

昭和基地におけるVLFエミッション観測 (1970-1971)

I. オーロラ・ヒスとオーロラ

巻田和男・福西浩*

Observation of VLF Emissions at Syowa Station in 1970-1971

I. Relationship between the Occurrence of Auroral Hiss Emissions and the Location of Auroral Arcs

Kazuo MAKITA and Hiroshi FUKUNISHI*

Abstract: VLF emissions were observed at Syowa Station by the 11th wintering party of the Japanese Antarctic Research Expedition in 1970-1971. The present paper deals particularly with the records of auroral hiss emissions, which are believed to be emitted by precipitating electrons in the aurora. It is shown that the power spectrum of the hiss emissions is confined in the low-frequency range between 4-32 kHz if the auroral arcs lie near the poleward horizon of Syowa Station, while it is extended to frequencies as high as 128 kHz if the active auroral arcs appear near the zenith. This can be explained by differences in the height of the emission region and in the propagation path of the hiss in the ionosphere: the high-frequency (~64 kHz) hiss is emitted at low altitudes of 1000-1500 km, its propagation path being limited to a narrow region near the location of the auroral arcs, while the low-frequency (~8 kHz) hiss is emitted at higher altitudes of 3000-3500 km, its propagation path spreading widely due to the refraction effect in the ionosphere.

1. はじめに

昭和基地において、冬季夜間に観測される広帯域 (数 kHz~数 100 kHz) の VLF・LF 帯の自然電波 (ここでは VLF エミッションと略称) はオーロラ・ヒスと呼ばれ、バンド又はアーク状のオーロラに伴って観測されることが知られている (ELLIS, 1957; DOWDEN, 1959; KOKUBUN *et al.*, 1972). ここでは第11次南極観測により得られた1970年の VLF エミッション, オーロラ, 地磁気のデータをもとに, オーロラ・ヒスとオーロラ及び地磁気変動

* 東京大学理学部地球物理学教室. Geophysical Institute, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo.

との関連性を中心に解析した結果を報告する。

2. オーロラ・ヒスの観測システムとその観測例

VLF エミッションの観測システムは図1に示されるように、4 kHz までの周波数帯の VLF エミッション（主としてコーラス現象）を受信するための系統と128 kHz までの周波

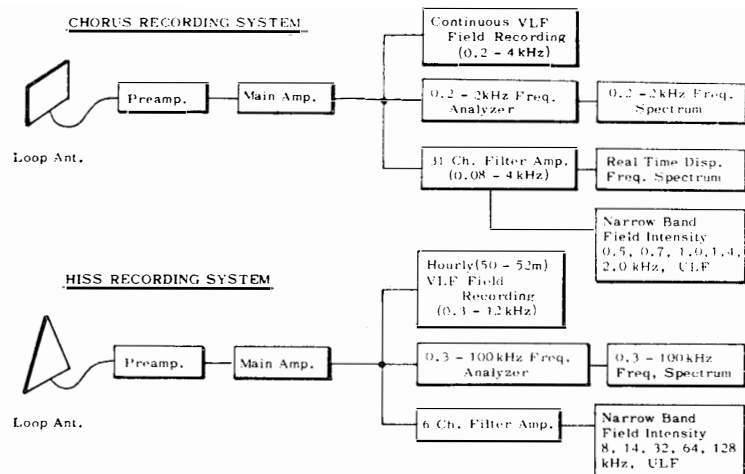


図1 VLF エミッション観測システムのブロック・ダイアグラム

Fig. 1. Block diagram of the instruments for observation of VLF emissions.

数帯の VLF エミッション（主としてオーロラ・ヒス）を受信するための系統よりなる（HAYASHI, 1971参照）。コーラス受信系統は、0.2~4 kHz の周波数帯のエミッションを連続録音するための長時間録音テープレコーダー、0.2~2 kHz の周波数スペクトルを2分に1回観測するためのヘテロダイン方式の周波数解析器、及び0.08~4 kHz 帯の実時間スペクトル解析器と、その周波数領域で任意に選んだ5つの周波数帯の強度を連続記録するコーラス電界強度記録器よりなる。ヒス受信系統は、0.3~12 kHz の周波数帯の信号を定時（毎時49分45秒より52分10秒まで）に録音するためのテープレコーダー、0.3~100 kHz のスペクトルを観測するためのヘテロダイン方式の周波数解析器、及び8, 14, 32, 64, 128 kHz の各周波数帯の強度を連続記録するためのヒス電界強度記録器よりなる。ヒス及びコーラス電界強度記録器には、地磁気脈動との相関をみるため、それぞれ地磁気脈動のX成分及びY成分を同時に記録させた。ヒス電界強度記録器によって観測されたオーロラ・ヒスの典型的な例を図2(a, b)に示す。

