

北欧 S-520-12号機によるパルセイティングオーロラの観測

鶴田浩一郎・森岡 昭*・早川 基・町田 忍
向井 利典・長野 勇**・宮岡 宏***

Observation of the Pulsating Aurora by S-520-12 Rocket at Norway

By

K. TSURUDA, A. MORIOKA, H. HAYAKAWA, S. MACHIDA, T. MUKAI,
I. NAGANO, AND H. MIYAOKA

Abstract: Particle, field and wave observations in a pulsating aurora have been carried out using the sounding rocket S-520-12, at northern polar region, Norway, on February 26, 1990. The initial analysis has disclosed two new findings, (i) precipitating low energy electrons associated with the auroral patch region, which suggests the secondary local acceleration of the auroral particles, (ii) pulsating LF wave component that is generated by periodically precipitating energetic electrons above the auroral ionosphere.

概 要

S-520-12号機は、1990年2月26日ノルウェー・アンドーヤ基地より明け方の脈動性オーロラの中に打ち上げられた。ロケットは完璧に飛翔し、搭載科学観測器機は脈動性オーロラ (Pulsating Aurora) の中において電場・磁場・粒子・波動およびプラズマの観測を行った。観測データの初期的な解析の結果から、脈動性オーロラと強く関連した新しい型の波動および粒子現象が見いだされた。すなわち、i) パルセイティングパッチの中で見いだされる約200eVの加速電子、および ii) 電離層上部で生成された脈動性 LF 波動成分、である。

*：東北大学理学部

**：金沢大学工学部

***：国立極地研究所

1. 序

極域の夜空を彩るオーロラは、遠く磁気圏の深部で生じているプラズマ粒子の加速現象が地球大気のスクリンに写し出されたものと言われている。宇宙科学研究所では、このオーロラ現象の中に S-520 型ロケットを打ち上げ、オーロラの謎、さらに地球磁気圏で生じているオーロラ粒子の加速の機構およびこれにかかわる波動粒子相互作用を解明することを目的としたプロジェクトが進められてきた。本稿では、第 1 回北欧ロケット実験における科学観測の初期解析結果を報告する。

第 1 回のロケット観測では、朝方のディフューズオーロラを観測対象とし、特に脈動性オーロラ (Pulsating Aurora) に焦点が置かれた。これは、脈動性オーロラのこれまでの地上及びロケット観測 [1], [2], [3], [4], [5] をもとに提出された、脈動性オーロラの粒子加速過程 [6], [7] にはまだ多くの謎 [8], [9], [10] が残されており、粒子・波動・場の精密な観測が必要とされている事による。

2. 観測器機の構成および地上支援観測

搭載観測器機および地上支援観測項目を第 1 表に示す。また、発射地点および発射方向を示した地図を第 1 図に示す。発射点であるノルウェー・アンドーヤ基地の地理緯度経度は、 $69^{\circ}19'N$, $16^{\circ}01'E$, 磁気緯度および経度は $67^{\circ}15'N$, $114^{\circ}23'E$, また磁気地方時零時は 21:00 UT である。

ロケット打ち上げに際しては、地上支援観測としてアンドーヤロケット基地において、オーロラ高感度 TV 観測、地磁気 3 成分観測、宇宙雑音吸収観測、VLF 波動観測、および電離層垂直打ち上げ観測が行われた。またトロムズの EISCAT 施設では打ち上げ予定期間中スタンバイし、打ち上げ時に同時観測が行われた。さらに、わが国のあけぼの (EXOS-D) はこの期間強化観測を行い、オーロラおよびオーロラに伴う波動・粒子の観測を行った。

第 1 表

搭載科学観測装置	
磁場計測	(MGF)
電場計測	(EFD)
低周波プラズマ波動計測	(VLF)
高周波プラズマ波動計測	(PWH)
電子密度計測	(NEI)
オーロラ粒子計測	(ESP, IMS)
スターセンサー	(STS)
地上支援観測	
高感度オーロラテレビ観測	
オーロラ分光観測	
地磁気フラックスゲイト磁力計	
宇宙雑音吸収観測	
VLF 波動観測	
電離層垂直打ち上げ観測	

