

第11次南極地域観測隊極光部門報告 1970-1971

福西 浩*・鮎川 勝**

Auroral Observations at Syowa Station, 1970-1971

Hiroshi FUKUNISHI* and Masaru AYUKAWA**

Abstract: The auroral observations carried out by the 11th wintering party of the Japanese Antarctic Research Expedition, 1970-1971, are; 1. Photographic observations of auroras with 16 mm and 35 mm all-sky cameras on routine basis. 2. Visual and photographic observations of auroras. 3. Observations of the space and time variations of proton auroras with the H_{β} tilting-filter meridian-scanning photometer and electron auroras with the multicolor meridian-scanning photometers. 4. Observations of auroral pulsations with the zenith photometers.

The principal aim of these observations is to study the dynamical morphology of proton and electron auroras during magnetospheric substorms. A high time-resolution scanning photometer was constructed to measure the H_{β} emissions in proton auroras. The equipment consists of the coelostat for scanning the sky along the geomagnetic meridian and the tilting-filter photometer for detecting the intensity and Doppler shift of the H_{β} emission. The scanning period of the coelostat was 45 s, and the tilting period of the filter was 1 s. The lower threshold of the detection was $0.25 R/\text{\AA}$. In order to study the space and time variations of the electron flux and energy spectra of auroral electrons, observations with the multicolor meridian-scanning photometers were carried out. The scanning period of these photometers was 5 s. The observed emission lines were $N_2^+\lambda 4278$, $O I\lambda 5577$ and $O I\lambda 6300$. The minimum detectable intensities of the photometers were 100 R, 100 R and 30 R, respectively for these emissions.

The photographic observations were carried out with an improved model of 35 mm all-sky camera mounted with a fish-eye lens.

1. はじめに

最近の科学衛星による地球周辺の直接観測によって地球磁気圏の構造が次第に明らかにな

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

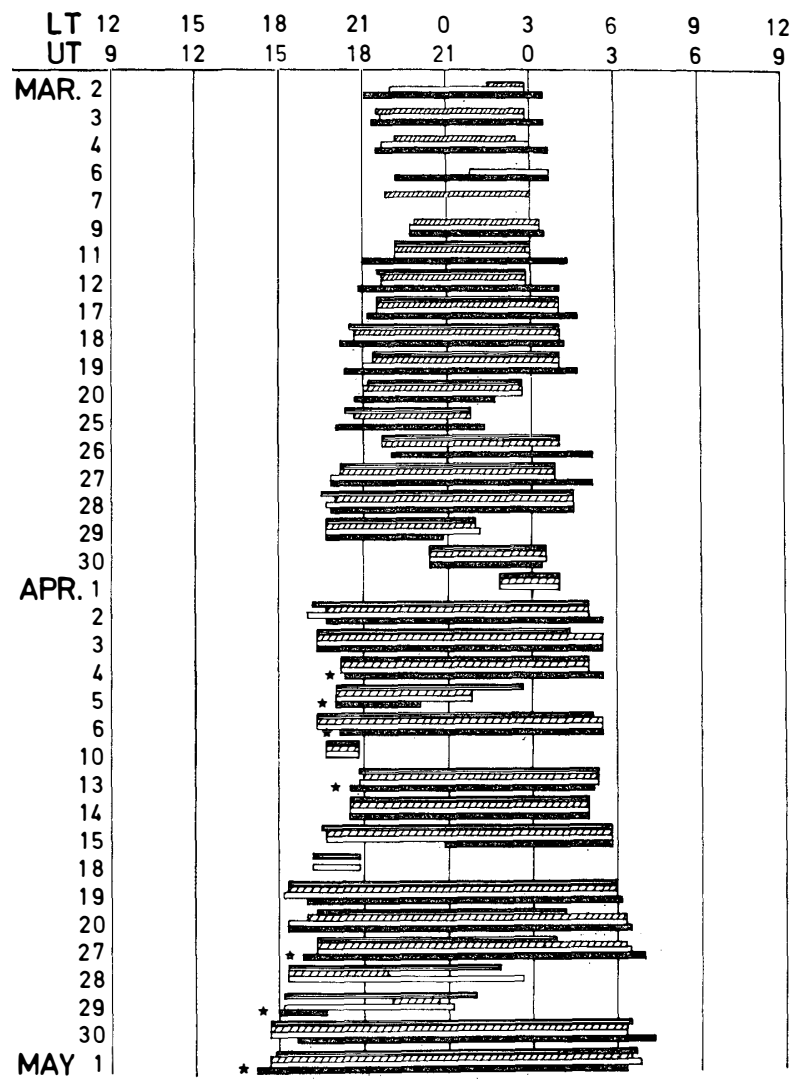
** 国立科学博物館極地研究センター. Polar Research Center, National Science Museum, Kaga 1-9-10, Itabashi-ku, Tokyo.

ってきた。しかし磁気圏プラズマの爆発的加熱現象である磁気圏サブストームの機構や磁気圏プラズマ中の現象である地磁気脈動、VLF 帯自然電波の発生機構に関し、未解決の問題がまだ多く残されている。極光は加速された磁気圏プラズマが磁力線に沿って極域電離圏まで降下することによって起きる。従って極光の空間的、時間的変動を知ることにより磁気圏プラズマの構造やその運動を知ることができる。そこで極光のダイナミカル・モルフォロジィを明らかにすることがとりわけ重要になってきた。このため1967年(第8次隊)から極光輝度の地磁気子午線に沿っての掃天観測が始められ(HIRASAWA and KAMINUMA, 1970; HIRASAWA and NAGATA, 1972), 1969年(第10次隊)からは、極光の更に早い動きをとらえるため、高速度二重掃天光電受光器による観測が始められた。但しこれらの観測は、極光が主として高エネルギーの電子によって励起されることや、技術的困難さから、電子励起の極光に限られていた。しかしながら磁気圏プラズマが、電子とプロトンからできていることから磁気圏サブストームの構造や、地磁気脈動、VLF 帯自然電波の発生機構を解明するうえで、電子励起の極光を観測すると同時に、プロトンによって励起される極光(プロトン・オーロラ)の観測が是非とも必要となってきた(これまでに昭和基地でなされたプロトン観測の結果に関しては、NAKAMURA, 1962; TSURUDA and KANEDA, 1968 参照)。1970年(第11次隊)の極光研究観測では、プロトン・オーロラの観測に主眼をおき、新たに掃天受光器を設置し、プロトンによって励起される水素バルマーベータ線(H_{β})の空間的、時間的変動を観測し、多くの新しい事実を得ることができた。電子励起の極光に関しては、新たに多色光電受光器を用いて、極光の空間的、時間的変動を知ると同時に降下電子のエネルギースペクトルに関する情報を得た。

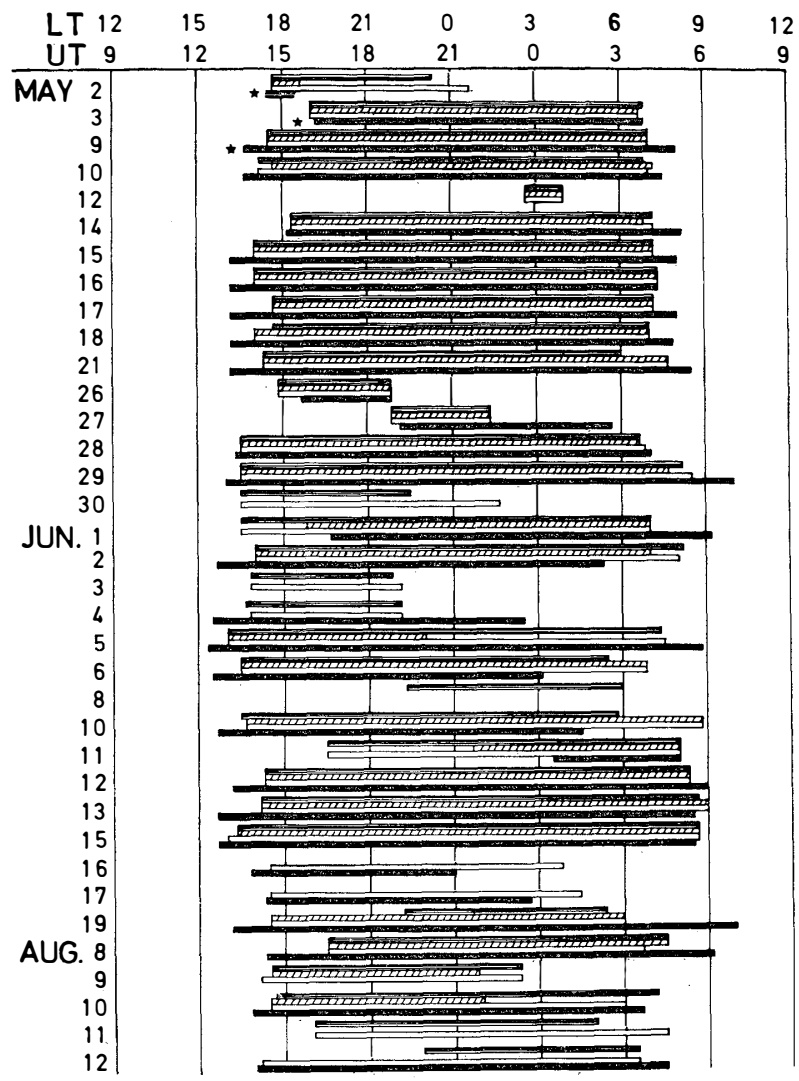
一方極光の定常観測では、全天写真観測に新しいモデルの全天カメラ(魚眼レンズを用いた35mm 全天カメラ)装置が使用されるにいたり、従来の16mm 全天カメラの欠点が改善され、より充実した観測態勢が整った。

第11次越冬観測(1970年2月~1971年1月)の極光部門の定常・研究のそれぞれの観測項目は次の通りである。

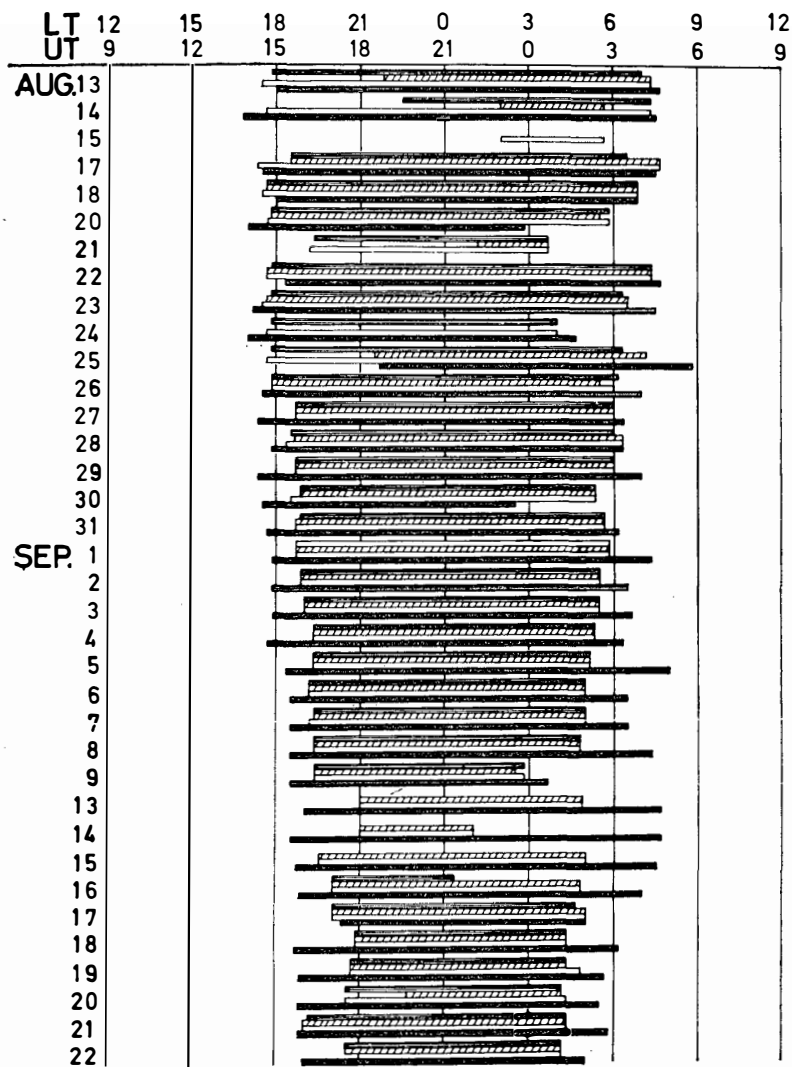
- A. 16mm 全天写真による極光の形態と運動の観測(鮎川・千葉)
- B. 35mm 全天写真による極光の形態と運動の観測(鮎川)
- C. 目視およびスチール写真による極光形態観測(鮎川)
- D. 極光輝度地磁気子午線掃天観測(福西)
 - a. H_{β} 線掃天観測
 - b. 多色掃天観測



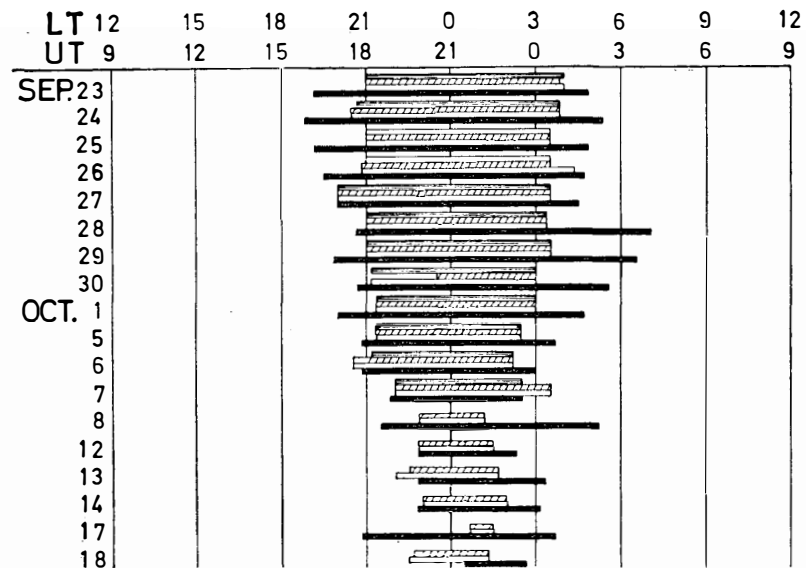
(a)



(b)



(c)



H_{β}
 MULTICOLOR
 AURORAL PULSATION
 35mm ALL-SKY CAMERA
 16mm ALL-SKY CAMERA
 (d)

図 1 (a-d) 極光観測実施図。●●●●は、全天写真観測、|||は、水素ベータ線掃天観測、//////は、多色掃天観測、□は、極光輝度短周期脈動観測を表わす。

Figs. 1 (a-d). Aurora observation chart at Syowa Station. Legend: all-sky camera; H_{β} tilting-filter meridian-scanning photometer; multicolor meridian scanning photometers; zenith photometer for auroral pulsations; ★ 16 mm all-sky camera.