3. オーロラ・ヒス出現の季節変化及び日変化

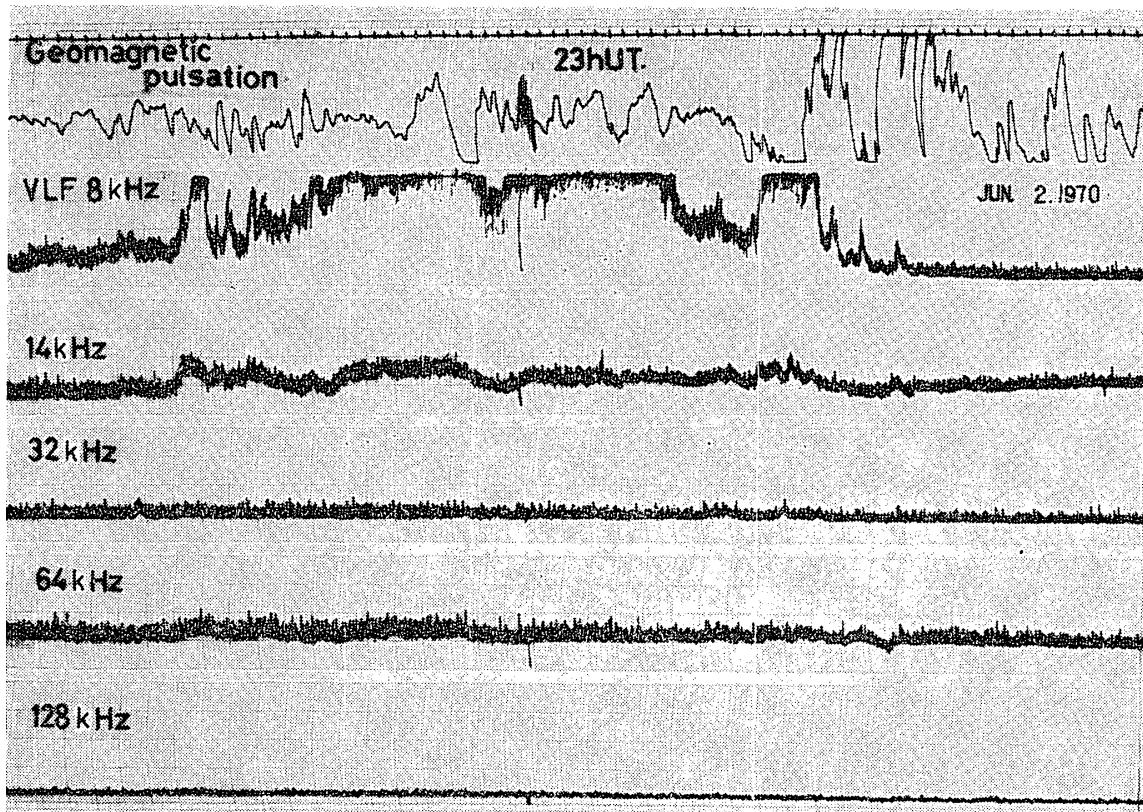


図 2 (a) ヒス電界強度記録器による低い周波数帯強度の卓越したオーロラ・ヒスの観測例

Fig. 2(a). Example of the auroral hiss emission observed by a 6 channel hiss field intensity recorder, with the simultaneous record of the geomagnetic micropulsation. It is noticed that the power of the hiss emission is confined in the low frequency range.

オーロラ・ヒス出現の季節変化を調べてみると、観測される期間は、主に3月から10月の冬季に限られており、8 kHz、64 kHzの2つの周波数帯において同じ傾向を示している(図3)。これに対し、科学衛星による電離層の上でのヒス観測では顕著な季節変化はない(GURNETT, 1966)。そこで、地上でのヒス出現の季節変化は、電離層の吸収効果によると思われる。すなわち、太陽高度が高い夏期には、電離層の電子密度が高くなることにより、強い電波の吸収が起こると考えられる。

日変化については、図4に示されるように、オーロラ・ヒスは主に18:00~01:00 GLT (Geomagnetic Local Time) の時間帯に出現し、昼間側ではほとんど観測されない。これはオーロラ・ヒスを起こしているオーロラ粒子(電子)の降下する領域(オーロラ・オーバル)が、昼間側では、昭和基地よりもずっと高緯度に位置するため、発生したオーロラ・ヒスが昭和基地に到達するまでに減衰してしまい、受信されにくくなる結果と思

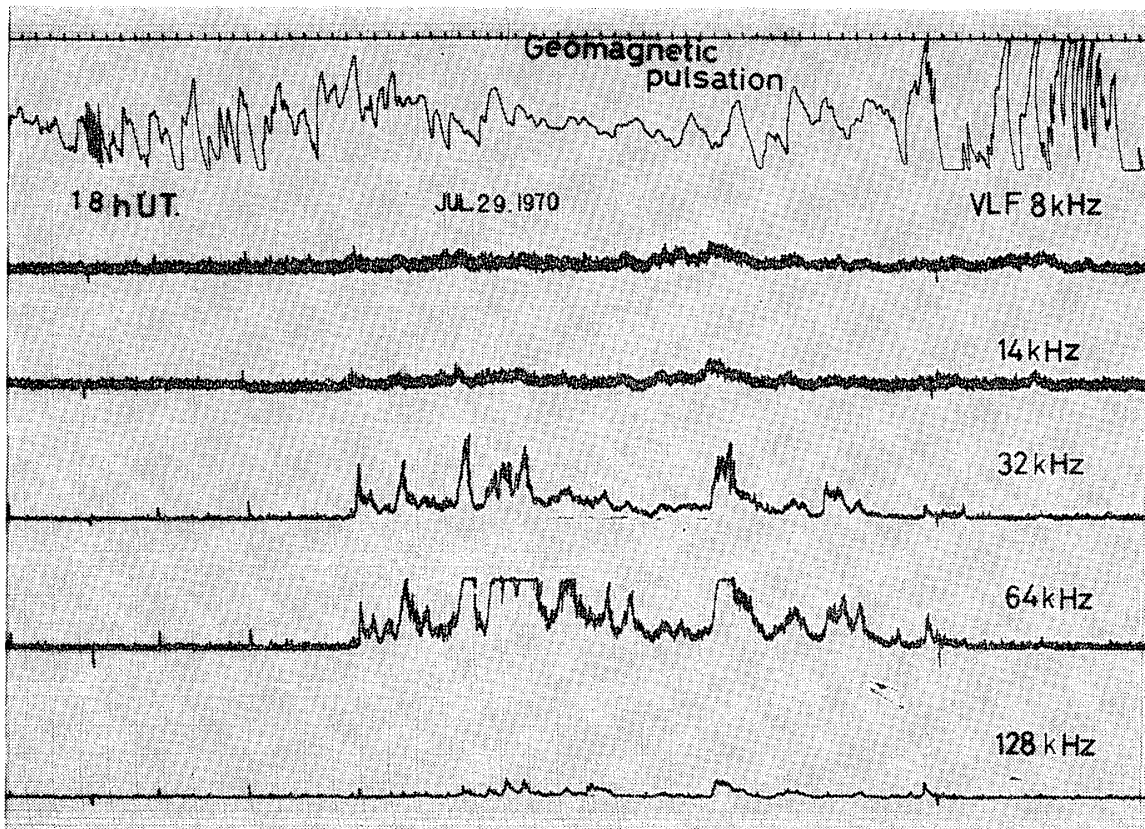


図 2 (b) ヒス電界強度記録器による高い周波数帯強度の卓越したオーロラ・ヒスの観測例
 Fig. 2(b). Example of the auroral hiss observed by a 6 channel hiss field intensity recorder, with the simultaneous record of the geomagnetic micropulsation. In comparison with the hiss emission in Fig. 2(a), a large enhancement of the power in the high frequency range is noticeable.