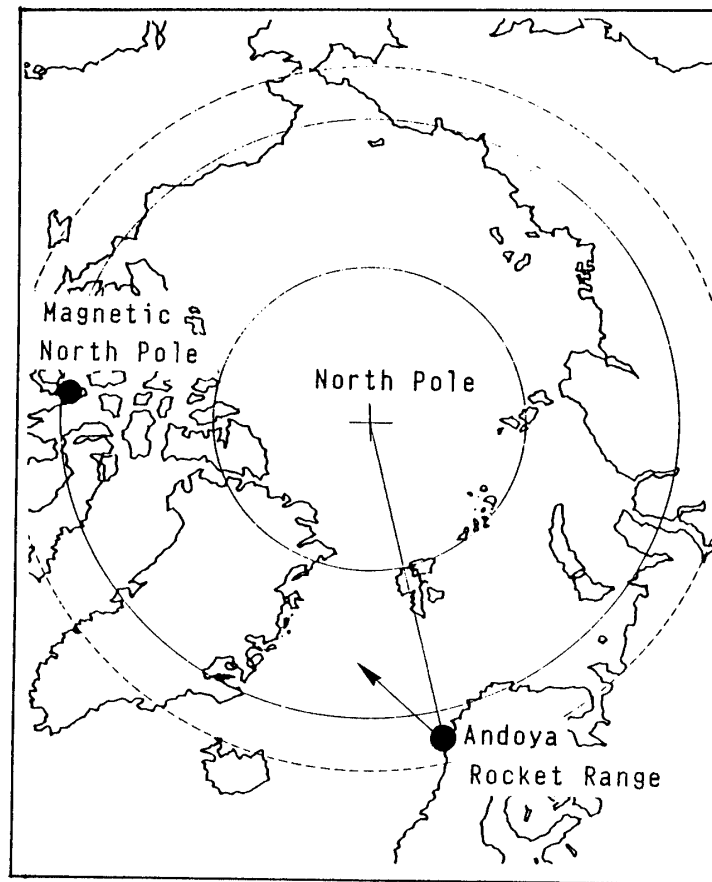


図1. ノルウェー・アンドーヤロケット基地と打ち上げ方向

3. 観測結果の概要

3. 1 ロケット打ち上げ時の地球物理的環境

第2図にロケット打ち上げ日をはさむ期間の地磁気活動度指数 Kp インデックスを示す。図の矢印で示される日に S-520-12号機は、打ち上げられたわけであるが、2月20日よりはいじまった地磁気活動の活発な期間にあたり、好条件のもと打ち上げられたといえる。第3図には、打ち上げられた時の地磁気強度変化と、宇宙雑音吸収データを示す。2月26日の磁気地方時04 h (UT 01h) に出現した地磁気サブストームの終相 (recovery phase) において、折しも上空に出現したパルセイティングオーロラの中に向かって S-520-12号機は無事打ち上げられた。

3. 2 ロケット飛翔軌道に沿った電子密度分布

インピーダンスプローブ (NEI) 計測によって得られた、ロケット飛翔軌道に沿った電子密度分布を第4図に示す。上昇時、100km-120km 高度において夜間にもかかわらず、 $1.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ の電子密度が観測され、オーロラ粒子による電離がかなり強く生じていたことを示している。尚、EISCAT (アンドーヤ基地より約150km 北東) による同時電離層観

