

1961年の越冬観測から見た昭和基地における
電離層, 極光および地磁気変化の相互関係

川尻轟大*・若井 登*・中村純二**・中村 強***・長谷川貞雄*

RESULTS OF SIMULTANEOUS OBSERVATIONS OF IONOSPHERE,
AURORA AND GEOMAGNETISM AT SYOWA STATION
DURING THE 1961 WINTERING

Nobuhiro KAWAJIRI*, Noboru WAKAI*, Junji NAKAMURA**,
Tsuyoshi NAKAMURA***and Sadao HASEGAWA*

Abstract

Ionospheric, auroral and geomagnetic observations were made simultaneously at Syowa Station during the fifth wintering of the Japanese Antarctic Research Expedition in 1961. The ionospheric soundings at vertical incidence were carried out every fifteen minutes. Auroras were measured by photometric technique for the three lines, $\lambda 5577 \text{ \AA}$ (OI(S-D) line), $\lambda 6300 \text{ \AA}$ (OI(D-P) line) and $\lambda 4278 \text{ \AA}$ (NG of $\text{N}_2^+(0-1)$ band), and the magnetogram from which the magnetic Q -indices were reduced, was obtained by a magnetometer of pen-recording type.

Based on these data obtained during the winter months, the expressions for the relation between auroral luminosity (J in kR) and electron density (N in electrons/

cm^3) in the E region were calculated in the following two ways.

1) When the exponent b of maximum electron density in the expression $J = aN_{max}^b$ is calculated by the method of least squares, it is about 1.6 for $\lambda 5577 \text{ \AA}$ line and about 1.3 for $\lambda 4278 \text{ \AA}$ band for the case of E_n (night E layer) or E_{sr} (retardation type of E_s).

2) In case it is assumed beforehand that the auroral luminosity is proportional to the square of maximum electron density in the E -region, the expression becomes $J(4278) = 1.2 \times 10^{-11} N_{max}^2$ for the case of the correlation of the 4278 band with E_{sr} layers.

In general, type of the sporadic E layer seems to change in the order from E_n to E_{sr} , E_{sa} (auroral type of E_s) and E_{sf} (flat type of E_s), as the geomagnetic disturbance of negative bay type progresses.

* 電波研究所 The Radio Research Laboratories

** 東京大学教養学部物理学教室 Institute of Physics, College of General Education, the University of Tokyo

*** 東京天文台 Tokyo Astronomical Observatory, the University of Tokyo

There is a kind of the sporadic F layer which is not accompanied by auroral and geomagnetic disturbances. Such E_s layers are apt to take a shape of flat type, and may be, so to speak, of mid-latitude type.

The relations between auroral intensities of $\lambda 5577 \text{ \AA}$ line and $\lambda 6300 \text{ \AA}$ line and between auroral luminosity and geomagnetic variation of H component are also discussed.

1. 緒 言

南極昭和基地（地理座標 緯度 $69^{\circ}00'22''\text{S}$ ，経度 $39^{\circ}35'24''\text{E}$ ，地磁気座標 緯度 $-69^{\circ}42'$ ，経度 $77^{\circ}24'$ ）における第5次越冬（1961年）期間中，第3次，第4次と同じく，電離層，極光および地磁気について同時観測がなされた。しかし，前2カ年の極光分光観測は酸素緑線の $\lambda 5577 \text{ \AA}$ 線のみに限られていたが，第5次越冬観測に至って初めて極光中の3つの主要な放射線である $\lambda 5577 \text{ \AA}$ (O I (S-L) 線)， $\lambda 6300 \text{ \AA}$ (O I (D-P) 線) および $\lambda 4278 \text{ \AA}$ (N_2^+ negative group の (0-1) 帯) の光電測光がなされた。そして光電測光器の改良により，15分毎に得られるアイオノグラム（電離層観測記録）と，同時刻における極光の輝度との直接の比較が可能になった。

電離層と地磁気の観測は，1959年の第3次越冬以来同じ方法で続けられた。

高緯度における超高層大気現象の相互関係については，すでに多くの人々によって報告されている。そのうち本論文に関連のあるものについて二三触れてみよう。

極光の輝度と E 領域の最大電子密度との関係については，すでに1955年にノルウエーの OMHOLT²⁾ が，Tromsø における観測結果から， N_2^+ の negative group のうちの $\lambda 4278 \text{ \AA}$ 帯を使って報告している。彼は対象とする E 領域の成層として特に臨界周波数附近で明瞭な帯速度の遅れを示す E_a 層（彼の命名による E_n (night- E layer) および E_{sr} (retardation type of E_s) 層が対応すると考えられる) を採用し，その最大電子密度 N_{max} (electrons/cm³) と輝度 J (kilo-rayleighs: 1 rayleigh = 10^6 photon/cm²(column) sec) との間に

$$J (\text{negative group of } \text{N}_2^+) = 2.5 \times 10^{-10} N_{max}^2$$

が成り立つことを示した。

また，昭和基地の1959年のデータを用いて，CGUTI³⁾ は定量的に $\lambda 5577 \text{ \AA}$ (O I) の輝度と E_s 層の最大電子密度との関係，および輝度と地磁気水平成分の変化 (ΔH γ 単位) との関係調べ，それぞれ次の関係式を得た。

$$J(5577) = 5 \times 10^{-10} N_{max}^2$$

$$J(5577) = 3 \times 10^{-3} |\Delta H|^2$$

他に定量的関係として REES⁴⁾ は $\lambda 5577 \text{A}$ (O I) の $\lambda 3914 \text{A}$ (N_2^+ の N.G.) に対する瞬時値の比は, 10 の 3 乗の輝度変化に対して 1.9 と一定であり, この値はオーロラの型に依らないと報告している. これは $\lambda 5577 \text{A}$ (O I) と, $\lambda 4278 \text{A}$ を含む N_2^+ の negative group の相関が非常によいことを示す例であろう. また, HUNSUCKER と CWREN⁵⁾ は IGY 期間中アラスカの College で得られた電離層のアイオノグラムと全天カメラによる写真を 1 対 1 に対応させ, その結果, 極光の天頂強度指数と E_s 層の臨界周波数との相関係数が 0.544 であることを見出した.

その他に定性的な関係を扱った論文も数多いが, 初期のものとしては 1953 年に出た MEEK⁶⁾ のものがある. 彼は亜極光帯にある Saskatoon のデータを使い, 地磁気の湾形変化の際, 地磁気水平成分の減少の割合が極光強度の増加に関係すると報告した.

また, MAEHLUM⁷⁾ は IGY 前後に得られたアイオノグラムを基にして調べた結果, Tromso においては極光帯の真下であるにもかかわらず, オーロラ型の E_s 層はほとんど出現しないと述べている.

本論文は第 5 次南極視測に際して, 1961 年の冬期に昭和基地において行なわれた, 電離層, 地磁気および極光の観測結果を, 統計的に解析したものである.

初めに, 電離層, 地磁気および極光の観測方法とデータの読み取りに関して記述する. 次に “夜間 E 層 (E_n 層)”, 各型の E_s 層および Blackout の発生頻度と地磁気 Q -指数との関係について述べ, 地磁気の変乱, 即ち $|Q|$ の増大に伴って E_s 層の成層の型に移行の生ずることを示す. また, この移行と全然関連がなく, 地磁気静穏時に極光活動とも関係なく出現する E_{sf} 層についても言及する. 次に, 極光輝度と E 領域における最大電子密度との関係を, $\lambda 5577 \text{A}$ および $\lambda 4278 \text{A}$ と種々の型の E_s 層および夜間 E 層とのすべての組合せについて調べる. 最後に, $\lambda 5577 \text{A}$ と $\lambda 6300 \text{A}$ との 2 つの輝線の相互関係, およびこれら 2 線の輝度と地磁気変化との関係, そして極光中の連続光成分等についても現在解析の進んだ範囲内で論ずる.

2. 観測方法とデータの読み取り

1) 電離層垂直投射観測

1) 観測方法

電離層垂直投射のルーチン観測は普通の日には15分毎に、通常世界日 (Regular World Days) には5分毎または連続的に行なわれた。観測期間は1961年1月25日より1962年1月15日までである。

しかしながら、本論文では冬期の5~7月のデータのみを解析に使用した。また、観測機はPIR-6B型を用い、その主な性能は次の通りである

使用電離層観測機の主な性能

送信電力	10 KW (尖頭出力)
掃引周波数範囲	1~15 Mc/s
観測時間	30 sec
パルス幅	60~120 μ S
周波数目盛	1.0 Mc/s 毎
高度目盛	100 km 毎
高度範囲	1000 km
空中線	テルタ型 (終端抵抗 600 オーム)
送信	南北方向 高さ 20 m 底辺長 80 m
受信	東西方向 高さ 15 m 底辺長 44 m

n) アイオノグラムの読み取り

極光帯で観測されるアイオノグラムは一般に非常に複雑なため、エコーの明確な分類と電離層パラメータの精確な読み取りは本質的なむづかしさを持っている。

実際の読み取りに当っては、主としてE領域からの反射に着目した。

本論文に用いた記号や定義は以下に示す如く 1961年のURSI Handbook⁸⁾によった

E_s 層反射の型による分類

$E_{s,f}$ (flat type) 周波数の増加に対して、見掛け高さがほとんど変化しないような E_s 反射。この型の反射波はどの緯度でも大体明瞭に記録される。

$E_{s,r}$ (retardation type) . 高周波端に、群速度による遅延によく似た見掛け高さの増加を示しているが、透過性をもっている E_s 反射。この型は、F層反射波に遅延

がなく, また高い層を全部遮蔽しないので, 群速度による遅延 (遮蔽効果をもった厚い E 層の場合に見られるような) とは区別することができ.

E_{sa} (auroral type) 周波数の増加に対して, 見掛け高さが変化しないか, または徐々に上昇する, 非常にはっきりした下縁をもつ E_s 反射であって, その上縁には何重かに重なった反射, または散乱した反射を伴っているような E_s 反射.

この上縁は数 100 km にわたって広がっていることがある.

上に挙げた3つの E_s の型は昭和基地冬期に非常に頻繁に観測され, これら以外の型は極めて少数だったので, 統計には使用できなかった.

これら E_s 層に加えて, カナダの研究者達⁹⁾ によって初めて提案され, “夜間 E 層 (E_n 層)” と命名された, 遮蔽効果を持った厚い層についても注意を払う必要がある. 著者等はこの E_n 層を E_{sr} 層と区別するのに, ある場合には困難を感じたが, E_n 層の判定に関しては以下に示す3つの基準を適用して E_s 反射と区別した^{10,11)}.

- a. E_n の臨界周波数附近には明瞭な群速度の遅延が見られること.
- b. E_n の臨界周波数以下には F 層のエコーが存在しないこと. 即ちその層が F 層を完全に掩蔽していること.
- c. E_n の臨界周波数附近の F 層エコーには E_n 層の存在による群速度の遅延が見られること.

この他に次の2つの基準も妥当と考えられるので採用することにした.

- d. F 領域にエコーが無いが, E_n 層が c (cusp) 型または h (high) 型の E_s と共存している場合 (昼間の E 層との類似による).
- e. F 層エコーの下限周波数の附近に明瞭な群速度の遅れが存在しているが, E 領域には全然エコーが無い場合. これは l (low) 型の E_s 層の電離による遮蔽か, または低周波附近の吸収によるものと考えられる.

2) 地磁気観測

1) 観測方法

地磁気観測も 1961 年1年間を通して, H, D, Z の3成分について行なわれた.

