

磁気圏嵐開始時の VLF-LF 電波バースト

恩藤忠典*・籾馬 尚*・大瀬正美*・西牟田一三*

VLF-LF Radio Bursts Observed at Local Onsets of Magnetospheric Substorms

Tadanori ONDOH*, Hisashi YABUUMA*, Masami OSE*
and Ichizo NISHIMUTA*

Abstract: Observations of VLF hiss narrow-band intensities (5.0 ± 0.2 kHz, 12.0 ± 0.5 kHz, and 50.0 ± 1.0 kHz), horizontal component (H) of the geomagnetic field, and the ionospheric absorption of cosmic radio noises of 30 MHz have been carried out at Syowa Station, Antarctica, since May, 1972.

Characteristics of VLF-LF radio emissions associated with 59 magnetospheric substorms which occurred for six months in 1973 have been statistically analyzed by using the above correlation data. Wide-band VLF-LF radio bursts are often found at all channels of 5 kHz, 12 kHz, and 50 kHz within 5 minutes of local onsets of magnetospheric substorms. Small absorption (less than about 0.5 dB) of the cosmic radio noises at 30 MHz suggests that precipitations of energetic electrons above 10 keV into the auroral-zone ionosphere have little relation with the generation of VLF-LF radio bursts. The cerenkov-type wide-band emissions from auroral electrons below 10 keV may generate VLF-LF radio bursts, since the auroral breakup occurs simultaneously with the local onset of magnetospheric substorm.

In the growth phase of the magnetospheric substorm, intensification of the westward electric field in the neutral sheet associated with thinning of the plasma sheet causes the inward plasma flow in the magnetotail. The electrostatic plasma instability causing the pitch angle diffusion of electrons occurs near the inner edge of the plasma sheet ($L < 10$) as the plasma convection develops, and then the plasma sheet electrons (0.1–10 keV) precipitate, due to the pitch angle diffusion, into the auroral zone along the geomagnetic field line.

Thus, the cerenkov-type emissions generated by the auroral electrons

* 郵政省電波研究所. Radio Research Laboratories, Nukuikita-machi, Kogagei-shi, Tokyo 184.

precipitating from the plasma sheet may produce the wide-band VLF-LF radio bursts at the local onsets of magnetospheric substorms.

概 要

南極昭和基地で観測した VLF 放射狭帯域強度 (5.0 ± 0.2 kHz, 12.0 ± 0.5 kHz, 50.0 ± 1.0 kHz), 地磁気水平成分, リオメーター 30 MHz の同時記録データを用いて, 磁気圏嵐の局所的開始に伴う VLF 電波バーストの解析を行った.

1973 年の 6 カ月間に起こった 59 個の磁気圏嵐に伴って発生した VLF 電波バーストを統計処理した結果, 磁気圏嵐の局所的開始から 5 分間以内に, 5 kHz, 12 kHz, 50 kHz の各周波数において, 広帯域な電波バーストが頻発していることが明らかになった. この VLF-LF 電波バーストに伴うリオメーター 30 MHz の電離層吸収は小さく, D 層まで侵入するような数 10 keV 以上の電子は, VLF-LF 電波バーストの発生とあまり関係しないことを示している.

磁気圏嵐の局所的開始が, オーロラの breakup と一致していることから, 10 keV 以下のオーロラ電子からの広帯域なセレンコフ型放射が, VLF-LF バーストの発生機構と思われる. 磁気圏嵐の成長期にはプラズマシートの薄化が起こり, 磁気中性シートの西向き電場が強化され磁気圏尾部での内向きプラズマ対流が発達する. プラズマ対流の発達に伴い, プラズマシート内端近くで静電的プラズマ不安定が発生し, プラズマシート電子はピッチ角拡散によって, 磁力線に沿って極光帯へ降下する. このオーロラ電子からのセレンコフ型放射が, 磁気圏嵐開始時の広帯域 VLF-LF 電波バーストを発生すると推測される.

VLF 放射, 地磁気活動, 極光現象, 電子降下現象の correlation data は, 極光帯電離層, 磁気圏尾部の物理的機構の解明に重要なもので, 今後とも続行すべきものである.

1. 南極昭和基地における VLF 放射, 宇宙電波雑音の電離層吸収,

地磁気水平成分の Correlation Data

南極昭和基地は地磁気緯度 69.6°S , 経度 77.1°E にあり, その地磁気共役点のアイスランドのレイキャビックと共に極光帯に位置し, 磁気圏嵐に関連した諸現象の観測に最適の場所である.

磁気圏嵐諸現象の解析に際し, 各測定器からの出力を同一のチャートレコーダーに入れた地上 correlation data は, 人工衛星データが豊富に手に入る現在でも, その重要性は少しも

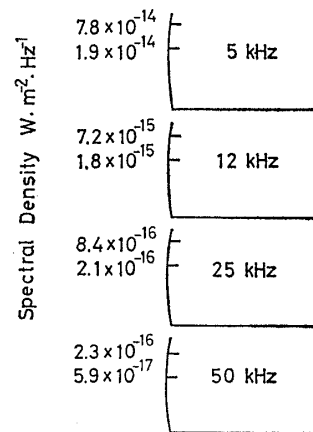
減っていない。極地方上空を通過する極軌道衛星のデータは、主に空間的变化を示すので極光帯の地上 correlation data は、磁気圏嵐の時間的推移を示すものとして、今後とも続行すべき重要なプロジェクトである。

1972年5月以来、電波研究所からの越冬隊員によって、VLF放射狭帯域強度 (750 ± 35 Hz, 5.0 ± 0.2 kHz, 12.0 ± 0.5 kHz, 25.0 ± 0.5 kHz, 50.0 ± 1.0 kHz), リオメーター 30 MHz の correlation data が観測されてきた。さらに1973年3月以降は、このデータに地磁気水平成分の記録が加えられ、750 Hz, 5 kHz, 12 kHz, 50 kHz の VLF 放射強度, 地磁気水平成分, 宇宙電波雑音 (CNA) 30 MHz の同時 correlation data の観測が続けられている。1972年5月~12月の間に得られた correlation data は、すでに ISOZAKI *et al.* (1974) によって発表された。

VLF 放射観測用のアンテナとしては、地理的南北子午面方向に面をもつ2回巻きデルタループ (高さ 18.5 m, 底辺 39 m) を用いている。アンテナ直下に前置増幅器を置き、これからの出力を同軸ケーブルで観測室に導いて、 $Q=10$ の狭帯域増幅器で増幅する。その後10ミリ秒平均化した後で、充電時定数5秒, 放電時定数2ミリ秒をもつ minimum reading 回路を通してから、その直流出力を6チャンネルのチャートレコーダーに入れてある。チャート速度は、毎時6cmにしてある。図1にチャート記録のVLF各チャンネルの雑音電波スペクトル密度のスケールを示す。

図1 VLF 狭帯域強度データの各周波数における電力束密度 ($W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$) のスケール (南極昭和基地)

Fig. 1. Scales of spectral power flux densities at each frequency channel of VLF hiss narrow-band data (Syowa Station, Antarctica).



今回は磁気圏嵐の局所的開始時に頻発する VLF-LF 電波バーストの特性を昭和基地で観測した1973年4月, 6月, 7月, 8月, 10月, 11月のデータを用いて解析した。ELF帯の750 Hz 波は、磁気圏嵐開始時に増加を示さないもので、今回は割愛した。

2. 磁気圏嵐の局所的開始に伴う VLF-LF 電波バースト

図 2~4 は、それぞれ 1973 年 10 月 7 日、6 月 29 日、6 月 24 日の午前 2 時~3 時頃 (東

図 2~8 磁気圏嵐の局所的開始時 (オーロラ breakup) の VLF-LF 電波バースト (昭和基地)

Figs. 2-8. Examples of VLF-LF radio bursts observed at local onsets (auroral breakup) of magnetospheric substorms.