われる。事実、昭和基地よりも高緯度側にある観測点では、オーロラ・ヒスが昼間側でも観測されることが UNGSTRUP (1967) により示された。注目すべき点は、オーロラ・ヒスの出現が 2200 GLT 付近に集中しており、真夜中過ぎには、ほとんど受信されなくなってしまうことである。この VLF ヒス発生頻度の非対称の原因として、ヒスを起こしているオーロラ粒子（電子）の性質が、真夜中を境にして午前側と午後側で異なっていることが考えられる。午後側のオーロラは、アーク又はバンド状をしており、ブレイクアップと呼ばれるオーロラ強度の突然の上昇と、極方向への急速な移動を行なうのに対し、午前側のオーロラは強度も弱く、パッチ又はレイ状をしており、ブレイクアップを起こさない。このことから、地上で観測されるオーロラ・ヒスは、真夜中前に観測されるバンド又はアーク状のオーロラを励起している電子によって、同時に起こされていると思われる。

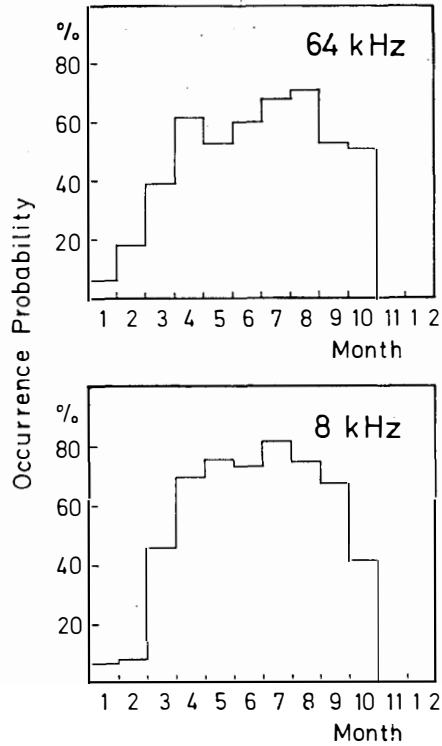


図 3 8 kHz および 64 kHz 帯でみたオーロラ・ヒス発生確率の季節変化

Fig. 3. Seasonal variation of occurrence probabilities of auroral hiss emissions at 8 and 64 kHz bands.

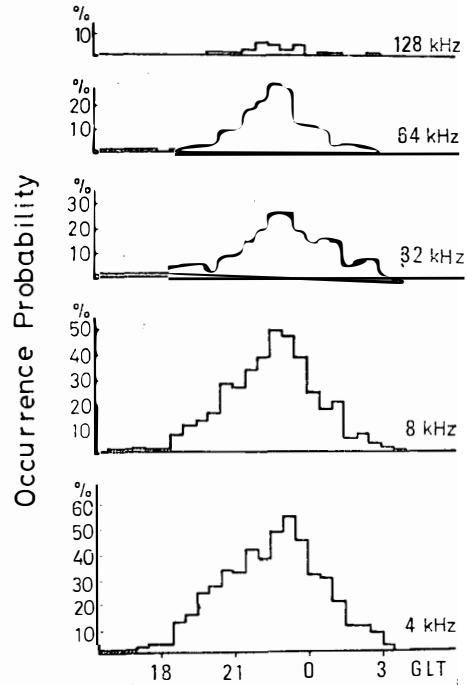


図 4 4, 8, 32, 64, 128 kHz の各周波数帯でみたオーロラ・ヒス発生確率の日変化

Fig. 4. Diurnal variation of occurrence probabilities of auroral hiss emissions at 4, 8, 32, 64 and 128 kHz bands.

4. オーロラ・ヒスの2つのタイプとオーロラの空間位置との関連

昭和基地で観測されるオーロラ・ヒスはその周波数スペクトルの違いから、2つのタイプに分類することができる。一つは昭和基地での地磁気変動が比較的静かで、オーロラのブレイクアップ現象がみられないときに観測されるヒスで、8 kHz 付近に最大強度を持ち 64 kHz 以上の周波数帯ではほとんど受信されない (図 2(a))。もう一方のタイプは、昭和基地でオーロラのブレイクアップが観測される前後に集中して受信され、最大強度はより高い周波数帯に移り、かつ 128 kHz の高い周波数帯まで受信される (図 2(b))。4, 8, 14, 32, 64, 128 kHz の各周波数帯で観測されたヒスの強度から、そのスペクトルをつくり、それらを統計的に重ね合わせることによって、2つのタイプの周波数スペクトルを求めた (図 5)。

さて、これらスペクトラムの違いが何に起因するのかを知るために、それぞれのタイプのヒスが観測されるとき、オーロラには、どのような差があるのかを調べてみた。図 6 は高い周

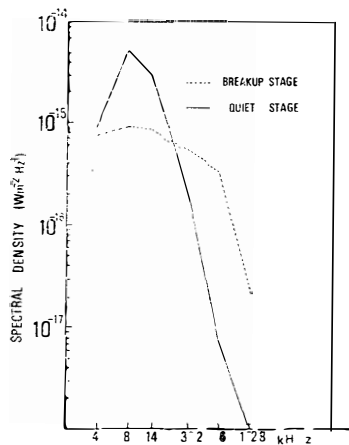


図5 オーロラ・ヒスのパワー・スペクトルの2つのタイプ

Fig. 5. Two types of the power spectra of hiss emissions.

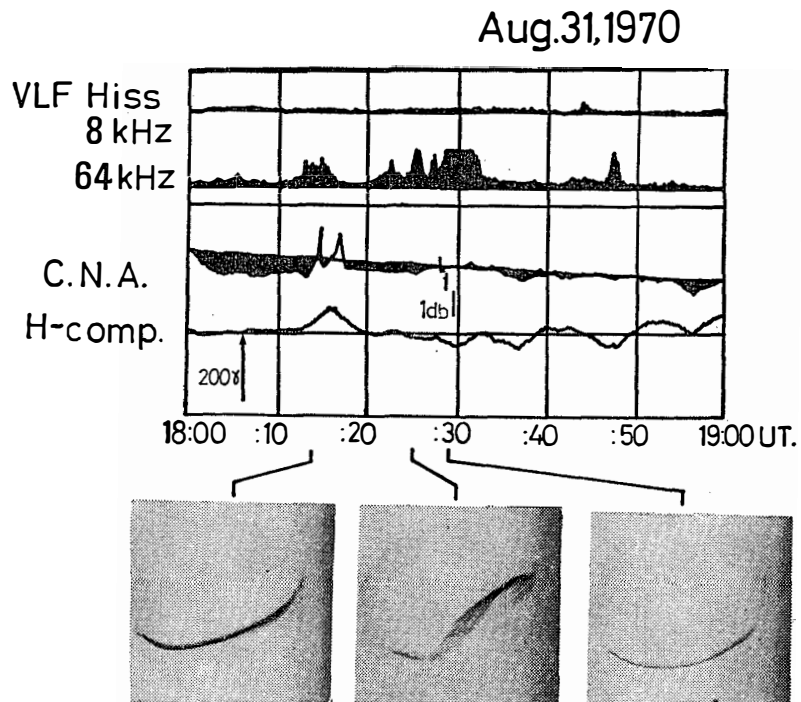


図6 高い周波数帯の強度が卓越するオーロラ・ヒスの観測例。30 MHzでのCNA, 地磁気H成分, 全天写真記録が同時に示される。全天写真は, 上が南(極側), 左が東である。

