

あけぼの衛星観測によって明らかにされた
極冠域における降下電子と電場の関係

小原隆博*・向井利典*・早川 基*・鶴田浩一郎*・松岡彩子*・西田篤弘*

Relation of Electric Field and Particle Precipitation
in the Polar Cap Region Inferred from Akebono ObservationsTakahiro OBARA*, Toshifumi MUKAI*, Hajime HAYAKAWA*,
Koichiro TSURUDA*, Ayako MATSUOKA* and Atsuhiko NISHIDA*

Abstract : Akebono (EXOS-D) observations revealed that an electric field in the polar cap region was very irregular and an entire polar cap region was filled with many electron precipitation spikes when the interplanetary magnetic field (IMF) was directed northward. It was also found that the variation of the electric field was dominantly seen in the dawn-to-dusk (E_y) component while less variation was observed in the noon-midnight (E_x) component. Most electron precipitations were found in a region where a $\text{div}E$ was negative. The integrated energy flux of the precipitating electrons was in the range from 0.01 ($\text{erg}/\text{cm}^2\text{s}$) to 1 ($\text{erg}/\text{cm}^2\text{s}$), which can produce auroral luminosity in the polar cap region. Though we have no simultaneous image data right now, it is likely that Akebono traversed multiple sun-aligned arcs.

要旨 : 惑星間磁場 (IMF) が北向きになると、極冠域の対流電場が乱れ、微細な構造を持つことが、「あけぼの」搭載の電場観測装置 (EFD) による観測の結果、明らかになった。一方、これまでの研究で、低いエネルギーを持った電子が、IMF が北向きになると、極冠域にスパイク的に出現することが判明している。そこで、電子の降下領域と電場の関係を調べた結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 電子は、電場の収束域 ($\text{div}E < 0$ の領域) に見られる。
- (2) 電場の変化は、 Y 方向 (dawn to dusk 方向) に大きく、 X 方向 (noon-midnight 方向) に小さい。
- (3) エネルギーフラックスは $0.01 \sim 1 \text{ erg}/\text{cm}^2\text{s}$ に及ぶ。

以上のことから、multiple sun-aligned arcs と呼ばれている現象を、「あけぼの」は観測している可能性が大きいものと思われる。

1. はじめに

極冠域の磁力線はオープンになっていて惑星間空間の磁力線につながっていると言われている。これを示す観測事実としてポーラーレインの IMF の X 成分依存性 (MIZERA and FENNELL, 1978) や、極冠域対流の IMF の Y 成分依存性など、例は多い。しかし、

* 文部省宇宙科学研究所, The Institute of Space and Astronautical Science, 1-1, Yoshinodai 3-chome, Sagami-hara 229.

これらは IMF が南向きの時に顕著であり、北向き IMF 時の極冠域については、この種の報告が少ない。

北向き IMF 時に見られる興味ある現象に、トランスポラーアークがあるが、その成因については、プラズマシート起源 (FRANK *et al.*, 1986; OBARA *et al.*, 1988) と、マントル起源 (GUSSENHOVEN and MULLEN, 1989) の両方があり、それぞれアークの磁力線はクローズ、オープンと考えている。しかし、出現の頻度を見るとこれらは非常に少なく、数%程度である (ISMAIL *et al.*, 1977)。確率的に 50 %ある北向き IMF 時には、極冠域はどうなっているのだろうか。これに対して HARDY (1984) は、北向き IMF 時に低い温度 (<50 eV) の電子が大きなフラックスを持って、極冠域に降下してくることを報告している。降下電子の温度から、マグネトシースがソースとして考えられるが、粒子を降らすメカニズムについては述べられていない。これは、粒子のみの観測であったため、電場との対応などについて調べられていないことによる。また、緯度も 85° 以上と極端に極軸に近い領域のみを対象にしていたため、例えば IMF の Y 成分による分布の (朝方あるいは夕方側への) 偏りと言った問題についても触れていない。

