

吉備国際大学  
政策マネジメント学部研究紀要  
第3号, 31-41, 2007

## 電離圏における対流電場の過遮蔽

石川裕子<sup>1)</sup> 橋本久美子<sup>2)</sup> 菊池 崇<sup>3)</sup> 渡辺 堯<sup>1)</sup> 国武 学<sup>4)</sup> 大高一弘<sup>4)</sup>

### Overshielding of The Convection Electric Field in The Ionosphere

Ishikawa, Y., K.K. Hashimoto, T. Kikuchi,  
T. Watanabe, M. Kunitake, and K. Ohtaka

キーワード：電離圏対流、対流電場、過遮蔽、オーバーシールドイング

#### 1. 序論

##### 1. 1 磁気圏対流電場の中低緯度電離圏への侵入

太陽活動に伴う地球周辺空間の環境変動を解明する宇宙天気研究では、磁気嵐やサブストーム時の3次元電流系発達や、内部磁気圏の粒子加速などが重要な課題である。これらの課題において、磁気圏対流の内部磁気圏への侵入や、その遮蔽が重要な鍵となると考えられる。磁気圏対流を駆動する電磁エネルギーは、昼側磁気圏境界における太陽風磁場と地球磁場の相互作用によって磁気圏内に流入する(Dungy, 1961)。磁気圏対流電場は領域1沿磁力線電流を介して、極域電離圏に電磁エネルギーとともに流入し中低緯度電離圏へ侵入することが、低緯度

や赤道のレーダー観測により示されている (Kelley et al. 1979, Gonzales et al. 1979, Fejer et al. 1979など)。Kikuchi et al. (1996) は、高緯度と低緯度・磁気赤道の磁力計観測から、高緯度と昼側磁気赤道でDP2磁場変動が数十秒の精度で同時であり、極域電離圏の対流電場が、ほぼ瞬間的に赤道まで侵入することを示した。これは対流電場の発達にともない、極域から昼側赤道まで広がる電離層で電流回路が形成されることを意味し、電磁エネルギーが磁気圏から極域電離圏を経て、中低緯度まで流入していることと等価である。

中低緯度電離圏と内部磁気圏は磁力線を介して結合しているため、中低緯度に侵入した対流電場は、

1) 茨城大学大学院 理工学研究科 博士前期過程 地球生命環境科学専攻  
〒310-8512 茨城県水戸市文京2-1-1

2) 吉備国際大学 政策マネジメント学部  
〒716-8508 岡山県高梁市伊賀町8

3) 名古屋大学 太陽地球環境研究所  
〒464-8601 名古屋市千種区不老町

4) 独立行政法人情報通信研究機構  
〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1

1) *Physical Sciences, Graduate School of Science, Ibaraki University  
2-1-1 Bunkyo, Mitoshi, Ibaraki, 310-8512, Japan*

2) *School of Policy Management, Kibi International University  
8, Igamachi, Takahashi, Okayama, 716-8508, Japan*

3) *Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601, Japan*

4) *National Institute of Information and Communications Technology  
4-2-1, Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan*

内部磁気圏に伝搬することが考えられる (Kikuchi, 2005)。磁気圏衛星の電場観測により、磁気嵐時に対流電場が遮蔽されずに内部磁気圏まで侵入することが、Wilson et al. (2001), Shinbori et al. (2005) によって示された。磁気嵐時の内部磁気圏の対流電場は、放射線帯粒子の生成に重要な役割を担うと考えられる (Lyons et al., 2005) が、衛星観測による事例研究は多くはない。一方、Hashimoto et al. (2002) は電離圏対流電場が大きく変動するとき、1分以内に非対称な赤道環電流が変動することを示し、対流電場が中低緯度電離圏を経て内部磁気圏に伝播するモデルを提案した。このように、中低緯度電離圏は内部磁気圏と結合しているため、この領域の電場変動の研究が重要な意味を持つ。

## 1. 2 対流電場の遮蔽

他方、中低緯度電離圏の対流電場を考える際には、侵入のほかに遮蔽を無視することができない。対流電場の遮蔽は、領域2沿磁力線電流 (R2-FACs) の成長にともない、極域対流電場と逆向きの電場が、電離圏に印加されるために生じると、解釈される (Vasyliunas 1972, Wolf et al., 1982, Spiro et al. 1988, Kikuchi et al., 2000, 2003, Koba et al., 2000など)。極域対流電場の中緯度電離圏への侵入と遮蔽については、磁力計網観測やレーダー観測による事例研究がなされ、対流 (DP2) 電場の発達から20~30分遅れて、過遮蔽が生じる (Somajajulu et al. 1987, Kikuchi et al. 2000, Peymirat et al. 2000) ことや、過遮蔽が、午後側の磁気緯度62.5度付近より低緯度側で発生することが報告されている (Kikuchi et al. 2000)。サブストームや磁気嵐時に極域電離圏対流が発達し、その後、急激に対流が弱まると、昼側磁気赤道で対流電場の過遮蔽が生じると解釈されている (Kelley et al. 1979, Gonzales et al. 1979, Fejer et al. 1979, Kikuchi et al. 2000, Koba et al. 2000)。

また、AMIE や MTIEGCM などのモデル計算によっても、電離圏における領域1沿磁力線電流と領域2沿磁力線電流の電場ポテンシャルの競合によって、中低緯度への対流電場の侵入や遮蔽が生じることが示されている (Nopper and Carovillano 1978, Senior and Blanc 1984, Koba et al. 2000, Peymirat et al. 2000)。