Fig. 6. Example of the high-frequency hiss emission. Simultaneous records of cosmic noise absorption at 30 MHz, geomagnetic H variation and all-sky camera photographs are also shown. The top of all-sky camera photographs is the geomagnetic south (poleward) and the left is the geomagnetic east.

波数の強度が卓越するヒスの例で, 64 kHz 帯で VLF ヒスが観測されているときは, 天頂付近に強いアーク又はバンド状のオーロラが東西にかかっているのが見られる。これに対して, 図7は低い周波数の強度が卓越するヒスの例で, 8 kHz 帯で強いヒスが観測されるときは, 天頂付近にはオーロラは見られず, 昭和基地の極側の地平線近くに弱いアーク状のオーロラが見られるだけである。図8は, 極側の地平線近くに出現していたアークが赤道側に移動を続け, 昭和基地の天頂に達し再び極側に後退して行く例である。このオーロラの動きに対応して, 始めヒスは低い周波数(8 kHz)の強度が卓越していたが, オーロラ・アークが天頂に近づくとつれ, 高い周波数(64 kHz)の強度が卓越し始める。そしてアークが極側に後退するにつれ, 再び低い周波数の強度が卓越してくる。すなわち, これらの例から, 高い周波数のヒスは, 天頂付近に出現するバンド又はアーク状のオーロラに, 一方低い周波数のヒスは, 地平線近くに位置するアーク状のオーロラに対応していることが分かる。

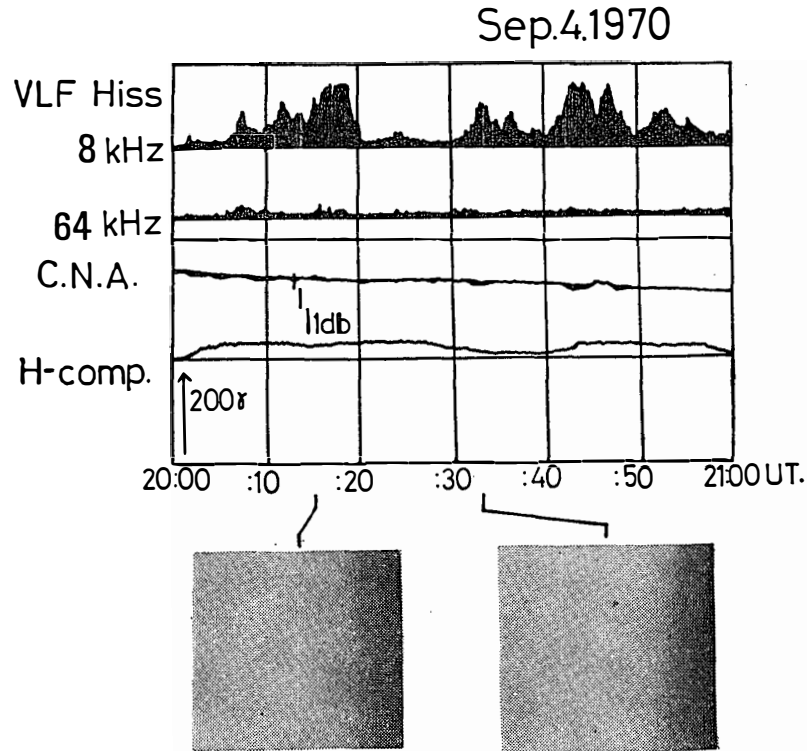


図 7 低い周波数帯の強度が卓越するオーロラ・ヒスの観測例. 30 MHz での CNA, 地磁気 H 成分, 全天写真記録が同時に示される.

Fig. 7. Example of the low-frequency hiss emission. Simultaneous records of cosmic noise absorption at 30 MHz, geomagnetic H variation and all-sky camera photographs are also shown.

この事実をさらに確かめるために、オーロラとオーロラ・ヒスの対応がよく見られる現象を30例選び出し、観測点に対するオーロラの位置の関係を調べた。まず天頂を中心に地磁気の南側、北側にそれぞれ、天頂角 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 、 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ と空間を4つに分割し、どの領域にオーロラが位置するかを調べた(図9)。この分布図から、高い周波数帯の強度が卓越するヒスの70%は天頂角が南側 45° から北側 45° の領域、すなわち、天頂を中心に南北100 km幅の領域に位置するアーク、又はバンド状のオーロラに対応することがわかる。一方、低い周波数帯の強度が卓越するヒスの50%は天頂角が 45° 以上の南側の領域、すなわち、昭和基地より100 km以上離れた極側に位置するアーク状のオーロラに対応することがわかる。

高い周波数までのびるヒスが、天頂付近に出現するオーロラに対応しているとすれば、このタイプのヒスが観測される時間帯はオーロラ粒子の降下する領域(オーロラ・オーバル)の位置に強く依存すると思われる。一方オーロラ・オーバルの位置は地磁気の活動度を表わすKp指数とよい相関をもち、Kpの増大とともに、低緯度側へ移動する。そして昭和基地は、同じ緯度を保ちながら、地球の自転とともにこのオーバルの下を移動して行くと考えら

