

S-310JA-1, 2 号機による VLF 自然電磁波 プラズマ波の測定

木村磐根*・松尾敏郎*・山岸久雄****
鎌田哲夫**・鶴田浩一郎***

VLF Natural Radio and Plasma Wave Observations by S-310JA-1 and 2 Rockets

Iwane KIMURA*, Toshio MATSUO*, Hisao YAMAGISHI,****
Tetsuo KAMADA** and Koichiro TSURUDA***

Abstract: This paper describes the results of VLF observations made by the S-310JA-1 and 2 rockets launched on February 13, 1976 and February 10, 1977 respectively. Both rockets were equipped with a dipole and a loop antenna which measured VLF plasma wave phenomena in the frequency range of 0.2–10 kHz.

The chorus or ELF hiss emissions in the frequency range less than 1 kHz the local wave phenomena identified as ion acoustic waves or electrostatic ion cyclotron waves were observed by S-310JA-1. In the S-310JA-2 experiment, VLF hiss was observed, which was identified as LHR hiss.

As to the relationship between the VLF noise intensity and the energetic electron flux in the energy range less than 10 keV, no clear correlation was found in either of the experiments.

要旨: 1976年2月13日および1977年2月10日に打ち上げられた S-310JA-1 および 2 号機による VLF 波動測定結果についてまとめたものである。両ロケットともダイポール、ループアンテナをセンサーとし、10 kHz の広帯域テレメータにより、0.2–10 kHz のプラズマ波動現象を観測した。

1 号機では 1 kHz 以下にコーラスあるいは ELF ヒスと思われる現象が地上と同時に観測されたほか、イオン音波あるいは静電的イオンサイクロトロン波と思われる局所的波動現象が検出された。また、2 号機では LHR ヒス的な現象が観測された。

VLF ノイズ強度と 10 keV 以下の電子のフラックス (S-310JA-1) および 10 keV 以

* 京都大学工学部電気工学第二教室. Department of Electrical Engineering II, Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606.

** 名古屋大学空電研究所. Research Institute of Atmospherics, Nagoya University, 13, Honohara 3-chome, Toyokawa 442.

*** 東京大学宇宙航空研究所. Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, 6-1, Komaba 4-chome, Meguro-ku, Tokyo 153.

**** 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9–10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

下と 40 keV 以上の電子のフラックス (S-310JA-2) との関連を調べたが、いずれもあまり顕著な関連はみられなかった。

1. 緒 言

極域の電離層中には粒子の降り込みに伴って多種の VLF 波動現象が頻繁に起こっていることが地上観測から知られている。IMS 期間にロケット観測が計画された際、とりあげられた重要なプロジェクトの 1 つは、この波動 - 粒子の総合観測であり、粒子と波動現象の関係、すなわち波動 - 粒子相互作用に関する情報を得ることを最大の目的として計画された。

S-310JA-1 および 2 号機では 10 kHz 以下の VLF 波動現象をダイポール、ループアンテナでとらえ、時分割で地上に広帯域伝送した。また、2 号機では、7 kHz の周波数につき、ダイポール、ループアンテナの E, H 成分からポインティング電力のロケット軸およびそれに直交する面内の成分を測定する回路 PFX を搭載したが、磁場成分の強いホイスラーモード波動現象が弱かったことにより、明瞭なデータが得られなかったのは残念であった。

以下 1 号機、2 号機で得られた VLF 現象を紹介し、その後に粒子との関連について触れる。

2. VLF 波動測定 (PWL) 結果

ロケット搭載機器については 1 号機、2 号機の PWL 共すでに報告されている (KIMURA *et al.*, 1978, 1979; 松尾他, 1979) ので簡単に概略を述べる。

