

# S-210JA-20, 21号機実験

## — 概 括 お よ び ま と め —

福 西 浩\*

### S-210JA-20 and 21 Rocket Experiments — General Introduction and Summary —

Hiroshi FUKUNISHI\*

**Abstract:** The S-210JA-20 and 21 rockets were launched into auroras at 2340 UT on June 24, 1976 and at 0023 UT on July 26, 1976, respectively. Both rockets were launched when the ISIS satellite was passing overhead near Syowa Station. In this report the scientific subject of these experiments is described first and the relation-ship among VLF waves recorded simultaneously at the three different altitudes (the ground, ~60–120 km, and ~1000–3000 km) is briefly discussed. The relation of VLF waves and electrostatic plasma waves in the 0.1–10 MHz range measured on the rockets to precipitating electrons is also summarized.

**要旨:** 1976年6月24日 2340 UT, および同年7月26日 0023 UT に昭和基地よりオーロラ中に打ち上げられた S-210JA-20, 21号機ロケット実験の結果を概括する。この実験は地上, 衛星観測を含む立体的同時観測として実施され, 3つの異なる高度(地上, 60–120 km のロケット高度および 1000–3000 km の衛星高度)での VLF 波動の記録が得られた。またロケットでは, HF 帯プラズマ波動データ, 40 keV 以上の電子のフラックスとピッチ角分布のデータ, および電子密度・温度のデータが得られた。この報告ではこれらのデータの関連性についてのまとめを行う。

## 1. は じ め に

南極における IMS 計画の最大のねらいは, 地上, ロケット, 衛星という3つの異なる高度で, オーロラやプラズマ波動等の超高層現象を観測することにより, それらの発生機構を明らかにすることであった。1976年4月より昭和基地で人工衛星 ISIS の受信がルーチンに行われるようになり, こうした立体的同時観測を実施する態勢が整った。そこでオーロラ中の波動 - 粒子の相互作用の解明を目的とした S-210JA-20, 21 号機を, ISIS 衛星が上空を

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

通過する時に合わせて打ち上げることが計画された。しかしこの実験を成功させるには、以下の7つの条件すべてが満たされていることが必要であり、ロケット発射のチャンスをとらえることは非常に困難な作業であった。

- 1) ロケットおよび搭載計器がすべて正常に作動していること。
- 2) 天候条件として晴れていること。
- 3) 風速が 8 m/s 以下であること。
- 4) 地磁気が荒れ、ロケット発射方向にオーロラが出現していること。
- 5) ロケット発射時に人工衛星 **ISIS** が上空を通過し、同時観測データが得られること。
- 6) みずほ基地、昭和基地の地上観測装置が順調に作動していること。
- 7) 地上で VLF 帯自然電波が観測されていること。

とりわけ、1976年は太陽活動の極小期に当たり、昭和基地上空に位置するような強いオーロラの出現は非常にまれだったので、4番目の条件は大きな制約になった。また、**ISIS** 衛星からの観測データを受信するためには、国立極地研究所、郵政省電波研究所を通じてカナダの **CRC** にコマンド依頼をあらかじめ出しておかねばならないので、5番目の条件も発射のための厳しい制約となった。しかし、地磁気活動の27日周期性を十分生かし、地磁気変動が大きく、オーロラ出現が活発になる時期を1カ月以上前から予想し、それに合わせて人工衛星 **ISIS** のコマンドを依頼し、また、その時期に合わせてロケット搭載計器の点検、組み立てを進め、2), 3) の気象条件が満たされればいつでも発射できる態勢をとった。そして、**S-210JA-20** 号機は、1976年6月24日 2340 UT (現地時間25日午前2時40分) に、21号機は、7月26日 0023 UT (現地時間26日午前3時23分) に、両機ともこれらすべての条件を満たして発射され、実験は成功した。

この **S-210JA-20**, 21 号機に関するイベントセッションの目的は、両機の実験結果を検討し、オーロラ粒子の入射に伴って発生する波動現象の発生機構を総合的に捕らえることである。この報告では、ロケット実験の概要を述べ、得られた観測結果の相互の関係についてのまとめを行う。

## 2. ロケット実験の概要

**S-210JA-20** 号機は極側に向けて、方位角  $135^\circ$ 、仰角  $82^\circ$  で発射され、最高到達高度 117.9 km に達した。一方 21 号機は低緯度側に向けて方位角  $315^\circ$ 、仰角  $82^\circ$  で発射され、最高到達高度 115.8 km に達した。表1にこれらロケットの飛しょうデータを、図1にロケットの

表 1 S-210JA-20, 21 号機飛しょうデータ  
 Table 1. List of the flight record of the S-210JA-20 and 21 rockets.

項 目	S-210JA-20	S-210JA-21
飛しょう年月日	1976. 6. 24	1976. 7. 26
飛しょう時刻	23h 40m 30s UT	00h 23m 00s UT
発射上下角	82°	82°
発射方位角	135°	315°
最大到達高度	117.9 km	115.8 km
最大到達高度時間	166 s	163 s
水平到達距離	142.7 km	144.7 km
全飛しょう時間	5 min 26 s	5 min 26 s
落下方位	85.3°	344.6°
スピン開始時間	X+46 s	X+45 s
脱頭 (開頭) 時間	X+60 s	X+60 s
テレメータ受信時間	5 min 26 s	5 min 23 s
頭胴部重量	40.5 kg	40.4 kg
槽内温度	18°C	25°C
推進温度	7°C	26°C
発射時地上気温	-26.7°C	-22°C
発射時地上風速	5 m/s • NNE	7.8 m/s • NNE
天 候	晴	晴
観測計器	PWL PWH NEL • TEL ESH GA	PWL PWH NEL • TEL ESH GA