本研究では、午後側のサブオーロラ帯を中心に発生する遮蔽電場を詳細に調べ、領域1沿磁力線電流の減少によるものとする、従来のモデルでは説明できない特性を持つことを明らかにした。その特性の詳細を報告し、その原因について議論する。

## 2. 解析結果

磁気圏対流電場は、極域から中低緯度、磁気赤道まで瞬間的に伝播し広がるが、サブオーロラ帯から低緯度で遮蔽されることから、本研究では極冠からオーロラ帯、サブオーロラ帯までを含む地磁気観測網である IMAGE (International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects) のデータを用いた。一般に IMF が南向きのときに磁気圏対流電場が発達するため、電離圏では極から赤道まで同時に DP2 電離層電流系が強まり、その磁場効果が磁力計で観測される。サブオーロラ帯より低緯度で対流電場の遮蔽電場が発達すると、対流電場は低緯度側で打ち消される。さらに遮蔽電場が強まり、過遮蔽が生じることもある。このような対流電場の遮蔽・過遮蔽が発生した事例を抽出するために、IMAGE 磁力計観測網データの X 成分の1日プロットで、全観測点で相関のよかった DP2 地磁気変動が、時間とともにサブオーロラ帯より低緯度で相関がなくなる現象を、「遮蔽が発生した」と定義した。2000年の1年間のデータから、31個の事例を抽出し解析を行った。本論文では、2000年2月8日1440 UT に遮蔽電場が発達した事例を、詳細に解析した結果を報告する。

2. 1 サブオーロラ帯における対流電場の遮蔽 気緯度56.9~75.3度に位置する12観測点 (表1) の IMAGE の磁気経度102.2~113.0度に沿って、磁 X 成分を図1に示す。NUR (磁気緯度56.89度) か

表1 本研究で使用した地磁気観測点一覧。磁力計観測網 IMAGE の12観測点と INTERMAGNET の4観測点の地理座標と地磁気座標。

観測所名	観測所コード	地理緯度	地理経度	磁気緯度	磁気経度
IMAGE					
Ny Ålesund	NAL	78.92	11.95	75.25	112.08
Longyearbyen	LYR	78.20	15.82	75.12	113.00
Hornsund	HOR	77.00	15.60	74.13	109.59
BearIsland	BJN	74.50	19.20	71.45	108.07
Sørøya	SOR	70.54	22.22	67.34	106.17
Masi	MAS	69.46	23.70	66.18	106.42
Kilpisjärvi	KIL	69.02	20.79	65.88	103.79
Muonio	MUO	68.02	23.53	64.72	105.22
Pello	PEL	66.90	24.08	63.55	104.92
Oulujärvi	OIJ	64.52	27.23	60.99	106.14
Hankasalmi	HAN	62.30	26.65	58.71	104.61
Nurmijärvi	NUR	60.50	24.65	56.89	102.18
INTERMAGNET					
Fredericksburg	FRD	38.20	282.63	48.40	353.38
San Juan	SJG	18.38	293.88	28.91	9.98
Ancon	ANC	-11.79	282.84	3.05	354.40
Kakioka	KAK	36.23	140.18	26.77	207.99

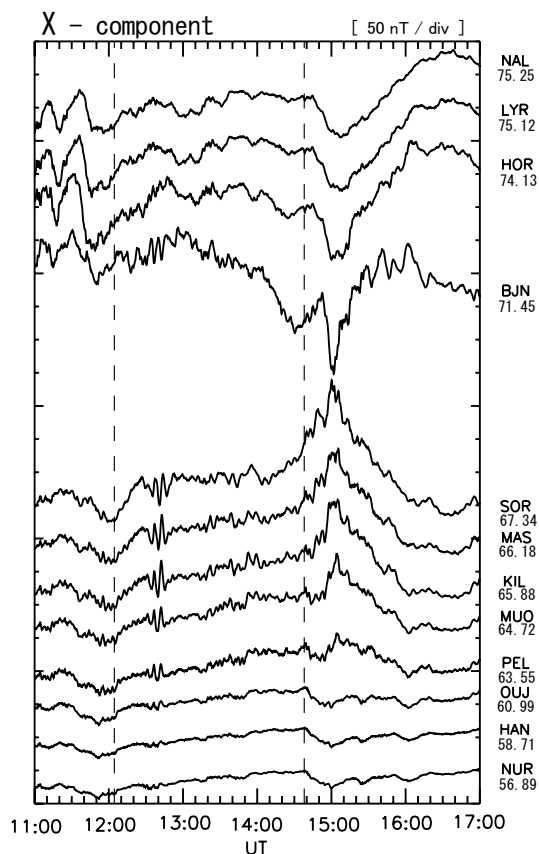


図1 IMAGE 磁力計観測網の地磁気 X 成分。1440 UT に17 MLT (磁気地方時) 付近に位置する。縦点線は DP2 磁場変動の開始時刻 (1205 UT) と、過遮蔽開始時刻 (1439 UT) を示す。

ら SOR (磁気緯度67.34度) の X 成分が1205 UT 頃に増加し始めた。観測点は1200 UT に1430 地磁気地方時 (MLT) に位置し、午後側の東向きオーロラジェット電流が強まったことを示す。同時に極冠側の BJJ (磁気緯度71.45度) から NAL (磁気緯度75.25度) の地磁気 X 成分が減少していることから、午後側の DP 2 電流セルが発達したことがわかる。