マグネットグラムは, 振幅差変調方式を適用した増幅器を使って, 増幅された各成分の変化をペンレコーダーに記すことによって得られた. 1年分のマグネットグラムのうち, 5, 6および7月の水平成分Hだけを Q-指数に直した.

ii) マグネトグラムの読み取り

高緯度地方では、地磁気の変化が激しく、一般に広く用いられている K -指数では、地磁気活動を表わすのに不適當である。それ故、地磁気活動の目安を与えるものとして、 K -指数の3時間間隔よりも、もっと短いものが望ましい。そこで BARTELS と FUKUSHIMA¹²⁾ は15分に1つの数値を与える“ Q -指数”を提案した。著者等は電離層の観測結果との比較の便も考慮して、この Q -指数を採用することにした。

K -指数は3時間内の全体の変化範囲を測るのに対して、 Q -指数は静穏日日変化によって決まる基準曲線からの偏差の全体を測定することによって決定される。つまり、 Q -指数は各時間の0分、15分、30分、45分を中心とした15分間内において、基準曲線から十方向と一方向に測定したそれぞれの最大偏差の絶対値の和から求められる。各 Q -指数に対応する r -値の上限の値は以下の通りである。

$Q =$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
r -値の上限	10	20	40	80	140	240	400	600	1000	1500	2200	∞

Q -指数の決定は、 Z 成分を除く2つの水平成分 H , D (ここでは偏角ではなくて、 H 成分に直角方向の水平変化ベクトルをさす) を読み取ることによって得られる。それ故、 Q -指数は最も乱れた水平成分の強さを表わすはずであるが、本論文では Q -指数を決定するのに H 成分のみを用いた。従って、本論文における Q -指数は電離層内の電流の強さ、特に昭和基地地上層の東西方向の電流の強さを示すと考えられる。

なお、本論文で Q -指数を決定するのに D 成分を用いなかったことによる影響は、ほとんど無視できる程度である。即ち、 D を考慮に入れたために Q -指数を訂正改めねばならない例は、7月の場合わずか2%程度であった。

本論文における Q -指数のこのような性質を最大限に利用するため、著者等は Q -指数を2つのグループに分けた。即ち十側の偏差と一側の偏差に従って $+Q$ および $-Q$ とした。十と一の両側にまたがっている場合は、より大きい偏差の方を採用した。

3) 極光観測

1) 極光観測

極光観測も一年間を通じて晴天暗夜行なわれた。観測日数は1961年2月21日より10月24

日までの9カ月間に134晩(約1500時間)に達した。また、観測場所は基地観測棟の屋上で海拔12mの地点であった。極光は次の3種の方法で観測された。

- a. 3色の光電観測・ $\lambda 5577 \text{ \AA}$ (OI(S-D)線), $\lambda 6300 \text{ \AA}$ (OI(D-P)線) および $\lambda 4278 \text{ \AA}$ (N_2^+ negative group の(0-1)帯)
- b. 全天カメラによる全天写真
- c. 目視観測

しかしながら、本論文では、極光観測結果については冬期の6月と7月の分のみを使用した。全天カメラによる写真および目視観測による結果は解析の際参考に用いた。

ii) 極光光電観測とその絶対強度の決定。

第5次越冬中の極光光電観測は1)に挙げた3色の他にバックグラウンド測定用に $\lambda 5300 \text{ \AA}$ の光電測光も行なった。

使用した受光器の対物レンズは直径 $\phi = 60 \text{ mm}$ (有効受光面積 $S = 28.2 \text{ cm}^2$), 焦点距離 $f = 215 \text{ mm}$, 視角は約 3.3° , 即ち, 立体角 Ω で $8.553 \text{ 平方度} = 2.605 \times 10^{-3} \text{ sterad.}$ であった。また使用した4枚の干渉フィルターの特性は Table 1 の通りである。

Table 1 Characteristics of interference filters.

Wave length λ (Å)	Index of transmission at λ T (%)	Half width* W (Å)
4278	73	68
5300	80	83
5577	83	112
6300(6363)	48(43)	192

* Half width W means that the total transmission spectrum energy is represented by T·W.

これらの干渉フィルターを通過した光は、RCA 6217 光電増倍管に集光させ、そこで得られた光電流を直流増幅して電子管式記録計に書かせた。記録の一例は Fig. 1 に示す通りで、暗電流→ $\lambda 4278 \text{ \AA}$ → $\lambda 5577 \text{ \AA}$ → $\lambda 6300 \text{ \AA}$ → $\lambda 5300 \text{ \AA}$ の順序に光量が記録されている。

極光では光量が10万倍近くも変化するので、極光の明るさに応じて増幅器の切替を行ない、暗い時は感度4、明るい時は感度3による測定を行なった。感度4と感度3で測定した場合の振れの比は10.7:1であった。Fig.1では21時25分から約5分間、感度3の記録がなされている。この記録計では時定数の調整が不十分であったため、振れが大き過ぎる場合、針が所期の値に達する前に次の所期値に向かって動き出す傾向が見られた。このため、全

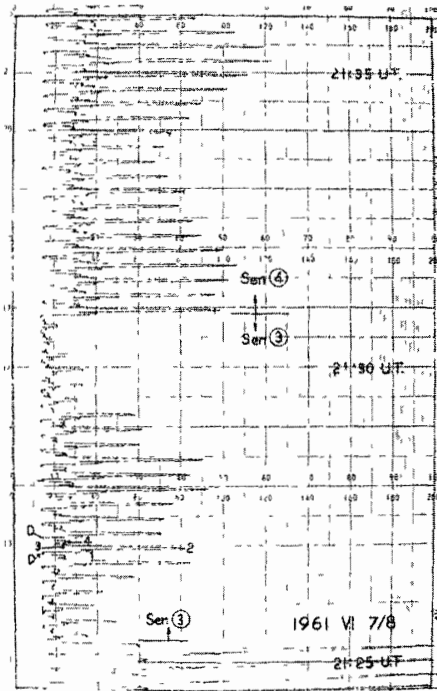


Fig 1 An example of photometric records. 1961 June 7/8 21 25-21 36 U T
 Sen ③ and ④ correspond to sensitive 3 and 4 of amplifier, respectively
 Marks at the time of 21·27, D 1, 2, 3, 4 show deflections of dark current,
 4278A, 5577A, 6300A and 5300A, respectively.

測定記録について Fig. 2 のような補正を加える必要があった。即ち、見かけの振れの大きさ d mm に対し、真の振れの大きさ D' は $(d+x)$ mm で与えられる

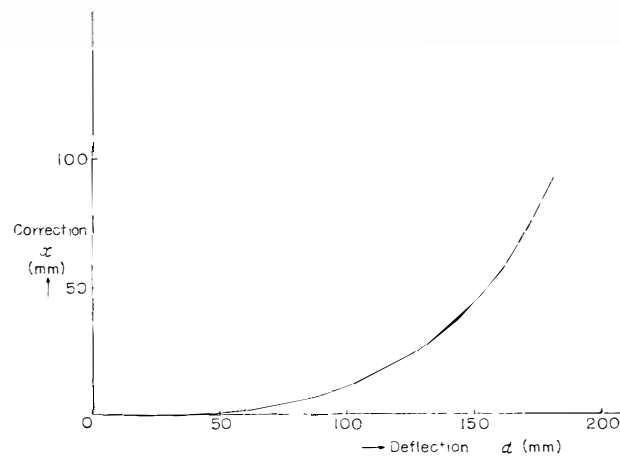


Fig 2 Relationship between the apparent deflection d and correction term x .
 True deflection $D' = d + x$ In case $d \leq 26.0$ mm, no correction is needed

各波長の絶対値を決め, かつ極光以外の星野光の影響を除くため, 視測の前後に同一器械を東京天文台丸山観測所に運んで, G 0 型の α Aur 星 (Capella) による検定を行なった. 1963年1月24日から26日までに行なった検定の結果は Table 2 の通りである.

Table 2 Calibration of photometer by observing the fixed star, Capella

Wave length λ (Å)	Deflection of recorder due to Capella $D_{\lambda}'(\alpha\text{ Aur})$ (mm)	Deflection corrected with extinction of atmosphere $D_{\lambda}(\alpha\text{ Aur})$ (mm)	Correction factor of G0 star I_{λ}
4278	16 30	24 10	0 322
5300	60 14	74 75	1 000
5577	28 23	34 32	0 459
6300	36 09	42 19	0 565

星野光のスペクトルはほぼ G 0 型星のスペクトルに等しいと考えられるので, 極光による λ 5577 Å, 4278 Å および 6300 Å の振れを求める際には次式によって星野光の影響を除いた.

$$D_{\lambda} = D_{\lambda}' - k_{\lambda} D_{5300}' \quad (1)$$

次に輝度の絶対値を rayleigh 単位で表わすため, ZnS に Ra を混入した標準光源 JC 200 を利用し, これを毎晩視測の前後に測光器にのせ, JC 200 による振れを記録した.

1963年1月24日から26日の間に JC 200 の λ 5577 Å に対する振れを測定したところ,

$$D_{5577}(\text{JC 200}) = 134.0 \text{ mm} \quad (2)$$

であった. さて, 大気圏外における太陽の λ 5577 Å における放射量は,

$$E_{5577}(\odot) = 5.81 \times 10^{13} \text{ photon/cm}^2 \cdot \text{Å} \cdot \text{sec} \quad (3)$$

であり, 太陽の実視等級は -26.72 等であるから, 1 等星の λ 5577 Å における放射量は,

$$E_{5577}(1) = 4.74 \times 10^2 \text{ photon/cm}^2 \cdot \text{Å} \cdot \text{sec} \quad (4)$$

これに相当する記録計の振れを $D_{5577}(1)$ とすれば,

$$D_{5577}(1) = A_{5577} \cdot E_{5577}(1) \cdot S \cdot T_{5577} \cdot W_{5577} \quad (5)$$

の関係が成り立つ. 但し, A_{5577} は測光器全体の波長特性を示す比例常数である. Capella は 0.148 等星であるから Table 2 から 1 等星の λ 5577 Å フィルターによる振れの大きさを計算すると,

$$D_{5577}(1) = 34.32 \times 0.453 = 15.55 \quad (6)$$

一方 R_{λ} rayleigh の極光夜光に対する λ 5577 Å フィルターによる振れの大きさを $D_{5577}(A)$

G) とすれば、この場合の入射光は線スペクトルだから次式が成立する。

$$D_{5577}(AG) = A_{5577} \cdot 10^6 R_{5577}(AG) \cdot S \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \cdot T_{5577} \quad (7)$$

(2)~(7)式から J C 200 の振れに相当する $\lambda 5577 \text{ \AA}$ 極光の rayleigh 値を求めると、

$$\begin{aligned} R_{5577}(\text{JC } 200) &= \frac{D_{5577}(\text{JC } 200)}{10^6 \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \cdot A_{5577} \cdot S \cdot T_{5577}} = \frac{D_{5577}(\text{JC } 200) \times 4\pi}{10^6 \Omega} \times \frac{E_{5577}(1) \cdot W_{5577}}{D_{5577}(1)} \\ &= 2210 \text{ (R)} \end{aligned}$$

同様な測定を1960年10月21日から22日までに行なった結果次の値を得た。

$$R_{5577}(\text{JC } 200) = 3744 \text{ (R)}$$

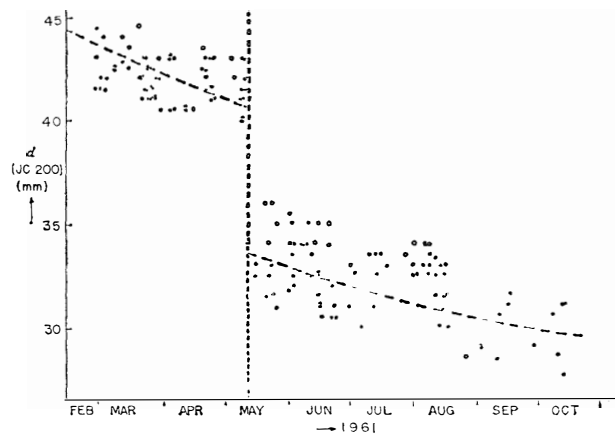


Fig. 3. Time variation of apparent deflection d corresponding to that of standard light (JC 200). The abrupt change of d value on the 11th of May is due to change in the circuit performance of the amplifier.

このように、一般に標準光源の輝度は時間の関数で、時間と共に自然対数的に減少する。Fig. 3は第5次越冬期間中の J C 200 の $\lambda 5577 \text{ \AA}$ フィルターによる振れの変化を示したものである。5月11日に断層が見られるが、これは増幅器の回路定数が増変したため、標準光源の輝度が不連続的に変わったものではない。図の破線で示したように、J C 200 の輝度が減少したものとすれば、観測期間中における輝度の月別平均値は Table 3 のようになる。

Table 3. Monthly average values of standard light (JC 200) in rayleighs.