軌跡を示す。この図より明らかなように、20, 21 号機とも実際の飛しょう方向は、打ち上げ時の方位角から大きくずれ 85.3°, および 344.6° であった。これは、20, 21 号機打ち上げ時の地上風速が 5 m/s および 7.8 m/s とかなり大きかったためと思われる。20 号機の実験では、図 2a に示されるように ISIS-2 衛星が、ロケット飛しょう中昭和基地の東約 1200 km を高度 1450 km で通過し、またその20分後には、ISIS-1 衛星がほぼ同じ軌道を高度約 2000 km で通過した。21 号機の実験では図 2b に示されるように、ロケット飛しょう時に ISIS-1 衛星が、昭和基地のほぼ真上を高度約 3450 km で通過した。

S-210JA-20, 21 号機に搭載された測定器は、以下の 5 つである。

- 1) VLF 帯波動測定器 (PWL): 0.2-10 kHz 帯の電波・磁場スペクトルの測定。
- 2) HF 帯波動測定器 (PWH): 0.1-10 MHz 帯電場スペクトルの測定。

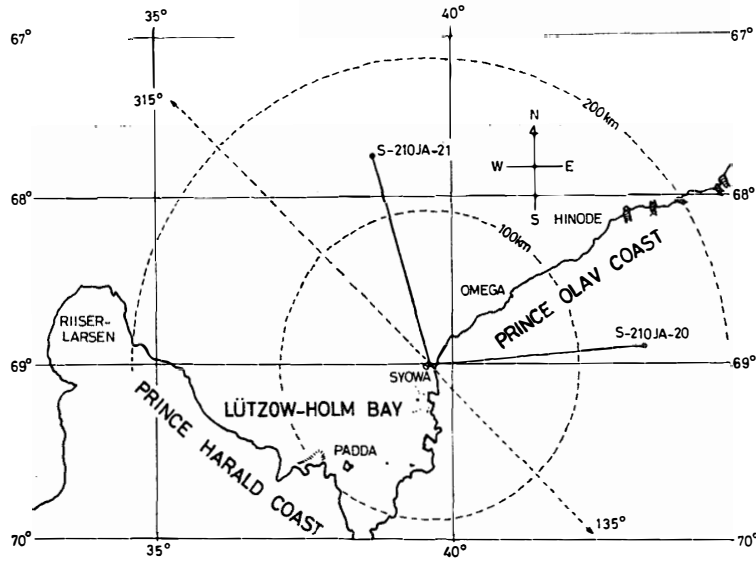


図 1 S-210JA-20, 21 号機の軌跡

Fig. 1. Ground tracks of the S-210JA-20 and 21 rockets.

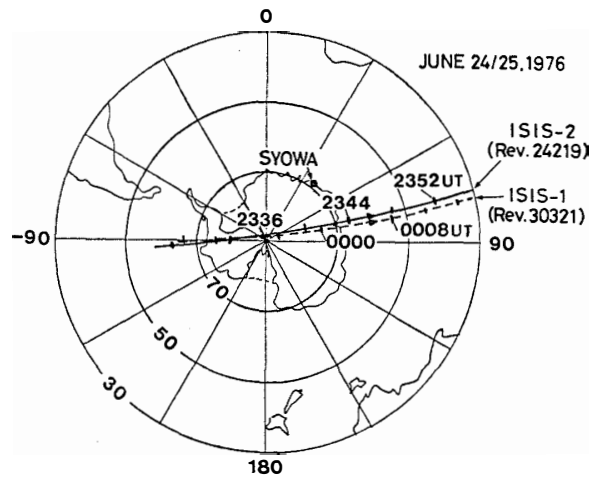


図 2a S-210JA-20 号機実験の際の ISIS-1, 2 衛星の軌道図

Fig. 2a. Ground tracks of the sub-satellite points of ISIS-1 and 2 in the S-210JA-20 experiment.

- 3)  $>40$  keV 粒子測定器 (ESH): 40 keV 以上の電子のフラックスおよびピッチ角分布の測定.
- 4) 電子密度・温度測定器 (NEL・TEL): ラングミュアプローブによる電子密度・温度の測定.
- 5) 地磁気姿勢計 (GA): フラックスゲート磁力計によるロケット姿勢の測定.

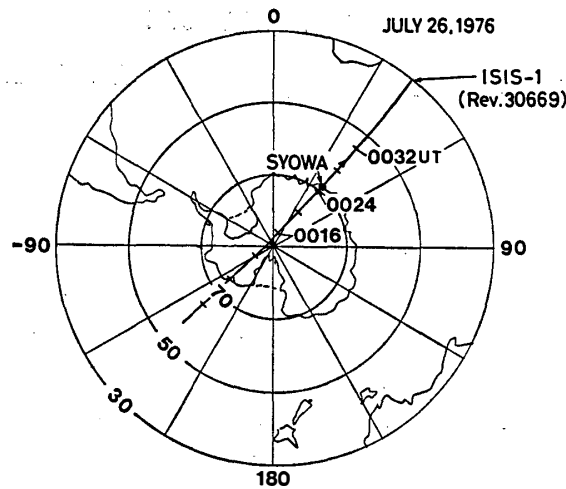


図 2b S-210JA-21 号機実験の際の ISIS-1 衛星の軌道図

Fig. 2b. Ground tracks of the sub-satellite points of ISIS-1 in the S-210JA-21 experiment.

一方, ISIS-1, 2 には, 0.2-30 kHz 帯の電場スペクトルを測定する観測器が搭載されている. VLF 帯波動測定器 (PWL) の詳細な観測結果は, KIMURA *et al.* (1980) により, HF 帯波動測定器 (PWH) の結果は, 大家他 (1980) により, また電子密度温度測定器 (NEL・TEL) の結果は, 宮崎他 (1980) によりこの報告の後に引き続いて報告されている. また  $>40$  keV 粒子測定器の結果は, 小玉他 (1980) により, 地磁気姿勢計 (GA) の結果は青山・遠山 (1980) によりほかのロケットの観測結果と一緒にして報告されている.