1989年2月22日、第12号科学衛星「あけぼの (EXOS-D)」が極域の諸現象の解明のために打ちあげられた (TSURUDA and OYA, 1991)。衛星の遠地点、近地点は、それぞれ、10500 km, 275 km で、軌道傾斜角は 75° である。大きな軌道傾斜角を持つことにより、極冠域 (オーロラオーバルで囲まれた領域) の諸現象の観測が可能になる。本研究の目的は、これまで詳細に調べられていなかった極冠域電場の微細構造と電子降下の関係を、「あけぼの」搭載の電場計測器 (EFD) と粒子計測器 (LEP) の観測データに基づき明らかにすることにある。粒子観測器 (LEP) は、16 keV までのエネルギーの電子とイオンを観測する (MUKAI *et al.*, 1990)。電場観測器 (EFD) は、tip-to-tip 60 m のアンテナ 2 対を用いて電場の各成分を計測する (HAYAKAWA *et al.*, 1990)。ここでは、LEP, EFD の 8 秒値データを用いて解析を行った。

2. 極冠域降下電子の出現特性

「あけぼの」に搭載された粒子計測器 (LEP) の観測結果を図 1 に示す。E-t ダイアグラムの形で示されているが、上 3 パネルが電子、下 3 パネルがイオンで、それぞれピッチ角でソートされている。衛星は dusk-to-dawn のパスで極冠域を横切った。注目したことは、85° を越えるような非常に緯度の高い領域で、スパイク状の降下電子を観測していることである。非常にしばしば「あけぼの」は、極冠域でこのようなスパイク状の降下電子を観測している。スパイクの幅を統計すると、ほとんどは 100 km 以下であるが、幅の広い (>150 km) スパイクもわずかではあるが、観測されている。また、電子のフラックスはポーラーレインに比べ一桁以上大きい。HARDY (1984) が報告しているものと同一

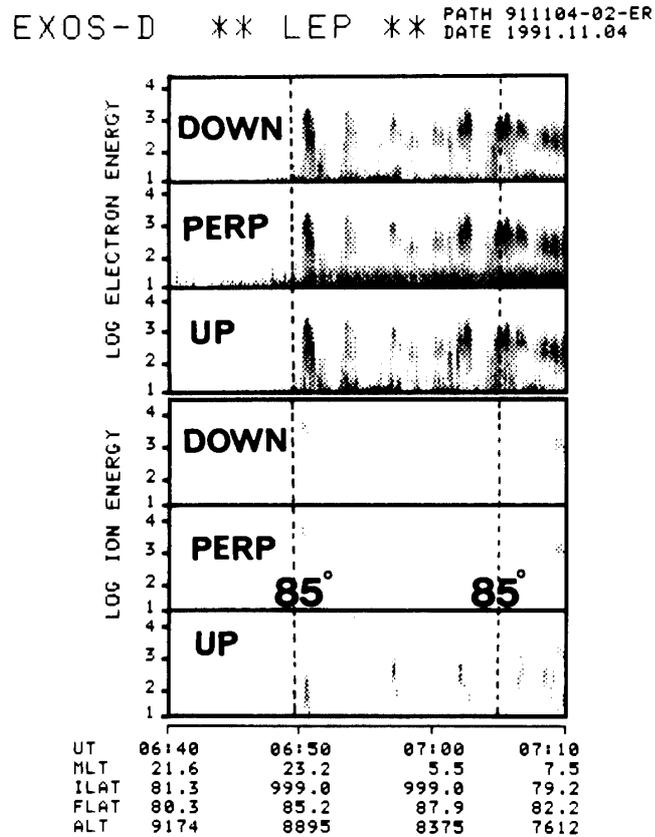


図1 「あけぼの」搭載の粒子観測装置 (LEP) によって観測されたスパイク的な電子降下の例。観測は1991年11月4日に行われた。

Fig. 1. Example of E-t diagram for the spike-like particle precipitation in the polar cap region. The top three panels are for electrons and the bottom three are for ions. They are sorted by pitch angle. Observation was made on November 4, 1991 in the northern polar region.

