

太陽風磁場の短時間変動に対する磁気圏—電離圏対流の応答

橋本久美子¹⁾, 菊池 崇²⁾, 国武 学³⁾, 亘 慎一³⁾

Life time of the shielding electric field during an isolated southward IMF event as observed by SuperDARN and magnetometer network

Hashimoto, K. K., T. Kikuchi, Y. Ishikawa, M. Kunitake, S. Watari

キーワード：磁気圏対流、DP2電流、過遮蔽

1. 序論

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(Dungey 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DP 2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、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、Wygant et al. (1998)、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。

一方、極域から中緯度電離圏への侵入した電場が遮蔽されることが、磁力計網観測やレーダー観測から報告されている。Somayajulu et al. (1987) は、昼

1) 吉備国際大学政策マネジメント学部環境リスクマネジメント学科

2) 名古屋大学太陽地球環境研究所総合解析部門

3) 独立行政法人情報通信研究機構第三研究部門

側磁気赤道のVHFレーダーの観測から、サブストーム成長相が始まって約20分後に、東向き電場が弱くなることを示した。またKikuchi et al. (2000) は、EISCATレーダーの観測と磁力計多点観測から、同様にサブストーム成長相にDP2電場が発達し始めてから約17分後に、午後側のサブオーロラ帯から低緯度で対流電場を遮蔽し、過遮蔽が生じたことを示した。

このような対流電場と逆向きの遮蔽電場も、内部磁気圏に伝播する可能性がある。そのため、中低緯度電離圏の対流電場を考える際には、侵入とともに遮蔽を無視することができない。対流電場と逆向きの遮蔽電場は、磁気圏対流が発達するとともに成長する領域2沿磁力線電流の電場と考えられてきた (Vasyliunas 1972、Wolf et al. 1982、Spiro et al. 1988、Kikuchi et al. 2000、2003、Kobea et al. 2000 等)。IMFが南を向くと電離圏対流が発達し、その後IMFの北向き変化により急激に対流が弱まると、領域2沿磁力線電流にともなう電場がサブオーロラ帯より低緯度の領域で顕在化するため、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、Kobea et al. 2000)。この解釈を基に、AMIEやMTIEGCMなどのモデル計算を行い、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、Kobea et al. 2000、Peymirat et al. 2000)。

最近、気象大学の藤田さん達のグループのグローバルMHDシミュレーションにより、過遮蔽のメカニズムが研究されている。前述のモデル計算と同様にIMFを南向きから北向きに変化させたときに、遮蔽電場の原因になる磁気圏電流のダイナモがどこで発達するかというプロセスが研究された (藤田他、2006)。IMFが北を向いた後の過渡的に、昼側カスプ

の低緯度側に領域2沿磁力線電流系のダイナモ領域が発生することが示され、主にこの電流系にともなう電場が電離圏における過遮蔽を引き起こしていると報告された。これは、電離圏に遮蔽電場を印加する領域2沿磁力線電流が、夜側のプラズマシートの内部境界付近のダイナモ領域と繋がると考えられてきたこれまでの解釈と異なる新しい結果である。

計算機シミュレーションの結果が妥当であるかを議論する際には、その結果を特徴付けるパラメータを実観測のデータと比較し、どの程度一致するかを吟味することが基本である。しかし遮蔽電場の原因となる電流系のダイナモを特徴づけるような観測データと、シミュレーションの比較は定量的に行なわれてきたとはいえない。そこで、本研究ではダイナモの特性として、継続時間 (ライフタイム) を観測から測ることを試みた。過遮蔽の開始を定義し、その継続時間を測ることができれば、遮蔽電場の原因となる電流系のダイナモのライフタイムと見なせる。そこで本研究では、過遮蔽の減衰時間を測るために、強い北向きIMFが長時間継続中に、短時間だけIMFが強い南向きに変化するイベントを抽出した。対流発達、及び過遮蔽発達と減衰の時刻を決定するために、極冠域から昼側の磁気赤道まで磁力計とHFレーダーのネットワーク観測データ (INTERMAGNET、SAMNET、SuperDARN) を解析した結果を報告する。