図 2
Fig. 2.

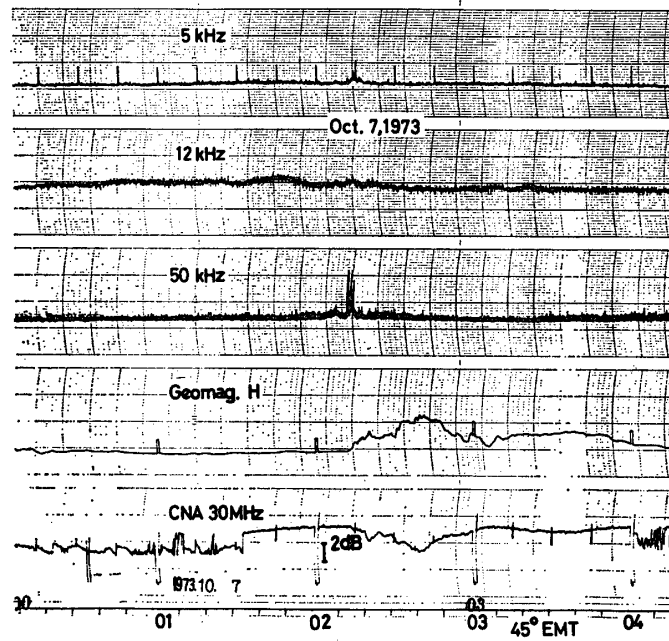


図 3
Fig. 3.

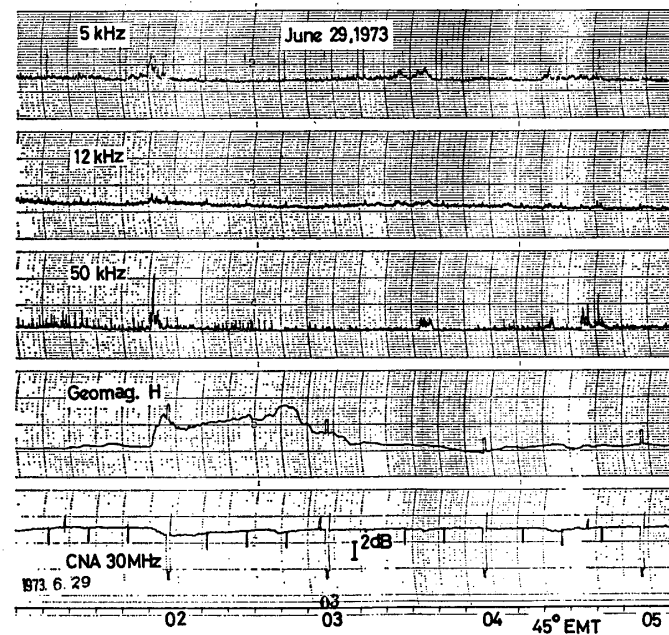
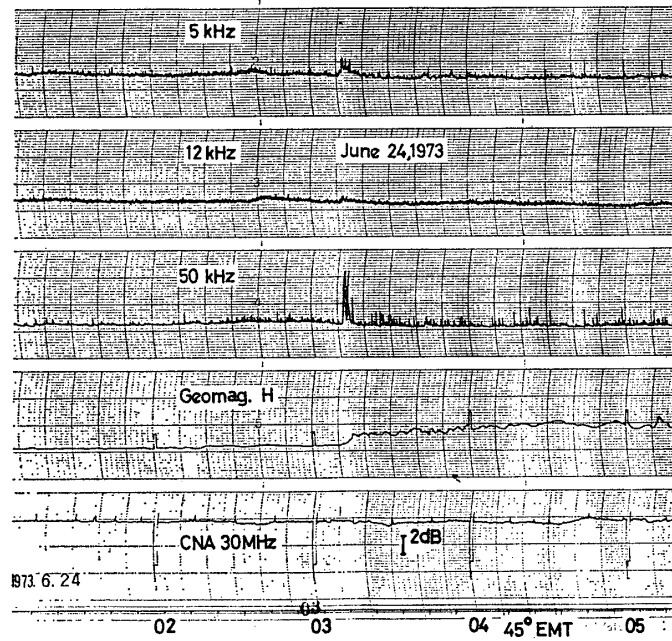


図 4
Fig. 4.



径 45° 標準時) に始まった磁気圏嵐の局所的開始時に発生した VLF-LF 電波バーストの例を示す. 地磁気水平成分のトレースは, 上向きが強度減少の方向で, 1 時間毎のスケールは 200γ を示す. 地磁気減少の始まりとほとんど同時に, 50 kHz および 5 kHz で電波バーストが起こり数分間続いている. 図 1 のスケールを照合すると, 50 kHz バースト強度は 10^{-16}

図 5
Fig. 5.

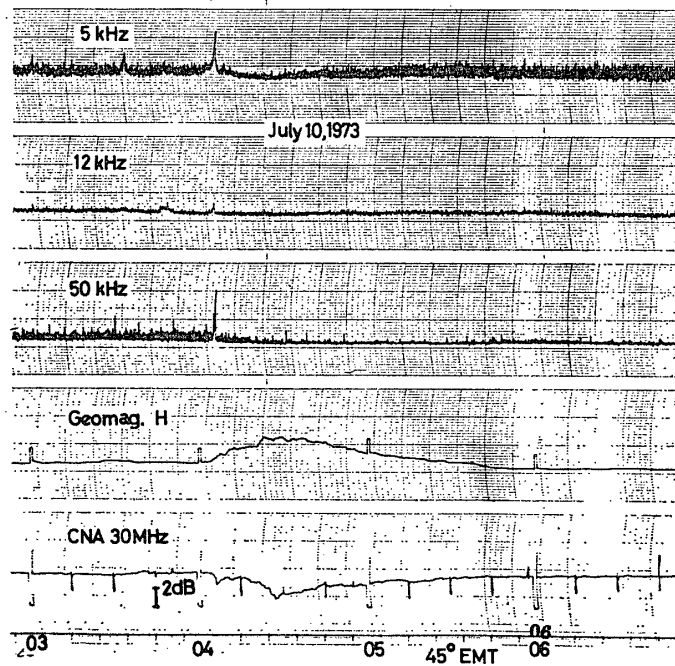


図 6
Fig. 6.

