

南極気球による電場とオーロラ X 線の観測

小川俊雄^{*}・小玉正弘^{**}・福西 浩^{***}・松尾敏郎^{****}・芳野越夫^{*****}Measurements of Electric Field and Auroral X-Rays
with Antarctic BalloonsTOSHIO OGAWA, Masahiro KODAMA^{*}, HIROSHI FUKUNISHI^{**},
Toshiro MATSUO^{***} and Takeo YOSHINO^{****}

Abstract: A plastic balloon of 5000 m³ was launched at Syowa Station ($L=61$), Antarctica, at 1138 UT on December 12, 1976, and the horizontal electric field and auroral X-rays (>25 keV) were simultaneously measured for about 10 hours in the stratosphere. During the balloon flight a weak geomagnetic substorm occurred corresponding to the eastward electrojet in the afternoon side of the auroral zone, and the electric field increased from 10 mV/m to 40 mV/m. There were good correspondences between the southward electric field and geomagnetic horizontal component and between the westward electric field and declination. Observed auroral X-rays were homogeneous throughout the all sky and of diffuse type. The X-rays were enhanced three times during the substorm. The electric field clearly decreased on the second X-rays event but there was no clear change on the other two events. There was no special change in the electric field direction during the geomagnetic substorm. One hour averages of the observed electric field show a clear S_q^p pattern. The height-integrated conductivities were calculated from the observed electric field and the geomagnetic variations at Syowa Station, getting the values of 1–10 mho. The Hall conductivity increased during the substorm.

要旨 1976年12月12日11時38分 UT, 南極昭和基地から 5000m³ のプラスチック気球を飛揚し, 約 10 時間にわたって成層圏における水平電場とオーロラ X 線

-
- * 京都大学理学部地球物理学教室. Geophysical Institute, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606.
 - ** 理化学研究所 The Institute of Physical and Chemical Research, 7-13, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173
 - *** 国立極地研究所 National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173
 - **** 京都大学工学部電気工学第二教室 Department of Electrical Engineering II, Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606
 - ***** 電気通信大学電波物理研究室 Radio Physics Laboratory, University of Electro-Communications, Chofu-shi, Tokyo 182

(>25 keV) の同時観測を行った。観測時間中、午後のオーロラ帯の東向きジェット電流に対応する地磁気サブストームがあり、電場は 10 mV/m から 40 mV/m に増加した。電場の南向き成分と地磁気水平分力が、また、電場の西向き成分と偏角に対応する変化を示した。観測されたオーロラ X 線は全天にわたってほとんど一様な diffuse 型のものであった。サブストーム中 3 回オーロラ X 線が増大し、そのうちの 1 回には明らかに南向き電場の減少に対応したか、後の 2 回については、はっきりした電場の変化はなかった。サブストームに伴って電場の方向には特別の変化はなかった。観測された電場の 1 時間平均値は明らかな S_q^p 型を示した。昭和基地の磁場変化と観測された電場変化から電離層電気伝導度を計算し、 1 - 10 mho の値を得た。サブストーム時には Hall 伝導度が増加した。

1. 序

極域におけるオーロラ発生時の電場と X 線の同時観測は、オーロラサブストームの成因を研究する上に重要である。電場は地上の磁場変化を起こす電離層電流の原因である。また、観測された電場から電離層および磁気赤道面におけるプラズマドリフトを推定することができる。オーロラ X 線はオーロラ帯の電離層に降下する荷電粒子の制動輻射から放射されるので、オーロラ粒子の性質とそれらの振舞いについての情報を与える。したがってこれらの両者を同時に観測することは、オーロラの発生機構、ひいては磁気圏サブストームの原因の研究にとって重要である。

昭和基地においては、1968年以來オーロラ X 線の観測を、また1972年以來電場の観測を行っている。X 線に関する観測結果は BARCUS *et al.* (1973) 等に、また電場に関する結果は TANAKA *et al.* (1977a, b) に報告されている。今回はじめてこの両者を同時測定することができた。

2. 観測装置

電場の水平成分用アンテナは、水平面内に直交して取り付け、長さ 4 m のガラスファイバー製釣り竿の先端部分 3 m に銀導電塗料を塗り、その上にアクアダックコーティングをほどこしたものである。水平アンテナの実効長は 50 m で、電位計の入力抵抗には $1 \times 10^{12} \Omega$ を用いた。

オーロラ X 線用センサーは、直径 1 インチ厚さ 2 mm の NaI シンチレーションカウンターである。観測されるエネルギー範囲は 25 keV 以上の光子で、カウンターの開角は天頂から $\pm 45^\circ$ である。計測には磁気シールド付きフォトマル RCA 2060 を用い、カウンタ数 2^4 で第 1 段のステップ、 2^{10} で第 2 段のステップになるようにした。このフォトマル

を垂直に取り付け、頭部のみがゴンドラの上部から出るようにし、増幅器の電源等は電場増幅器と同じところに収めた。

ゴンドラは一辺 55 cm の立方体のアルミニウム板でできており、表面はすべてアクアダクテコーティングした。この金属導体箱はアンテナとは独立した導体系となり、電位測定の規準となる。

電場の方位検出用には誘導コイルを用いた。直径 1 cm、長さ 30 cm のパーマロイ棒にコイルが 2 万回巻いてある。水平アンテナを含むコントラを、約 20 秒の周期で時計まわりに回転させ、コイルに誘起される起電力を増幅し、電場出力と位相を比較して、電場の方位を決定した。