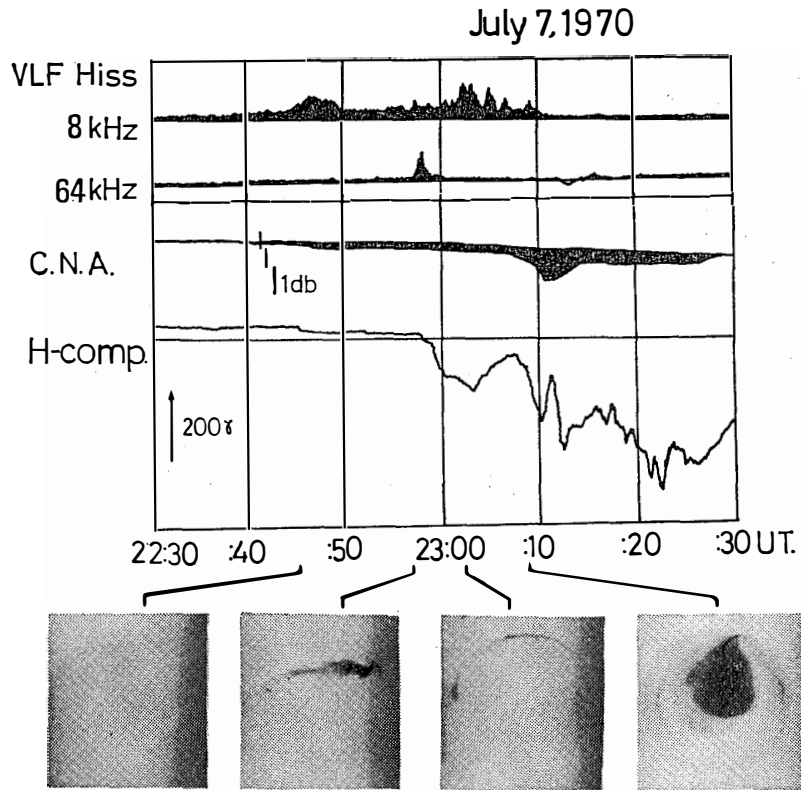


図 8 オーロラ・アークの移動に伴うヒス周波数スペクトルの変化。アークが低緯度側へ移動するにつれ、高い周波数帯の強度が卓越してくるのがみられる。

Fig. 8. Variation of the frequency of the hiss emission, related to the equatorward movement of the auroral arc. It is noticeable that the power in the high frequency range increases as the auroral arc approaches the zenith of Syowa Station from the poleside horizon.

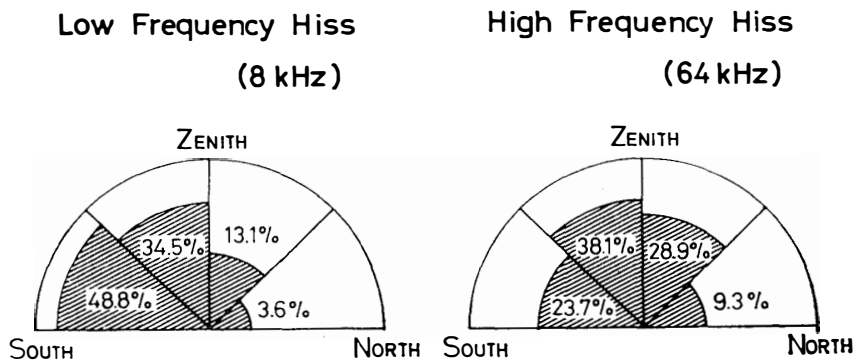


図 9 オーロラ・ヒスの2つのタイプとオーロラ・アークの空間位置の関係。天頂を中心に、南側、北側に天頂角 $0^\circ \sim 45^\circ$ 、 $45^\circ \sim 90^\circ$ と空間が4つに分割され、ヒスが観測されたときのオーロラの位置が、それらのどの領域に属するかが、パーセントで表わされている。

Fig. 9. Relationship between the two types of hiss emissions and the location of auroral arcs.

れるから、昭和基地がオーバルをよぎる時間帯は、 K_p の増加とともに夕方側にずれて行く。従って、 K_p の増大とともに、高い周波数までのびているヒスの出現時間帯も、夕方側へずれて行くことが期待される。図10, 11はヒスの発生頻度の K_p 依存性を調べたもので、この傾向が、はっきりと示されている。すなわち、8 kHz の低い周波数帯では、ヒスが観測される時間帯は K_p にあまり依存しないのに対し、64 kHz の高い周波数帯では、 K_p が増大するにつれ、発生頻度のピークの位置が夕方側の早い時間帯に移って行くのが見られる。

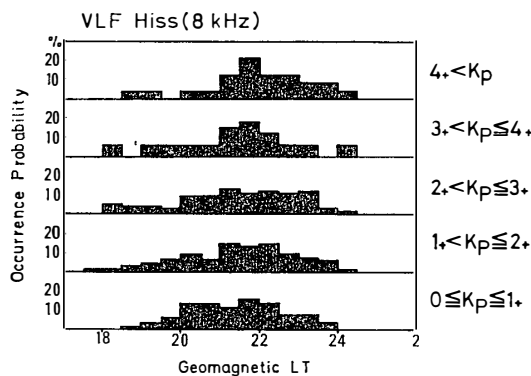


図10 8 kHz 帯でのヒス発生時間帯の K_p 依存性

Fig. 10. K_p dependence of the diurnal variation of hiss occurrences at 8 kHz band.

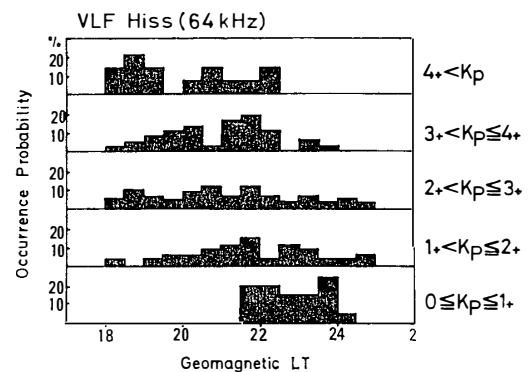


図11 64 kHz 帯でのヒス発生時間帯の K_p 依存性

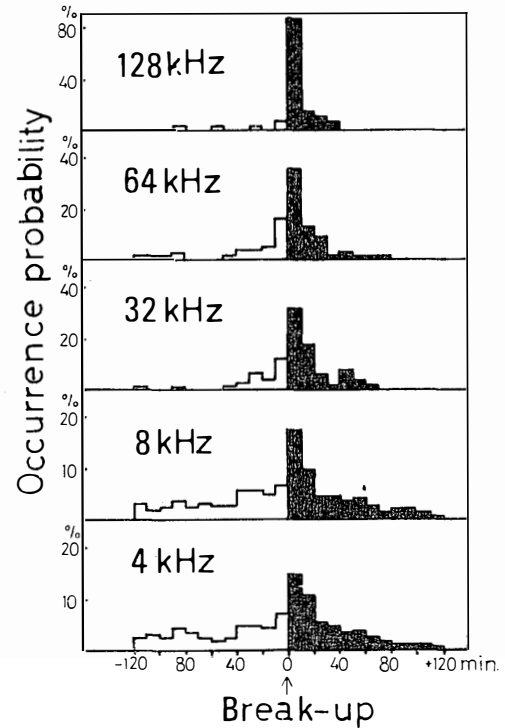
Fig. 11. K_p dependence of the diurnal variation of hiss occurrences at 64 kHz band.

