

2-2-2 HF レーダーを用いたジオスペース・センシング

2-2-2 *Geospace Diagnostics by HF Radars*

堀 智昭

HORI Tomoaki

要旨

宇宙天気研究における重要課題である、磁気圏-電離圏対流の大規模構造のモニタリングについて、広い視野での2次元フローパターンが得られる SuperDARN HF レーダー網は非常に有効である。ここではアラスカ King Salmon レーダーと磁力計ネットワークのデータを用いて、夕方～夜にサブオーロラ帯で観測される東向きの流れを伴う電離圏対流のフロー・シアについて詳細な解析を行い、このフロー・シアが、惑星間空間磁場変動などに伴い、領域-1 沿磁力線電流と領域-2 沿磁力線電流の均衡が変化した時に過渡的に現れる対流パターンであることを示す。この結果は、電離圏の大規模対流構造が、沿磁力線電流が持ち込む電場の微妙なバランスによって大きく変動していることを示唆している。

SuperDARN HF radars are powerful tools to diagnose large-scale plasma convection in the Geospace. Utilizing the King Salmon radar and the magnetometer chain data, we show that transient ionospheric flow shears appearing at sub-auroral latitudes in the dusk to evening sector are convection patterns caused by the transient imbalance between the Region-1 and Region-2 field-aligned currents.

[キーワード]

電離圏対流, 対流電場, SuperDARN レーダー, フロー・シア, 磁力計
Ionospheric convection, Convection electric field, SuperDARN radar, Flow shear, Magnetometer

1 はじめに

1.1 宇宙天気研究と国際協力

1970年代より始まった人類の宇宙進出の波はとどまるどころを知らず、現在では数百機の通信・観測その他の人工衛星が日々運用され、さらに国際有人宇宙ステーションでは人が数カ月にも及ぶ長期滞在をするまでになっている。近年、民間の宇宙旅行会社が設立されたというニュースは、記憶に新しい。宇宙は、技術者、研究者などの一部の人間に対してだけでなく、ついには一般の民間人にとってもその門戸を開くことになった。これから人類の、宇宙への依存が高まっていくなかで、宇宙天気現象の基礎研究や、その応用である宇宙天気予報に関するニーズも益々高まっていくことが予想される。

このような時代背景のなか、宇宙天気研究は今や世界的潮流となっている。1988年、情報通信研究機構の前身である通信総合研究所によって、世界に先駆けて開始された宇宙天気研究は、その後1990年代に入ってから米国が国家プロジェクトとして実行を開始した。その後、ヨーロッパ宇宙機構(ESA)でも開始され、最近では中国、韓国などのアジア諸国でも宇宙天気に関する本格的な研究体制が整えられ、活発な研究が行われている。またそのような国際的な研究活動を束ねるような計画も実施されており、2004年から5年計画で実施され多くの成果を上げたCAWSES (Climate And Weather of the Sun-Earth System)も、2009年よりCAWSES-IIというプロジェクトに生まれ変わり、CAWSESと同じく宇宙天気に関する国際共同研究計画として推進されている。

1.2 磁気圏-電離圏対流と国際 SuperDARN 計画

宇宙天気では、地球上層大気(中間圏・電離圏・熱圏)から近地球の宇宙空間に跨る広大なジオスペースがその研究対象であり、そこで起こる様々な現象を観測しようとする、上で述べたような国際協力、国際共同計画が本質的に必要となってくる。そのような研究プロジェクトのなかの1つが、国際 SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) 計画である[1]。この計画では、同一の機能を持つ大型の短波(HF)レーダーを世界各地に建設し、そこで観測されるデータを国際コミュニティで共有することで、宇宙天気に関する研究に大きな寄与を果たしている。現在では南北両半球合わせて20機を超えるレーダーが稼働しており、図1ではそのうちの北半球に展開されている SuperDARN レーダーの視野の位置を示す。SuperDARN レーダーは短波帯の電波を電離圏に照射し、そこから反射されたエコーを受信することで、主に電離圏 F 層でのプラズマの動きを計測することができる。その視野は方位角が50°、計測可能範囲は3000 kmにも及び、この広い視野を活かして、電離圏プラズマの流れ、いわゆるプラズマ対流の2次元構造を得ることが可能である。

