

# 北向き惑星間磁場に伴う極域沿磁力線電流

山田雄二・竹田雅彦\*・荒木徹\*\*

(1989年11月4日受付, 1989年11月27日改訂)

## 概 要

惑星間磁場が継続的に北向きとなっていた1980年5月10日から11日にかけての極軌道人工衛星 MAGSAT の磁場データから, 新しい方法を使って定量的に極域沿磁力線電流分布を求めた. その結果リージョン1電流の高緯度側にそれと逆向きの一対の沿磁力線電流があり, その密度はリージョン1電流の2倍強の約 $2\mu\text{A}/\text{m}^2$ , 電流強度は約600~800kAであった. またこの電流によって生じる電離層電位差は約30kVと見積られた. この電位差を惑星間電場によると考えると磁気圏界面での電場侵入の東西スケールはおよそ地球半径程度と考えられる.

## 1. はじめに

Iwasaki (1971) は極冠内の地上磁場変動に, 惑星間磁場 (interplanetary magnetic field, IMF) の南北成分 ( $B_z$ ) が北向きの時に特有の擾乱が存在することを明らかにした. 地上で見られるこの磁場擾乱は午前側で反時計回り, 午後側で時計回りの一対の電離層渦電流によって説明できる (Maezawa, 1976; Levitin et al., 1982; Friis-Christensen et al., 1985). この様な電離層電流が流れていることは極域電離層に夕方側から朝側方向の電場が印加されていることを意味する. またこれに対応する沿磁力線電流 (field-aligned current, FAC) が, 午後側で磁気圏から電離層へ, 午前側で電離層から磁気圏へ向けて流れていることを示唆している. これらの電場や FAC の存在は人工衛星による電場 (Burke et al., 1979, 1984), イオンドリフト速度 (Burch et al., 1980; Banks et al., 1981; Heelis et al., 1986), 磁場 (Saflekos and Potemra, 1980; Zanetti et al., 1982, 1984; Iijima, 1983; Araki et al., 1984; Iijima et al., 1984; Iijima and Shibaji, 1987) の観測によって確認され, その形態が明らかにされつつある.

この様な電流系や大規模な電場構造は, 北向き IMF のときに特有な太陽風と地球磁気圏との相互作用によるものと考えられるが, そのメカニズムについての定量的な研究はあまり進んでいない.

---

\* 京都大学理学部地球物理学教室

\*\* 京都大学理学部地磁気世界資料解析センター

FACは電離圏と磁気圏とを電氣的に結合する役割を持っている。従って、FACの分布を調べることは、そのような相互作用のメカニズムを考えていく上で大きな手がかりとなるが、そのためにはさらに定量的にFAC分布を求め、時間変動を捕らえる必要がある。そこで我々はFACの分布を正確に求めるために、極軌道人工衛星の磁場観測データを用いる新しい方法を開発した。そして継続的にIMFが北向きであった1980年5月10日～11日のイベントに対して試験的にこの方法を用いてみた。

地上の観測所や人工衛星で観測された磁場データからFAC分布を求める方法はいくつか提案されている。特に極軌道人工衛星はFACを横切って連続的に磁場を観測できるため、磁場の変化からより直接的にFACを推定することが可能である。Zmuda and Armstrong (1974)やIijima and Potemra (1976)は極域FACを東西方向に無限に延びる鉛直シート状電流と仮定して、磁場の東西方向成分の軌道方向の勾配から軌道に沿ってのFACを求めた。またそのような操作を複数の連続した軌道について行うことによって2次元的な電流分布を求めた。彼らの方法の欠点は第一に、東西方向に延びたシート状電流を仮定しているため、FACがシート構造でない場合に分布が正確に求まらないことと、第二にこの方法では電流密度がわからないことである。一方Araki et al. (1984)やIijima and Shibaji (1987)は軌道に沿った水平磁場ベクトルを適当な格子点上に置き換え、数多くの軌道のデータの平均から2次元的な磁場分布を求め、その回転を計算することによってFAC密度分布を求めた。この方法では平均的な電流密度分布を求めることが可能であるが、有意な結果を得るには長い期間のデータが必要である。

我々の方法はこれら従来の方が持つ欠点を補い、短期間のデータによって精密にFAC分布を求めることができる。その原理を第2節で説明する。そして実際にこの方法を用いて、IMFが継続的に北向きとなっていた期間のFAC分布を求めた結果を第3節で述べる。

## 2. 解析方法

まずFAC-電離層3次元電流系(FACと、それによって電離層中に生じた電位差によって流れる電離層電流)が定常電流系であり、観測された磁場擾乱はこの電流系のみにより生じていると仮定する。FAC分布は電離層面上のある領域である直交関数系  $\{f_n\}$  により展開できるとする。すなわち

$$j(\mathbf{r}) = \sum_n a_n f_n(\mathbf{r}) \quad (1)$$

ここで  $j$  は求めようとするFAC密度分布関数であり、位置  $\mathbf{r}$  の関数である。

上記の関数  $f_n$  の表すFAC分布により生じる電離層電流分布  $i_n$  は適当な電離層電気伝導度分布を仮定すれば、電流の連続式を解くことによって求めることができる(Kamide and Matsushita, 1979)。求めるFAC分布  $j$  によって生じる未知の電離層電流分布を  $i$  とすると、(1)と同様に、

$$i(\mathbf{r}) = \sum_n a_n i_n(\mathbf{r}) \quad (2)$$

である。

さらにこの  $f_n$  と  $i_n$  が、ある位置  $\mathbf{r}_0$  につくる磁場ベクトル  $\mathbf{b}_n(\mathbf{r}_0)$  はBiot-Savartの式で計算することができる。  $j$  と  $i$  が  $\mathbf{r}_0$  につくる磁場  $\mathbf{B}(\mathbf{r}_0)$  も同様に  $\{b_n(\mathbf{r}_0)\}$  の一次結合であり、その係数は同じく  $|a_n|$  である。