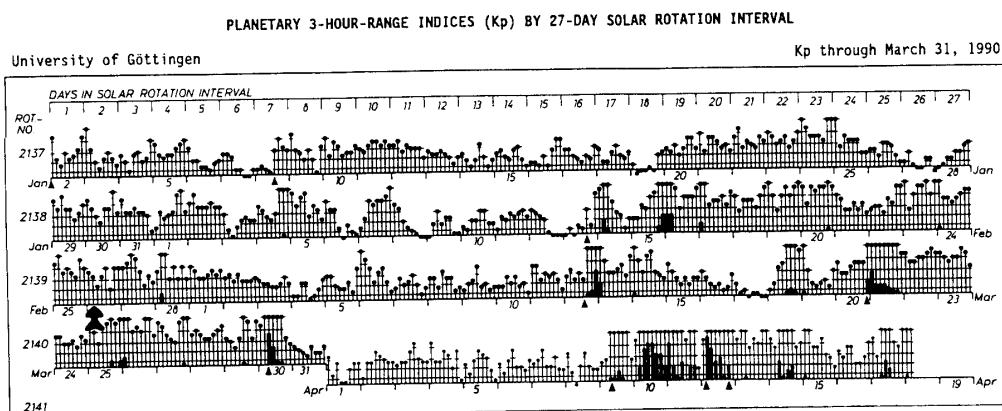


図2. 北欧ロケットキャンペーン期間前後の地磁気活動指数. ロケットは2月26日(矢印)比較的地磁気活動度の高い日に打ち上げられた.

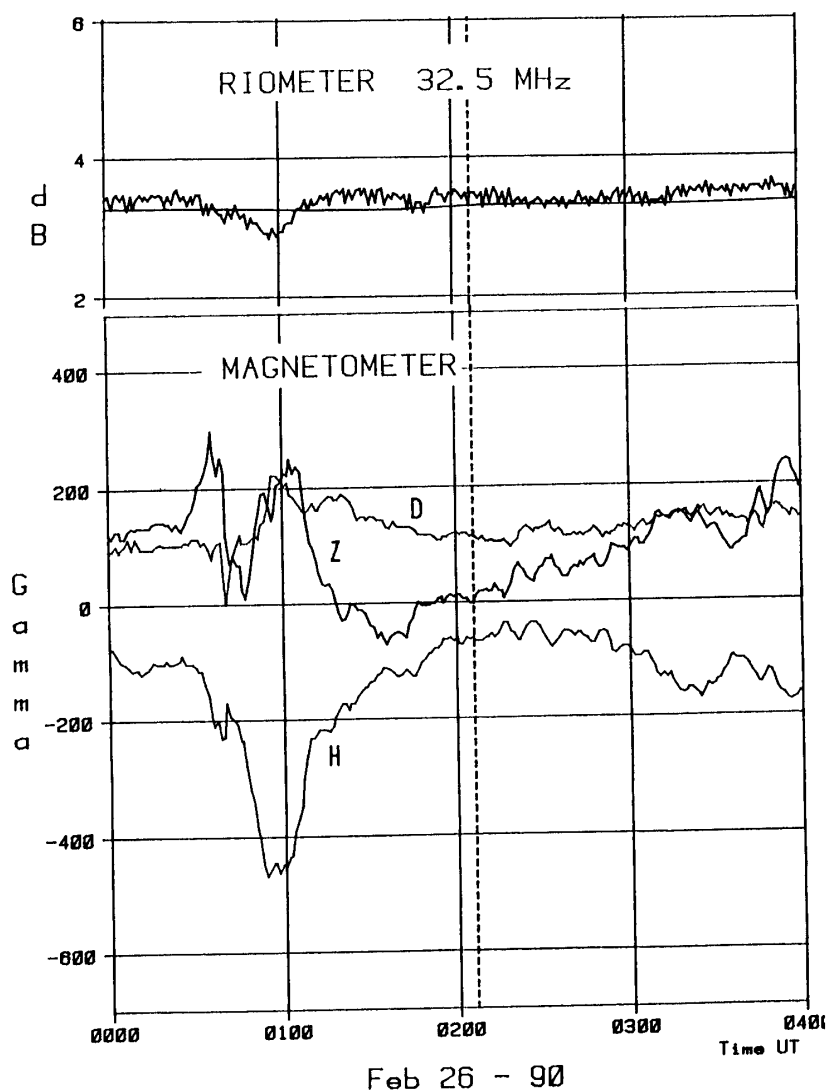


図3. 打ち上げ時刻(点線)前後の宇宙雑音吸収データ(上)と地磁気データ(下)

