

## 昭和基地における成層圏電場・電流の観測

田中良和\*・小川俊雄\*\*・小玉正弘\*\*\*

### Stratospheric Electric Fields and Currents Measured at Syowa Station, Antarctica

Yoshikazu TANAKA\*, Toshio OGAWA\*\* and Masahiro KODAMA\*\*\*

**Abstract:** The measurements of vector electric fields and currents were made with two plastic balloons of 5,000 m<sup>3</sup> launched from Syowa Station ( $L=8.4$ ), Antarctica, on 28 November and 29 December, 1972. The results give the following. (1) The vertical electric field and current at the altitude of 30 km are 0.12–0.21 V/m and  $1.3\text{--}2.2 \times 10^{-12}$  A/m<sup>2</sup> respectively, and their diurnal variations are roughly consistent with the expected variation from the average world-wide thunderstorm activity. (2) The electrical conductivities were estimated from the ratio of the electric current to the electric field giving the average value of  $1 \times 10^{-11}$  mho/m at the altitude of 30 km. This value is about twice as large as that in Japan. This can be explained by the latitudinal effect of the cosmic ray ionization in the atmosphere. (3) Enhancements of the electric field and current were observed in both vertical and horizontal components of the magnitude of about 80 mV/m and  $0.8 \times 10^{-12}$  A/m<sup>2</sup> respectively at an initial stage of a magnetic substorm. The vertical electric field on the ground was also correspondingly enhanced by about 80 V/m at the same time. (4) Comparisons of observed horizontal electric field vectors with the magnetic fields observed at Syowa Station show that the magnetic field variations are caused by the ionospheric Hall current. (5) One hour averages of the horizontal electric field show large scale convection fields consistent with  $S_q^p$  in the polar ionosphere and with  $DP-2$  in the equatorial magnetosphere. The average ionospheric and magnetospheric equatorial

---

\* 京都大学理学部付属火山研究施設. Volcanological Laboratory, Kyoto University, Aso, Kumamoto 869-14.

\*\* 京都大学理学部地球物理学教室. Geophysical Institute, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606.

\*\*\* 理化学研究所. Institute of Physical and Chemical Research, 7-13, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

electric fields were 40 mV/m and 0.98 mV/m respectively, and corresponding plasma convection velocities were estimated to be 700 m/s and 22 km/s respectively.

### 1. はじめに

成層圏における気球到達高度で電場を測定することには、大きくわけて2つの目的がある。1つは雷を主な発電源とする大気電場系を研究することであり、もう1つは電離圏・磁気圏におけるプラズマ運動を主な発電源とするスペース電場系を研究することである。すなわち、成層圏内の電場を形成しているものに、対流圏起源のものと、電離圏・磁気圏起源のものがある。前者においては電離層が大地に対して約 300 kV の電位をもち、雷発電源より十分遠いところで垂直下方を向く電場を与える。後者は太陽・太陰ダイナモ電場  $S_q$  および  $L$ 、極域対流電場  $S_q^p$ 、オーロラ電場  $DP-1$ 、磁気圏対流電場  $DP-2$  等の電場を含むスペース電場系で水平方向に数 10 kV の電位を有し、電離層内に水平電場をつくる(OBAYASHI and NISHIDA, 1968).

極域における成層圏電場を観測することは、オーロラ嵐の機構や磁気圏内対流を研究する上で重要である。このような研究は北半球高緯度における MOZER 等の観測によって発展させられた (e.g. MOZER and SERLIN, 1969; MOZER and MANKA, 1971)。高緯度においては磁気圏内電場が電気伝導度のよい磁力線方向に伝ばんし、磁気圏対流や極磁気嵐に関連して数 10 mV/m の強い電場を電離層に作る。これら電離層水平電場は波長が電離層の高さに比べて十分長いのでほとんど減衰することなく気球高度にまで伝ばんする (BOSTRÖM and FAHLSON, 1973)。一方、雷を発電源とする垂直電場は高さと共に指数関数的に減衰して 30 km の気球高度では約 0.1 V/m となる。従って電場のベクトル成分を測定することによって、これら2種類の電場を区別して研究することができるはずである。

気球による電場観測はロケット・人工衛星による直接測定に比べて次のような特徴を有する。ロケット・人工衛星は高速で地球磁場を横切るために  $V \times B$  ( $V$  は飛しょう速度,  $B$  は磁束密度) の起電力を同時に観測し、かつ場所的にも時間的にも比較的短い範囲の測定値が観測されるのに対して、気球観測では、時間的に周期 1 秒以上、場所的には 100 km 以上の大規模平均電場が観測され、かつ 24 時間以上にわたって連続測定を行うことができる。

筆者等のうちの小川・田中は 1966 年以來、太洋村、原町、三陸においていくつかの気球実験を行って、電場、電流、電気伝導度の高度分布と、成層圏一定高度におけるそれらの時

間の変動を研究してきた。今回昭和基地において、はじめて成層圏電場の観測を行うことができたのは、これらの実験経験に基づくものである。以下に第13次南極観測隊によって行われた実験装置の概要と、1972年11月、12月の実験結果について報告する。

## 2. 観測装置

観測に用いた装置は、直径2mm長さ10mの導電ワイヤ5本をセンサーとしたアンテナ系で、図1の如く配列されている。この電場・電流計は気球の帯電の影響をさけるため、5,000 m<sup>3</sup>のプラスチック気球の下100mのところにつるされた。垂直電場測定には、上部アンテナと水平アンテナN間の電位差を測定し、水平電場測定には、NとSアンテナおよびEとWアンテナ間の電位差を測定した。電流測定には各アンテナ対を $5 \times 10^9 \Omega$ の抵抗と800 pFの静電容量で短絡した際に流れる電流を測定した。このときアンテナに有限の電流が流れて空間の電場にゆがみを生じるため、同時に2成分を測定することは不可能であるから、モーター式切換器により、時分割を行って順次測定する方法を採用している。

アンテナの特性は等価的に図2で示される。 $r_0, c_0$ はアンテナ間の等価的な抵抗および静電容量で、大気の電気伝導度を $\sigma$ 、誘電率を $\epsilon_0$ とすると $c_0 r_0 = \epsilon_0 / \sigma$ の関係がある。 $R, C$ を電位計の入力抵抗および容量とし、 $E$ を電場の強さ、 $h_{eff}$ をアンテナの実効高とすると、アンテナの開放端起電圧は $V_0 = E h_{eff} \cos \theta$  ( $\theta$ は電場とアンテナのなす角度) とな