3. 観 測

1976年12月12日14時38分 EST (11時38分 UT) に昭和基地付近の海氷面上から、5000m³ のプラスチック気球を用いて、電場とオーロラ X 線の観測装置を飛揚させた。気球は方位 250°-260° の方向に飛しょうした。

気球飛揚時にはかなり強い風が吹き、飛揚の瞬間の風向の急変のため、垂直電場成分用上部アンテナワイヤーがコントラの一隅に巻きついたため、ゴンドラは傾いたまま上昇した。このため一対の水平電場成分用アンテナと垂直アンテナを用いる観測は不可能となったが、残りの一対の水平アンテナはほぼ水平面内に止まり、終始電場の観測を行うことができた。

気球飛揚直後の写真を検討した結果、コントラは約 45° 傾いていたことがわかった。したがってコントラ上面に取り付けた X 線カウンターも約 45° 傾いたことになる。X 線シンチレーションカウンターの開角が ±45° であるため、ゴンドラの回転にともなって、カウンターは気球からみた水平面から天頂に至る大気層をスイープしたことになる。

以上のようにして観測された電場、X 線および方位検出用誘導磁力計 (GA) のテレメータ出力を記録計上でモニターした例を図 1 に示す。

4. 結 果

図 1 に示したような記録上から、1 分毎に読み取って求めた水平電場の値と方向を図 2 に示す。同様にして読み取ったオーロラ X 線の計数値を図 3 に示す。

図 2 から水平電場の値は数 mV/m から 40 mV/m の間を変化した。電場の方向は、は

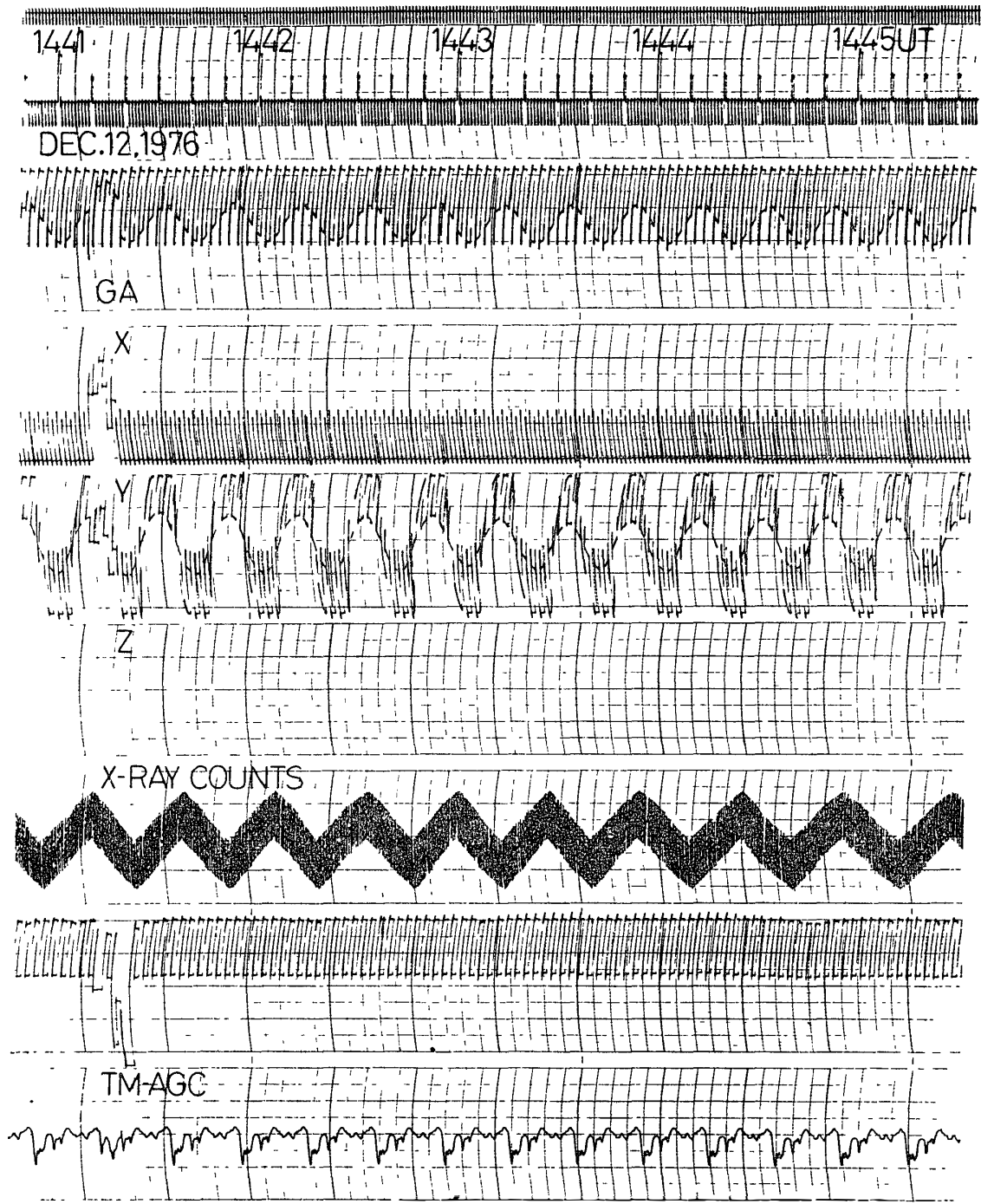


図 1 水平電場 (Y), オーロラ X 線, 誘導コイル (GA) のテレメータ出力

Fig. 1. Telemeter output of horizontal electric field (Y), auroral X-rays and induction coil (GA).