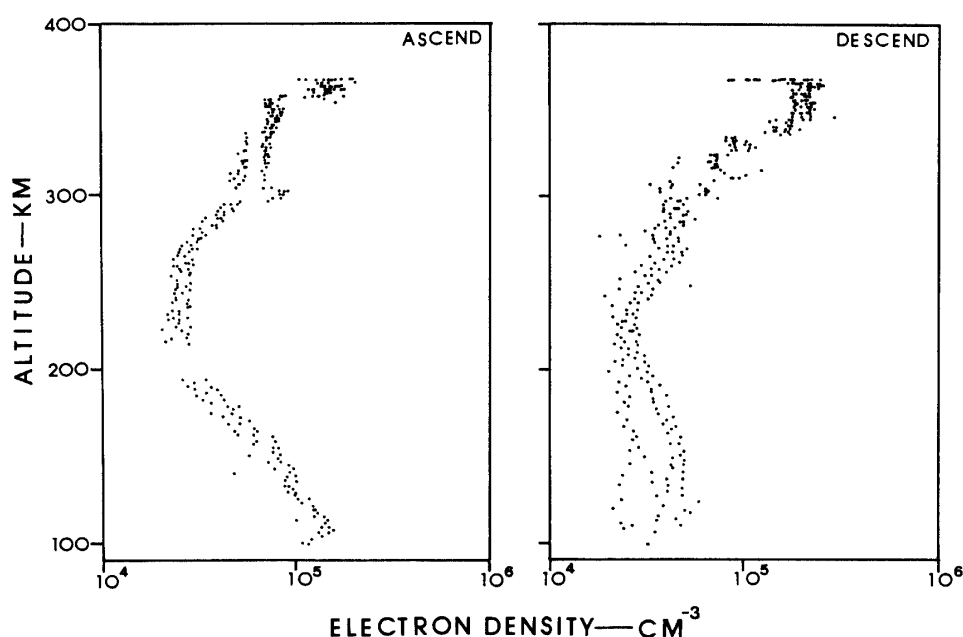


図4. インピーダンスプローブ (NEI) によって得られた電離層電子密度分布データ.

測のデータも、ロケットによる結果とほぼ同様のプロファイルを示し、かなり広い範囲にわたって、一様な電離層構造であったことを示している。

3. 3 地上 TV カメラによるパルセイティングオーロラ

第5図に、地上の高感度オーロラ TV 映像のデータを解析して得られた、ロケット飛翔軌道近傍の固定した5点のオーロラ光度変動を示す。

場所によってパルセイティングオーロラの出現の仕方は変わるが、Flight time 200–300秒及び500–600秒付近にはっきりとした周期的オーロラ強度変動（パルセイティングオーロラ）が見られる。

この周期は平均的に14–16秒であった。

3. 4 パルセイティングオーロラ中の粒子スペクトル

オーロラ粒子計測装置 (ESP) は80eV から16keV の電子のエネルギースペクトラムおよび固定エネルギーチャンネル (1, 4, 10, 25keV) について20msec の時間分解能で計測した。第6図にロケット打ち上げ後440–520秒の間の降下電子エネルギーフラックスおよび位相空間における分布関数を示す。降下電子は3つの成分からなっていることが示される。まず、約200eV 以下のエネルギー域に、Maxwell分布からはずれた、局所加速を示唆するようなスペクトラムが見いだされる。このエネルギー帯域における粒子フラックスとパルセイティングオーロラの関連はほとんどこれまで注目されていなかったもので、本実験が発見した新しい現象の1つである。この粒子の加速過程については、オーロラパッチの近傍の電気伝導度の不均質に起因するアルフベン波による加速が、斎藤等[11]によって検討されている。200eV から8 keV にわたるエネルギー範囲では Maxwell分布に従った磁気圏からの降り込み電子成分が見いだされる。またこのエネルギー帯域より高いエネルギー範囲では、スペクトルの形が power-law に従うようなスペクトルを示し、フラックスは後述するよう