		$R_{5577}(\text{JC } 200)$
1961	Feb (latter part)	3320
	Mar	3260
	Apr	3180
	May	3110
	June	3040
	July	2980
	Aug	2920
	Sept	2870
	Oct	2820

次に $\lambda 5577 \text{ \AA}$ 以外の波長の極光の rayleigh 値を求めるため, たとえば $\lambda 6300 \text{ \AA}$ についての(5), (7)式を書き並べてみる.

$$D_{6300}(\alpha \text{ Aur}) = A_{6300} \cdot E_{6300}(1) \cdot S \cdot T_{6300} \cdot W_{6300} \times \frac{1}{0.453}$$

$$D_{5577}(\alpha \text{ Aur}) = A_{5577} \cdot E_{5577}(1) \cdot S \cdot T_{5577} \cdot W_{5577} \times \frac{1}{0.453}$$

$$D_{6300}(\text{AG}) = A_{6300} \cdot 10^6 \cdot R_{6300}(\text{AG}) \cdot S \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \cdot T_{6300}$$

$$D_{5577}(\text{JC } 200) = A_{5577} \cdot 10^6 \cdot R_{5577}(\text{JC } 200) \cdot S \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \cdot T_{5577}$$

これら4式と初めに挙げた諸表の値を用いると

$$R_{6300}(\text{AG}) = 1.440 \times \frac{R_{5577}(\text{JC } 200)}{D_{5577}(\text{JC } 200)} \times D_{6300}(\text{AG}) \quad (8)$$

同様に

$$R_{4278}(\text{AG}) = 0.6442 \times \frac{R_{5577}(\text{JC } 200)}{D_{5577}(\text{JC } 200)} \times D_{4278}(\text{AG}) \quad (9)$$

(8), (9)式から Table 3 の rayleigh 値とその夜の J C 200 による $\lambda 5577 \text{ \AA}$ の振れを用いて各波長の rayleigh 値が求められる.

以上の操作により, 毎分の $\lambda \lambda 4278 \text{ \AA}$, 5577 \AA および 6300 \AA の極光輝度を求めた. ただし, 薄明時や月明時は背景が必ずしも G 0 型ではないので, その時の輝度は解析には使用しなかった. また, 一般に輝度が小さい場合には, 測定値の誤差の割合が大きくなると考えられるので, 一部の例外を除いてそれぞれ $\lambda 5577 \text{ \AA}$ では $150R$ 未満, $\lambda 4278 \text{ \AA}$ では $200R$ 未満, $\lambda 6300 \text{ \AA}$ では $175R$ 未満の値も使用しなかった.

これらの値は天頂のわずか 10 平方度附近の輝度しか示していないので、これを電離層や地磁気などの他の地球物理学的なデータと比較する際には、全天カメラの観測結果を参考にするなど充分注意した。

3. E_s 層, E_n 層および Blackout の発生と地磁気 Q -指数との関係

E 領域の成層についての統計を進めていくうちに、地磁気活動と E 領域内での成層の変化との間に、有意な関係があることがわかった。初めにこれら2つの関係について述べることにする。

Table 4 は昭和基地冬期の5~7月における K -指数の平均値と、 E 領域各層の夜間(L. T.15時00分より10時45分まで)における相対的出現頻度を示す。記号BとEはそれぞれ吸収、および観測機の下限周波数以下の電離のためアイオノグラム上に反射エコーが存在しない場合である。

Table 4 Relative occurrence frequency of E -region echoes and the average values of K -indices in winter months.

Month	E_n	E_{sr}	E_{sa}	E_{sf}	B + E	\bar{K}
May	15 4	17 7	22 6	20 0	22 2	2 50
June	10 0	13 9	21 8	27 2	22 6	2 20
July	10 2	13 0	15 4	14 8	36 0	3 15

note -When there were two echoes in E -region in an ionogram, the authors counted them as two echoes. There were cases in which there was no E -region echoes in spite of the existence of F -region echo. So the total is not 100 per cent.

Table 4 からわかるように、昭和基地においては、 E_{sa} はかなり大きい割合で出現し、MAEHLUM⁷⁾ が、Tromso が極光帯の真下であるにもかかわらず、そこでは E_{sa} がまれにしか観測されないと述べているのと対照的である。各型の層の出現頻度を大きさの順に並べると、6月を除いて

$$E_{sa} > E_{sf} > E_{sr} > E_n$$

となる. 6月の E_{sf} が特別である点については, 本節の第5項で触れるが, これはTable 4からもわかる通り, 6月が特に地磁氣的に静穏だったことに関係する. 7月はそれと対照的にかなり荒れ模様であった.

本節の前半の各図は7月の各成層の出現頻度数のヒストグラムを Q -指数と地方時に対応させて描いたものである. 換言すると, 横軸は出現頻度数と地方時を表わし, 縦軸は Q -指数を示す. また右側のヒストグラムは地方時を考慮せずに各 Q -指数についての合計を示し, 下側のそれは反対に Q -指数を考慮せずに各地方時についての合計を示す.

1) 地磁気水平成分の変化の一般的傾向

Fig. 4は地磁気 Q -指数の日変化を真夜中を中央にして表わしたヒストグラムである.

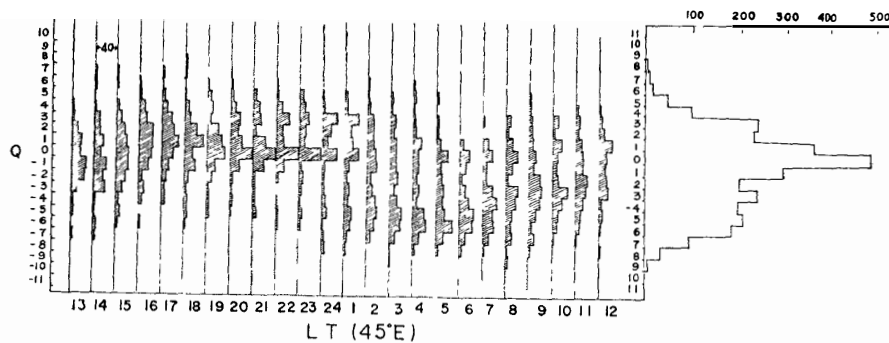


Fig. 4. General trend of variation of geomagnetic H-component with Q -indices and local mean time, observed at Syowa Station in July, 1961.

この図から以下のことが云える.

- i) 地方時の夜半または午前1時前は, 大体弱い正の湾形変化で占められる.
- ii) 正から負への湾形変化への移行は午前1時頃に起き, その後日出頃まで負側で占められる.
- iii) 負の湾形変化の一番底は03時ないし04時頃生じている. (なおここでいう湾形変化は第5節で述べる局地的磁気嵐(極磁気嵐)と同等と考える.)

ii)の事実によって暗示される電離層内の電流の変化, 即ち東向きから西向きへの変化が昭和基地の場合01時頃起きているのは, 他の観測所の結果に比較して少し遅いようである. というのは, 他の観測所(主に北半球であるが)では, この移行は地理的(地方)時22時から24時の間に起きる例が多いからである. ただここで地磁気(地方)時を採用すると, 北半球の観測

所では地理的地方時との間にそれ程大きい違いはないのに対して、昭和基地の場合2時間40分と非常に大きい¹³⁾。それ故、地理的地方時01時は地磁気地方時22時20分と書き改められて、他の観測所の結果にはほぼ一致する。

2) E_n 層の出現頻度の変化

Fig. 5(1)は E_n 層の出現頻度を示す。 E_n の出現は大部分湾形変化の正から負への移行の時刻よりも前に生じている。Q-指数に関していえば、 E_n は主として $3 \geq Q \geq -1$ の範囲で出現しており、 $Q \leq -2$ の領域では大変少ない。これは、地磁気活動が活発になると、 E_s やBによって占められるからであろう。ただ、この際 E_n は、実際は存在し続けるが、アイオノグラム上には E_s かまたはエコーのないBだけが存在しているのか、あるいは E_n 自身の成層がくすれて E_s やBを生せしめるようになるのかははっきりしないが、おそらく後者の影響の方が強いものと思われる。その理由については、本節の最後および第6節の考察と結論のところ触れる。

昭和基地に出現する E_n が地磁気静穏時に多いことは、中緯度での E_n が比較的擾乱時に発生するのと対照的である。また、高さに関しても中緯度のは $h'E_n$ が140~150 km と、かなり高いのに反し、昭和基地での $h'E_n$ は $h'E_s$ と同程度であり、高くても115 km 前後という相違がある^{14,15)}

他の特徴として、一般に E_n は時間的に連続して出現する傾向があり、長い時には数時間も続くことがある。

3) E_{sr} 層の出現頻度の変化

次に E_{sr} 層の出現頻度を Fig. 5(2)に示す。 E_{sr} もまた正の側によく出現している。しかし、 E_n と違ってかなりの数の E_{sr} が負の湾形変化の時にも生ずる。

一方日変化のヒストグラムは夜半頃と04時頃の2つのピークを持つ。すでに MONTALBETTI と McEWEN¹⁶⁾ によって指摘されたように、 E_{sr} の出現頻度の日変化に2つの山が存在するという事実は、 E_{sr} の目立った特徴である。彼等によれば、 E_{sr} 出現頻度の2つの山の間隔は、地磁気緯度が高くなればなる程大きくなり、亜極光帯、例えば College や Winnipeg のような所では日変化の中にただ一つの極大値しか存在しない。

4) E_{sa} 層の出現頻度の変化

E_{sa} 層になると、Fig. 5(3) からわかるように、出現頻度の比重がH成分の正変化の頃よ

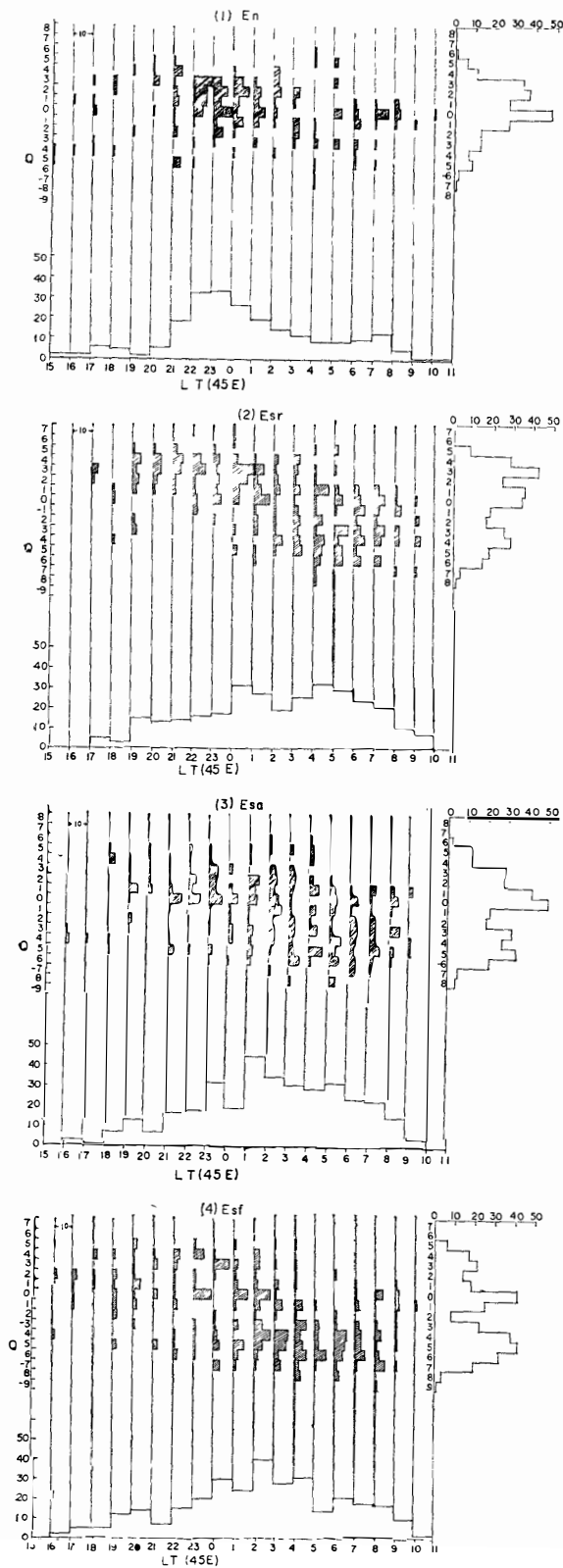


Fig. 5 Frequency of occurrence of E-region echoes in July, with Q-indices and local mean time.