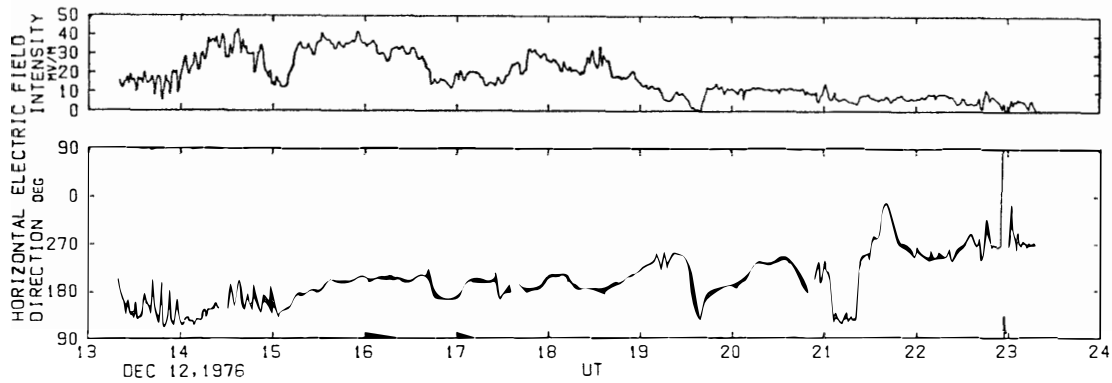


図 2 水平電場の値と方向

Fig 2. Horizontal electric field intensity and direction

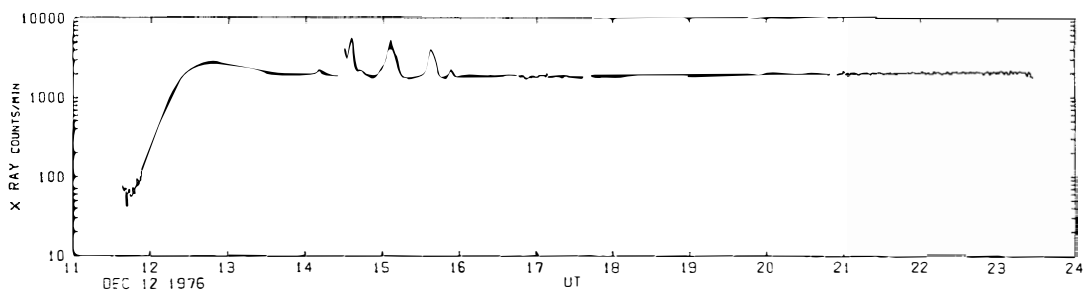


図 3 オーロラ X 線計数値

Fig 3 Auroral X-ray counts

じめ南東から、変動をとめないながらも全体として時計まわりに回転して、観測の最後には西向きの方になった。電場の値は 14 時—19 時 UT に大きく、観測の後の方が小さくなった。

オーロラ X 線の計数値は 14 時 30 分—14 時 39 分、14 時 57 分—15 時 13 分、および 15 時 35 分—15 時 43 分 UT にそれぞれ増大し、背景値 1900 カウントに対して 2 倍以上の 4000—5500 カウントのピーク値を示した。これら X 線計数値の異常増大のうち、第 2 の変化は電場の減少にはっきり対応しており、それぞれの変化の始まり、極大と極小、終りがほぼ一致する。しかし、他の 2 つの変化は特によい対応があるようには見えない。

電場の観測値を磁場変化と比較するため、図 2 に示した電場の値を磁氣的南向き成分 (E_s) と西向き成分 (E_w) にベクトル分解して、昭和基地で観測された磁場変化の水平成分 (H) と偏角 (D) に対比して示したものが図 4 である。磁場変化の基準線は観測の前後から判断してひいたものである。図 4 から、 E_s と H 、 E_w と D はかなりよく対応していることがわかる。特に観測の初期にはこのことがはっきりしており、14 時—19 時 UT

の電場の増大は地磁気サブストームに関係していることがわかる。観測の後期で対応がわるくなるのは、気球が昭和基地より数 100 km 離れたためでもある。

以上のごとく、観測された電場にはサブストームの影響が含まれているが、このサブストームはあまり激しいものではない。観測された電場の全体像を見るために、1 時間毎の平均値をとって、それらを磁気地方時について電離層に投影する。その結果を図 5 に示す。

