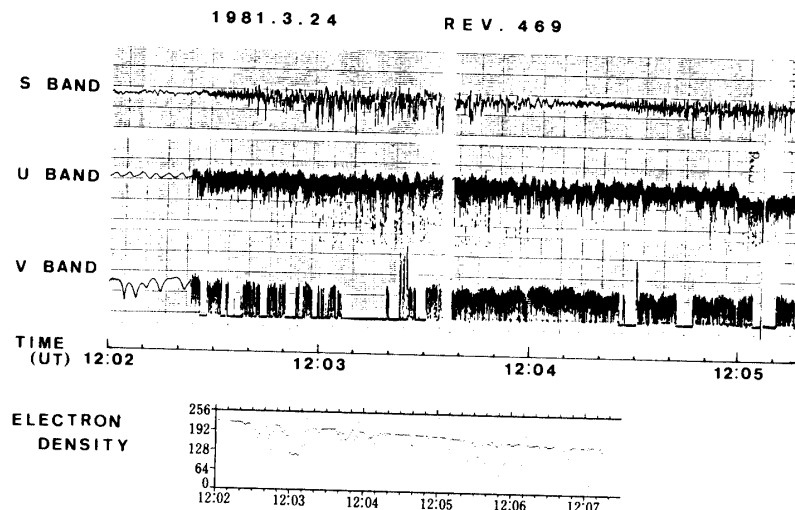


図1 「ひのとり」からの3つの送信電波のシンチレーションと同時に「ひのとり」に搭載されたインピーダンスプローブによって検出されたプラズマ不規則構造。図中 ELECTRON DENSITY (東北大学高橋氏の御好意による)はシース容量値の生データを示したものである。

部である。

普通電波シンチレーションの統計的研究には静止衛星からの電波が利用されるが、ここでは太陽観測衛星「ひのとり」の1981年2月から1982年4月の一年2ヶ月に亘るS, UおよびV波帯のピーコン及びテレメータ電波のAGC信号を解析した。このような地球周回衛星による研究のメリットは発生頻度に加えて不安定領域のスケールの大きさがある程度知る事が出来る点にある。この場合プラズマバブルの研究の為には受信局はできるだけ日本の南にあり、かつ電波を送信する衛星はequator orbitでかつ低高度を飛行する事が望ましく、従って、「ひのとり」のTM電波をプラズマバブルの存在する北限と云われる磁気緯度 $20^{\circ}$ にある内之浦で受信できるのは好都合である。移動衛星によるシンチレーション発生 of 統計的研究は過去に一例報告されている (Livingston, 1980)。

## 2. シンチレーション解析の手順

1981年2月21日、M-3S-2号機によって打ち上げられた「ひのとり」は軌道傾斜角 $30^{\circ}$ 、近地点500 km、遠地点600 kmの赤道周回衛星である。本衛星には136.725 MHzのVHF波帯電波、400.45 MHzのUHF電波および2.2805 GHzのS波帯電波が用いられているので、三つの周波数での電波シンチレーションの振舞いを研究する事が可能である。

解析はまず、三つの電波のAGCレベルのペン書きレコーダーの記録からシンチレーションの見られはじめる時間とおわりの時間をリストアップし、これにシンチレーションの発生した日の太陽黒点数、太陽電波強度およびシンチレーションが発生している時間帯で

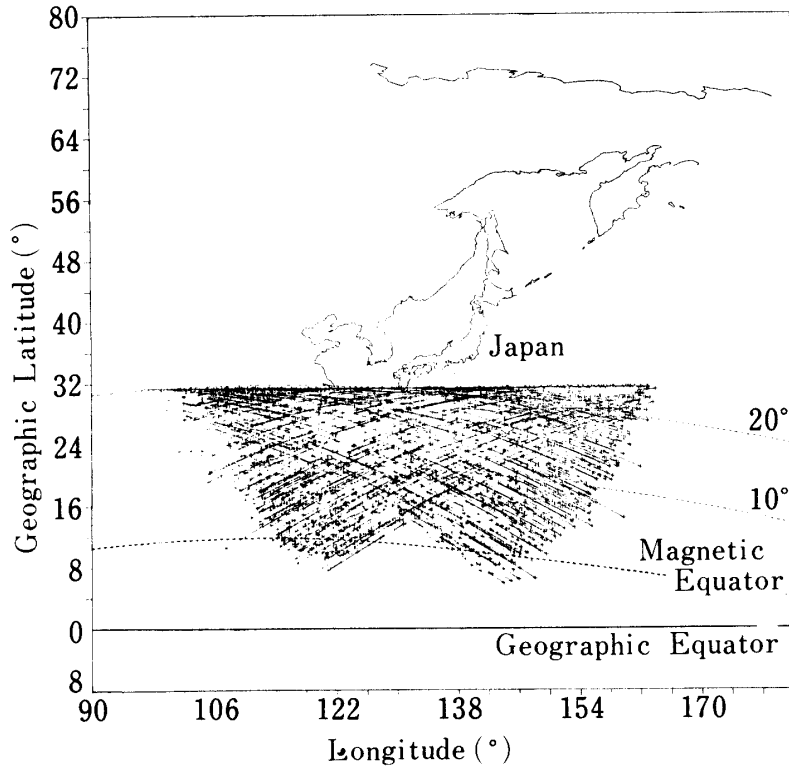


図2 内之浦での衛星電波受信中にシンチレーションが起った時の衛星の位置

の3時間平均の Kp インデックスを同時に計算機入力した。図2は電波シンチレーションを記録した時の衛星の位置をプロットしたものであるが、内之浦で受信する事の可能な範囲のほぼ全域にわたっているといえる。即ちここに描かれた軌道でカバーした領域にプラズマバブルが存在していたと考えられ、それは東経94度から164度、北緯6°から32°、地磁気緯度にして南緯4°から北緯24°までとなっている。衛星は1日に15周地球を周回し、そのうち5回だけ内之浦で受信可能であり、一回の受信可能時間はほとんどの場合約10分であるが、時にこれより短い時間しか受信できない事がある。

シンチレーション発生頻度およびそのスケールを調べるために3つの周波数のそれぞれに対し以下のような定義を行った。本論文で使用されている図の縦軸はすべてこれらの定義によるものである。

$$\text{Percentage Occurrence} = \frac{\text{シンチレーションの持続時間の総和}}{\text{内之浦でデータを取得した時間の総和}} \dots\dots\dots (1)$$

上記の式に基いて得られる数字は発生頻度をあらわすと考えられ、實際上式を用いて得られた発生頻度の地方時、及び季節依存性は過去に報告されたものと矛盾しない。

発生頻度を出すための定義として（シンチレーションの発生回数／内之浦でデータを取得した回数）を取らなかったのは内之浦で衛星電波を受けている時間が各周回ごとに異なる

る事、かつ衛星との一回の交信中に数回のシンチレーションがある事があるからである。

$$\text{Occ. Time/Occ. numbers} = \frac{\text{シンチレーションの持続時間の総和}}{\text{シンチレーションのあらわれた総発生回数}} \dots\dots (2)$$