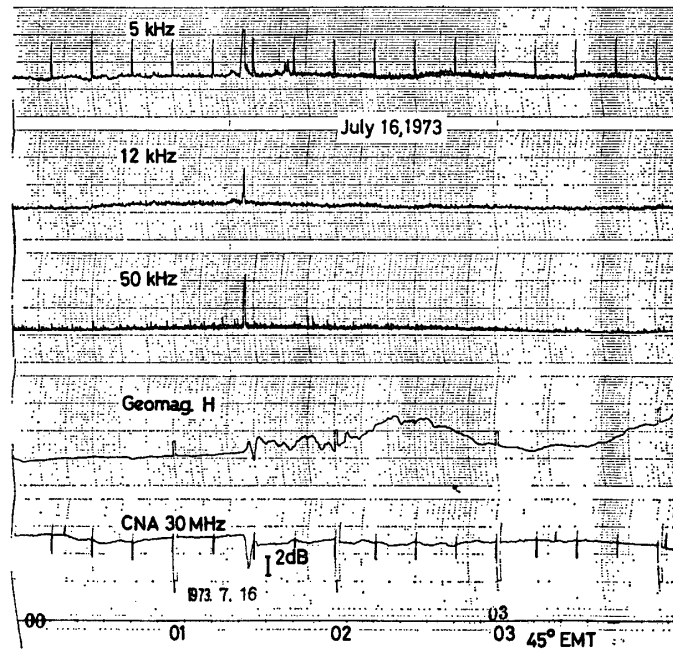
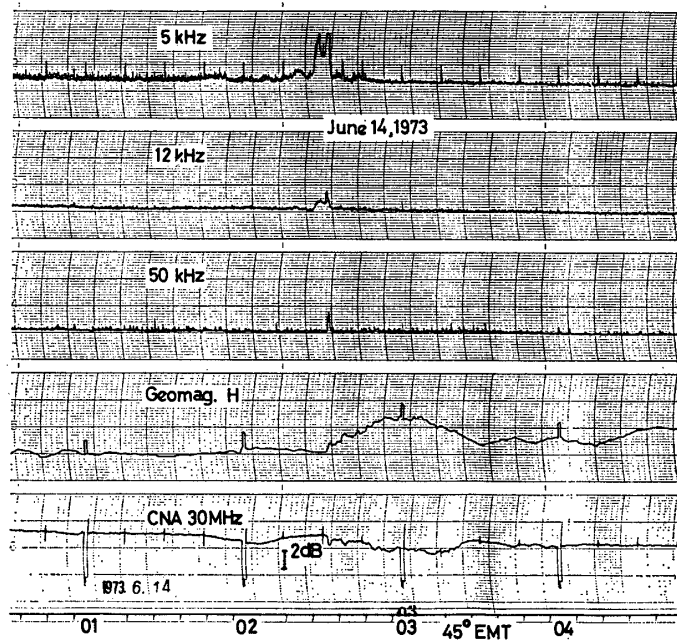


図 7
Fig. 7.



$W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$ で、5 kHz バーストは $4 \times 10^{-15} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$ 程度のものであったと思われる。磁気圏嵐中に、この VLF 電波バースト以外に何も発生していないことは、注目すべきことである。また VLF 電波バースト中の CNA 30 MHz の電離層吸収は、極めて小さく 0.5 dB 以下と思われる。

図 5~7 は、それぞれ 1973 年 7 月 10 日、7 月 16 日、6 月 14 日の 1 時半~4 時の間に起

こった磁気圏嵐の開始時に発生した典型的な電波バーストで、その強度は 50 kHz で 10^{-16} $W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$, 12 kHz で 10^{-15} $W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$, 5 kHz で 10^{-14} $W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$ 程度のもので、VLF-LF の広帯域にわたって発生している。7月10日と16日に起こったバーストは、わずか2分間以下しか継続していない。7月16日の地磁気じょう乱の開始部は、SC* の様相を呈している。

図 8
Fig. 8

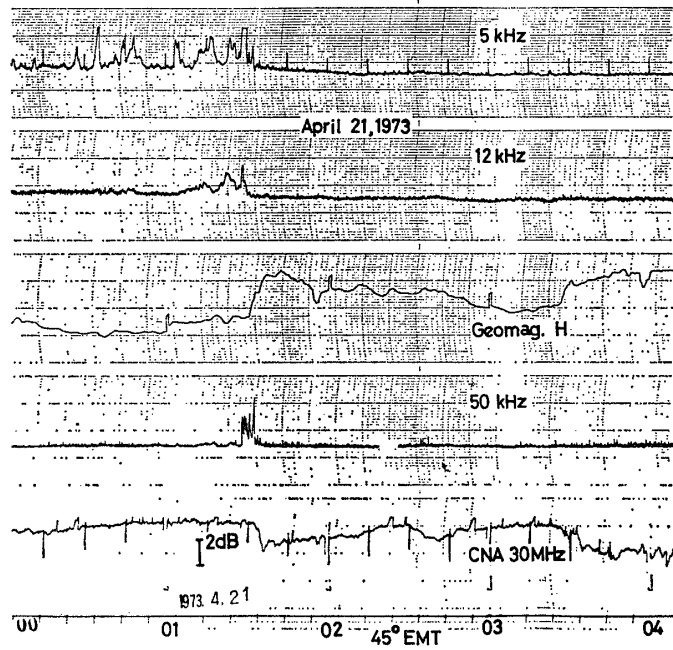
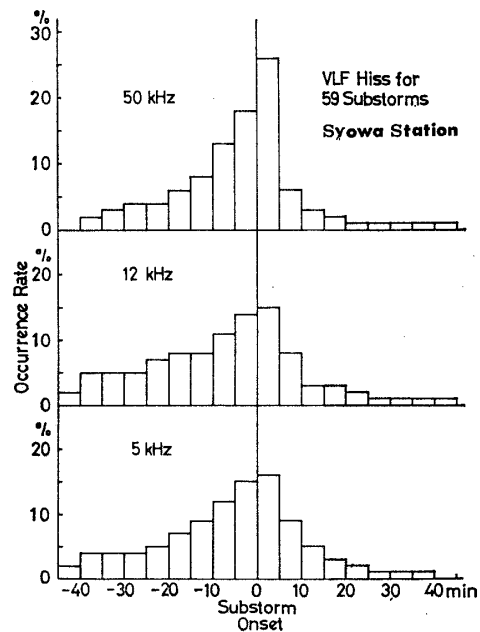


図 9 1973 年の 6 カ月間に発生した 59 個の磁気圏嵐の開始前後における、VLF-LF 電波バーストの発生率の嵐時変化 (昭和基地)

Fig. 9. Substorm-time variation of occurrence frequency of VLF-LF radio bursts (in 5 minute interval) occurring for 59 magnetospheric substorms observed for 6 months in 1973 (Syowa Station, Antarctica).



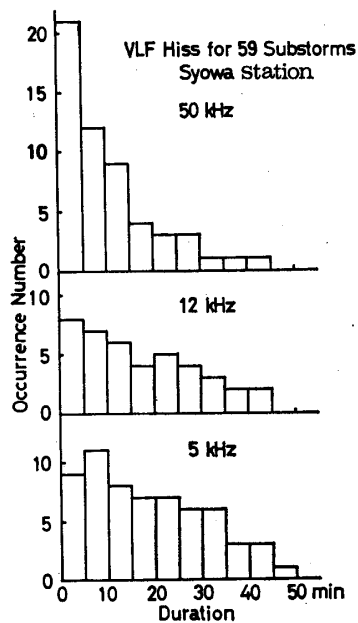


図 10 1973 年の 6 カ月間に発生した 59 個の磁気圏嵐の開始前後に発生した VLF-LF 電波バーストの継続時間の分布 (昭和基地)

Fig. 10. Distribution of durations (in 5 minute interval) for VLF-LF radio bursts occurring for 59 magnetospheric substorms observed for 6 months in 1973 (Syowa Station, Antarctica).