のものを「あけぼの」は見ていることになる。

1989年10月～1990年6月までの観測の中から、IMFのデータと比較可能な345パスについて、各成分との比較を行った結果を図2に示す。極冠域にスパイク的な降下電子が見出されたパスを、塗りつぶしている。注目したいことは、スパイクの出現がIMFのZ成分に非常に強くコントロールされていることである。すなわち、IMFが北向きになると、スパイクが出現してくることである。これに対してスパイクの出現は、IMFのX、Y成分に依存しない。この結果は、HARDY (1984) の統計結果と同じである。

北半球のみについて、スパイク的な降下電子が見られた場所を、IMFのY成分の正負で分けてプロットした(図3)。これを見ると、Y成分によるdawn側やdusk側への偏りは無く、広く一様に出現していることが分かる。また、「あけぼの」は北と南の極冠域を1時間30分程度の間隔で交互に観測するが、スパイクは北南共に現れていた。

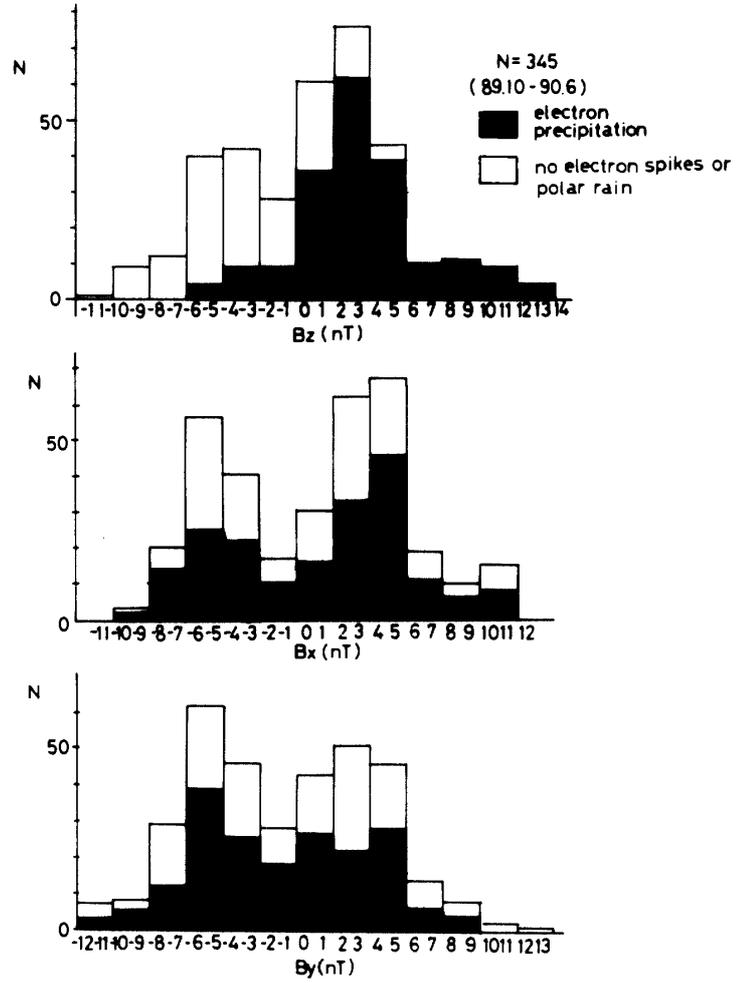


図2 スパイク的な降下電子出現の IMF 三成分に対する依存性. Z 成分が正になると, スパイク的な降下電子が出現する.

Fig. 2. Histograms of number of events of the spike-like electron precipitation: dependence on the three IMF components.