### 3. ロケット発射時の状態

図 3-5 に示された AE index およびオーロラ帯に位置する10の観測所 (Syowa Station, Mizuho Station, Tixie, Dixon, Kiruna, Reykjavik, Narssarsauq, Great Whale River, Fort Churchill, Meanook) および Kiruna とほぼ同じ経度で中緯度に位置する Kiev, Tbilisi で得られた地磁気変化 ( $H$  成分) から明らかなように, 20, 21 号機ともにサブストームの expansion phase に打ち上げられた. とりわけ20号機の打ち上げは6月24日 1635 UT の SSC で始まった磁気嵐の最中であり, 興味深い. ロケット発射前後のオーロラの状態は図 6a, b の全天カメラ写真に示される. 20号機は全天に広がる breakup aurora に打ち込まれた. ロケットは何本ものアークを横切って飛しょうしたことが分かる. 一方 21 号機は, diffuse なオーロラの低緯度側 edge を通過した. このときのオーロラ強度は, 図 7 の地磁気子午線掃天型

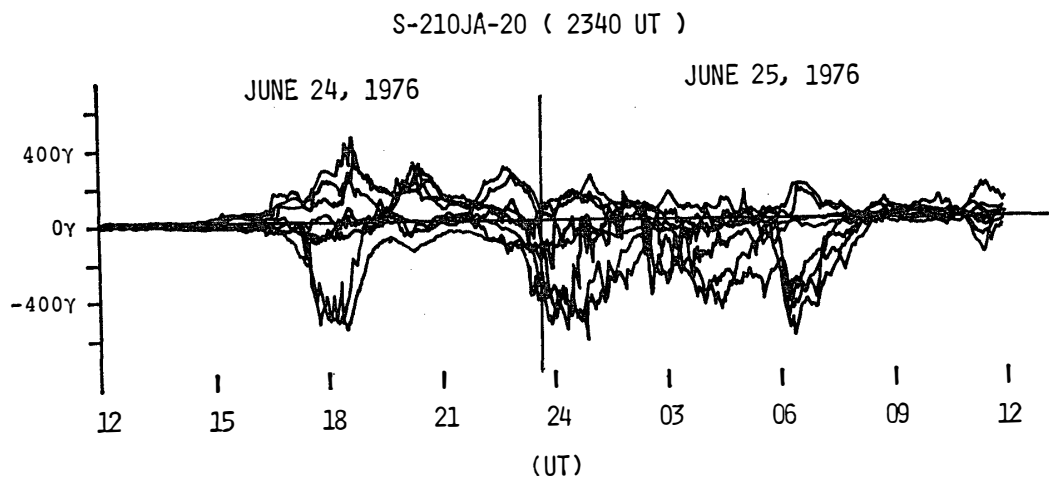


図 3a S-210JA-20 号機発射前後の AE index. ロケット発射時刻 (2340 UT) は垂直線で示されている

Fig. 3a. AE index in the S-210JA-20 experiment. Launching time of the rocket (2340 UT) is represented by a vertical line.

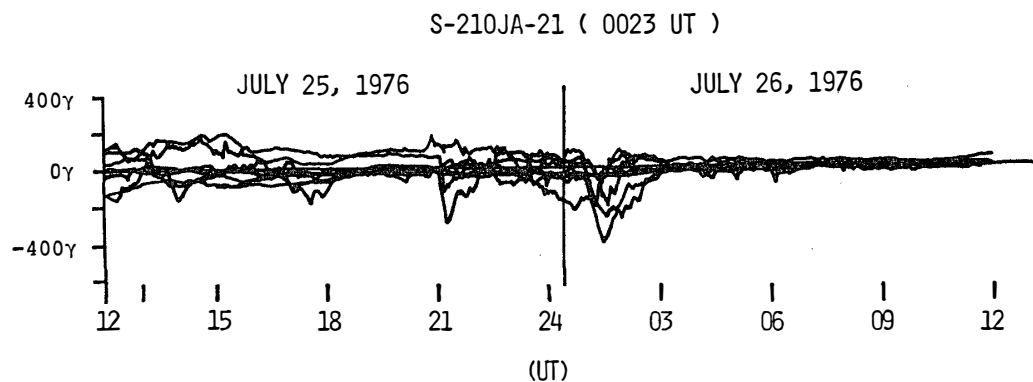


図 3b S-210JA-21 号機発射前後の AE index. ロケット発射時刻 (0023 UT) は垂直線で示されている。

Fig. 3b. AE index in the S-210JA-21 experiment. Launching time of the rocket (0023 UT) is represented by a vertical line.

フォトメータの記録で与えられる。20号機では、 $5577 \text{ \AA}$  でのオーロラ強度のピークは  $35 \text{ kR}$ 、ロケットが通過した場所付近でのオーロラ強度は約  $4\text{--}12 \text{ kR}$  である。一方21号機では、ピークは  $6 \text{ kR}$ 、ロケット通過場所のオーロラ強度は約  $2 \text{ kR}$  である。

このほかの地上で観測された超高層現象は図 8, 9 で与えられる。20号機飛しょう時の CNA は、約  $0.3\text{--}0.5 \text{ dB}$ 、地磁気脈動は Pi タイプを示す。また  $8 \text{ kHz}$  強度の上昇にみられ

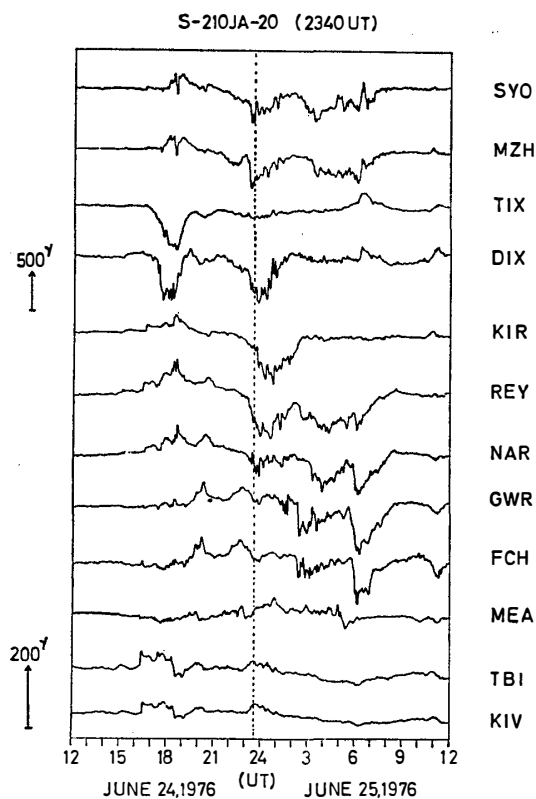


図 4a S-210JA-20 号機発射前後の世界的な地磁気  $H$  成分変化. ロケット発射時刻 (2340 UT) は, 破線で示される.