電離圏対流の実態は電離圏電子の電場ドリフトなので、対流の観測をすることで電離圏に印加さ

れている対流電場を知ることができる。この電場の源であるダイナモは、地球磁気圏と太陽風との相互作用によって駆動されており、沿磁力線電流によって電離圏に持ち込まれたものである。つまり電離圏を巨大なスクリーンとして、そこでの電場を計測することで、磁力線に沿って電離圏に投影された磁気圏全体の対流構造を知ることができるわけである。SuperDARN は複数レーダーによるネットワーク観測により、特にこの対流の大規模構造をモニターすることに威力を発揮する[2][3]。

極域電離圏の大規模対流構造は、磁気圏対流が電磁的に電離圏に投影されたものと考えられ、これまで多くの研究がなされてきた。1980年代以前には現在のような広域をカバーするレーダー・衛星による電場の観測はなく、多くの研究では、もっぱら全世界に展開していた磁力計のデータから等価電流系を導出し、それが Hall 電流であるという仮定($\mathbf{j} \propto |\mathbf{B} \times \mathbf{E}|$)から電気ポテンシャル構造を推定していた。Nishida ら[4]は Disturbance of Polar Field 2 (DP 2) 電流系が図2に示すような2つの渦構造から成っていることを示し、さらに Nishida [5]ではこの電流系の強度変動(DP 2 fluctuations)が惑星間空間磁場(Interplanetary Magnetic Field: IMF)の南北向き成分の変動と良い相関があることを示した。

その後、人工衛星による電場観測や、SuperDARN による電離圏プラズマの電場ドリフト観測が行わ

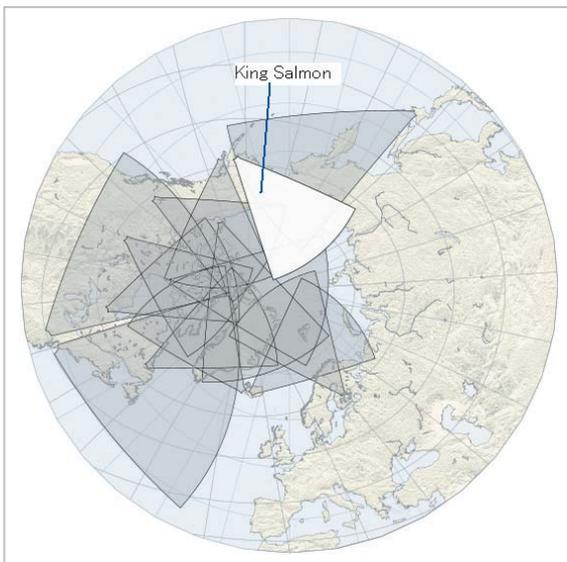


図1 北半球の SuperDARN レーダーの視野扇形が各レーダーの視野を表す。

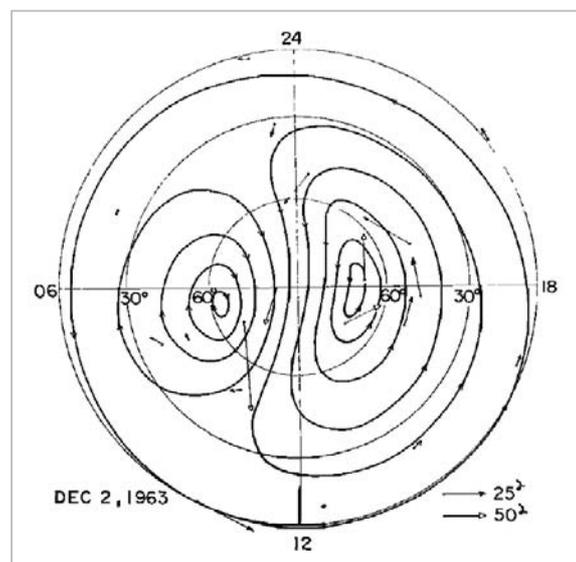


図2 地磁気観測から同定された DP2 電流系低緯度まで広がる2渦構造になっていることがわかる。

れるようになり、電場の観測に基づく電離圏大規模対流構造が得られるようになった。図3に SuperDARN 観測を統計することで得られた平均的な対流構造を示す。図3に示されているように、夕方側の磁気緯度 60-70°付近は夕方側対流渦のうち夜側から昼間側に戻る部分に対応し、通常この領域では西向きの電離圏対流が支配的である。