$$\mathbf{B}(r_0) = \sum_n a_n \mathbf{b}_n(r_0) \quad (3)$$

この  $r_0$  を人工衛星が磁場を観測した場所とし、そこで観測された擾乱磁場を  $\mathbf{B}_0(r_0)$  とする。FACとそれによってできた電離層電流 ( $j+i$ ) とが  $\mathbf{B}_0$  をつくったとすると、 $\mathbf{B}$  と  $\mathbf{B}_0$  は一致しなければならない。従って十分多くの地点での磁場観測値  $\mathbf{B}_0$  があれば、各地点で  $\mathbf{B}$  と一致するように、係数  $|a_n|$  を最小自乗法によって決定でき、(1)からFAC分布が求まる。またこの方法では(2)から、FACによって流れる電離層電流分布（さらには電離層電位分布）も、互いに矛盾なく求めることが可能である。

今回この方法を実際に試みる上で、電離層は厚さのない球殻とし、FACはダイポール磁力線に沿って流れるとした。またFAC分布、電離層電気伝導度分布は何れも磁気赤道面に対して対称であるとした。従って電離層電流分布も自動的に磁気赤道面に対して対称となる。また電離層は緯度間隔1度、地方時間隔30分の格子点に分割して計算を行った。以上の仮定はあくまで数値計算の便宜上のものであって、将来改良することが可能であることに注意すべきである。

電離層電気伝導度分布は、International Reference Ionosphere(IRI)79モデルをもとに春分における北半球の電離層電気伝導度分布を計算し、それを90kmから400kmまで高さ方向に積分したものを南北半球が対称として用いた。FACは南北半球とも極から緯度55度までの電離層面上に流入・出するとした。その領域内で、磁気余緯度  $\theta$  と磁気地方時  $\phi$  の関数であるFAC密度分布  $j(\theta, \phi)$  を次のようにFourier-Bessel展開する。

$$j(\theta, \phi) = W(\theta) \sum_{n=0}^N \sum_{m=1}^M (C_{nm} \cos n\phi + S_{nm} \sin n\phi) J_n(\lambda_{nm} \frac{\sin \theta}{\sin \theta_0}) \quad (4)$$

$$W(\theta) = \frac{1}{2} \sqrt{1+3\cos^2 \theta} J_0(\lambda_{01} \frac{\sin \theta}{\sin \theta_0}) \quad (5)$$

ここで  $J_n$  は  $n$  次の第1種ベッセル関数、 $\lambda_{nm}$  は  $n$  次のベッセル関数の  $m$  番目の零点である。  $C_{nm}$ ,  $S_{nm}$  は求めるべき係数である。また  $\theta_0$  はFACが出入りする領域の境界の余緯度(今の場合は35度)である。以下の計算では  $N, M$  は5とした。

(4)式において、 $C_{nm}$ ,  $S_{nm}$  はどのような値でも許されるわけではない。FACの総量  $K$  は  $j$  を領域内で積分することにより得られ、

$$\begin{aligned} K &= r^2 \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\theta_0} j(\theta, \phi) \sin l \sin \theta d\theta \\ &= \pi r^2 \sin^2 \theta_0 |J_1(\lambda_{01})|^2 C_{01} \end{aligned} \quad (6)$$

であるが、 $j$  は定常電流だから、電離層に流れ込む下向き電流と、流れ出る上向き電流とが相殺する必要がある、 $K$  は0でなければならない。 $J_1(\lambda_{01})$  は0ではないから、結局(4)式には

$$C_{01} = 0 \quad (6')$$

という拘束条件がつくことになる。(4)式の右辺にかかっている  $W$  は  $K=0$  という拘束条件を(6)のように単純に表現するための緯度方向の重み関数となっている。ここで  $r$  は球殻電離層の半径、 $l$  は伏角で、ダイポール磁場のとき

$$\sin l = \frac{2\cos \theta}{\sqrt{1+3\cos^2 \theta}} \quad (7)$$

の関係がある。

## 3. 解析結果

使用したデータは1980年5月10日から11日にかけて、極軌道衛星 MAGSAT が北半球の緯度60度以北で観測した3成分磁場データ (Investigator-B) である。ISEE-3の観測によればこの期間はIMF- $B_z$ が連続して大きな正の値であった (Iijima, 1983)。この期間を前後2つに分けて、それぞれの期間について独立に解析した。表1にその時刻と、使用した磁場データ数、その期間のIMFの平均値を示す。磁場データはあらかじめモデル主磁場を差し引き、更に各々の軌道についてトレンドを除去した上で、不変磁気緯度 (invariant latitude) と地方時の座標系に変換して使用した。

前半の期間の観測磁場分布を図1に示す。MAGSATは周期90分で地上250kmから550kmの高さの極軌道を周回する。地磁気座標系でみると、その軌道は約1日の周期で昼夜方向に移動するため、連続する複数の軌道のデータから磁場の2次元的な分布がわかる。この図を見ると、一部欠測しているが、水平磁場ベクトルは昼間側の高緯度域 (80度以北) で、午後側で時計回り、午前側で反時計回りに渦状に分布していることがわかる。従ってこの図からでもこの渦の中心に、午後側で下向きの、午前側で上向きのFACが流れていることが推測される。またこの付近での磁場の鉛直成分は午後側で下向き、午前側で上向きとなっている。これは極域のFACに伴う電離層 Hall 電流によってつくられていると考えられる (Araki et al., 1984)。

この磁場データから求められたFAC密度分布 (図2) からはもっと細かい構造がわかる。図1でわかるように磁場データは昼側に偏っているため、求めたFAC分布もデータの無い夜側は意味がないので昼側だけ示す。昼側高緯度の80度付近を中心に、午後側で下向きの、午前側で上向きの一対のFACが表現されている。極域FACの密度のピークは午前側、