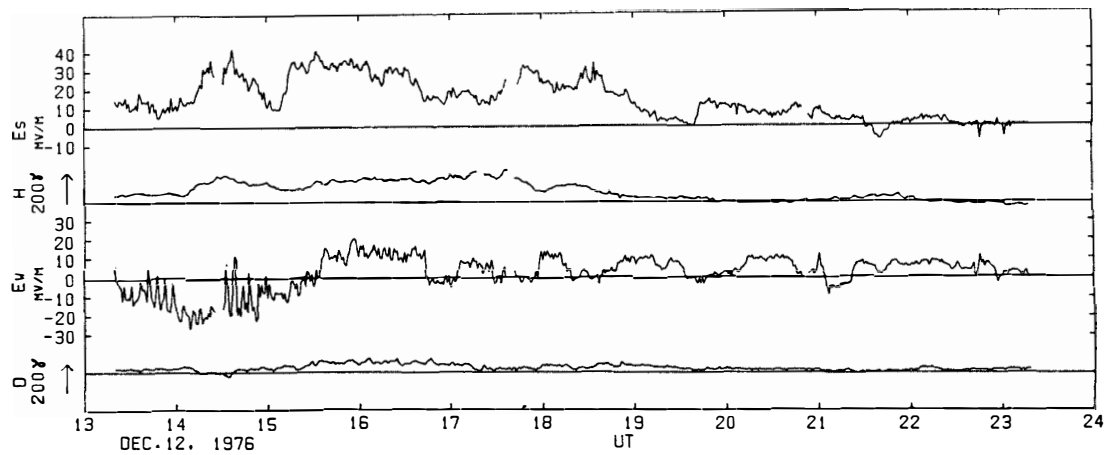


図 4 電場（南向き成分 E_s と西向き成分 E_w ）と昭和基地の地磁気変化（水平成分 H と偏角 D ）の比較

Fig. 4. Comparison of electric fields (southward component E_s and westward component E_w) and geomagnetic variations (horizontal component H and declination D) at Syowa Station.

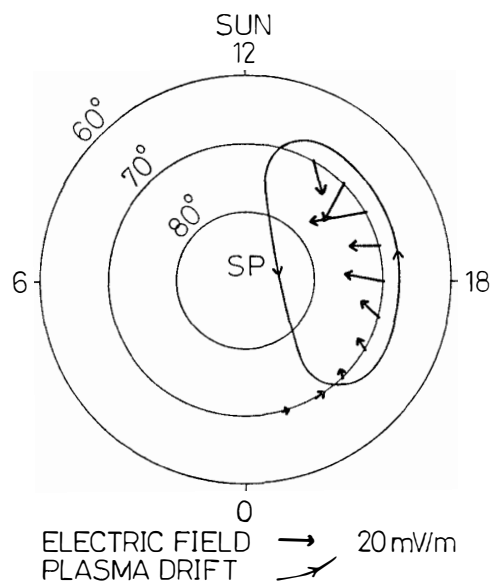


図 5 電場の 1 時間平均値とそれから推定される電離層内のプラズマドリフト

Fig. 5. One hour averages of electric fields and estimated plasma drift in the ionosphere.

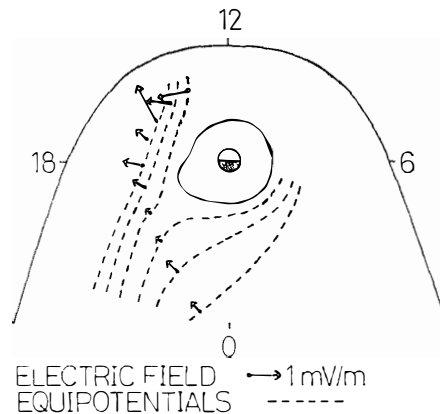


図 6 磁気赤道面における電場と等電位分布

Fig 6 Magnetospheric equatorial electric fields and equipotentials

1時間平均値は 34 mV/m から 4 mV/m の間で変動し、はじめ南東から、南、ついで西に方向を変えた。これらの電場に対応するプラズマドリフトの流線を推定して図5に示す。1時間平均の値は10時間分しかないので日変化を見ることはできないが、少なくとも午後の半日について S_q^p 型をよく示している。22, 23時には電場の値が小さくほぼ西向きになっており、Harang不連続に対応すると思われる。

次に磁力線を等電位と仮定して、これらの電場を磁気赤道面に投影する。投影のための磁場モデルには、IMP 1, 2, 3の観測から求めた FAIRFIELD (1968) のモデルを用いた。その結果を図6に示す。投影に当たっては、電離層の共回転による赤道向き電場 6.9 mV/m を考慮した。図6の磁気赤道面の非回転系における電場の平均値は $0.58 \pm 0.31 \text{ mV/m}$ である。これらの電場の値に対応する等電位分布を点線で示した。等電位線はプラズマドリフトの流線を示し、赤道面における大規模対流の分布を表している。

5. 議 論

5.1. 成層圏電場と電離層電場

MOZER and SERLIN (1969), MOZER and MANKA (1971), MOZER *et al.* (1974), MOZER and LUCT (1974) 等は北高緯度において気球による電場の観測を行って、観測された成層圏電場が真の電離層電場であることを示し、これらを用いてサブストームの成因や、高緯度における一般的な電場について議論した。

一方、MOZER (1971), ATKINSON *et al.* (1971), BOSTRÖM and FAHLESON (1977) 等は、成層圏における観測から電離層電場を求めることができることを理論的に証明し、周

期 1 秒以上, スケール 100 km 以上の電離層電場は成層圏においてもほとんど減衰しないことを示した. また, HOPPEL (1971) は陸上の地形の影響によって成層圏水平電場に大気垂直電場の影響が入ることを指摘し, OGAWA *et al.* (1975) が実際の気球による観測からこのことを裏づけた.

南半球における観測は, TANAKA *et al.* (1977a, b) が 2 個の気球を用いて 3 次元電場を測定し, オーロラサブストームにともなう電場の水平・垂直両成分に変化があることを見い出した.