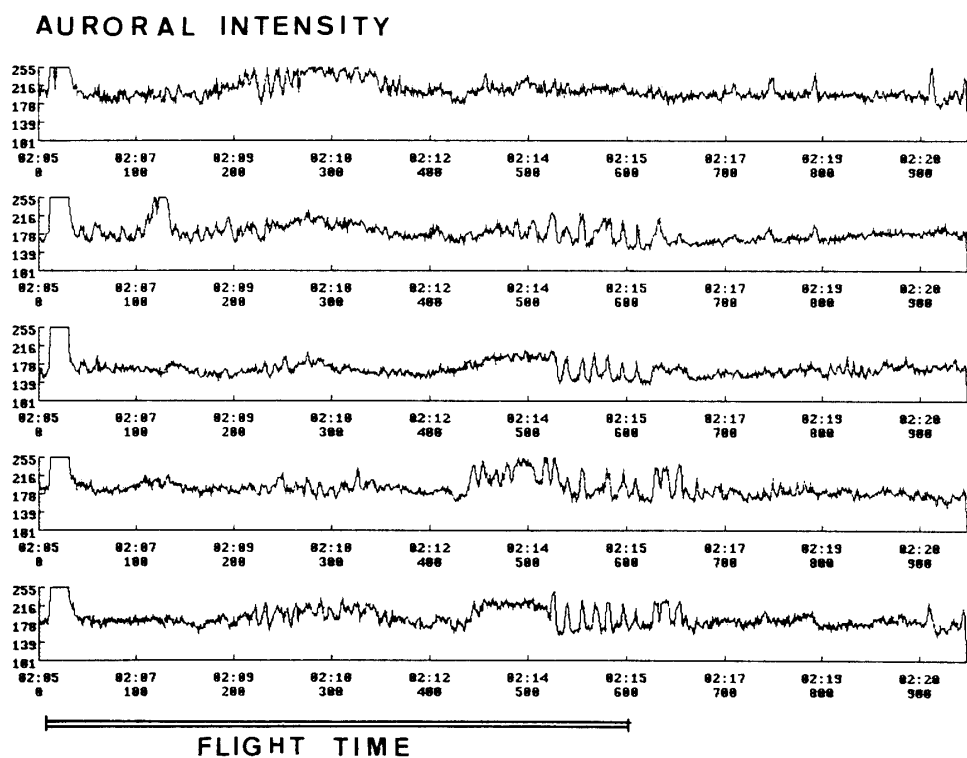


図5. 地上高感度TVカメラデータによる、ロケット軌道近傍のオーロラ光度の変動

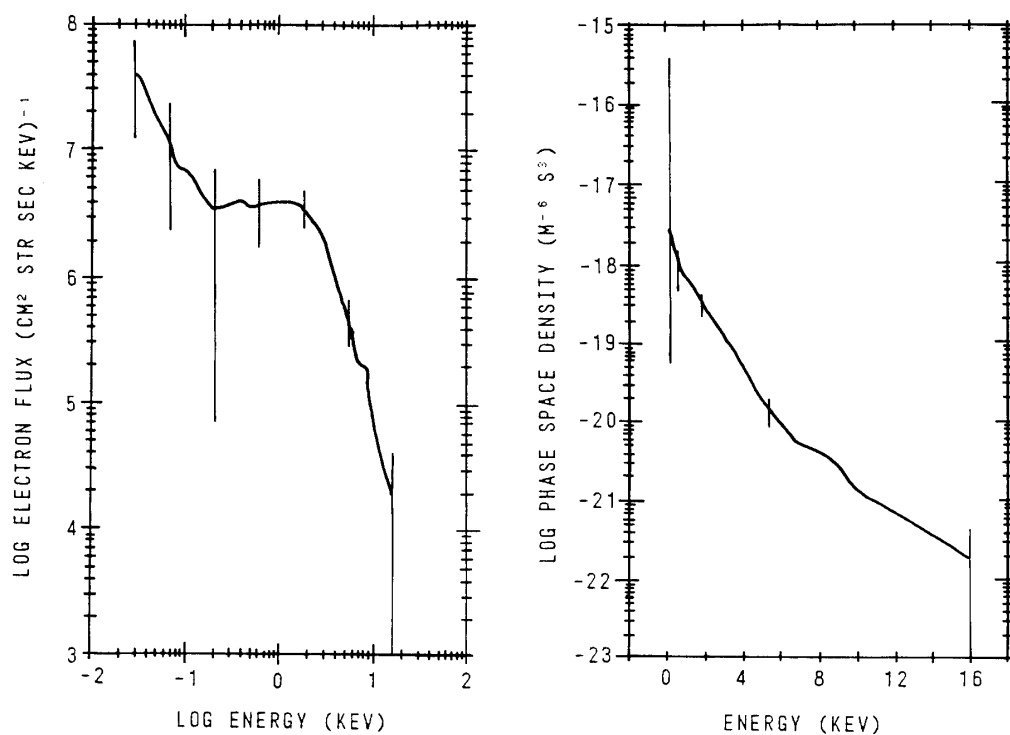


図6. オーロラ粒子計測装置による降下電子のエネルギーフラックスおよび分布関数

に脈動性の時間変化を示した。

3. 5 HF 波動にあらわれた脈動性 (パルセイティング) 放射現象

LF/HF 波動受信機 (PWH) は、周波数20kHz—5 MHz の電界成分をダイポールアンテナによって観測した。受信信号は、周波数分解能 1 kHz, 時間分解能1.28秒の機上周波数分析装置によって処理される。この装置による観測から、40kHz から140kHz の周波数帯にわたって脈動性の強度変動を持つ放射現象が検出された。この波動の周波数77kHz の成分と先述のオーロラ強度変動とを示したのが第7図である。ロケットで観測した波動は特に、flight time 200—300秒及び500秒付近の、オーロラ強度の脈動的変動が顕著になる時間帯ではその変動強度が大きくなっているが、ほぼ全 flight 時間にわたって平均周期約12秒で強度変動を示していることがわかる。

この観測された波動とオーロラの activity の違いは、観測している波動は伝搬性のものであり、ロケット近傍のオーロラが変動していない場合でも、ロケットから離れた別のオーロラパッチの脈動変動に伴う電波放射を受信しているものとして解釈される。

さらにこの LF 帯の波動の強度変動と前述の降下電子のフラックス変動とを比べたものを第8図に示す。粒子については3つのエネルギー帯に分けたフラックス変動が同図の上部3欄に示されている。最下段は LF 波動の77kHz 成分の強度変動である。粒子のフラックス変動のうち変動の顕著なエネルギー範囲である 8—16keV のもの (同図上段) と77kHz 波動との対応を見ると、変動の位相については1対1の対応は見られないが、両者の変動の周期はかなり近いものであることが指摘できる。

このようなオーロラ粒子やオーロラ強度の脈動性変動に伴う LF 帯波動についてはこれまで報告がなく、S-520-12号機による実験が初めて見いだした現象である。この LF 波動は、