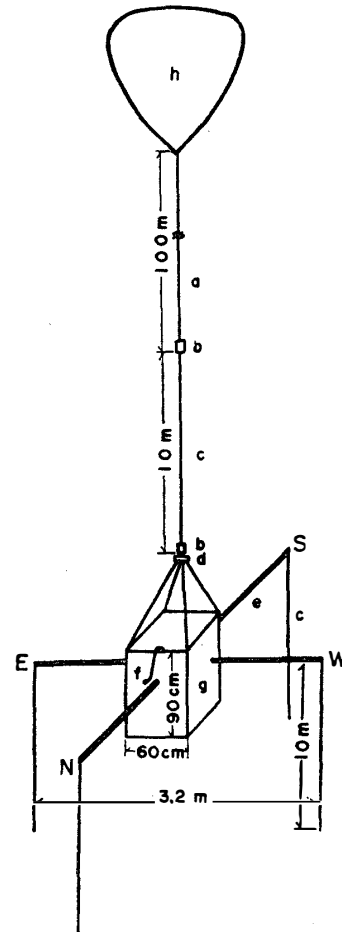


図1 成層圏電場・電流測定装置

a: ナイロンロープ (4 mm $\phi$ ), b: テフロン絶縁材, c: スチールワイヤアンテナ (2 mm $\phi$ ), d: レベル調節装置, e: アルミニウムパイプ (20 mm $\phi$ ), f: サーミスタ温度計, g: 発泡スチロール (10 cm 厚), h: プラスチック気球 (5,000 m<sup>3</sup>)

Fig. 1. Measuring system of electric field and current in the stratosphere.

a: Nylon rope (4 mm $\phi$ ), b: Teflon insulator, c: Steel-wire antenna (2 mm $\phi$ ), d: Level adjuster, e: Aluminum pipe (20 mm $\phi$ ), f: Thermistor, g: Styloform (10 cm thick), h: Plastic balloon (5,000 m<sup>3</sup>).

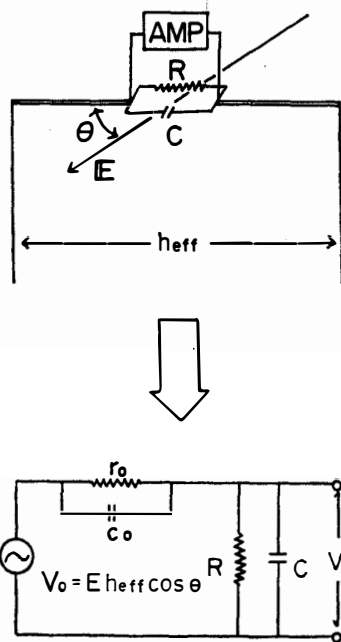
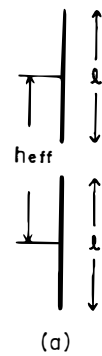
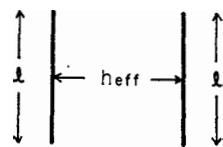


図 2 アンテナ等価回路

Fig. 2. Equivalent circuit of the antenna.



(a)



(b)

図 3 平行線アンテナ

(a) 垂直成分用アンテナ

(b) 水平成分用アンテナ

Fig. 3. Parallel wire antennas.

(a) Antenna for vertical component.

(b) Antenna for horizontal component.

り、 $R \gg r_0, C \ll c_0$  の場合、電位計端子電圧は  $V = V_0$  となる。同時搭載の地磁気方位計との比較から  $\theta$  がわかれば、 $h_{eff}$  で除して電場の方向と大きさを知ることができる。一方  $R \ll r_0$  のときは短絡電流として、 $I = V_0/Z_0$  が得られる。 $Z_0$  はアンテナの内部インピーダンスで、時間的にゆるやかな変化場に対しては容量は問題とならず、 $I = V_0/r_0$  すなわち  $r_0 = V_0/I$  となるから、 $c_0$  が既知であれば大気電気伝導度は、 $\sigma = (\epsilon_0/c_0)(I/V_0)$  の関係から求めることができる。また、電流密度は  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$  であるから、 $I = (c_0/\epsilon_0)j \cos \theta h_{eff} = Aj \cos \theta$  となり、有効面積  $A$  は  $(c_0/\epsilon_0)h_{eff}$  で与えられる。従って  $c_0$  と  $h_{eff}$  が与えられれば有効面積がわかる。アンテナの容量はアンテナが簡単な形状をしている場合は計算ができる。平行線状の時には垂直アンテナ (図 3 (a)) の場合、 $c_0 \approx \pi \epsilon_0 l / \ln(l / \sqrt{3} a)$  (ただし半径  $a$  と上下のアンテナ間隔は長さ  $l$  に較べて十分小さい)、水平アンテナ (図 3 (b)) の場合には  $c_0 \approx \pi \epsilon_0 l / \ln(h_{eff} / a)$  (但し  $a$  および  $h_{eff}$  は  $l$  に較べて十分小さい) となる。今回実験に用いた直径 2 mm 長さ 10 m のアンテナについて、容量および有効面積はそれぞれ、上下アンテナで 32.1 pF, 36.3 m<sup>2</sup>, 水平アンテナで 17.2 pF, 6.23 m<sup>2</sup> である。