りも、幾分負変化の方に傾いてきている。山は大きくみて、 $Q=-3$ 、 -4 および -5 の部分と $Q=0$ または $+1$ の部分の2つにわかれる。前者は明らかに極光の出現と関係があるが、後者のように地磁気のほとんど変化していない時でも大抵 *HA* (homogeneous arc) か *HB* (homogeneous band) が、天頂とは限らないが出現しているのである。

E_{sa} の日変化についていえば、01時と02時の間に出現の極大があり、かつその山の直前はかなり深い谷が存在している。この谷は極光活動が一時的に弱まると考えられる正子の頃に対応している。しかしながら、5月や6月は日変化のヒストグラム中にこのような谷は存在していない。その代り 01 時頃に出現頻度が急上昇している。

5) E_{sf} 層の出現頻度の変化

Fig. 5(4)は E_{sf} 層の出現頻度分布を示す。右側のヒストグラム中3つの山が存在するが、その内 $Q=-4$ 、 -5 および -6 の山が最も卓越している。この負側で $|Q|$ の大きい E_{sf} は、 E_{sa} が発達して E_{sf} に変化したものと考えられる。なぜなら、 E_{sf} の頻度の Q -値に関するピークは E_{sa}

のピークがさらに負側へ移動したものであり、また日変化のヒストグラムに関して、 E_{sa} のピークより時間的に遅れて極大値を形成しているからである。

$Q = 0$ 附近の極大値を形成する E_{sf} は他の E_s に比較して大変変わった特色を持っている。極光帯において出現する E_s は、一般に、多かれ少なかれ、極光や地磁気活動に相関がある。しかしながら、次節で示すように、地磁氣的に静穏な日においては、 E_{sf} の臨界周波数、即ち電子密度と極光の輝度とはほとんど相関がない。一方、6月の $Q = 0$ の場合の f_oE_{sf} の頻度分布を示すと Fig. 6 のようになり、平均は 3.70 Mc/s であるが、7~8 Mc/s のところにも

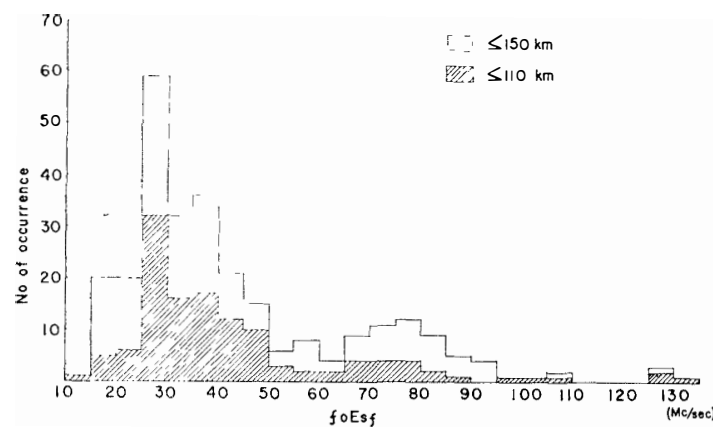


Fig. 6 Number of occurrence of E_{sf} versus f_oE_{sf} in case $Q=0$ in June.

小さい山があり、大きいものでは 13 Mc/s 以上まで延びている。地磁気前擾時に、かくも電子密度が増大することは、全く注目値する。このように地磁気静穏時に多く出現し、極光の輝度とは関係のない E_{sf} は、中緯度において観測される E_{sf} にその性質が似ているといえる。そこで、著者等はこの種の E_{sf} を特に“中緯度型 E_{sf} ”と名付けることにした。この“中緯度型 E_{sf} ”が極光帯にも出現するという事実は、 E_s の生成に何等かの示唆を与えるかもしれない。特に6月の10日から14日頃にかけて、地磁気のかかなり静穏な日が続き、昭和基地でこの種の E_{sf} が頻繁に出現し、長い時にはほとんど1昼夜続いた。約 1600 km 離れた隣の Mawson 基地でも6月11日に約7時間という異常な長さでこの E_{sf} が続き、また、約 3000 km 離れた Wilkes では6月16日に約6時間 E_{sf} が続いて発生している。しかし、その他の基地では、特に目立った傾向を示していない。Fig. 7はこの“中緯度型 E_{sf} ”が7月より一層多く出現した5月の例を示している。

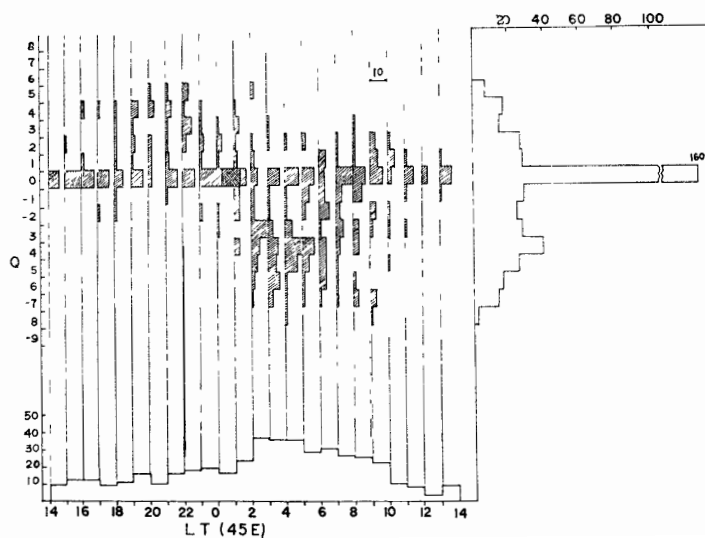


Fig. 7. Frequency of occurrence of E_{sf} echoes in May, with Q -indices and local mean time.

6) Blackout の出現頻度の日変化

最後に直接E領域の成層とは関係はないが、極光帯特有の現象である Blackout_極について言及する。Fig.8 から明らかなように、日変化には2つの山が存在する。朝方の山はFig.8の右側のヒストグラム中 $Q = -3$ より $Q = -7$ までの範囲の幅広いピークに該当する。換言すれば、朝方に生起する Blackout は、地磁気擾乱に伴い低域電離層内の電子密度増加によって電波の吸収が卓越し、 f_{min} が増加して起る本来の Blackout である。

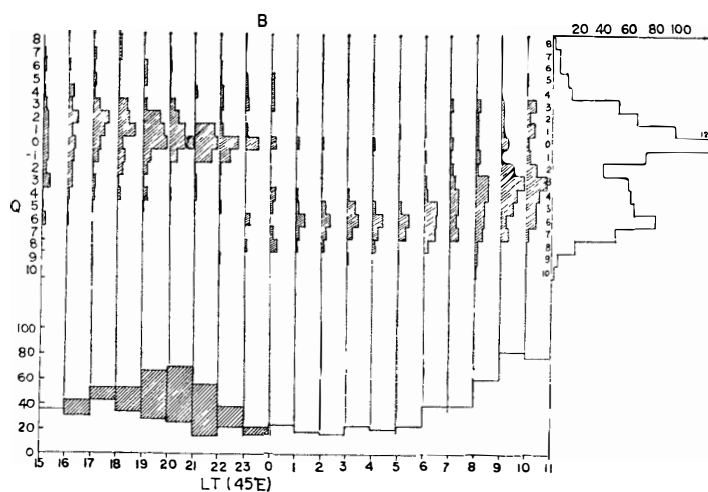


Fig. 8. Frequency of occurrence of Blackout in July.

これに反し、午後側の山は主に次の現象によると考えられる。即ち f_oF_2 の低下による反射条件の劣化である。冬期においては、日没後 F 層内の電子密度が低下し、臨界周波数にして 2 Mc/s 前後まで下る。この際低周波領域における観測機の利得の低下と相まって、見掛け上アイオノグラムにはどの観測エコーも存在しなくなり“Blackout”と数えられるのである。著者等はこの種の見掛け上の Blackout、即ち“E”に対応するものと本来の Blackout を区別するため次の諸点に注意した。

1) この種の Blackout の際、観測機によるエコーは観測されないが、遠方から来る雑音までは消されないと考え、これら雑音の有無を調べたこと。

ii) “Blackout” が起るに先立ち f_oF_2 が一様に 2 Mc/s 前後まで下ったかどうかということ。これは本来の Blackout では数 Mc/s あたりから突然にエコーが消失するからである。

以上の結果、Fig. 8 の日変化のヒストグラムのうちヘリチを施した部分が見掛けの Blackout、即ち“E”に対応する部分となった。

極冠帯 Blackout もまた地磁氣的静穏時に生起する¹⁷⁾。しかしながら、7月に起った3つの SC の直前に生起した極冠帯 Blackout も、ヒストグラム中に含ませたが、数が少なく、地方時にあまり依存しないので、日変化全体の傾向を変えるに至らなかった。

以上は7月のデータについての結果であるが、5月もほぼ似た結果が得られた。ただ6月は地磁氣的に静穏だったせい、時間的には7月ほどはっきりした成層の移行を示していないが、 Q -指数に関しては、 $Q=0$ が特に多いという点を除いて各 E_s の Q -指数に対する分布は大体7月と同じであった。

7) E 領域臨界周波数と Q -指数および地方時との関係

これまで述べたことは、 E_n , E_s および Blackout の発生頻度を Q -指数と地方時について表わしたものであった。これによってある程度 E 領域内の成層の移行が暗示されたのであるが、本項ではもっと別の観点から f_oE_n と f_oE_s の変化を中心に調べた結果を記述する。

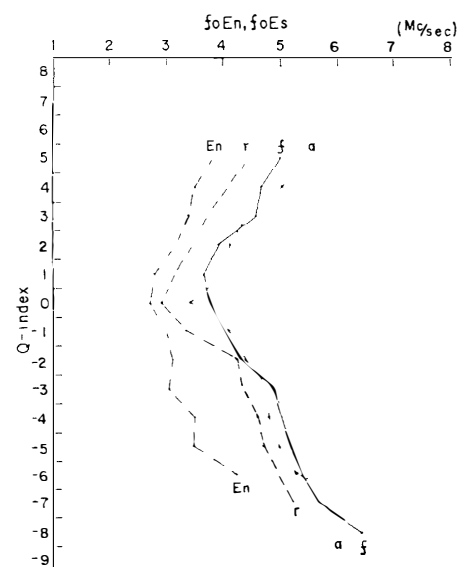


Fig 9 Variation of median critical frequency on E-region with the change of Q-indices. Data of June and July.

