

アラスカ King Salmon レーダーによる宇宙天気の研究

Space weather study using the HF radar in King Salmon, Alaska

菊池 崇 橋本久美子 篠原 学 野崎憲朗 ビル ブリストウ

KIKUCHI Takashi, HASHIMOTO K. Kumiko, SHINOHARA Manabu, NOZAKI Kenro, and B. Bristow

要旨

地球周回衛星や静止軌道衛星は、太陽活動に起因する宇宙嵐によって、しばしば障害を受ける。また、低緯度電離圏の電子密度の異常増加により、GPS 測位に大きな誤差を生じる。宇宙嵐は、太陽風プラズマと地球磁場の相互作用によって作られた電磁気エネルギーが、地球から 10 万キロメートルの範囲にある磁気圏と数百キロメートルにある電離圏で構成される宇宙空間に流入することによって発生する。中でも、地球半径の数倍の距離の磁気圏や低緯度電離圏への電磁気エネルギーの流入のモニターと流入機構の解明が、衛星周辺の宇宙天気を予報するために重要である。この目的のために、アラスカ King Salmon に大型 HF レーダーを建設し、国際 SuperDARN レーダー網の一環として運用し、赤道を含む中低緯度に磁力計を設置した。これらのデータを解析して、電磁気エネルギーの流入過程に関する研究を行った結果を報告する。

Earth orbiting and geostationary satellites often suffered from damages caused by space storms, of which energy is produced by the interaction between the solar wind and magnetosphere. In particular, the energy transmission to the inner magnetosphere and low latitude ionosphere is a critical issue in the space weather study. To monitor the electromagnetic energy coming into the magnetosphere and ionosphere, we built an HF radar in King Salmon, Alaska, and operated it as a part of the SuperDARN radar network. Combining with magnetometer data from the low latitude and equator, we revealed new aspects of the energy transmission to the equatorial ionosphere. Here we report the radar system and initial results basing on the radar and magnetometer observations.

【キーワード】

宇宙天気, 衛星障害, 磁気圏, 電離圏, HF レーダー, 磁力計観測

Space weather, Satellite anomaly, Magnetosphere, Ionosphere, HF radar, Magnetometer

1 まえがき

2003 年 10 月 24 日に地球観測衛星みどりが、大量のオーロラ電子を浴びて、帯・放電し、火災を起こして機能を停止した。また、地球周辺宇宙空間に分布する高エネルギーの放射線量が増大することによって、放送衛星や気象衛星が一時機能を喪失し、放送の中断や雲写真データの途絶などの障害が発生している。また、磁気嵐によって異常増加した電離圏電子による GPS 測位誤差が発生

している。このように、衛星を用いたハイテクシステムは、宇宙環境の変動によって、容易に障害を受ける。このために、情報通信研究機構をはじめとして、大学や研究機関で宇宙天気予報の研究が盛んになっている。この動きは、米国やヨーロッパでも盛んであり、地球物理や宇宙科学分野の国内外の学会では、例外なく、宇宙天気セッション又は宇宙天気をメインテーマとするセッションが開かれている。

宇宙天気予報研究は、情報通信研究機構の前身

である通信総合研究所が、1988年に、世界に先駆けて開始した(菊池, 1988)。それまで数十年間にわたって継続してきた電波予警報を、宇宙利用時代に即して、宇宙空間の電磁場や放射線粒子の予測へと発展させるための研究プロジェクトである。1990年代に入ってから、米国でも国家プロジェクトとして宇宙天気研究が開始され、最近、ヨーロッパ宇宙機構(ESA)でも開始され、世界的な潮流となっている。2004年から2008年の5か年間の予定で実施されているCAWSES(Climate And Weather of the Sun-Earth System)も宇宙天気に関する国際共同研究の一つである。宇宙天気研究が世界的に広がった背景には、宇宙空間が、かつてのような神秘の空間から、実用衛星が飛び交い、民間人の宇宙旅行が実現したように、人類が利用する空間になったことが挙げられる。