しかしながらこの領域での電離圏対流が必ずしも西向きとなっているわけではなく、短時間ではあるが、平均的な対流の向きと正反対の東向きの流れが観測されることがある。この東向きの流れはオーロラ帯(通常は緯度 65°以上)より低い緯度に形成されることが多いため、そのほとんどがオーロラ帯かそれより高緯度側に視野を持つ既存の SuperDARN レーダーでは頻りに観測することができない。興味深い現象であるにも関わらず、この東向きプラズマ流がグローバルな流れの一部なのか、それとも局所的なものなのか、現状では明らかになっていない。

SuperDARN レーダーの中でも、情報通信研究機構が運用する King Salmon レーダーはこの現象を観測するのに最適な位置にあると言える。2001 年より SuperDARN の一員として稼働し始めた King Salmon HF レーダー (KSR) は、最近稼働し

始めた中緯度レーダー群を除けば、既存の SuperDARN レーダーの中で最も緯度が低い範囲を観測でき、またレーダーのビームの方向がオーロラ帯・サブオーロラ帯でちょうど西を向いているため、Doppler velocity として東西方向の電離圏プラズマ流を直接計測することが可能である。実際に KSR によって、しばしばこの過渡的な東向き対流が観測されており、またこの東向き対流のうち、高緯度側に反対の西向き対流を伴うことで東西方向のフロー・シア(逆向きのプラズマ流が隣接した構造)を形成している例が多く見つかっている。この KSR がカバーする緯度・経度帯には、同じく情報通信研究機構が展開する NICT-SWM (Space Weather Monitoring) 磁力計および RapidMag 磁力計 (<http://kogma.nict.go.jp/cgi-bin/geomag-interface/>) が広範囲で地磁気変動を計測しており、レーダーと複数の磁力計を用いた多角的な研究を実現できる環境が整っている[6]。このような充実した研究リソースを用いることにより、低緯度側に東向き対流を伴って出現するフロー・シアについて、地上・衛星観測と合わせながらその特性、発生メカニズムに関する研究を行ったので、本稿ではその結果について報告する。