このようにして, 気球による成層圏電場の観測は, 人工衛星 (HEPPNER, 1972; GURNETT, 1972), ロケット (MOZER and FAHLESON, 1970; POTTER, 1970), バリウム電離雲 (WESCOTT *et al.*, 1969; HAERENDEL, 1972) および IS レーダー (DOUPNIK *et al.*, 1972; BREKKE *et al.*, 1974) とともに, 電離層電場観測の有力な手段であることが証明された. 以下この報告で述べる結果もこれを支持するものである.

5.2. サブストームにともなう電場

図 4 に見られるように, この観測中 14 時—19 時 UT に, 昭和基地の地磁気変化約 200 γ の一連の弱いサブストームが起こった. 気球で観測した電場変化と昭和基地で観測した地磁気変化はよく対応している. したがってこれらの地磁気変化は, 電場の増大に原因する電離層電流のために起こったものと考えられる. しかるに一方, 図 2 において観測された電場の方向の時間経過を見れば, サブストームの時刻に対応して特別の変動があったとは思われない. 13 時 20 分—15 時 00 分 UT に短周期の特徴ある振動が見られるが, これがサブストームの開始時に特有の変化かどうかは今のところわからない. 19 時 40 分, 21 時 10 分, 23 時 00 分 UT 頃に短時間電場の方向の変化が見られるが, それ以外のところでは全体としてきわめて規則正しく時計まわりに, 電場の方向が回転していることがわかる. このような電場の振舞いは, 後で述べるように, S_q^p 対流系の電場に特有のものであるから, したがって, サブストームにともなう電場の変化としては, 電場の強さが大きくなったことだけである. このことは, サブストームの原因を考える上で大へん重要である. 一般にオーロラ帯の電離層には, 後で述べる磁気圏の大規模対流電場が伝達されている. したがってここで見い出したように, サブストーム時に電場の強さが単に大きくなるだけであるということは, この時, 磁気圏内の電場も, その方向には変化がなく, 単に大きさが強くなっただけであると推定される.

MOZER (1971) は孤立型のサブストーム時の理想化した電場変化モデルを提出した. 図

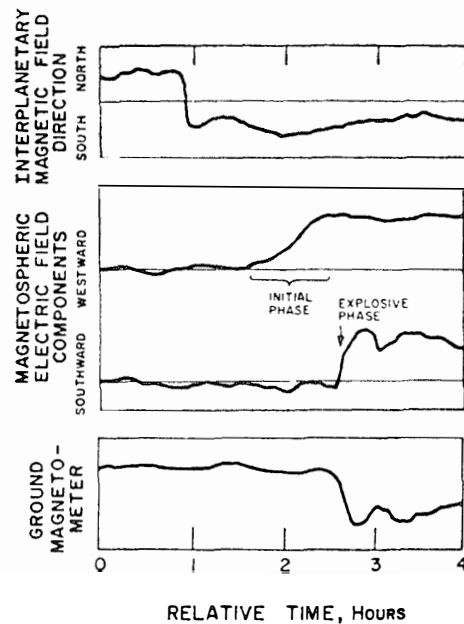


図 7 MOZER (1971) による孤立型サブストームのモデル
 Fig. 7. Isolated substorm model by MOZER (1971)

7にそれを示す。それによれば、惑星間空間磁場が南向きに転じて約1時間後に、磁気圏に西向き電場が発達する。この西向き電場によって、夜側の磁気圏プラズマは地球向きに $E \times B$ ドリフトを起こす。このドリフトが1時間ぐらい続いた後、サブストームの爆発相が起こる。この時、電離層に投影された西向き電場によって極向きのホール電流が流れ、これによってできた南向き電場でオーロラジェット電流が、ホール電流として流れる。この結果地上の磁場の水平成分が減少するというものである。我々の場合のサブストームは午後のオーロラ帯に起こった東向きジェットに対応する。サブストームの始まりの時に東向きの電場が現れることは TANAKA *et al.* (1977b) にも出ている。この場合の時刻は17時 UT 付近であるが、我々の場合は13時20分—15時30分 UT であるから、この東向きの電場はサブストームの始まりの時刻に特徴的に現れるように見える。また、サブストーム時に南向き電場が強くなることも TANAKA *et al.* (1977b) の場合と同じである。しかしながら、図2の電場の方向はきわめて規則正しく時計まわりに回転しているので、前述の東向き電場や南向き電場が、サブストームを起こす特別の電場であると判断するのは早急に過ぎるであろう。今後の観測によって確かめなければならない。

5.3. 電離層電気伝導度

気球で観測した電場と、昭和基地で観測された磁場変化(図4)を用いて電離層電気伝

導度を計算することができる。一般に2次元の無限平面電流を仮定した電離層電流は、昭和基地の伏角 -65.61° を用い、地下の誘導電流の効果が電離層電流の効果の $1/2$ だけあるとすると、次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} J_x &= 1.21\Sigma_1 E_x + 1.10\Sigma_2 E_y \\ J_y &= -1.10\Sigma_2 E_x + \Sigma_1 E_y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで J_x, J_y はそれぞれ南向きおよび東向きの電流である。 Σ_1, Σ_2 はそれぞれ高さについて積分した Pedersen および Hall 電気伝導度である。電場、電気伝導度、磁気変化の単位をそれぞれ mV/m , mho および nT ($=\gamma$) で表せば、それらの間には次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} H &= -1.10\Sigma_2 E_N + \Sigma_1 E_E \\ D &= -1.21\Sigma_1 E_N - 1.10\Sigma_2 E_E \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで E_N, E_E はそれぞれ北向きおよび東向きの電場である。式(2)を用いて観測された電場と磁場のデータから Σ_1 と Σ_2 を計算することができる。その結果を図8に示す。