2. 解析結果

本研究では、強い北向きIMFが長時間継続中に、短時間だけ B_z の南向き変動が生じた2000年2月23日のイベントを解析した。WIND衛星が (167, 20, 20) (単位: Re、GSM座標系) で観測した太陽風パラメータを図1に示す。1450 UT頃から $B_z \sim +10$ nTが9時間以上続く最中に約20分間だけ、 B_z が約-12 nTまで減少していた (図1中枠)。この前後の時間、 B_y 成分は正で、太陽風速度は460 km/sで安定していた

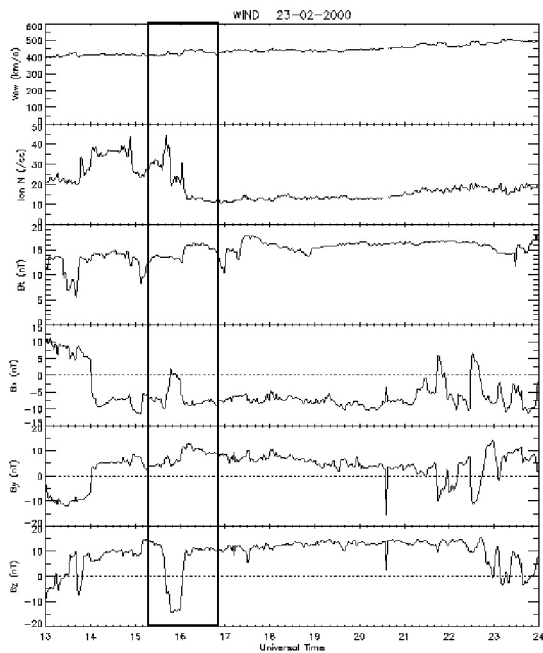


図1 WIND衛星による太陽風速度、密度、IMF 3成分の観測。

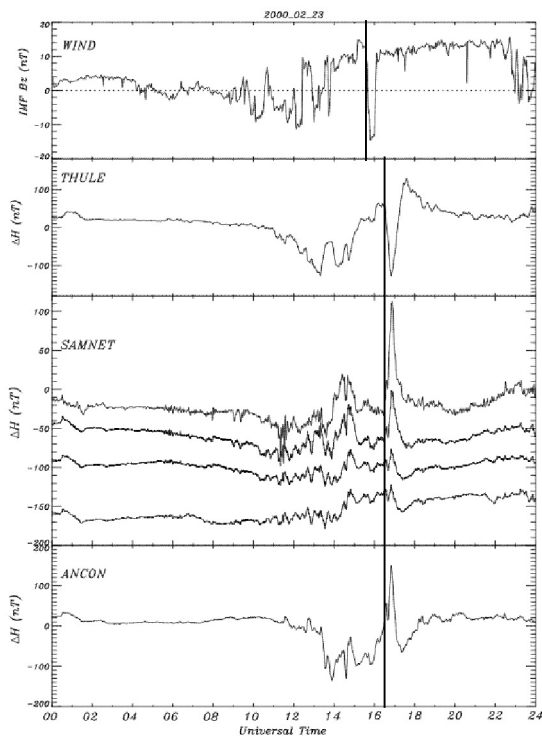


図2 上からIMF Bz成分 (WIND衛星観測)、地磁気H成分 (Thule: 極冠、SAMNET: 中緯度、Ancon: 磁気赤道)。

が、数密度は10個/ccから40個/ccまで変動がみられた。

比較のために、IMF Bzと極冠 (Thule、磁気緯度88.46度) から中緯度 (SAMNET、磁気緯度50.93度~64.44度)、磁気赤道 (Ancon、磁気緯度1.56度S) の地磁気H成分を図2に示す。Bzと地磁気変動を比較すると、負のIMF BzとDP2電場の増大が対応していることがわかる (図2縦線)。1630 UTに極冠域で地磁気H成分が急激に減少し始めると、同時に午後側オーロラ帯-中緯度のSAMNETと昼側磁気赤道のAnconでは増加した。この地磁気変動の振幅は、緯度が下がるにしたがい減少し、昼側磁気赤道のAnconで再び増幅するという特徴を示し、典型的なDP2磁場変動である。IMF南向き変動に伴い対流電場が発達し、極から昼側磁気赤道まで東向き電場が侵入していることを示す。