5. 磁気圏サブストームの発達とオーロラ・ヒスの出現

オーロラ・ヒスがサブストームのいかなるステージに出現するかをみるために、昭和基地で観測されたオーロラ・ブレイクアップ現象の始まりの時刻を $T=0$ とし、その前後120分間のヒスの発生頻度の統計を周波数別に行なった(図12)。それによると、高い周波数帯まで伸びているヒスは、ブレイクアップの前後30分間に大部分集中して観測されるのに対し、低い周波数帯(4 kHz~8 kHz)のヒスは、ブレイクアップの前後2時間位の広い時間帯にわたり受信される。すなわち、高い周波数のヒスが昭和基地でのオーロラ・ブレイクアップ現象に直接関係しているのに対し、低い周波数のヒスは、昭和基地でブレイクアップが観測されない時でも受信される。しかし、この事実から、低い周波数帯の強度が卓越するヒスは、オーロラ・ブレイクアップ現象に無関係であるとは言えない。なぜなら、ブレイクアップは、極地域の全領域で同時に起こるのではなく、AKASOFU (1964) によって示されたように、真夜中付近でまずオーロラ・アークのブレイクアップが起こり、それがサージとなって極方向、及び西向きに急速に拡大していくので、昭和基地から離れた所で起こったオーロラ

図12 オーロラ・ブレイクアップ開始前後におけるヒス発生確率の周波数依存性

Fig. 12. Frequency dependence of the occurrence probabilities of hiss emissions as a function of substorm time. $T=0$ is the onset time of the auroral breakup events.



のブレイクアップに伴って発生したヒスが昭和基地まで伝搬してくる可能性が考えられる。

この可能性を確かめるために、昭和基地周辺に位置する Godhavn, Kiruna, Mirny, Dixon, Tixie Bay の5つの観測点でとられた地磁気の記録をもとにサブストームの発達とオーロラ・ヒス発生の関係を調べてみた(これらの観測点の位置は断熱不変緯度に関して南北半球の対称性を仮定して図13に示される)。図14は昭和基地で低い周波数のヒスが受信されたときの例で、8 kHz 帯でヒスが観測されている間、昭和基地では、地磁気 H 成分の正

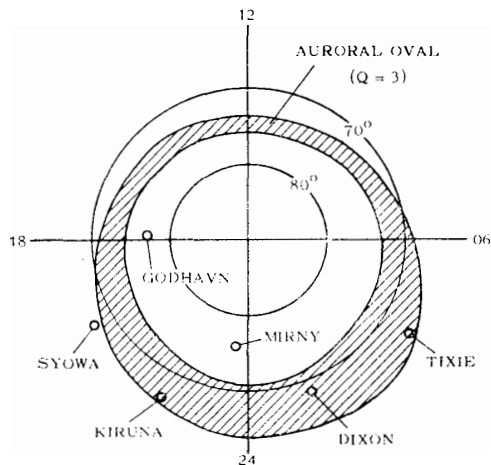


図13 解析に用いられた地磁気観測点の位置. 斜線の部分は、FELDSTEIN が出した $Q=3$ におけるオーロラ・オーバルの領域を表わす。

Fig. 13. Approximate location of the auroral oval at $Q=3$ determined by FELDSTEIN and the location of the geomagnetic observatories whose records are used in Figs. 14-16.

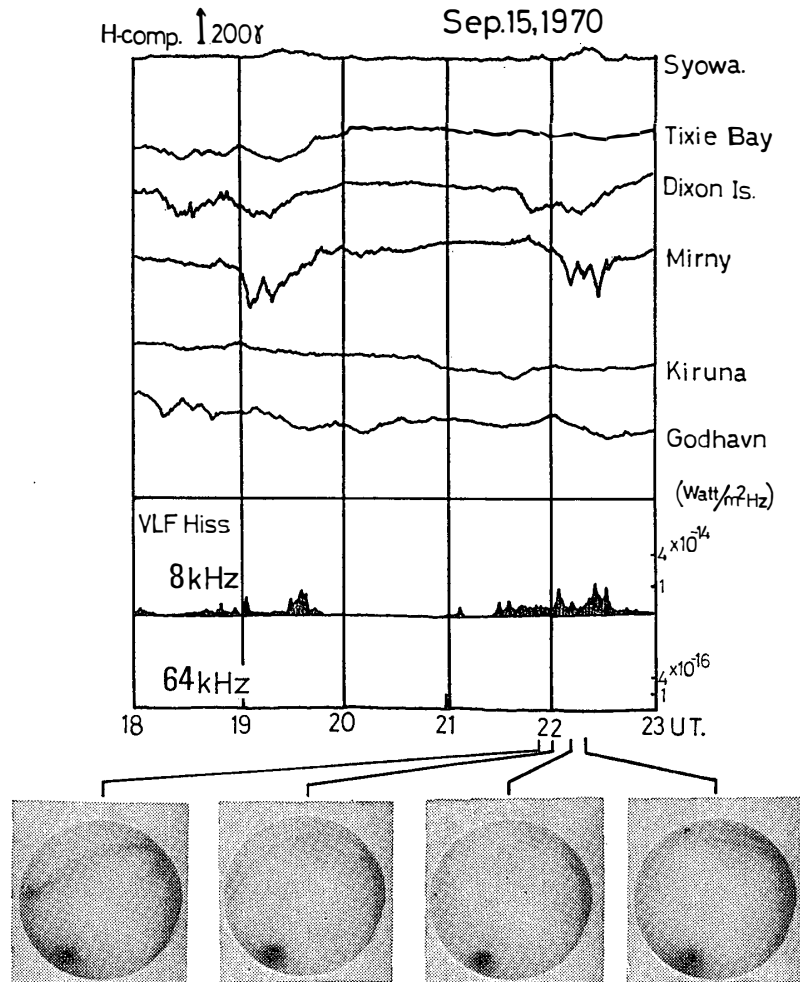


図14 サブストームの発達と、低い周波数強度の卓越したオーロラ・ヒス出現の関係。上段は、図13で示される極地域のいろいろな観測点で得られた地磁気H成分の記録。中段は、昭和基地で観測された8 kHz および64 kHz 帯のオーロラ・ヒスの強度。下段は、同じく昭和基地でのオーロラの全天写真記録である。但し全天写真の左下にみえる黒い部分は、月である。

Fig. 14. Occurrences of the low-frequency hiss emissions during the course of the polar substorms. Top: the records of the geomagnetic H variations observed at several stations in the polar region. Middle and bottom: the field intensities of hiss emissions at 8 and 64 kHz bands and the all-sky camera photographs as observed at Syowa Station.