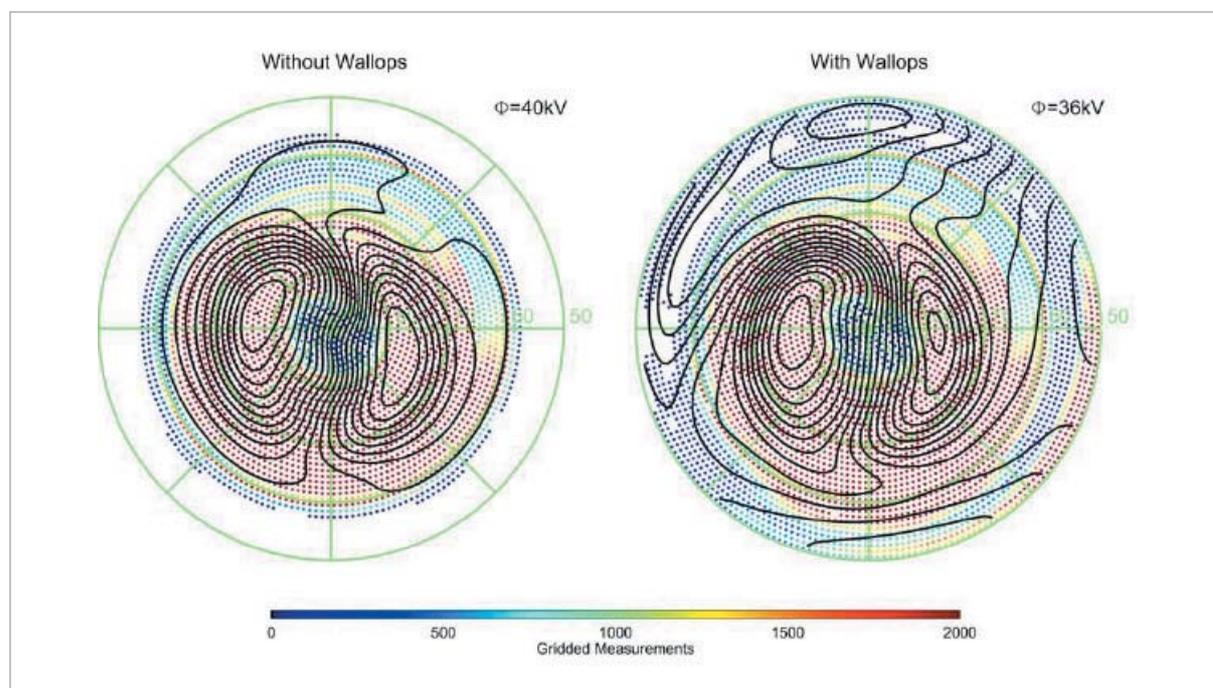


図3 SuperDARN 観測から求めた平均的な対流パターン

左図・右図はそれぞれ、Wallops レーダーによる中緯度観測データを含めずと、それを含めた結果。

2 事例研究

通常西向き対流の緯度帯において、実際に東向き対流が King Salmon レーダーによって観測された例を以下に示す。図4は2007年8月10日09:00 UTにおけるKSRの視野図中扇形の内側、およびRapidMag 磁力計(PBK, TIK, NOK, AMD)、NICT-SWM 磁力計(KSM, STC, PTK)の位置(図中オレンジの点)を示している。この時RapidMag 磁力計は午後側の広い範囲の地方時に渡ってオーロラ帯をカバーしており、DP2電流系の強度変動(大規模対流の強度変動に対応)をモニターすることができる位置にあった。一方KSRはこの時、視野の中を扇形の弧の方向に16本のbeam (beam00-beam15)、さらに各beamについて動径方向に75のrange gateに分割して観測していた。通常2分で全視野をスキャンするので、電離圏F領域プラズマの水平速度場を2分毎に得ることができる。特に赤線で示したbeam02はPBK、TIKのほぼ真上を通りほぼ西向きとなっていることから、磁気緯度 $\sim 62\text{--}64^\circ$ 付近の東西方向のプラズマ速度をモニターすることができる。

図5上図は時刻6-11 UTでbeam02に沿って観測された視線方向のプラズマ速度の変動をカラーコンターで示している。有効なエコーが返ってきているRange gate 10-30付近(シベリア東岸～アラスカ西岸上空)を見ると、プロットされている時間帯の大部分で黄色から赤色となっており、レーダーから離れる向き、つまり大規模対流の平均パターンから予想されるように西向きプラズマ流が卓越していたことがわかる。しかし $\sim 08:10$ UT、 $\sim 09:00$ UTと2回ほどその西向きプラズマ流が10分程度中断し、さらにそこではコンターが黄緑色となっていることから、プラズマ流の向きが反転して弱い東向きとなっていることが観測されている。

また下図には同時刻にPBK、TIK、NOKで観測されていた地磁気H成分(水平北向き成分)の変動の様子を示している。図中の赤緑青の実線がこの日の観測値、灰色の線は地磁気活動が極めて静穏だった日(同年8月5日)の同時刻の観測値を表している。地方時が異なる3つの観測所間で非常にコヒーレントな変動が現れていることから、これらの地磁気変動が大規模対流を反映したDP2