上記の式によって出される物理的数字は個々のシンチレーションの平均の持続時間であり、衛星が移動している事を考えるとシンチレーションの起っている領域のスケールをあらわすものと考えられる。磁気テープに入力されたシンチレーション電波の情報はこれら2つの式に基いて地方時、季節、Kp インデクス、太陽黒点数、太陽電波束とプラズマ不規則発生頻度とスケールとの関係を調べるために解析された。この他に内之浦で交信した衛星周回の総数をシンチレーションの有無にかかわらず Number of Observation として定義した。この数字は式(1)によって出されたシンチレーションの発生頻度および(2)によって出されたスケールの統計的データの有意さをチェックする為に有効である。即ち時期によっては内之浦で交信可能な観測周回数が夜間でなく昼間に限られる事があり、この場合テープ上にシンチレーションが記録されなかったとはいえ実際には内之浦で交信できない領域で起っていた可能性が残されているわけである。

解析の結果は観測回数は一年を通じ、また Kp インデクス等の物理定数に対しても昼夜にほぼ均等に分布していることを示している。上記の式によって解析した項目は、

- 1) ローカルタイム依存性；ローカルタイム一時間毎の発生率、ローカルタイム一時間ごとの観測回数と持続時間、ローカルタイム依存性の夏冬による相違、およびローカルタイム依存性の磁気活動度による相違。
- 2) 季節依存性；一ヶ月毎の発生率、一ヶ月毎の観測回数と持続時間、季節依存性の夜間、昼間による相違および季節依存性の太陽黒点数による相違
- 3) 磁気活動度依存性；Kp インデクスで分類した発生率、Kp インデクスで分類した観測回数と持続時間および磁気活動度依存性の夜間と昼間との相違。
- 4) Solar flux 依存性；Solar flux で分類した発生率、Solar flux で分類した観測回数と持続時間および Solar flux 依存性の夜間と昼間との相違
- 5) Sunspot Number 依存性；太陽黒点数で分類した観測回数と持続時間、黒点数依存性の夜間と昼間との相違である。

本解析において将来問題となるかもしれない2点は

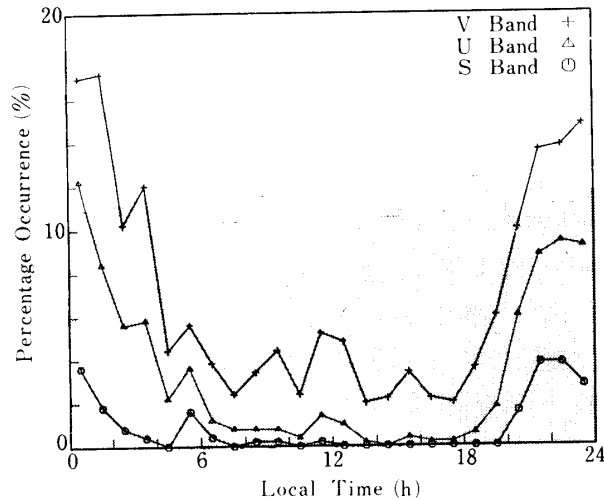
- (1) シンチレーション 1.76 db 以上を一括してシンチレーションの発生ひん度、および回数を議論した事。
- (2) 受信するアンテナのエレベーションに特に制限を設けなかった事で、従って特にエレベーションが低い時には電離層高度以下の大気のゆらぎによるシンチレーションを検出するおそれがあるが、解析結果のうち、たとえば日変化および地方時依存性での Kp の役割りは従来報告されている事と矛盾しない。

従って本解析によって得られた新しい成果は十分に電波シンチレーションに関する Morphology の中に入れ得ると考える。

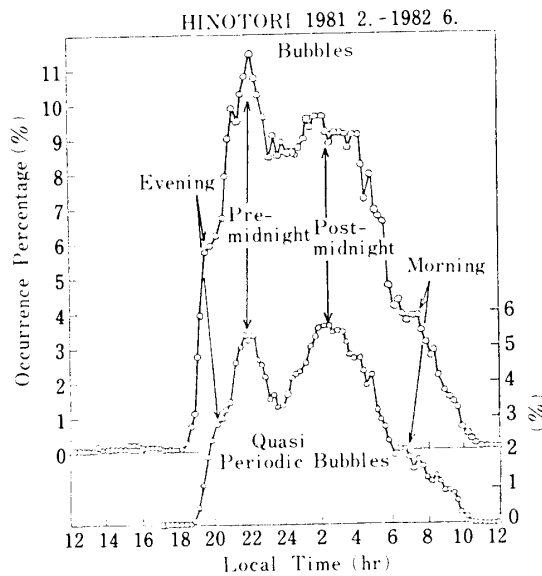
## 3. 解析結果

## 3.1. 発生頻度およびスケールの地方時依存性

図3 aは季節変化およびKpインデックス等の地球物理パラメータを考えないで単に地方時に対する発生頻度をまとめたものである。図1のように衛星で観測されるシンチレーション



(a)



(b)

図3 三つの電波シンチレーションの発生頻度の地方時依存性。図3a影の部分は夜間の観測周回で発生頻度の10%を50周回に読みなおす。図3bは「ひのとり」によって得られたプラズマバブルの発生頻度（東北大学、渡辺重十氏の解析結果）

ヨンの場所は東経  $94^\circ$  から東経  $164^\circ$  に亘り、両端では約4時間強の時差があるがここではすべて受信時における内之浦での地方時でまとめてある。この図は現在まで報告されているのとはほぼ同じで(たとえば Aaron, 1977), 電波シンチレーションは夜間に発生頻度が高く昼間は少ない。SHF帯のシンチレーションはU及びV波帯に激しいシンチレーションが現われる時のみあらわれるので発生頻度はU及びV波帯より少ない。夜間のシンチレーションと昼間のシンチレーションは後述するように  $K_p$  インデックス, 太陽電波束, 太陽黒点数等への依存性が異なる。特に昼12時を中心としてあらわれるシンチレーションはE層電子密度の不規則構造によるものといわれている。シンチレーション発生頻度の一日周期に重畳して特にV波帯に3時, 6時, 9時, 12時, 15時, 18時, および21時に小さなピークがあらわれる。これらシンチレーションの発生頻度の統計が取られたと同じ期間に「ひのとり」衛星によって観測されたプラズマバブルの発生頻度は極めて相似た様相を示している。即ち図3bに示すようにバブルの発生頻度は大まかには地方時18時頃に上昇しはじめ22時, および3時にピークを取り更に朝方6時にわずかにもり上がる。バブル発生頻度において22時, 3時近くにピークを持つ事はS波帯のシンチレーション発生頻度と似ており, 更に図3bにおける3時近くのバブル発生頻度のピークはU, V波帯にのみあらわれる。従ってこれら2枚のパネルをお互いに見較べる事によって22時および6時近くにあらわれるバブルはS波帯にも影響をおよぼす強いものであり午前3時近くのプラズマバブルはU, V波帯のみに影響をおよぼす比較的低い周波数変動を有するものである事がわかる。図4aおよび図4bはそれぞれ夏(6, 7および8月)および冬(12, 1および2月),  $K_p = 0 \sim 2^-$ ,  $K_p = 2^+ \sim 5^-$ ,  $K_p \geq 5^+$  の3段階に分類した発生頻度の地方時依存性を示す。図4aよりわかるようにV波帯のシンチレーションは夏におこりやすく, U波帯からS波帯へと周波数が高くなるにつれ発生頻度は逆転する。図3aにみられた約3時間周期の小さな変動は図4bからわかるように  $K_p \leq 2$  の時にはあらわれておらず, かつ図4aと一緒にして夏冬の依存性は無い事がわかる。特に図3aに見られるようなU, S波帯での22時のピークはV波帯において  $K_p$  依存性がなくはっきりしないが, 図4bからわかるように  $K_p \leq 2$  の時にのみあらわれるものである事がわかる。特に午前6時ごろにS波帯に強くあらわれたピークは図4a, bより  $K_p \geq 5$  でかつ冬に生じる事がわかる。午前6時のシンチレーションのピークは後に示すように一日の間に最も大きなスケールを持っている。