このとき ACE 衛星が観測した太陽風磁場 (IMF) と太陽風速度、密度を図 2 に示す。IMF Bz 成分は 0835 UT に +3 nT から -2 nT に変動した後、約 6 時間にわたり 0 ~ -3.5 nT の弱い南向きで推移した。1400 UT 頃から負の Bz 値はゆっくりと減少し、1440 UT 以降は 0 ~ +1 nT になった。一方 IMF By 成分は、1035 UT から 1600 UT 頃まで -2.5 ~ -3.5 nT で安定していた。このように弱い南向き IMF によって、1205 UT から 2 時間30分の間にゆっくりと

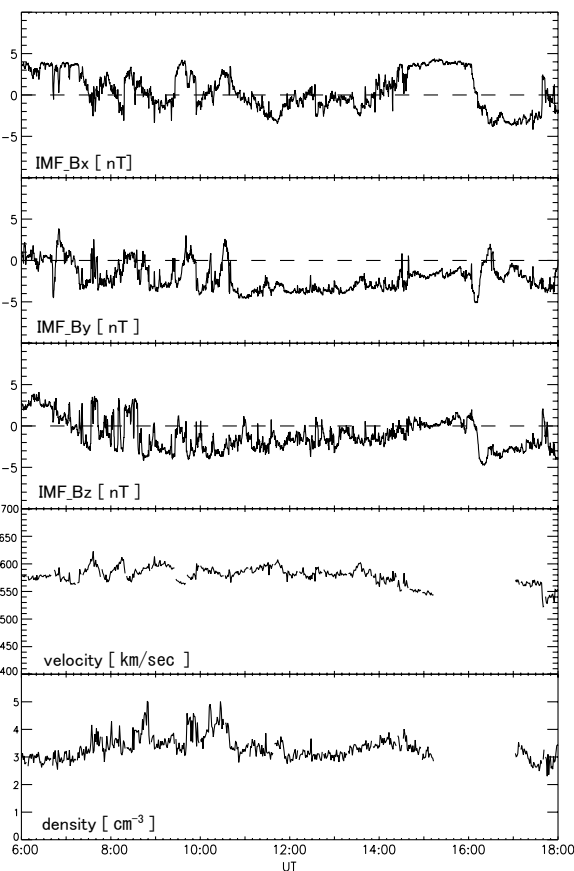


図 2 ACE 衛星で観測された太陽風磁場 3 成分 (GSM 座標系) と、太陽風速度、数密度。

対流電場が発達し、DP 2 電流系が強まったと考えられる。

1410 UT 頃に SOR、MAS、KIL で、地磁気 X 成分の増加が急になり始めたが、MAS より低緯度側の観測点では、変化率はほとんど変わらなかった (図 1)。1439 UT に PEL から NUR の 4 観測点では、X 成分が逆に減少し始めた。地上の地磁気変動は、磁気圏境界面電流や沿磁力線電流、電離圏電流の変動による磁場効果の重ね合わせである。その中で、電離圏電場は赤道まで瞬時に伝搬するため、電離層電流による磁場変動は極から赤道まで同時に開始する。そしてその磁場変動の振幅は高緯度から低緯度になるほど減衰するが、昼側磁気赤道で異常増幅を示すことが特徴である。図 3 に、INTERMAGNET 磁力計観測網の 3 観測点の地磁気 H 成分を示す。1500 UT に磁気赤道 (Dip-equator) に近い ANC (磁気緯度1.56度 S) は、午前側の 11 MLT 付近に位置し、サブオーロラ帯の地磁気 X 成分の減少と同時に、ANC でも X 成分が減少していた (図 3)。一方、ANC と同じ磁気経度に沿った低緯度の SJG (磁気緯度28.31度) と FRD (磁気緯度48.40度) では、この X 成分の減少がほとんどみられず、赤道異常増幅が起きているといえる。このことか

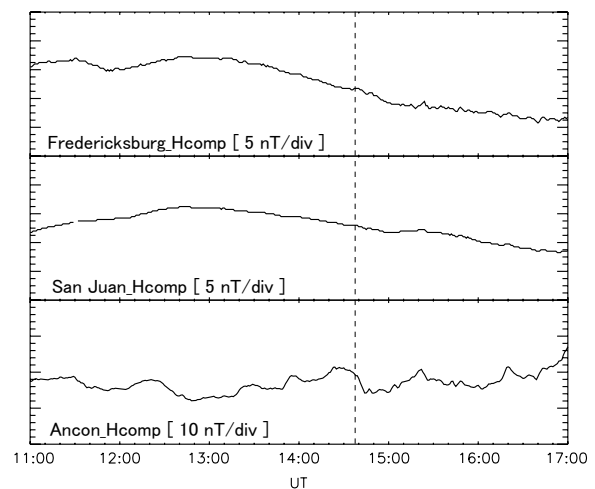


図 3 INTERMAGNET 磁力計観測網の ANC (磁気赤道)、SJJ、FRD (低緯度) の地磁気 X 成分。1440 UT に 11 MLT 付近に位置する。縦点線はサブオーロラ帯で対流電場の過遮蔽が開始した時刻を示す。