搭載された装置には上述のアンテナ系に付属する高入力前置増幅器、主増幅器、N アンテナの向きを知るためのフラックスゲート型磁力計、アンテナが水平面内にあることを確

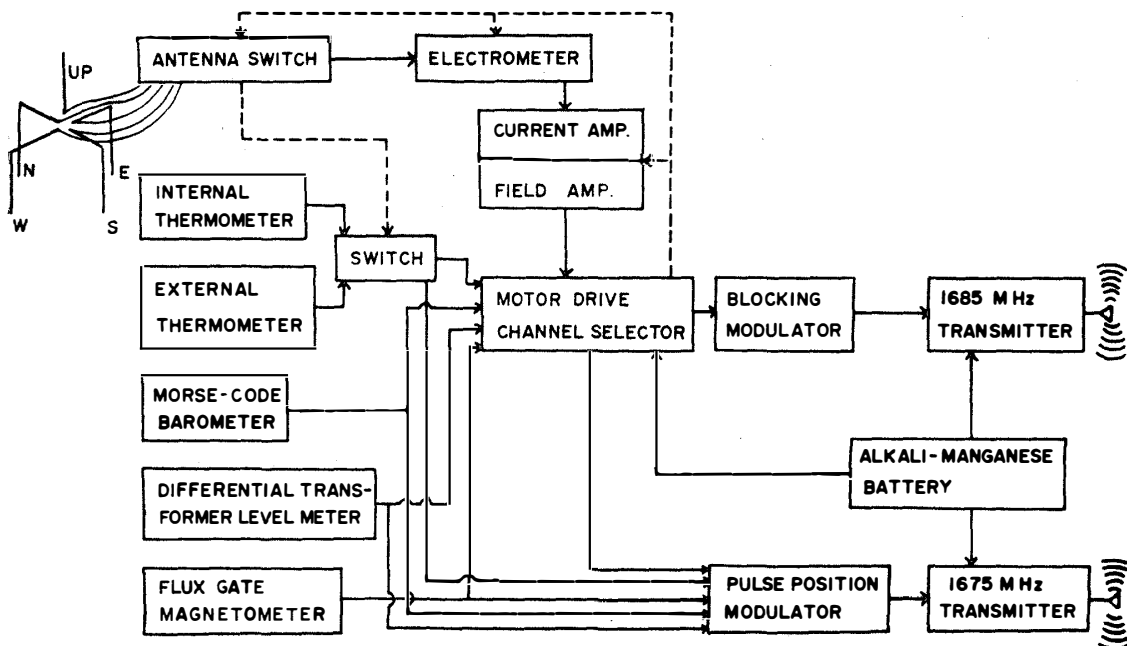


図 4 電場・電流測定装置のブロックダイアグラム

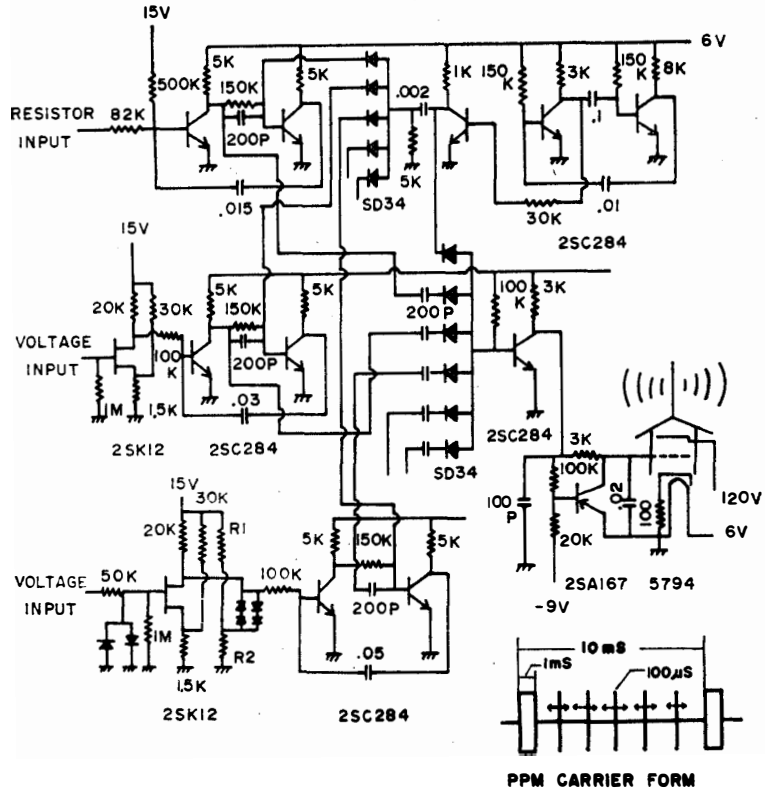
Fig. 4. Block diagram of electric field and current measuring system.

認する傾斜計，気圧高度計，気温と測器内温度測定用サーミスタ，変調型送信器，および可充電式アルカリマンガン電池を用いた電源とモーター式切換器がある。これらの装置は保温のため厚さ 10 cm の発泡スチロールでおおった。測器の総重量は 32 kg であり，電力的には連続 48 時間の観測が可能である。これらのブロックダイアグラムを図 4 に示した。1,685 MHz のブロッキング変調波はおもに気象ゾンデ用受信機で受信したが，補助として微少電力の 5 チャンネル PPM 送信機を付加し，1,675 MHz で同時送信させ，ロケット用受信機で受信した。この付加装置を図 5 に示す。これにより，電場，温度，気圧，方位，傾斜をそれぞれ連続送信することができた。図 6 は本機の総合結線図である。この回路図からわかるように，アンテナが非平衡入力であるため生じるオフセット電圧を検知するため，1 サイクルごとにアンテナを入れかえてその差を求めるように考慮した。

### 3. 観 測

実験に先だって気象衛星 ESSA からの雲写真を検討して，基地周辺に雲がなく，地上風 3 m 以下の日であって，かつ夜に入って極磁気嵐発生の可能性のある日を選定したため，それぞれ一週間の待機をおこなった。海氷が厚かったため，放球は障害物の少ない観測棟東方 500 m の海氷上で行った。

(a) 変調器  
(a) Modulator.



(b) 復調器  
(b) Demodulator.

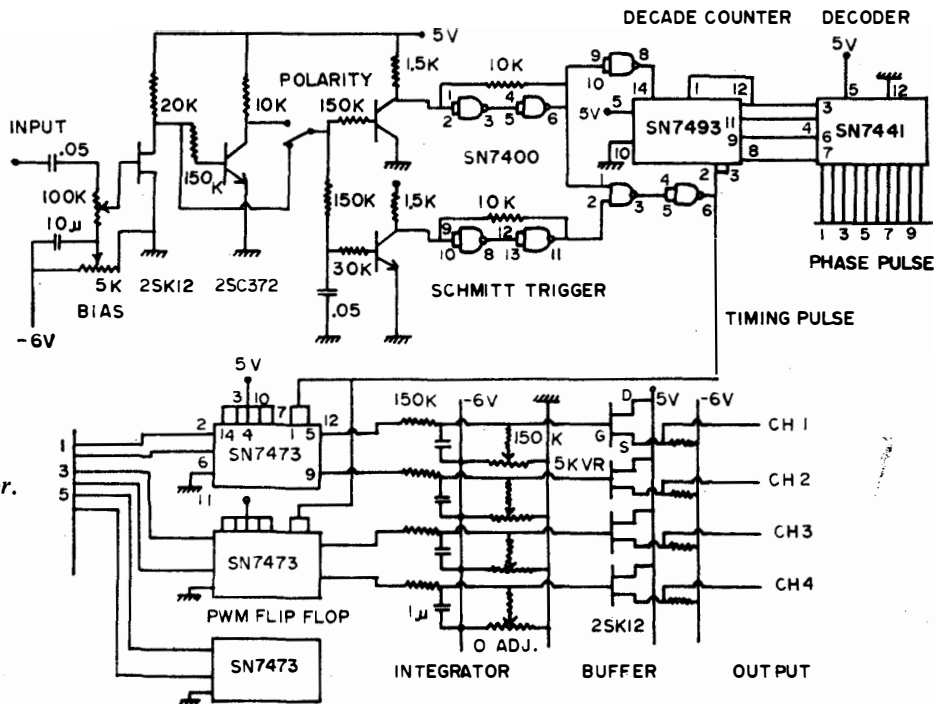
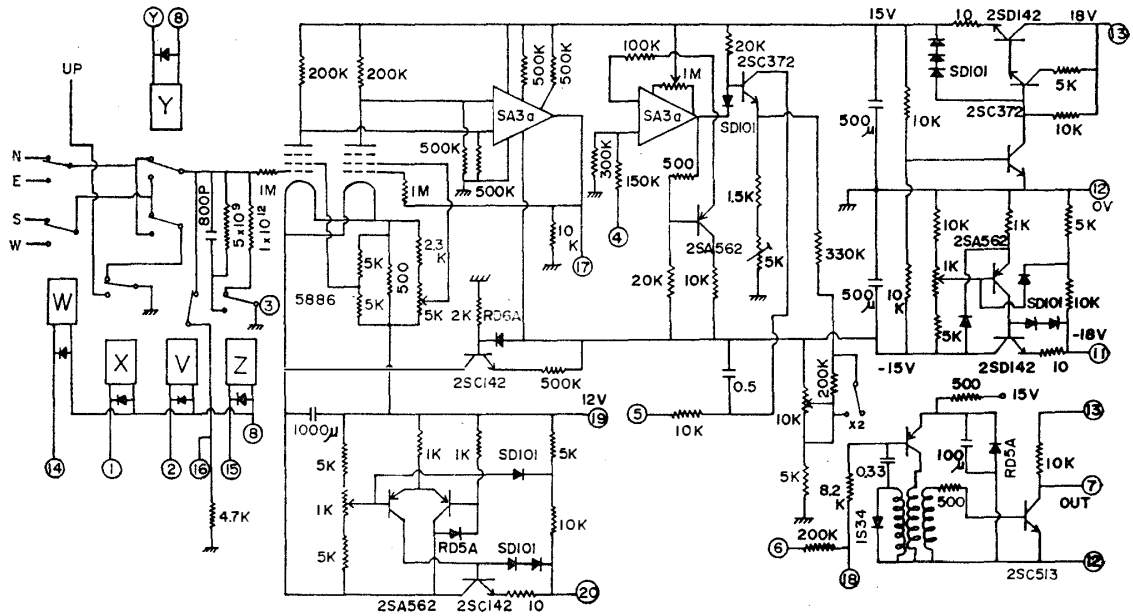