真夜中前23時頃までには  $K_p$  の小さい時が発生頻度が大きくこの後朝方にかけて  $K_p$  の大きくなるにつれ発生頻度が増す。このように  $K_p$  の大きくなるにつれ発生頻度が増す傾向はアーロン等 (Aaron et al., 1980) によって報告されている。

図5には空間スケールの地方時依存性を示した。シンチレーションの発生頻度は夜間に較べると昼間はかなり少ないがことスケールに関しては大きな変化はなく, U, V波帯においては昼のスケールは夜のスケールの約1/2という事になる。この図に顕著な事は前述したようにS波帯における朝方6時のスケールの大きなシンチレーションである。

### 3.2. 季節依存性

図6は  $K_p$  インデックス等すべてを含めた季節に対する夜間シンチレーションの発生頻度

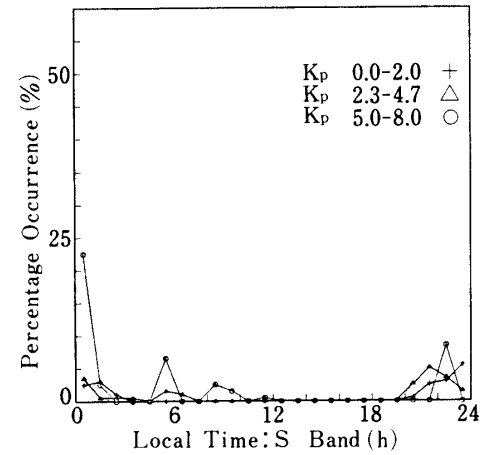
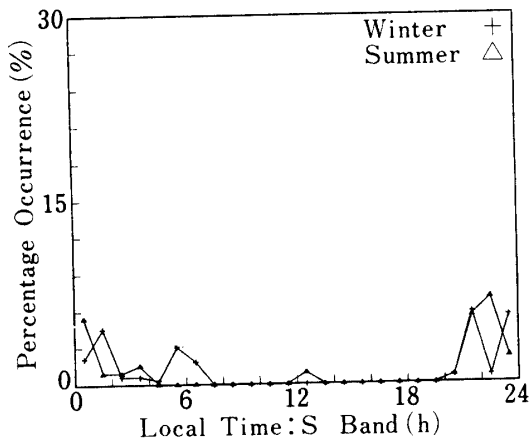
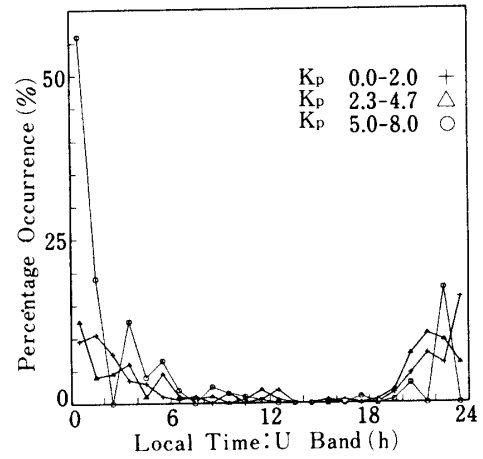
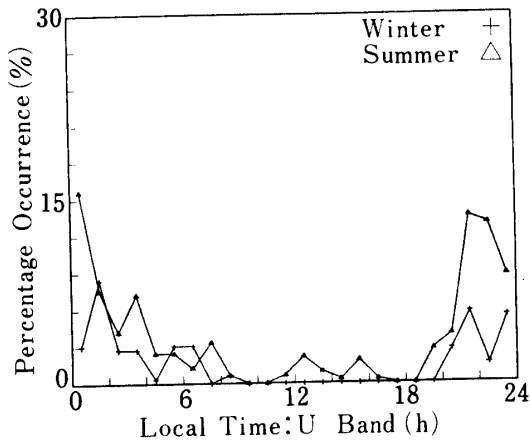
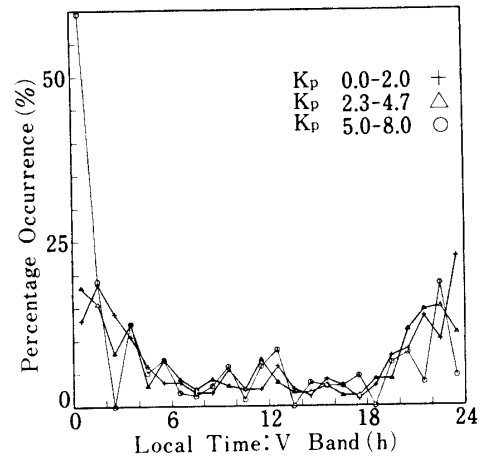
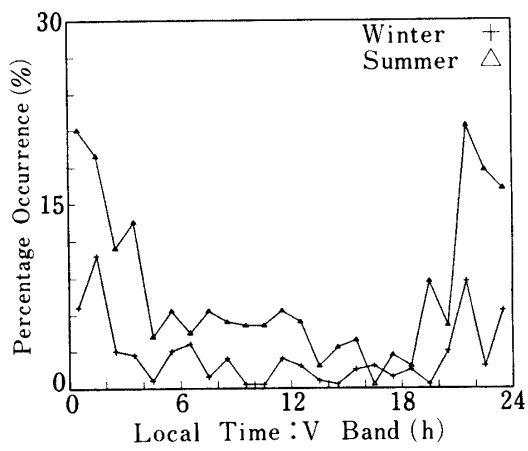


図4 a 3つの電波のシンチレーションの夏冬の発生頻度の違い

図4 b 3つの電波シンチレーションの発生頻度をKpインデックス別に調べた地方時依存性. 図中Kpインデックスの数字2.3および4.7はそれぞれKp=2+, Kp=5-を意味する.