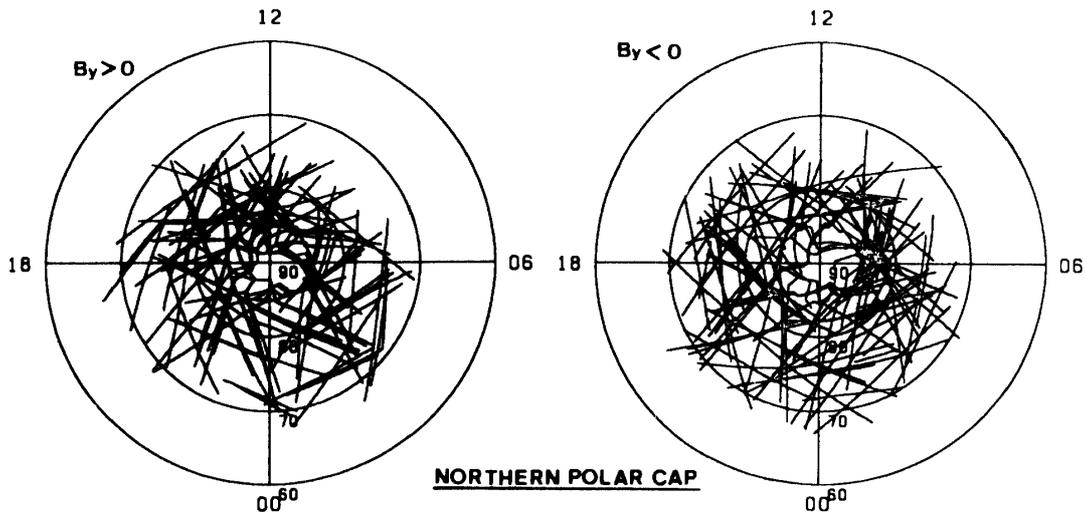


図3 IMF の Y 成分の符号で分けたスパイク的な降下電子の出現領域. Y の正負に依らず, 広く極冠域を埋めつくすように現れる.

Fig. 3. Distribution of spike-like electron precipitation in the northern polar cap region for positive B_y (left) and negative B_y (right).

3. 電場と粒子の対応

「あけぼの」搭載の電場観測器 (EFD) により得られた極冠域対流電場も、粒子同様、興味ある変化を呈している。すなわち、IMF が南向きの時は、対流は安定しているのに対し、北を向き始めると途端に乱れ始める。前説で述べた電子の降下と対応があると思われたので、比較を行った。

1989年11月26日の極冠域での観測結果について見ていく。電場のY成分 (dawn-to-dusk 成分) を図4 (上のトレンド) に、20~400 eV の電子フラックスを (下のトレンド) に示す。衛星は dawn-to-dusk に飛翔していたことから、電場のプラスの傾きが、 $\text{div}E < 0$ に対応する。粒子フラックスの増大が、電場の収束域に対応していることが判明する。

電場の divergence を評価するにあたり、Y成分のみではなくX成分も評価しなければならない。傾向をつかむ意図で、二つのケースについて解析を行った。つまり、軌道が

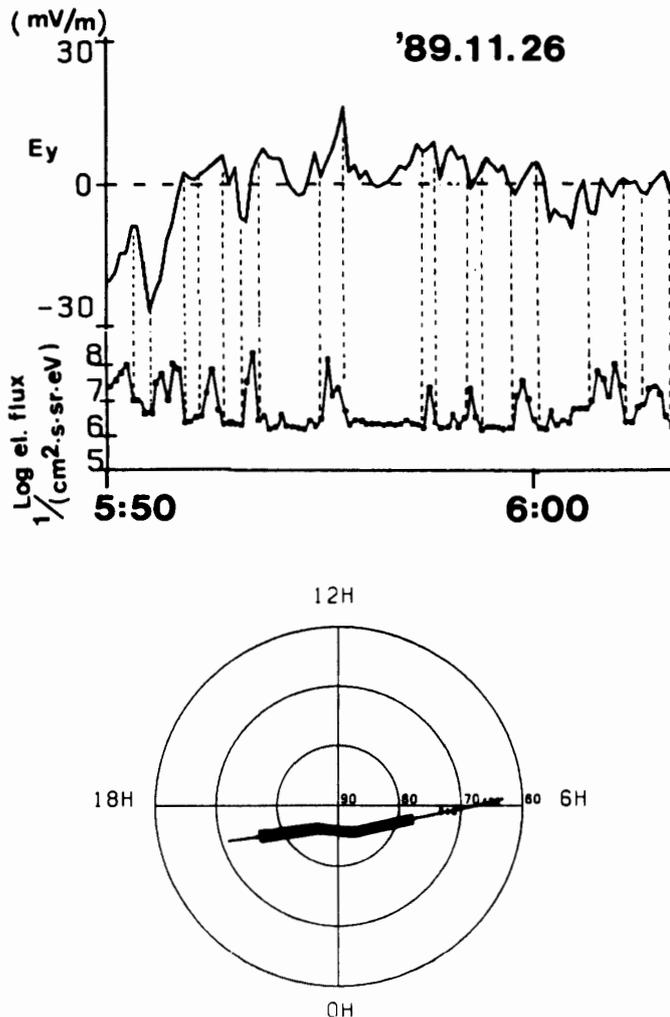


図4 電場 (Y成分) の空間変化と、降下電子フラックスの対応。傾きがプラスの所に降下電子のフラックス増加が確認される。衛星はこの時、dusk から dawn に飛翔していたので、電場 Y 成分のプラスの傾きが、 $\text{div}E < 0$ になる。

Fig. 4. Relation of E_y (duskward component of electric field in the polar cap) and electron flux for 200 eV to 400 eV range. Satellite pass was given in the bottom.