E. 極光輝度短周期脈動観測（福西）

F. 極光雑音の電波観測（福西）

筆者らはこの報告で、それぞれの観測方法、経過および結果の概略などについて紹介し、広く一般に資料を利用していただく手引きにしたいと考える。

全天カメラ観測、 $H\beta$ 線掃天観測、多色掃天観測、極光輝度短周期脈動観測の実施状況を図1 (a, b, c, d) に示す。

2. 16mm 全天写真観測

1968年（第9次隊）に地学棟（旧観測棟）より、観測棟の屋根の上に移転された16mm全天カメラにより30秒毎に15秒露出で撮影した。観測期間の詳細はAYUKAWA (1971) を参照されたい。本観測器は1966年（第7次隊）以来のもので随所に老朽化が目立ち、9月初めよりカメラ本体の故障が頻繁に発生し、9月29日に観測を打切った。

3. 35mm 全天写真観測

3.1. 観測装置

本観測装置は、金田栄祐氏（東京大学理学部）の設計によるもので、従来の16mm全天カメラによる観測の不満足な点を補い、全天写真観測記録の精度、取り扱いおよび資料整理上において大きな進歩をもたらしたといえる。図2 (a, b) にその実施概念および系統図を示す。

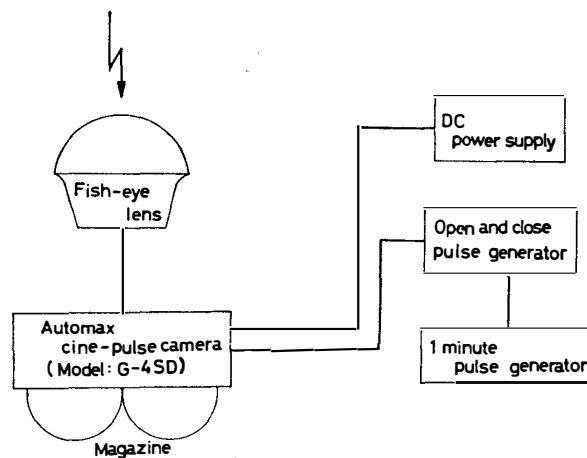


図 2 (a) 35mm全天カメラのブロック・ダイアグラム

Fig. 2 (a). Operation diagram of the 35mm all-sky camera.

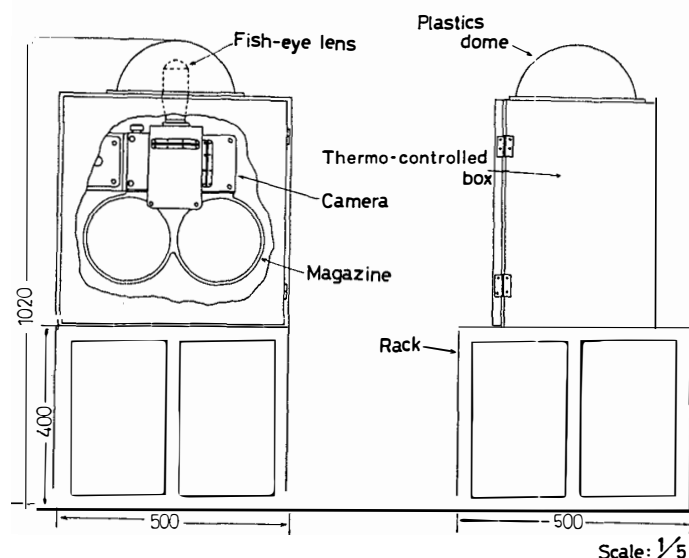


図 2 (b) 35mm 全天カメラの概観図

Fig. 2 (b). Layout of the 35mm all-sky camera.

この装置は、オートマックス、シネ・パルスカメラを使用し、35mm シネ判フィルム上に極光現象を撮影記録するものであるが大別して撮影カメラ (G-4 SD シネ・パルスカメラ)、カメラ制御器、保温箱の三つから成立っている。撮影カメラは、オートマックス G-4SD シネ・パルスカメラ本体、データボックス、撮影レンズ (魚眼レンズ) およびマガジンから構成され、G-4 SD カメラ制御器内に組み込まれた撮影パルス信号に同期して動作する設計になっている。

その仕様は次のとおりである。

- | | |
|-------------|---|
| (a) 使用フィルム | 35mm |
| (b) 画面寸法 | データ部分 18.75mm × 5.08mm
画面 18.75mm × 18.75mm |
| (c) フィルム容量 | 400フィート (マガジン) |
| (d) 撮影レンズ | 魚眼レンズ (ケンコー), f: 40mm (アンジェニュー), F: 3.5 |
| (e) レンズマウント | スクリューマウント |
| (f) 撮影方式 | パルス駆動方式 |
| (g) データボックス | ①時計, ②年月日, 撮影条件などのデータを書き込んだデータ板,
③現象状態他フィルム感光濃度の比較を行なうための基準となるチャート (上記①~③の各データを, 画面データ部分に撮影する) |
| (h) 電源 | AC100V および DC28V |

(i) 寸法, 重量 約170mmW×360mmH×480mmL, 約9 kg

G-4 SD シネ・パルスカメラ制御器は1分間に2こまの露出を制御できる撮影パルス発生器, 撮影されたフィルムの長さを表示するフーテージカウンター, 撮影こま数の選択操作(1こま/分, 2こま/分のいずれかを選択できる)およびフィルム送りチェック操作などを行なう操作スイッチから構成され, その電源容量は約700VAである。

3.2. 観測経過と結果

観測期間の詳細は AYUKAWA (1971) に述べてあるが, 記録の大半は, 観測開始当初, 初期故障と思われる種々の事故があり, 時計表示などデータ焼込み部分に判別しにくい部分がある。

従来の16mm全天カメラを魚眼レンズ使用の35mm全天カメラに変更したことによって得られる特徴を以下に簡単に述べ, 両者の撮影記録を図3, 4に示す。

- ① 魚眼レンズ使用により従来かけていた天頂付近の撮影が可能となった。
- ② 撮影画面の拡大により解析精度が向上した。
- ③ 日付, フィルム感光標準濃度板などが, 目的の被写体と同時かつ同一画面内に記録できた。
- ④ 取り扱い, 操作が非常に簡単になった。
- ⑤ 将来問題として, 極光の多点観測の使用に適する(コンパクトであるため, 運搬, 設置などが比較的容易)。
- ⑥ 資料整理上の労力の軽減。

4. 目視およびスチール写真(単発, 連続写真)による観測

目視およびスチール写真観測は, 天測点にコルゲートの残品によって防風装置を作り, そこを第1観測点とした。当初この防風装置の中に長時間(3~4時間, 長い時は一晩中)待機して観測したが, 6月頃から防寒のため, 待機場所を第9発電棟の暗室に移し, オーロラの活動度, あるいは風・温度など気象条件によって, その観測場所を天測点, 第9発電棟裏または屋根の上など, 適当に選定して観測した。目視観測は, 3月6日から10月20日の間, 夜間晴天時(月令12~22の期間は軽視)原則として30分毎に International Auroral Atlas の code によって記録をとった。スチール写真は, ニコン S2 (F:1.1, 50mm) およびニコン F (F:1.4, 50mm)×2計3台のカメラを使用して撮影した。主としてニコン S2 をカラー単発写真, ニコン F を連続および単発白黒写真用と使い分けた。観測開始当初は, カ

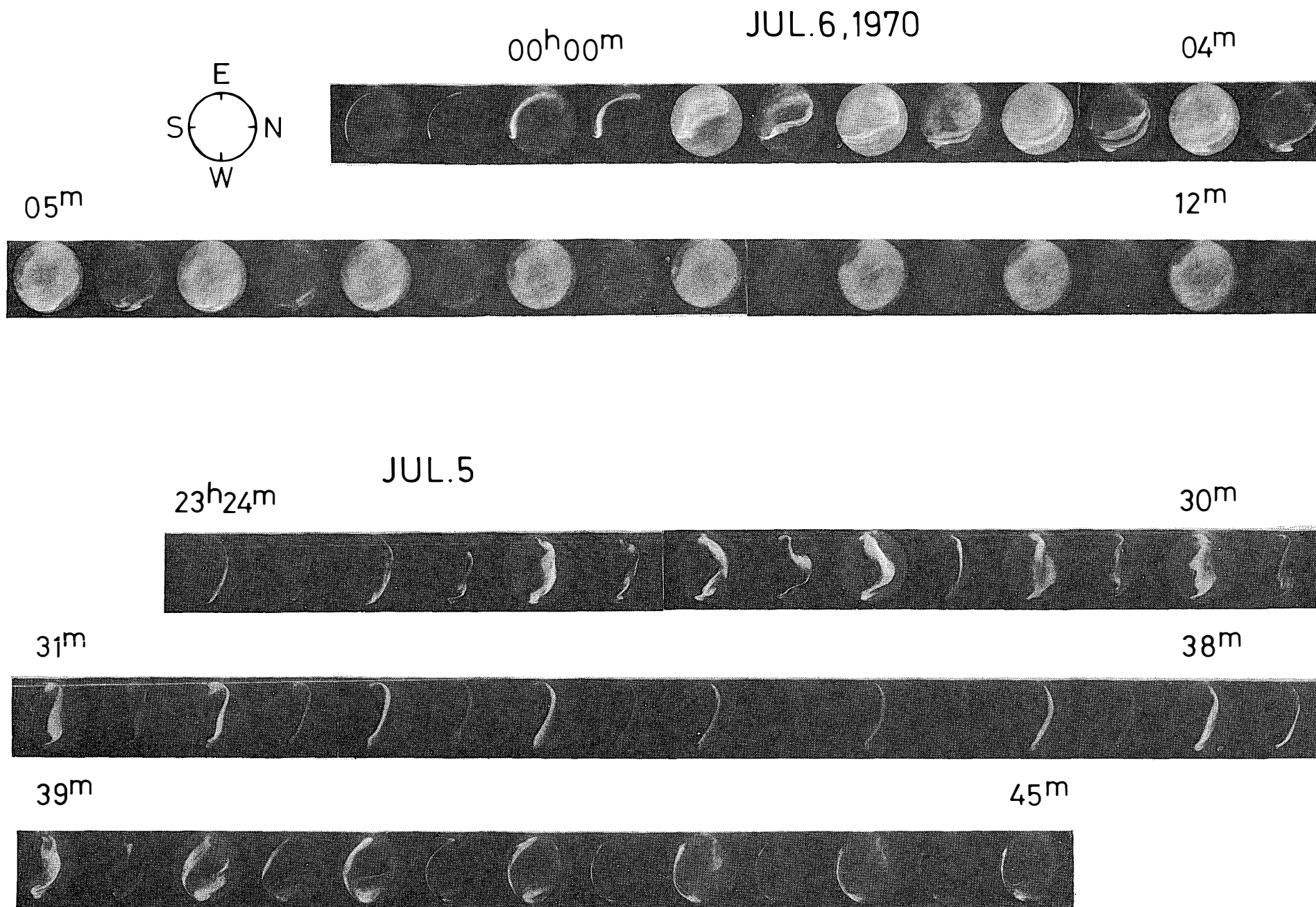


図3 35mm 全天カメラによるブレイクアップ時のオーロラの急激な強度上昇と極方向への広がり の例。この時の地磁気 H 成分の変化は、図10に示される。
 Fig. 3. 35mm all-sky camera sequential photographs showing a sudden brightening of the quiet arc followed by a rapid poleward motion during an auroral breakup event. Simultaneous magnetic records are shown in Fig. 10.