Fig. 9 は各型の臨界周波数が地磁気の擾乱の進展に伴ってどう変化するかを示す。この図から次の2つの事実が引き出せる。即ち、

(1) $Q > 0$ の領域では E_n と E_{sr} , および E_{sa} と E_{sf} が割合に似た性質を持ち、この4つの成層を通じては、各 Q -指数に対して $f_oE_n < f_oE_{sr} < f_oE_{sa} \approx f_oE_{sf}$ といった関係がある。(但し $Q \geq 4$ では個数が少なく不確実である。)

(2) $Q < 0$ の領域では f_oE_n が他の3つと断然かけ離れて小さく、 f_oE_{sr} , f_oE_{sa} および f_oE_{sf} はかなり接近している。そして後者の3つはどちらかといえば $f_oE_{sr} < f_oE_{sa} < f_oE_{sf}$ といった傾向を持っている。

これら(1), (2)の関係は見方を変えれば、各層の厚さの相違を示しているのかもしれない。

これについても第6節の考察と結論のところでも再び触れる。

以上に述べたことと関連して、各型の臨界周波数の日変化を Fig. 10 (1) から Fig. 10 (4)

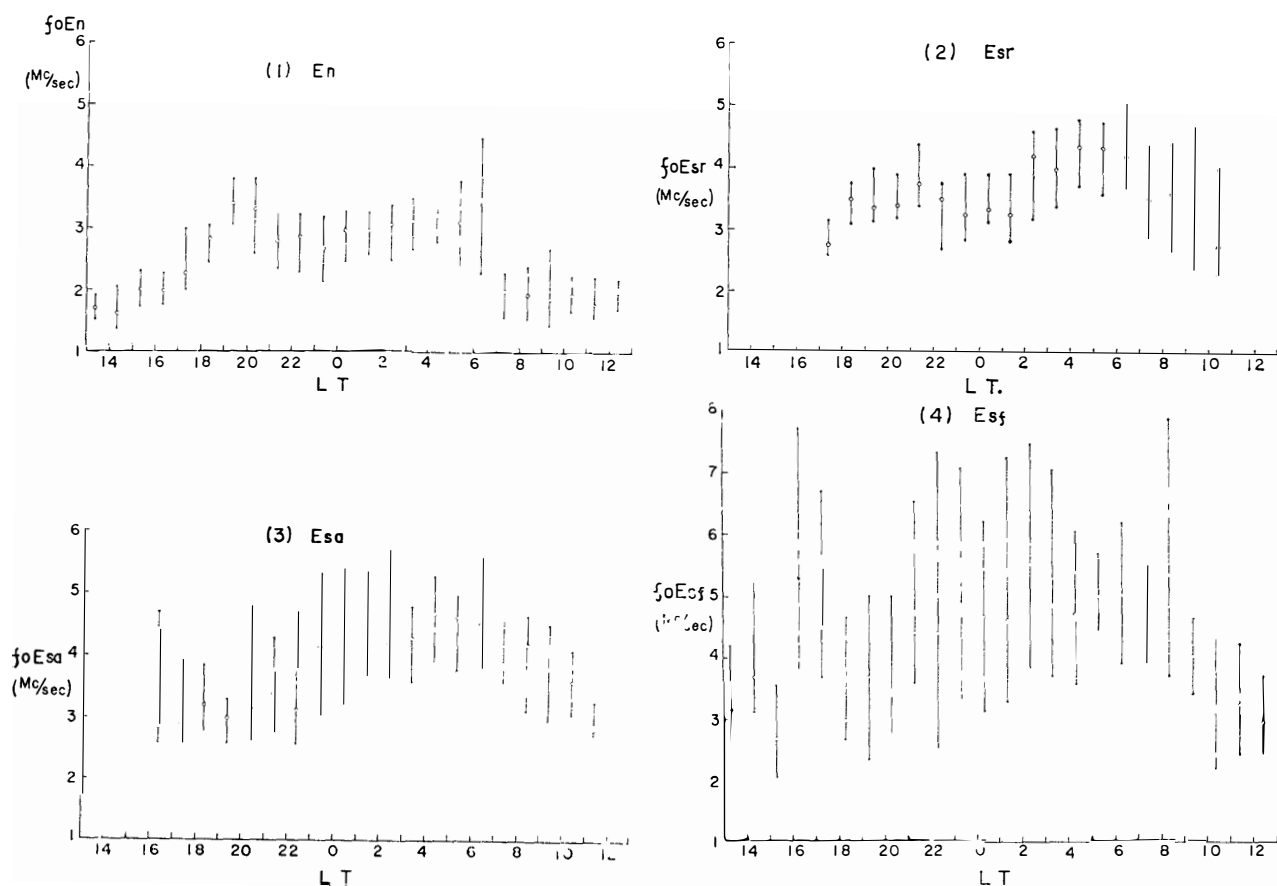


Fig 10 Diurnal variation of critical frequency in E-region. Data of June and July. Open circles are median values. Black dots show the values of upper quarter and lower quarter.

までに示す. この際も一般的傾向としては, $f_oE_{sf} > f_oE_{sa} > f_oE_{sr} > f_oE_n$ が成立し, また上四分位数と下四分位数の差もこの順序になっている. 他に目立つ点としては,

1) f_oE_n , f_oE_{sr} の両者は正子頃一時低下し地磁気の最も荒れている 02 時~06 時頃が一番大きい. f_oE_{sa} , f_oE_{sf} もまたこの頃大きくなっている.

ii) f_oE_{sf} は他の型の臨界周波数と比較して, 平均周波数に対するちらばりの割合かすはぬけて大きい.

これら各 E 領域反射の性質や移行については最大電子密度と極光輝度, といった観点から再び第 4 節で触れることにしよう

4. E 領域における最大電子密度と極光天頂強度との関係

極光の輝度と E 領域の最大電子密度との定量的関係については, 緒言でも触れたように, 二三の人々によってすでに得られている. しかし, それらの関係は, 極光の光のうちのある波長と E 領域反射の中のある型のエコーとの関係に限られていた. そこで著者等は昭和基地で得られた電離層と極光のデータを十分に利用するため, 極光輝度と最大電子密度との相関係数および関係式などを, $\lambda 5577 \text{ \AA}$ 輝線および $\lambda 4278 \text{ \AA}$ 帯と, E_n および E_s の種々の型とのすべての組合せについて計算した.

この際次の諸点に注意した. もし極光の輝きの中心部が天頂にない場合, それが天頂にある場合よりも輝度が小さくなる. 何故なら口径約 3.3 度の受光部は常に天頂に向いているからである. それに反して電離層の空中線の指向性はそれ程尖鋭ではないので, 斜め方向に濃い電離層がある場合, 単に見掛け高さを少し高くするだけの違いでアイオノグラム上にエコーとして映る. このように, 2つの装置の天頂方向に対する指向性が違うので, もし何等かの手段でこの斜め反射を統計から除かない限り, 極光輝度と最大電子密度との相関が悪くなってしまう.

上に挙げた理由で, 統計に入れるべき見掛け高さの上限を 110 km とした. 但し, 例外として E_n は E_s よりやや高目であり, 広い範囲で一様に分布していると考えられるので, 特に高さ制限を設けなかった. 他に全天カメラによる極光全天写真も参考にし, たとえ $h'E_s$ (見掛け高さ) が 110 km 以下であっても極光の中心部が天頂からはずれている疑いのある場合は除いた.

以上の諸点に注意した上で, 極光輝度 J_{kR} と最大電子密度 N_{max} (electrons/cm³) と

の関係を次の2通りの方法で計算し、その関係式を得た。

i) 最小自乗法によって $J = aN^b_{max}$ なる式の定数 a , b を求める。

ii) $J = cN^2_{max}$ を仮定してその比例定数 c を求める。

ii) によって得られる関係式は、これまで二三の研究者によって求められた式と直接比較することができる。また $J \propto N^2_{max}$ という関係は先験的に次のような仮定を含む。即ち、極光の発光層が最大電子密度の層と同等であり、その層の中では電子密度の平衡が保たれ、さらに、電子の消滅機構が再結合によるということである。

冬期6月および7月のデータを用いて次のような諸量を計算し、その結果は Table 5 に示してある。

i) $\log_{10} J$ と $\log_{10} N$ の間の相関係数 ρ 。

ii) $J = aN^b_{max}$ の関係式における係数 a , 指数 b および分散 σ^2 。

iii) $J = cN^2_{max}$ の関係式における係数 c 。

これらの計算を6月のみ、7月のみおよび6月と7月の合計の3種のデータについて行なった。ただし個数の少ないものについては6・7月の合計だけを取扱った。

Table 5 中にある E_n 層は同じアイオノグラム中に、他に E_s 層が全然存在しない場合のみを採用した。何故なら E_n と E_s が共存している場合、どちらの層がとれだけ極光の発光に対して寄与しているか不明だからである。実際 E_s 層が共存している場合には、相関係数は Table 5 の値よりかなり低かった。

また地磁気活動静穏時に発生するある種の E_s 層は、極光輝度との相関においていささか他の E_s 層と趣を異にするので、 E_{sa} と E_{sf} のみは $|Q| \geq 3$ と $|Q| \leq 2$ の2つの群に分類した。

E_n や E_s の型による分類の他に、以下に述べる二三の分類についても計算を行なった。

Table 5 の下方に極光輝度と多回反射を伴った E 領域の成層 (Fig. 11 (14) (29)), および極光輝度と多回反射の他に群速度の遅延をも伴った E_n 層および E_{sr} 層との組合せ (Fig. 11 (13) (28)) についての関係が示してある。これは多回反射が存在するエコーはほぼ天頂附近から反射してきているであろうと考えられるからであるが、後者は大体 OMHOLT の E_a 層²⁾ に相当する。

この他に特に $|Q| \geq 3$ で見掛け高さ $h' E_s$ が 95 km と特に低いものだけを選んでみた (Fig. 11 (15) (30)). これも高さの低いものは大体天頂から反射してきているであろうとの配慮によるが、たとえ $h' E_s$ が 95 km でも全天写真により極光中心部が天頂からはずれていると思われる場合は除いてある。

Table 5 Several constants in relation to maximum electron density in E-region and auroral zenith luminosity
(a) $\lambda 5577 \text{ \AA}$

Type of echoes	Month	$J = aN_{max}^b$		σ^2 in $\log J$	ρ between $\log J$ & $\log N$	$J = cN_{max}^2$	No of data	Remarks	
		J in kR	N in el/cm^3						
E_n	June & July	51.8×10^{-9}	1.64	0.008	0.962	7.61	31	Fig 11 (1)	
E_{sr}	June	5.99×10^{-10}	1.81	0.016	0.924	6.08	44	〃 (2)	
	July	2.60×10^{-8}	1.50	0.012	0.936	6.06	66	〃 (3)	
	June & July	7.51×10^{-9}	1.60	0.014	0.927	6.07	110	〃 (4)	
E_{sa}	$Q_1 \geq 3$	June	7.15×10^{-8}	1.41	0.011	0.935	4.59	50	〃 (5)
		July	3.27×10^{-8}	1.49	0.023	0.912	5.69	24	〃 (6)
		June & July	5.01×10^{-8}	1.44	0.016	0.918	4.95	74	〃 (7)
E_{sf}	$Q_1 \geq 3$	June	1.21×10^{-6}	1.20	0.023	0.903	5.76	32	〃 (8)
		July	1.86×10^{-7}	1.35	0.018	0.952	4.69	29	〃 (9)
		June & July	3.88×10^{-7}	1.29	0.022	0.934	5.25	61	〃 (10)
E_{sa}	$Q_1 \leq 2$	June & July	4.54×10^{-8}	1.42	0.057	0.743	4.53	45	〃 (11)
E_{sf}	$Q_1 \leq 2$	June & July	6.55×10^{-2}	0.12	0.237	0.085	1.89	48	〃 (12)
E_n & E_{sr}	June & July	3.82×10^{-8}	1.47	0.007	0.927	6.50	33	〃 (13) Retardation and multiple echo	
E_n & E_s	June & July	1.49×10^{-7}	1.35	0.014	0.923	5.70	57	〃 (14) Multiple echo	
$h' E_s$ 95km	$Q_1 \geq 3$	June & July	1.60×10^{-7}	1.37	0.014	0.923	5.11	44	〃 (15)

(b) $\lambda 4278 \text{ \AA}$

Type of echoes	Month	$J = aN_{max}^b$		σ^2 in $\log J$	ρ between $\log J$ & $\log N$	$J = cN_{max}^2$	No of data	Remarks	
		J in kR	N in el/cm^3						
E_n	June & July	3.37×10^{-10}	1.73	0.037	0.630	1.54	25	Fig 11 (16)	
E_{sr}	June	5.17×10^{-8}	1.30	0.016	0.799	1.04	36	〃 (17)	
	July	3.65×10^{-8}	1.33	0.008	0.933	1.08	56	〃 (18)	
	June & July	6.61×10^{-8}	1.29	0.021	0.816	1.17	92	〃 (19)	
E_{sa}	$Q_1 \geq 3$	June	4.88×10^{-7}	1.11	0.010	0.902	0.79	50	〃 (20)
		July	1.93×10^{-6}	1.02	0.025	0.805	0.99	23	〃 (21)
		June & July	7.15×10^{-7}	1.09	0.017	0.854	0.85	73	〃 (22)
E_{sf}	$Q_1 \geq 3$	June	9.11×10^{-7}	1.08	0.032	0.836	1.01	32	〃 (23)
		July	2.21×10^{-7}	1.20	0.023	0.920	0.84	28	〃 (24)
		June & July	3.51×10^{-7}	1.16	0.028	0.889	0.93	60	〃 (25)
E_{sa}	$Q_1 \leq 2$	June & July	5.23×10^{-5}	0.72	0.012	0.638	0.83	28	〃 (26)
E_{sf}	$Q_1 \leq 2$	June & July	2.43×10^{-2}	0.13	0.066	0.165	0.41	49	〃 (27)
E_n & E_{sr}	June & July	1.12×10^{-6}	1.05	0.007	0.845	1.18	30	〃 (28) Retardation and multiple echo	
E_n & E_s	June & July	4.14×10^{-7}	1.13	0.012	0.904	1.00	50	〃 (29) Multiple echo	
$h' E_s$ 95km	$Q_1 \geq 3$	June & July	2.19×10^{-8}	1.38	0.019	0.900	0.83	44	〃 (30)