ら、1439 UT から対流電場と逆向きの電場が発達し、サブオーロラ帯付近より低緯度側では対流電場を打ち消し、昼側磁気赤道で西向き電場が卓越したと考えられる。

これまで報告された対流電場の電離圏における過遮蔽は、IMF Bz 成分の北向き変動により対流電場が弱まると、相対的に領域 2 沿磁力線電流にともなう逆向きの電場が卓越するためであると解釈されてきた (Kelley et al., 1979 等)。2000年2月8日の事例の場合、太陽風の上流約155万 km の位置で ACE 衛星が観測した太陽風速度約560 km/s から、太陽風の昼側磁気圏境界面までの到達時間を見積もると、ACE 衛星の観測から約46分の遅れとなる。しかし、これを適用しても1350 UT 前後の IMF (図 2) には、対流が急速に減衰する原因となるような変化は見られない。極冠の BJN の地磁気 X 成分 (図 1) は、1430 UT に増加しており、オーロラオーバルが一時的に高緯度側に縮小した可能性がある。このことは対流電場が弱まった可能性を示唆するが、電離圏における電場は光速伝播する (Kikuchi et al., 1978) ことから、その約9分後に開始した対流電場の遮蔽の直接の原因であるとは考えられない。このように、2000年2月8日1438 UT に発生した、対流電場のサブオーロラ帯における遮蔽は、これまで報告された事例とは異なる特性をもつことが明らかになった。

## 2.2 オーロラ帯における対流電場増大

遮蔽が始まると同時にオーロラ帯の SOR、MAS、KIL では東向きオーロラジェット電流がさらに強まった。一般にオーロラ帯でジェット電流が強まる原因として、電場の発達と電離層電気伝導度の増大の2つが考えられる。本研究では、これらの原因を区別するために、極域短波レーダー網 (SuperDARN: Super Dual Auroral Radar Network) のデータを用いて、電場発達の有無を確認した。Su-

perDARN のうち、フィンランドの Hankasalmi レーダーは、IMAGE と同じスカンジナビア半島付近にレーダー視野を持つ。そのため、Hankasalmi レーダーを用いて、オーロラ帯付近の電場の時間変化を調べた。

図 4 は Hankasalmi レーダーのビーム 2 で観測されたエコー強度、F 層プラズマの視線方向速度と、エコーのスペクトル幅の時間変化である。1445 UT に磁気緯度63度から73度付近に強いエコーが現れ、1515 UT 頃に消える。特に磁気緯度66度から71度の範囲に、視線方向速度が1000 m/s 前後の高速のプラズマ流が発生したことが、図 4 からわかる。これは、地磁気 X 成分が増加した時刻 (図 1) とほぼ一致している。このことは、電気伝導度の増大ではなく、この狭い緯度幅の領域で北向きの電場が強まったことにより、東向きのオーロラジェット電流が強められたことを意味する。

1456 UT から約120秒間に観測された、極域電離圏 F 層プラズマ流の 2 次元図を図 5 に示す。ジョンズホプキンス大学応用物理研究所 (JHU/APL)

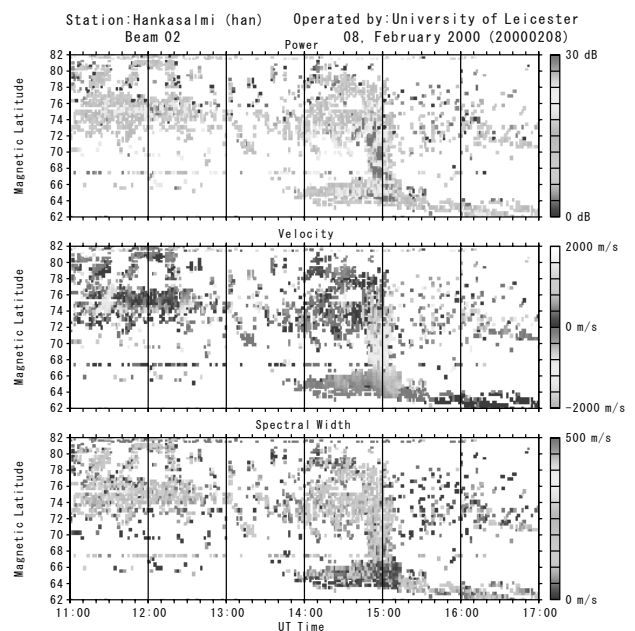


図 4 SuperDARN・Hankasalmi レーダーのビーム 2 のエコー強度、ドップラー速度、スペクトル幅(上から)の時間変化。縦軸は地磁気緯度を示す。

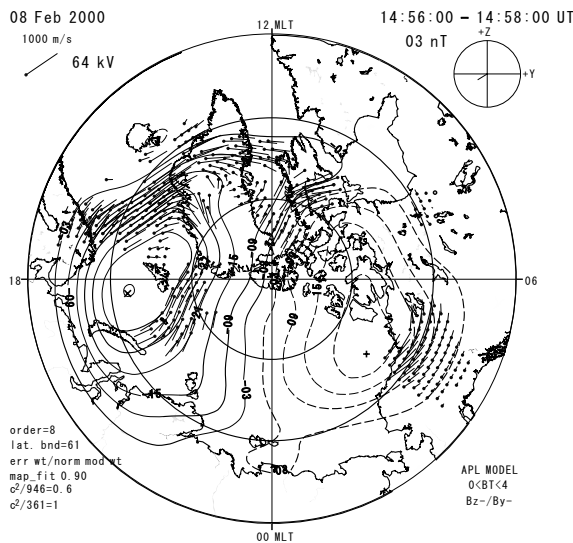


図5 1456-1458 UTの北半球の電離圏F層プラズマの対流パターン。JHU/APLのポテンシャルマップモデルを使用して計算された。コンターは電場ポテンシャルを表し、ベクトルの長さはプラズマ流速を表す。