電界アンテナは Be Cu の円筒形で 1 号機は全長 2.8 m, 2 号機は 2.4 m のいずれもダイポール形である。磁界アンテナはいずれも $1\text{ cm}\phi \times 15\text{ cm}$ のフェライト棒に銅線を巻いたものであるが、1 号機で 8000 回、2 号機で 16000 回巻いてある。いずれも 5-7 kHz 近傍に共鳴点ができるようにして利得を稼いでいるが、2 号機の場合にはコアの材質が変わり実効 μ が低いため巻数が大きくなった。ループアンテナの実効高は 1 号機の場合 6 kHz で約 40 mm, 2 号機の場合 5 kHz で約 2 mm である。

1, 2 号機の VLF 受信機系の大きな相違は、ダイポールからの入力回路が、1 号機ではトランス受けて、時分割でアンテナに DC バイアス 3 V を印加してシースを除去したのに対して、2 号機では入力回路を高インピーダンスにしてシースの影響を軽減したこと。また広帯域系の主増幅器が、1 号機ではリニア増幅器を用いたのに対して、2 号機では AGC をかけて対数圧縮していることである。

観測された波動現象としては、1号機では 1) コーラスあるいは ELF ヒス的な 1 kHz 以下の電磁波現象と、2) イオン音波あるいは静電的イオンサイクロトロン波と思われるものが、また2号機では、3) LHR ヒスと思われるものが検出されている。これらはいずれも詳細に報告されている (KIMURA *et al.*, 1978, 1979; 松尾他, 1979) のでこれを要約すると以下のようになる。

2.1. コーラスまたは ELF ヒス

前述のように地上観測ともよく対応して、1 kHz 以下に集中したスペクトルがロケットで観測されており、ロケットのダイポール、ループアンテナ出力の比の値、およびロケットのスピニ依存性が小さいことなどからこれがホイスラーモードであることは明らかである。地上とロケット観測のこの現象の強度の絶対比較は、地上のデータの校正が不十分のため行えないが、スペクトルの形から見ると図1に示すように地上の方が上限周波数が低く、下部電離層中に高い周波数をカットする原因があると考えられる。これは、上方から下降してきたホイスラー波が、通過角 (transmission cone angle) の外で入射すると、全反射が起こるが、数百 Hz 以下の周波数では、波長が長いため、全反射の後もトンネル効果で地上に到達する。

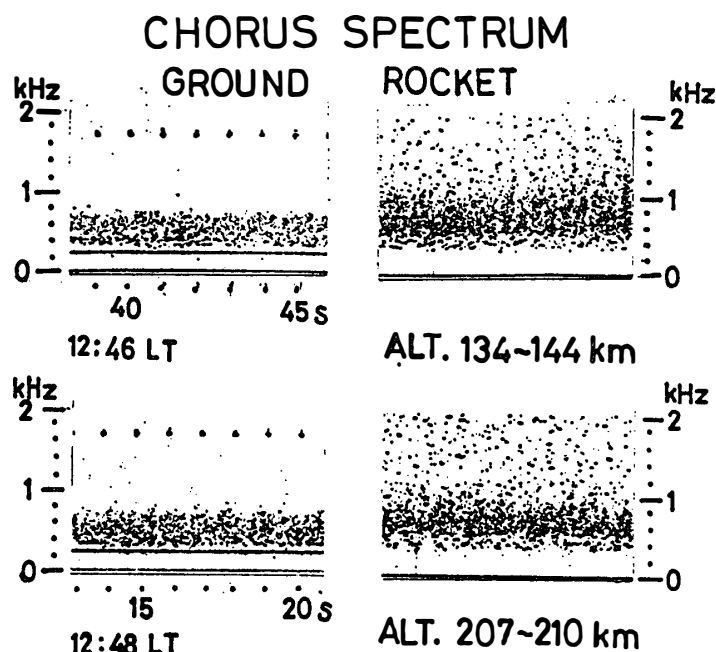


図1 ロケット (S-310JA-1) と地上で観測された 1 kHz 以下の VLF 放射のスペクトルの比較

Fig. 1. A comparison of VLF emission spectra in the frequency below 1 kHz, observed on the S-310JA-1 rocket and on the ground.