宇宙天気予報は、宇宙利用の安全を担保するためのシステムであるが、十分な実用レベルに達しているとはいえない。地球観測衛星みどりの事故に際しては、事故直後に、オーロラ電子が原因ではないかとの見通しを得た(菊池、最新宇宙ニュース、http://www.universe-s.com/news/2003/1125_j.html)が、オーロラ嵐が突発的に発生したメカニズムについては、研究途上である。一般に、宇宙嵐が発生するためには、太陽風で運ばれる電磁気的エネルギーやプラズマの流入が必要であるが、特に、オーロラ嵐や磁気嵐、そして、放射線帯高エネルギー電子の生成に、深くかかわっている電磁気エネルギーの流入が重要であり、このモニターと流入機構の解明が大きな研究課題である。情報通信研究機構は、電磁気エネルギーの流入をモニターする目的で、1998年までに磁気赤道のYapや低緯度の沖縄に磁力計を設置し、2001年7月にアラスカKing Salmonにおいて、大型のHFレーダーを建設した。このレーダーは、国際SuperDARN計画(Greenwald et al, 1998)が建設を進めているレーダーと同一の機能を持っており、国際コミュニティがデータを共有して、宇宙天気研究を進めている。

2 HFレーダーと磁力計観測による電離圏電場の観測

2.1 King Salmon レーダー

HFレーダーは、周波数8-20MHzの短波帯の電波を斜め上方に放射し、地球磁力線沿いに分布する電離圏電子密度の、電波波長の半分程度のスケールを持つ不規則構造によって反射された電波を受信し、そのドップラー周波数を測定する。これにより、プラズマの運動速度を測定する。図1は、北極域に展開する10基のレーダーの視野を示す。King Salmonはレーダー網の一番西に位置し、レーダーの空白域であるシベリア東部を観測視野に納めている。また、2006年12月より運用を開始した名古屋大学太陽地球環境研究所の北海道HFレーダーの視野と連続するために、極域から中緯度の電離圏プラズマの運動を観測することができ、電磁気エネルギーの内部磁気圏と低緯度電離圏への流入のモニターとして、世界でもユニークなレーダー対を形成している。

レーダーのアンテナは、周波数8-20MHzを連続的に送受信するログペリアンテナで、高さ15メートル、間隔12メートルのアンテナタワーを17本並べ、タワー間にエレメントを張った16本のアンテナよりなるphased arrayとなっている

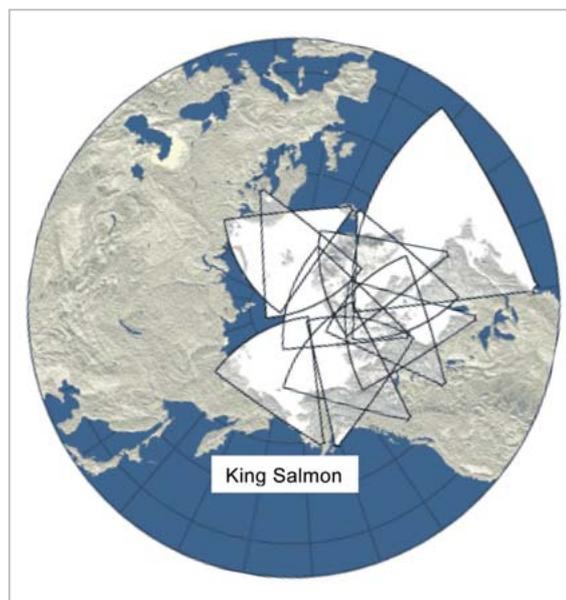


図1 北極域における短波レーダーネットワーク

SuperDARN。King Salmonレーダーは、日本の北側のシベリア東部地域を観測しており、我が国の電離圏観測等と連携する。



図2 King Salmon に建設されたアンテナ(上)とレーダー装置(下)

(図2)。16本のビーム間の位相を変化させて、距離3000km、視野角53度の扇形の二次元面上のエコー強度とプラズマ運動速度を観測する。レーダービームの掃引は、7秒ごとに行われ、2分ごとに1枚の二次元データが収集される(図3参照)。

電離圏プラズマは、磁気圏から電離圏へ磁力線沿いに伝送された電場の強度と、地球磁場の強度の比で決まる速度で、電場と地球磁場に垂直な方向に運動する。極域では地球磁場は、ほぼ鉛直方向であるために、プラズマ運動は水平となる。電離圏プラズマの中に、電波の波長の半分程度のスケールの不規則構造があると、電離圏へ入射した電波は、この不規則構造によって反射を受ける。この反射波を、送信と同じアンテナで受信して、そのドップラー周波数を測定することによって、プラズマの視線方向の速度を得る。図3は、このようにして得られた二次元面内でのプラズマ速度を示す。暖色系はプラズマがレーダーから遠ざかる方向を示し、寒色系は近づく方向を示す。1基のレーダーが観測するプラズマ速度は視線方向であるために2次元の速度ベクトルを得ることはできないが、2基のレーダーが別々の方向から同一場所を観測する場合には、視線方向速度の合成により、2次元速度ベクトルを得ることができる。一方、King Salmon レーダーのように、対になるレーダーを持たない場合は、ベクトル方向の流線