Fig. 4a. Geomagnetic  $H$ -component variations recorded at ten stations (Syowa Station, Mizuho Station, Tixie, Dixon, Kiruna, Reykjavik, Narssarssauq, Great Whale River, Fort Churchill and Meanook) in the auroral zone and two stations (Kiev and Tbilisi) at middle-latitude before and after the launching of the S-210JA-20 rocket. The launching time is given by a vertical dotted line.

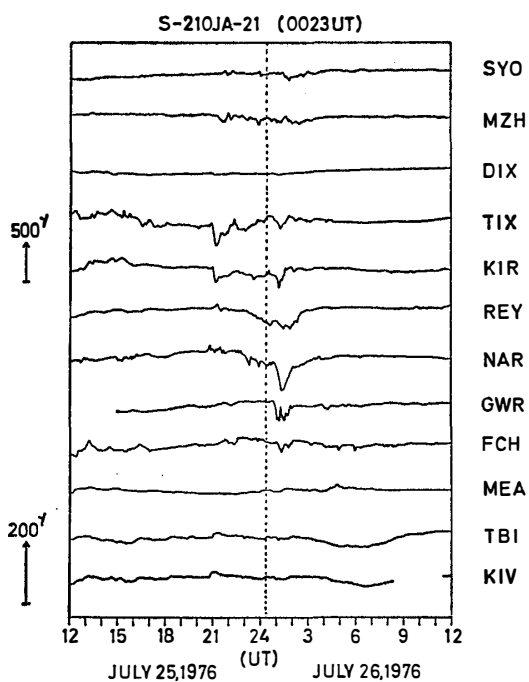


図 4b S-210JA-21 号機発射前後の世界的な地磁気  $H$  成分変化. ロケット発射時刻 (0023 UT) は破線で示される.

Fig. 4b. Geomagnetic  $H$ -component variations recorded at ten auroral-zone stations and two middle-latitude stations before and after the launching of the S-210JA-21 rocket. The notation is the same as that in Fig. 4a.

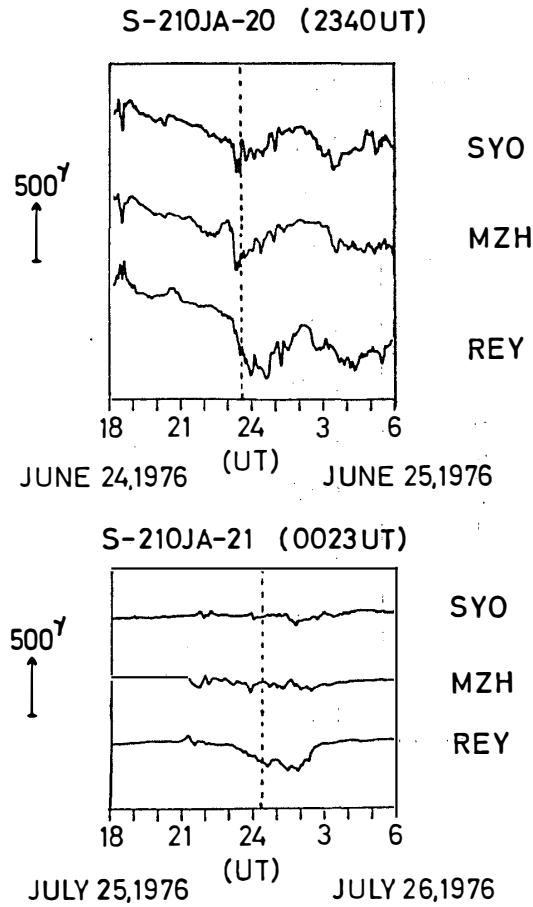


図 5 S-210JA-20, 21 号機発射前後における昭和基地, みずほ基地およびその共役点レイキャビックで記録された地磁気  $H$  成分変化. ロケット発射時刻は破線で示される.  
 Fig. 5. Geomagnetic  $H$ -component variations recorded at Syowa Station, Mizuho Station and Reykjavik, which is located near the conjugate point of Syowa Station, before and after the launching of the S-210JA-20 and 21 rockets. The launching time is given by a vertical dotted line.

るように, 弱いオーロラヒスが観測された. 一方21号機飛しょう時の CNA は 0.2 dB, 地磁気脈動は, Pi タイプで, 8 kHz 強度の上昇からヒスが起きていることが分かる.