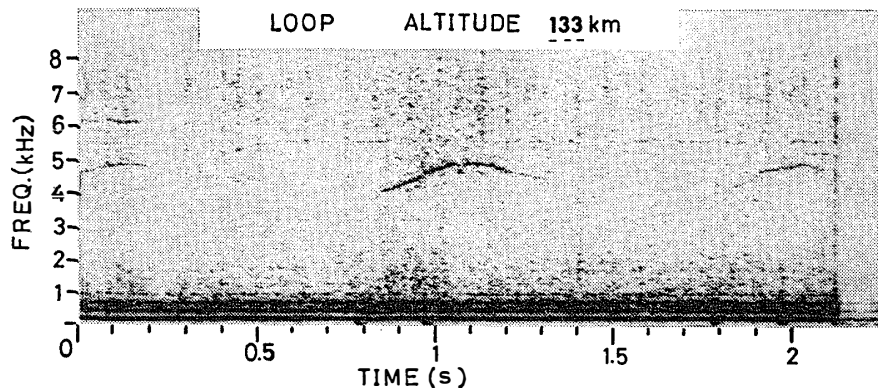


図 2 スピン周期で周波数の変化する VLF 波動現象 (S-310JA-1 で観測)

Fig. 2. VLF wave phenomena, the frequency of which varied with the spin period of rocket (observed by S-310JA-1).

この場合の減衰量の周波数特性や、衝突減衰の周波数特性は地上とロケットのスペクトルの相違をある程度定性的に説明できる (KIMURA *et al.*, 1978).

2.2. イオン音波あるいは静電的イオンサイクロトロン波現象

1号機ではその周波数、強度のスピン依存性から、ロケットのごく近傍で生起しているイオン音波、あるいは静電的イオンサイクロトロン波と思われる現象が検出されたが、これは 2.8 m のダイポールと同時にコア形ループアンテナによっても検出され、しかも、そのアンテナ出力で比べるとループアンテナの方が強いという奇妙な現象である (図 2) が、これは、ループアンテナがその垂直空中線効果である程度電界にも感度をもつこと、またダイポールアンテナ長 (2.8 m) に比べて十分短い波に対しては、ダイポールアンテナの実効長が非常に小さくなる (波長 10 - 数十 cm に対して数 mm となる) ことから理解され、その場合の波長が十数センチメートルでなければならないことからモードを考えると、イオン音波かイオンサイクロトロン波と考えられる。しかし両者を判別できるに足る情報は不十分である。ただラングミュアプローブや固定バイアスプローブに直流バイアス電圧 (+2.5~6V) を印加したときのみ現れていることから、これらのプローブに周辺から流れ込む電流による current driven instability によるものと考えられる (KIMURA *et al.*, 1979).

2.3. LHR ヒス

2号機では 6 kHz 近傍に lower cutoff をもつヒスがダイポールアンテナで観測された (図 3) が、ループアンテナおよび地上では観測されなかった。このロケットでは電子密度のデ

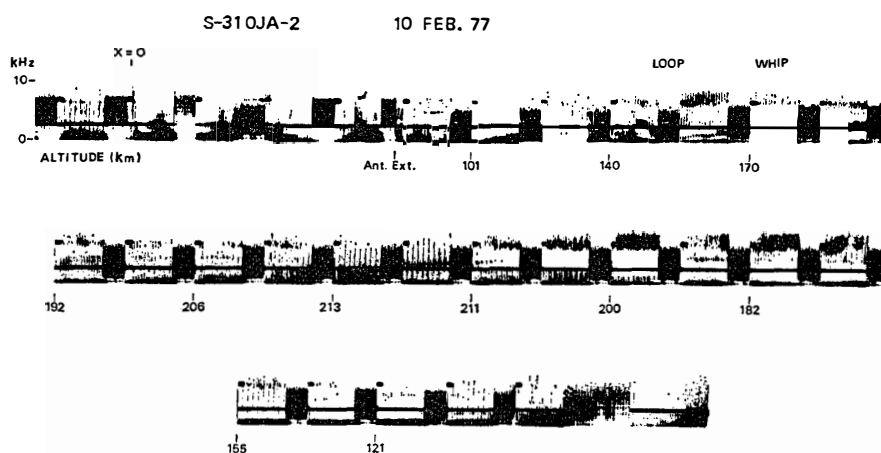


図 3 S-310JA-2 で観測された LHR ヒスと思われる波動現象
 Fig. 3. VLF wave phenomenon apparently LHR hiss, observed by S-310JA-2.