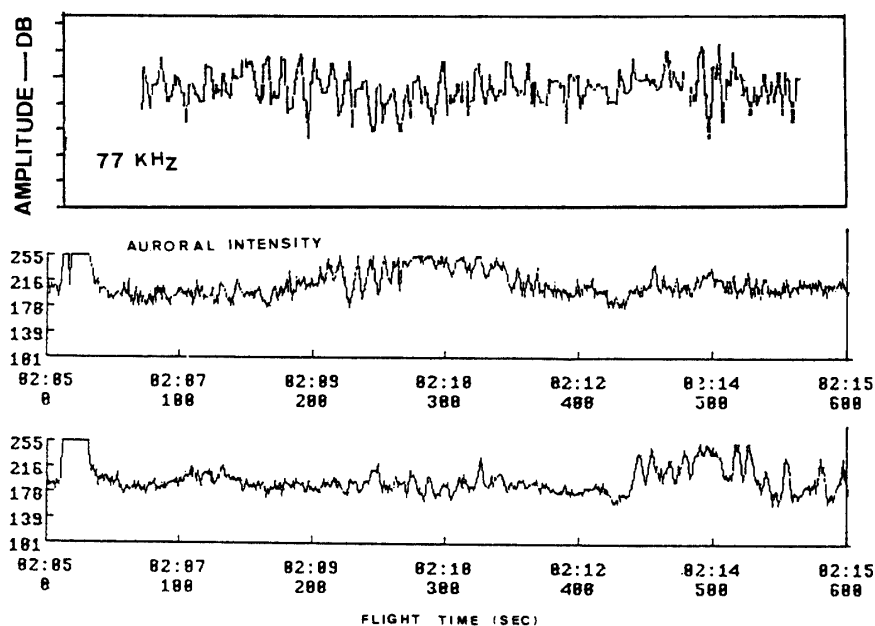


図7. PWH によって観測された77kHz の波動の強度変動とオーロラの光度変動

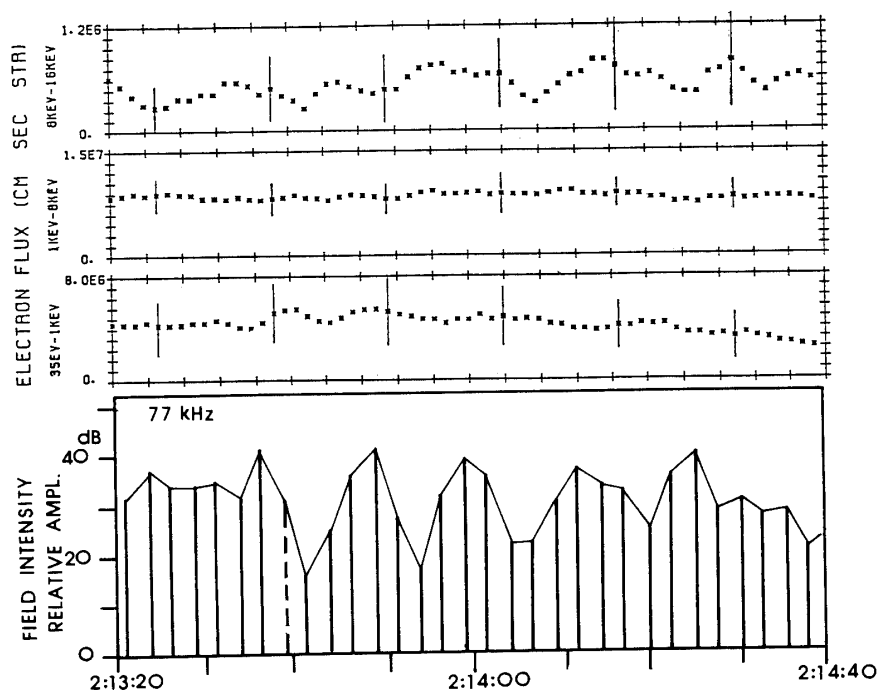


図8. 降下粒子のフラックス変動と77kHzのLF波動の強度変動

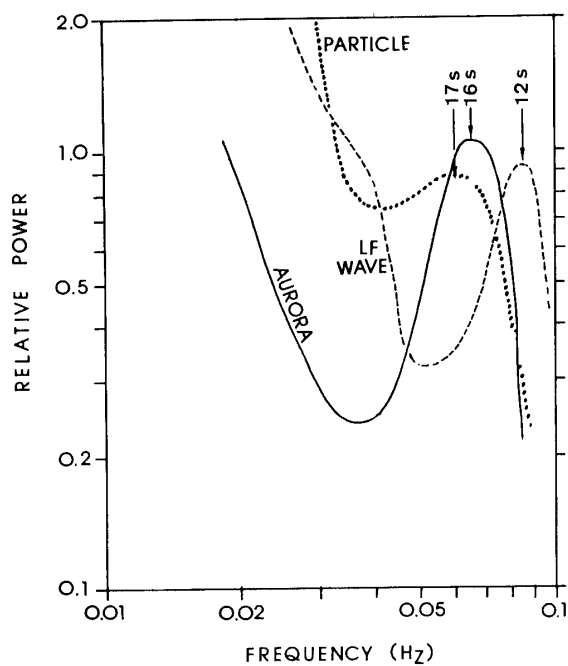


図9. 波動強度 (WAVE), オーロラ光 (AURORA) および降下粒子フラックス (PARTICLE) の変動周期スペクトラム

その観測高度のプラズマパラメータ（プラズマ周波数および電子サイクロトロン周波数）からホイスターモード波であること、さらにその発生高度はロケットよりも高々6000km上空と推定される。こうしたことから、この波動は、脈動しながら降下する比較的高エネルギー粒子によるインコヒーレント放射ヒスであると考えられる。詳細な検討は、現在進められている観測波動強度と降下粒子による放射スペクトル計算の比較によらねばならない。

3. 6 波動・粒子・オーロラ光の脈動周期スペクトル

観測された LF 波動、降下粒子フラックスおよびオーロラ強度変動のスペクトルを第 9 図に示す。3 者の変動周期は、波動が12.5秒、オーロラが16秒と求められる。また粒子の降下周期は明瞭な周期を持たないが、約17秒と求められる。この変動周期の違いは、現在検討中である。波動については全 flight 時間にわたってのスペクトルであり、オーロラについては500秒近傍の約100秒間のスペクトルであるということをもまず検討する必要があるが、また、オーロラと波動の変動の間に物理的に周期差の生じる可能性も残されている。

4. 結 論