一般に極光帯では、磁気圏嵐の局所的開始と同時にオーロラ breakup が起こっており、強いオーロラ電子流が短時間に電離層に降り注いでいると推測される。オーロラ電子からのセレンコフ放射は広帯域に現れるから、前述の VLF-LF 電波バーストのスペクトル特性を説明できると思われる。図 8 は 1973 年 4 月 21 日 1 時半頃に起こった磁気圏嵐開始時の VLF 放射で、5 kHz では開始の約 30 分前から発生している。しかし 50 kHz では嵐の開始の約 6 分前から強いバーストが起こっている。

1973 年の 6 カ月間に、昭和基地で観測された 59 個の磁気圏嵐について、嵐の開始前後に起こる VLF 放射の発生頻度を、地磁気水平成分で見られる嵐の開始時刻で重ねて、50 kHz, 12 kHz, 5 kHz における VLF 放射の発生率の嵐時変化を求めた (図 9)。磁気圏嵐開始の約 15~20 分前から各周波数ともに発生率が漸増し、嵐の開始から 5 分以内で発生率が最大になり、5 分以後は急激に減少する。また、この傾向は 50 kHz で最も顕著に現われている。図 10 は 59 個の磁気圏嵐中に発生した全 VLF 放射の継続時間の発生数の分布を示す。特に 50 kHz では、5 分間以下の継続時間のものが圧倒的に多く、図 9 で嵐の開始から 5 分間以内に VLF-LF 放射の発生率が最大であったことと符合している。

図 11 は 1973 年 8 月 13 日に、地磁気活動と無関係に真夜中以前に起こった VLF-LF 放射の例である。30 分間以上も続く 12 kHz および 5 kHz 放射の終り頃に 50 kHz 放射がバースト的に起こっている。この例からも VLF-LF 放射は、地磁気じょう乱や CNA 30 MHz 電離層吸収を起こす原因とは直接的関係になく、低エネルギー粒子の侵入と密接な関係にある

と思われる。

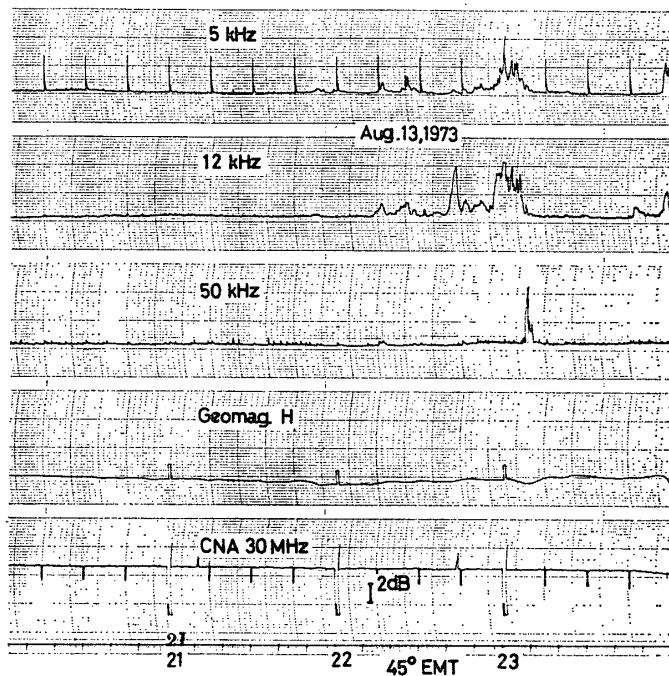


図 11 磁気圏嵐に関係なしに発生した VLF-LF 電波バーストの例 (昭和基地)

Fig. 11. Example of VLF-LF radio bursts which occurred independent of the magnetospheric substorm.

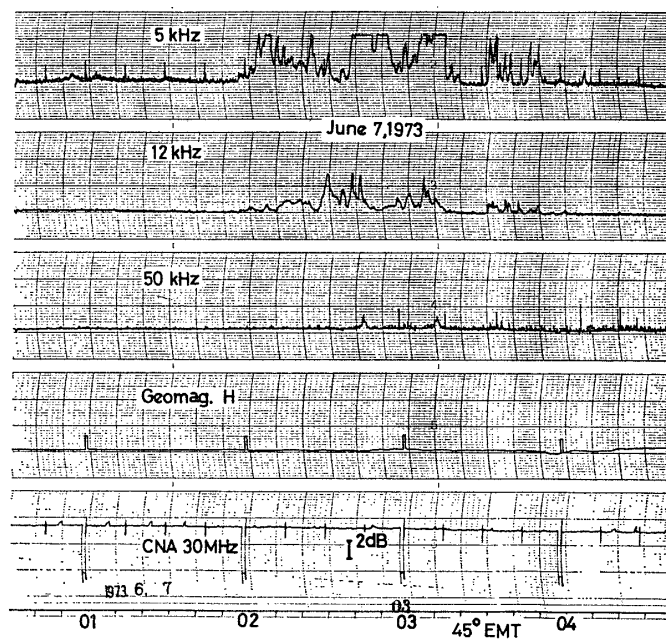


図 12 昭和基地で観測された VLF ヒスストームの例

Fig. 12. Example of VLF hiss storm observed at Syowa Station, Antarctica.

図 12 は地磁気活動, CNA 30 MHz 電離層吸収と全く無関係に起こった VLF ヒスストームの例である. 5 kHz ヒスの強度は $10^{-13} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$ にも達し, 2 時間以上も連続的に発生したことを示している. 12 kHz では $10^{-15} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$ またはそれ以下, 50 kHz では $10^{-17} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$ の弱いものしか観測されなかった. 磁気圏嵐開始時の VLF-LF 電波バーストが, 10-20 kHz にスペクトル密度のピークをもっていたのに対し, 図 12 の VLF ヒスストームは明らかに 10 kHz 以下の VLF 帯にスペクトル密度のピークをもち, その発生機構も前者のものとは異なるものと思われる. この論文の末尾に, 付録として, 1973 年 4 月 19 日, 4 月 20 日, 7 月 1 日, 7 月 23 日, 7 月 26 日, 7 月 27 日, 7 月 30 日, 8 月 1 日, 8 月 25 日, 10 月 6 日, 10 月 16 日の磁気圏嵐に伴って発生したいろいろな型の VLF 放射の例を付図 1~11 に示した.

3. オーロラ電子からのセレンコフ VLF 放射

前節で明らかのように, オーロラの breakup または磁気圏嵐の局所的開始時に起こる VLF-LF 電波バーストは, 広帯域スペクトルを持ち, その強度ピークは 10~20 kHz 間にあって, $3 \times 10^{-14} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 程度である (KOKUBUN *et al.*, 1972).

図 13 は双極子磁場モデルおよびプラズマ分布として無衝突モデルを用いた場合の極光帯 (地磁気不変緯度 $A=65^\circ$) を通る磁力線に沿っての電子のプラズマ周波数 f_{pe} , 電子のジャイロ周波数 f_{He} , lower hybrid 共鳴周波数 f_{LHR} の分布を示す. このモデルを用いて求めた, $A=65^\circ$ の磁力線に沿っての 0.1~10 keV 電子流 (ただし, この計算に用いた条件は $dJ/dE = \alpha \times E^{-4} (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{ster} \cdot \text{eV})^{-1}$, $A=1.5-2.5$) からのセレンコフ放射率の分布を図 14 に示す. $A=65^\circ$ の地球磁力線上の地表から約 $2.5 \times 10^4 \text{ km}$ (地磁気緯度 $\sim 30^\circ$) の所に, 3 kHz, 400 Hz で最大のセレンコフ放射電力域が存在する. 他の周波数でも, 最強のセレンコフ放射域は地磁気赤道面上ではなく, 磁気緯度 30° 辺りに存在する.