ータが得られなかったが、この現象の下限周波数を LHR 周波数と仮定し、また極域のイオン組成に関するデータを用いて電子密度を逆算すると $3-4 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ の程度となり、substorm 時の電子密度としてはもっともらしい値であることがわかる。したがってこの現象は LHR ヒスであろうと結論された (松尾他, 1979)。

3. 粒子観測との関連

3.1. S-310JA-1

1 号機では 10 keV 以下の電子フラックス測定器として ESL, ESM の 2 台の測定器が搭載された。後者はエネルギー分解能は前者より劣るが、時間分解能が良いので VLF 観測データとの比較を試みた。図 4 の上側は PWL のレベルデータ (広帯域受信信号の包絡線) の内アンテナに 3 V の DC バイアスをかけた D(3) モードの時間レベルの最大, 最小値を時間に対してプロットしたものであり、下図は ESM の 3-6 keV の電子のフラックスである。PWL レベルの最大値はスピン変調を強くうけた静電的なものであり、最小値はコーラス (または ELF ヒス) のレベルを代表しているものと考えられる。この図をよく見ると PWL レベルと電子フラックスはマクロには相関があるようにもみえる。しかしコーラスあるいは ELF ヒスは波源が相当遠方と考えられ、また一般に伝搬は non duct であろうから、良い相関がある必要はない。また静電的な波も必ずしも降り込み電子フラックスが直接の原因でもなさそうである。

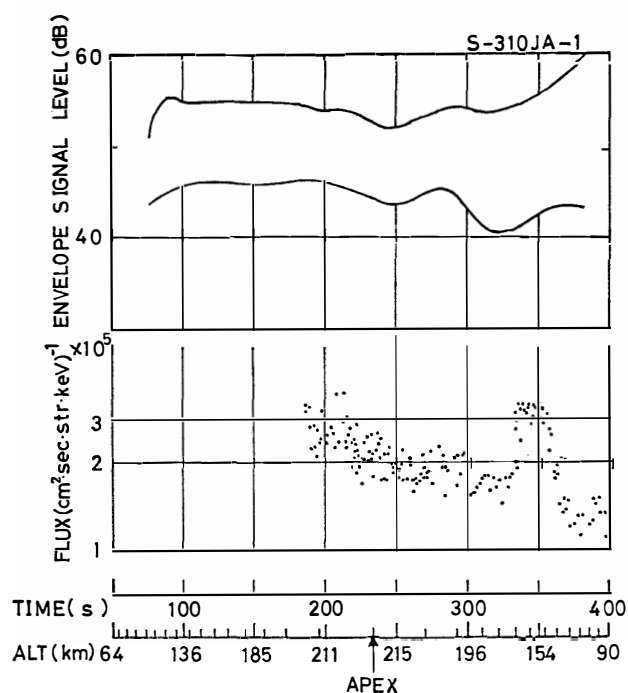


図 4 S-310JA-1 で観測された VLF ノイズ強度と 10 keV 以下の電子のフラックスとの関連

Fig. 4. Interrelation between the VLF noise intensity and the flux of energetic electrons below 10 keV in the S-310JA-1 experiment.