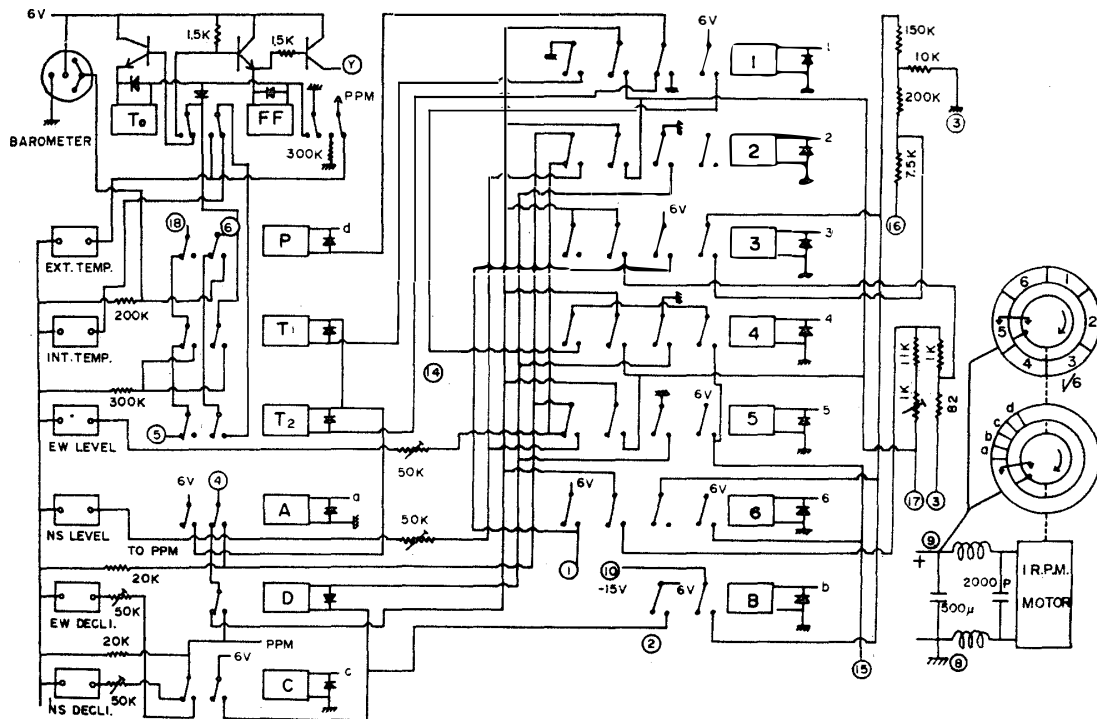
図 5 PPM 変調・復調器の回路図

Fig. 5. Circuits of PPM modulator and demodulator.



(a) 電場・電流測定用エレクトロメータ回路

(a) Electrometer circuit for electric field and current antennas.



(b) モータ駆動式チャンネル切換器回路

(b) Circuit of motor-driven channel switch.

図 6 測定装置の総合回路

Fig. 6. Synthetic circuits of measuring system.

B<sub>5</sub>-13 は 1972 年 11 月 28 日 15 時 40 分 UT, B<sub>5</sub>-14 は 12 月 29 日 14 時 37 分 UT に 77 m<sup>3</sup> の He ガスを充てんして放球した。放球時にアンテナを損傷させないため、測器は高さ約 1 m の台に載せた。100 m のナイロンロープは補助気球で垂直につり上げ、20 m 高の測風塔の風向、風速から測器とランチャー間位置の決定を行って垂直に浮上させることができた。

気球上昇曲線を図 7 に示す。気球は毎分 250~260 m のほぼ一定速度で上昇し、120~130 分後にレベルフライトに入った。気球の航跡は図 8 に示す。B<sub>5</sub>-13 は下層で南から東方に流

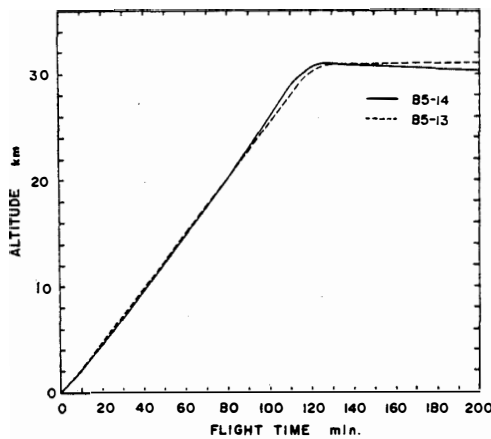


図 7 気球上昇曲線

Fig. 7. Time profiles of balloon heights.