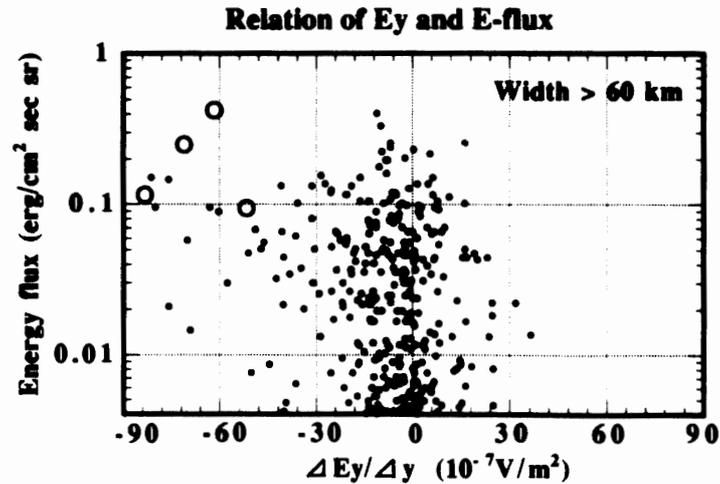


図5 Dawn-to-dusk のパスについて統計を行った結果、降下電子フラックスの増大は、 $\text{div}E < 0$ の領域に見られるようである。各ポイントは、電子フラックスの増大が空間スケールで 60 km 以上の現象について平均の値を示している。

Fig. 5. Relation of the E_y (duskward component of the electric field) and total energy flux of precipitating electrons. Note that we have plotted the case when the width of spike-like electron precipitation was more than 60 km. The sense of the gradient of E_y agrees with that of $\text{div}E$. A statistical shift can be seen with respect to the gradient; i.e. most of intense particle precipitations were seen where $\text{div}E$ was negative.

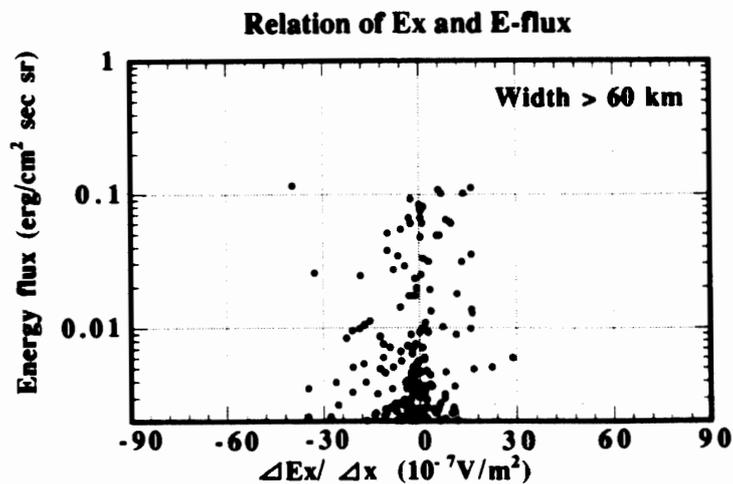


図6 図5と同じ手法を、noon-midnight のパスについて適用した。その結果、相関は見られず、電場の変化も小さい。また、大きなフラックスとの遭遇頻度も小さい。

Fig. 6. Relation of the E_x (sunward component of the electric field) and total energy flux of precipitating electrons. No correlation was seen in this case and the amplitude of the variation of the electric field seems quite small compared with that of the Y component.

dawn-to-dusk のものと noon-midnight のもの 20 数パスについて、それぞれ軌道にそっての電場の変化が、 Y 成分の、そして X 成分の空間的な傾きを与えるものとして解析を行った。まず、dawn-to-dusk のパスについての結果を、図 5 に示す。縦軸には、積分されたエネルギーフラックスを、横軸には電場 Y 成分の傾き ($\Delta E_y/\Delta y$) を示している。ここで注意したいことは、幅が 60 km 以上のスパイクについて取り扱ったことで、それぞれのデータポイントは、その領域近傍での平均的な値である。以下のことが図 5 から言える。すなわち、