MAEDA (1975) は, 人工衛星の観測値から求めた mead-fairfield 磁場モデルおよびイオン組成, プラズマ密度の人工衛星による観測値から導いた磁気圏プラズマ分布モデルを用いて, 夜側の $A=70^\circ$ を通る磁力管内を降下するオーロラ電子からのインコヒーレントセレンコフ放射電力を計算した. Mead-fairfield モデルでは, 双極子磁場に比べて磁力線が夜側に後方に延ばされており, 磁力管の体積が大きくなっている. したがって磁力管内のオーロラ電子からの全放射電力も, 双極子磁場の場合よりずっと大きくなる.

$A=70^\circ$ の夜側の地球磁力管内を降下する 0.1~10 keV の軟スペクトル電子流 $J_e(E)=4 \times$

$10^8 E^{-2} (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{ster} \cdot \text{keV})^{-1}$, および硬スペクトル電子流 $J_h(E) = 8 \times 10^7 E^{-1.2} (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{ster} \cdot \text{keV})^{-1}$ からのインコヒーレントセレンコフ放射は, それぞれ 20 kHz および 10 kHz で最大値 $6 \times 10^{-14} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ および $3 \times 10^{-15} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ となる. 特に軟スペクトル電子流からのセレンコフ放射電力束密度は, VLF-LF 電波バーストの最大値 $3 \times 10^{-14} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ と同程度である.

前節の例で見たように, 磁気圏嵐開始時の VLF-LF 電波バーストは, 地磁気じょう乱が激しくなる直前に起こり, その時の CNA 30 MHz の電離層吸収は極めて小さい. また静穏時の夜間の極光帯電離層による VLF 電波の電離層吸収は数 dB だから (ONDOH, 1963), 磁気圏嵐開始時の VLF-LF 電波バーストは, オーロラ電子からのセレンコフ放射によって説明できる.

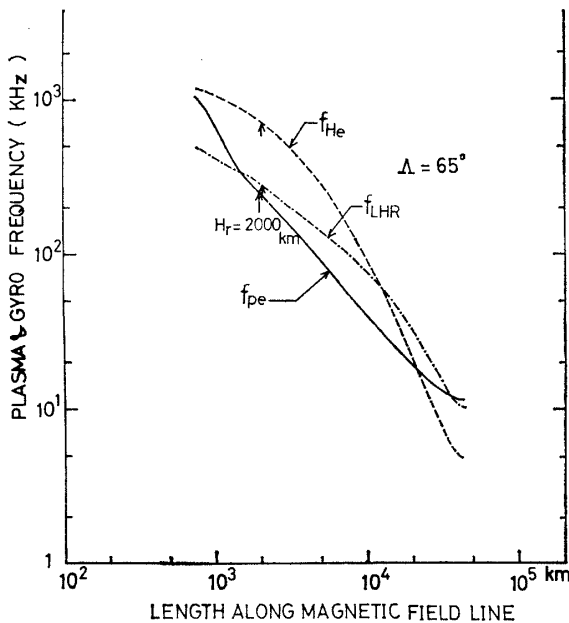


図 13 無衝突プラズマモデルに従って求めた $\Lambda = 65^\circ$ の磁力線に沿う電子プラズマ周波数 f_{pe} , 電子ジャイロ周波数 f_{He} , lower hybrid 共鳴周波数 f_{LHR} の分布

Fig. 13. Distributions of the electron plasma frequency (f_{pe}), electron gyrofrequency (f_{He}), and lower hybrid resonance frequency (f_{LHR}) along the geomagnetic field line of $\Lambda = 65^\circ$. These parameters are computed from the collisionless plasma model and the centered dipole magnetic field.

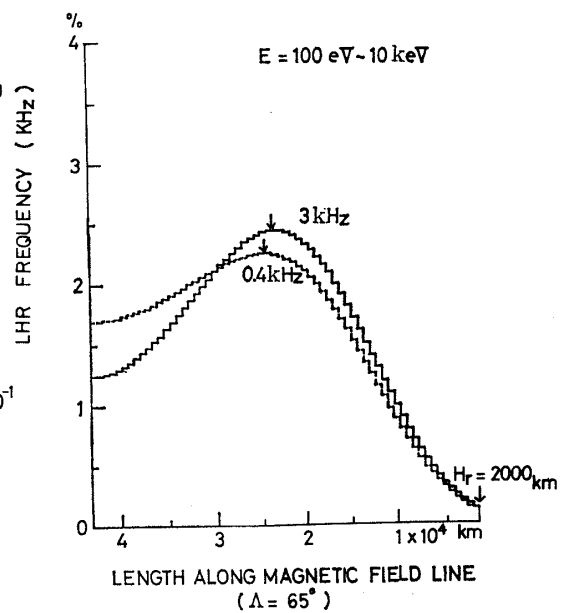


図 14 $\Lambda = 65^\circ$ の磁力線に沿う, 100 eV ~ 10 keV のオーロラ電子流からのセレンコフ放射電力の百分率分布 (左端が地磁気赤道面)

Fig. 14. Percentage distribution of the power flux density for the cerenkov emissions from auroral electrons (100 eV-10 keV) along the geomagnetic field line of $\Lambda = 65^\circ$ for 3 kHz and 0.4 kHz waves. Left end of the figure is the geomagnetically equatorial plane.

それでは磁気圏嵐開始時のオーロラ電子は、どこから来たのであろうか。磁気圏嵐の開始約1時間前から、磁気圏周辺の惑星空間磁場の z 成分は、北向きから南向きに変わる。これに伴って磁気圏尾部ではプラズマシートの南北の厚さが薄くなり、磁気中性面に西向き電場がかかって地球後方から内向きのプラズマ対流が起こる。プラズマ対流の成長により、プラズマシート電子のピッチ角分布の乱れが発達する。磁気圏嵐の開始に近づくにつれて、太陽向きプラズマ対流が強くなり、 T_{\perp}/T_{\parallel} が増加する(T_{\perp} および T_{\parallel} は磁力線に垂直および平行な温度成分)。そして $L \leq 10$ の比較的地球に近い所で、プラズマシートに静電的プラズマ不安定が生じ、波動粒子相互作用によって、プラズマシート電子のピッチ角拡散が起きる。この結果プラズマシート電子は磁力線に沿って電離層へ降下する。 $L=10$ は $A=71.5^{\circ}$ 、 $L=7.1$ は $A=68^{\circ}$ 、 $L=5.6$ は $A=65^{\circ}$ であることを考慮すると、ピッチ角拡散で降下するプラズマシート電子は、夜側の極光帯電離層に落下することになる(KENNEL, 1969; FREDRICKS, 1975)。事実、人工衛星の観測結果によれば、プラズマシート電子の流束密度は $0.5 \sim 10$ keV で $10^8 \sim 10^7$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{ster} \cdot \text{keV}$) $^{-1}$ 程度で、ロケットによる極光帯電離層内でのオーロラ降下電子のそれとほぼ一致している。

4. 結 論

南極昭和基地で観測した VLF 放射狭帯域強度 (5 kHz, 12 kHz, 50 kHz), および地磁気水平成分, 宇宙電波雑音 (CNA) 30 MHz の電離層吸収の同時 correlation data を 1973 年の 6 カ月間に起こった 59 個の磁気圏嵐について統計解析した。その結果、磁気圏嵐の局所的開始時に、継続時間が 5 分以内の広帯域の VLF-LF 電波バーストが発生することが判明した。この電波バーストに伴う CNA 30 MHz の電離層吸収は、極めて小さく 0.5 dB 以下である。したがって CNA 30 MHz 電離層吸収に大幅に効くような高エネルギー粒子の降下は、VLF-LF 電波バーストの発生と関係がない。