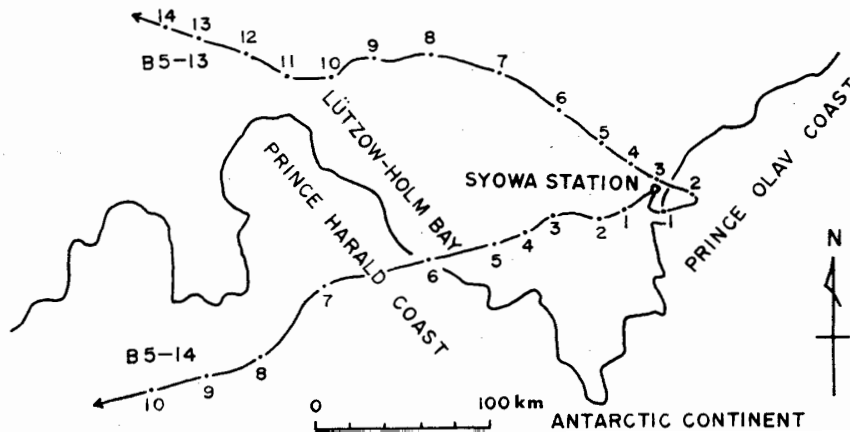


図 8 気球航跡図。航跡に沿う数字は気球放球後の時間を示す。

Fig. 8. Balloon trajectories. Numbers attached to the trajectories give the elapsed time in hours after launching.

れ、高度 31 km でレベルフライトに入ってから北西または西北西に平均 7.7 m/s で飛しょうした。B<sub>5</sub>-14 は平均 8.7 m/s の風によって西南西に流れ、リュツォ・ホルム湾を横切ってプリンスハラルド海岸に上陸し、陸氷上を飛んで 24 時間にわたってデータを伝送したが、アンテナ方位計に異常を生じ、水平電場の方向を求めることはできなかった。また、B<sub>5</sub>-14 は気球飛揚後 125 分で高度 31 km に達した後、徐々に高度を下げ 300 分以後には 28~29 km



の高度で浮遊し、1,200分から急速に降下した(図12参照)。B<sub>5</sub>-13は上昇中1~2分周期で回転し、レベルフライトに入ってから約6分周期で反時計まわりに、ほぼ一定の自転を続けた。気球と測器は直径4mmのナイロンロープで接続されているので数回以上のねじれは時間と共に解除されてしまう。従ってこの回転は気球下部が、らせん状にねじれ、そこに上下風が作用したか、あるいは気球が平均風からスリップして生じたものと推察される。

#### 4. 観測結果と議論

##### 4.1. 垂直電場・電流の高度分布

気球上昇中に得られた垂直電場・電流の高度分布を図9に示す。電気伝導度は電流と電場の比から計算した。この図から、電気伝導度は2回の観測でほぼ一致し、日本における観測値より約2倍大きく(小川他, 1969), 30kmの高度で $1.0 \times 10^{-11}$  mho/mであることがわかる。これは高緯度における宇宙線による電離が日本の緯度に比べて約5倍大きく(NEHER, 1967), 電気伝導度はその平方根として効くことで説明される。また、上昇につれて電場・電流ともにB<sub>5</sub>-13の場合がB<sub>5</sub>-14の場合より大きくなっている。これらに対応して昭和基地における地上電場も図10に示す如く11月28日の場合が12月29日の場合より大きく、値は時間とともに増大している。このように地上と成層圏で同時に電場が増大していることから、この原因は電離層電位の時間的変化によるものであると推定される。

このことをもう少し詳しく検討してみると、B<sub>5</sub>-13での電場・電流の増加の原因になり得るものとして、気球航路下の地形の影響、全地球上の雷活動の増大、およびオ

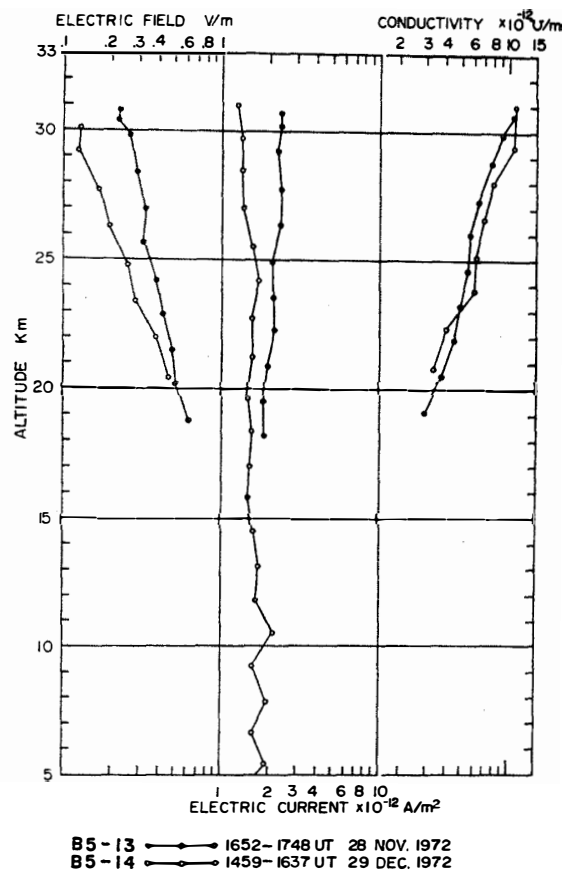


図9 垂直電場・電流・伝導度の高度分布。伝導度は電流と電場の比から求めた。

Fig. 9. Altitude profiles of the vertical electric fields, currents and conductivities. Conductivities were calculated from the ratio of the current to the electric field.

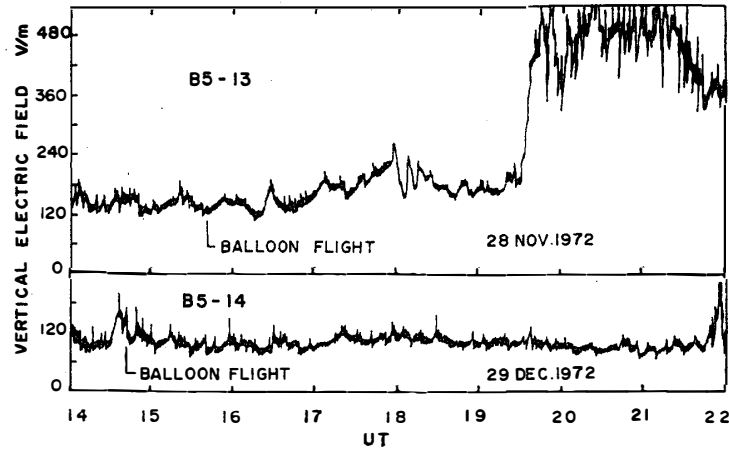


図 10 気球放球前後の昭和基地における地上電場の記録. 11月28日19時30分以後のじょう乱はカタバティック風によるものである.