のポテンシャルマップモデル (Ruohoniemi and Baker, 1998) を用い、6基の SuperDARN 短波レーダーの視線方向速度データから得られた電場ポテンシャルの等高線と、プラズマ流速ベクトルを重ねてプロットされている。ベクトルの長さが速度の大きさを表す。午後側対流セル上の15 MLTの地磁気緯度70-73度から1730 MLTの地磁気緯度65-72度付近で西向き高速プラズマ流が発達したことがわかる。オーロラオーバルは夕方から昼側にいくほど磁気緯度が高くなるため、18 MLT付近で西向き的高速プラズマ流の位置は、東向きオーロラジェット電流の分布 (図1) とほぼ一致する。

さらに、図6に示すように IMAGE の地磁気Z成分が、1445 UTにNURからMASの7観測点で急増加し、BJNで減少した。NURからMASの緯度で観測されたZ成分の増加は、1505 UTに最大になりその後減少し、1550 UTにもとのレベルまで回復した。特に PELで振幅が最大であった。また、MASとBJNの間に位置するSORでは、増加も減少もしなかった。このようなZ成分の緯度変化は、

SOR付近を中心とする東向きのジェット電流が、低緯度側は PEL (磁気緯度63.55度) 付近から、高緯度側は少なくとも BJN (磁気緯度71.45度) 付近までの、約8度の狭い緯度の領域に集中して強められたことを示唆し、地磁気X成分 (図1) や SuperDARN (図4, 5) から得られる電場の緯度変化とよく一致する。

以上の解析結果から、1439 UTにOUJから低緯度側で、南向きの電場により対流電場が遮蔽され、同時に高緯度側のオーロラ帯で、北向きの電場が強められていることが明らかになった。PELとOUJの間付近で、電場の向きが逆転しており、正の極性を持つ領域2沿磁力線電流が、この領域を中心に発達したことを示唆する。一方、BJNとSORの緯度の間に、領域1沿磁力線電流が位置すると考えられるため、これら2つの沿磁力線電流の間の狭い緯度

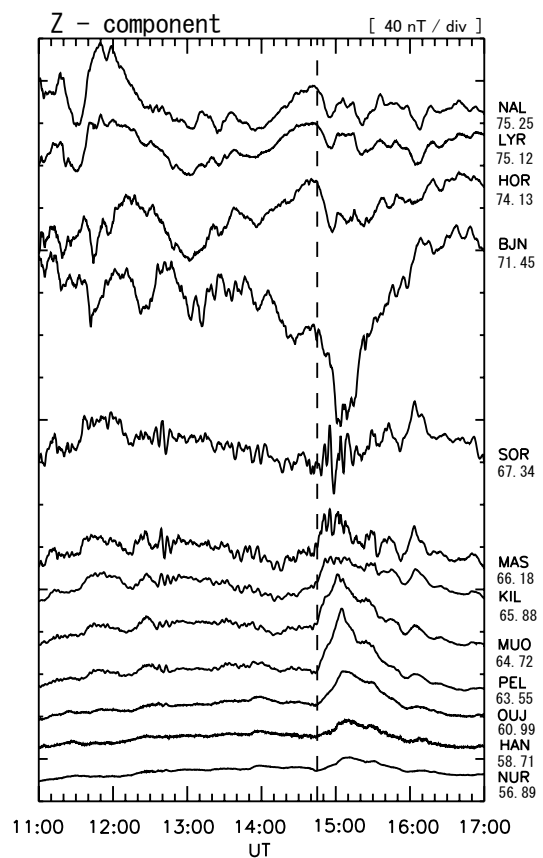


図6 IMAGE 磁力計観測網の地磁気Z成分。形式は図1と同様。縦点線はサブオーロラ帯で急激な増加が開始した時刻 (1445 UT) を表す。

領域では、電場が強められる。従来の遮蔽モデルのように、対流電場が弱まった場合を考えると、低緯度側で過遮蔽は発生するが、このようにオーロラ帯で北向き電場が強まり、東向きジェット電流が強くなるということは起こらない。このことから、領域2沿磁力線電流が急に強まったことが、過遮蔽発生の原因であると考えられる。

### 3. 解析のまとめと考察

極冠からサブオーロラ帯の IMAGE 磁力計観測網で観測された地磁気 X 成分を用い、2000年2月8日1439 UTに発生した、サブオーロラ帯から低緯度で対流電場が遮蔽される事例を解析した(図1)。INTERMAGNETの昼側磁気赤道(11 MLT)でも、同時に H 成分が減少し(図3)、西向きの電場が侵入したことが同定された。また、サブオーロラ帯で対流電場が遮蔽されると同時に、オーロラ帯では対流電場が強められていることが、地磁気 X 成分(図1)、Z 成分(図6)および SuperDARN の Hankasalmi レーダーによる電場観測(図4)から明らかになった。これらの解析結果は、18 MLT の磁気緯度63度付近を中心に、下向きの沿磁力線電流が発達し、沿磁力線電流にともなう正の極性を持つ電場ポテンシャルが、電離圏で増大したことを示唆する。