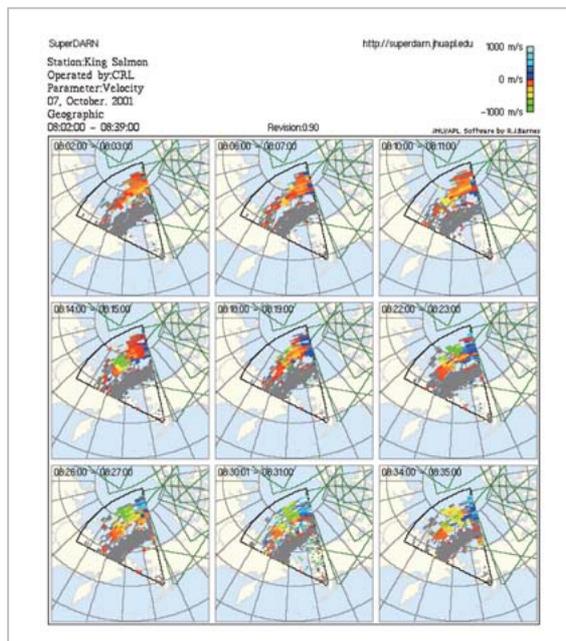


図3 King Salmon レーダーが観測した電離圏プラズマの視線方向速度

レーダーへ近づく場合が正(寒色系)、遠ざかる場合が負(暖色系)のカラー表示になっている。

関数を球面調和関数の級数の和と仮定し、観測値にこれまで得た平均的なプラズマ対流パターンを加えて、級数の係数を決め、全体の速度ベクトルを求める方法がとられている(Ruohoniemi and Baker, 1998)。図4に、King Salmon レーダーのデータを入れた、北極域全体の電離圏プラズマ流のベクトル図を示す(Johns Hopkins 大学応用物理研究所が <http://superdarn.jhuapl.edu/> で公開)。

2.2 低緯度・赤道磁力計観測

HF レーダーにより観測される電離圏プラズマの運動は、電離圏電場の情報を与えるが、電場は電離圏E層中に電流を流すために、地上で、磁場強度の変動をもたらす。したがって、電離圏の電気伝導度のモデルを使用することによって、逆に、地上磁場変動から電離圏中の電流や電場を推定することができる(Tsunomura and Araki, 1984)。特に、レーダーのない中低緯度地域では、磁力計による磁場観測が重要となる。衛星に障害を与えるような大規模な宇宙嵐の場合は、磁気圏電場による電離圏電流は、中低緯度、赤道まで流入し、グローバルなDP2と呼ばれる磁場変動を起こす(Nishida et al, 1966; Kikuchi et al, 1996)。この

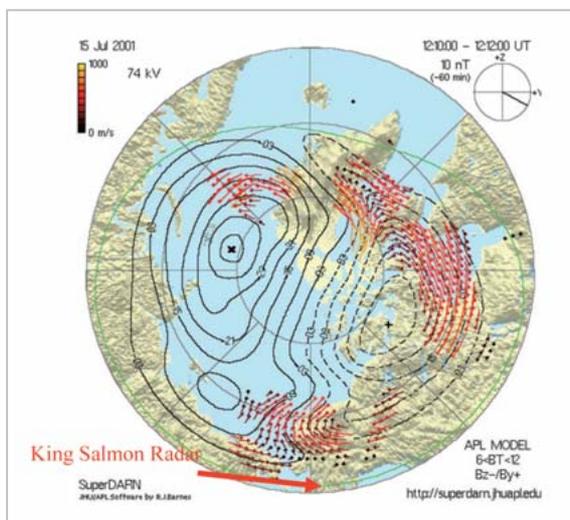


図4 SuperDARN レーダー網により観測された北極電離圏プラズマ対流

図の上方が磁気地方時の12時、右方が6時を示す。2分ごとに、昼と夜の電離圏プラズマ対流が同時に観測される。

DP2 磁場変動は、太陽風磁場の Z 成分、 B_z との相関がよいために (Nishida, 1968)、太陽風に源を持つ電磁気エネルギーの磁気圏・電離圏への流入をモニターする方法として古くから用いられてきた。特に、磁気赤道では地球磁場が水平になるために、東西方向の電場により鉛直方向の分極電場が作られ、分極電場によるホール電流が流れる結果、実効的に、低緯度に比べて1桁程度、電気伝導度が大きくなる。このために、極電離圏から伝播してきた弱い電場であっても大きな振幅の磁場変動を引き起こすために、グローバルな電場を検出するデータとして活用される (e.g., Kikuchi et al, 1996)。この利点を生かすために、情報通信研究機構は1988年までに、磁気赤道 Yap に磁力計を設置し、赤道磁場変動と参照するために低緯度の沖縄に磁力計を設置した (図5)。