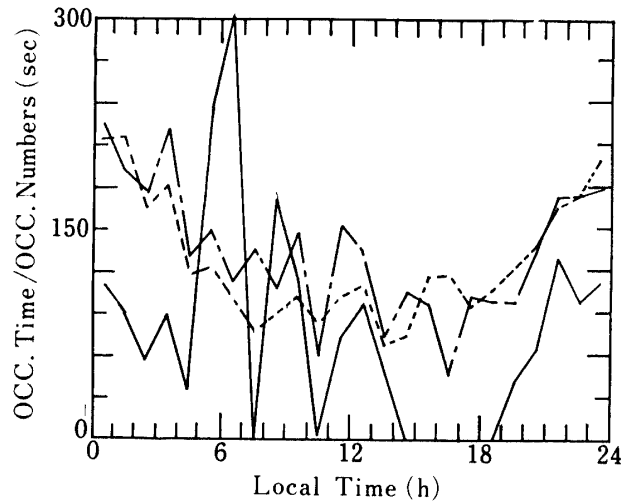
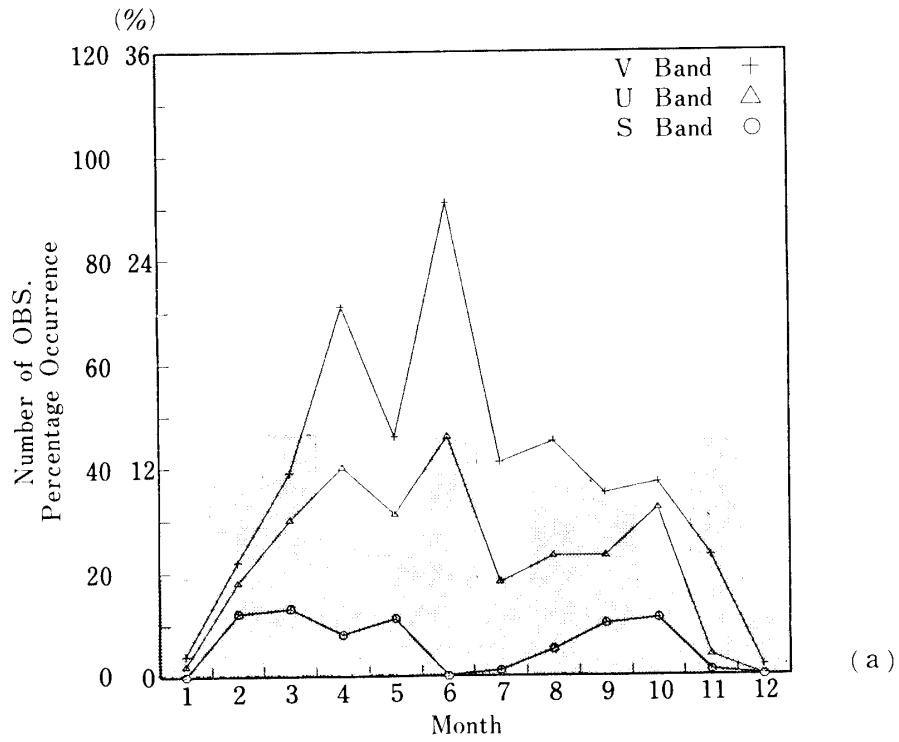


図5 電波シンチレーションの空間スケールの  
 地方時依存性  
 ——はS波帯，- - -はU，および  
 .....はV波帯である。

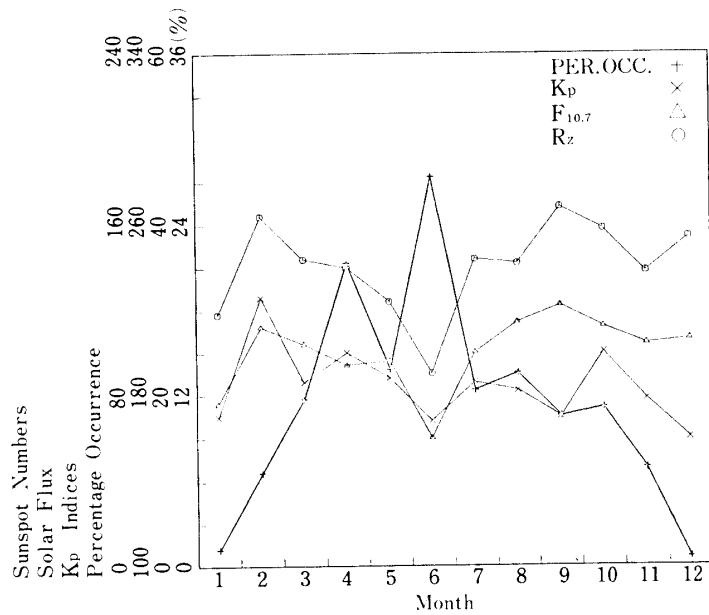
の集計である。U，およびV波帯における6月の発生頻度のピークは過去にアジアゾーンの季節変化として報告されているものと同じであろう (Muldrew, 1980)。その他4月，6月および10月に2ヶ月ごとに小さなピークがみられるがこれは Livingston (Livingston, 1980) が Kwajelin での季節変化として報告しているものと似ている。

U波帯シンチレーションも発生頻度は少ないがV波帯と同じような振舞いをするがV波帯よりは季節変動の振幅が小さい。S波帯になるとV波帯とは逆に3月4月および9月10月に発生頻度の極大を取る。S，UおよびV波帯で同じような月変化の振舞いをする報告されている中緯度でのシンチレーションを考えると一見不自然のように思えるが，ここに示したV波帯からU波帯への移り変わりの様子を見るとS波帯がV波帯と異った振舞いをする事は不思議ではない。このようなS波帯での振舞いは Skinner 等 (Skinner et al., 1971) によって報告されており統計処理の仕方からくる人為的なものではないと思われる。図中に同時にプロットされたその月の Kp Sum，太陽黒点数の平均および太陽電波束を見るとS波帯はあたかもこのような地球物理定数に強く依存しているようであり，後述するようにVおよびU波帯よりはるかにはっきりした太陽黒点数，太陽電波束依存性を有するが Skinner 等の報告を考えるとこのような地球物理定数のみによって制御されているとは断定できない。

図7にはシンチレーションの空間スケールを示した。V波帯は3月にピークを持つが，1月，12月をのぞけばS波帯などのような大きな変動はない。周波数が高くなってS波帯になるとV波帯に3月にあらわれていたピークは，4月に移動し，かつもう一つの明かなピークが10月にあらわれる。即ち小さいスケールのシンチレーションは1月，12月を除いて一年中出現しており，S波帯に影響を及ぼすような強いシンチレーションは2～3月，9～10月におこりその中でもスケールは4月および10月が大きいという事になる。



(a)



(b)

図6 電波シンチレーション発生頻度の季節依存性(夜のみ)(図6a)と太陽電波束F<sub>10.7</sub>, 太陽黒点数RzおよびKpインデックスとの関係(図6b). 図6bには図6aと同じV波の発生頻度を重ねてある. 図6aにおいて影の部分は夜間の観測周回数