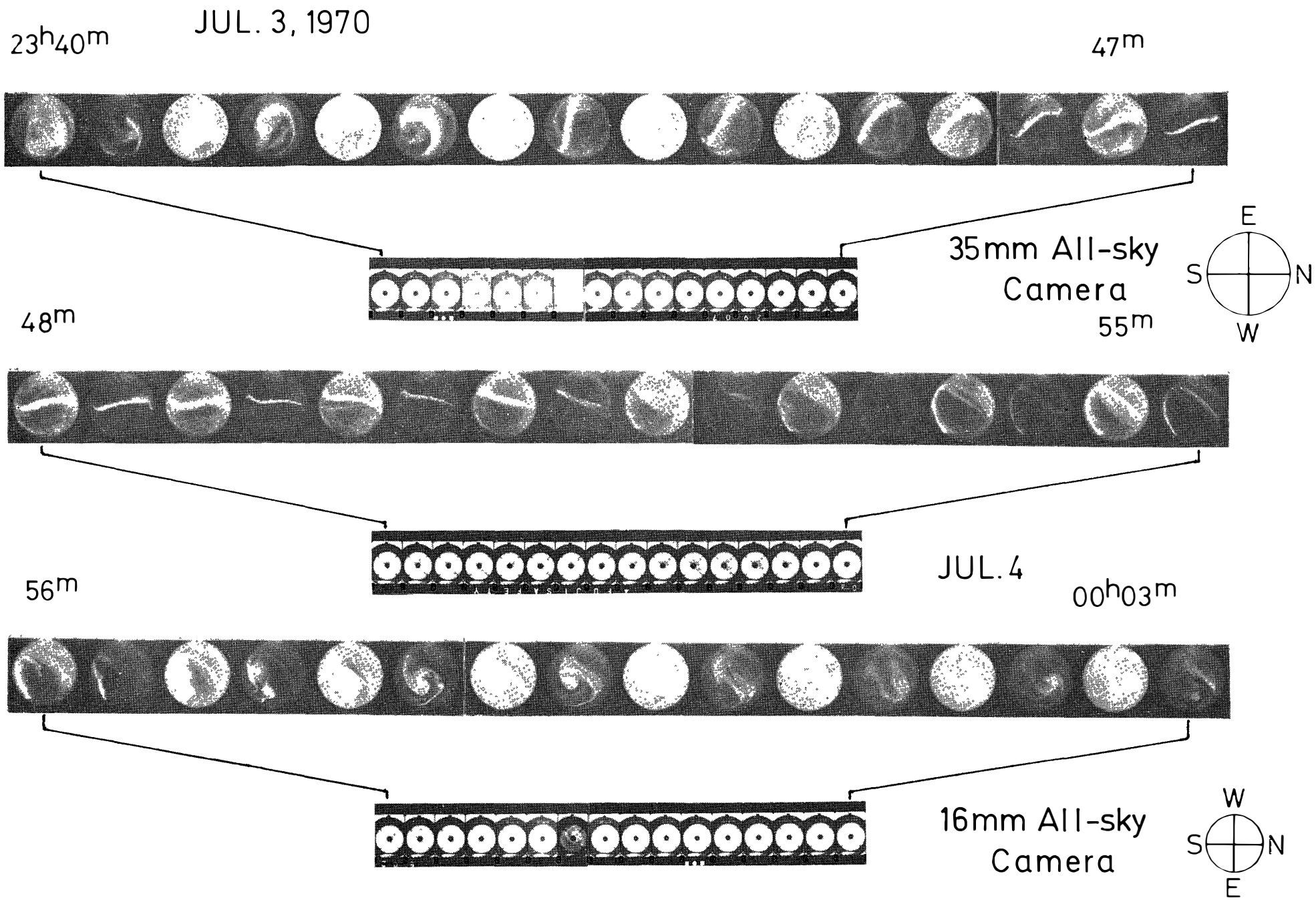


図 4 サブストーム中のオーロラの35mm および16mm 全天カメラ記録の比較

Fig. 4. Comparison of simultaneous auroral photographs taken with the 35 mm all-sky camera and the 16 mm all-sky camera during the auroral substorm on 3 July, 1970.

ラーと赤外線フィルム同時撮影に重点をおき、極光の活動状態によって随時連続写真観測をした。7月中旬よりブレイクアップ後のベイル、パッチ状オーロラの連続写真に重点をおいて観測した。使用フィルムは、カラー写真用として、コダックエクタクロム HS、白黒単発写真用にコダック2475またはコダック4-X、連続写真用にコダック4-Xなどを用いた。なお新しい試みとして、オーロラブレイクアップ時を撮影することを目的としてコダックインフラレッド、コダックエアロエクタクロムフィルムを若干使用した。

表1にスチール連続写真観測がおこなわれた日数および枚数を示す。

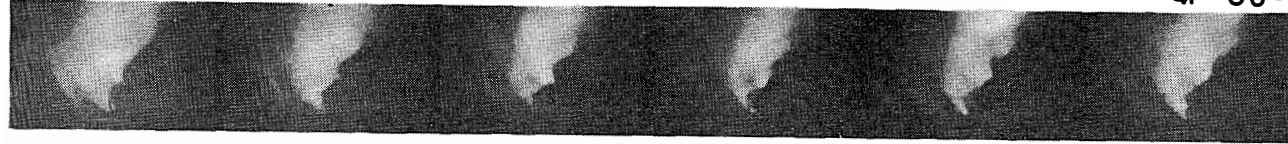
表1 スチール連続写真による極光観測実施表
Table 1. Dates and times for serial photographs of auroras.

Date	Time (U. T.)		Number of photographs	Remarks	
	Start	Stop		Azimuth	Elevation
1970 Mar. 2	h m s	h m s			
	23 04	23 06	10	192°	22°
	23 08	23 10	10	180	30
	23 16	23 17 30	7	42	10
Mar. 3	23 20	23 23	7	42	10
	19 46	19 50	18	67	6
	20 00	20 01	6	18	43
	20 10	20 16	24	58	10
	20 30	20 33	16	54	13
	20 56	20 58	10	56	10
	20 59 50	21 04 20	14	86	13
	21 10	21 14	10	301	10
	21 15	21 16	6	260	10
	21 17	21 21	19	198	10
Mar. 6	22 46	22 48	11	32	12
	20 58	20 59 30	13	180	70
	21 42	21 44	7	223	12
	21 50	21 52	10	218	12
	21 53	21 57	17	270	68
	22 00	22 04	12	214	52
Mar. 9	22 06	22 09	17	20	20
	22 53 30	22 55 30	14	122	16
Mar. 17	23 11	23 14	15	264	22
	22 25	22 29	16	188	12
Mar. 18	22 35	22 39	23	184	10
	22 50	22 57	30	194	10
	23 04	23 11	29	223	16
	20 40	21 20	207	57	12
Mar. 19	21 43	21 47	15	200	76

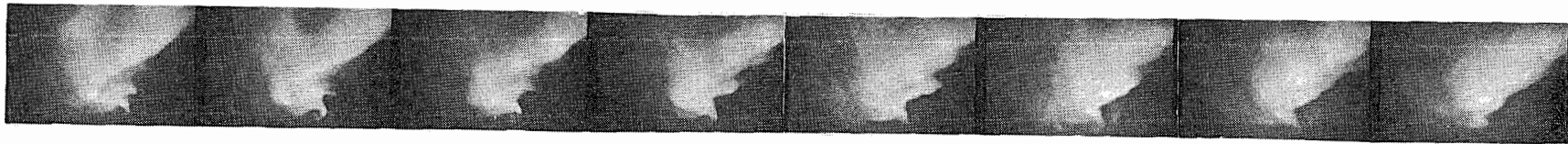
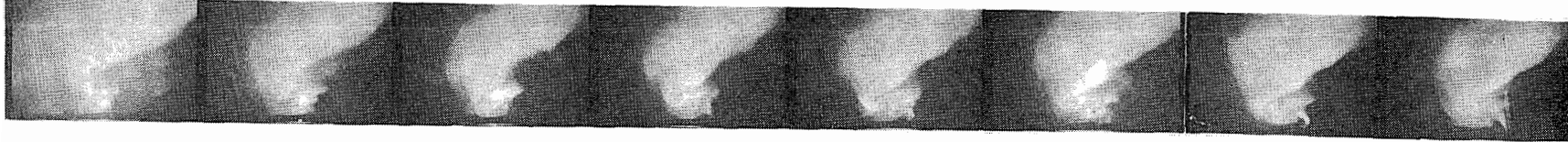
Date	Time (U. T.)		Number of photographs	Remarks	
	Start	Stop		Azimuth	Elevation
	h m s	h m s			
Mar. 19	23 04	23 14	50	90°	10°
	23 15	23 23	33	158	76
	23 37	23 45	37	184	8
Mar. 28	00 17	00 19	13	112	10
	19 58	20 00	20	82	14
	20 10	20 16	38	182	10
	22 37	22 38	5	0	20
	22 39	22 46	21	288	17
	22 53	22 55	13	300	18
	23 02	23 03	11	314	13
Apr. 6	21 42	21 45	17	94	10
	21 47	21 49	9	230	6
Apr. 19	22 50	22 59	41	98	8
Apr. 20	02 30	03 32	18	204	8
	22 37	22 41	16	184	7
	22 49	22 50 30	13	202	6
May 16	01 17	01 25 30	7	170	10
Ju y 3	00 35	00 56	22	0	90
	21 46	21 47	9	300	58
	23 04	23 05	9	230	10
	23 08	23 11	9	200	90
	23 14	23 16	13	190	82
	23 17	23 19	10	270	20
	23 25	23 27	10	320	60
	23 25	23 27	10	320	60
July 6	00 19	00 23	20	260	70
	00 30	00 40	11	290	68
	00 55	01 08	14	278	70
	01 14	01 20	7	338	20
	01 25	01 40	29	304	70
	01 49 30	01 59	20	260	40
July 9	21 23	21 25	12	330	80
	21 50	21 53	13	320	75
	22 41	22 43	8	320	80
	23 34	23 43	20	330	70~80
	23 50	23 52 30	15	300	80
July 10	23 46	23 50	18	290	0
July 11	00 11	00 21	40	320	75
	01 26	01 38	24	320	80
July 21	19 06	19 10	22	200~240	50~60
	22 45 30	22 47	15	90	15~20

Mar. 18 20h 40m 00s (UT) E.

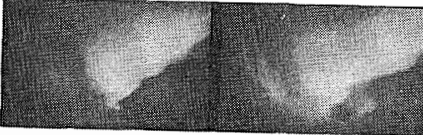
41m 00s



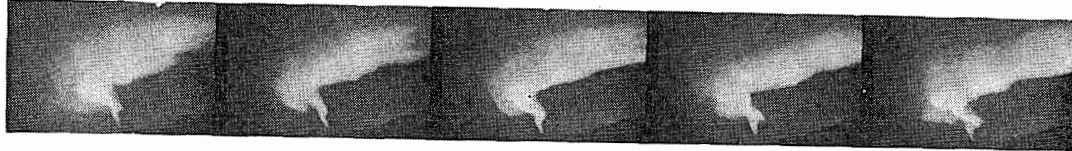
43m 24s



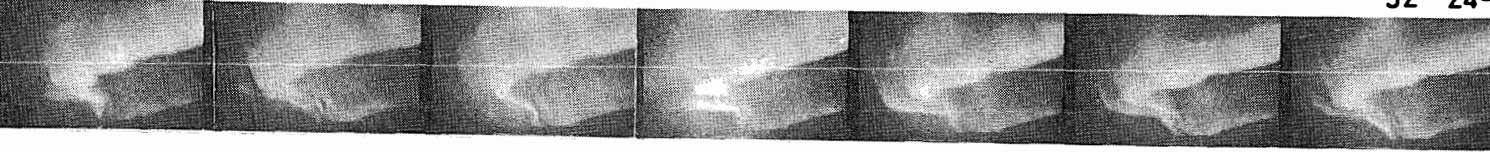
46m 42s



50m 00s



52m 24s



54m 00s

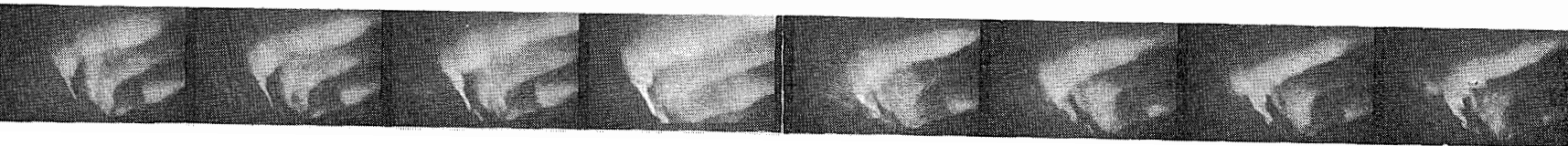
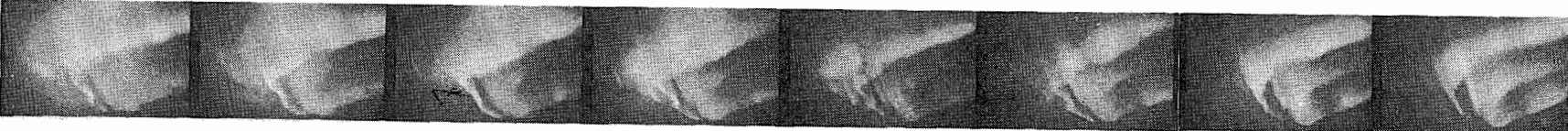


図 5 (a) スチール連続写真. ブレイクアップ前の多重アークの形成と最も低緯度側に存在するアークの輝度の上昇
Fig. 5(a). Serial photographs showing the formation of multiple arcs and the brightening of the northernmost arc before an auroral breakup event.