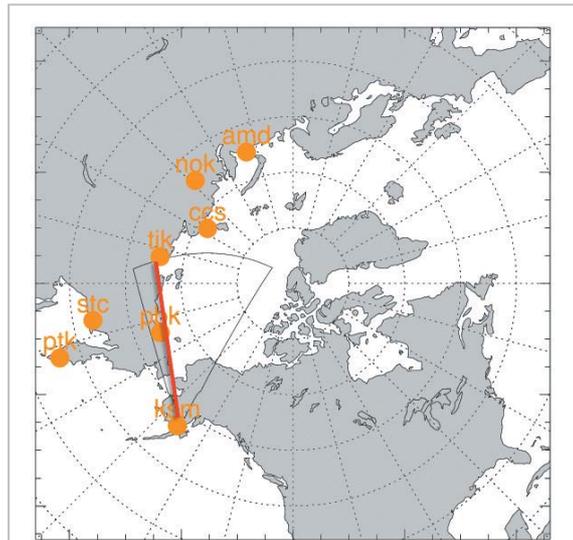


図4 2007年8月10日 09:00 UT

King Salmon レーダー(KSR)、NICT-SWM 磁力計および RapidMag 磁力計の配置。赤線はKSRの2番目のbeamの位置を表す(Altitude Adjusted Corrected Geomagnetic Coordinates : AACGM 座標系)。

電流系の変動をとらえていると考えることができる。この日H成分は ~ 8 UT頃から基本的に増加するセンスにあるが、 $\sim 08:10$ 、 $\sim 09:00$ UT頃に一時的に減少に転じている。H成分増加は東向き電離圏電流(Hall電流を仮定すれば西向きプラズマ対流と同値)の増加、つまりDP2電流系(大規模対流)の発達を意味するので、H成分増加と西向きプラズマ流が観測されることは矛盾しない。また上記の東向きプラズマ流はDP2電流系が減衰するタイミングで見えていることになり、東向き流を西向き流の減衰と捉えれば、DP2電流系が弱まり大規模対流が弱まっていると予想される時にそれが実際にレーダーで観測されているということになる。

以上に示したのはレーダーの特定のbeamに沿って観測されたプラズマ流の1次元的空間構造であるが、KSRでは同様の観測を視野内の別のbeamでも行うことにより、緯度-経度の2次元平面での速度場を得ることができる。その速度場の時間変化を示したのが図6である。ここでは2回目に東向き流が見えた時間帯($\sim 09:00\text{--}09:15$ UT)を挟む36分間について、4分ごとの速度場のスナップショット(スナップショット自体は2分スキャンから導出)を示している。これを見ると明らかなように、磁気地方時(Magnetic Local Time :