表1 解析した期間の時刻、データ数、求めたFACと電位差の値、太陽風のパラメータ。データ数は1成分を1個と数える。FACの密度と強度は電離層に入る方向を+とし、午前側、午後側の順に示している。太陽風パラメータは毎時平均値の期間内の最大値、最小値、括弧内に平均値を記す。

U.T.		May 10, 1980 04:15~17:34	May 10~May 11, 1980 17:54~05:59
データ数		1476	1246
極域FAC	密度 [ $\mu\text{A}/\text{m}^2$ ]	-2.1 +2.1	-2.0 +1.7
	強度 [kA]	-798 +794	-763 +611
	電位差 [kV]	29.5	31.5
リージョン1	密度 [ $\mu\text{A}/\text{m}^2$ ]	+0.9 -0.7	+0.8 -0.5
	強度 [kA]	+220 -226	+121 -11
$B_z$	(平均) [nT]	12.8-16.0(14.7)	5.8-11.0(8.7)
$V$	(平均) [km/s]	358-408 (358)	376-425 (398)
$VB_z$	(平均) [mV/m]	5.3-6.4 (5.7)	2.5-4.3(3.5)
$L$	[Re]	0.81	1.41

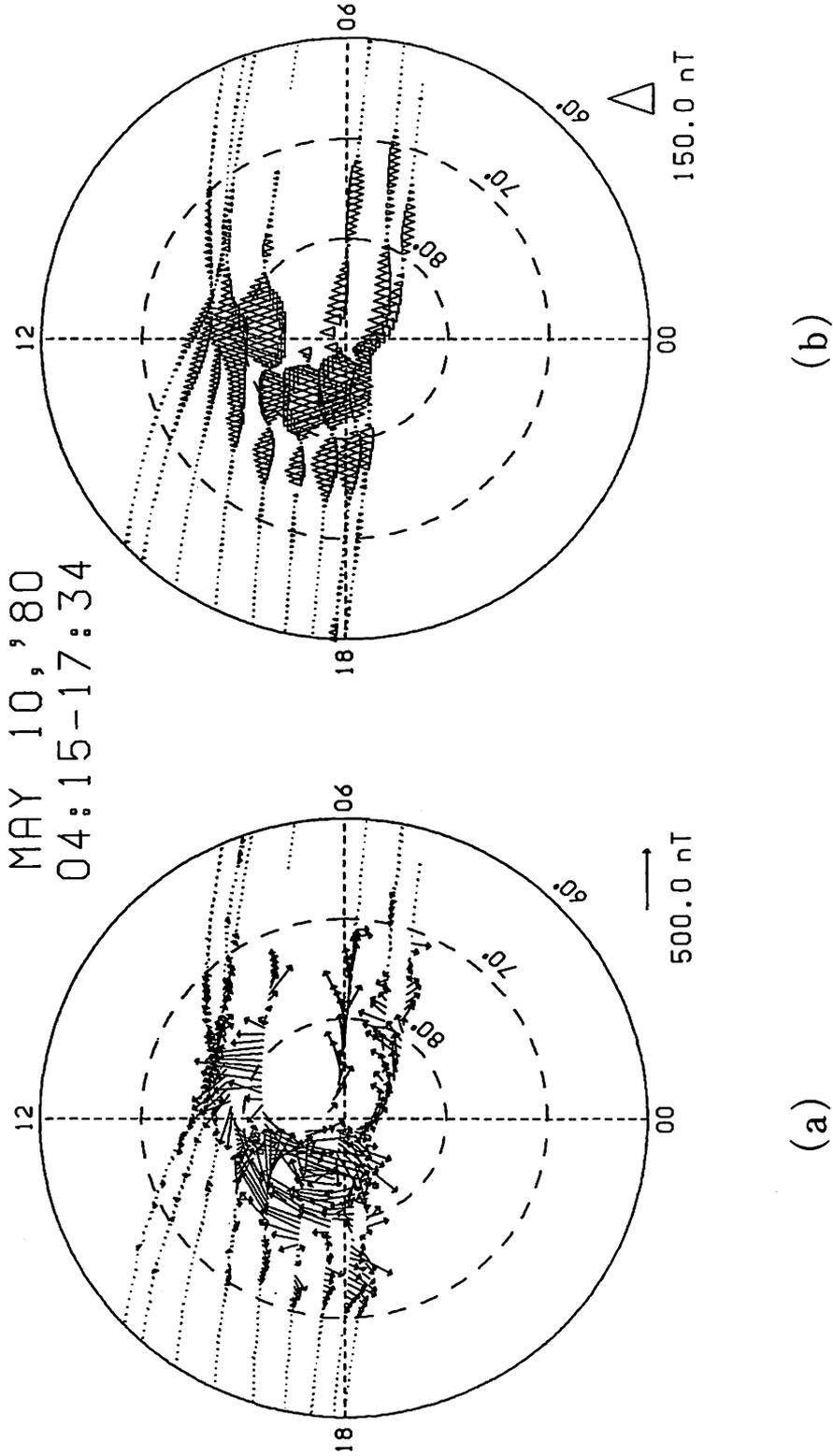


図1 1980年5月10日4時15分から17時34分(UT)に観測した水平磁場ベクトル(a)と鉛直磁場(b)の分布。最も外側の円が不変磁気緯度60度を表している。