の変化が観測され、アーク状のオーロラが極側の地平線近くに見られるのに対し、昭和基地より真夜中に近い Dixon や、より高緯度に位置する Mirny ではこのとき大きなネガティブ・ベイが起こっている。このことは昭和基地より高緯度の領域をジェット電流が流れていることを物語っている。すなわち、昭和基地で低い周波数のヒスが受信されるときは、昭和基地より真夜中に近い領域や高緯度では、オーロラのブレイクアップが連続して起こってい

と思われる．図15は昭和基地で鋭いネガティブ・ベイとオーロラのブレイクアップが起こり，それに伴って高い周波数のヒスが受信された例である．

これらの事実から，オーロラ・ヒスは，一般にオーロラのブレイクアップに伴って発生し，ヒスの受信点が，ヒスを発生させるオーロラ粒子の降下する領域に近いとき，すなわちブレイクアップが天頂付近で観測されるときは，高い周波数帯の強度が卓越したヒスが観測され，受信点がオーロラ粒子の降下領域から遠く離れているときは，低い周波数帯の強度が卓越するヒスが観測されると考えられる．但し，図16で示されるように汎世界的にみて，地磁気変動が非常に静かなときでも，昭和基地の天頂付近でオーロラが輝き出せば，高い周波数までのびたヒスが観測されることがある．このことから，地磁気の変化には，電離圏への粒子の降下と同時に，電場の存在が必要とされるが，オーロラ・ヒスの発生には粒子の降下だけで充分であることが分かる．

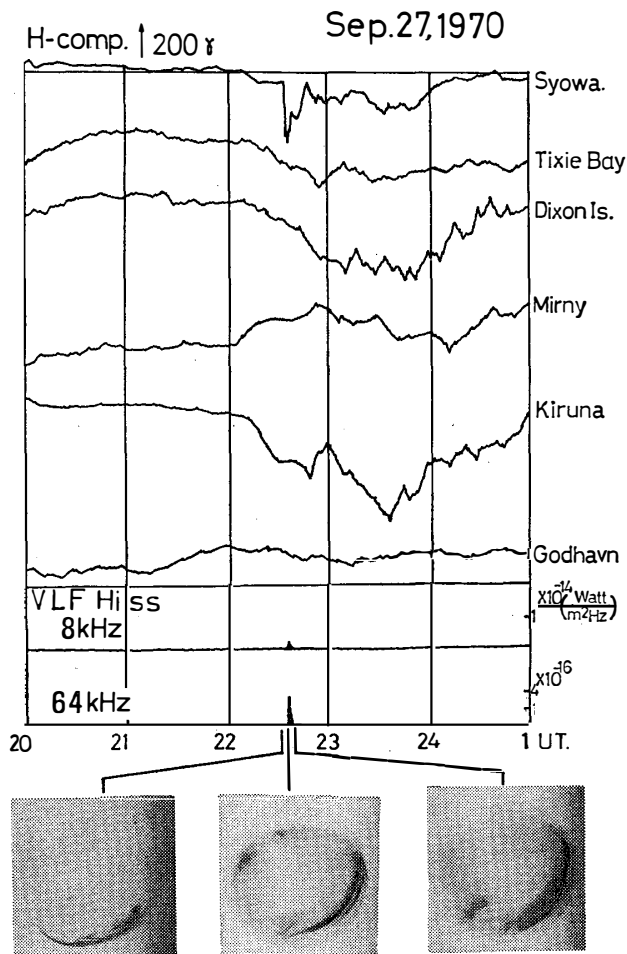


図15 サブストームの発達と，高い周波数強度の卓越したオーロラ・ヒス出現の関係．図の表示は，図14と同様である．
Fig. 15. Occurrences of the high-frequency hiss emissions during the course of the polar substorms. The notation is the same as that in Fig. 14.

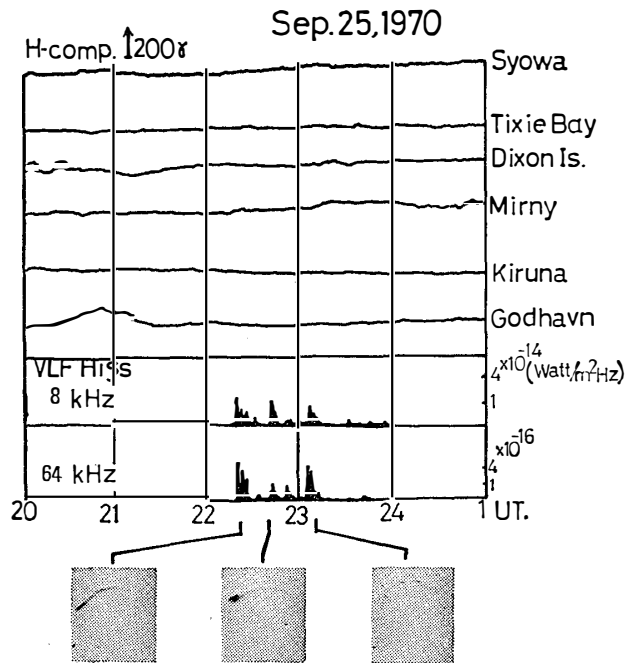


図16 地磁気活動が非常に静かなときに発生したオーロラ・ヒスの例. 図の表示は, 図14と同様である.

Fig. 16. Occurrences of the hiss emissions on a very quiet day. The notation is the same as that in Fig. 14.

6. オーロラ・ヒスの発生・伝播モデル

4, 5 節でオーロラ・ヒスには高い周波数までのびたスペクトルをもつヒスと, 低い周波数帯の強度が卓越するヒスの2つのタイプがあることが指摘され, その違いが, ヒス発生場所とヒス受信点との相対的位置関係に起因していることが示された. この解析結果をもとにオーロラ・ヒスの発生及びその伝播について考えて行こう.