(1) 電場の傾き ($\Delta E_y/\Delta y$) に対し、偏りがある。(div $E < 0$ の領域に電子降下が多い)。

(2) エネルギーフラックスは、0.1 erg/cm²s sr を越えることがある。

Noon-midnight のパスについて、電場の X 成分との対応を調べた。結果を図 6 に示すが相関は無いと言える。しかも、 Y 成分が大きくゆらいでいたのに対して、 X 成分の振幅は小さい。先の dawn-to-dusk のパスも noon-midnight のパスもパス数としてはほとんど同じだが、noon-midnight の場合には大きなフラックス域に遭遇する頻度が少ないことが同時に分かる。

4. 考 察

「あけぼの」の観測事実を再びまとめると以下ようになる。すなわち、

- (1) 電子は、電場の収束域 (すなわち、div $E < 0$ の領域) に見られる。
- (2) 電場の変化は、 Y 方向に大きく、 X 方向に小さい。
- (3) エネルギーフラックスは 0.01~1 erg/cm²s に及ぶ。

この結果および noon-midnight のパスの場合に、大きなフラックス域に遭遇する頻度が小さかった事実から、noon-midnight 方向に伸びたアークを「あけぼの」はクロスした可能性が大きい。エネルギーフラックスは時に 1 erg/cm²s に達することから、1 kR 程度の強さを持つ blue line を発することが予想される。地上のカメラの感度はおおむね 0.1 kR 程度であることから十分観測が可能である。LASSEN and DANIELSEN (1978) が、multiple sun-aligned arc 現象について報告しているが、今回の「あけぼの」観測は multiple sun-aligned arc を捉えている可能性が高いものと思われる。

現象が、multiple sun-aligned arc を捉えたものとしても、一体この粒子はどこからやって来るかと言う問題は残る。粒子の起源を探ろうとする時、流れ (convection) の方向が手がかりを与えてくれる。冒頭に述べた通り、北向き IMF 時に極冠域に非常にはっきりと見られる現象に、transpolar arc (theta aurora) がある。FRANK *et al.* (1986) の場合、arc 中の convection は sunward であった。また、theta aurora の電子の特徴は plasma sheet あるいは plasma sheet boundary layer の電子と似ており (OBARA *et al.*,

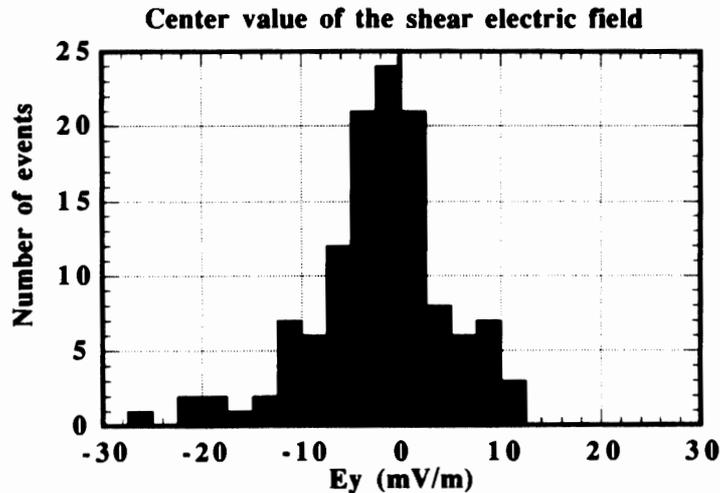


図7 スパイク域での E_y の中心値の分布。マイナス側にもプラス側にも分布が広がっており、系統的な偏りは無い。
 Fig. 7. Histograms of center value of the E_y in the spikes. There is no relation to the E_y value.