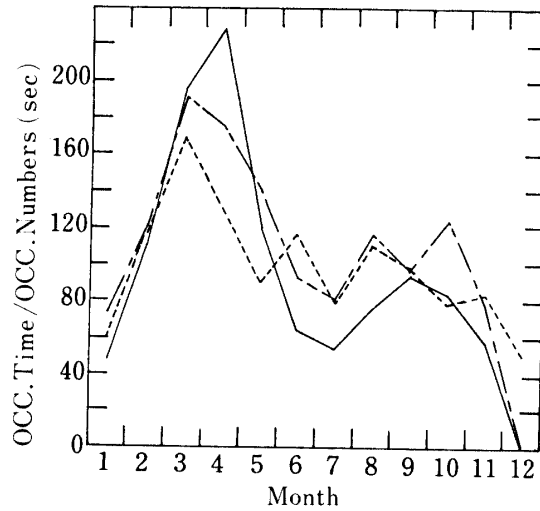


図7 電波シンチレーションの空間スケールの季節依存性。  
3本の線の種類については図5と同じである。

#### 4. 地球物理パラメータ依存性

##### 4.1 太陽黒点依存性

太陽黒点に対する夜間シンチレーションの発生頻度を図8 aに示した。Rz=100 にお

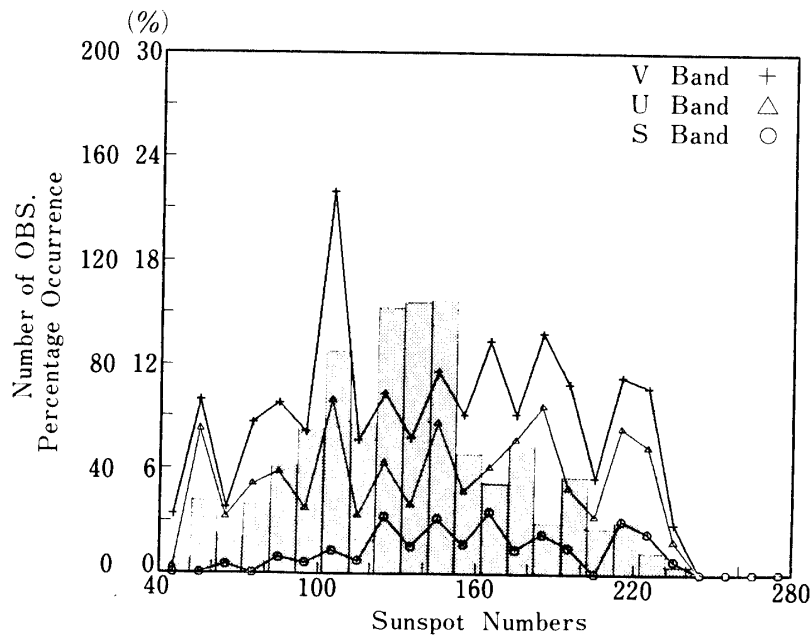


図8 a 電波シンチレーションの太陽黒点数に対する発生頻度。影をつけた部分は夜間の観測周回数である。

る発生頻度のピークは図8 bに見られるように6月において  $Rz=100$  におけるシンチレーション観測の総時間数が多かった事による。V波帯のシンチレーションは上記した  $Rz=100$  におけるピークを除けば、太陽活動度と共に  $Rz=190$  まで上昇し、その後減少しはじめ

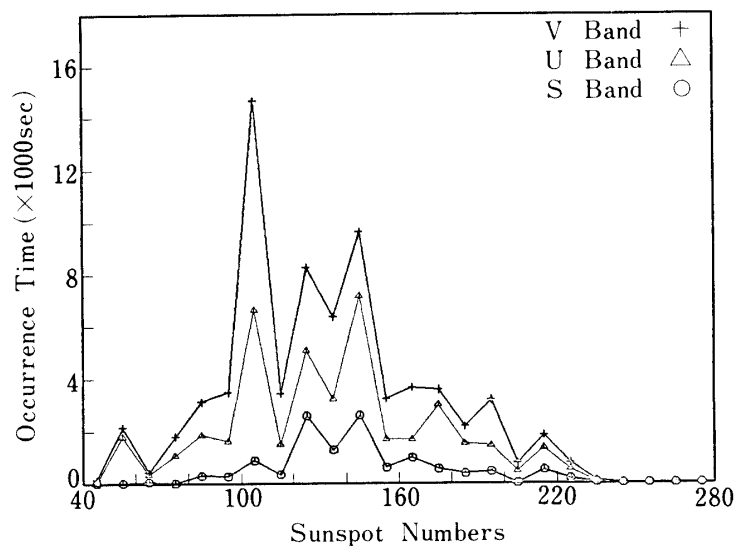


図8 b 太陽黒点ごとの総発生時間。

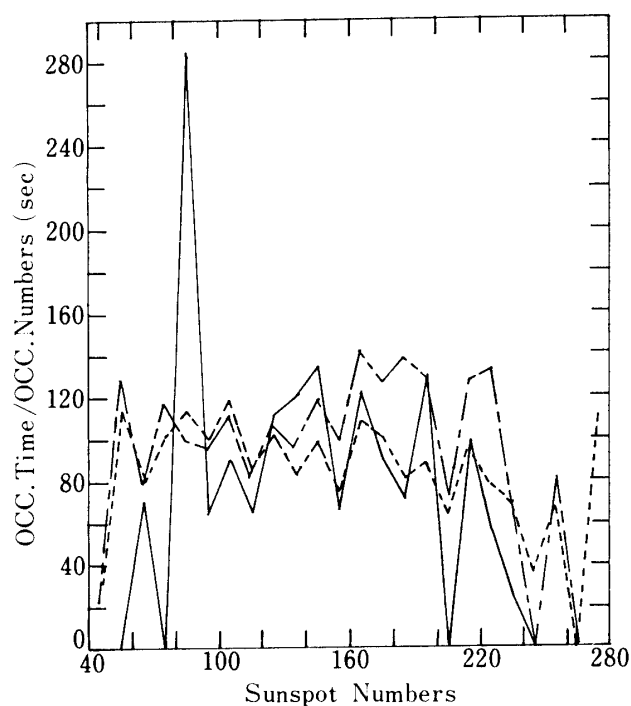


図9 電波シンチレーションのおこっている領域の大きさの太陽黒点数依存性。線の種類については図5と同じである。

める。Rz=220に小さなピークが見られる。これは発生頻度のKpインデックスおよび太陽電波束にもみられ物理的に意味があると思われる。S波帯での太陽黒点数依存性はV波帯よりよりはっきりとしており発生ひん度のピークはRz=140~180にありV波帯より低い太陽黒点数で最大を持っている。図9は太陽黒点数に対するシンチレーションのスケールをあらわす。図8に示すように太陽黒点数50以下および210以上での観測回数は少ないので信頼するには不安があるが、特にV波帯ではRz=50~200では殆んどRz依存性を示さないがUおよびS波帯でRz<100およびRz>220の領域で発生頻度が減少する傾向がある。