図8で17時15分、21時40分、23時00分 UT 頃に Σ_1 と Σ_2 が負の値となったが、これらはいずれも電場の値が小さく、方向が急変しているところに相当し、計算の誤差である。同様に、19時35分 UT 付近の Σ_1 と Σ_2 が異常に大きいのも、電場がゼロ付近にある。

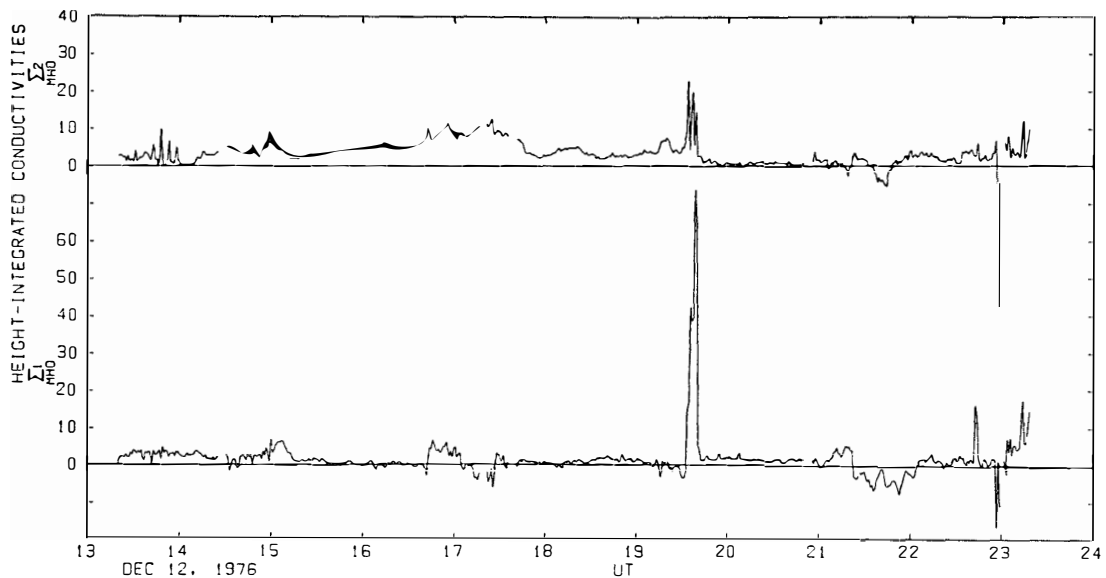


図8 気球で観測した電場と昭和基地の地磁気変化から計算した、高さ積分電気伝導度 Σ_1 は Pedersen 伝導度, Σ_2 は Hall 伝導度

Fig 8. Height-integrated conductivities calculated from the balloon-measured electric field and geomagnetic variations at Syowa Station. Σ_1 : Pedersen conductivity; Σ_2 : Hall conductivity.

るために生じたもので信頼できない。以上のところを除けば、 Σ_1 と Σ_2 は全体として 1-10 mho の間にある。サブストーム時には Σ_2 が Σ_1 より大きくなる

BREKKE *et al.* (1974) は IS レーダーの観測から Σ_1 と Σ_2 を求めた。それによれば、静穏時には Σ_2 と Σ_1 の比はほぼ 2 であるが、サブストーム時には Σ_2 が Σ_1 よりずっと大きくなる。我々の結果もこれと同じ傾向にある。BREKKE *et al.* (1974) はさらに、電離層の東西方向の電流 (J_y) と地上の H とはよい対応があるが、南北方向の電流 (J_x) と D とは、磁力線方向の電流を考えなければよい対応が得られないと報告している。このことについて KAMIDE and BREKKE (1975) は、オーロラオウエルの極側と赤道側の境界に沿って、磁力線に沿う一対の面電流が存在するとすれば、少なくとも部分的には解釈できることを示した。我々の場合には、磁力線方向の電流についての情報がないので、このことをこれ以上深く議論することはできない。

5.4. S_q^p 電流系

図 5 に示した電離層電場の 1 時間平均値とそれによるドリフト型は、午後側の 10 時間分のデータしかないが、NAGATA and KOKUBUN (1962) が示した S_q^p 場とよく一致する。 S_q^p 場の型は正午一深夜の線に対して傾いている。午後のはじめの半分で電場の値が大きいのは、5.2 で議論したようにサブストームの影響であろう。22, 23 時に電場の値が完全に西向きになった。これは Harang の不連続と呼ばれる領域で、この結果は MAYNARD (1974) の結果とよく一致する。

5.5. 赤道面ドリフトと等電位分布

WOLF (1975) は $L \approx 8$ にほぼ円形のアルウェン層（プラズマシートの内部境界）を仮定して、2.5 時間の間プラズマシートと電場が矛盾のないように変化した場合の赤道面での電位分布を計算した。その結果は、図 6 に示した昭和基地での電場観測から求めたポテンシャル分布によく一致している。