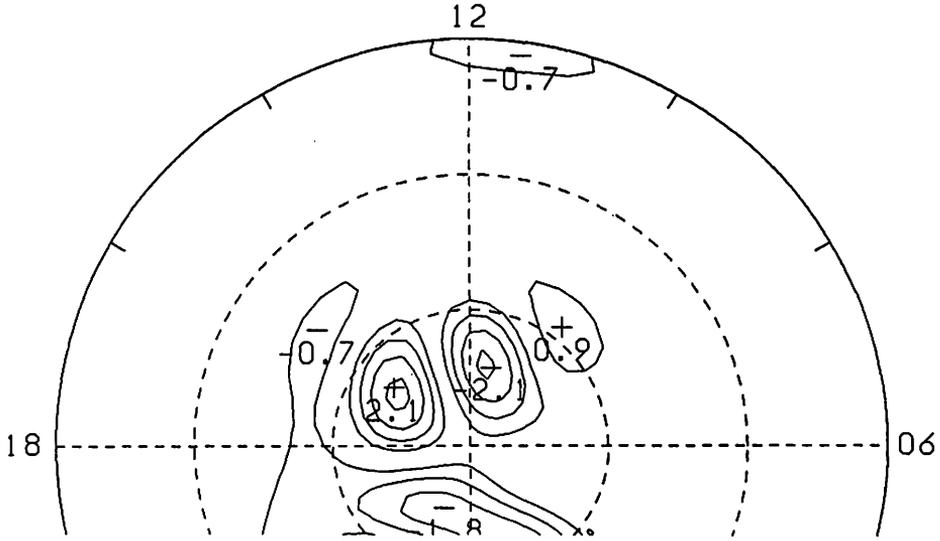


図2 図1の磁場データから求めたFAC密度分布。+は下向き、-は下向き電流の極値を示している。コンターの間隔は $0.5 \mu\text{A}/\text{m}^2$ で、見やすくするために0線は省略している。

午後側とも $2.1 \mu\text{A}/\text{m}^2$ である。その低緯度側には極域FACと逆に、午後側で上向きの、午前側で下向きのFACが見える。緯度経度分布や極性から見てこれはリージョン1電流系 (Iijima and Potemra, 1976) だと考えられる。昼側におけるその密度ピークは極域電流系の半分以下である (表1)。リージョン1電流系は統計的には東西方向に延びたシート状をしており (Iijima and Potemra, 1976)、このイベントでも午後側のリージョン1はそのような構造を示しているが、極域FACにはそのような構造はみられない。

こうして求めたFAC密度分布を積分して、電流強度を計算すると、極域電流系は午前側の下向き電流と午後側の上向き電流がいずれもおおよそ800kAでよくバランスしている (表1)。

この様な4つの部分に分かれたFAC構造は統計解析からも求まっている。Levitin et al. (1982)は重回帰分析を用いて夏期の地上磁場を解析し、北向き $B_z$ に依存するFAC分布を明らかにした。それはやはり昼間側の極域で午後側で電離層に入り、午前側に出るパターンである。(ただし彼らの結果にはリージョン1電流は現れていない。) またFriis-Christensen et al. (1985)も同様の解析を行い、 $B_z > 0$ ,  $B_y = 0$ のときの平均パターンは我々と同じ極域電流系+リージョン1であることを明らかにしている。Araki et al. (1984)やIijima and Shibaji (1987)がMAGSATの全期間のデータから求めた北向きIMFのときの平均的FAC分布も我々のものとほぼ等しい。このように半日程度のデータによる我々の結果と長期間のデータを用いた統計解析の結果が一致するという事は、我々の結果が妥当なものであることを示すと同時に、北向きIMFに伴うFACが時間とともに、その強度は変動してもパターンはあまり変化しないことを示唆する。

前節で述べたように我々の方法ではFAC分布と同時に電離層電位分布も同時に求まる。その電離層電位分布を図3aに示す。極域のFACによって電離層に電位差が生じており、その電位差は約138kVである。電位のピークの位置がFAC密度のピークよりやや夜側にずれているが、これは電離層電気伝導度が夜側から昼側に向けて大きくなっている効果に

よるものである。

我々はここでの計算に春分の電離層電気伝導度モデルを使ったが、解析期間が夏(5月)であるから、ここで得られた電位差の値はかなり大きめに見積られていると考えるべきである。そこでこの電気伝導度の違いを近似的に補正するために、春分の電離層モデルを用いて得られたFAC分布(図2)と5月の電離層電気伝導度モデルとから、Kamide and Matsushita (1979)の方法によって電離層電位分布を計算しなおしてみた。その結果(図