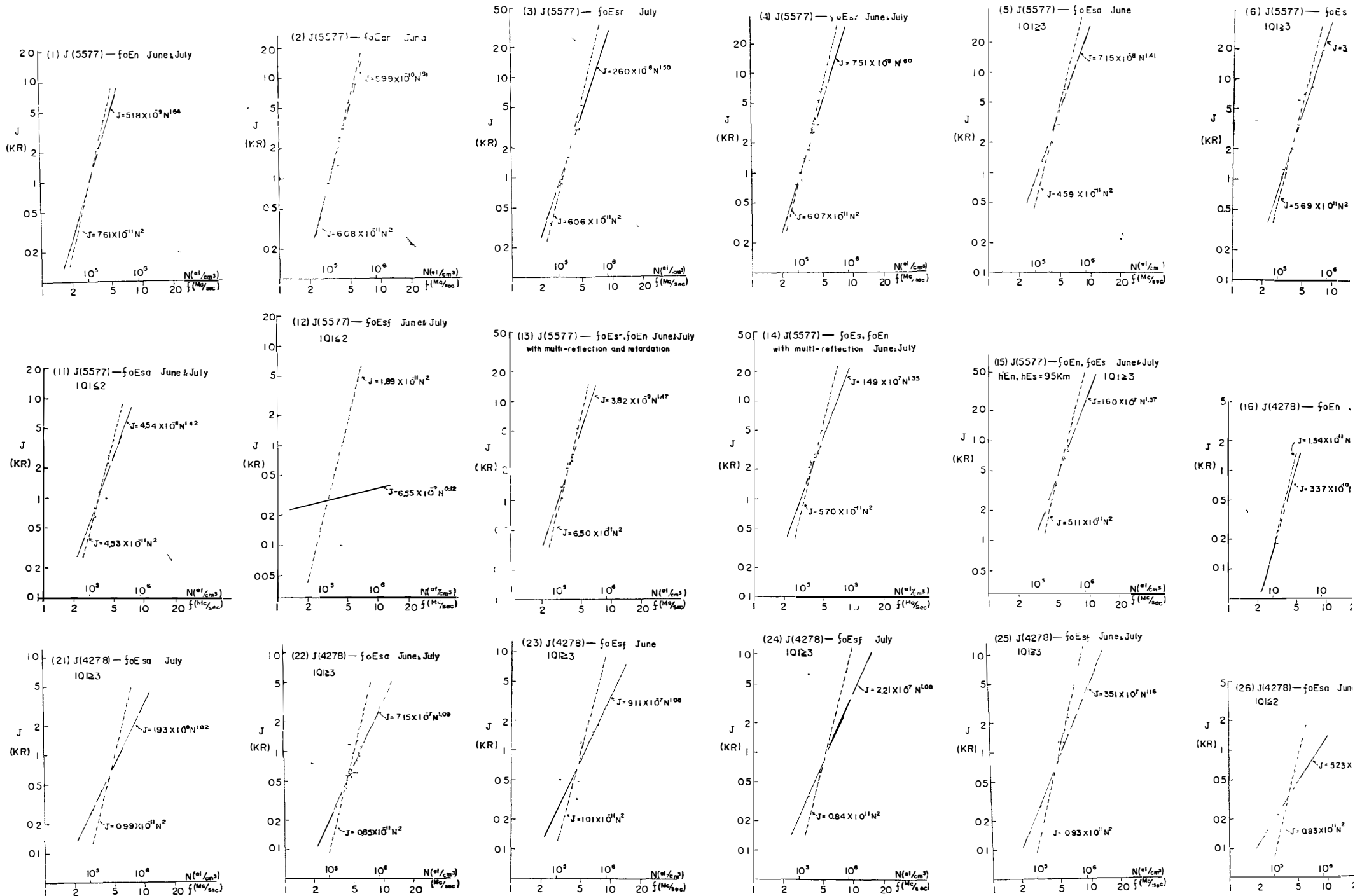
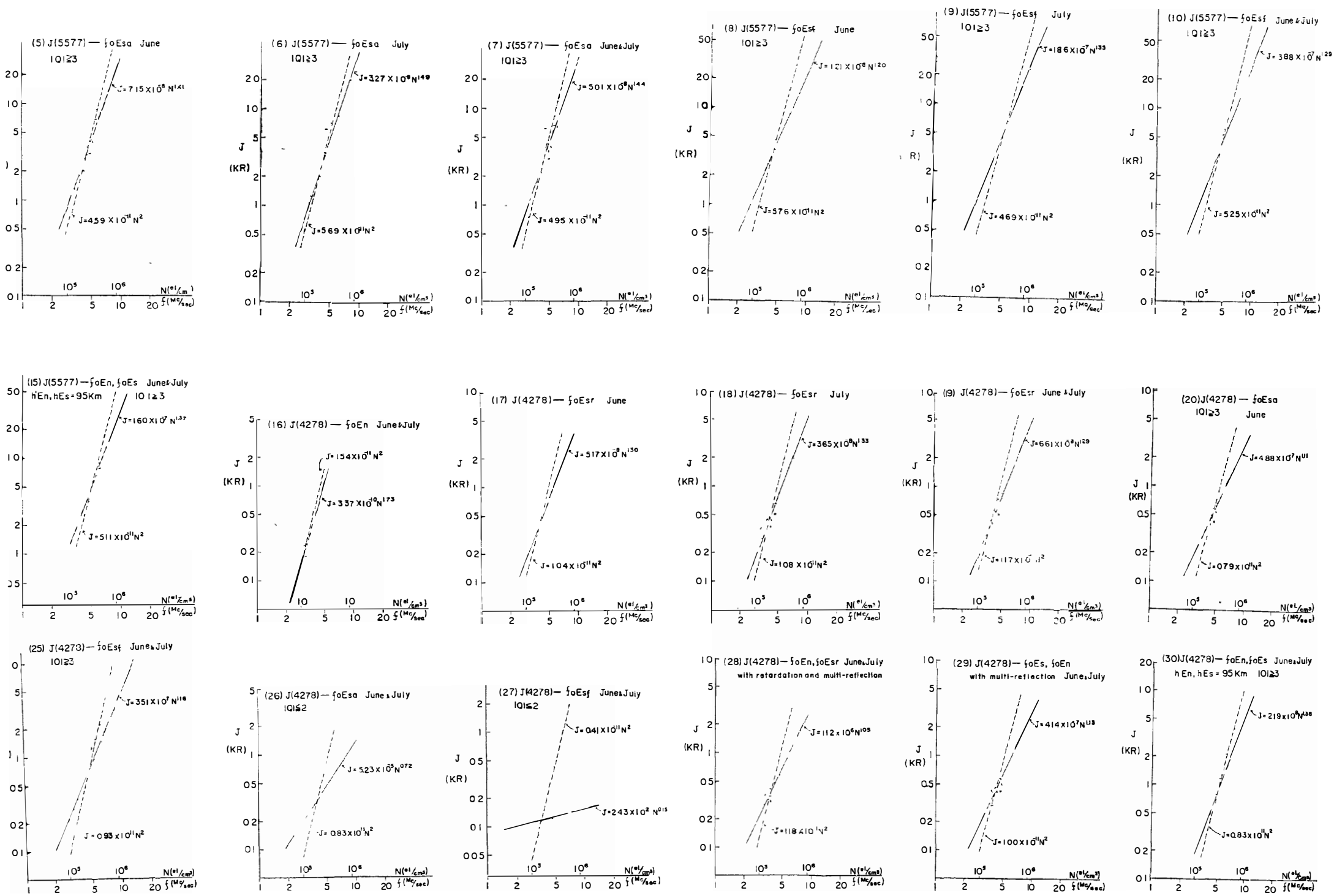


Fig. 11. Relationship between the maximum electron density in E-region and the auroral zenith luminosity. The solid lines indicate the re-



and the auroral zenith luminosity The solid lines indicate the relations $J = aN_{max}^b$, and the dotted lines the relations $J = cN_{max}^2$.

E 領域の最大電子密度と極光輝度とのいろいろな組合せについての関係を Fig. 11 (1)~(30) に示してある. 図中の実線は $J = aN_{max}^b$ を, また点線は $J = cN_{max}^2$ を仮定して得られた関係式を示す.

Table 5 からひき出される主な結果は以下の通りである.

1) $J = aN_{max}^b$ の関係式における指数 b は, 電子密度の割に厚い層であると考えられる E_n や E_{sr} の b の方が E_{sa} や E_{sf} のそれに比較して大きく, その範囲は $\lambda 5577 \text{ A}$ の場合 1.6~1.3, $\lambda 4278$ の場合 1.4~1.1 であった. これらの値は, 電子の消滅を再結合によるとした場合の $b = 2$ より小さく, 付着とした場合の $b = 1$ より大きく, ほぼ中間である. 一番大きいのは $J(5577) - f_o E_{sr}$ の組合せで, 1.81 とかなり 2 に近かった. $J(4278) - f_o E_n$ では, $J(4278)$ の他の組合せと比較してとびぬけて大きく $b = 1.73$ を示すが, この場合は個数も 25 と少なく, また分散や相関係数から考えて少し怪しい値である.

2) $h' E_s = 95 \text{ km}$ の E_s 層だけを集めた場合 (Fig. 11 (15) (30)) $\lambda 4278 \text{ A}$ の指数 b がかなり大きい値 1.38 となった. $\lambda 5577 \text{ A}$ では他と比較してあまり変化がない.

また, この種の E_s は f 型が圧倒的に大きく, 6~7 月全体の個数 98 個のうち 55 個まで E_{sf} が占め, 他は $E_{sa} = 28$, $E_{sr} = 9$, $E_n = 6$ であった. E_{sf} が多いのは電子が低いところに集中して分布するからかも知れない.

3) $\log_{10} J$ と $\log_{10} N$ との相関係数については $J(5577)$ の場合は一部の例外を除いて 0.92~0.96, また $J(4278)$ の場合は 0.80~0.93 と, 共に大きい値を示し, かつ一般に $J(5577)$ の相関の方が $J(4278)$ のそれより大きい.

4) 前にも述べたように, 6 月と 7 月のうち地磁気静穏時 ($|Q| \leq 2$) の E_{sf} だけを集めた例 (Fig. 11 (12) (27)) では, 相関係数, 分散および定数 a , b は他の場合に比較して極端に違っている. 即ち, 相関係数は 0.085 および 0.165 とほとんど 0 に近く, 極光とはほとんど相関がないことを示している. これが前章で述べた“中緯度型 E_s ”と言われる所以である.

5) 指数 b や分散 σ^2 は $J(5577)$ の場合, ほぼ $E_n \rightarrow E_{sr} \rightarrow E_{sa} \simeq E_{sf}$ という序列が成立している (但し a, f 型は $|Q| \geq 3$ に着目). 一方 $J(4278)$ の場合はそれ程顕著ではないが, 大体その傾向にのっていると見てよい. また $J = cN_{max}^2$ の関係式における c の値も大体上の序列が成立している.