この2000年2月23日のイベントでは、長時間にわたりSuperDARNのレーダーエコーが極冠を中心に広範囲に得られていた。ジョンホプキンス大学応用物理研究所のポテンシャルマップモデルを用い、北半球の6基のSuperDARN HFレーダーの視線速度データから得られた電場ポテンシャルの等高線と、F層プラズマ流の速度ベクトルを図3に示す。IMFが南向きに变化する直前には、極冠のプラズマ対流が4セルパターンであったことがわかる (図3a)。強い北向きIMFのときに現れる対流パターンである。1630 UTにIMFが南を向くと、対流パターンは2セルに変わりエコー領域も広がり対流電場が増大した (図3b)。このような変化は、上述のDP2地磁気変動から得られた対流電場の発達とよく一致する。

IMF Bzが約20分後に再び北向き (約+10 nT) に急激に変化すると、DP2電場も極から赤道まで同時に減少し始めた。図4は、図2の1500 UTから2000 UTを拡大した図である。1652 UT頃 (図4点線) にAnconで東向き電場が急速に弱まり始め、中緯度のYORやGMLでは過遮蔽が見られる。一方、これらの

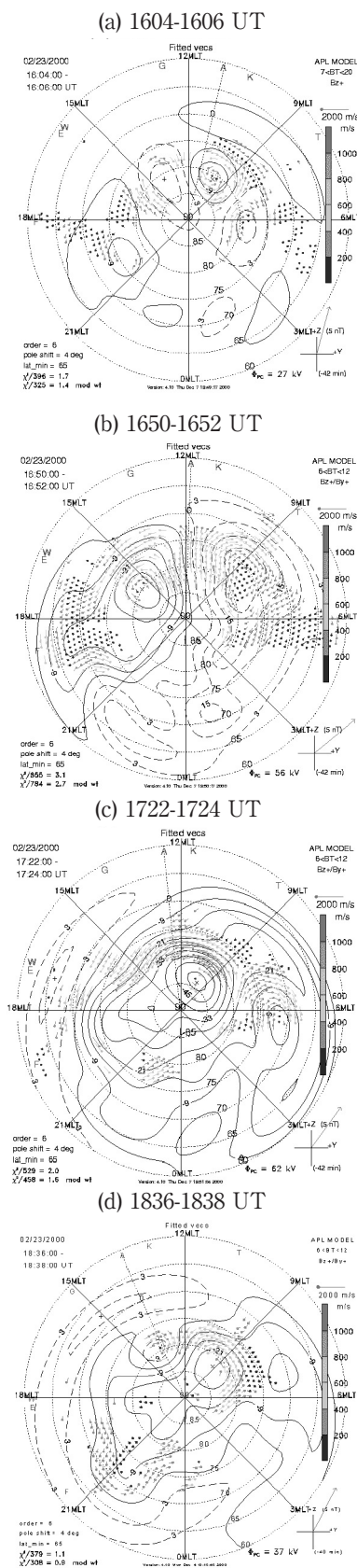


図3 1604 UT ~2028 UTの極域電離圏F層のプラズマ対流パターンと電場ポテンシャル。

観測点の変化と比べると、極冠のThuleのH成分は、1735UT (図4破線) まで間に、ややゆっくりと直線的に回復した。極域電離層のプラズマ対流は図4③の時間に、2セルから3セルパターンに変化していた。さらに1735 UT (破線) を過ぎると昼側極冠にリバーサ対流セルが現れ、4セルパターンになった (図3 d)。これらのデータは、IMFが急激に強い北向きに変化したために、図4②の時間に流入していた、磁気圏対流を駆動する電磁エネルギーの供給が止まり、あとは消費し続けていた (図4③) ことを示唆する。つまり、約20分継続した強い南向きIMFによって駆動された磁気圏対流、すなわち昼側領域1沿磁力線電流のダイナモは図4③の約40分間でほぼ消失したと解釈できる。