磁気圏嵐の成長期に磁気圏尾部にかかる西向き電場の成長に伴い、プラズマシートのプラズマは、太陽向き対流を起こし、 $L \leq 10$ の極光帯を通る磁力線が磁気赤道面と交差する辺りで、静電的プラズマ不安定を起こす。このため $0.5 \sim 10$ keV のプラズマシート電子のピッチ角拡散により、オーロラ電子となって磁力線に沿って極光帯へ降下する。

このオーロラ電子からのセレンコフ放射スペクトルは、 $10 \sim 20$ kHz 間にピークを持ち、磁気圏嵐開始時の VLF-LF 電波バーストの周波数スペクトルと一致する。また夜間静穏時の VLF 電波の電離層吸収は数 dB 以下なので、セレンコフ放射電力束密度の $10^{-14} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

Hz^{-1} は、ほぼ地上における VLF-LF 電波バーストの強度と同程度である。

謝 辞

昭和基地での correlation data の観測に関して、お世話頂いた第 14 次南極越冬隊長の平沢威男博士に厚くお礼申し上げます。また VLF 放射受信器の使用について、快諾下さった名古屋大学空電研究所田中義人博士に心から感謝します。

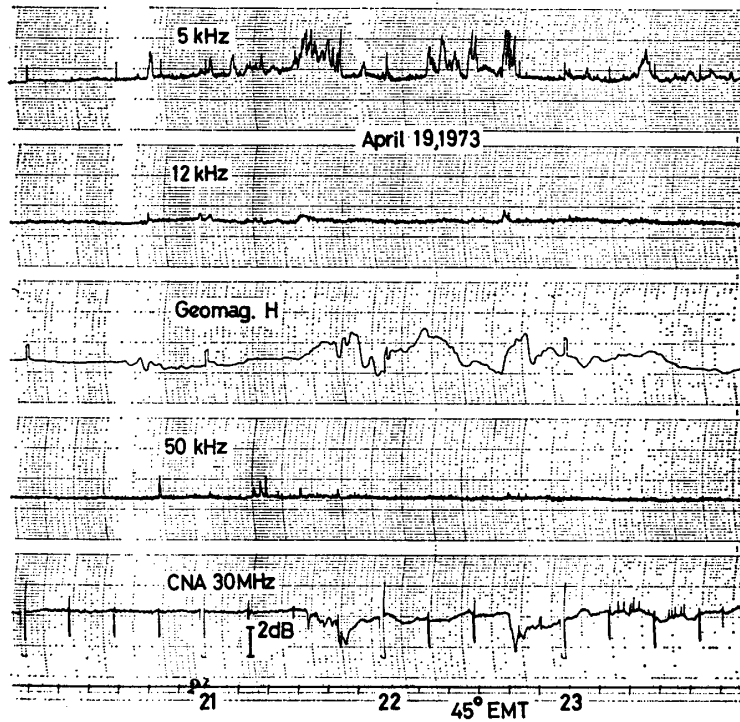
文 献

- FREDRICKS, R. W. (1975) : Wave-particle interactions and their relevance to substorms. *Space Sci. Rev.*, **17**, 449-480.
- ISOZAKI, S., M. OSE and T. ONDOH (1974) : Correlation records of VLF hiss and ionospheric absorption of cosmic radio noise at Syowa Station, Antarctica in 1972. *JARE Data Rep.*, **22** (Ionosphere), 19 pp.
- KENNEL, C. F. (1969) : Consequences of magnetospheric plasma. *Rev. Geophys.*, **7**, 379-419.
- KOKUBUN, S., K. MAKITA and T. HIRASAWA (1972) : VLF-LF hiss during polar substorm. *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **26**, 138-148.
- MAEDA, K. (1975) : A calculation of auroral hiss with improved models for geoplasma and magnetic field. *Planet. Space Sci.*, **23**, 843-865.
- ONDOH, T. (1963) : The ionospheric absorption of the VLF emissions at the auroral zone. *J. Geomag. Geoelectr.*, **15**, 90-108.
- 恩藤忠典 (1974) : 磁気圏嵐 (Magnetospheric substorm). *電波研究所季報*, **20**, 323-345.

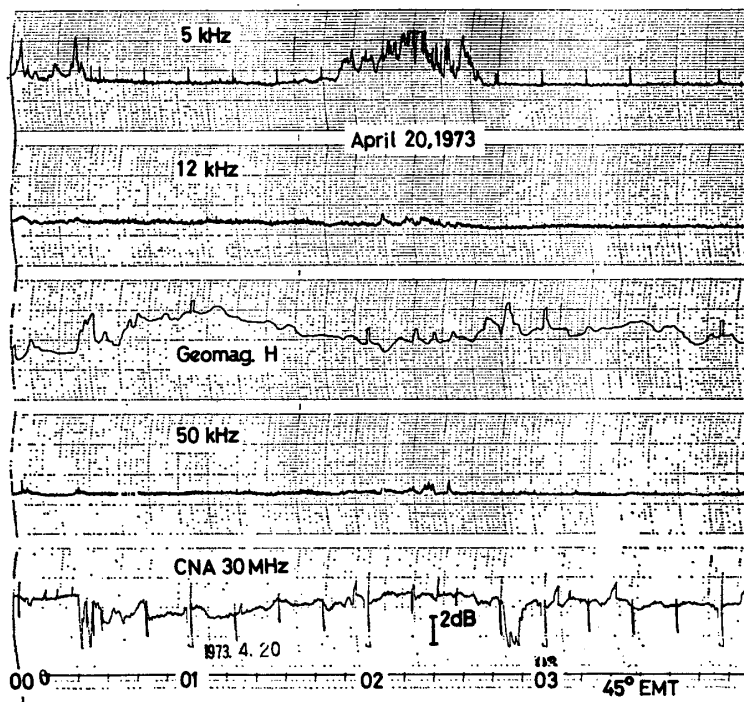
(1975年12月17日受理)

付図 1~11 昭和基地で観測された磁気圏嵐に伴う VLF 放射及び宇宙電波雑音 30 MHz の電離層吸収

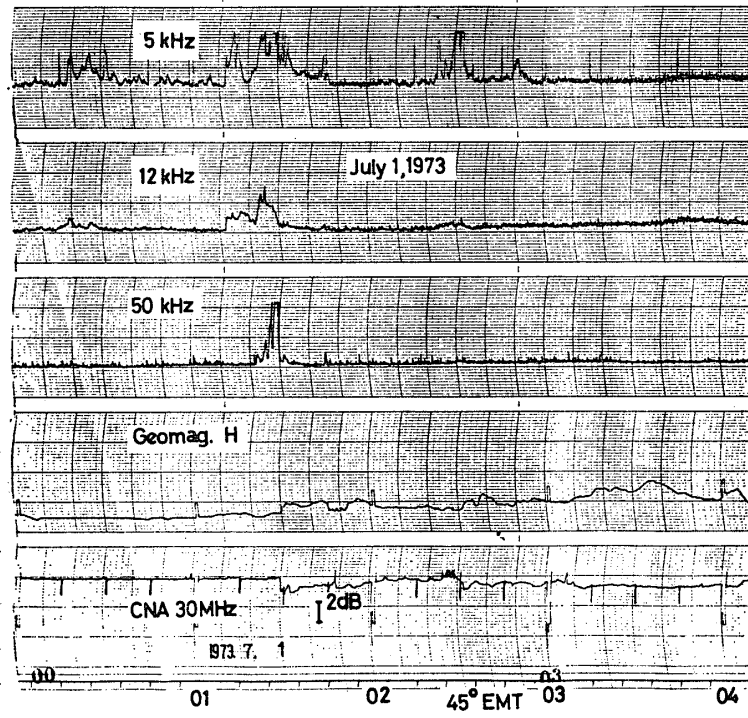
Appendixes 1-11. Correlation records of VLF hiss narrow-band intensity, geomagnetic H-field, and ionospheric absorption of cosmic radio noises of 30 MHz observed for magnetospheric substorms in 1973 at Syowa Station, Antarctica.