#### 4.2. 太陽電波束依存性

図10に発生頻度の太陽電波束依存性を示す。全体的なプロファイルとして太陽電波束の増加と共に上昇し、極めて大ざっぱに $F_{10.7} > 240$ で徐々に減少しはじめる。 $F_{10.7} > 280$ におけるピークは観測回数は少ないが太陽黒点数の依存性と同じような意味をもっと思われる。図11にスケールの太陽電波束依存性を示す。たとえばV波帯に例をとると $F_{10.7}$ の増加と共にスケールは上昇しはじめ、 $F_{10.7} = 180 \sim 240$ で幅広い最大を取った後 $F_{10.7} > 240$ でゆっくりと減少しはじめる。 $F_{10.7}$ に対するV波帯とU波帯の依存性はお互いの周波数が近い事もあって相似ている。S波帯はより弱く $F_{10.7}$ の影響を受ける。

#### 4.3. Kpインデックス依存性

図12aはKpインデックスに対する夜間シンチレーションの発生頻度を示す。Kp<6ではKpの増加と共に発生頻度は一定かいく分減少する傾向がある。この事は以前に発表さ

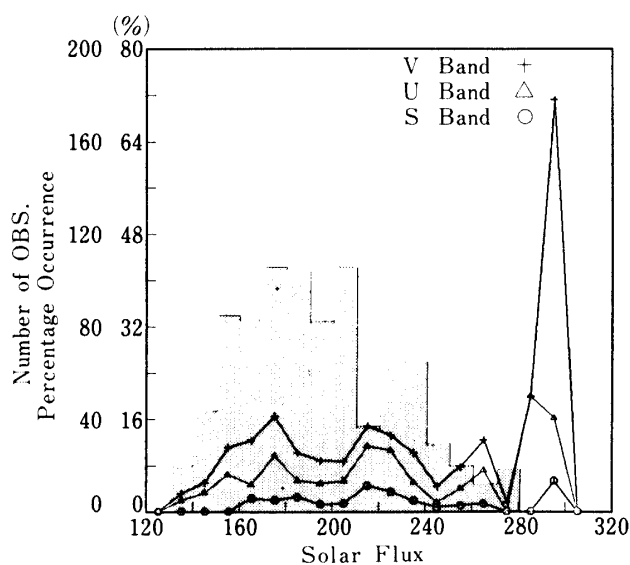


図10a 電波シンチレーション発生ひん度の太陽電波束依存性。影の部分は夜間の観測周回数である。

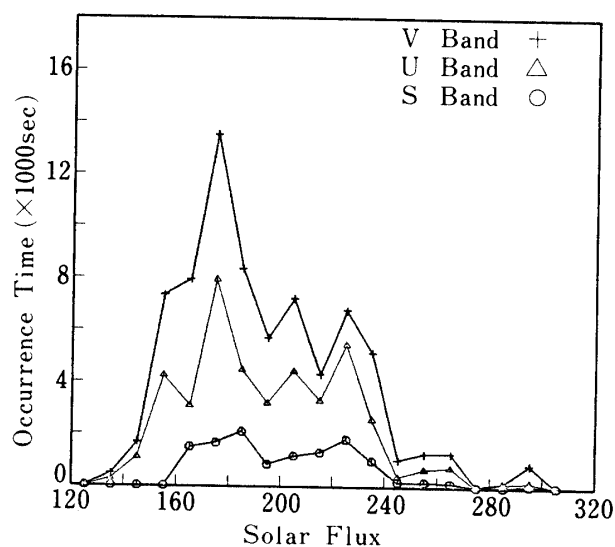


図10b 太陽電波ごとの総発生時間。

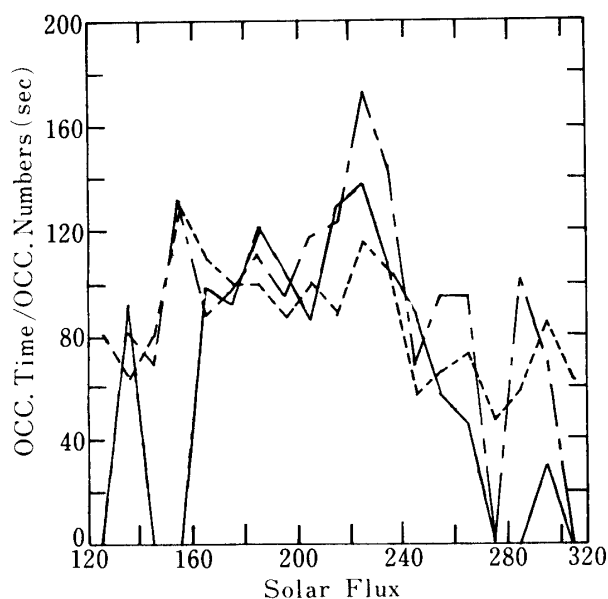


図11 電波シンチレーションを生じているスケールの太陽電波束依存性。  
線の種類については図5と同じである。

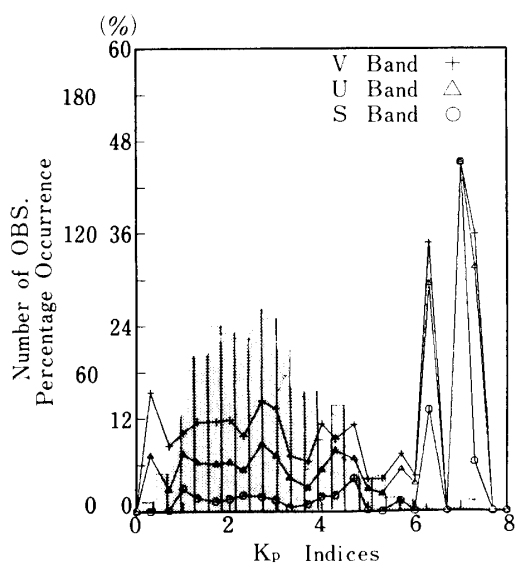


図12 a 電波シンチレーションの Kp インデックスに対する依存性。黒くぬりつぶした棒は夜間の観測総回数である。

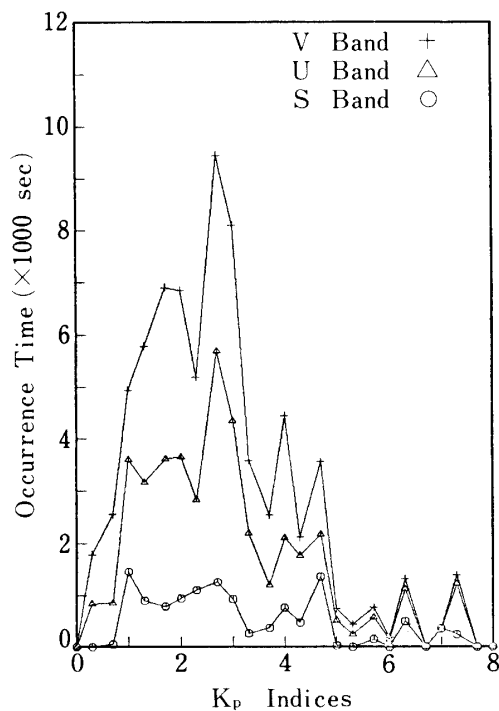


図12 b Kp インデックス毎の総発生時間。

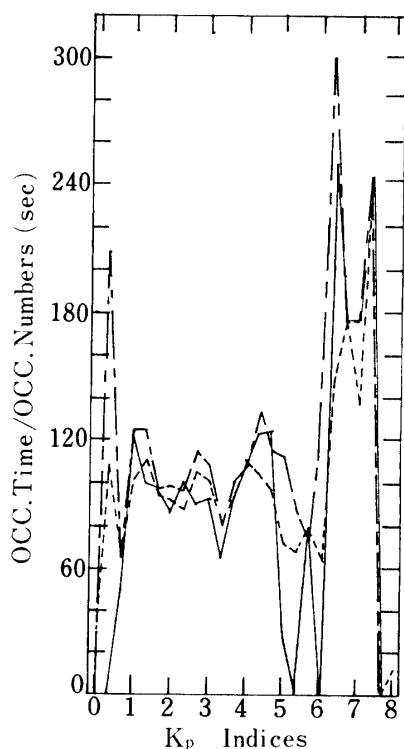


図13 電波シンチレーションのスケールの  
Kp インデックス依存性. 線の種類に  
ついては図5と同じ.

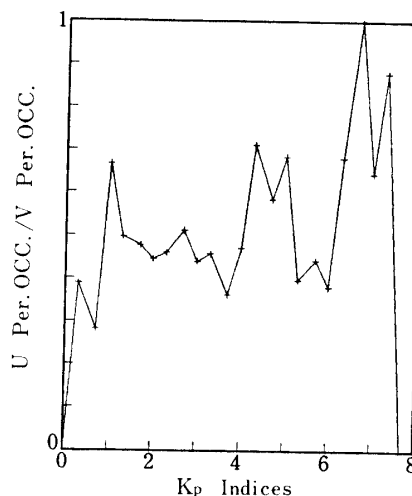


図14 VHF 帯電波シンチレーション発生頻  
度に対する UHF 帯電波シンチレーシ  
ョンの発生頻度の割り合い. Kp が大  
きくなるにつれ割り合いが1に近づ  
く. この事は Kp が大きくなると UHF  
帯にまで影響を及ぼすような強いシン  
チレーションが生じる事を意味する.

れている事実と変わらない.  $Kp < 6$  になるとシンチレーション発生頻度は急激に上昇する事は他の二つの物理定数  $F_{10.7}$  および  $R_z$  に対する依存性と同じであるが特にここで注目しておきたい. Mullen (1973) は  $Kp$  ではなく  $Dst$  がふえた時にシンチレーションが発生しやすくなる事を報告している. 図 12 a に観測の周回数とシンチレーションの発生頻度をプロットした.  $Kp$  の増加と共に発生ひん度が増加し且つ図 13 に示すように一回当りのスケールが急激に増える. 図 14 は U 波帯シンチレーションの発生頻度を V 波帯シンチレーションの発生頻度で割ったもので, シンチレーションが激しくなるにつれ最初 V 波帯にのみ現われるシンチレーションは次第に周波数の高い U 波帯, S 波帯へと拡がってゆく事を考えると, この図の意味する所は  $Kp$  の増加と共にシンチレーションがはげしくなり特に  $Kp > 6$  ではこの傾向が大きい. 以上をまとめると, 特に  $Kp > 6$  においては一度シンチレーションが発生するとそれは大規模ではげしいシンチレーションに発達するという事である.