*Fig. 10. Vertical electric fields measured on the ground before and after the balloon launching at Syowa Station. Sudden increase at 1930 UT and succeeding disturbances on 28 Nov. 1972 were caused by the katabatic wind.*

オーロラサブストームに伴う電場の増大等が考えられる。まず第1の地形の影響については、航路下の大陸沿岸の地形は十分ゆるやかで、観測された40%に及ぶ電場・電流の増大を説明することはできない。第2に、雷活動は空電強度を増加させることになるので、昭和基地における4~40 Hzのシューマン共振帯の電界強度の記録を検討したが、そのような増大は見られなかった。第3のオーロラサブストームの影響については、11月28日17時55分UT頃に極磁気嵐が発生して(図13参照)、地上電場に極めて特徴的な準正弦波状の電場変化が存在し、気球高度でも同様の変化(図11参照)が見られることから、B5-13における電場の増加はオーロラ嵐によって生じたものであると考えられる。

OLSON (1971) はミネソタでの地上電場の観測結果に基づいてオーロラ時に生じた電場変化の数例を示し、主としてコロナ状のオーロラの時に、負の強い変化があると述べている。一方LOBODIN and PARAMONOV (1972) は両半球での地上電場とオーロラの相関の統計から、オーロラは北半球では負の空間電荷として作用し、南半球に対しては正の空間電荷として働くという結果を得た。そしてこの影響はオーロラ出現の前後2~3時間持続して、平均変化量で35%に達するという今回の観測結果に類似した報告をしている。

#### 4.2. 垂直電場・電流・伝導度の時間変化

図11は水平飛行中の垂直電場・電流の時間変化を示したものである。同図に静穏日電場の日変化を与える原因と考えられている世界雷活動の積分領域 (Handbook of Geophysics,

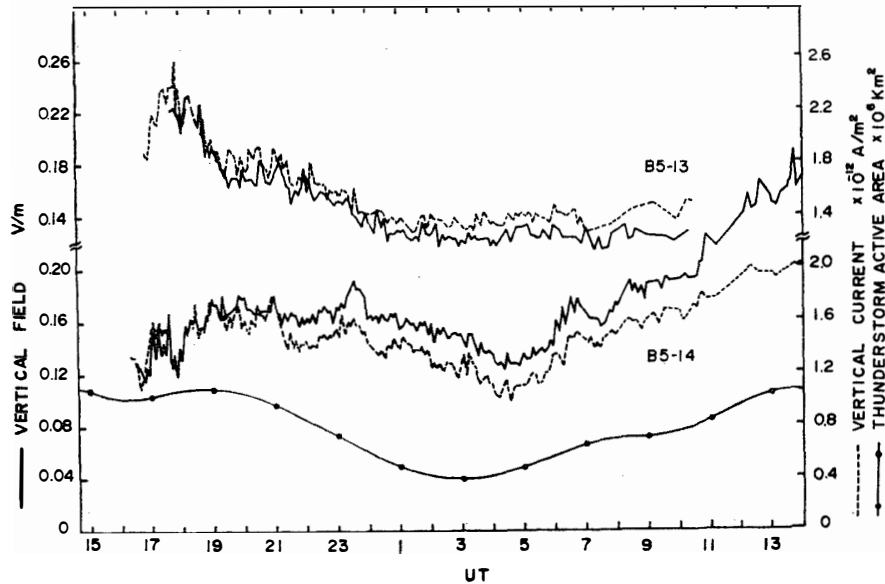


図 11 水平飛しょう中の垂直電場・電流および仮想的雷活動地域の時間変化

Fig. 11. Time variations of vertical electric fields and currents during the level flights.

A time variation of estimated world wide thunderstorm active area is also shown.

1960) を描いてある。これと電場・電流を比較すると、3カ所に大きなずれの部分が見つかる。第1は B<sub>5</sub>-13 における 18 時 UT 前後の部分、第2、第3は B<sub>5</sub>-14 の 17 時 UT 前後と 10 時 UT 以降の部分である。第1については電場・電流ともに増大しており、これは前述のごとく、オーロラ嵐によって引き起されたものと考えられる。第3について電場が電流増加率よりずっと大きくなっているのは、気球高度が時間とともに変っていることによると解釈される。図9からわかるように電流は高度とともに変化しないが、電場は電気伝導度と逆関係で高度とともに指数関数的に減少する。B<sub>5</sub>-14 の飛しょう末期では気球は 27 km 以下に下がっているから、当初の 31 km に比べて値が約 1.6 倍になる。図9の垂直分布を用いて B<sub>5</sub>-14 の電場の値を 30 km での値に換算すると電流の変化とよく一致する。また B<sub>5</sub>-14 飛しょう末期の垂直電流の増加は、世界雷活動領域の日変化より約 40% 大きい。これは B<sub>5</sub>-14 が飛しょう末期に大陸内部に向かって飛んだため、地形効果によって電流密度が徐々に増加したのと考えられる。気球航跡下の大陸内部には 1~2 km の高度をもつ大陸氷があり、これによって電気伝導度の低い最下層大気が切りとられたこととなり、これによって気柱抵抗が約 40% 低下していることになる。第2の減少の原因についてはまだ検討中である。

結局、図 11 の垂直電流の時間変化は前述の部分を除いて汎世界的雷活動領域の時間変化とほぼ一致し、極域においても垂直電場・電流の日変化は主として雷を発電源とする電流に

より生じていると考えられる。

図 12 は電気伝導度の時間変化と気球高度を示したものである。B<sub>5</sub>-13 は 31 km の一定高度で水平浮遊していて  $1.0\sim 1.2\times 10^{-11}$  mho/m の値を示し、著しい日変化はない。一方 B<sub>5</sub>-14 では時間とともに減少してゆくが、これは先にも述べたように気球の降下によるものである。これを 30 km の高度での値に換算すれば  $1.0\times 10^{-11}$  mho/m  $\pm 20\%$  をうる。

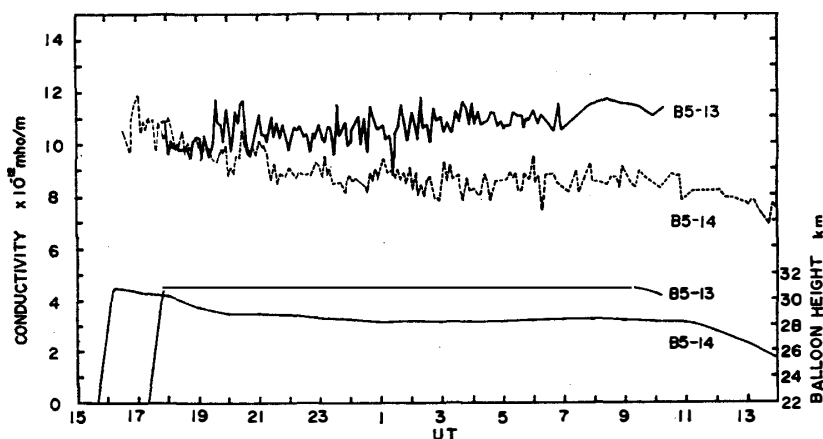


図 12 水平飛しょう中の電気伝導度と気球高度の時間変化。伝導度は電流・電場の比から計算した。

Fig. 12. Time variations of electric conductivities and balloon heights. Conductivities were calculated from the ratio of the current to the field.