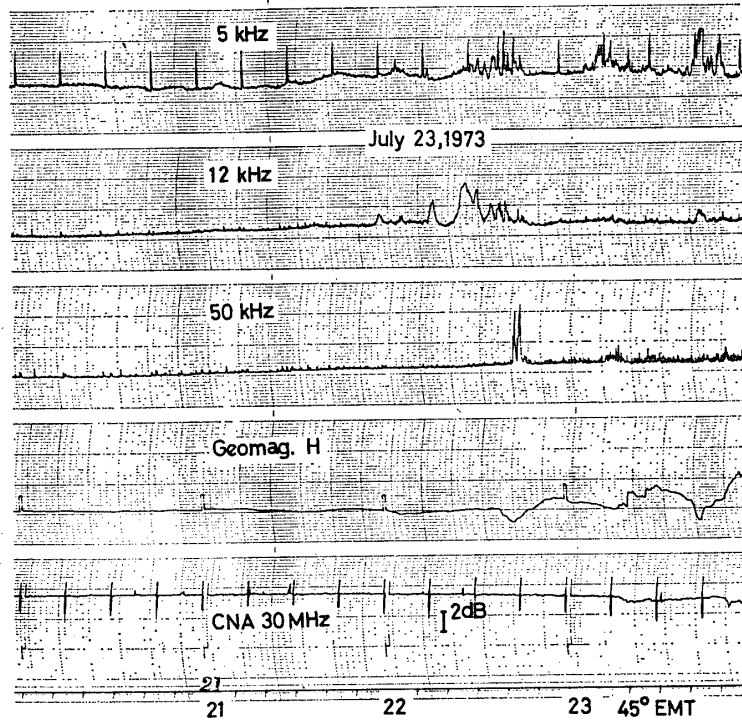
付図 1
Appendix 1



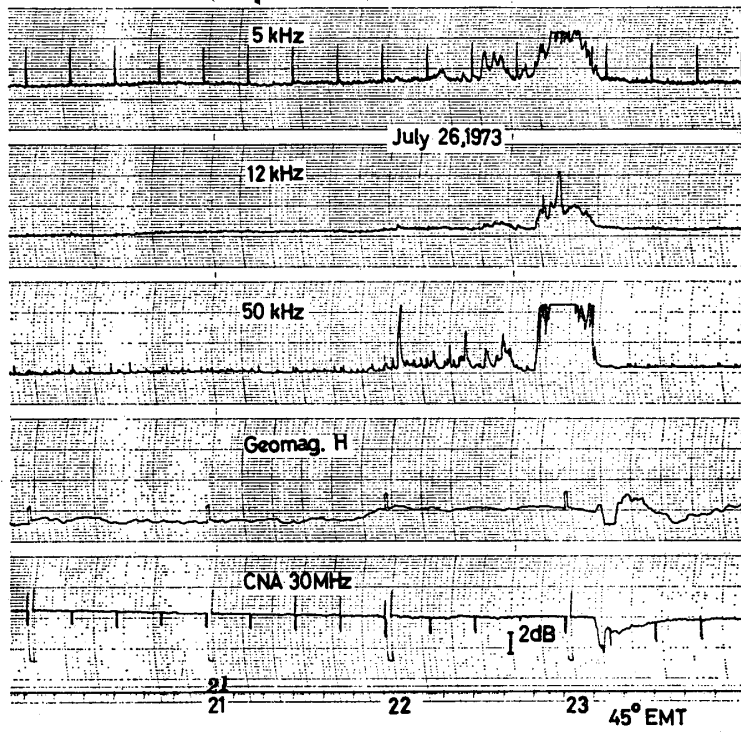
付図 2
Appendix 2



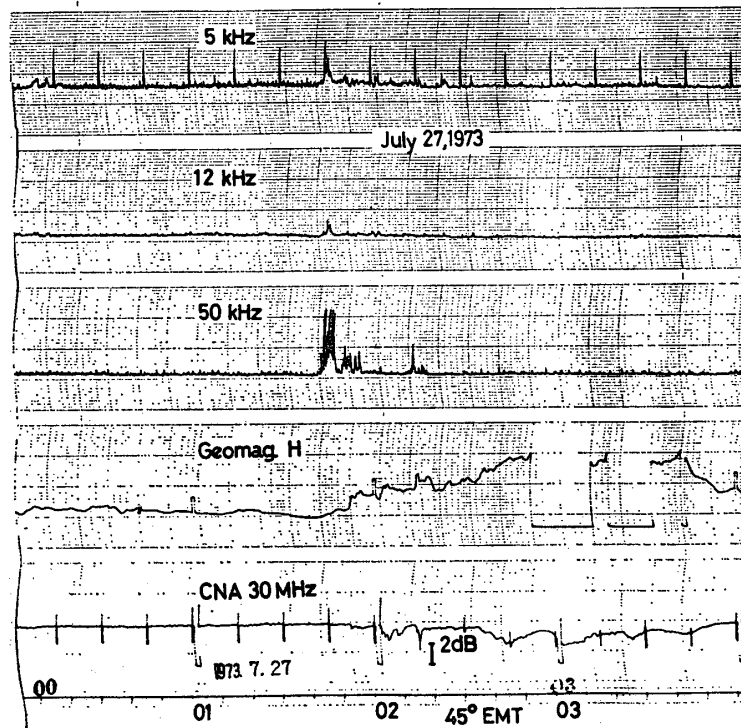
付図 3
Appendix 3



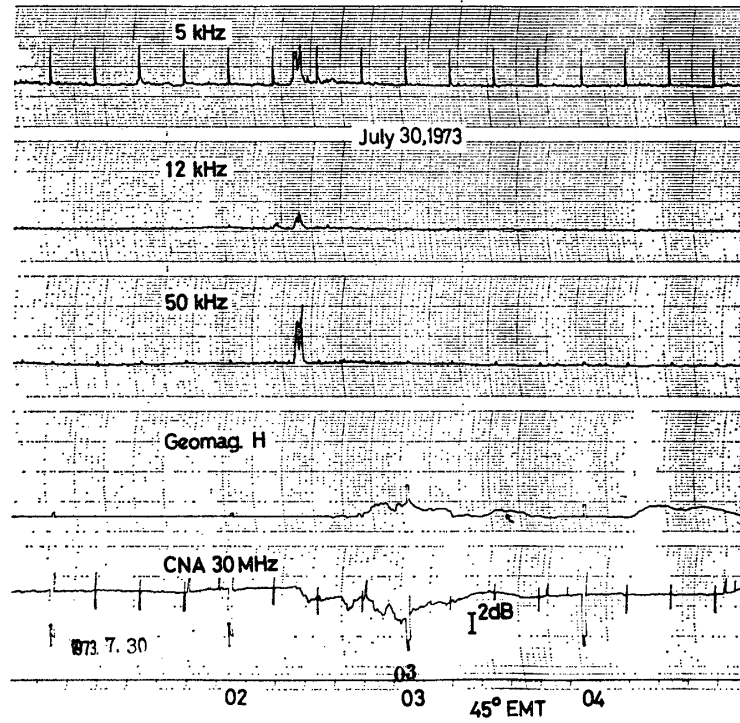
付図 4
Appendix 4



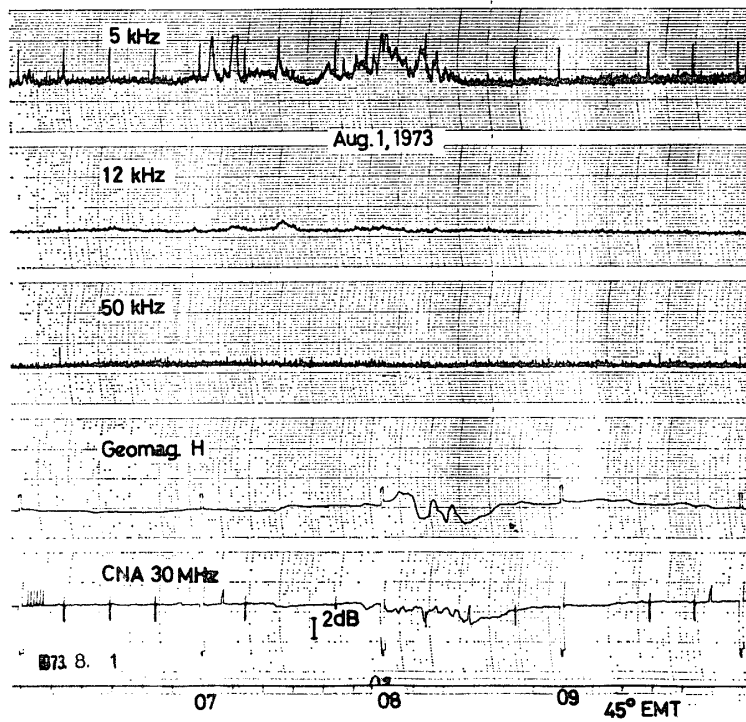