#### 3. 1 従来の遮蔽発達モデル

本研究以前に報告された対流電場の遮蔽事例は、IMFの北向き変動によって対流電場が弱まったことにより、引き起こされるものであった(Kelley et al. 1979, Fejer et al. 1979, Kikuchi et al. 2003など)。南向き IMF により磁気圏対流が発達するとき、夜側磁気圏では地球方向のプラズマ対流が強まり、夜中から夕方側の内部磁気圏のプラズマ圧が増加する(Ebihara and Ejiri, 2000など)。このような朝夕非対称なプラズマ圧分布は、半径方向の3~4 Re 付近にピークを持ち、非対称な赤道環電流のダイナモ

となる。非対称な赤道環電流は、領域2沿磁力線電流を介してオーロラ帯の低緯度側境界で電離圏電流と結合し、同時に対流電場とは逆向きの電場が電離圏に印加される。そのため、磁気圏対流が発達するときには、昼側の領域1沿磁力線電流の発達とともに、常に領域2沿磁力線電流が発達する。これら2種類の電場が電離圏で競合した結果として、電離圏の電場が決まる。電離圏対流が発達している最中には、昼間側の領域1沿磁力線電流の電流密度は、常に領域2沿磁力線電流のそれより大きいため(Iijima and Potemra, 1978)、電離圏では極から赤道まで対流電場が卓越する。したがって、IMFが北向きに変動すると、磁気圏対流は急速に弱まる。しかし、内部磁気圏にダイナモをもつ領域2沿磁力線電流の減衰には時間がかかるため、対流電場と逆向きの電場が、サブオーロラ帯から低緯度の電離圏で卓越して現れる。このようなシナリオをもとに、AMIE や MTIEGCM などのモデル計算が行なわれ(Senior and Blanc 1984, Koba et al. 2000, Peymirat et al. 2000など)、中・低緯度電離圏における対流電場の遮蔽や、赤道カウンタージェット電流が説明できることが示された。

#### 3. 2 領域2沿磁力線電流の発達による遮蔽

本研究の事例において ACE 衛星の観測データからは、対流を弱める原因と考えられる太陽風パラメータの変化は見られなかった(図2)。また、地上の地磁気データにも対流電場が減衰したことを示す証拠を見つけることができなかった。IMFが南向きから北向きに変動するとき、午後側オーロラ帯では、それまで発達していた東向きオーロラジェット電流が急速に減少することから、磁気圏対流が弱まっていることを知ることができる。Kikuchi et al. (2003)の図4が示すように、このような場合、1分の精度のデータで同時にサブオーロラ帯では西向きの電流が顕著になり、対流電場の過遮蔽が起こる

が、オーロラ帯で東向きジェット電流も減少する。ところが、本研究で解析した事例では、対流電場の遮蔽開始とともにオーロラ帯で東向きジェット電流がさらに強まり、対応するF層電離圏のプラズマ流の速度が約1000 m/sまで増大した。つまり、対流電場が発達し続けているときに、急に対流電場と逆向きの電場が発達したと考えられ、従来のモデルでは説明ができないことを明らかにした。

### 3. 3 サブストーム爆発相との関連性

1205 UT頃から2時間30分近く、領域1沿磁力線電流がゆっくりと発達しつつける間、低緯度側には、それより弱い領域2沿磁力線電流が、追隨して発達していたと考えられる。1439 UTに、急に領域2沿磁力線電流が強まり、それに伴う電場が、オーロラ帯で対流電場をさらに強め、サブオーロラ帯から低緯度側で対流電場を打ち消し、過遮蔽が生じた。太陽風パラメータの変化以外にこのような磁気圏—電離圏の電流系が急に増大する原因として、夜側のサブストームに伴う電流系が考えられる。そこで、対流電場の遮蔽開始とサブストーム爆発相開始の関係を調べた。

サブストーム爆発相の開始時刻は、Pi 2 地磁気脈動、オーロラブレイクアップ、AL 指数、夜側中緯度の正の湾型地磁気変動などによって定義される。本研究では、午後側サブオーロラ帯の下向き沿磁力線電流の発達との関連性を調べるのが目的であるため、サブストーム電流系が夜側中緯度でつくる、正の湾型地磁気変動の開始と比較した。サブストーム爆発相に、夜側オーロラ帯の西向きジェット電流との間で急激に発達する、ウェッジ電流の磁場効果が、夜側中低緯度の地磁気 H 成分と D 成分に、正の湾型変動として観測されることが知られている。そのため、IMAGE が18 MLT に位置するとき、00 MLT 付近に位置する INTERMAGNET の Kakioka (KAK) の1秒値を用いて解析を行なった。

図7は、KAKの地磁気H成分のプロット(中)と、Pi 2 地磁気脈動を見るために0.0250 Hzから0.0067 Hzのバンドパスフィルタをかけたプロット(上)である。この図から、典型的な正の湾型地磁気変動が、1440 UTに発達し始めたことがわかる。ほぼ同時にPi 2 地磁気脈動も増幅しており、サブストーム爆発相が開始したことを支持する。これらのことから、少なくとも1440 UTには、サブストーム爆発相開始にともなう、3次元電流系が発達し始めたことが示唆される。これは、午後側サブオーロラ帯で領域2沿磁力線電流が発達したと、同定された時刻の1分後であり、ほぼ同時に発達したと考えられる。