1988) plasma sheet 起源としている。今回扱ったスパイク的な降下粒子の起源に関する手がかりを得る目的で、スパイク域での電場の Y 成分 (dawn-to-dusk 成分) の中心値の分布を求めた。結果を図7に示すが、 E_y がプラスにもマイナスにも分布している。つまり、対流方向とスパイク出現の間には特別な関係が無い。このことから plasma sheet 起源を強く押すことは出来ない。

解析した例は十分な数ではないが、OBARA *et al.* (1992) はスパイク的な降下電子の温度を求めている。これによると降下電子の温度は 50 eV 程度と低く、マグネトシースの電子がソースと考えられている。本論文の図7の結果は、極冠域の磁力線がオープンになっていて、マグネトシースに到っていると言う考えと矛盾しない。つまり、IMF が北向きになると磁気圏にシアーそのものが作り出され、それがスパイク的な電子降下を起こす、と言うシナリオが考えられる。つまり、“ $\text{div}E < 0$ ”メカニズム (BURKE *et al.*, 1982) が、本質と思われる。前述の transpolar arc 現象についても OBARA *et al.* (1993) が電場と粒子の対応を調べたが、“ $\text{div}E < 0$ ”メカニズムが成り立っていた (図5中に、○印で示したのが、transpolar arc に対する粒子フラックスと電場勾配である)。

以上、本論文で “ $\text{div}E < 0$ ”メカニズムが働いていることが明らかになったが、IMF が北を向くと何故電場が乱れ始め $\text{div}E < 0$ の領域が生成されるのかについての明瞭な答えはまだ無い現状である。

謝 辞

本研究で使用したデータの一部は、南極昭和基地（国立極地研究所）にて受信したものです。関係各位のご努力に感謝致します。IMFのデータは、NASA/GSFCのLEPPING博士より提供されました。謝意を表します。

文 献

- BURKE, W.J., GUSSENHOVEN, M.S., KELLEY, M.C., HARDY, D.A. and RICH, F.J. (1982): Electric and magnetic field characteristics of discrete arcs in the polar cap. *J. Geophys. Res.*, **87**, 2431-2433.
- FRANK, L.A., CRAVEN, J.D., GURNETT, D.A., SHAWHAN, S.D., WEIMER, D.R. *et al.* (1986): The theta aurora. *J. Geophys. Res.*, **91**, 3177-3244.
- GUSSENHOVEN, M.S. and MULLEN, E.G. (1989): Simultaneous relativistic electron and auroral particle access to the polar caps during interplanetary magnetic field Bz northward: A scenario for an open field line source of auroral particles. *J. Geophys. Res.*, **94**, 17121-17132.
- HARDY, D.A. (1984): Intense fluxes of low-energy electrons at geomagnetic latitude above 85°. *J. Geophys. Res.*, **89**, 3883-3430.
- HAYAKAWA, H., OKADA, T., EJIRI, M., KADOKURA, A., KOHNO, Y. *et al.* (1990): Electric field measurement on the Akebono (EXOS-D) satellite. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **42**, 371-384.
- ISMAIL, S., WALLIS, D.D. and COGGER, L.L. (1977): Characteristics of polar cap sun-aligned arcs. *J. Geophys. Res.*, **82**, 4741-4749.
- LASSEN, K. and DANIELSEN, C. (1978): Quiet time pattern of auroral arcs for different directions of the interplanetary magnetic field in the Y-Z plane. *J. Geophys. Res.*, **83**, 5277-5284.
- MIZERA, P.F. and FENNEL, J. (1978): Satellite observation of polar magnetotail lobe and interplanetary electrons at low energies. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **16**, 147-153.
- MUKAI, T., KAYA, N., SAGAWA, E., HIRASAWA, M., MIYAKE, W. *et al.* (1990): Low energy charged particle observations in the "auroral" magnetosphere: First results from the Akebono (EXOS-D) satellite. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **42**, 479-496.
- OBARA, T., KITAYAMA, M., MUKAI, T., KAYA, N., MURPHREE, J.S. and COGGER, L.L. (1988): Simultaneous observations of sun-aligned polar cap arcs in both hemispheres by EXOS-C and Viking. *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 713-716.
- OBARA, T., MUKAI, T., HAYAKAWA, H., MACHIDA, S., TSURUDA, K. *et al.* (1992): Identification of polar cap boundary in the nightside sector. *Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys.*, **5**, 46-49.
- OBARA, T., MUKAI, T., HAYAKAWA, H., NISHIDA, A., TSURUDA, K. *et al.* (1993): Akebono (EXOS-D) observations of small-scale electromagnetic signatures relating to polar cap precipitation. *J. Geophys. Res.*, **98**, 11153-11159.
- TSURUDA, K. and OYA, H. (1991): Introduction to the EXOS-D (Akebono) project. *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 293-295.

(1994年4月8日受付; 1994年6月7日改訂稿受理)