図 10 において地上の電場が 11 月 28 日 19 時 30 分頃から急上昇している。これはカタバティック風（冷却寒気流が内陸部から大陸斜面に沿って吹き下ろし、地上数 10 m 位までに雪片を飛ばす）の影響によるものであるが、この効果は気球高度では全く見られない。

#### 4.3. 水平電場・電流の時間変化

B<sub>5</sub>-13 においては水平電場用のエレクトロメータの感度をフルスケール  $\pm 50$  mV に設定したが、記録はほとんどスケール外に出てしまった。そこで水平電場は、観測された電流値と垂直電流・電場の比によって決まる電気伝導度を用いて求めた。

図 13 は水平飛しょう中の水平全電流の向きと強さ、および北向き、東向きの各成分の強さを昭和基地での磁場変化とともに示したものである。磁場の基線は 1972 年 8 月から 11 月までの極めて静穏な 15 日間の各時間の平均値である。電流ベクトルの向きは地磁気座標でとっており、 $0^\circ$  方向は地理的に  $-45^\circ$  に対応する。気球の回転につれて、ワイヤ・アンテナが短周期で振動したので、個々の方位の精度はほぼ  $\pm 45^\circ$  である。推定誤差を細い垂直

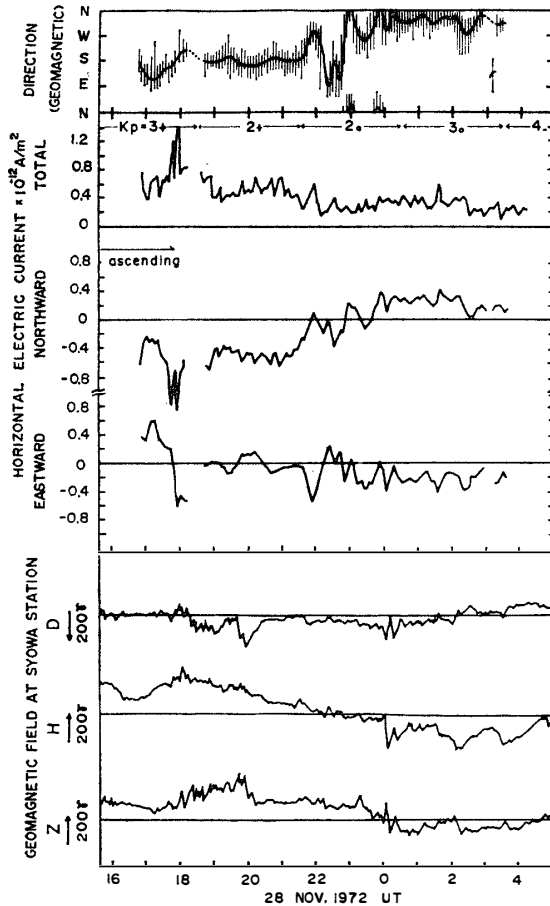


図 13 B<sub>5</sub>-13 で観測された水平飛しょう中の水平電流ベクトルと昭和基地における地磁気変化の時間変化。電流ベクトルの方向には地磁気座標を用いた。マグネットグラム中の基線は静穏時の平均レベルを示す。

Fig. 13. Time variations of horizontal electric currents observed with B<sub>5</sub>-13 and geomagnetic fields at Syowa Station. Geomagnetic coordinate is used for the direction of current vector. The base lines in the magnetogram were taken to fit average quiet time level.

線で示した。

電流変化を磁場変化と比較してみると、18時 UT 付近の磁気じょう乱の発生に対応して強い極向き電流の増大が見られる。さらに20時と0時頃の磁場変化に対応してそれぞれ電流にも変化があるように見える。

つぎに長周期変化に着目してみると、時間経過とともに徐々に減少しており、これを電場の値に換算すると100 mV/m から30 mV/m となる。電流の向きについてみると、夜半前はほぼ南向きで、夜半すぎには北西に向きを変えている。これを地磁気と電場の変化の関係でみると、磁場のH成分が基線より増加している23時頃までは電場の方向が南向きであり、H成分が減少に変わる0時以後は北向きの成分をもつ電場となっている。また偏角の東偏と電場の西向き成分が対応している。電場と磁場のこのような関係から、磁場変化をおこしているものは電離層 Hall 電流であると言える。

昭和基地の成層圏で観測された以上のような大規模電場から極域電離層におけるプラズマ対流パターンを求めることができる。観測された水平電場の1時間平均値と  $\mathbf{E} \times \mathbf{B} / B^2$  から計

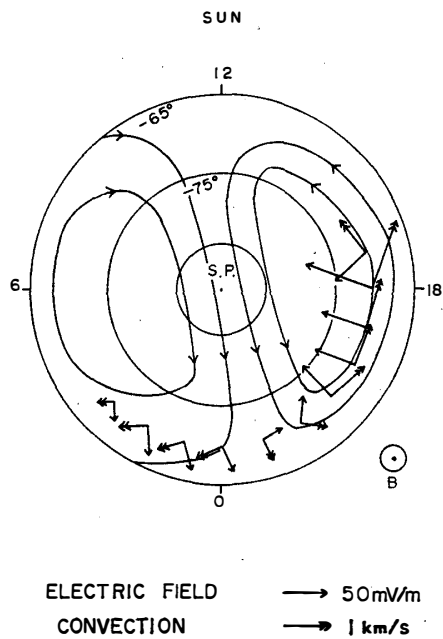


図 14 電離層に投影した1時間平均水平電場と推定されるプラズマ対流  
 Fig. 14. One hour averages of horizontal electric field and estimated plasma convection pattern in the ionosphere with the magnetic local time.

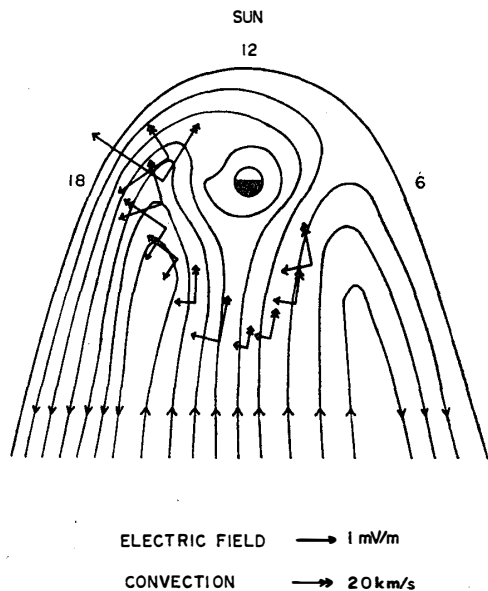


図 15 磁気赤道面に投影された1時間平均水平電場とプラズマ対流  
 Fig. 15. One hour averages of horizontal electric field mapped in the equatorial plane and estimated plasma convection pattern with the magnetic local time.