極域電離圏の電場が赤道まで高速で伝播して、赤道電離圏 E 層に強い電流を流すことは、磁気インパルス (SC) の高緯度と赤道での発生同時性から、Araki (1977) により発見された。極域電場の低緯度赤道への高速伝播は、その後も、旧電波研究所の HF Doppler 観測網による低緯度電離圏電場の直接観測 (Kikuchi, 1986) や、赤道で増大する数分周期の地磁気脈動 (Motoba et al, 2002)、数十分周期の DP2 磁場変動 (Kikuchi et al, 1996) により、確認された。極域電離圏の電場が、赤道

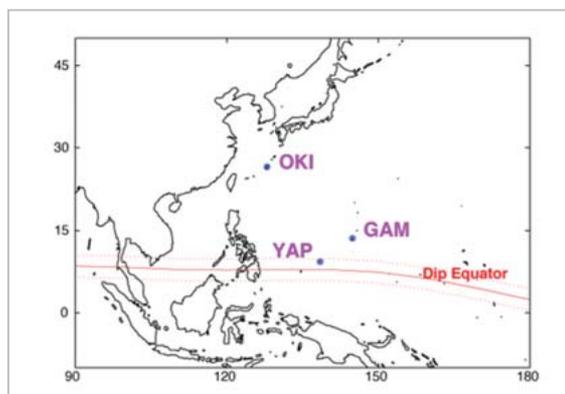


図5 磁気赤道 YAP と低緯度の沖縄 (OKI) の磁力計観測点

YAP はほぼ磁気赤道上に位置し、電離圏電気伝導度が異常に大きいため、極域電離圏から伝播した電場により強い磁場変動が発生する。

電離圏までの約 8000 km の距離を、ほぼ瞬間的に伝播する機構については、Kikuchi et al. (1978)、Kikuchi and Araki (1979) により、地面と電離圏 E 層で構成される導波管内のゼロ時 TM モードによることが示された。TM0 モード波の伝播は電離圏の有限伝導度による減衰を受けるが、量的には 10 % 程度以下であり、これよりも、伝播距離に比べて極域電場のサイズが小さいことによる幾何学的な減衰が大きいことが示された。この減衰により赤道では、10 分の 1 以下の強度に減少するが、先に述べたように磁気赤道の電離圏電気伝導度が異常に大きくなっているために、観測可能な磁場変動を引き起こす。

2.3 磁気嵐時の電場

磁気嵐時に磁気圏で発達する朝夕方向の電場が内部磁気圏へ侵入することにより、磁気嵐環電流を発達させることが知られている。実際、磁気嵐時には、内部磁気圏深くで、強い電場が衛星により観測されている (Wygant et al, 1998 ; Shinbori et al, 2005)。内部磁気圏の電場は、磁気嵐時の大規模電流系の発達をもたらす (Ebihara and Ejiri, 2000 ; Burke et al, 1998)、放射線帯粒子の生成にも寄与する可能性が指摘されている (Nishimura et al, 2007)。また、磁気嵐電場は、低緯度、赤道の電離圏へ伝播して、電離圏全電子数を増加させ、GPS 測位に大きな誤差を生じることが知られており (Maruyama et al, 2004 ; Tsurutani et al, 2004)、宇宙天気予報分野の大きな研究課題となっている。

る。低緯度赤道へ侵入する電場は、ペルーの Jicamarca 非干渉性レーダーで直接観測される (Huang et al, 2005) ほか、中低緯度の電離圏で電流を流し、地上で DP2 磁場変動を引き起こす (Wilson et al, 2001)。電離圏電場と内部磁気圏の電場の関係については、内部磁気圏のプラズマ対流が極域電離圏の電場増加から数分以内で増加することが、Hashimoto et al (2002) により見いだされ、電場が電離圏を経由して内部磁気圏へ伝播するモデルが提案された。