6) 前もって $J = cN_{max}^2$ の関係を仮定すると, c は $J(5577)$ では $6.0 \sim 7.6 \times 10^{-11}$, また $J(4278)$ では $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-11}$ という値が出た. 前者は OGUTI の値 5×10^{-10} に比較して

1/7~1/8 である。後者については、OMHOLT が E_a 層から $J(N.G.) = 5 \cdot J(4278)$ を仮定して得た値 2.5×10^{-10} と比較するため、 E_a 層に対応する E_n, E_{sr} with retardation and multiple echo を用いると $J(N.G.) = 6.0 \times 10^{-11}$ となり約 1/4 となった。

5. 酸素原子から放射される極光輝線 $\lambda 5577\text{A}$ と $\lambda 6300\text{A}$ の相互関係

この問題に関しても、冬期6月および7月の観測から得られた光電測光のデータを使用し、その中の $\lambda 5577\text{A}$ (緑線) および $\lambda 6300\text{A}$ (赤線) 輝線強度の時間的な相互関係を調べた。この際極光特有の動きおよび型などには特に注意を払わなかった。

1) $\lambda 5577\text{A}$ および $\lambda 6300\text{A}$ 極光輝線の出現頻度

$\lambda 5577\text{A}$ および $\lambda 6300\text{A}$ の各輝線強度は通常 rayleigh 単位で表わされるが、普通大気光では酸素原子 $\lambda 5577\text{A}$ 輝線強度は $250 R$ (rayleigh) 位であり、 $\lambda 6300\text{A}$ の強度は $50 \sim 200 R$ である。これらの値は大体の平均値であるが、後者は緯度によりその差が大きいものである。そのことは宗谷船上の大気光観測によって確かめられている¹⁸⁾。従って、極光の出現といっても、肉眼で確認される明るいものから、光電測光器によってその異常が認められる弱い極光的現象を示すものまで、その強度の変化はさまざまであるが、著者等かここで極光として取り扱う現象は、その強度が大体 $1 kR$ 以上の強度のものを対象としている。普通 $1 kR$ 程度の極光は肉眼ではあまり確認できないものである。

Fig. 12 は6月および7月の2カ月間の各輝線強度が $2 kR$ 以上のものについての出現頻度

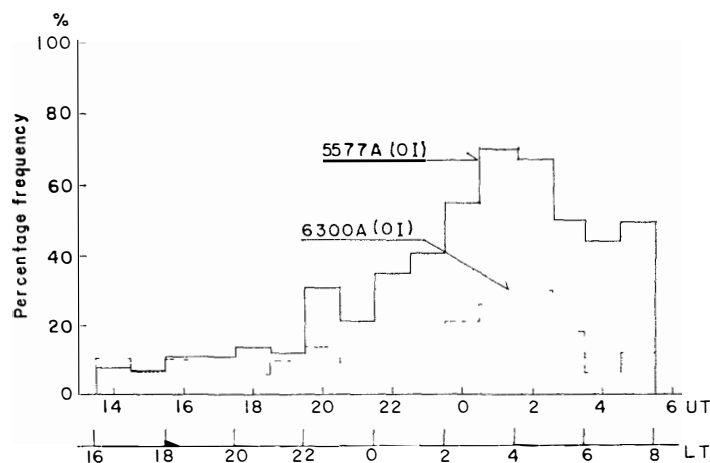


Fig 12 Diurnal variation of percentage frequency of auroral appearances in zenith at Syowa Station in June and July in 1961. The threshold intensity was taken over about $2 kR$ for both red and green emission lines

を示した。これからわかるように, 夜半後地方時 03 時から 04 時附近に極光の出現が最も多くなっている。また, 緑線と赤線とが同時に出現する傾向がある。このことは酸素原子から発輝される $\lambda 5577 \text{ \AA}$ および $\lambda 6300 \text{ \AA}$ 輝線の発光機構が, ある程度同一原因に依るものと考えられる。極光の出現が夜半後に集中していることは局地的磁気嵐(極磁気嵐)による結果であって, 太陽の子午線通過から約 15 時間後に最も極光の出現が多くなっていることを示している。この事実はまた, 太陽から放出される荷電粒子が直接あるいは間接的に極光帯に流入し, これら上層大気の酸素原子および分子イオンなどと衝突して起る発光現象をさすと考えられる。

11) $\lambda 5577 \text{ \AA}$ と $\lambda 6300 \text{ \AA}$ 輝線強度の相関

大気光から極光までの広範囲な強度変化に対して $\lambda 5577 \text{ \AA}$ と $\lambda 6300 \text{ \AA}$ 酸素原子の 2 つの輝線強度の比較を行なった。

Fig. 13 は同時刻に対する各輝線強度を適当な輝度範囲の平均値で示したものである。極光出現と共に $\lambda 5577 \text{ \AA}$ と $\lambda 6300 \text{ \AA}$ 輝線はかなりよい相関を示している。このことは極光の発光が同一原因によることを示していると考えられる。また, 極光の出現が汎世界的磁気嵐に伴う時には, $\lambda 5577 \text{ \AA}$ 輝線と $\lambda 6300 \text{ \AA}$ 輝線強度の比が通常の極光とかなり違ってくる。即ち, 昭和基地を訪れる“定期的極光”(極磁気嵐に伴う極光と等価と考える)はその比

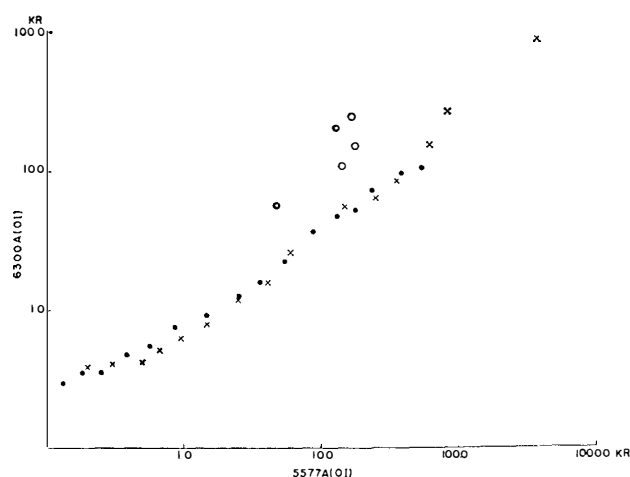


Fig 13 Correlation of intensities of green (5577 A line) and red (6300 A line) emission Black dots and crosses correspond to the data in June and July, respectively Open circles and double circles also correspond to the data in June and July, respectively, in days when the intensity of red line became predominant

$J(5577)/J(6300)$ が3~5位であるが、汎世界的磁気嵐型のものも0.2位になることがある。これは赤線が特に強く発光する時である。従って、極磁気嵐に伴う極光は汎世界的磁気嵐に伴うものとはその発光過程において区別して考える必要がある。

このように、酸素原子の発輝する $\lambda 5577 \text{ \AA}$ と $\lambda 6300 \text{ \AA}$ 輝線との相互関係は、前節でも記したように、その発光機構と発光層の高さを決定する上に重要な意味をもっている。しかしながら、これだけを基にして極光の発光を一義的に決めることは困難である。

iii) その他の関係

Fig. 14 (a), (b) と Fig. 15 (a), (b) は6月および7月における地磁気 Q -指数と輝線強度との関係を示している。この図の中で実線は $Q \geq 0$ を示し、点線は $Q < 0$ を示している。これからもわかるように、極光の出現は極地特有な極磁気嵐とも呼ばれているものに強く関連している。 $\lambda 5577 \text{ \AA}$ については Oguti³⁾ の結果ともよく一致しているが、 $\lambda 6300 \text{ \AA}$ の輝度が地磁気活動、特に極磁気嵐のときにもかなりよい相関を示すことは特筆に値する。

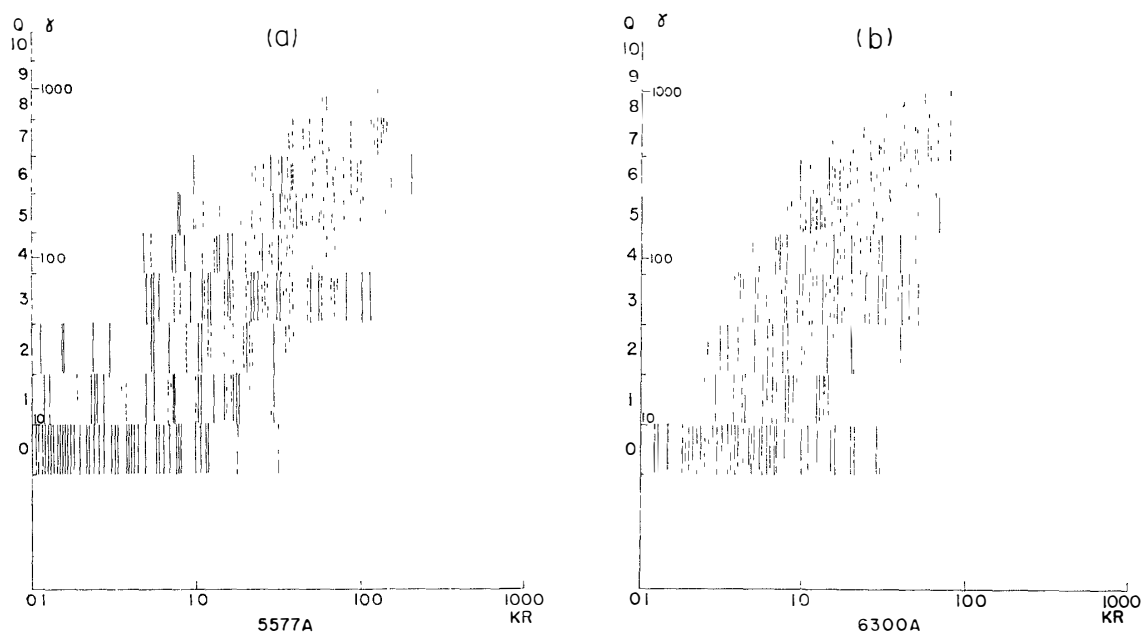


Fig. 14. Correlation of intensity of 5577 Å and 6300 Å emission lines with geomagnetic activity indicated by Q -indices Data of June

— $Q \geq 0$ and \cdot $Q < 0$

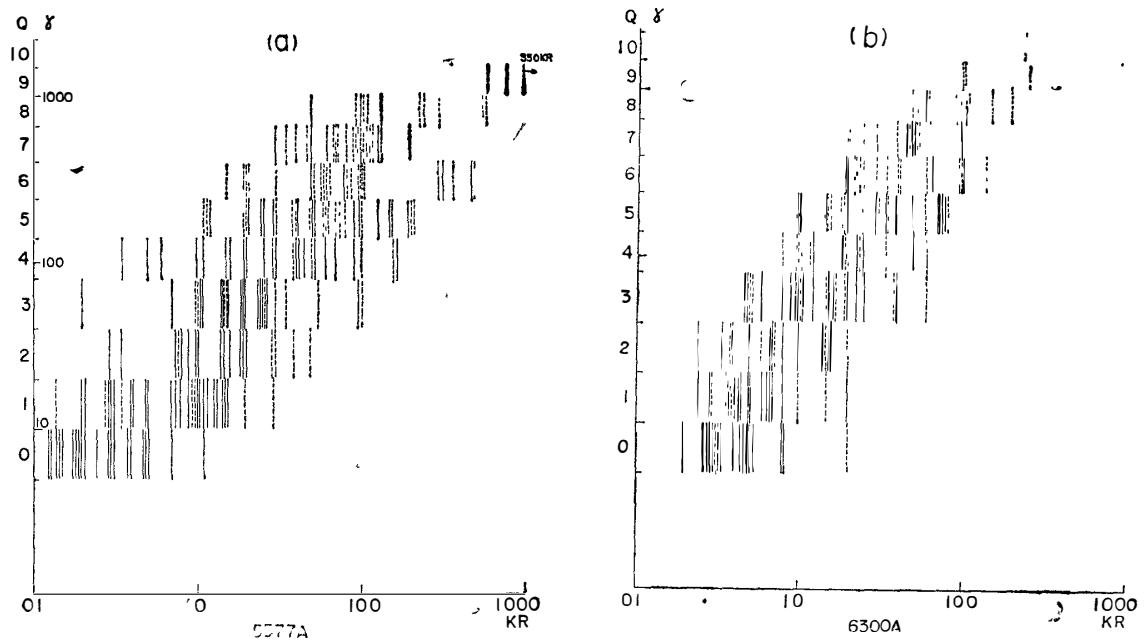


Fig. 15. Correlation of 5577 Å and 6300 Å emission lines with geomagnetic activity indicated by Q-indices Data of July
 — : $Q \geq 0$ and ··· $Q < 0$

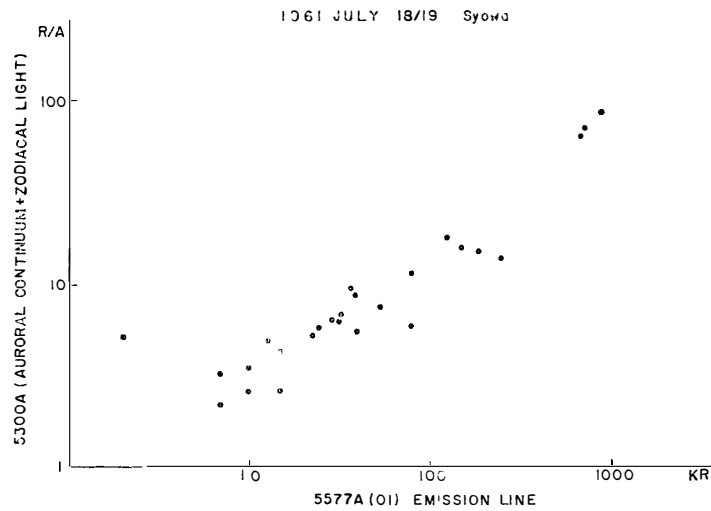


Fig. 16 Correlation of 5300 Å continuum intensity with that of 5577 Å emission line of aurora. 5300 Å continuum in the auroral spectra may be contaminated with the zodiacal light component.