科学衛星での観測によって, オーロラ・ヒスは数 100 eV~数 keV のオーロラ粒子 (エレクトロン) によって, 地上数 100 km~数 1000 km の高度で発生していることが明らかになってきたが (MOSIER, 1971; GURNETT and FRANK, 1972), その発生機構の説明は, まだ充分ではない. 例えば, JØRGENSEN (1968) の単一粒子によるインコヒーレントなチェレンコフ放射のモデル計算では, 放射のパワーが観測値よりも, 2ケタほど小さくなってしまふ. この点を改良するには粒子の運動に何らかの coherence を考える必要がある. すなわち波動と粒子の相互作用を考える必要がある. MAKITA (1972) はオーロラ粒子の流入に伴う, チェレンコフ不安定によってヒスが発生していると考え, 波の成長率の計算を行なった. その結果, 数 kHz の低い周波数帯の波は数 1000 km の高度で励起されやすいのに対し, 数 10 kHz の高い周波数帯の波は 1000 km 付近の低い高度で発生しやすいことが示された. また, 磁気圏で発生したホイッスラー波の電離圏透過に関しては, 入射方向が電離層に

垂直に近いホイッスラー波だけ電離層に入射でき、電離層内では周波数が低いほど波の屈折率が大きくなる (PITTEWAY *et al.*, 1971). このことから、図17で示されているように、高い周波数のヒスは、オーロラ粒子の降下する領域の近辺でしか観測されないのに対し、低い周波数のヒスは、オーロラ粒子の降下領域からずっと離れた場所でも観測されることが期待される。すなわち、このモデルによって、4、5節で示されたオーロラ・ヒスとオーロラの関係がうまく説明される (ここで示されたオーロラ・ヒスの発生・伝播モデルに関するさらに詳しい議論は MAKITA, 1972を参照されたし)。

7. あとがき

受信されたオーロラ・ヒスの周波数スペクトルの形は、ヒスの発生場所とその受信場所との相対的位置関係により大きく変化することが示された。特に昭和基地で低い周波数帯の強度が卓越するヒスが受信されるときは、昭和基地よりも高緯度の電離層では強いオーロラ粒子の降下が起こっており、その下の地上の観測点では、高い周波数までのびたヒスが観測される可能性が指摘された。この予想が正しいかどうかは、昭和基地と、より高緯度の地点で同時にヒスとオーロラを観測することにより確かめることができる。

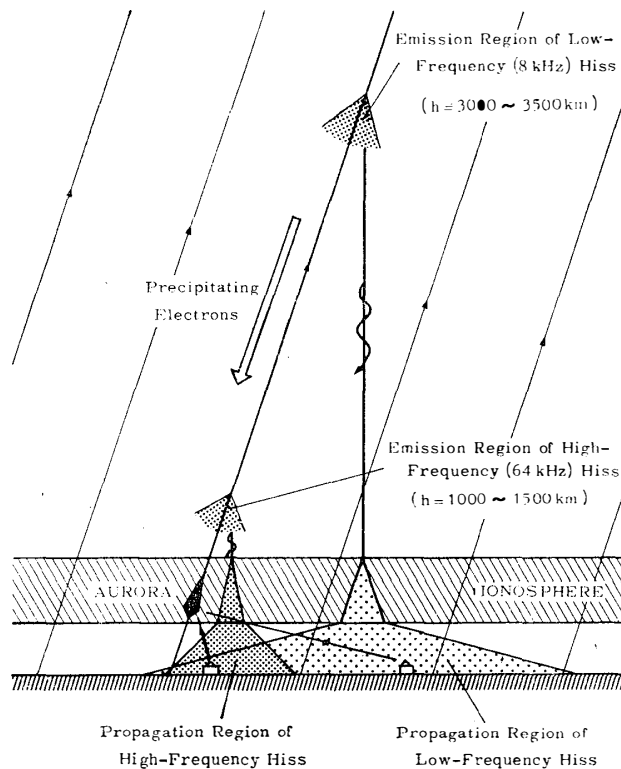


図17 オーロラ・ヒスの発生・伝播モデルの模式図

Fig. 17. Schematic diagram of a model for the generation and the propagation of the auroral hiss emissions.

11次隊によって、昭和基地の東南約 300 km の地点に初めて設置された、みずほ観測拠点 (70°42.6' S, 44°17.3' E) はこうした観測を行なうのに非常に適しており、将来昭和基地とみずほ観測拠点とでオーロラ及び VLF エミッションの同時観測が行なわれることが切望される。

終りに、観測実施にあたり、ご指導とご協力をいただきました第11次隊の皆様には厚く謝意を表します。

文 献

- AKASOFU, S.-I. (1964) : The development of the auroral substorm. *Planet. Space Sci.*, **12**, 273-282.
- DOWDEN, R. L. (1959) : Low frequency (100 kc/s) radio noise from the aurora. *Nature*, **187**, 805.
- ELLIS, G. R. (1957) : Low frequency radio emission from aurora. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **10**, 302-306.
- GURNETT, D. A. (1966) : A satellite study of VLF hiss. *J. Geophys. Res.*, **71**, 5599-5615.
- GURNETT, D. A. and L. A. FRANK (1972) : VLF hiss and related plasma observation in the polar magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, **77**, 172-190.
- 林 幹治 (1971) : 第10次南極地域観測隊極光・地磁気部門概報—主に VLF エミッションを中心として—。南極資料, **40**, 34-49.
- JØRGENSEN, T. S. (1968) : Interpretation of auroral hiss measured on Ogo 2 and at Byrd Station in terms of incoherent Cerenkov radiation. *J. Geophys. Res.*, **73**, 1055-1069.
- KOKUBUN, S., K. MAKITA and T. HIRASAWA (1972) : VLF-LF hiss during polar substorm. *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **26**, 138-148.
- MAKITA, K. (1972) : VLF hiss accompanying aurora at Syowa Station, Antarctica. Thesis, Geophys. Inst., Univ. of Tokyo.
- MOSIER, S. R. (1971) : Poynting flux studies of hiss with the Injun 5 satellite. *J. Geophys. Res.*, **76**, 1713-1728.
- PITTEWAY, M. and J. JESPERSON (1971) : A numerical study of the excitation, internal reflection and limiting polarization of whistler waves in the lower ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **28**, 17-43.
- UNGSTRUP, E. (1967) : Very low frequency emission associated with aurora and particle precipitation. *Aurora and Airglow*, ed. by B. M. McCormac, Reinhold, New York, 599-605.

(1972年10月13日受理)