磁気嵐の電場が電離圏を経由して、内部磁気圏へ伝播するならば、内部磁気圏の磁力線の足元に近い領域を観測する King Salmon レーダーは、磁気嵐電場のモニターとして有力である。次に、Yap の磁力計で観測した DP2 磁場変動と、King Salmon レーダーにより観測されたプラズマ対流の相関解析により見いだされた、磁気嵐時の電場とこれを打ち消す遮へい電場に関する新しい知見を紹介する。

図 6 上段は、2006 年 12 月 14-15 日に沖縄で記録された磁場 3 成分を示す。H 成分は、14 日 1410 UT に急増し、2230 UT から磁場減少が発達し始めた。最初の磁場増加の急始は、SSC (Storm Sudden Commencement) と呼ばれ、太陽風衝撃波が磁気圏の前面に衝突することにより磁気圏前面に流れる Chapman-Ferraro 電流により発生する。その後の磁場減少は磁気圏内の地球半径の 4 倍前後の距離で発達する西向き環電流によるもので、環電流は磁気圏内に侵入した電場により発達する。沖縄は、磁気赤道電離圏で強く流れる電流の影響を受けず、また、極域電離圏の強い電流の効果も受けにくい位置にあるために、沖縄の磁場変動は、磁気圏の電流の効果を表すと考えることができる。

図 6 下段は、同じ時間帯で磁気赤道 Yap で記録された磁場 3 成分を示す。沖縄の磁場変動と大きく異なるのは、2230 UT 付近から発達する周期 30 分の周期振動とその後の大きな振幅の変動である。これらの磁場変動は、磁気赤道の電離圏を流れる電流による DP2 磁場変動であり、これを抽出するために、両方の観測所の静穏時の磁場日変化を補正し、Yap 磁場変動から沖縄の磁場変動を引く。このようにして得られた DP2 磁場変動を図 7 に示す。赤道 DP2 電流は、22UT 付近から

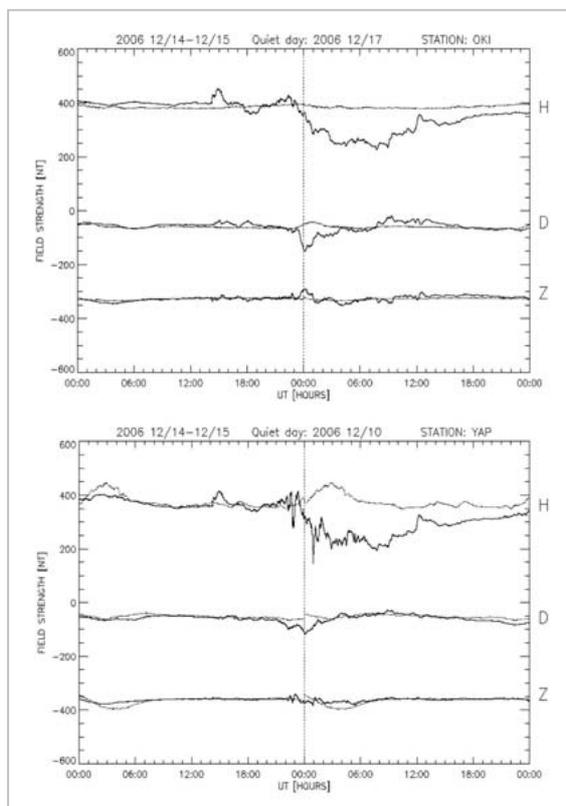


図 6 磁気嵐が発生した 2006 年 12 月 14-15 日の、沖縄 (上段) と Yap (下段) で記録された磁場 3 成分。破線は 12 月 10 日の静穏時の磁場変動

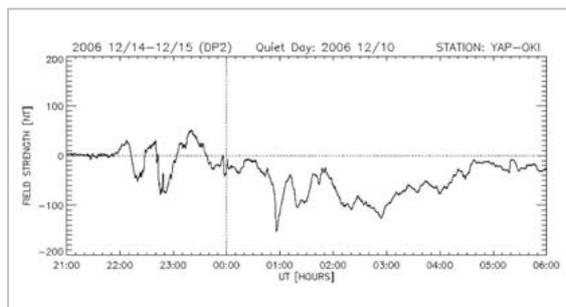


図 7 磁気赤道 Yap の磁場変動から沖縄のそれを差し引いて得た赤道電離圏電流による DP2 磁場変動

約 30 分の周期で増加と減少を繰り返し、2320 UT 以降は、減少傾向を示している。

30 分周期で振動する赤道の DP2 磁場変動は、極域電離圏の電場が光速で赤道電離圏へ伝播したために発生することが、Kikuchi et al (1996) により示されたが、さらに元をたどれば、太陽風磁場の南北成分の周期変動により変動する磁気圏対流電場が原因である (Nishida et al, 1966 ; Nishida, 1968)。実際、図 7 の DP2 周期変動に対応する太