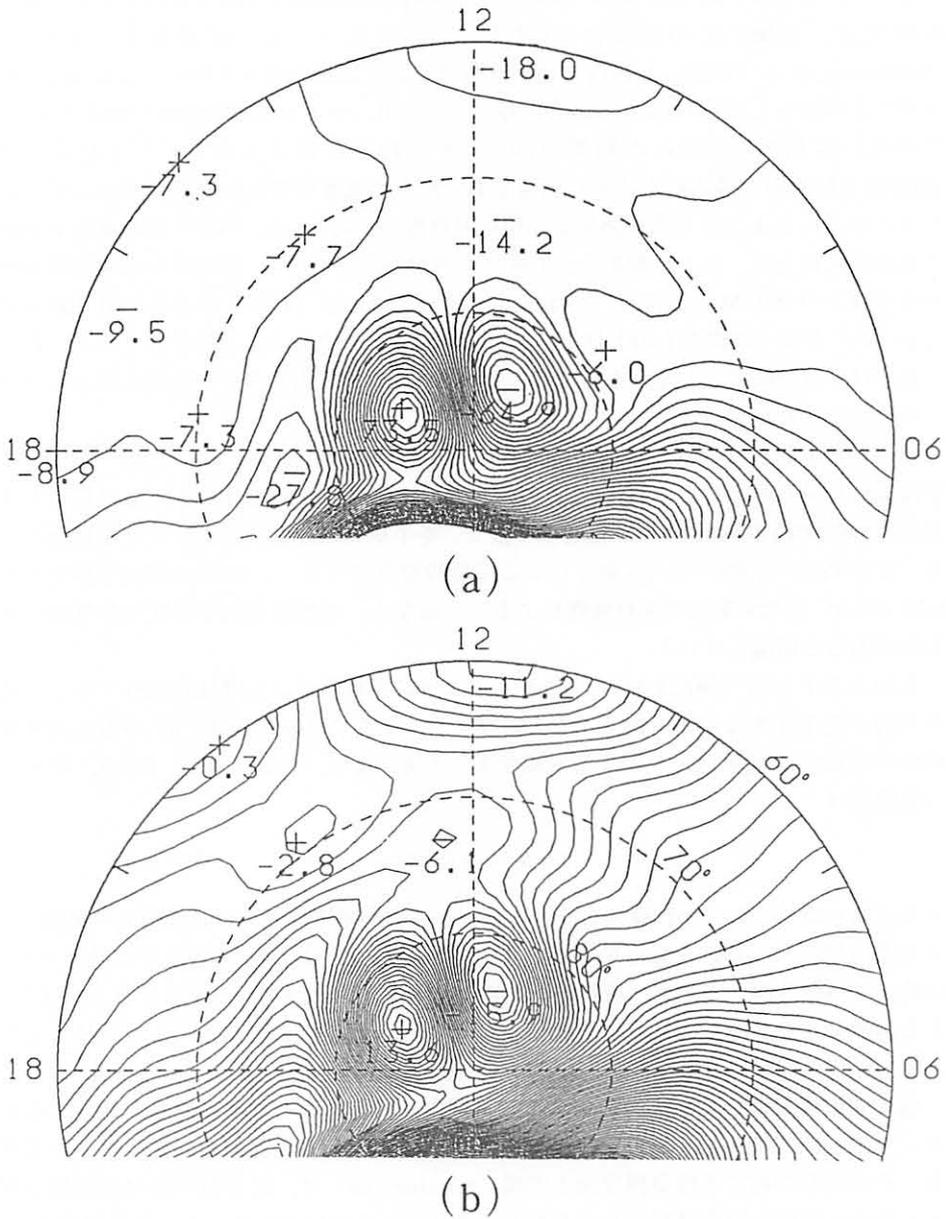


図3 (a)春分の電離層電気伝導度分布モデルを用いて図1の磁場データから求めた電離層電位分布。コンターの間隔は5kV。(b)5月の電気伝導度モデルを用いて求めた電位分布。コンターの間隔は1kV。数字は極点の電位を0としたときの電位の極値をkV単位で示している。

3 b), 極域 FAC に伴う電位差は約 30kV となった. これは Heelis et al. (1986) が人工衛星 DE2 によるイオンドリフト速度の観測からいくつかの北向き IMF のイベントについて求めた値と同程度である.

同様にして後半のデータ(図 4)から求めた FAC 分布, 電離層電位分布をそれぞれ図 5, 図 6 a, b に示す. この期間の FAC は密度, 強度共前半よりやや小さい.

これまで統計解析から得られた北向き IMF の時の FAC 密度は我々の結果と必ずしも一致しない. 例えば, Levitin et al. (1982) の 1968 年夏期の  $B_z > 0$  のときのデータの解析の結果では, 極域 FAC の密度は  $B_z \ln T$  あたり, 約  $0.04 \mu A/m^2$  である. また Friis-Christensen et al. (1985) も 1972~73 年夏期について同様の解析を行い,  $B_z = 5nT$ ,  $B_y = 0$  のときの値として約  $0.4 \mu A/m^2$  と見積もっており, いずれも我々の得た値より小さい. この違いは我々の解析した期間の IMF  $\cdot B_z$  が平均的な値より大きめだったことと, MAGSAT 期間の太陽活動が非常に活発であったため電離層電気伝導度が高かったことによると考えられる. 例えば 1968 年夏の相対黒点数が平均約 110, 1972~73 年夏が平均約 60 であるのに対して, 我々が解析した 1980 年 5 月は 180 であった. 1979 年から 80 年にかけての南半球での夏の MAGSAT データから Iijima and Shibaji (1987) が求めた値 (およそ  $2 \mu A/m^2$ ) が我々の得たものとほぼ一致していることもこのことを裏付けている. ただしこれだけで統計結果との違いを説明できるかどうかは解析方法の違いも含めてさらに詳細に吟味する必要がある.

北向き IMF に伴う FAC の強さが電離層電気伝導度に強く依存することは, この FAC に季節変化が見られることが裏付けている. Zanetti et al. (1982) や Araki et al. (1984) は, 北向き IMF の時の極域 FAC が夏半球で強く, 冬半球では非常に小さいことを指摘している. また Reiff (1982) は人工衛星による電場観測を調べて, この FAC の南半球での非対称性が FAC を流す電場の非対称性によるのではなく, 電離層電気伝導度の非対称によるものであると結論している.

北向き IMF に伴う極域 FAC の強さがこのように電離層電気伝導度に依存することは, その源が定電圧的なものであることを示唆する. そこで試みに極域 FAC の電圧源が太陽風中の IMF の Z 成分 ( $B_z$ ) による電場であると考え (Banks et al., 1984), それに伴う電位差は

$$\phi = -L(V \times B_z) \quad (8)$$

で与えられる. ここで  $\phi$  は極域にかかる朝→夕方向の電位差,  $V$  は太陽風の風速,  $L$  はその電場がかかっている東西方向の空間スケールである.  $B_z$  が正のときの電場,  $-V \times B_z$  は負 (夕→朝方向) であり, 我々が得た FAC の向きと一致する. (8) の  $V, B_z$  に ISEE-3 による観測値を代入し,  $\phi$  に我々が求めた値 ( $\sim 30kV$ ) を用いて, 逆に  $L$  を見積もると, およそ地球半径程度となる (表 1). これは地球磁気圏のスケールよりかなり小さい.