一方、過遮蔽は1813 UT (図4赤線) 頃に減衰したことが、中緯度のGMLやYOR、磁気赤道のAnconで、H成分がほぼ静穏時のレベルまで回復したことからわかる。このとき極域の電離層プラズマ対流は4セルパターンが継続していたため、対流電場の増大により遮蔽電場が再び打ち消されたとは考えられない。そのため、過遮蔽の原因となる電流系のダイナモ自体が、この時刻にほぼ減衰してしまったと解釈できる。

以上の解析結果から、過遮蔽の継続時間は、図4 中点線と赤線の間 (③と④) に継続していたといえる。対流電場が急激に減少した時刻 (点線) より前に、すでにこの電流系は成長し始めている可能性があるが、MHDシミュレーションによって予想されているダイナモは、IMFが北向きに変化した後に成長するとされている。したがって、本研究では、太陽風からのエネルギー流入が止まり (激減) 対流電場が弱まり始めたと考えられる時刻から、過遮蔽が完全に減衰した時刻までを遮蔽電場の継続時間 (ライフタイム) と定義する。本研究で解析した2000年2月23日のイベントでは、1652 UTから1813 UTまでを遮蔽電場の原因となるダイナモの継続時間として

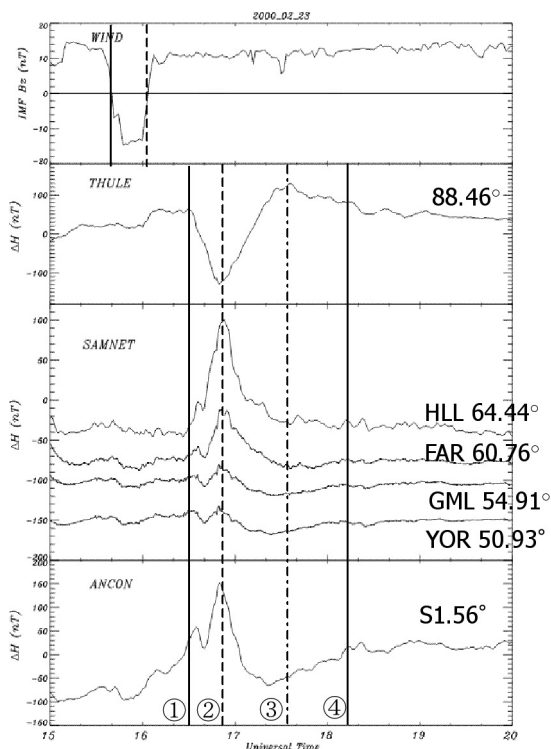


図4 図2と同じフォーマットで、15-20UTを拡大した図。4本の縦線はそれぞれ①対流電場が発達開始、②減衰開始、③プラズマ対流パターンが4セルに変化、④過遮蔽がほぼ減衰した時刻を示す。

測ると、81分(図4③+④)という値になる。つまり、約20分間の強い南向きIMFにともない磁気圏電離圏対流が発達したあとに、発生した過遮蔽の電場の継続時間は約80分であったという結果が得られた。

3. 解析のまとめ

本研究では、南向きIMFにともなう磁気圏電離圏対流のエネルギー流入が、短時間だけ起こった場合に、その後IMFが北向きに変化した際に発生する過遮蔽の電場の継続時間を見積もることを試みた。エネルギー流入の時間が明確になるように、強い北向きIMFが長時間継続する最中に、短時間IMFが南向きに変化するイベントを選び、極から磁気赤道までの地磁気データと極域HFレーダーデータを解析した。それにより対流発達と減衰、過遮蔽の開始と減衰の時刻を同定することができた。2000年2月23日