#### 4. ロケットで観測された波動・粒子・電子密度

##### 4.1 S-210JA-20 号機実験

20 号機飛しょう時, 地上で観測されたオーロラヒスはロケットでも観測された. KIMURA



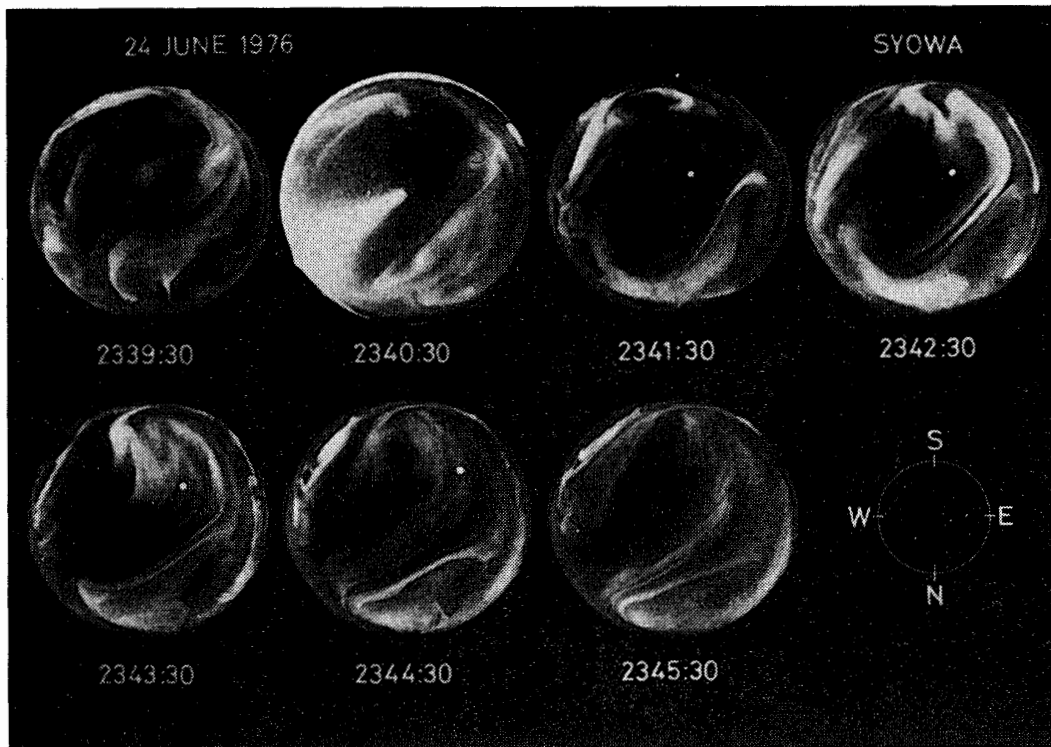


図 6a S-210JA-20 号機飛しょう中のオーロラ全天カメラ写真。ロケットの位置は写真の中で白い点で示される

Fig. 6a. All-sky photographs during the flight of the S-210JA-20 rocket. The location of the rocket is represented by a white spot.

*et al.* (1980) は観測された電場成分と磁場成分の比が、宮崎他 (1980) の 20 号機での電子密度観測結果を用い full wave 法で計算したホイスラーモード波の比と一致することから、この波はホイスラーモードの波であると結論した。さらに地上で観測されたヒスは、ロケットで観測されたヒスより約 16 dB、強度が弱くなっていたが、これも電離層通過の際の減衰量とうまく一致することを示した。

奥谷他 (1979) および小玉他 (1980) の  $>40$  keV 電子の観測によれば、ロケットがオーロラのアークを横切るときに、フラックスの大きな上昇がみられた。また、その際のピッチ角分布は約  $60^\circ$  にピークを示した。小玉他 (1980) は、昭和基地の mirror 高度が、ダイポール磁場に比べかなり低いことから、ロケット高度よりも高い所で磁力線方向の電子の入射があれば、ロケット高度では、粒子の磁気モーメントの保存と、大気による散乱の効果から  $0^\circ$  と  $90^\circ$  のあいだでピークをもちうることを指摘した。

KIMURA *et al.* (1980) は、40–60 keV 電子のフラックスの変化と VLF 強度の変化が非常に

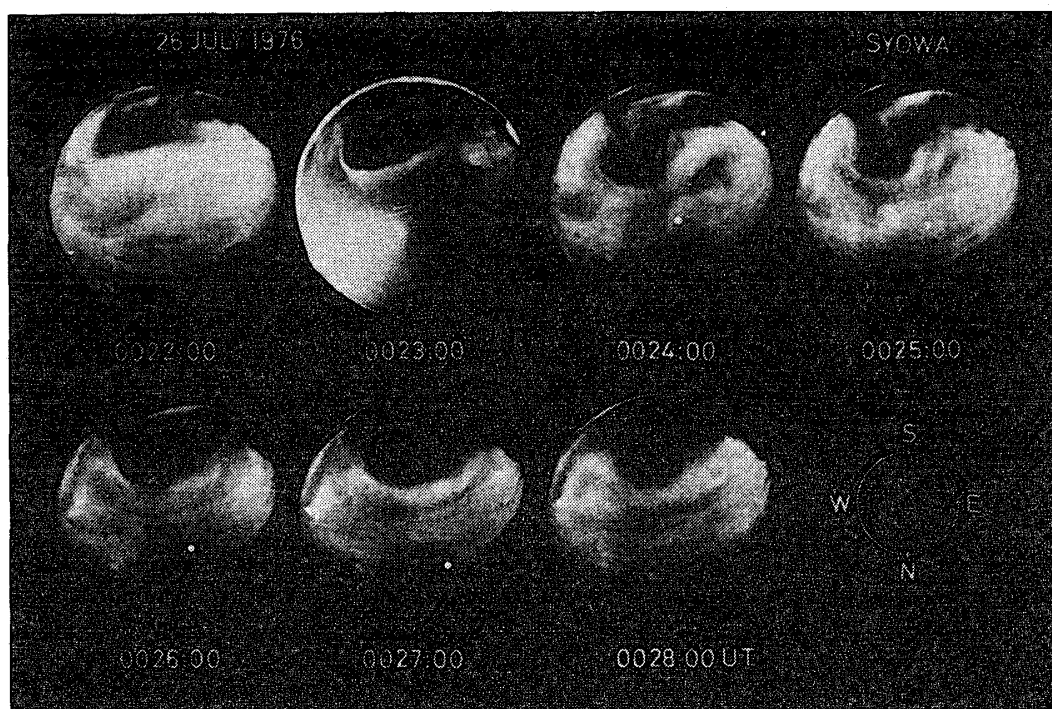


図 6b S-210JA-21 号機飛しょう中のオーロラ全天カメラ写真. ロケットの位置は写真の中の白い点で示される

Fig. 6b. All-sky photographs during the flight of the S-210JA-21 rocket. The location of the rocket is represented by a white spot.