惑星間電場は開いた磁力線に沿って磁気圏内に侵入すると考えられる. 従ってそれによって磁気圏内に生じる電位差は IMF と地球磁場の結合した部分の空間スケールで定まる. その結合が起こる磁気圏界面上の線 (merging line) は,  $B_z$  が負の時は昼側磁気圏のさしわたし程度 (例えば Crooker, 1980) と考えられるのに対して, 上記の結果は  $B_z$  が正の時は負の時に比べて非常に限られた領域で磁力線の結合が起こることを示している.

このように我々の方法では, 半日程度の時間分解能で FAC や電場の変動を捕らえることが可能である. したがってさらに多くのイベントについて解析を行えば IMF と極域電

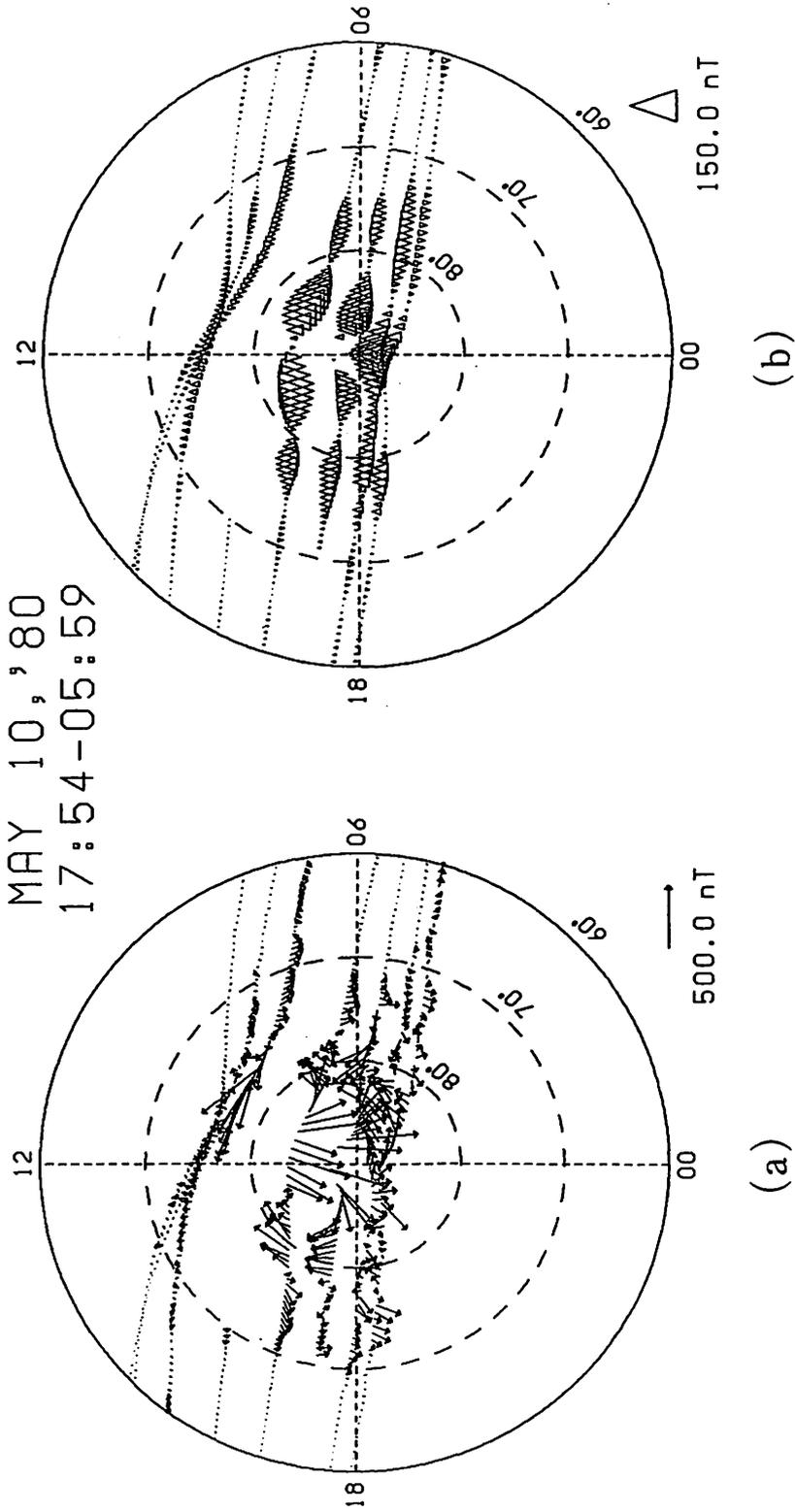


図4 図1と同様に、1980年5月10日17時54分から11日5時59分(UT)に観測した  
水平磁場ベクトル(a)と鉛直磁場(b)の分布。

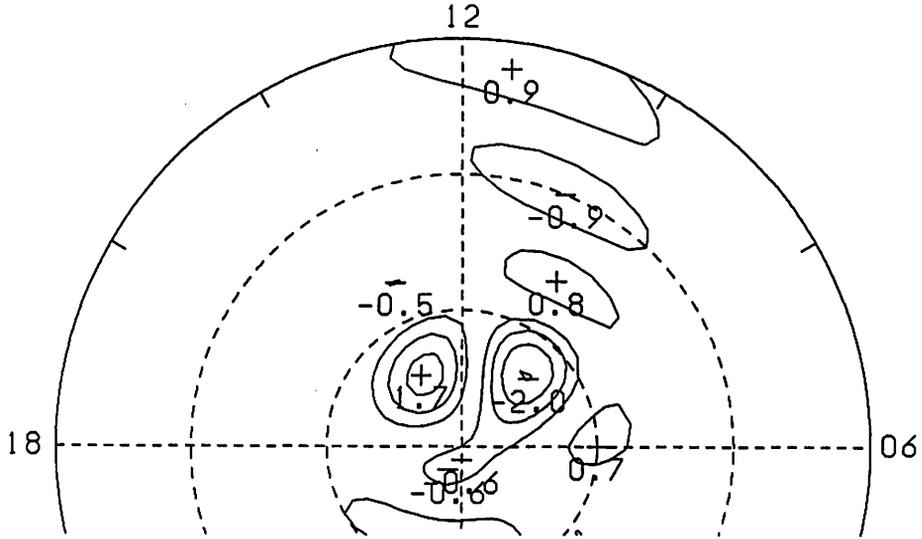


図5 図2と同様に、図4の磁場データから求めたFAC密度分布。

場・電流との関係についてのさらに定量的な議論が可能となろう。

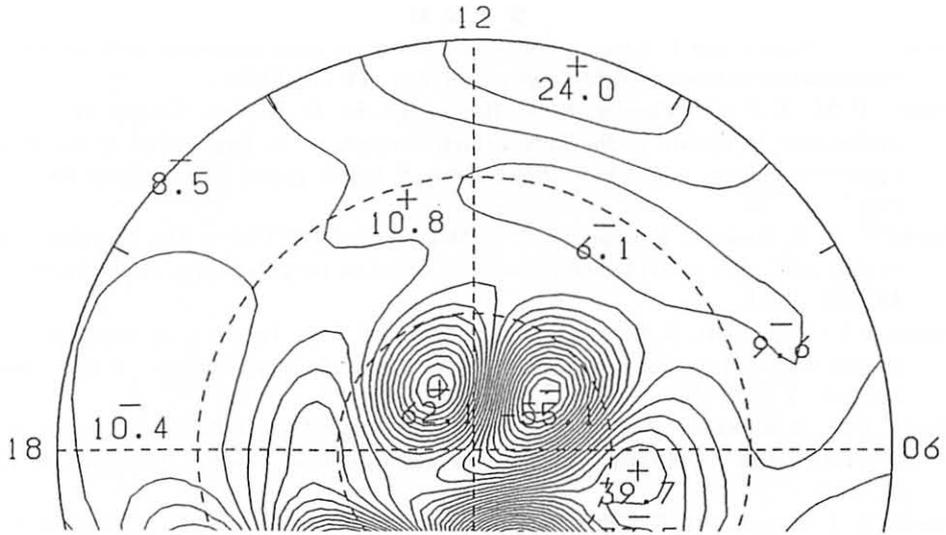
#### 4. 結 論

惑星間磁場が継続的に北向きとなっていた1980年5月10日から11日にかけての極軌道人工衛星 MAGSAT の磁場データを使って、定量的に FAC 分布を求めた。その結果次のことがわかった。