午後側の電流系と夜側のサブストーム電流系の間

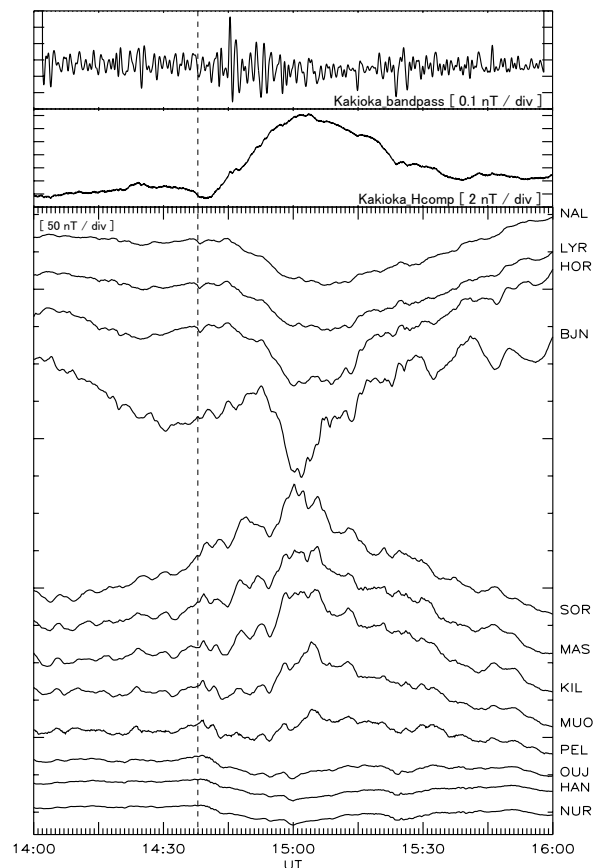


図7 INTERMAGNET 磁力計観測網のKAK(中緯度)の地磁気X成分(1秒値)に0.0250–0.0067 Hzのバンドパスフィルタをかけた結果と、生データプロット。KAKは1440 UTに24 MLT付近に位置した。



の関係は、今後の研究課題であるが、サブストーム爆発相開始のメカニズムや電流系についても未解決の問題が多く残されている。爆発相開始時にオーロラの爆発的な活発化とともに、オーロラバルジの西端に強い上向き沿磁力線電流が発生することが知られている。しかしこのようなサブストームの電流系が空間的にどこまで分布しているのか、対となる下向きの沿磁力線電流がどこに流れ込み、どのような電流回路を形成しているのかも解決がついていない。

午後側の領域2沿磁力線電流の増加の原因としては、爆発相開始時に、地球に近い磁気圏尾部で西向きの強い誘導電場が発生し、高エネルギーのオーロラ粒子が地球近傍に輸送されることが考えられる。その一部が電離圏に降下しオーロラを発光させ、夜側赤道面に対流電場と同じ向きの強い誘導電場を発生させることにより、プラズマ分布の圧力を強め、非対称性を強めて、領域2沿磁力線電流を強める可能性が考えられる。今後さらに、2000年のIMAGE磁力計データから抽出した、31例の同様の事例を詳細に解析することにより、サブストームとの関係を含め、電離圏における対流電場の遮蔽の新しいメカニズムを明らかにしていく。

#### 4. 結論

磁気緯度63度付近から低緯度側で対流電場が過遮蔽されるとき、同時に高緯度側のオーロラ帯で北向きの電場が強められることを明らかにした。高緯度側と低緯度側で加えられる電場は、向きが逆転しており、正の極性を持つ領域2沿磁力線電流がこの領域を中心に発達したことを示唆する。さらに、サブオーロラ帯の過遮蔽開始とほぼ同時に、真夜中付近でサブストーム爆発相が開始したことがわかった。従来、領域1沿磁力線電流に伴う対流電場が弱まることにより、低緯度側で遮蔽が発生すると考えられてきたが、このモデルでは本論文の事例は説明でき

ない。対流電場が成長している最中にサブストームが開始し、昼間側で領域2沿磁力線電流が発達したと考えられる。昼間の領域2沿磁力線電流の発達と、夜側のサブストームの電流系の発達との関係を明かにすることが今後の課題である。

#### 謝 辞

IMAGE磁力計データはIMAGEホームページ (<http://www.ava.fmi.fi/image/index.html>) で公開されているデータを利用しました。IMAGE磁力計観測を維持運営されているヨーロッパ国際共同プロジェクト参加国の関係組織とPIである Finnish Meteorological Institute に感謝します。INTERMAGNET磁力計データは、京都大学地磁気世界資料センターのホームページからダウンロードして利用しました (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index-j.html>)。京都大学地磁気世界資料センターに感謝します。

#### 参考文献

- Dungey, J. W., Interplanetary magnetic field and the auroral zones, *Phys. Rev. Lett.*, 6, 47, 1961.
- Ebihara, Y. and M. Ejiri, Simulation study on fundamental properties of the storm-time ring current, *J. Geophys. Res.*, 105, 15843-15859, 2000.
- Fejer, B. G., Gonzales, C. A., Farley, D. T., Kelley, M. C., and Woodman, R. F., Equatorial electric-fields during magnetically disturbed conditions. 1. Effect of the interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 84, 5797-5802, 1979.
- Gonzales, C. A., M. C. Kelley, B. G. Fejer, J. F. Vickrey, and R. F. Woodman, Equatorial electric fields during magnetically disturbed conditions, 2. Implications of simultaneous auroral and equatorial measurements, *J. Geophys. Res.*, 84, 5803-5812, 1979.
- Hashimoto, K. K., T. Kikuchi, and Y. Ebihara, Response of the magnetospheric convection to sudden interplane-