よい相関を示すことから、20号機で観測されたオーロラヒスは、かなり低い高度で電子流により励起されている可能性があることを示唆した。高度 1450 km を飛行する ISIS-2 衛星でも VLF 帯に強い波動が観測された (KIMURA *et al.*, 1980) が、衛星は昭和基地の東約 1200 km を通過したので、これが地上やロケットで観測されたものと同一のものは断定できない。

このほか宮崎他 (1980) の電子密度の観測結果では、115 km の高度で最大電子密度約  $5 \times 10^5/\text{cm}^3$  を示し、地上で観測された CNA 現象や強い  $E_S$  エコーの出現とよい一致を示す。HF 帯波動観測器 (PWH) では、電子サイクロトン周波数  $f_H$  以下およびその近傍で比較的狭帯域のエミッションが観測された。これらは降下電子により励起された静電的プラズマ波動と思われる (大家他, 1980)。

#### 4.2. S-210JA-21 実験

ロケット飛しょう時 ISIS-1 衛星が昭和基地の真上を高度約 3450 km で通過し、オーロラヒスは、地上、ロケット、衛星という 3つの異なる高度で同時に観測された。KIMURA *et al.*

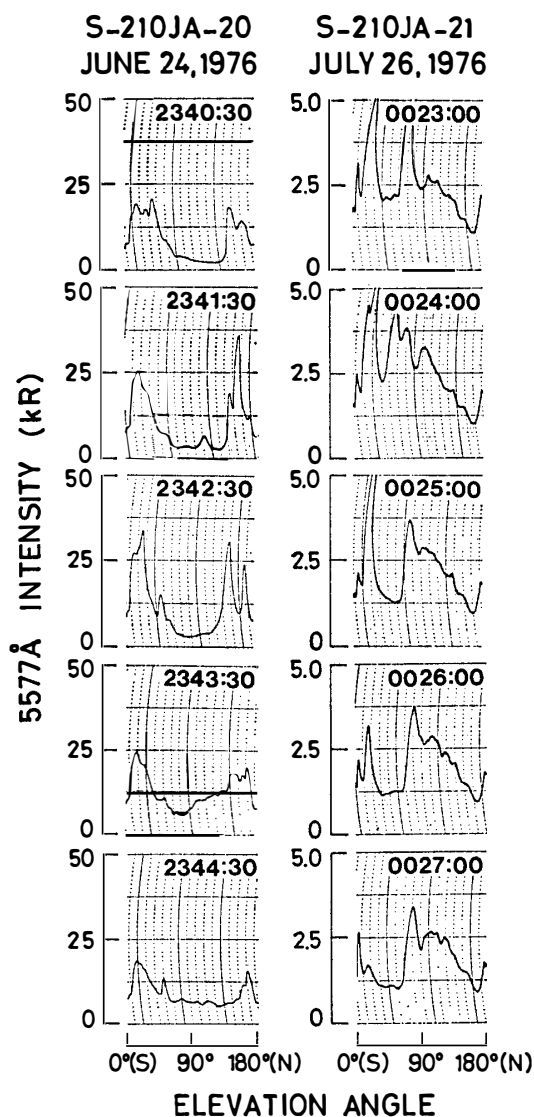


図 7 S-210JA-20, 21 号機飛行中, 地磁気子午線掃天型フォトメータで記録された 5577 Å オーロラ強度. 仰角 0°, 90°, 180° は, それぞれ南の地平線, 天頂, 北の地平線方向を表す.

Fig. 7. Intensity records of 5577 Å emissions measured by a meridian scanning photometer during the flights of the S-210JA-20 and 21 rockets. Elevation angles of 0°, 90° and 180° correspond to poleward horizon, zenith and equatorward horizon, respectively.

(1980) は, 宮崎他 (1980) によって 21 号機で観測された電子密度プロファイルを用い, full wave 法によりホイスラー波動の電場成分と磁場成分の比を計算し, これが観測値と一致することから観測されたオーロラヒスは, ホイスラーモードの波であることを示した. また地上で観測されたヒスの強度は, ロケット高度より約 14 dB 減衰していたが, これも full

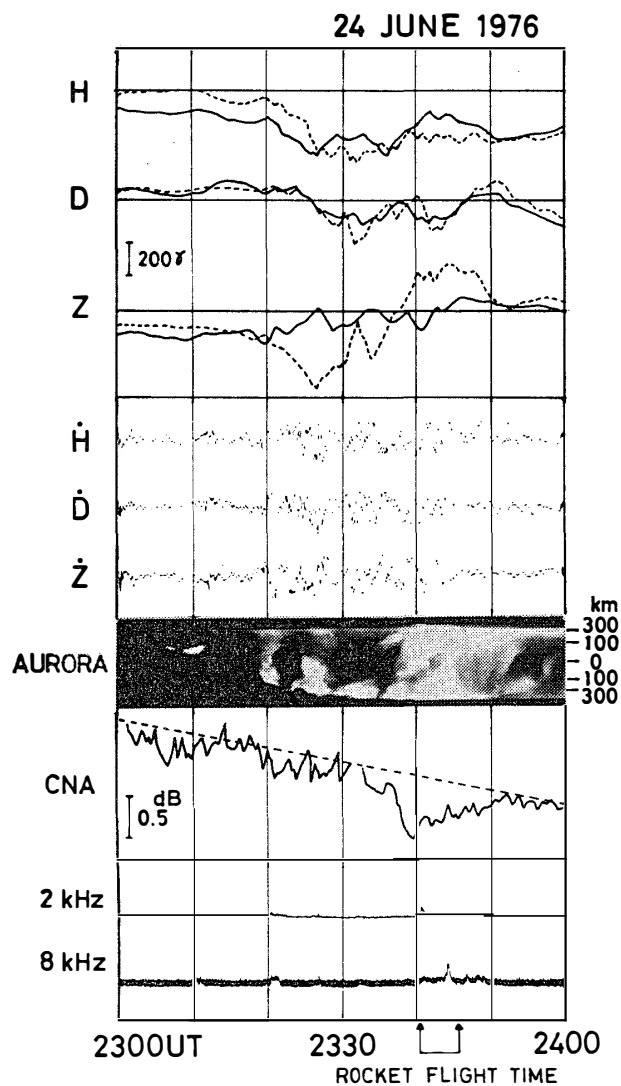


図 8 S-210JA-20 号機発射前後の相関記録. 上から昭和基地 (実線), みずほ基地 (破線) で観測された地磁気 3 成分記録. 昭和基地で観測された 1) 地磁気脈動 3 成分記録, 2) 地磁気子午線カメラによるオーロラ写真, 3) CNA, および 4) 2 kHz と 8 kHz での VLF 自然電波強度.