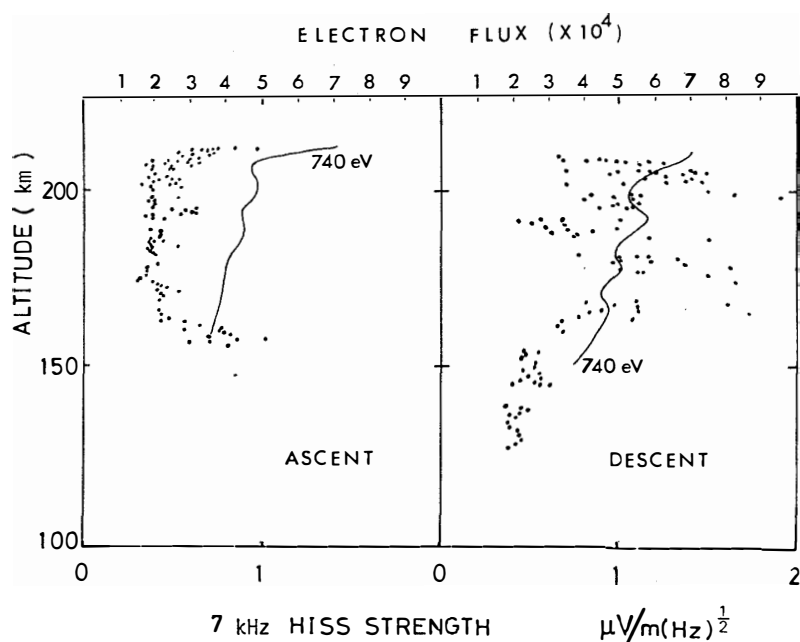


図 5 S-310JA-2 で観測された 7 kHz 付近のヒス強度と 740 eV の電子フラックスの相関
Fig. 5. Correlation between the 7 kHz hiss intensity and the electron flux of 740 eV in the S-310JA-2 experiment.

3.2. S-310JA-2

2号機には 10 keV 以下の電子フラックス用の ESL と 40 keV 以上のフラックス用に ESH が搭載されたが、全般的傾向としては上昇時のフラックスが下降時より高いという結果であった。

一方 PWL では 7 kHz 付近の LHR ヒスの強度を調べると図 5 のドットで示すように上昇時より下降時の方が強度が強い傾向をもっている。そこで ESL の測定結果のうち、上昇時より下降時の方がフラックスが若干高かった 740 eV についてそのフラックスの高さ変化を描くと、図 5 の実線のようになる。これをみると上昇時 apex 付近の増加、および下降時の高度の下降とともに減少する傾向は似ているがその相関はあまり良いとは言えない。

我々の観測したものが LHR ヒスとすれば上記の結果からみると直接電子ビームによって作られるという機構を考えたいが、積極的サポートには上記のデータは不十分である。

4. 結 言

S-310JA-1, 2号機では直接オーロラと VLF 現象との関連をみることはできなかったが、波動現象として電磁波的なコーラスあるいは ELF ヒス、静電的な LHR ヒス、イオン音波あるいは静電的イオンサイクロトロン波など、各種の波動現象が観測され、またそれらと電子フラックスとの関連のデータも得られたのは、貴重な結果である。S-310JA-3 号機については、この報告の範囲外であるが、地磁気環境も静穏でロケット、地上ともほとんど注目すべき現象が検出されていない。したがって4号機以降のロケット観測結果に期待したい。

謝 辞

本ロケット観測および地上観測を担当された第17次南極地域観測隊（芳野隊長，平沢副隊長）および第18次南極地域観測隊（楠隊長，国分副隊長）の隊員の方々に深甚なる謝意を表します。また、比較に用いられた粒子観測（ESL, ESM）のデータは、それぞれ東京大学宇宙航空研究所伊藤富造教授および久保治也氏，神戸大学松本治弥教授および賀谷信幸氏の観測によるものである。ここに記して謝意を表する。

文 献

- KIMURA, I., YAMAGISHI, H., MATSUO, T. and KAMADA, T. (1978): S-310JA-1 rocket observation on VLF emission spectra at Syowa Station in Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 9, 51-68.

KIMURA, I., MATSUO, T. and DOI, T. (1979): Characteristics of a dipole and a loop antenna for plasma waves observed by the S-310JA-1 rocket. Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.), **64**, 42-49.

松尾敏郎・木村磐根・鎌田哲夫 (1979) : S-310JA-2 で観測された VLF ヒスの特性. 南極資料, **64**, 50-56.

(1979年5月17日受理)