算されたドリフト速度をそれぞれベクトルの矢印で図 14 に示した。またこれから推定される対流渦を仮定して流線を描いた。データは 11 時間分しかないが、これから極域対流パターンは 23 時方向から朝夕の方向に向う 2 つの対流渦であると見る事ができ、平均電場は 40 mV/m で、平均ドリフト速度は 720 m/s となる。これは NAGATA and KOKUBUN (1962) が地上の磁場解析から求めた  $S_q^p$  場に対応するものと思われ、HEPPNER (1972), GURNETT (1972) 等による OGO-6 による観測結果と一致する。

つぎにこの電場を、完全導電性を仮定した磁力線に沿って磁気赤道面に投影することができる。昭和基地を通る磁力線について、IMP 衛星により求められた磁場モデル (FAIRFIELD, 1968) から  $L$  値を求め、ダイポール近似によって子午線方向に  $2L(L-3/4)^{1/2}$ 、東西方向に  $L^{3/2}$  の変化率 (MOZER, 1970) を用いて投影を行うと図 15 を得る。静止座標系で示すために共回転に対応する赤道向き電離層電場 7.4 mV/m を加えた。平均赤道面電場は 0.98 mV/m で、対応する対流速度は 22 km/s になる。これから磁気圏大規模対流パターンを推定して流線で示した。これは NISHIDA (1966) の対流パターンモデルと一致する。

### 5. 結 論

第 13 次南極観測隊によって行われた 2 機

の気球による成層圏電場・電流の観測から以下のことがわかった。

(1) 高度 30 km における垂直電場の値は 0.12~0.21 V/m, 垂直電流の値は  $1.3\sim 2.2\times 10^{-12}$  A/m<sup>2</sup> でそれらの日変化は平均世界雷活動の日変化によって近似的に説明できる。

(2) 高度 30 km における大気電気伝導度の値は  $1\times 10^{-11}$  mho/m で日本での観測値の約 2 倍である。これは宇宙線電離の緯度効果によって説明できる。

(3) 極磁気サブストームに対応して垂直・水平成分ともに約 80 mV/m の強い電場変化が、地上の垂直電場の変化 80 V/m とともに観測された。

(4) 観測された水平電場ベクトルの方向の変化から、地上の磁場変化が電離層 Hall 電流によることを推定した。

(5) 観測された水平電場の 1 時間平均値から推定した大規模電場は  $S_q^p$  および DP-2 の電場系と矛盾しない。電場の値は電離層で平均 40 mV/m, 磁気赤道面で平均 0.98 mV/m で、対応するプラズマ対流速度は電離層で 720 m/s, 磁気赤道面で 22 km/s となる。

## 6. おわりに

今回の気球による電場観測の特徴は、南極地域においてはじめて、同一アンテナ系で、電場・電流・伝導度の高度プロファイルを得ることができ、また、成層圏のほぼ一定高度で垂直および水平電場の時間変動を観測することができたことである。これによって、大気電気の global circuit, 極磁気嵐,  $S_q^p$ , DP-2 電場等との関係を明らかにする緒を得ることができた。将来この種の観測が継続的に繰返されてデータが蓄積されることがのぞまれる。その際には、(1) 方位計の精度をあげて地磁気  $D_{st}$  やビルケラント電流等との関連を研究する。(2) オーロラ発光, X 線等との同時塔載観測を行う。(3) ロケットによる垂直異高度での同時観測を行う。(4) 昭和基地より約 100 km 離れた高緯度の地点で同時観測を行う。その他、(5) 電離層観測や地磁気脈動・VLF 放射観測結果等との比較から、極サブストームの総合的な研究がなされることが期待される。

おわりに、本研究の実行を可能ならしめた関係各位の努力と、川口貞男隊長をはじめとする第 13 次南極地域観測隊越冬メンバーの熱心な協力に深く感謝いたします。

## 文 献

- BOSTRÖM, R. and U. FAHLESON (1973) : Theoretical and experimental considerations behind balloon-born electric field experiments. TRITA-EPP, 73-14, Royal Inst. Tech. Stockholm, 1-16.
- 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, IUCSTP Secretariat, c/o National Academy of Sciences, Washington, 123–138.

HEPPNER, J. R. (1972) : Electric fields in the magnetosphere. *Critical Problems of Magnetospheric Physics*, ed. by E. R. DYER, IUCSTP Secretariat, c/o National Academy of Sciences, Washington, 107–122.

LOBODIN, T. V. and N. A. PARAMONOV (1972) : Variation of atmospheric electric field during aurorae. *Pure Appl. Geophys.*, **100**, 167–173.

MOZER, F. S. (1970) : Electric field mapping in the ionosphere at the equatorial plane. *Planet. Space Sci.*, **18**, 259–263.

MOZER, F. S. and R. H. MANKA (1971) : Magnetospheric electric field properties deduced from simultaneous balloon flights. *J. Geophys. Res.*, **76**, 1697–1712.

MOZER, F. S. and R. SERLIN (1969) : Magnetospheric electric field measurements with balloons. *J. Geophys. Res.*, **74**, 4739–4754.

NAGATA, T. and S. KOKUBUN (1962) : An additional geomagnetic daily variation field ( $S_q^p$ -field) in the polar region on geomagnetically quiet day. *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **16**, 256–274.

NEHER, H. V. (1967) : Cosmic-ray particles that changed from 1954 to 1958 to 1965. *J. Geophys. Res.*, **72**, 1527–1539.

NISHIDA, A. (1966) : Formation of plasmopause, or magnetospheric plasma knee, by the combined action of magnetospheric convection and plasma escape from the tail. *J. Geophys. Res.*, **71**, 5669–5679.

OBAYASHI, T. and A. NISHIDA (1968) : Large scale electric field in the magnetosphere. *Space Sci. Rev.*, **8**, 3–31.

小川俊雄・田中良和・田中耕三郎・三崎方郎・北原福二(1969): 成層圏における電場・電流・伝導度の測定. 大気球シンポジウム, 昭和44年度, 東大宇宙航空研, 142–151.

OLSON, D. E. (1971) : The evidence for auroral effects on atmospheric electricity. *Pure Appl. Geophys.*, **84**, 118–138.

U. S. AIR FORCE GEOPHYSICS DIRECTORATE (1960) : *Handbook of Geophysics*. Macmillan Company, New York.

(1975年6月19日受理)