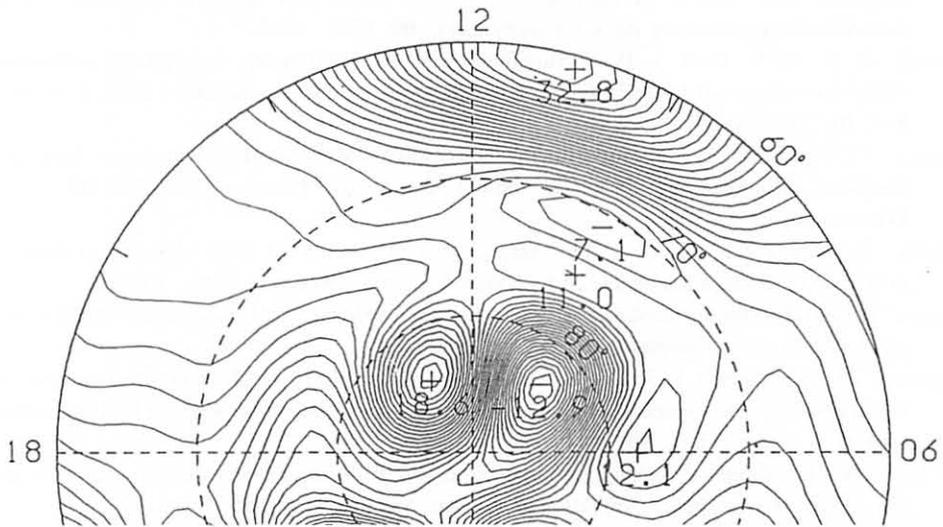
- (1) この時の昼間側極地方にはリージョン1電流とその高緯度側の別のFACとが流れていた。極域のFACは午後側で下向き、午前側で上向きで、これはリージョン1電流と逆向きである。このようなFAC分布の形はこれまでに統計解析によって得られたものとよく一致している。従って北向きIMFに伴うFAC分布の時間変化は小さいと考えられる。
- (2) 極域FACの密度ピークは上向き、下向き電流ともに約  $2 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 、電流強度は約600~800kAであった。昼間側のリージョン1電流の密度は極域FACの半分以下であった。
- (3) 求めたFAC密度の値はこれまで得られている数値より大きい。これは解析期間の  $\text{IMF} \cdot B_z$  の値が大きかったことと、電離層電気伝導度が高かったことによると思われる。
- (4) このFACによって生じる電離層電位差は約30kVとなった。この値と太陽風パラメータとから、 $\text{IMF} \cdot B_z$  によって生じる太陽風中の電場 ( $V \times B_z$ ) が地球磁気圏内に侵入する東西方向の空間スケールを求めると、およそ地球半径程度となった。

#### 謝 辞

この論文での計算は京都大学大型計算機センターのFACOM-M380/VP200を使用して行った。



(a)



(b)