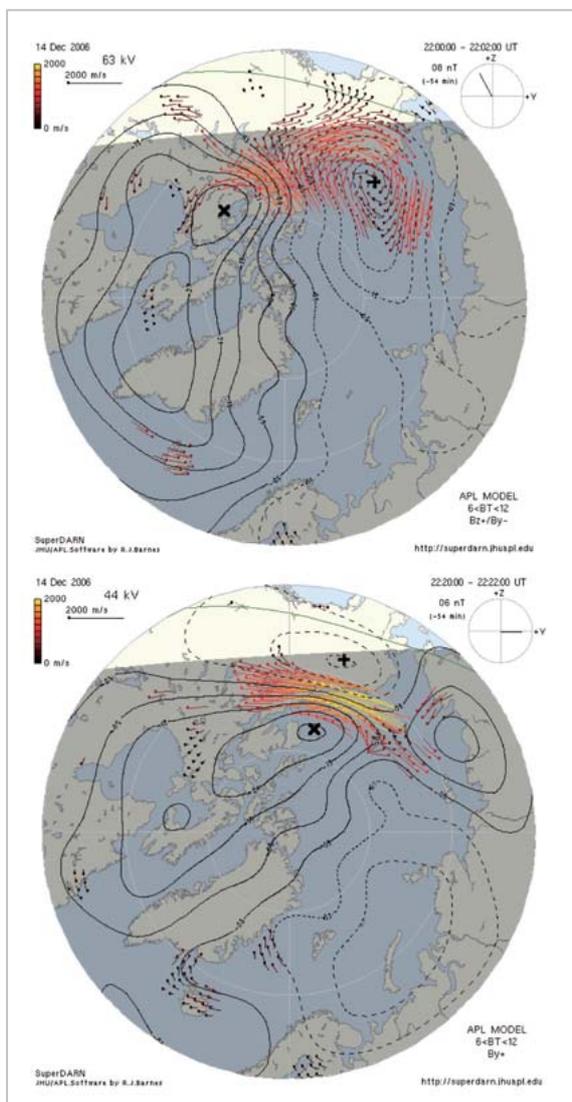


図8 2200 UTの赤道の正の磁場変動に対応する2渦型の電離圏対流パターン(上段)と2220 UTの負の磁場変動に対応する変形した対流パターン(下段)

負磁場変動の原因と思われる午前の右回りの対流渦がKing Salmonレーダーにより観測された。

陽風磁場変動がACE衛星により観測されている。図7は、DP2磁場変動が、東向き電流による正の磁場変動と、西向き電流による負の磁場変動により構成されていることを示す。赤道のDP2磁場変動が極域電離圏の対流電場と良い相関を持つことは、EISCATレーダーデータを解析してKikuchi et al.(1996)により示されたが、図7で見いだされた負の変動を引き起こす電場は対流電場と逆向きであり、この電場の正体を明らかにする必要がある。

この目的のために、極域電離圏プラズマの動き

を観測するKing Salmonレーダーを含むSuperDARNレーダーネットワークのデータを解析した。図8の上段は、赤道磁場変動が正にふれた2200 UTのプラズマ対流を示す。磁気地方時12時(図上方)に強い極方向のプラズマ流が観測され、午前側(図右方)に反時計回りの対流渦がKing Salmonレーダー他により観測された。この対流パターンは、南向きの太陽風の磁場による大規模2渦対流のパターンに一致し、朝方から夕方に向かう対流電場が増強されたことを示している。この朝夕電場が赤道電離圏へ侵入し、昼間で観測された正の磁場変動を引き起こす東向き電流を流したと考えられる。一方、図8の下段は、赤道磁場が負にふれた2220 UTのプラズマ対流を示す。12時のプラズマ流は西向きになり、同時に、これまで反時計回りであった午前の領域で、時計回りのプラズマ流が、King Salmonレーダーにより観測された。この対流パターンの変化は、これまでの朝夕方向の電場の向きが、夕から朝へ逆転したことを意味している。この極域電離圏電場方向の逆転が、赤道磁場変動が正から負へと変化した原因と考えられる。電場方向の逆転は、遮へい電場の発達を示していると考えられ、遮へい電場の発生をHFレーダーが直接観測した可能性がある。遮へい電場の発生は、磁気嵐の衰退に関係するほか、低緯度電離圏を変動させる原因と考えられるために、King Salmonレーダーのように極域の比較的low latitude側の領域を観測するHFレーダーは、磁気嵐発達の理解や予測にとって重要なデータを提供してくれると期待される。