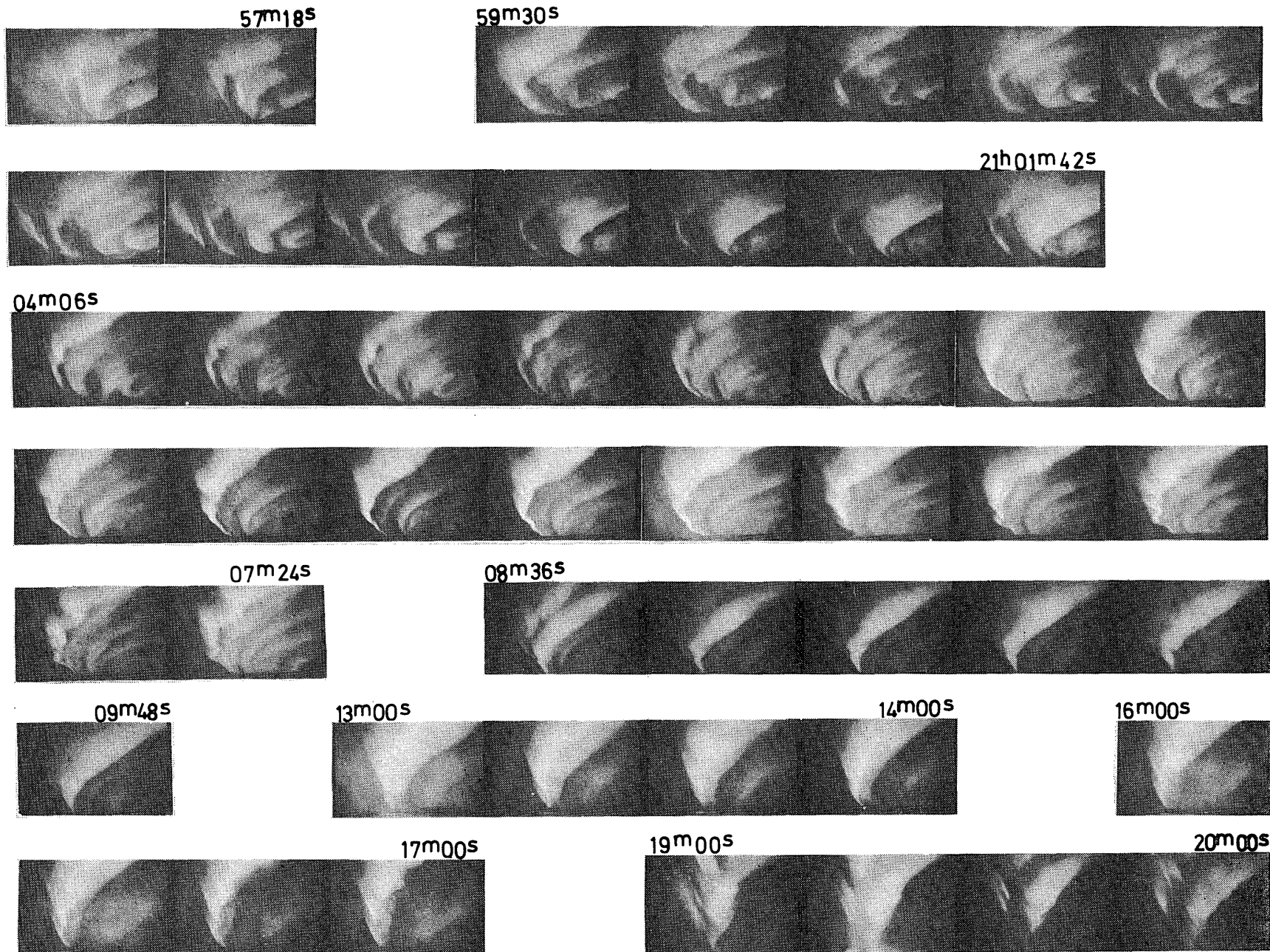
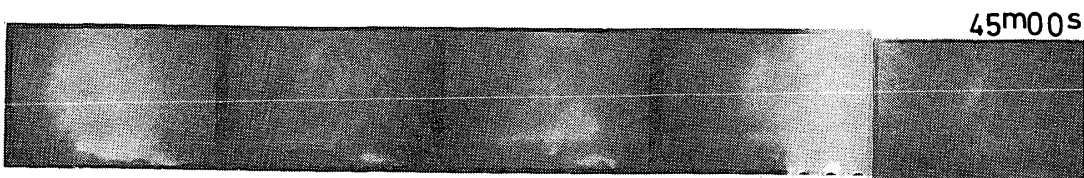
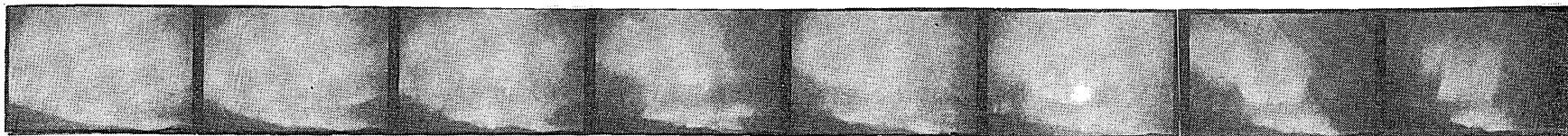


図 5 (b) スチール連続写真. ブレイクアップ前の多重アークの形成と最も低緯度側に存在するアークの輝度の上昇
 Fig 5(b). Serial photographs showing the formation of multiple arcs and the brightening of the northernmost arc before an auroral breakup event.

Mar.19 23h37m00s S.



Jul.6 01h14m N.

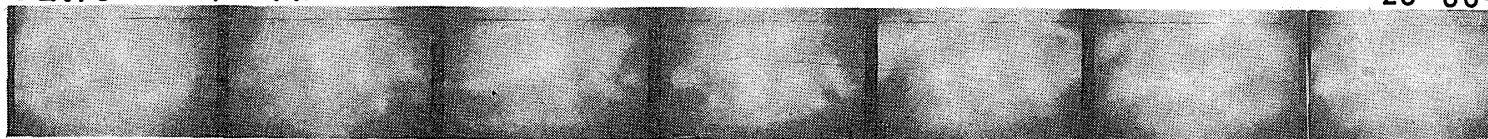


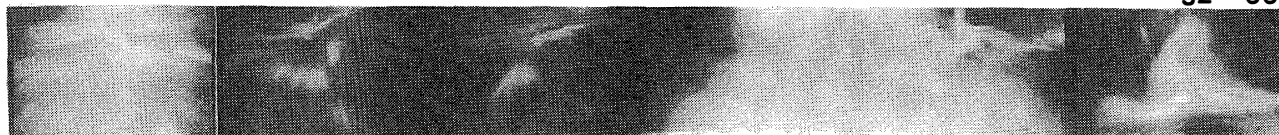
図 6 スチール連続写真. Mar. 19は、ブレイクアップ後のオーロラの極方向への移動の例. Jul. 6は、サブストームの回復期にみられるパッチ状オーロラの例

Fig. 6. Serial photographs taken on Mar. 19 and Jul. 6, 1970 showing the poleward movement of rayed bands after an auroral breakup event and the appearance of patches during the subsequent recovery phase.

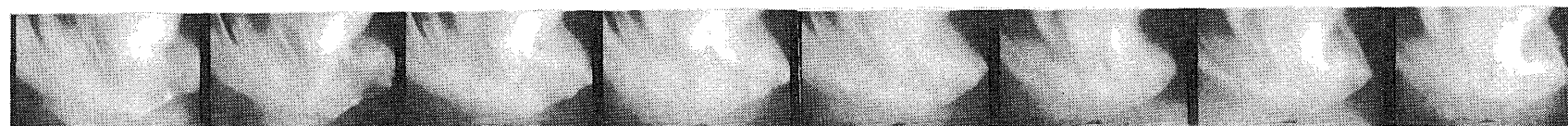
Jul. 9 23^h50^m00^s NNW.



52^m00^s



Sep. 1 19^h19^m00^s ENE.



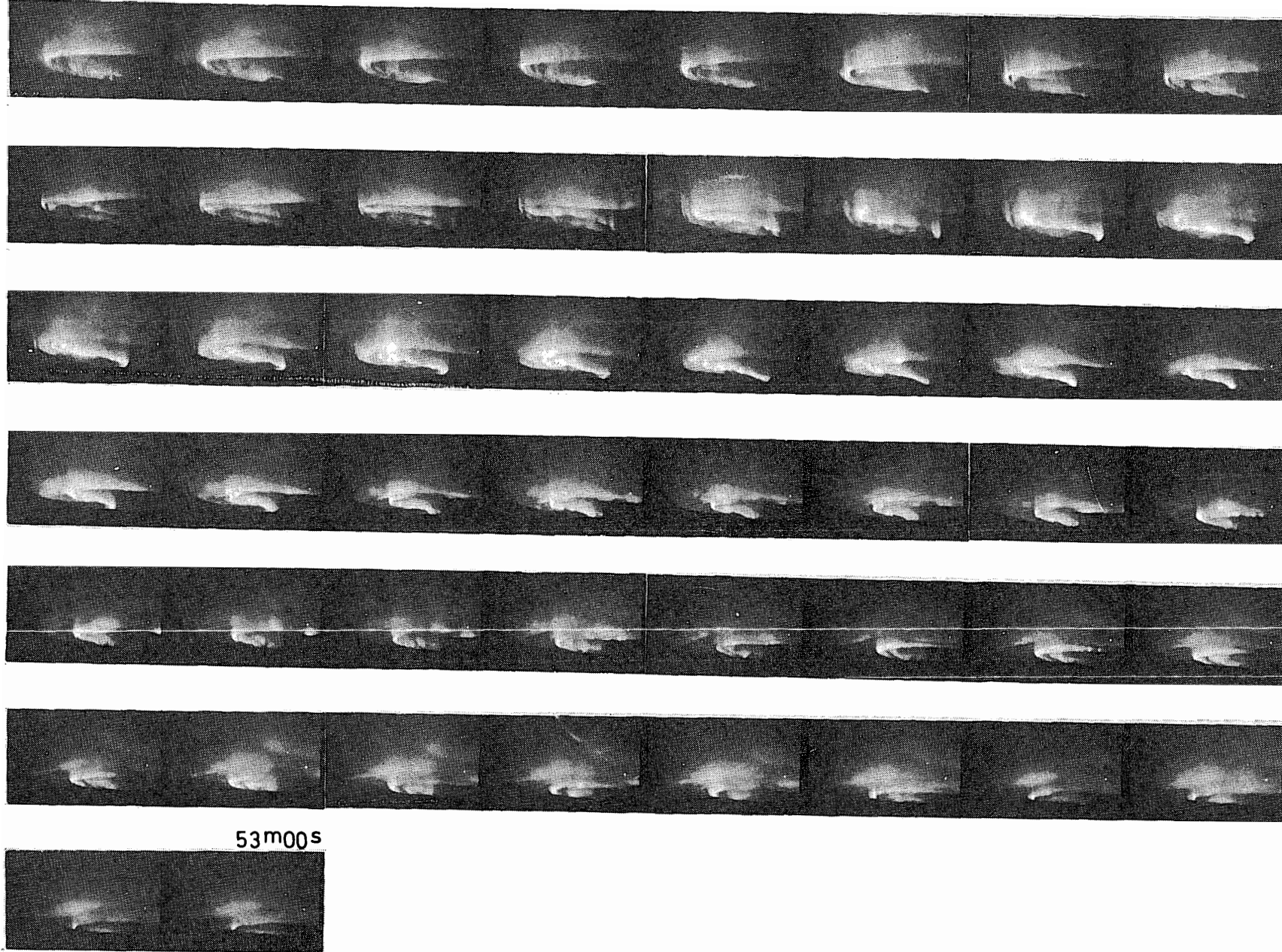
29^m00^s



図 7 スチール連続写真. Jul. 9は、ブレイクアップ時に天頂近くで見られるコロナ状オーロラの例. Sep. 1は、ブレイクアップ前の多重アークの形成と低緯度側への移動の例

Fig. 7. Serial photographs taken on Jul. 9 and Sep. 1, 1970 showing auroral corona at the zenith and the formation of multiple arcs, which

Sep. 3 21h45m00s SSE.



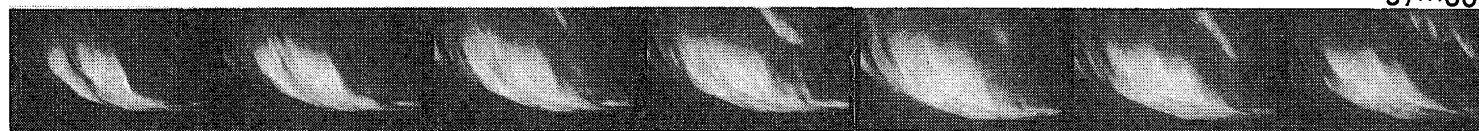
53m00s

図 8 スチール連続写真. 極側の地平線でみられるループ状オーロラの例
Fig. 8. Serial photographs taken on Sep. 3, 1970 showing auroral loops near the pole-side horizon.

Sep. 3 22h31m00s E .



37m00s



Sep. 22 22h01m SE.



22h05m

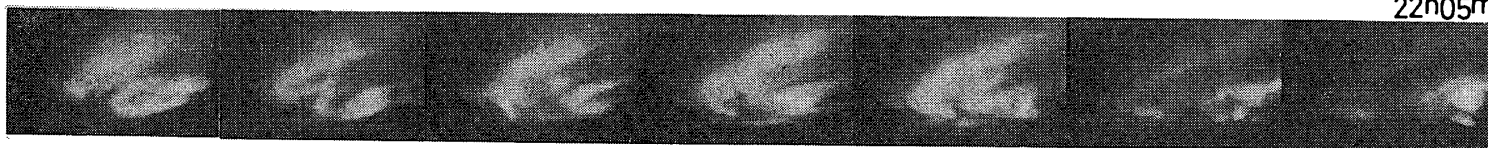


図 9 スチール連続写真. Sep. 3 は, ブレイクアップ時のレイ・バンドの輝度上昇の例. Sep. 22 は, トラベリング・サージの例
Fig. 9. Serial photographs taken on Sep. 3 and Sep. 22, 1970 showing the brightening of rayed bands during an auroral breakup event
and a westward traveling surge.