5.6. 電場と X 線の相関

第 3 章観測のところて述べたように、気球飛揚時にコントラが約 45° 傾いたので、X 線カウンターはほぼ 3 rpm の周期で全天を走査したことになる。したがって、もし特定方向にオーロラ X 線源があるとすると、周期的な変化が現れるはずであるが、記録紙上にはそのような変化は見られなかった。したがって、オーロラ X 線の発光は全天にわたってほとんど一様な diffuse 型のものであったと思われる。しかし全天と言っても、大気による吸収

のため天頂方向からの寄与が大きいことはもちろんである。

オーロラ帯降下粒子と電場の関係については、AGGSON (1969) がロケット観測からオーロラアークの中で電場が減少することを発見した。この逆相関の関係はその後、POTTER and CAHILL (1969), WESCOTT *et al.* (1969), MÅSEIDE *et al.* (1973), MAYNARD *et al.* (1973) 等によって種々の観測から同様の結果が発表された。一方、MOZER and FAHLESON (1970) は電場と粒子の同時観測から、オーロラアークの境界で平均的電場強度が変化しなかったと報告し、CHOY *et al.* (1971) もこれを支持する結果を得た。電場と光が正相関関係にあるか、逆相関関係にあるかは、オーロラ発生機構を考える上で重要なポイントとなる。すなわち、AGGSON (1969) は、磁気圏に発生した電場が磁気圏と電離層を結ぶ回路の電流源として働き、オーロラを発生する降下粒子が電離層で電気伝導度を増大させ、磁気圏と電離層を結ぶ全体の電流回路のうち、電離層における部分の抵抗を減少させるため、それによる電位降下としての電場が減少すると解釈した。MAYNARD *et al.* (1973) の指摘するように、オーロラの中で電場と光が正相関か逆相関のどちらが起こるかは複雑な問題で、多くの要素に依存している。たとえば、電流源の内部抵抗、Pedersen 電気伝導度、降下粒子のエネルギーとフラックス、空間電荷の存在等と密接に関係している。

MOZER *et al.* (1973) は Fort Churchill から飛揚させた気球によって電場と X 線を同時観測した。その結果は、夜間の粒子降下現象に先だて西向き電場が増加し、粒子降下の最中には西向き電場が減少する場合が全体の約 70% あったことを示した。また、粒子降下は南向き電場の変化とは無関係であると指摘している。

この報告で述べた昭和基地での観測では、MOZER *et al.* (1973) とは逆に、オーロラ X 線の変化は西向き電場にはほとんど関係がなく、むしろ南向き電場に関係があるように見える。しかし、3 回のオーロラ X 線異常増加に対して、電場の変化がはっきり対応したのはただ一度だけで、残りの 2 回についてははっきりした対応が見られなかった。したがって、この結果から電場とオーロラ X 線の関係を詳しく議論することはむづかしい。

6. 結 論

- (1) 気球で観測した成層圏電場は真の電離層電場である。
- (2) 午後の東向きオーロラジェットを起こす地磁気サブストームに対応して、電場の値が背景値の約 10 mV/m から約 40 mV/m に増加した。
- (3) サブストーム中 3 回のオーロラ X 線の増大があり、そのうちの 1 回ははっきり南

向き電場の減少に対応したが、残りの2回についてははっきりした対応が見られなかった。

(4) 電場の方向は、はじめ14時 UT に南東方向にあり、時間とともに時計まわりに回転して23時 UT には西向きになった。このような電場の変化は、電離層における S_q^p 型によく一致する。

(5) サブストームにともなって、電場の方向に特別の変化はなかった。すなわち、サブストーム時には S_q^p 型の電場の値が増大するだけである。

(6) 磁気赤道面におけるプラズマドリフト型を求めた。これは WOLF (1975) の計算結果によく一致する。

(7) 昭和基地の磁場変化と気球で観測した電場から電気伝導度を計算し、Pedersen, Hall 伝導度ともに1-10 mho の値を得た。サブストーム時には Hall 伝導度が大きくなる。

謝 辞

気球飛揚とテレメータ受信に多大の援助をいただいた第17次南極観測隊越冬隊員の方々に深く感謝します。データ解析には主として京都大学大型計算機センターを利用した。また一部の解析には京都大学理学部地磁気世界資料解析センターを利用した。

文 献

- AGGSON, T. L. (1969) Probe measurements of electric fields in space. Atmospheric Emission, ed. by B. M. McCORMAC and A. OMHOLT. New York, Van Nostrand Reinhold, 305-316.
- ATKINSON, W., LUNDQUIST, S. and FAHLESON, U. (1971): The electric field existing at stratospheric elevations as determined by tropospheric and ionospheric boundary conditions. Pure Appl. Geophys., **84**, 46-56.
- BARCUS, J. R., BROWN, R. R., KARAS, R. H., BRØNSTAD, K., TREFALL, H., KODAMA, M. and ROSENBERG, T. J. (1973): Balloon observations of auroral-zone X-rays in conjugate regions. J Atmos. Terr. Phys., **35**, 497-511.
- BOSTROM, R. and FAHLESON, U. (1977): Vertical propagation of time-dependent electric fields in the atmosphere and ionosphere. Electrical Processes in Atmospheres, ed. by H. DOLEZALEK and R. REITER. Darmstadt, Dr. Dietrich Steinkopff, 529-535.
- BREKKE, A., DOUPNIK, J. R. and BANKS, P. M. (1974): Incoherent scatter measurements of E region conductivities and currents in the auroral zone. J. Geophys. Res., **79**, 3773-3790.
- CHOY, L. W., ARNOLDY, R. L., POTTER, W., KINTNER, P. and CAHILL, L. J., Jr. (1971) Field-aligned particle current near an auroral arc. J. Geophys. Res., **76**, 8279-8298.
- DOUPNIK, J. R., BANKS, P. M., BARON, M. J., RINO, C. L. and PETRICEKS, J. (1972): Direct measurements of plasma drift velocities at high magnetic latitudes. J. Geophys. Res., **77**, 4268-4271.
- FAIRFIELD, D. H. (1968): Average magnetic field configuration of the outer magnetosphere.