3 むすび

人類の宇宙利用を進めるにあたって、大きな障害は、人工衛星機器に障害を引き起こす高エネルギー粒子やプラズマ、そして、電離圏変動を引き起こす電場や磁場変動である。中でも、電場は磁場変動の原因となり、また、電離圏の全電子数増加(Maruyama et al, 2004; Tsurutani et al, 2004)や放射線帯の高エネルギー粒子の生成に寄与する(Lyons et al, 2005; Nishimura et al, 2007)。この電場をいかに効率的に観測するかが、宇宙天気監視において重要である。電場の観測はAKEBONO衛星などにより、磁気圏内部での直接観測が有効

である (Shinbori et al, 2005) が、磁気圏内の 1 点での観測という限界がある。一方、地球磁力線に沿って電流が流れやすいという性質から、磁気圏の電位はそのまま電離圏での電位として観測することが可能であるために、HF レーダーによる電離圏電場の観測が重要となる。King Salmon レーダーは、2001 年 7 月に建設され、各国の HF レーダーとともに SuperDARN レーダー網の一翼を担っている。一方、電磁気エネルギーの伝送は、電場と磁場のベクトル積である Poynting flux で表されるために、電場の観測と同時に、磁場の観測が重要である。特に、磁気赤道での磁場観測は、低緯度電離圏や内部磁気圏への電場の侵入をモニターする手段として有効である。

本稿では、Yap と沖縄の磁力計により観測された赤道電離圏の電場と、King Salmon レーダーを主に SuperDARN レーダー網で観測された極域電場の二次元パターンを比較した。この結果、昼間赤道で正の磁場変動を引き起こす東向きの電場が、極域電離圏の大規模な 2 渦タイプのプラズマ対流に対応し、赤道の負の磁場変動に対しては、極域電離圏の低緯度側に、新しいタイプの対流渦が発生することを見いだした。極域の低緯度側を視野に持つ King Salmon レーダーにより得られた成果である。この対流渦の向きは、2 渦タイプで予想される反時計回りと逆向きであるために、対流電場を打ち消す方向を持つ遮へい電場である可能性が高い。これを検証するためには、名古屋大

学太陽地球環境研究所が建設した北海道 HF レーダーや、磁気圏環電流のシミュレーションとの相関解析が有効である。実際、北海道レーダーは、King Salmon レーダーの視野のすぐ低緯度側の中緯度を観測し、時計回り対流渦の低緯度側を観測した。また、Ebihara and Ejiri (2000) の環電流シミュレーションを実施したところ、遮へい電場をもたらす領域 2 型の沿磁力線電流が発達したことが判明し、HF レーダーにより見いだされた時計回り対流渦が遮へい電場の発達を示すことが確認された。このように、HF レーダーと磁力計による電場と磁場の観測及びシミュレーションを総合的に解析することにより、宇宙天気を決定する電磁気エネルギーの伝送機構の解明が大きく進展すると期待される。

謝辞

King Salmon レーダー建設と運用において、アラスカプロジェクトのリーダーとして、アラスカ大学との折衝などプロジェクトの遂行を円滑に進めた村山泰啓氏に感謝します。Yap と沖縄の磁力計観測は、それぞれ NOAA ヤップ気象台と琉球大学演習林のご助力により実施できたことを感謝します。高等研究院の海老原祐輔氏には環電流と遮へい電場に関する貴重な示唆をいただいたことを感謝します。

参考文献

- 1 Araki, T., "Global structure of geomagnetic sudden commencements", *Planet. Space Sci.*, 25, 373-384, 1977.
- 2 Burke, W. J., N. C. Maynard, M. P. Hagan, R. A. Wolf, G. R. Wilson, L. C. Gentile, M. S. Gussenhoven, C. Y. Huang, T. W. Garner, and F. J. Rich, "Electrodynamics of the inner magnetosphere observed in the dusk sector by CRRES and DMSP during the magnetic storm of Jun". 4-6, 1991, *J. Geophys. Res.* 103, A12, 29,339-29,418, 1998.
- 3 Ebihara, Y. and M. Ejiri, "Simulation study on fundamental properties of the storm-time ring current", *J. Geophys. Res.*, 105, 15843-15859, 2000.
- 4 Greenwald, R. A., Baker, K. B., Dudeney, J. R., Pinnock, M., Jones, T. B., Thomas, E. C., Villain, J.-P., Cerisier, J.-C., Senior, C., Hanuise, C., Hunsucker, R. D., Sofko, G., Koehler, J., Nielsen, E., Pellinen, R., Walker, A. D. M., N. Sato, and Y. Yamagishi, DARN/SuperDARN, "A global view of high-latitude convection", *Space Sci. Rev.*, 71, 763-796, 1995.