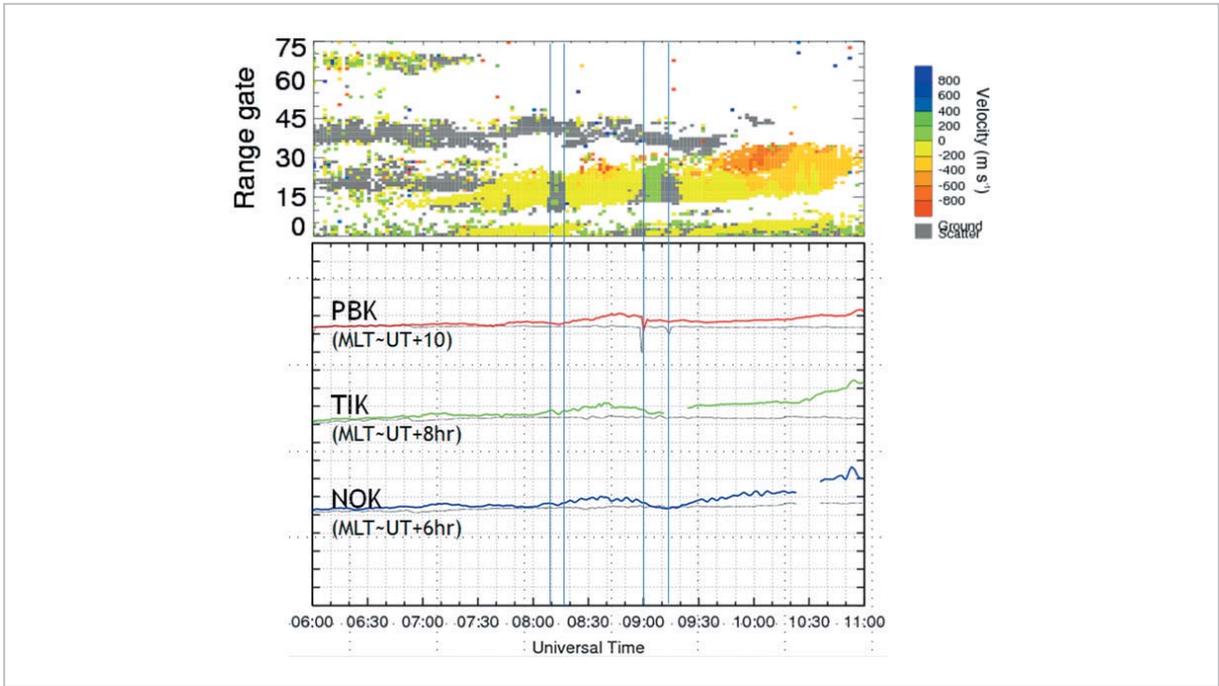


図5 KSR beam02 で観測された Doppler velocity と地磁気変動との比較

KSR でレーダーに向かう方向の Doppler velocity (上図) が 2 回 (縦線で挟まれた時間帯) 観測されており、その時同時に地磁気 (下図、単位は 50 nT/div) から DP2 電流系が減衰していることがわかる。

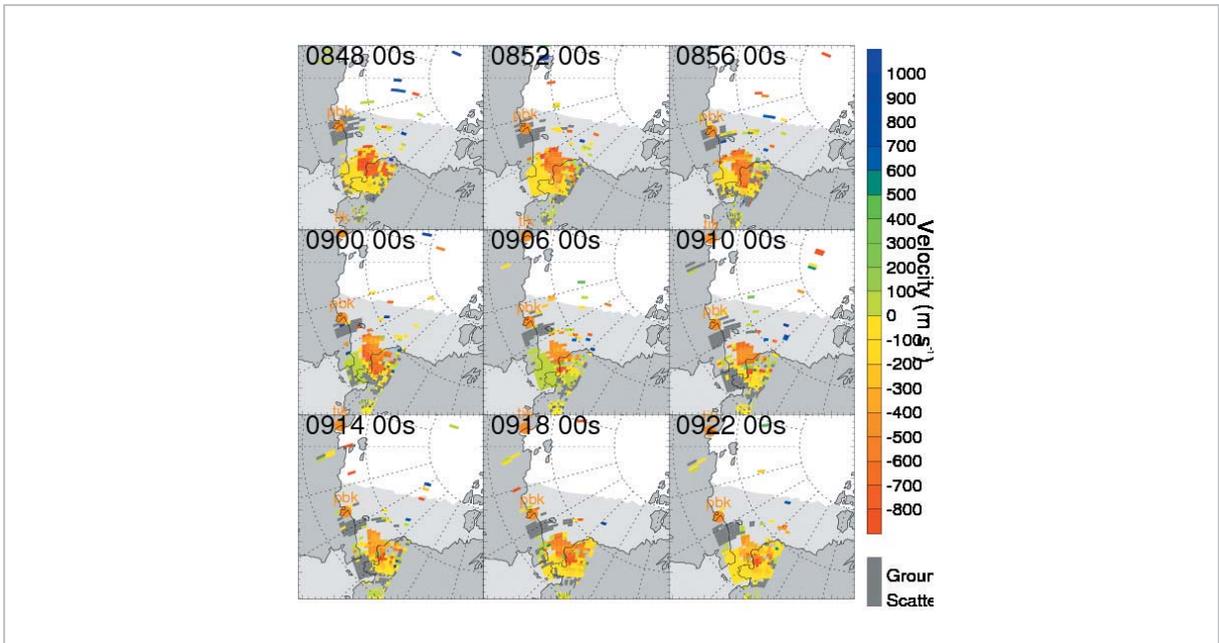


図6 2次元プラズマ流構造の時間変化

KSR で観測された電離圏プラズマ流の 2 次元構造と、その時間変化。

MLT) ~ 21 h より西側では図 5 で見えていた東向き流は緯度にして ~ 64° より低緯度側に分布しており、その高緯度側では前後の時刻と同じ西向き流が続いている。つまり高緯度側で西向き流、