付図 5
Appendix 5



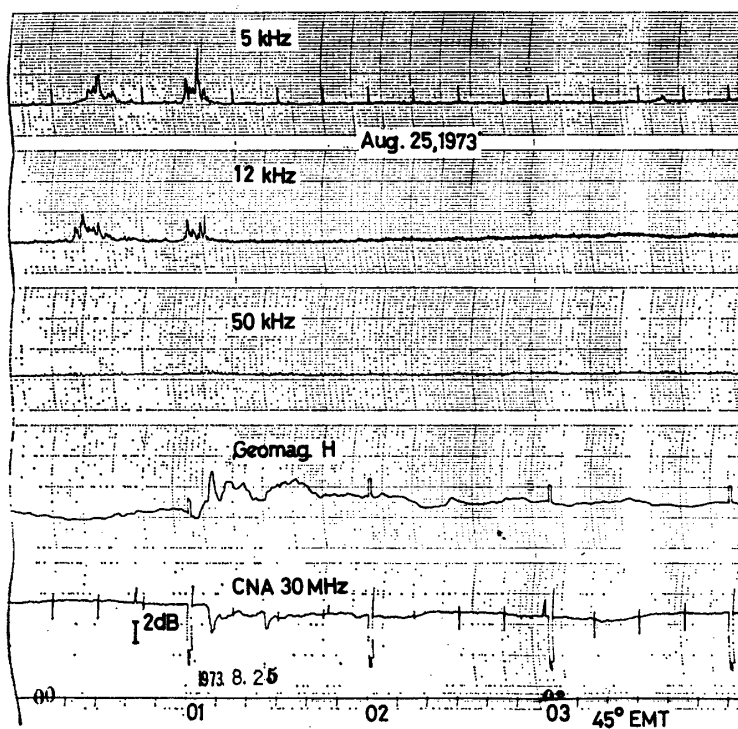
付図 6
Appendix 6



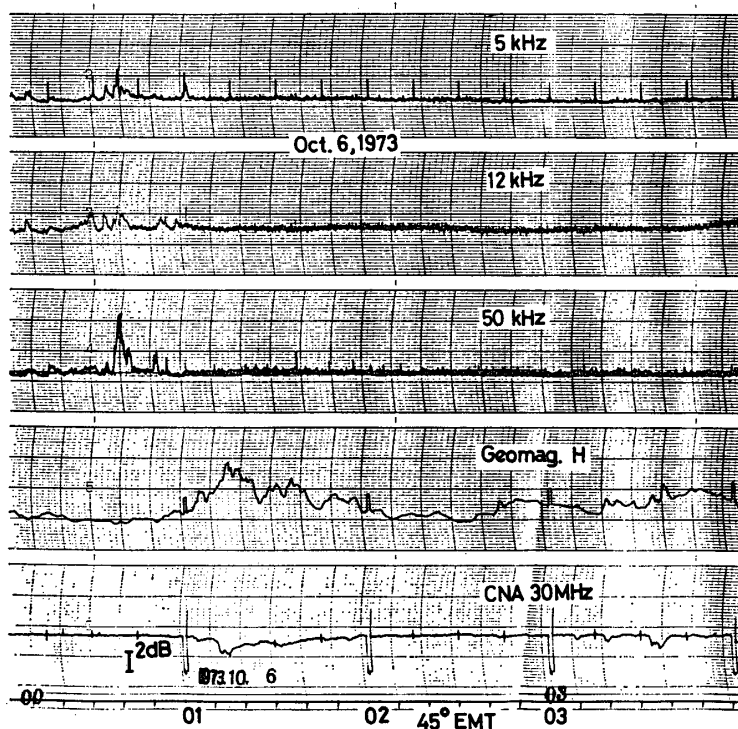
付図 7
Appendix 7



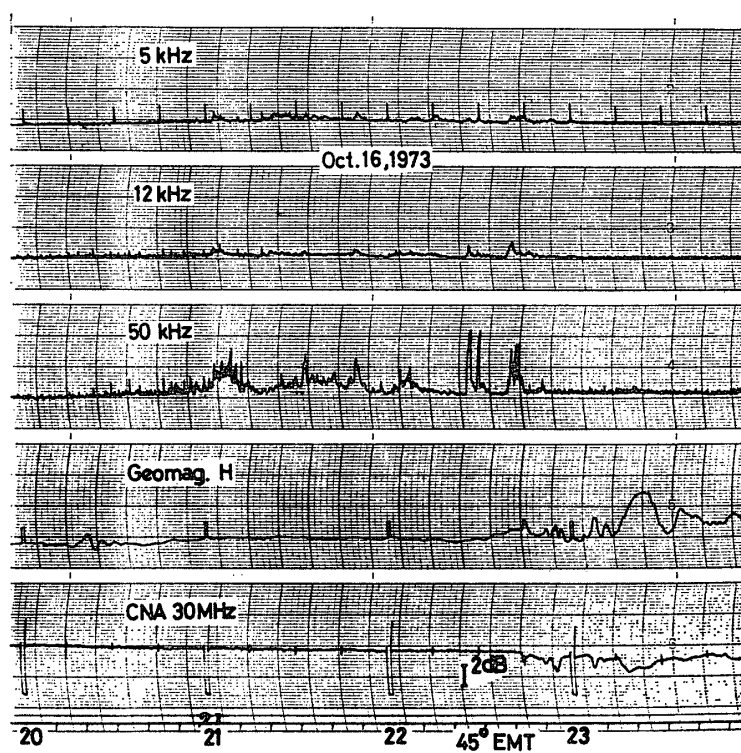
付図 8
Appendix 8



付図 9
Appendix 9



付図 10
Appendix 10



付図 11
Appendix 11