- tary magnetic field changes as deduced from the evolution of partial ring currents, *J. Geophys. Res.*, 107, A11, 1337, doi : 10.1029/2001JA009228, 2002.
- Iijima, T., and Potemra, T. A., Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms, *J. Geophys. Res.*, 83, 599-615, 1978.
- Kelley, M. C., B. G. Fejer, and C. A. Gonzales, An explanation for anomalous equatorial ionospheric electric fields associated with a northward turning of the interplanetary magnetic field, *Geophys. Res. Lett.*, 6, 301-304, 1979.
- Kikuchi, T., T. Araki, H. Maeda, and K. Maekawa, Transmission of polar electric fields to the equator, *Nature*, 273, 650-651, 1978.
- Kikuchi, T., H. Luehr, T. Kitamura, O. Saka, and K. Schlegel, Direct penetration of the polar electric field to the equator during a DP2 event as detected by the auroral and equatorial magnetometer chains and the EISCAT radar, *J. Geophys. Res.*, 101, 17161-17173, 1996.
- Kikuchi, T., H. Luehr, K. Schlegel, H. Tachihara, M. Shinohara, and T. -I. Kitamura, Penetration of auroral electric fields to the equator during a substorm. *J. Geophys. Res.*, 105, 23251-23261, 2000.
- Kikuchi, T., K. K. Hashimoto, T. -I. Kitamura, H. Tachihara, and B. Fejer, Equatorial counterelectrojets during substorms, *J. Geophys. Res.*, 108(A11), 1406, doi : 10.1029/2003JA009915, 2003.
- Kikuchi, T., Transmission line model for driving plasma convection in the inner magnetosphere, *The Inner Magnetosphere: Physics and Modeling*, AGU Geophysical Monograph Series Volume 155, 173-179, edit. T. I. Pulkkinen, N. A. Tsyganenko, and R. H. W. Friedel, 2005.
- Kobeá, A. T., Richmond, A. D, Emery, B. A, et al., Electrodynamic coupling of high and low latitudes : Observations on May 27, 1993, *J. Geophys. Res.*, 105, 22979-22989, 2000.
- Lyons, L. R., Lee, D. Y., Thorne, R. M., et al., Solar wind-magnetosphere coupling leading to relativistic electron energization during high-speed streams *J. Geophys. Res.*, 110 (A11) : Art. No. A11202 NOV 11 2005.
- Nopper, R. W. and R. L. Carovillano, Polar-equatorial coupling during magnetically active periods, *Geophys. Res. Lett.*, 5, 699, 1978.
- Peymirat, C., A. D. Richmond, and A. T. Kobeá, Electrodynamic coupling of high and low latitudes : Simulations of shielding/overshielding effects, *J. Geophys. Res.*, 105, 22991-23004, 2000.
- Senior, C. and M. Blanc, On the control of magnetospheric convection by the spatial distribution of ionospheric conductivities, *J. Geophys. Res.*, 89, 261-284, 1984.
- Shinbori, A., T. Ono, M. Iizima, A. Kumamoto, and H. Oya, Electrodynamics in the duskside inner magnetosphere and plasmasphere during a super magnetic storm on March 13-15, 1989, *Earth Planets Space*, Vol. 57, 643-659, 2005.
- Somayajulu, V. V., C. A. Reddy, and K. S. Viswanathan, Penetration of magnetospheric convective electric field to the equatorial ionosphere during the substorm of March 22, 1979, *Geophys. Res. Lett.*, 14, 876-879, 1987.
- Spiro, R. W., R. A. Wolf, and B. G. Fejer, Penetration of high-latitude-electric-field effects to low latitudes during SUNDIAL 1984, *Annales Geophysicae*, 6, 39-50, 1988.
- Vasyliunas, V. M., The interrelationship of magnetospheric processes, *Earth's Magnetospheric Processes*, ed. B. M. McCormac, 29-38, 1972.
- Wilson, G. R., W. J. Burke, N. C. Maynard, C. Y. Huang and H. J. Singer, Global electrodynamics observed during the initial and main phases of the July 1991 magnetic storm, *J. Geophys. Res.*, 106, A11, 24517-24539, 2001.
- Wolf, R. A., M. Harel, R. W. Spiro, G. H. Voigt, P. H. Reiff, C. K. Chen, Computer-simulation of inner magnetospheric dynamics for the magnetic storm of July 29, *J. Geophys. Res.*, 87, 5949-5962 1977, 1982.

**Abstract**

Using magnetometer data from the polar cap to mid-latitudes (IMAGE, INTERMAGNET) and SuperDARN radar data, we have examined development of the shielding electric field in the ionosphere for the event of February 8, 2000. The shielding electric fields caused overshielding at magnetic latitudes lower than 65 degrees at 18 MLT after the DP2 current developed for 2.5 hours. We found that the eastward electrojets and sunward plasma flow were enhanced at auroral latitudes between 66 and 71 degrees, concurrently with the overshielding at mid latitudes. The overshielding has been attributed to reduction in the electric field at auroral latitudes due to northward turning of the interplanetary magnetic field (IMF). However, the overshielding event we analyzed was associated with enhancement of the electric field. It is suggested that the sudden development of the Region-2 field-aligned currents (R2 FACs) caused both the overshielding at mid latitudes and the enhanced plasma flow in the auroral ionosphere. The development of the R2 FACs might be associated with the substorm that occurred in the midnight.