## 5. 議 論

電波シンチレーションを生じるプラズマ不規則構造が存在するプラズマバブル領域の生成については小さなプラズマ変動が地球磁場の存在のもとで大きなプラズマ不安定に発達してゆくという Rayleigh-Taylor 不安定による機構が提案され (Haerendel, 1973), 更にこの考えを拡張して中性ガス風, Pedersen conductivity 等を考慮した最近の理論 (Zalesak et al, 1982) は過去に報告されたプラズマバブルの振舞いを原理的に説明している. ただ最初のプラズマ不安定がどのようにして作られるかはいくつかの原因が考えられている.

ここに報告した電波シンチレーションに関するいくつかの性質は Rayleigh-Taylor 不安定で説明できるのではないかと思われる。今までの結果をまとめると

1. V および U 波帯は 6 月に発生頻度が最大となるのに対し、S 波帯は逆に最少となる。またシンチレーションのスケールの解析とあわせて考えると、プラズマ密度のゆらぎは 6 月に発生しやすいが、空間的スケールは一年中ほぼ同じである。特に S 波帯にまで影響を及ぼすような強いシンチレーションは 2～4 月、9～10 月に起こり、そのうちでもスケールの最も大きくなるのは 4 月および 10 月である。
2. 日変化については従来数多く発表されているように圧倒的に発生頻度が大きい。しかしながら昼間のシンチレーションのスケールについては夜におこったシンチレーションのスケールの約半分である。Kp インデックスの日変化におよぼす影響は真夜中前は Kp が小さい時に発生頻度が大きく真夜中を過ぎて朝方に至るまで、Kp の増加と共にシンチレーションの発生頻度はふえる傾向にある。
3. 発生ひん度は太陽電波束  $F_{10.7}=180\sim 240$ 、太陽黒点数  $R_z=140\sim 180$  でゆるやかな最大をとり、 $F_{10.7}>270$ 、 $Kp>6$  で大きな発生頻度を示す。

プラズマバブルの生成にはある程度の太陽活動が必要とされるが、太陽黒点があまりに大きくなりすぎるとむしろ不安定性を抑圧する力が働くと考えられる。即ちこの場合夜間でかつ E および F 領域は電氣的に結合が悪いとは云えわずかながら二つの領域は接続されており Rayleigh-Taylor 不安定による電場は短絡されることが考えられる。この考えでゆくと太陽電波束と太陽黒点数は全体的には比例関係にあるのでこれら 2 つの地球物理パラメータに関する発生頻度の依存性は似ているはずで図 8 a と図 10 a はこの推論を裏づけている。しかし  $F_{10.7}$  が 280 を越えるとむしろできたバブルを減衰させる力よりはバブルへと発達させる小さなプラズマ密度の不規則構造を作る大気擾乱の方がまさる事が考えられこの事は  $F_{10.7}>280$  でスケールが小さくなる事と矛盾していない。

シンチレーション発生頻度およびスケールの Kp インデックス依存性も同じような考えで説明できると思われる。即ち磁気嵐時に極域に生じた大気騒乱は全世界的に拡がり赤道帯でプラズマ密度の不規則構造を生ぜしめこれがバブルへと発達する。従ってこの場合、発生頻度、スケール共に大きくなる事が予想され図 12 a および図 13 はこの事を示しているようである。