S-520-12号機によるパルセイティングオーロラの中の粒子及び LF-HF 帯プラズマ波動の観測は、プラズマ密度の計測とともに、きわめて良好なデータを得ることができた。データ解析の結果、パルセイティングオーロラに伴って周波数40kHz-140kHz の波動が放射されていることが示された。この波動はこれまでに報告されていない新しい現象である。また降下粒子の低エネルギー成分にオーロラ粒子の局所的加速を示唆する現象が観測された。データの解析は更に継続中であるが、オーロラの中における波動と粒子の相互作用に関する新しい知見が得られるものと期待される。

参 考 文 献

- [1] G.R. Creswell and T.N. Davis, J. Geophys. Res., 71 (1966) 3155
- [2] R.A. Helliwell and S.B. Mende, J. Geophys. Res., 85 (1980) 3376
- [3] A.W. Yau, B.A. Whalen and D.J. McEwen, J. Geophys. Res., 86 (1981) 5673
- [4] I. Sandahl, KGI Report No 185 Oct. 1984
- [5] T. Yamamoto and T. Oguti, J. Geophys. Res., 87 (1982) 7603
- [6] G.T. Davidson, J. Geophys. Res., 84 (1979) 6517
- [7] G.T. Davidson, J. Geophys. Res., 91 (1986) 4413
- [8] N.B. Brown, T.N. Davis, T.J. Hallinan and H.C. Stenbaek-Nielsen, Geophys. Res. Lett., 3 (1976) 403
- [9] H.C. Stenbaek-Nielsen and T.J. Hallinan, J. Geophys. Res., 84 (1979) 3257
- [10] J.-E. Wahlund and H.J. Opgenoorth, J. Geophys. Res., 94 (1989) 17223
- [11] 齊藤義文, 町田忍, 向井利典, 第88回地球電磁気・地球惑星圏学会講演予稿集, 1990 P-48