Date	Time (U. T.)		Number of photographs	Remarks	
	Start	Stop		Azimuth	Elevation
Aug. 2	h m 01 48	h m 01 55	38	300~330°	20~30°
Sept. 1	19 19	19 29	40	40	12
Sept. 3	21 45	21 53	50	60~80	0~10
	22 31	22 37	15	30~40	0~10
Sept. 22	21 51	22 05	46	60	0

また撮影したスチール連続写真の中で代表的なオーロラの形態を選んで図5 (a, b), 6, 7, 8, 9に示し, その時の地球磁場水平成分の変化を図10に示す.

一方第11次隊では, 冬期に内陸旅行が行なわれ, 昭和基地の南東約 300 km の地点にみずほ観測拠点 (70°42.6'S, 44°18.9'E, 海拔 2,167 m) を設け, 超高層部門では, 地磁気や極光などの予備的観測を行なった. 図11は, その時撮影したオーロラのスチール写真である. 将来この地点と昭和基地とのオーロラの同時観測が行なわれるならば, オーロラ機構解明のための有力な情報が得られるであろう.

5. 極光輝度地磁気子午線掃天観測

5.1. H_{β} 線掃天観測

プロトンによって励起される H_{β} 線 ($\lambda 4861.3 \text{ \AA}$) の強度を, 地磁気子午線に沿って掃天観測することにより, プロトン・オーロラの空間時間変動に関する情報を得ようとするものであり, 装置は, 子午面をスイープするシーロスタット部と. それより取り入れた H_{β} 光を検出するティルティング・フィルタ方式の光電受光器よりなる. ティルティング・フィルタ方式は, 多層膜干渉フィルタの透過波長が, その光の入射角の増加とともに短波長側へ移動する特性を利用したもので, 干渉フィルタを周期的に傾けることによって波長をスイープする. 高速プロトンによって励起された H_{β} 線は, ドップラー・シフトのため 4861.3 \AA より短波長側へずれており, ティルティング・フィルタ方式で波長をスイープすることにより, ドップラー・シフトの大きさ, 従って入射プロトンのエネルギーを知ることができる. また同時にバックグラウンドの光の強度を測定することができるので, H_{β} 線のように非常に弱い光を検出するのに適している.

装置の概観図は, 図12に示される. 地磁気子午線に沿って, $180^{\circ}45$ 秒の周期で掃天するシーロスタット部より取り入れられた極光の光は, ダクトを通り, ティルティング・フィルタ光電受光器に導かれる. 光電受光器の先端には平面鏡があり, これを倒すことにより, 極光の

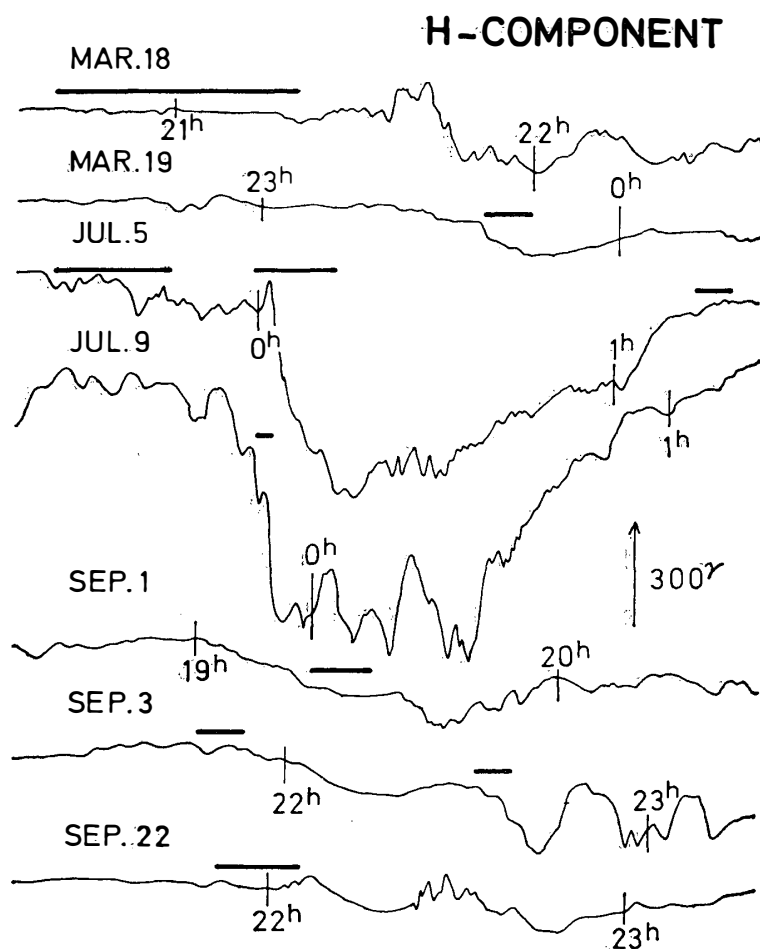


図 10 図 5～9 で示されたスチール連続写真撮影時の地磁気 H 成分
 Fig. 10. Geomagnetic H-component variations during the days of auroral activity shown in Figs. 5-9.



図 11 1970年7月27日みずほ観測地点で撮影されたオーロラ (撮影者: 福嶋泰夫)
 Fig. 11. Aurora observed on Jul. 27, 1970 at Mizuho Camp (courtesy of Dr. Yasuo FUKUSHIMA).

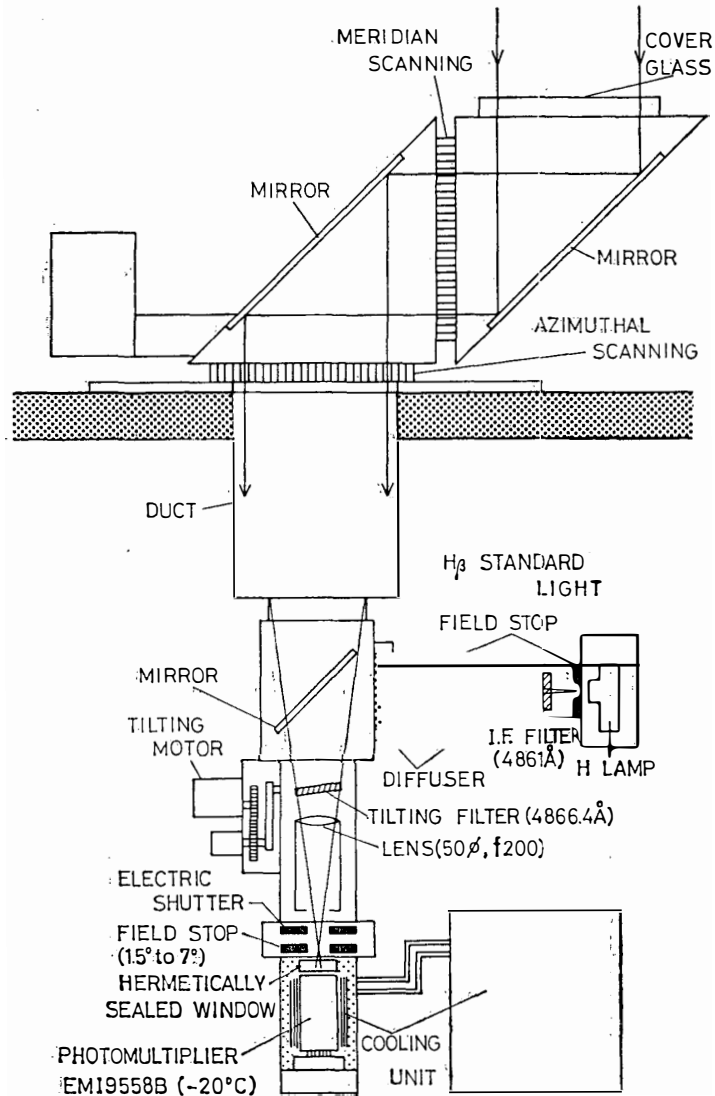


図 12 H β ティルティング・フィルター方式掃天光電受光器の概観図

Fig. 12. Schematic operation diagram of an H β tilting-filter meridian-scanning photometer.

光は遮断され、代わりに水素標準光源からの光が光電受光器に導かれ、キャリブレーションが行なわれるようになっている。水素標準光源は、定電流電源によって安定化された水素スペクトル・ランプからの光を、干渉フィルターを通して H β 線だけ選び出し、半透明の平板によって面光源にしたものである。入射光の量は、絞りをマニュアルで切換えることによって変えられる。

極光の光、あるいは水素標準光源からの光は、半値幅約 5 Å の狭帯域干渉フィルターによって特定の波長だけ選別され、対物レンズによって集光され、光電子増倍管に導かれる。干渉フィルターは、シンクロナス・モーターにより、0°→15°→0° と周期的に傾き、波長領域を

スイープする。スイープの速さは、モーターを取りかえることにより、2段階に変えられ、 0° から 15° までのティルティング周期は、1秒及び0.25秒である。 0° から 15° までのティルティングにより、 4866\AA から短波長側へ 80\AA のスイープを行なっている。視野を限定するためのフィールド・ストップは、マニュアルで回転し、視野は、 1.5° 、 2.5° 、 7° と選択できる。フィールド・ストップの前には、シャッターがあり、電気的に光電子増倍管への光をシャ断することができる。光電子増倍管は、9558 B-EMI を使用、S/N を改善するため、冷却器により、 -20°C に冷却し、暗電流は $5 \times 10^{-11}\text{A}$ 以下である。光電子増倍管の出力は、極光のダイナミック・レンジが広いため、増幅率の違う2つの IC オペアンプにより増幅され、3チャンネル・ペンレコーダー及び4チャンネル・FM データレコーダーに記録された。記録紙上の感度は、 $0.25\text{R}/\text{\AA} \cdot \text{mm}$ 及び $2.5\text{R}/\text{\AA} \cdot \text{mm}$ であり、測定できる強度範囲は、 $0.25\text{R}/\text{\AA} \sim 100\text{R}/\text{\AA}$ である。

5.2. 多色掃天観測

極光の3つの特徴的輝線 $\text{N}_2^+ \lambda 4278$ 、 $\text{OI } \lambda 5577$ 、 $\text{OI } \lambda 6300$ の掃天観測をすることによって、電子によって励起される極光の空間時間分布、及び入射電子のエネルギー・スペクトルに関する情報を得ようとするものである。

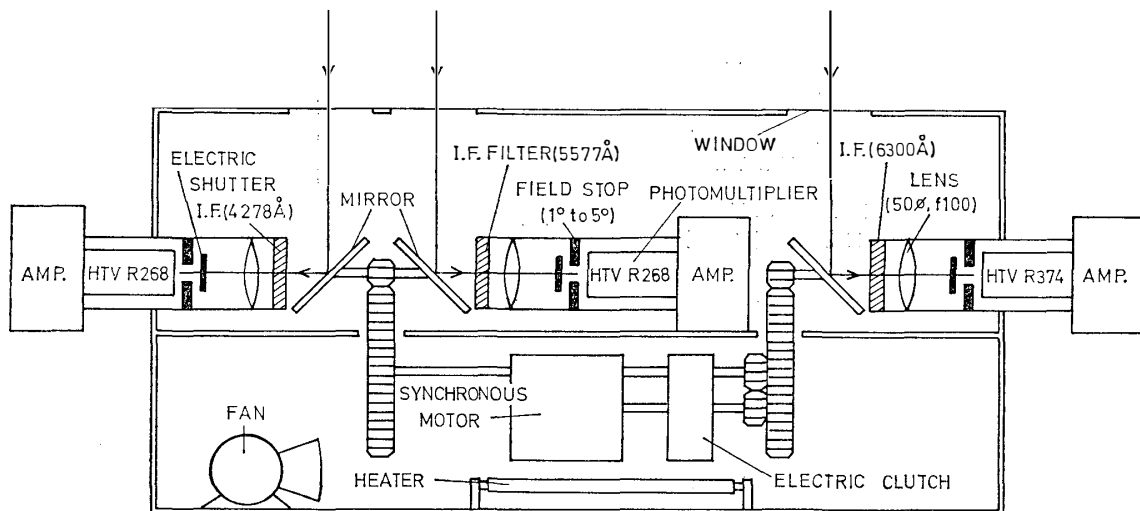


図 13 多色掃天光電受光器の概観図

Fig. 13. Schematic operation diagram of multicolor meridian-scanning photometers.