- 5 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.
- 6 Huang C.-S., J. C. Foster, and M. C. Kelley, "Long-duration penetration of the interplanetary electric field to the low-latitude ionosphere during the main phase of magnetic storms", *J. Geophys. Res.*, 110, A11309, doi:10.1029/2005JA011202, 2005.
- 7 Kikuchi, T., T. Araki, H. Maeda, and K. Maekawa, "Transmission of polar electric fields to the equator", *Nature*, 273, 650-651, 1978.
- 8 Kikuchi, T. and T. Araki, "Horizontal transmission of the polar electric field to the equator", *J. Atmos. Terr. Phys.*, 41, 927-936, 1979.
- 9 Kikuchi, T., "Evidence of transmission of polar electric fields to the low latitude at times of geomagnetic sudden commencements", *J. Geophys. Res.*, 91, 3101-3105, 1986.
- 10 菊池 崇, "宇宙天気予報計画", 通信総合研究所季報, 35, 特7, 3-11, 1989.
- 11 Kikuchi, T., H. Lühr, 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.
- 12 Lyons, L. R., D.-Y. Lee, R. M. Thorne, R. B. Horne, and A. J. Smith, "Solar wind-magnetosphere coupling leading to relativistic electron energization during high-speed streams", *J. Geophys. Res.*, Vol.110, No.A11, A11202 10.1029/2005JA011254 11, Nov. 2005.
- 13 Maruyama, T., G. Ma, and M. Nakamura, "Signature of TEC storm on 6 November 2001 derived from dense GPS receiver network and ionosonde chain over Japan", *J. Geophys. Res.*, 109, A10302, doi:10.1029/2004JA010451, 2004.
- 14 Motoba, T., T. Kikuchi, H. Lühr, H. Tachihara, T.-I. Kitamura, K. Hayashi, and T. Okuzawa, "Global Pc5 caused by a DP2-type ionospheric current system", *J. Geophys. Res.*, 107, A2, 10.1029/2001JA900156, 2002.
- 15 Nishida, A., N. Iwasaki, and T. Nagata, "The origin of fluctuations in the equatorial electrojet; A new type of geomagnetic variation", *Annales Geophysicae*, 22, 478-484, 1966.
- 16 Nishida, A., "Coherence of geomagnetic DP2 magnetic fluctuations with interplanetary magnetic variations", *J. Geophys. Res.*, 73, 5549-5559, 1968.
- 17 Nishimura, Y., A. Shinbori, T. Ono, M. Iizima, and A. Kumamoto, "Evolution of ring current and radiation belt particles under the influence of storm-time electric fields", *J. Geophys. Res.*, Vol.112, No.A6, A06241 10.1029/2006JA012177, 2007.
- 18 Ruohoniemi J. M., Baker KB, "Large-scale imaging of high-latitude convection with Super Dual Auroral Radar Network HF radar observations", *J. Geophys. Res.*, 103, 20797-20811, 1998.
- 19 Shinbori, A., Y. Nishimura, 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*, 57, 643-659, 2005.
- 20 Tsunomura, S. and T. Araki, "Numerical analysis of equatorial enhancement of geomagnetic sudden commencement", *Planet. Space Sci.*, 32, 599-604, 1984.
- 21 Tsurutani, B., et al., "Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields", *J. Geophys. Res.*, 109, A08302, doi:10.1029/2003JA010342, 2004.
- 22 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.

- 23 Wygant, J., D. Rowland, H. J. Singer, M. Temerin, F. Mozer, and 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, 10.1029/98JA01436, 1998.



菊池 崇

名古屋大学太陽地球環境研究所教授
理学博士
宇宙天気

橋本久美子

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准教授
博士（理学）
磁気圏電離圏物理学

篠原 学

九州大学 博士（理学）
太陽地球系物理学



野崎憲朗

電磁波計測研究センター宇宙環境計測グループ主任研究員
電離層観測

Bill Bristow

アラスカ大学フェアバンクス校准教授
Ph.D.
超高層物理学

オーロラ・電離大気—中性大気相互作用の観測実証—
アラスカ大学フェアバンクス校准教授による宇宙天気の研究