Fig. 8. Syowa Station records of 1) geomagnetic variations, 2) magnetic pulsations, 3) auroral photograph along the geomagnetic meridian, 4) cosmic noise absorption, and 5) VLF intensities in 2 and 8 kHz bands. The geomagnetic variations recorded at Mizuho Station also are presented by dotted lines.

wave 法により計算された電離層下部通過の際の減衰量とよく一致することを示した.

小玉他 (1980) による  $>40$  keV 電子の観測結果では, フラックスの変化は 21 号機の結果に比べゆるやかであった. これはロケットが, diffuse なオーロラ中を飛しようしたためと思わ

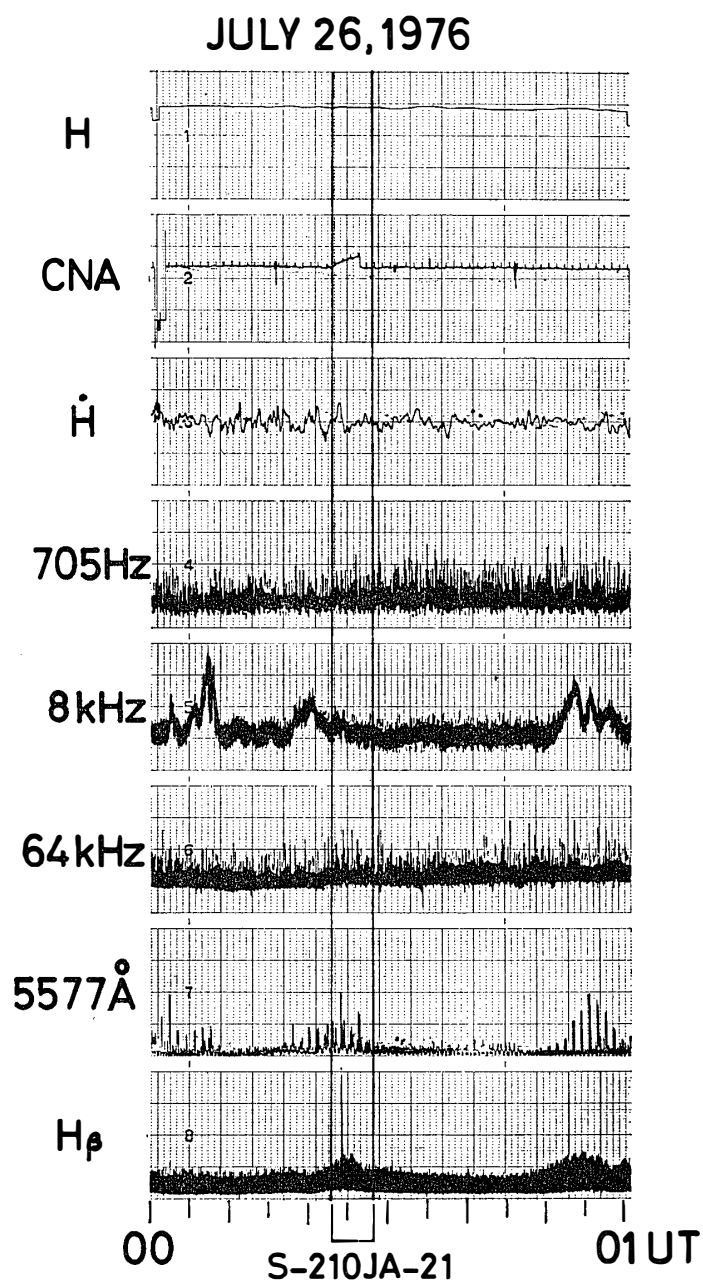


図 9 S-210JA-21 号機発射前後の相関記録, 上から地磁気  $H$  成分, CNA, 地磁気脈動  $H$  成分, 705 Hz, 8 kHz, 64 kHz での自然電波強度およびオーロラ ( $5577\text{\AA}$ ,  $H_{\beta}$ ) 掃天強度の記録.

Fig. 9. Records of geomagnetic  $H$  component, cosmic noise absorption, magnetic pulsation, 705 Hz, 8 kHz and 64 kHz band intensities and  $5577\text{\AA}$  and  $H_{\beta}$  emission intensities which are observed at Syowa Station before and after the launching of the S-210JA-21 rocket.

れる。ピッチ角分布は、20号機と同じく約  $60^\circ$  付近にピークをもったが、20号機の場合よりもずっとなだらかなピークを示した。しかし  $60^\circ$  付近のピークの存在は、20号機の場合ほど強くはないが、21号機においても磁力線に沿った高エネルギー電子の入射があったことを示唆する（小玉他，1980）。KIMURA *et al.* (1980) は、VLF 強度と  $>40$  keV 電子フラックスの相関はあまりよくないことから、ロケットで観測されたオーロラヒスはロケット高度付近で起こされているのではなく、もっと高い高度で起こされた波が伝搬してきた可能性が強いことを指摘した。