装置は、図13に示されるように、空間を掃天するために鏡を回転させる機械部分をおさめたチェンバーと、極光の光を検出する光電受光器をおさめたチェンバーよりなり、屋外に置かれるため機械部分のチェンバーは、ヒーターによって約 15°C に保温される。一方光電受

光器のチェンバーは保温されず、外気温程度まで冷却されるため、冬期極光観測期には、約 -20°C 以下に下がり、光電子増倍管の S/N を改善するのに役立っている。

鏡は、回転軸に対し 45° の角度で取り付けられ、地磁気子午線に沿って 180° 往復回転運動を行ない、N \rightarrow S と空間をスイープする。 180° 掃天周期は、シンクロナスモーターの回転速度を変えることにより、5秒及び2.5秒と2段階に切り換えられる。回転する鏡によって取り入れられた極光の光は、干渉フィルタによって定められた特定の波長だけ選別され、対物レンズによって集光され、光電子増倍管に導かれる。視野を限定するためのフィールド・ストップは、マニュアルにより回転し、視野は、 1° ~ 5° と選択できる。光電受光器には、また電子シャッターがあり、これを閉じることにより、ベース・ラインを決めることができる。光電子増倍管は、OI $\lambda 6300$ 検出用に R374-HTV, OI $\lambda 5577$, $\text{N}_2^+\lambda 4278$ 検出用に R 268-HTV を使用、暗電流はそれぞれ $0.005\ \mu\text{A}$, $0.03\ \mu\text{A}$ 以下である。光電子増倍管の出力は、 H_β 光電受光器と同じく、極光のダイナミック・レンジが広いため、それぞれ増幅率が違う2つの IC オペアンプで増幅され、3チャンネル・ペンレコーダー及び4チャンネル・FM データレコーダーに記録された。記録紙上の感度は、 6300\AA は 60R/mm , 1kR/mm で、測定できる強度範囲は、 $30\text{R}\sim 40\text{kR}$ である。 5577\AA , 4278\AA は、高感度の方が 200R/mm , 低感度の方が $1,25\text{kR/mm}$ であり、測定できる範囲は、 $100\text{R}\sim 50\text{kR}$ である。

装置の感度検定は、白色標準光源によって行なった。これは、定電流電源で安定化されたタングステンランプからの光を半透明の平板により面光源にしたもので、光源の強さは、電流を変えることによって調節できる。

5.3. 極光掃天観測の結果

図14は、 H_β 掃天光電受光器による極光中の H_β エミッションの観測例である。 H_β 線は、ドップラー・シフト及びドップラー・ブロードニングを起こしており、昭和基地を通る磁力線方向 ($\sim 10^{\circ}\text{N}$) に近づくにつれドップラー・シフトが大きくなる (ピークの間隔が広がる) のが認められる。図15は、多色掃天受光器による極光アークの観測例であり、 6300\AA , 5577\AA , 4278\AA の3輝線が感度を変えて記録されている。図16は、極光のブレイクアップに伴う H_β 強度上昇の例で、電子励起の極光からのコンタミネーションによるバックグラウンド・レベルの上昇がみられる。固定フィルタでは、バックグラウンドの強度と、 H_β 強度を区別できないが、ティルティング・フィルタ方式では、 H_β エミッションの輝線強度だけを求めることができる。

さて、こうした掃天受光器の記録から、極光の空間的、時間的変化、及びプロトン励起の

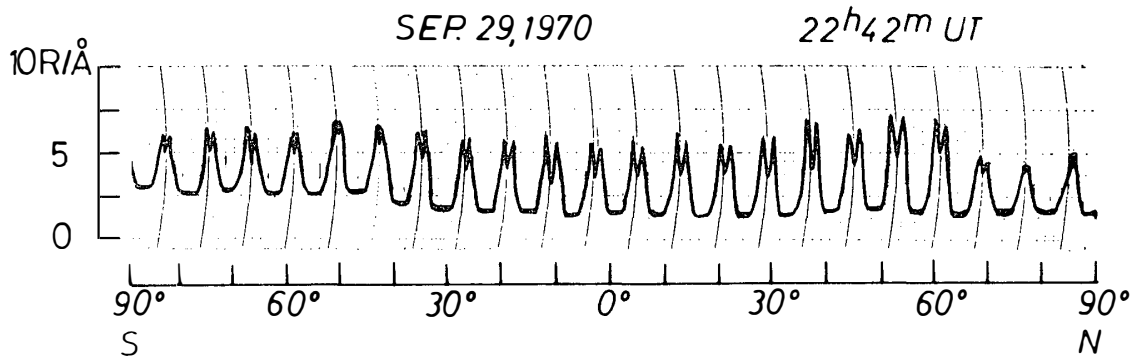


図 14 H_{β} 掃天光電受光器によるオーロラ中の H_{β} エミッションの観測例
 Fig. 14. Example of auroral H_{β} emission record by an H_{β} tilting-filter meridian-scanning photometer.

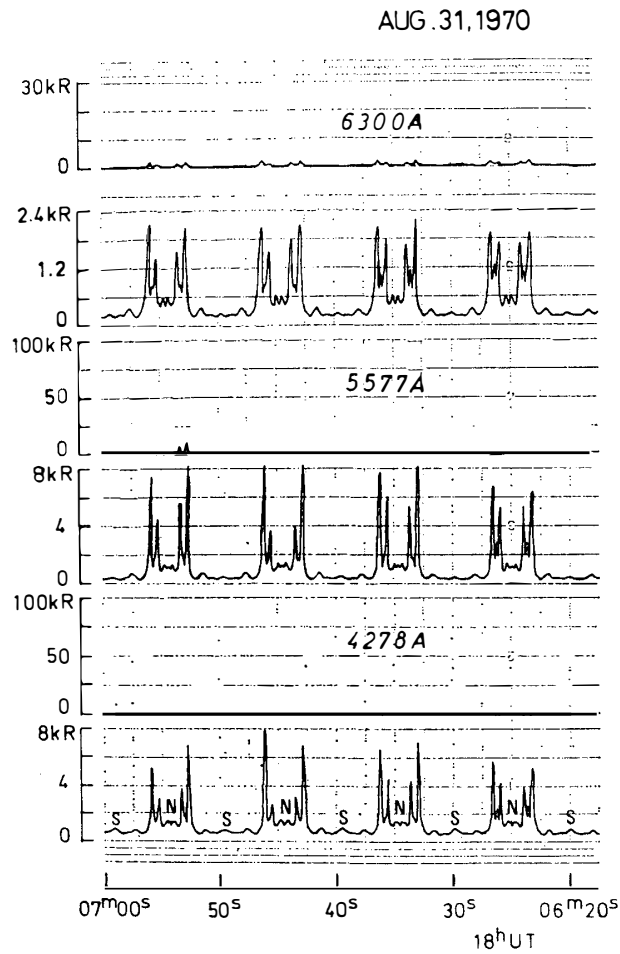


図 15 多色掃天光電受光器によるオーロラ・アークの観測例
 Fig. 15. Example of the multicolor meridian-scanning photometer record of auroral arcs.

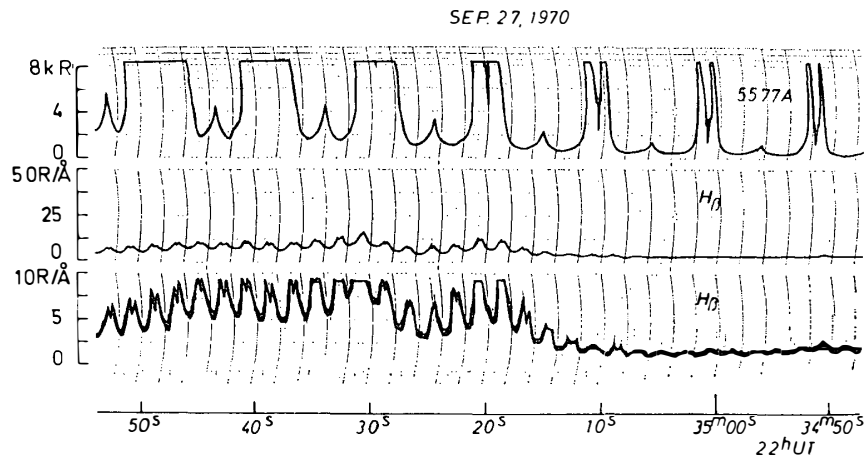
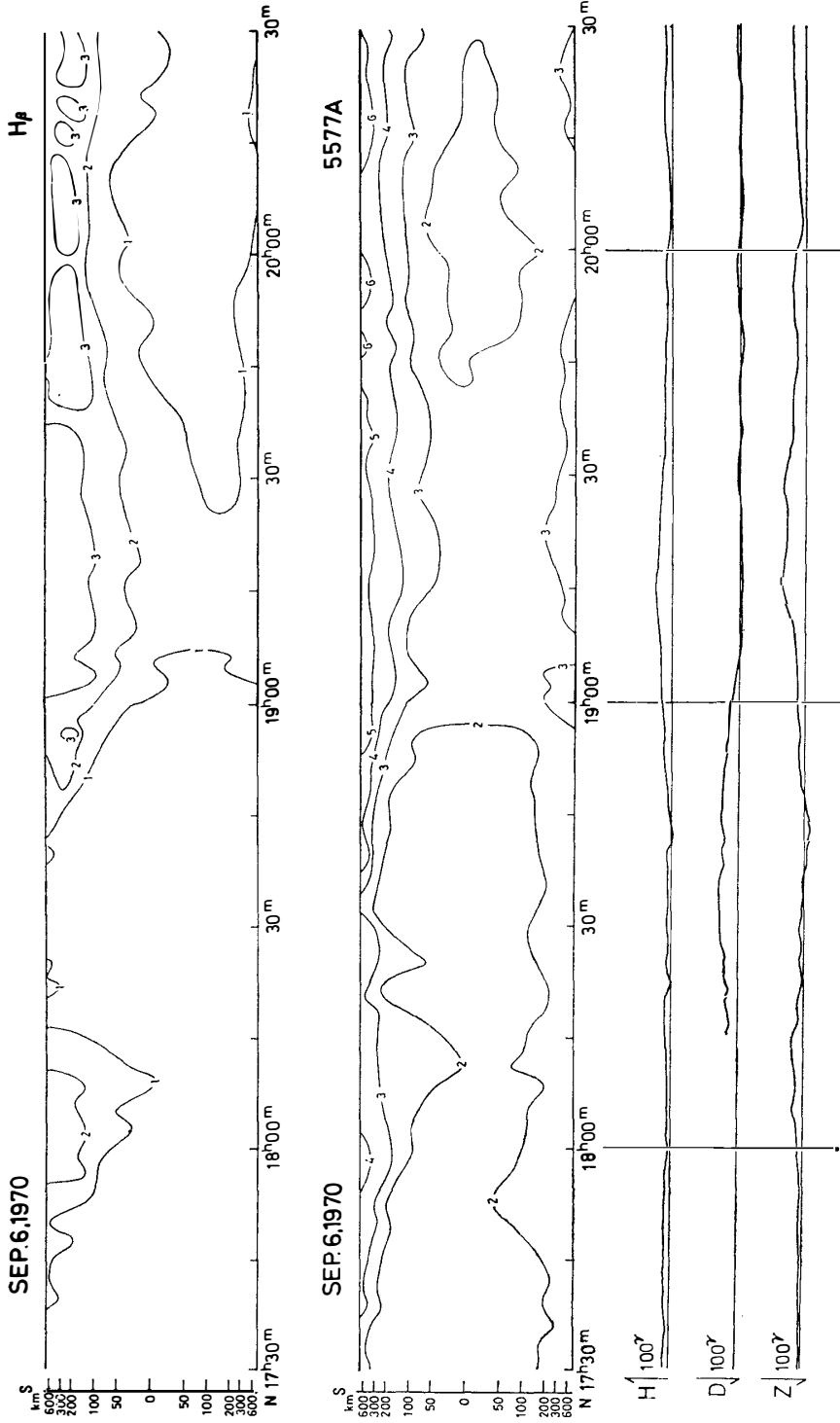


図 16 ブレイクアップに伴う H_{β} エミッション強度の上昇の例。上段が 多色掃天光電受光器からの OI $\lambda 5577$ エミッションの記録で、中段、下段は、 H_{β} 掃天光電受光器からの感度の異なる H_{β} エミッションの記録である。

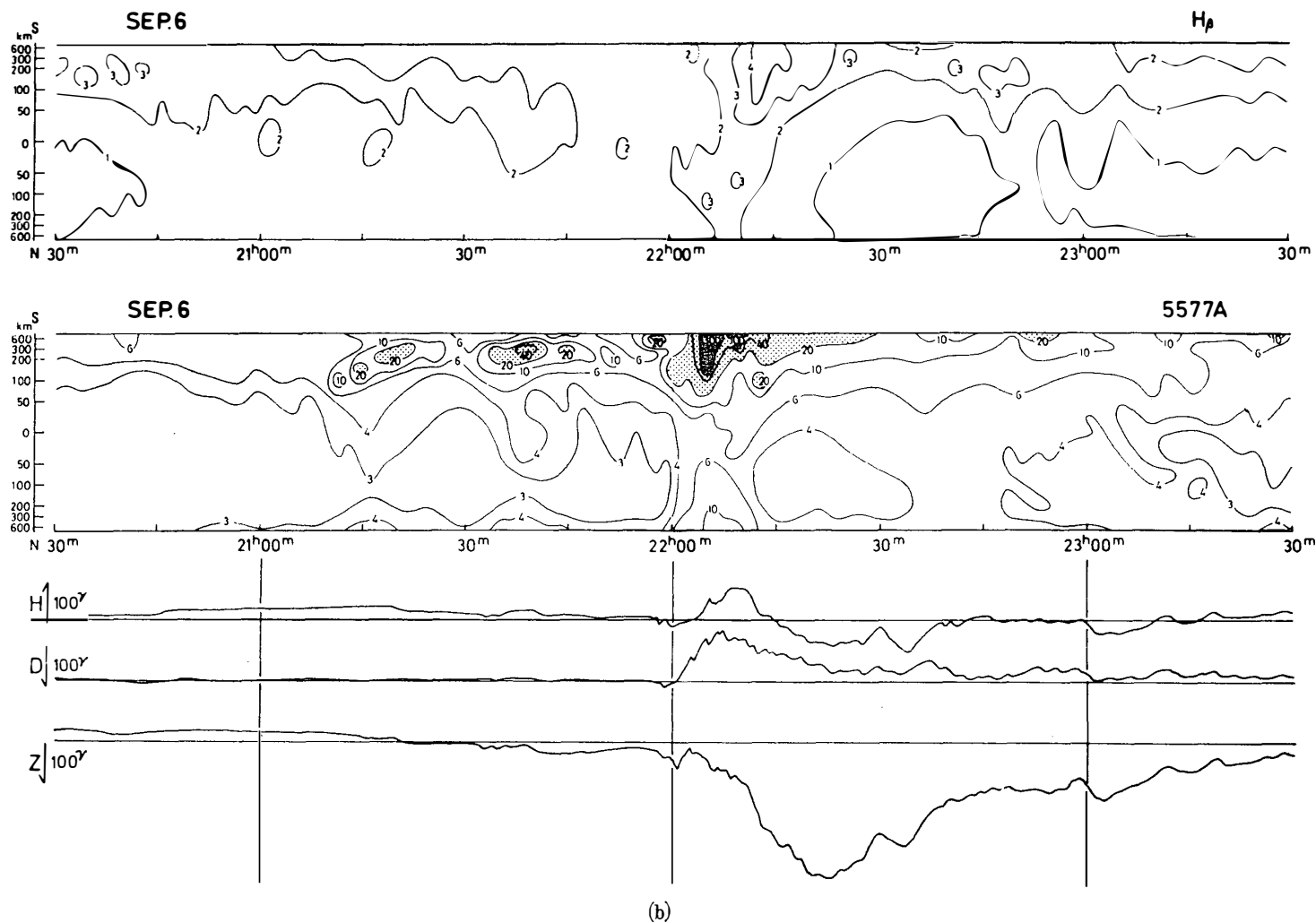
Fig. 16. Example of the record for an auroral breakup event accompanied by an H_{β} emission enhancement. Top: OI $\lambda 5577$, middle and bottom: H_{β} emissions (low and high sensitivities.)