Fig. 16 は極光出現に伴い各輝線強度が増加するに従って、極光連続光もその強度を増加することを示している。大気光中に含まれる連続光に関しては、TOMATSU¹⁹⁾, TANABE²⁰⁾ 等が詳しく研究しているが、極光中の連続光については未だ発表されていない。著者等が求めたこれらの連続光成分の $\lambda 5300\text{Å}$ (半値幅 83Å の干渉フィルター使用) の強度は 10 R/A から 200 R/A の範囲であり、極光輝度の大きい時 $\lambda 5300\text{Å}$ の強度も強くなる。従って、極光中に連続光成分も含まれていることはかなり確からしい。

ここで $\lambda 5300\text{Å}$ のフィルターに入る星野光、および $\lambda 5577\text{Å}$ と $\lambda 6300\text{Å}$ のわずかの混入も差引いてある。しかしながら、黄道光成分に関しては考慮していないが、今回の測定時間内では、ほぼ一定値に近く、それも 1 R/A 以下と推定できる。

6. 考察と結論

本論文の第3節および第4節で、 E 領域内の各成層の特質について、種々の観点から解析した結果について記述した。これらの諸特質、即ち、第3節中の各成層の出現頻度と地方時および Q -指数との関係、各成層の臨界周波数の Q -指数による変化および日変化、また、第4節では Table 5 に示された各成層による関係式の諸定数の違い等からわかるように、同じ E 領域の成層とはいっても、それぞれかなり違った性質を示す。これらの諸性質の違いの由来するところはもとより、 E 領域内における電子密度分布の仕方の相違であるが、主として厚みに関係している。それ故、ここで層の厚みに変化を及ぼす原因について考察することは意味があろう。その一つの原因として考えられるのは電離層内を流れる電流 i による電子の上下方向の運動である。地磁気のベクトルを B とすれば電流 i には $F = i \times B$ なる力が働く。この力の向きは、夜半前 E_n や E_{sr} の出現しやすい頃は、正の湾形変化を起す東向きの電流により上向きとなり、負の湾形変化が起る頃は、西向きの電流により下向きの力が働く。そして一方では、電離層の下方では粒子の密度が大きいので電子は他の粒子との衝突により動きにくく、従って電子の再結合や付着による消滅が大きいのに対し、電離層の上方では粒子の密度が比較的小さく、従って、電子は動きやすいという性質がある。これらの、電子に働く力の向きと電離層の上下における性質の違いから、電離層は正の湾形変化の頃は上下に膨脹しやすく厚さも厚くなり、かつ見掛け高さは幾分高めとなる。一方負の湾形変化の頃は下方へ押しつぶされる傾向にあり、それ故、層の厚みは薄く、かつ低くなるであろう。この $F = i \times B$ なる力によって、 $E_n \rightarrow E_{sr} \rightarrow E_{sa} \rightarrow E_{sf}$ といった移行過程がある程度推測され

と思う。

ただここで注意しなければならないのは, 第3および第4節で述べた“中緯度型 E_{sf} ”の存在である。この E_{sf} は本来地磁気擾乱に伴う E 領域の成層の移行とは関係のない存在である。この種の E_{sf} の成因は不明であるが, 極光や地磁気活動とはほとんど関係がないところから, 荷電粒子の突入よりは, 中緯度と同じ原因, 例えば windshear による turbulence を考えた方がよいであろう。

このように, 昭和基地で観測される E_{sf} には2通りあり, その成因として, 一つは荷電粒子の突入による地磁気擾乱時に発生し, 他は極光や地磁気活動とは関係なく中緯度の E_{sf} と同じ原因で発生すると考えられる。

ここに記述した成層の移行は, 時間的には主として地磁気水平成分が底をつく地方時 03時から 04 時までの話である。それ以後朝方にかけてはあまりはっきりしていない。

本論文における電離層データは 15 分毎のルーチン観測によって得られるものを使い, 主として7月の1カ月にわたる統計から, 層の移行を推測した。15 分毎の個々の例では, 上の移行とは必ずしも一致しない例もあるが, どちらかといえば, $E_n \rightarrow E_{sr} \rightarrow E_{sa} \rightarrow E_{sf}$ という移行が最も多い。もっと詳細な成層の変化を調べるには, 比較的長期にわたる連続観測の結果からこまかい統計をやる必要がある。

第3節の第6項で述べた, 正子前に出現する見掛け上の Blackout, 即ち“ E ”に対応するものについては, Riometer の観測結果が得られればかなりはっきりすることであろう。アラスカでの Riometer の観測結果によれば, 電波の吸収は朝方が圧倒的に大きく, 正子前はむしろ最低となっている。

第5節の $\lambda 5577 \text{ \AA}$ と $\lambda 6300 \text{ \AA}$ の相互関係に関する記述は, まだほんの一部の統計的結果であって, 結論を得るまでに至っていない。各輝線相互の関係および極光連続光についての詳細は, 目下詳しく検討中であり, いずれ発表する予定である。

また, 極光輝線および連続光の観測は, スペクトログラフおよび光電測光の同時観測をもとにして行なわれることが必要であり, 今後もこの方面の多種多様の観測が望まれる。中でも連続光の存在を確認することは, 特に重要であり, 著者等は今後の観測に期待したい。

本論文における解析の結果, 現在の段階でいえることは次の通りである。

1) 昭和基地で観測される E 領域反射は, それぞれの型によって非常に特色があるが, 地磁気の擾乱に従って移行するようである。その順序は $E_n \rightarrow E_{sr} \rightarrow E_{sa} \rightarrow E_{sf}$ が最も普通と考えられる。

2) 1) の移行と関係がなく、極光や地磁気活動の静穏時に出現し、かつ極光輝度とその最大電子密度とがほとんど相関のない f 型の E_s 反射が存在する。その成因は荷電粒子の流入とは関係がないと考えられ、あたかも中緯度で出現する E_s 層とその性質が似ているので、著者等は仮に“中緯度型 E_s ”と名付けた。

3) 最大電子密度 N_{max} (el/cm³) と極光輝度 $J(kR)$ との関係を $\log N_{max}$ と $\log J$ との相関係数で表わすと、 $\lambda 5577 \text{ \AA}$ の場合は大体 0.92~0.96, また $\lambda 4278 \text{ \AA}$ の場合は 0.80~0.93 と非常に大きい値を示した。

4) $J = aN_{max}^b$ なる関係式を最小自乗法を用いて決定した場合、指数 b は、電子密度の割に厚い層であると考えられる E_n や E_{sr} の b の方が E_{sa} や E_{sf} のそれに比較して大きく、その範囲は $\lambda 5577 \text{ \AA}$ の場合 1.6~1.3, $\lambda 4278 \text{ \AA}$ の場合 1.4~1.1 となった。

5) 前もって $J = cN_{max}^2$ の関係を仮定すると、 c は $J(5577)$ では $6.0 \sim 7.6 \times 10^{-11}$, また $J(4278)$ では $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-11}$ となった。前者は OGUTI の値 5×10^{-10} に比較して $1/7 \sim 1/8$ である。後者については、OMHOLT が用いた E_a 層に相当する E_n, E_{sr} with retardation and multiple echo で比較すると、 $J(N.G.)$ では OMHOLT の値 2.5×10^{-10} に対して 6.0×10^{-11} となり、約 $1/4$ である。

6) $\lambda 6300 \text{ \AA}$ の輝線強度は $\lambda 5577 \text{ \AA}$ の強度や地磁気変化ともかなりよい相関を示している。

7) 極光中に極光連続光成分が存在していることはかなり確からしい。

謝 辞

本論文をまとめるに当たり、種々御指導を賜った電波研究所の糟谷企画課長、柴田、田尾両主任研究官および電波物理研究室の米沢室長および羽倉主任研究官、資料整理に御協力いただいた予報係の諸氏に対し深甚なる謝意を表する。

文 献

- 1) National Report of Japanese Antarctic Research Expeditions 1958-1960, Japan Antarctic Office, Ministry of Education (1960)
- 2) Omholt, A The auroral E-layer ionization and the auroral luminosity J Atmos Terr. Phys, Vol 7, 73-79 (1955)

- 3) Oguti, T. . Inter-relations among the upper atmosphere disturbance phenomena in the auroral zone. JARE 1956-1962 Scientific Reports, Series A, No, 1, Aeronomy (1963).
- 4) Rees, M H : Absolute photometry of the aurora-I, The ionized molecular nitrogen emission and the oxygen green line in the dark atmosphere J Atmos. Terr. Phys., Vol 14, 325-337 (1959)
- 5) Hunsucker, R D and Owren, L Auroral sporadic-E ionization. J Res. NBS., 66 D, No 5, 581-592 (1962)
- 6) Meek, J H . Correlation of magnetic, auroral and ionospheric variation at Saskatoon Part 2. J Geophys Res , Vol 53, No 1, 87-92 (1954)
- 7) Mæhlum, B The Sporadic-E auroral zone Geophysica Norvegica, Vol XXIII, No 1, 1-32
- 8) URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction of the World Wide Soundings Committee, edited by W R Piggott and K Rawer, Elsevier Publishing Company (1961)
- 9) Meek, J H. and Davies, F T Canadian observers instruction book (1946).
- 10) Hanson, G H , Hagg, E L and Fowle, D The interpretation of ionospheric records D R T. E. Rep , No R-2 (1953)
- 11) King, G A M. The Night-E layer Ionospheric Sporadic E, Pergamon Press , pp 219-231 (1962).
- 12) Bartels, J and Fukushima, N · A Q-index for the geomagnetic activity in quarter-hourly intervals Abhandlungen Akad. Wiss. Göttingen, Math -Phys Klasse, Sonderheft, No 3, (1956)
- 13) Nakamura, J The life and progress of the aurora Defence Research Board. T78 J (1963).
- 14) Wakai, N and Sawada, K . Nocturnal variation of the ionospheric E region in a temperate latitude associated with geomagnetic disturbances. J Radio Res Labs Vol 11, No 53, 1-17 (1964).
- 15) Haubert, A L'ionisation nocturne de la region-E et l'activité geomagnétique. J Atmos. Terr Phys., Vol 15, 84 (1959).
- 16) Montalbetti, R and McEwen, D J. . Hydrogen emissions and sporadic-E layer behaviour J. Phys Society Japan, Vol. 17, Supplement A-I, International Conference on Cosmic Rays and the Earth Storm, Part I, 212-215. (1962)
- 17) Hakura, Y. · Polar cap blackout and auroral zone blackout J Radio Res. Labs , Vol. 7, No 34, 583-597 (1960).
- 18) Huru-hata, M . Airglow intensity observed on the SOYA Japanese Expedition Ship to the Antarctic 1956-1962 JARE Scientific Report, Series A, Aeronomy, No 2 (1963).
- 19) Tomatsu, T · Notes on the night glow continuum near 5300A. Rep of Ionos. Res Japan, Vol 12, No. 2 (1958).
- 20) Tanabe, H. Zodiacal light and airglow components at 5300 A. Pub Astronom. Soc Japan, Vol 16, No. 4 (1964).

(1965年4月17日受理)