宮崎他 (1980) の電子密度の観測では、105 km で最大電子密度約  $2 \times 10^5/\text{cm}^3$  を示し、20号機の場合よりも小さかったが、92 km 以下では21号機で観測された電子密度の方が、20号機の場合よりかなり大きくなっている。これは21号機が、diffuse なオーロラに打ち込まれたためと思われる。この結果は宮崎他 (1980) が指摘したように、ロケットが通過した場所のオーロラの強度が、20号機の場合は 4–12 kR であるのに対し、21号機の場合は 2 kR とかなり小さいにもかかわらず、CNA は20号機が 0.3 dB、21号機が 0.2 dB とそれほど変わらないことと対応していると思われる。

HF 帯波動測定器 (PWH) では3種類の明瞭なエミッションが高度 150 km 以上で観測された（大家他，1980）。1つは、2–4 MHz の周波数範囲にある比較的狭帯域のエミッションで、ほぼ  $f_{L=0} < f < f_{UHR}$  の範囲で起こっている。ただし、 $f_{L=0}$ 、 $f_{UHR}$  は  $L$  ( $Z$ ) モードカットオフ周波数および、UHR 周波数を表す。第2のタイプは、400–800 kHz に現れる広帯域エミッションで、観測された周波数の電子サイクロトロン周波数  $f_H$  に対する関係は、 $0.4 < f/f_H < 0.6$  であった。第3のタイプは、450 kHz 以下の周波数帯でスピニング軸と磁力線のなす角が減少したときに観測された。この中で、第2のタイプのエミッションが、 $>40$  keV 電子フラックスと非常によく対応を示した。大家他 (1980) は、第1のタイプは、降下電子との Landau 型および cyclotron 型共鳴相互作用で励起されたプラズマ波動で、その一部が電磁波モードに変換されたものであると解釈した。また第2、第3のエミッションは、loss cone 分布または、温度異方性分布をもつ降下電子により励起された  $f_H$  以下の静電波モード ( $f/f_H \simeq 0.5$  付近で成長率最大) であると結論した。第3のタイプが、ロケット軸が磁力線方向に近づくと観測されたのは、ダイポールアンテナの方向が、波の伝搬方向と一致するためと解釈された。

## 5. お わ り に

S-210JA-20, 21 号機実験は、地上、衛星との立体的同時観測として実施されたが、こうした観測形態は南極では初めてのものであり、この実験が、新たな超高層現象研究方法を切り開いた意義は大きいといえよう。20, 21 号機ともオーロラヒスを3つの異なる高度（地上、60–120 km のロケット高度、1000–3000 km の衛星高度）で同時に観測することに成功した。そして、その結果から地上で観測されるオーロラヒスはロケット高度ではホイスラーモードの波であることが明らかにされた (KIMURA *et al.*, 1980)。粒子と波動との相互作用に関しては、20, 21 号機とも 40 keV 以上の高エネルギー電子を測定する装置しかなく、オーロラ発光に最も寄与の大きい数 keV のエネルギーをもつ電子の測定器は、搭載されていなかったことから、結論を得るまでにはいたらなかった。しかし >40 keV 電子のピッチ角分布が、60° 付近にピークをもつという興味深いデータが得られた。小玉他 (1980) による結果の解釈は、第19次南極地域観測で実施されたロケット実験の解析を通じてさらに詳しく検討されるであろう。

また、大家他 (1980) による HF 帯プラズマ波動の観測結果では、UHR 周波数から Z モードカットオフ周波数にかけて、および電子サイクロトン周波数以下に顕著なエミッションが観測された。これらはオーロラの降下粒子により、電離層中でオーロラの発光とほぼ平行して進行する波動粒子相互作用の様相をとらえたものである。

宮崎他 (1980) による電子密度の観測結果は、ホイスラー波の電離層透過に対する full wave 法による計算に用いられ、電離層中での屈折率や減衰率が観測値と非常によく一致することが示された (KIMURA *et al.*, 1980)。このことは、ロケットにより波動-粒子の相互作用の機構を解明するには、同時に電子密度を測定する必要があることを示し、搭載重量に対する厳しい制限にもかかわらず、20, 21 号機の観測項目が適切なものであったといえよう。

## 謝 辞

S-210JA-20, 21 号機実験を著者と共に実施した、第17次南極地域観測隊越冬隊の芳野起夫越冬隊長、松尾敏郎、小井沼良雄、真利子修、中井康二、仁木国雄のロケット実験担当隊員、およびその他の第17次越冬隊員に深く感謝致します。またこの 20, 21 号機の責任者である京都大学工学部木村啓根教授に、実験計画の立案からデータの解析まで長期間にわたってお世話下さったことに対し厚くお礼申し上げます。さらに昭和基地での ISIS 衛星受信を国立極

地研究所と共同で実施されている郵政省電波研究所の松浦延夫氏，恩藤忠典氏に厚くお礼申し上げます。

最後にこのロケット実験を計画された国立極地研究所の永田武教授，平沢威男教授，およびロケット実験時の世界的な地上地磁気観測データの解析を行った国立極地研究所の藤井良一氏に深く感謝致します。

#### 文 献

- 青山 巖・遠山文雄 (1980)：南極ロケットの姿勢. 南極資料, **68**, 122-128.
- KIMURA, I., MATSUO, T., KAMADA, T. and NAGANO, I. (1980): Auroral hiss observed by Antarctic rockets, S-210JA-20 and 21. Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.), **69**, 17-36.
- 小玉正弘・奥谷晶子・和田雅美・今井 喬・竹内 一 (1980)：ロケット高度における  $>40$  keV オーロラ電子のピッチ角分布. 南極資料, **68**, 35-46.
- 宮崎 茂・森 弘隆・小川忠彦 (1980)：S-210JA-20, 21 号機による電子密度温度観測結果. 南極資料, **69**, 52-55.
- 奥谷晶子・和田雅美・竹内 一・小玉正弘・今井 喬 (1979)：南極ロケットによるオーロラ帯降下電子の観測. 南極資料, **63**, 29-41.
- 大家 寛・宮岡 宏・宮武貞夫 (1980)：南極ロケット S-210JA-21 号機による高周波プラズマ波動スペクトルの観測. 南極資料, **69**, 37-51.

(1979年7月12日受理)