表 2 プロトン・オーロラ及び電子・オーロラの空間時間変化図リスト
Table 2. List of the intervals, for which space and time diagrams of H_{β} emissions and 5577 Å emissions are available.

Date	Time (U.T.)		Date	Time (U.T.)	
	Start	End		Start	End
	h m	h m		h m	h m
Mar.			Aug.		
18-19	18 30	00 30	23	16 15	22 30
19-20	21 45	00 30	27-28	16 00	02 30
27	17 30	23 00	28-29	16 00	02 30
28-29	22 00	00 45	31- 1	16 15	02 15
Apr.			Spet.		
3- 4	18 15	01 15	1- 2	16 30	01 30
4- 5	21 15	00 15	2- 3	16 30	01 45
6- 7	17 45	01 00	3- 4	16 15	02 00
15-16	16 45	02 00	6- 7	17 30	01 45
30- 1	15 00	03 26	19-20	17 39	00 45
May			22-23	18 04	00 30
1- 2	14 55	03 15	24-25	18 15	00 15
3- 4	16 00	03 30	25-26	18 15	00 00
14-15	15 30	04 00	26-27	18 15	00 00
27	18 45	21 45	27	18 16	23 48
June			28	18 30	23 45
12-13	18 45	05 00	29	19 00	23 46
13	14 14	16 00			



(a)



(b)
 図 17 (a, b) Sep. 6, 1970 の H_β エミッションおよび 5577Å エミッションの空間時間変化図. 最上段が H_β エミッション, その下が 5577Å エミッションの空間時間変化図で, 数字 1 は, それぞれ 8R, 100R に相当. 最下段は, 昭和基地の地磁気 H, D, Z 成分
 Figs. 17 (a, b). The space-time diagrams of H_β emissions (top) and 5577Å emissions (middle). Numerals in the contour map are given in units of 8R and 100R, respectively. Bottom traces are the H; D; Z components of geomagnetic variations.

極光，プロトン・オーロラと，電子励起の極光，エレクトロン・オーロラの相互関係を求めるため， H_{β} 線掃天光電受光器による記録，及び多色掃天光電受光器の記録からは，エレクトロン・オーロラの代表的輝線 $0I \lambda 5577$ エミッションを選び，縦軸に地磁気子午線方向の空間位置，横軸に時間をとり，オーロラ強度を等強度線で表わすダイアグラムの作成を行なった．作成した日数は，31日間で，日時は表2で示される．

この空間時間変化図は，プロトン・オーロラとエレクトロン・オーロラの関係に関する有力な情報を提供してくれた．図17 (a, b) は，その代表的例である．

最上段は， H_{β} エミッションの空間時間変化図．数字1は，8 R に相当．その下は， 5577 \AA エミッションの空間時間変化図で，数字1は，100R に相当．空間時間変化図では，斜射効果 (van Rijn effect) や大気吸収等による補正は行なわれていない．また，オーロラの高度を 100km と仮定し，天頂角を昭和基地からの地磁気子午線に沿っての距離に変換した．最下段は，地磁気変化の H, D, Z 成分である．

この図をみると，2000UT (昭和基地では，Geomagnetic Local Time, GLT は，UT より15分進む) よりも早い時間帯では，H (あるいは Z) の増大及び減少とより相関をもって極方向から赤道方向に H_{β} のエミッション・ゾーンが広がり，また極方向に後退してゆくのが見られる (1800UT 及び1900UT 付近をみよ)．この時の $0I \lambda 5577$ エミッションの空間時間変化は， H_{β} のそれと非常に類似しており，強度比 $I(5577)/I(H_{\beta})$ は約10で，プロトンによって 5577 \AA が励起された場合の計算値 (EATHER, 1967 a, b) と一致する．このこと

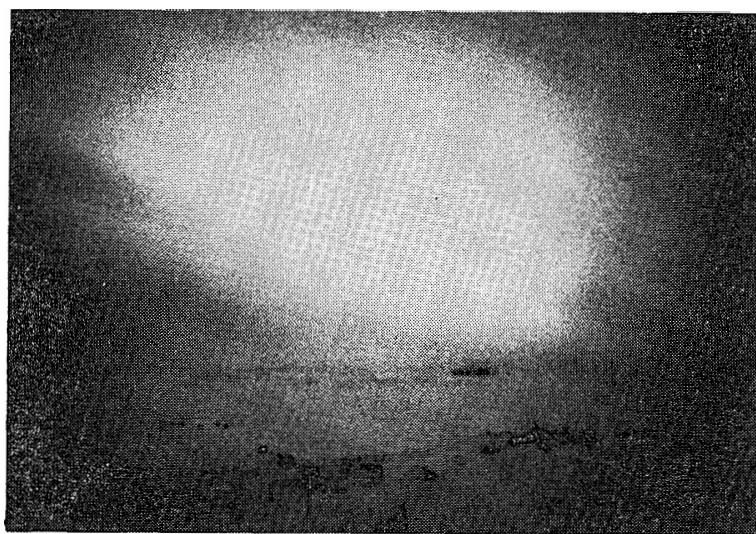


図 18 午後側でみられるプロトン・オーロラのステール写真
Fig. 18. The proton aurora observed in the dusk of Sep. 1, 1970.

から、この時間帯での5577Å エミッションは、プロトンによって励起されていると考えられる。

一般に、プロトン・オーロラは非常に強度が弱い（ H_{β} 強度で普通 100R 以下）、全天カメラ写真ではむろん識別できないが、午後側でみられるプロトン・オーロラは、非常に幅の広い、構造がはっきりしない帯状のオーロラが東西にかかるのが普通である。図18は、長時間露出をかけた午後側でみられるプロトン・オーロラのスチール写真である。

さて、2000UT 以降になると、プロトン・オーロラが見える領域（プロトン・オーロラ・オーバル）は、徐々に赤道側に向かって移動し始め、プロトン・オーロラ・ベルトの極側に電子・オーロラのアーチが出現し始める（21000 UT 以降）。ここで重要なことは、プロトン・オーロラと電子・オーロラの出現する領域がはっきりと分離されていることである。この事実と FRANK (1971) の科学衛星の観測結果などを合わせて考えると、磁気圏において電子・オーロラは、プラズマ・シートからの降下電子によって、プロトン・オーロラは、トラッピング・バウンダリの内側のリング・カレント・プロトンからの降下プロトンによって起こされていると考えられる。

そして、2200UT に南の地平線で電子・オーロラのブレイクアップが起こり、それより少し遅れて電子・オーロラの低緯度側から始まるプロトン・オーロラのブレイクアップ現象がみられる。このブレイクアップ現象によって、プロトン・オーロラのゾーンは、極方向に後退することが分かる。

Sep. 6 の例は、 K_p が低い（2+, 2+）比較的静かな日の例で、電子・オーロラ・オーバルの位置は、昭和基地よりも極方向（高緯度側）にあった。 K_p の大きい荒れた日は、電子・オーロラ・オーバルの位置は、低緯度側に下がり、それと同時にプロトン・オーロラ・オーバルの位置も低緯度側に移動する。図19 は、そうした日の例で、 K_p は 4 である。しかし、この例でも先に述べたような、ブレイクアップ前のプロトン・オーロラの低緯度側移動と、ブレイクアップ時の極方向への広がりがはっきりとみられる。ブレイクアップの直前2230UT には、プロトン・オーロラは、昭和基地の北の地平線よりも低緯度側へ移動してしまい、プロトン・オーロラが消失したように見える。

ブレイクアップ時の極方向への広がりは、電子・オーロラとプロトン・オーロラで様子が違い、プロトン・オーロラのブレイクアップの方が数分遅れる。また2249UT に始まる2度目のブレイクアップでは、プロトン・オーロラで地磁気 Z 成分の鋭い減少とよい対応をもって顕著なブレイクアップ現象がみられるのに、電子・オーロラでは、は

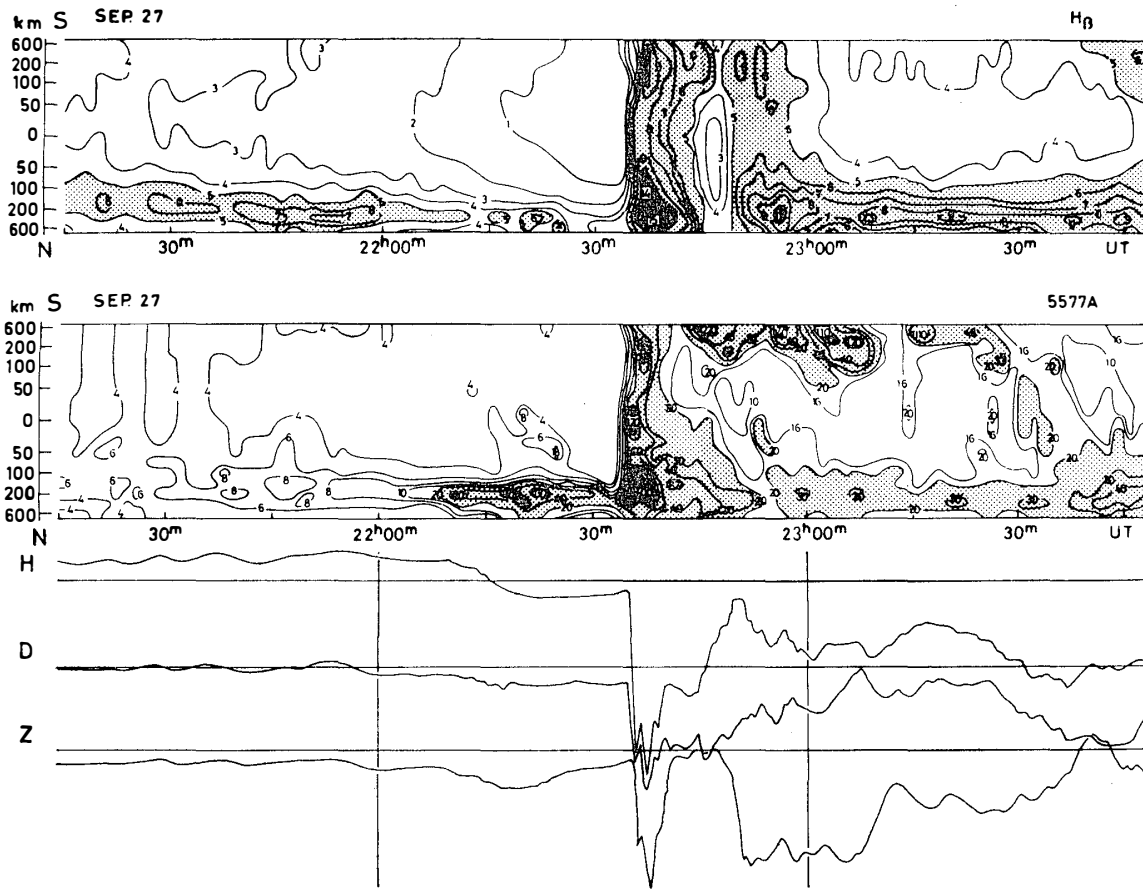


図 19 Sep. 27, 1970の H_{β} エミッションおよび 5577\AA エミッションの空間時間変化図
 Fig. 19. The space-time diagrams of H_{β} and 5577\AA emissions on Sep. 27, 1970 shown along with the simultaneous geomagnetic variations.