図6 (a)図3(a)と同様に図4の磁場データから求めた電離層電位分布。(b)図3(b)と同様に電気伝導度の違いを補正した電位分布。

## 参考文献

- Araki, T., T. Kamei, and T. Iyemori, Polar cap vertical currents associated with northward interplanetary magnetic field, *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 23, 1984.
- Banks, P. M., J. P. St. Maurice, R. A. Heelis, and W. B. Hanson, Electric fields and electrostatic potentials in the high latitude ionosphere, in *Exploration of the Polar Upper Atmosphere*, edited by J. Holtet and C. S. Deehr, pp.281-291, D. Reidel Pub. Co., 1981.
- Banks, P. M., T. Araki, C. R. Clauer, J. P. St. Maurice, and J. C. Foster, The interplanetary electric field, cleft currents and plasma convection in the polar caps, *Planet. Space Sci.*, **32**, 1551, 1984.
- Burch, J. L., P. H. Reiff, R. W. Spiro, R. A. Heelis, and S. A. Fields, Cusp region particle precipitation and ion convection for northward interplanetary magnetic field, *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 393, 1980.
- Burke, W. J., M. C. Kelley, R. C. Sagalyn, M. Smiddy, and S. T. Lai, Polar cap electric field structures with northward interplanetary magnetic field, *Geophys. Res. Lett.*, **6**, 21, 1979.
- Burke, W. J., D. A. Hardy, F. I. Rich, R. C. Sagalyn, B. Shuman, M. Smiddy, R. Vancour, P. J. L. Wildman, M. C. Kelley, M. A. Doyle, M. S. Gussenhoven, and N. A. Saflekos, High latitude electrodynamics: observations from S3-2, *Space Sci., Rev.*, **37**, 161, 1984.
- Crooker, N. U., The half-wave rectifier response of the magnetosphere and antiparallel merging, *J. Geophys. Res.*, **85**, 575, 1980.
- Friis-Christensen, E., Y. Kamide, A. D. Richmond, and S. Matsushita, Interplanetary magnetic field control of high-latitude electric fields and currents determined from Greenland magnetometer data, *J. Geophys. Res.*, **90**, 1325, 1985.
- Heelis, R. A., P. H. Reiff, J. D. Winningham, and W. B. Hanson, Ionospheric convection signatures observed by DE2 during northward interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, **91**, 5817, 1986.
- Iijima, T., Field-aligned currents during northward IMF, in *Magnetospheric Currents*, Geophys. Monogr. Ser., vol. 28, edited by T. A. Potemra, pp. 115-122, AGU, Washington, D. C., 1983.
- Iijima, T., and T. A. Potemra, The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad, *J. Geophys. Res.*, **81**, 2165, 1976.
- Iijima, T., and T. Shibaji, Global characteristics of northward IMF-associated (NBZ) field-aligned currents, *J. Geophys. Res.*, **92**, 2408, 1987.
- Iijima, T., T. A. Potemra, L. J. Zanetti, and P. F. Bythrow, Large-scale Birkeland currents in the dayside polar region during strongly northward IMF : a new Birkeland current system, *J. Geophys. Res.*, **89**, 7441, 1984.
- Iwasaki, N., Localized abnormal geomagnetic disturbance near the geomagnetic pole and simultaneous ionospheric variation, *Rep. Ionos. Space Res. Jap.*, **25**, 163, 1971.
- Kamide, Y., and S. Matsushita, Simulation studies of ionospheric electric fields and currents in relation to field-aligned currents, 1, Quiet periods, *J. Geophys. Res.*, **84**, 4083, 1979.
- Levitin, A. E., R. G. Afonina, B. A. Belov, and Ya. I. Feldstein, Geomagnetic variation and field-aligned currents at northern high-latitudes, and their relations to the solar wind parameters, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **A304**, 253, 1982.
- Maezawa, K., Magnetospheric convection induced by the positive and negative Z components of the interplanetary magnetic field : Quantitative analysis using polar cap magnetic records, *J. Geophys. Res.*, **81**, 2289, 1976.
- Reiff, P. H., Sunward convection in both polar caps, *J. Geophys. Res.*, **87**, 5976, 1982.
- Saflekos, N. A., and T. A. Potemra, The orientation of Birkeland current sheets in the dayside polar region and its relationship to the IMF, *J. Geophys. Res.*, **85**, 1987, 1980.

- Zanetti, L. J., T. A. Potemra, J. P. Doering, J. S. Lee, J. F. Fennell, and R. A. Hoffman. Interplanetary magnetic field control of high-latitude activity on July 29, 1977. *J. Geophys. Res.*, **87**, 5963, 1982.
- Zanetti, L. J., T. A. Potemra, T. Iijima, W. Baumjohann, and P. F. Bythrow. Ionospheric and Birkeland current distributions for northward interplanetary magnetic field: inferred polar convection. *J. Geophys. Res.*, **89**, 7453, 1974.
- Zmuda, A. J., and J. C. Armstrong. The diurnal flow pattern of field-aligned currents. *J. Geophys. Res.*, **79**, 4611, 1974.

Field-Aligned Currents  
during Northward Interplanetary Magnetic Field  
by  
Yuji YAMADA, Masahiko TAKEDA, and Tohru ARAKI

**Abstract**

We propose a new method to estimate the horizontal distribution of field-aligned currents in the polar region using magnetic field perturbations observed by a polar-orbital satellite. The method is applied for data of MAGSAT on May 10-11, 1980 when the interplanetary magnetic field was successively northward. The result shows that a pair of field-aligned currents existed at the high latitude side of the Region 1 current pair and the flow direction was opposite to that of the Region 1. The current density of the additional current was about  $2 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , which was more than twice of that of the Region 1, and its total current intensity was 600-800 kA. The ionospheric potential difference induced by the polar cap current was estimated at about 30 kV, which means that a characteristic size of the merging of magnetic field lines between geomagnetic and interplanetary magnetic fields is an earth radius.