のイベントを解析した結果、約20分間の強い南向きIMFにともない磁気圏電離圏対流が発達したあとに、発生した過遮蔽の電場の継続時間は約80分であった。

対流電場と逆向きの電場を電離圏に印加する電流系のダイナモ領域が、夜側プラズマシートの内部境界にあると考えるとき、このダイナモは磁気圏対流が発達した結果として、追隨して成長すると思われる。この場合、南向きIMFにともなう太陽風エネルギーの流入が止まると、その後は主に電離圏におけるエネルギー損失によって対流電場も、遮蔽電場も減衰する。すなわちダイナモに蓄えられた電磁エネルギーを使い切るまでの時間が、約80分であったと解釈できる。

一方、MHDシミュレーションから予測されている昼側カスプの低緯度側のダイナモ領域は、IMFが北向きに変化した後に過渡的に発生するとされている(藤田他、2006)。本研究で選んだような比較的単純なIMFの変化は、シミュレーションモデルの入力として再現する際にも扱いやすいと考えられる。前節と同様に定義した過遮蔽の継続時間を計算し、観測値と比較することにより、磁気圏内における遮蔽電場の発生プロセスをより定量的に議論することが可能になると期待される。

4. 謝辞

WIND衛星のデータはNASA/CDAWebから、INTERMAGNETの地磁気データは京都大学の地磁気世界資料解析センターのWebサイトから、ダウンロードしました。またSAMNETの地磁気データはLancaster大学により提供していただきました。データ提供について、関係機関の方々に深く感謝いたします。

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.
- Fujita, S., T. Kikuchi, T. Tanaka, A numerical simulation of the electric-field overshielding triggered by a northward turn of the interplanetary magnetic field, 「第2回磁気圏電離圏複合系における対流に関する研究会」抄録, 2006.
- 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 interplanetary 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 counterjets 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* 155, 173-179, edit. T. I. Pulkkinen, N. A. Tsyganenko, and R. H. W. Friedel, 2005.
- Kobea, 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. Kobea, 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, Electrodynamic in the duskside inner magnetosphere and plasmasphere during a super magnetic storm on

- March 13-15, 1989, *Earth Planets Space*, 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.
- Wygant, J., D. Rowland, H. J. Singer, M. Temerin, F. Mozer, M. K. Hudson, Experimental evidence on the role of the large spatial scale electric field in creating the ring current, *J. Geophys. Res.*, 103 (A12) , 29527-29544, 1998.
- 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

An isolated southward IMF occurred over a time interval of 20 min on February 23, 2000. The IMF decreased from +14 nT to -16 nT, and then increased abruptly to +10 nT in 20 min. This isolated southward IMF event gave us an opportunity to examine the time constant of the growth and decay of the convection electric field and shielding electric field, which determine the electric field at subauroral to equatorial latitudes. SuperDARN detected a 4-cell convection pattern before the onset of the southward IMF event, which changed into a 2-cell pattern within a few minutes after the southward IMF turning. The convection pattern changed into 3-cell after the northward turning of the IMF, and further into 4-cell pattern in 40 min. The polar cap potential detected by magnetometers indicates steep growth of the convection electric field during the period of the southward IMF, and decay after the northward IMF in correspondence to the changes of the convection pattern. The magnetometer at the dayside geomagnetic equator, Ancon, Peru detected the convection electric field that penetrated promptly to low latitude and drove a strong ionospheric current that intensified the equatorial electrojet with the aid of the Cowling effect. After the northward turning of the IMF, on the other hand, the equatorial electrojet reversed its direction, implying that the shielding electric field overwhelmed the convection electric field immediately after the decrease in the convection electric field. This fact suggests that the shielding electric field developed rapidly so as to cause the overshielding effect after 20 min from the growth of the convection electric field. We also found that the overshielding continued for 80 min, while the convection electric field decayed in 40 min. The longer time constant of the shielding electric field may have resulted in its dominant role at low latitude after the decrease in the convection electric field.

Keywords : Overshielding, Convection electric field, Shielding electric field, Field aligned current