- J. Geophys. Res., **73**, 7329–7338.
- GURNETT, D. A. (1972): Electric field and plasma observations in the magnetosphere. *Critical Problems of Magnetospheric Physics*, ed. by E. R. DYER. Washington, IUCSTP Secretariat, c/o National Academy of Sciences, 123–138.
- HAERENDEL, G. (1972): Plasma drifts in the auroral ionosphere derived from barium release. *Earth's Magnetospheric Processes*, ed. by B. M. MCCORMAC. Dordrecht, D. Reidel, 246–256 (Astrophys. Space Sci. Lib., Vol. 32).
- HEPPNER, J. P. (1972): Electric fields in the magnetosphere. *Critical Problems of Magnetospheric Physics*, ed. by E. R. DYER. Washington, IUCSTP Secretariat, c/o National Academy of Sciences, 107–122.
- HOPPEL, W. A. (1971): Altitude variations in the electrical potential resulting from orographic features. *Pure Appl. Geophys.*, **84**, 57–66.
- KAMIDE, Y. and BREKKE, A. (1975): Auroral electrojet current density deduced from the Chatanika radar and from the Alaska meridian chain of magnetic observatories. *J. Geophys. Res.*, **80**, 587–594.
- MÅSEIDE, K., HOLTET, J. A., EGELAND, A. and MAYNARD, N. C. (1973): Electric field and fine structure in aurora. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **35**, 1833–1841.
- MAYNARD, N. C. (1974): Electric field measurements across the Harang discontinuity. *J. Geophys. Res.*, **79**, 4620–4631.
- MAYNARD, N. C., BAHNSEN, A., CHRISTPHERSEN, P., EGELAND, A. and LUNDIN, R. (1973): An example of anticorrelation of auroral particles and electric fields. *J. Geophys. Res.*, **78**, 3976–3980.
- MOZER, F. S. (1971): Origin and effects of electric fields during isolated magnetospheric substorms. *J. Geophys. Res.*, **76**, 7595–7608.
- MOZER, F. S. and FAHLESON, U. (1970): Parallel and perpendicular electric fields in an aurora. *Planet. Space Sci.*, **18**, 1563–1571.
- MOZER, F. S. and LUCT, P. (1974): The average auroral zone electric field. *J. Geophys. Res.*, **79**, 1001–1006.
- MOZER, F. S. and MANKA, R. H. (1971): Magnetospheric electric field properties deduced from simultaneous balloon flights. *J. Geophys. Res.*, **76**, 1697–1712.
- MOZER, F. S. and SERLIN, R. (1969): Magnetospheric electric field measurements with balloons. *J. Geophys. Res.*, **74**, 4739–4754.
- MOZER, F. S., BOGOTT, F. H. and TSURUTANI, B. (1973): Relations between ionospheric electric fields and energetic trapped and precipitating electrons. *J. Geophys. Res.*, **78**, 630–639.
- MOZER, F. S., GONZALEZ, W. D., BOGOTT, F., KELLEY, M. C. and SCHUTZ, S. (1974): High-latitude electric fields and the three-dimensional interaction between the interplanetary and terrestrial magnetic fields. *J. Geophys. Res.*, **79**, 56–63.
- NAGATA, T. and KOKUBUN, S. (1962): An additional geomagnetic daily variation field (S_q^p field) in the polar region on geomagnetically quiet day. *Rep. Ionos. Space Res. Jpn*, **16**, 256–274.
- OGAWA, T., YASUHARA, M. and HUZITA, A. (1975): Stratospheric horizontal electric fields over mountains. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **37**, 841–844.
- POTTER, W. E. (1970): Rocket measurements of auroral electric and magnetic fields. *J.*

- Geophys Res., **75**, 5415–5431.
- POTTER, W. E. and CAHILL, L. J., Jr. (1969). Electric and magnetic field measurements near an auroral electrojet. *J. Geophys. Res.*, **74**, 5159–5160.
- TANAKA, Y., OGAWA, T. and KODAMA, M. (1977a) Stratospheric electric fields and currents measured at Syowa Station, Antarctica-1. The vertical component *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 523–529.
- TANAKA, Y., OGAWA, T. and KODAMA, M. (1977b) Stratospheric electric fields and currents measured at Syowa Station, Antarctica-2 The horizontal component *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 921–925.
- WESCOTT, E. M., STOLARIK, J. D. and HEPPNER, J. P. (1969) Electric fields in the vicinity of auroral forms from motions of barium vapor releases *J. Geophys. Res.*, **74**, 3469–3487.
- WOLF, R. A. (1975) Ionosphere-magnetosphere coupling. *Space Sci. Rev.*, **17**, 537–562

(1978年6月10日受理)