しかしながらいまだ多くの事が説明されずに残っている。即ちシンチレーション発生頻度についての最大の疑問点は季節変化である。即ち Kwajalen ( $167^{\circ}28'$ ) での 1976 年～1977 年までの結果は 8 月および 9 月に最大となり 1 月および 12 月に最少となった。これは Guam ( $150^{\circ}E$ ) で 1978 年～1979 年に行われた結果と似ている。一方 Ancon ( $-77^{\circ}$ ) ではこれより 6 ヶ月シフトして 12 月を中心とする幅広い最大を取り 6 月および 7 月に最少となった。Koster (1972) はシンチレーション発生頻度の最少になる月が年によってシフトしている事を報告しており、今後 3 年以上に亘って連続的にシンチレーションの発生頻度を研究する事が必要である。更にまた発生頻度の地方時依存性の項で述べた真夜中前後での Kp への応答の仕方は別の報告によると 8、9 および 10 月には真夜中前には見るべき Kp 依存性を示さなかったのに対し、夜中すぎると Kp の増加と共に増え、また別な季節に



は真夜中前後、いずれの場合にも Kp の増加と共に増えた事が記録されている (Mullen, 1973; Mullen and Whitney, 1974). Koster は Accra および Ghana で非常に大きな地磁気擾乱の時にシンチレーションがしばしば抑圧される事を示しており、これは我々の結果と矛盾する。

## 6. ま と め

ここでは通常行われている静止衛星でなく、地球周回衛星「ひのとり」によってシンチレーションの発生頻度およびスケールの地方時、季節、Kp, F<sub>10.7</sub>および Rz 等の地球物理定数への依存性を統計的に調べたが、同時にもう一つの移動衛星「白鳥」のシンチレーションの解析をする事は興味がある。即ち「ひのとり」電波受信の前後に「白鳥」の受信がある事がありこれによってシンチレーションの持続時間、シンチレーションの起っている位置等についてより詳しい情報が得られる可能性がある。静止衛星による電波シンチレーション受信の場合と同様、地球周回衛星の電波シンチレーションの研究で重要な事はバブルの発生、生長、消滅に伴ってシンチレーション電波周波数スペクトルの変動について統計的な研究を続ける事でこれによってバブルの進化の様子を捉えられる可能性がある。

更にまた内之浦で受信している間に衛星に搭載されたプラズマプローブがバブルを捉える時があるので、より高い空間分解能のプラズマプローブで得られたデータと地上での AGC レベル変動周波数解析を行う事によってプラズマバブルの内部構造とシンチレーションの関係を知る事ができる。プラズマ不規則構造中を電波が通過する時の電波の乱れについては理論計算があるが実際に充分確かめられているわけではない。

ここにのべた手法を AGC レベルを計算機へ入力するための A/D 変換器、および内之浦にある計算機への interface を作る事によって長期間に亘って多くのデータを処理する事ができる。内之浦でのプラズマバブル研究に関してのシンチレーション電波の受信もさる事ながら、今後 MS-T5 および Planet-A TM 電波の太陽風によるシンチレーションも考えられるので、通信工学的見地からも興味ある問題であり設備をととのえる事を提案したい。

## 謝 辞

本研究の初期に内之浦実験場で日本電気(株)石津末広氏にデータの読み取りを手伝っていただいた。ここに記して謝意を表する。

## References

- [1] Aarons, J.; Equatorial Scintillation: A Review, IEEE Transactions on Antennas and Propagation Vol. Ap. 25. 729-736, 1977.
- [2] Aarons, J., J.R. Koster, R.F. da Silva, J.R. Medeiros, R.T. Medeiros, A. Bushby, J. Pantoja, J. Lanat, and M.R. Paulson, Seasonal and geomagnetic control of equatorial scintillations in two longitudinal sectors, J. Atmos. Terr. Phys., 42, 861-866, 1980.

- [ 3 ] Bowman, G.G. ; Spread-F occurrence in mid-and low-latitude regions related to various levels of geomagnetic activity, *J. Atmosph. Terr. Phys.*, **44**, 585-589, 1982.
- [ 4 ] DasGupta, A., Santimay Basu, J. Aarons, J.A. Klobuchar, Sunada Basu and A. Bushby ; VHF amplitude scintillations and associated electron content depletions as observed at Arequipa, Peru, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **45**, 15-26, 1983.
- [ 5 ] Haerendel, G., Theory of equatorial Spread F, Internal Report of Max Planck Institut für Physik und Astrophysik, 1973.
- [ 6 ] Koster, J. R. ; Equatorial Scintillation, *Planet. Space Sci.*, **20**, 1999-2014, 1972.
- [ 7 ] Livingston, R.C. ; Comparison of multifrequency equatorial scintillation, American and Pacific Sectors, *Radio Science*, **15**, 801-814, 1980.
- [ 8 ] Muldrew, D.B. ; Characteristics of ionospheric bubbles determined from aspect sensitive scatter spread F observed with Alouette I. *J. Geophys. Res.*, **85**, 2115-2123, 1980.
- [ 9 ] McClure, J.P., and W.B. Hanson ; A catalog of ionospheric F region irregularity behavior based on Ogo 6 retarding potential analyser data, *J. Geophys. Res.*, **78**, 7431-7440, 1973.
- [10] Mullen, J.P., and H.E. Whitney ; Equatorial measurements using the LES-6 and ATS-6 satellite beacons, Report of the Joint Satellite Studies Group, published by Centre National D'etudes des Telecommunications., Lannion, France, J. Papet Lepine, Ed., 1974.
- [11] Mullen, J.P. ; Sensitivity of equatorial scintillation to magnetic activity, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **35**, pp. 1187-1194, 1973.
- [12] Skinner, N.J., R.F. Kelleher, J.B. Hacking and C.W. Benson ; Scintillation fading of signals in the SHF band, *Nature. Physical Science*, **232**, 19-21, 1971.
- [13] Tsunoda, R.T. ; Magnetic-field-aligned characteristic of plasma bubbles in the nighttime equatorial ionosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **42**, 743-752, 1980.
- [14] Tsunoda, R.T. ; Time evolution and dynamics of Equatorial Back Scatter Plumes, *J. Geophys. Res.*, **86**, 139-149, 1981.
- [15] Woodman, R.F., and C. LaHoz ; Radar observations of F region equatorial irregularities, *J. Geophys. Res.*, **81**, 5447-5466, 1976.
- [16] Wernik, A.W., C.H. Liu, and K.C. Yeh ; Model computations of radio wave scintillation caused by equatorial ionospheric bubbles, *Radio Sci.*, **15**, 559-572, 1980.
- [17] Yeh, K.C., H. Soicher, and C.H. Liu ; Observations of equatorial ionospheric bubbles by the radio propagation method, *J. Geophys. Res.*, **84**, 6589-6594, 1979.
- [18] Zalesak, S.T., S.L. Ossakow, and P.K. Chaturvedi, Nonlinear equatorial spread F ; The effect of neutral winds and background Pedersen conductivity, *J. Geophys. Res.*, **87**, 151-166, 1982.