つきりしない。これらは、Sep. 6の静かな日と同様、プロトン・オーロラのブレイクアップが電子・オーロラのそれより低緯度側で起こることによって解釈される。

K_p=3の中程度に荒れた日の例を図20に示す。この例でも、2000UT付近から、プロトン・オーロラ・オーバルの低緯度側移動が始まり、それ以降、その高緯度側に、強い電子・オーロラが出現する。そして電子及びプロトン・オーロラのブレイクアップ現象が2209UTからみられる。

さて、真夜中以後の午前側では、ブレイクアップ現象は、かなり様子が違って来る。図21に示されるように、ゆっくりした地磁気 H 成分の減少がおこっている最中に0020UTから、急激なプロトン・オーロラの極方向への広がりが起こる。この時、真夜中より前のNarssarsauq (昭和基地より27°西) では、鋭いネガティブ・ベイが起きている。即ち、真夜中以降では、電子・オーロラよりもプロトン・オーロラでブレイクアップ現象がはつき

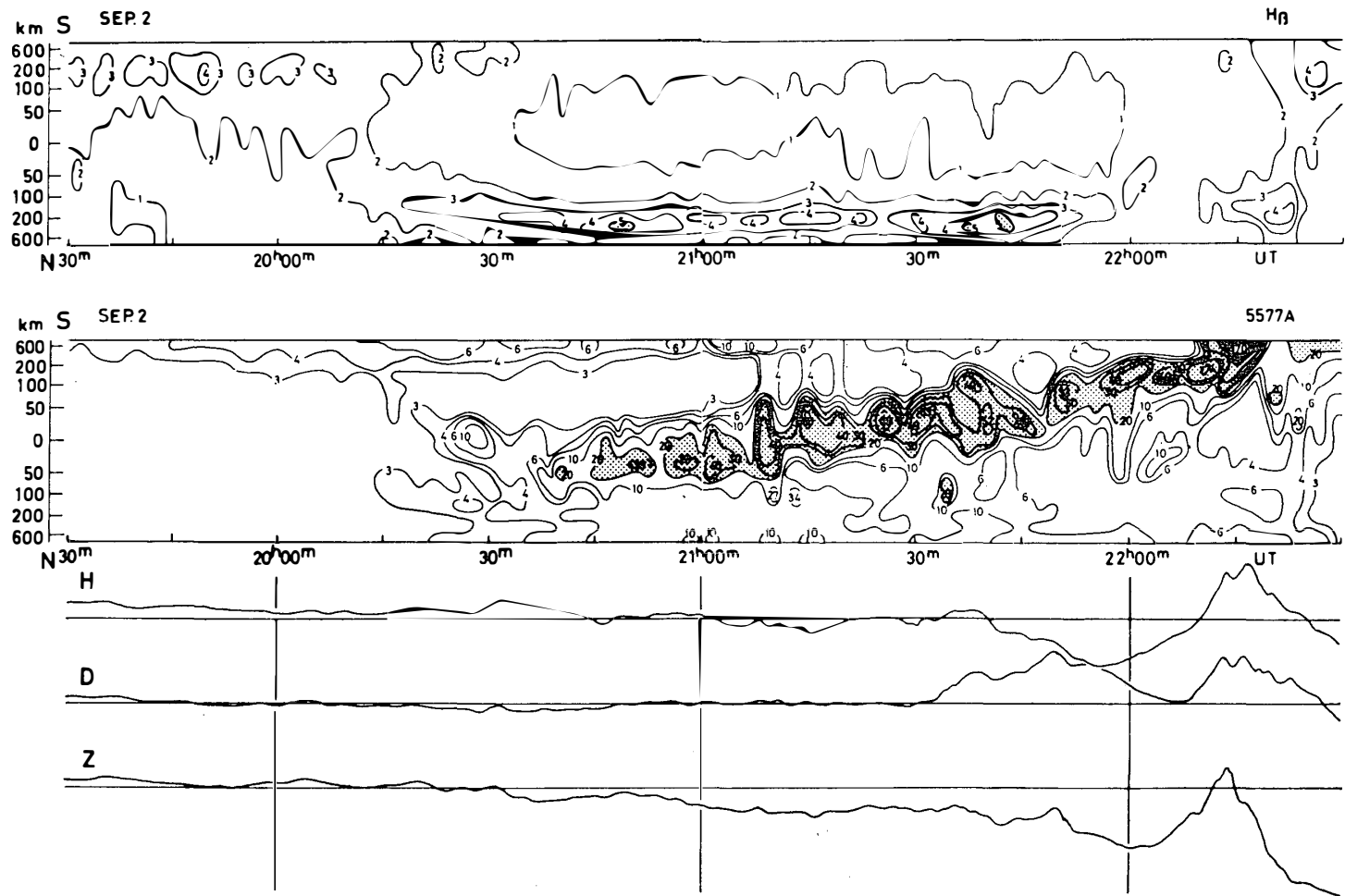


図 20 Sep. 2, 1970 の H_{β} エミッションおよび 5577\AA エミッションの空間時間変化図

Fig. 20. The space-time diagrams of H_{β} and 5577\AA emissions on Sep. 2, 1970 shown along with the simultaneous geomagnetic variations.

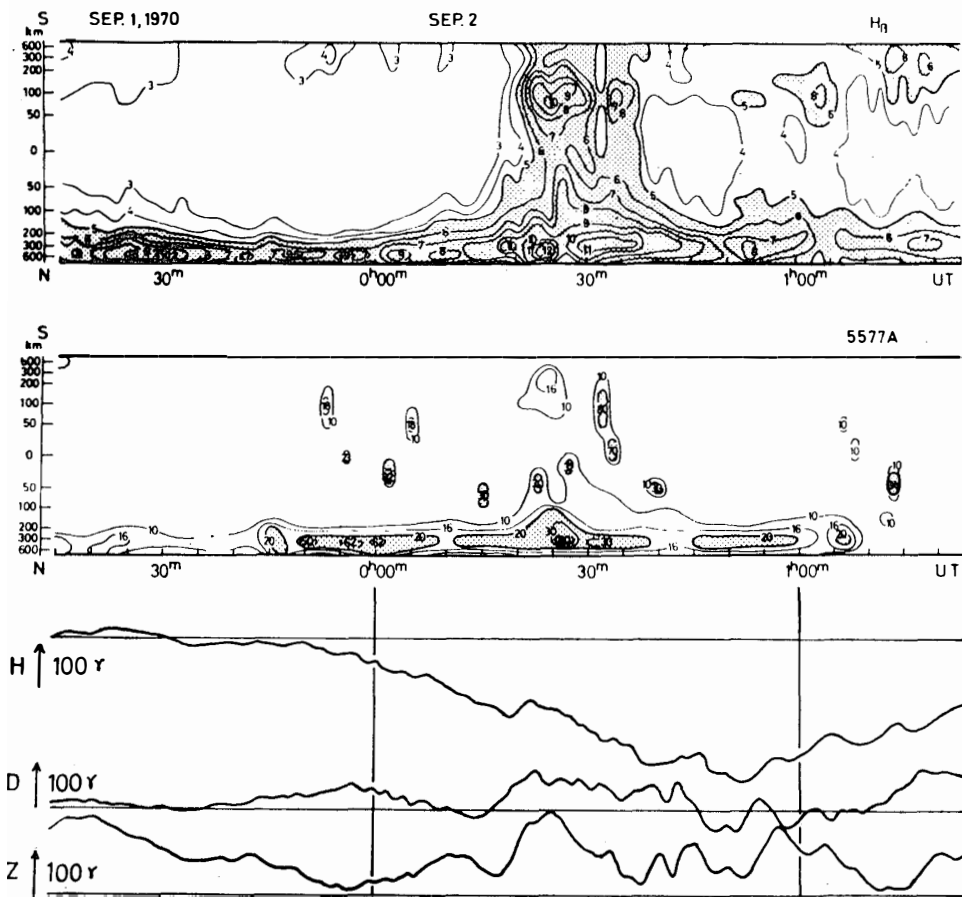


図 21 Sep. 1-2, 1970 の H_{β} エミッションおよび 5577\AA エミッションの空間時間変化図
 Fig. 21. The space-time diagrams of H_{β} and 5577\AA emissions on Sep. 1-2, 1970 shown along with the simultaneous geomagnetic variations.

りとみられる．以上の結果をまとめる．

A. Early evening sector

1) 午後側の2000GLT (地磁気が荒れている日は, 1800GLT) より早い時間帯で観測される 5577\AA エミッションは, 空間時間分布 H_{β} がエミッションと非常によく似ており, 強度も弱く, 強度比は, $I(5577)/I(H_{\beta}) \sim 10$ で, 5577\AA エミッションがプロトンで励起されていると考えた場合の計算結果と一致する．このことから, この領域では降下粒子はプロトンのみで, 純プロトン・オーロラの領域と考えられる．即ち, エレクトロン・オーロラ・オーバルの位置は, 昭和基地より 5° 以上極側にあり, 掃天光電受光器ではエレクトロン・オーロラは観測されない．

2) 地磁気の H 成分の増大とともに, プロトン・オーロラの強度は増大し, 領域は極方向から赤道方向に広がる．また H 成分の減少とともに, プロトン・オーロラは強度を減少

させつつ極方向に後退する。即ち、プロトン・オーロラは、ポジティブ・ベイの発達及び衰退とよい相関をもっている。

B. Late evening sector

1) 2000GLT から2200GLT の時間帯（荒れた日は、1800GLT から2100GLT の時間帯）になると、プロトン・オーロラのゾーンは高緯度側に鋭い境界をもち、この境界の高緯度側の領域に電子・オーロラが出現する。

2) ブレイクアップの1時間位前から、プロトン・オーロラのゾーンは低緯度側に移動し始め、その高緯度側に出現したアークも同時に低緯度側に移動し続ける。

3) プロトン・オーロラ・オーバルの高緯度側で、電子・オーロラのブレイクアップ現象（急激なオーロラ強度の上昇と、極方向へのオーロラの広がり）が起こるが、このときプロトン・オーロラは、極方向への広がりを示さない。

C. Pre-midnight sector

1) 2200 GLT から0000 GLT の時間帯（荒れた日は2100 GLT から0000 GLT の時間帯）になると、電子・オーロラのブレイクアップ現象と同時に、プロトン・オーロラもブレイクアップを起こす。

2) プロトン・オーロラのブレイクアップは、電子・オーロラよりも遅れ、かつ電子・オーロラの低緯度側で起こる。

D. Post-midnight sector

1) ゆるやかなネガティブ・ベイの中で、プロトン・オーロラの顕著なブレイクアップ現象が起こる。電子・オーロラは、弱いレイが出現するだけでブレイクアップ現象は見られない。

2) このとき、0000 GLT 前の地点では、鋭いネガティブ・ベイが観測される。

6. 極光輝度短周期脈動観測

極光輝度の短周期変動、およびそれらの地磁気脈動との関連を調べるため、天頂方向に固定された視野の異なる二つの光電受光器により極光輝度の連続観測を行なった。

観測装置のダイアグラムは図22に示される。受光器の視野は、それぞれ 30° 及び 5° で、干渉フィルタは両者とも 4278\AA を用いた。記録器には、6チャンネル・ペンレコーダーを用い、広域用受光器の出力は、帯域フィルタ F1 ($0.01\sim 0.1\text{Hz}$)、F2 ($0.1\sim 2\text{Hz}$) を通し、直流成分に重なった短周期の変動だけを記録させ、狭域用受光器の出力は、そのまま記録させた。

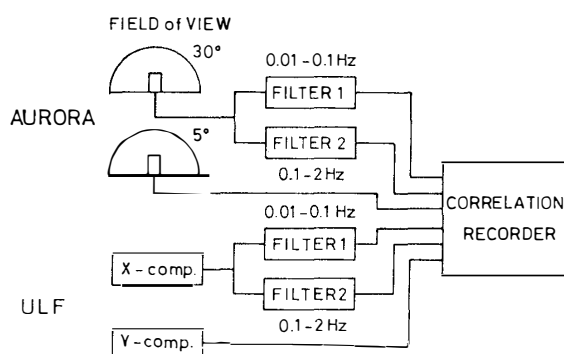


図 22 極光輝度短周期脈動観測システムのブロックダイアグラム

Fig. 22. Block diagram of the operation system of auroral and geomagnetic pulsations.

地磁気脈動の X 成分は、同じ周波数特性をもつフィルタ F1, F2を通し、Y 成分はフィルタを通さずそのまま記録させた。

7. あとがき

プロトン・オーロラと電子・オーロラの同時掃天観測の結果は、オーロラ・フレア（磁気圏サブストーム）を解明する上で、多くの新しい情報をもたらしつつある。これらについての更に詳しい結果は、おって JARE Scientific Report や、その他の雑誌に発表していく予定である。

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、ならびに準備段階でご指導いただいた東京大学理学部地球物理学研究施設の皆様に厚く謝意を表します。

文 献

- AYUKAWA, M. (1971): Records of all-sky camera utilization at Syowa Station, Antarctica in 1970. JARE Data Rep., **13**, 1-19.
- EATHER, R. H. (1967 a): Secondary process in proton auroras. J. Geophys. Res., **72**, 1481-1490.
- EATHER, R. H. (1967 b): Auroral proton precipitation and hydrogen emissions. Rev. Geophys., **5**, 207-285.
- FRANK, L. A. and K. L. ACKERSON (1971): Local-time survey of plasma at low altitudes over the auroral zones. Univ. Iowa Res. Rep., 71-40.
- HIRASAWA, T. and K. KAMINUMA (1970): Space-time variation of aurora and geomagnetic disturbances, auroral observations at Syowa Station in Antarctica. JARE Sci. Rep., Ser. A, **8**, 1-29.
- HIRASAWA, T. and T. NAGATA (1972): Constitution of polar substorm and associated phenomena in the southern polar region. JARE Sci. Rep., Ser. A, **10**, 1-76.
- NAKAMURA, J. (1962): Time correlation of auroral spectra. J. Phys. Soc. Japan, **17**, Supp. A-I, 227-233.
- TSURUDA, M. and E. KANEDA (1968): Hydrogen emission preceding auroral break-up. Rep. Ionos. Space Res. Japan, **22**, 289-294. (1972年4月11日受理)