低緯度側で東向き流となるようなフロー・シアが形成されていることになる。

このフロー・シアの緯度構造を詳しく調べるために、観測される視線方向のプラズマ流を磁気経

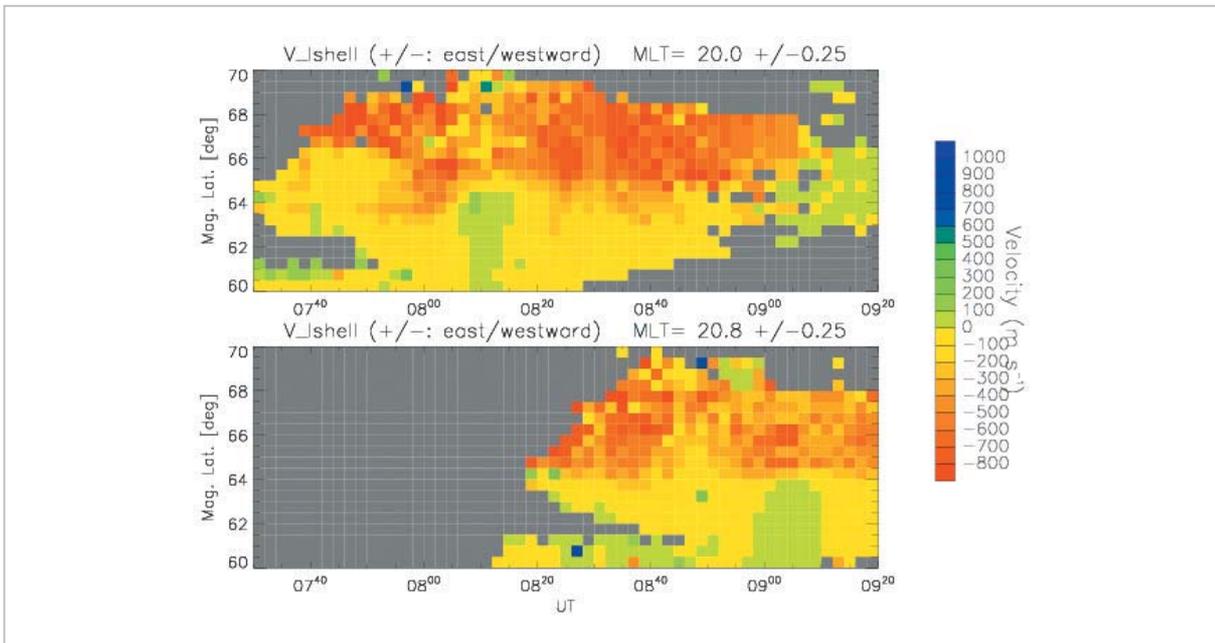


図7 L shell 方向のプラズマ流速の緯度構造

(上図) 磁気地方時 = 20.0 h ± 0.25 h の範囲で観測された Doppler velocity が磁気経度方向のプラズマ流速の視線方向への射影であると仮定して、そこから求めた磁気経度方向(L shell 方向)のプラズマドリフト速度の緯度構造。(下図) 上図と同様、ただし磁気地方時 = 20.8 h ± 0.25 h で観測されたもの。

度方向(つまり L-shell に沿った方向)のプラズマ流の速度に換算して、その経度方向の速度の緯度依存性を示したのが図7である。ここでは真のプラズマ速度は経度方向にあるとして、それを視線方向へ射影した速度成分が実際のレーダーの観測速度となると仮定した。すなわち真のプラズマ速度および視線方向に射影された速度をそれぞれ V_{Lshell} 、 V_{LOS} 、beam の視線方向と経度方向とのなす角を θ として、ここでは以下のような式から V_{Lshell} を計算した。

$$V_{Lshell} = V_{LOS} / \cos \theta \quad (1)$$

図7上のパネルでは、MLT = 20.0 h ± 0.25 h、下パネルでは MLT = 20.8 h ± 0.25 h の範囲で観測されたプラズマ速度から V_{Lshell} の緯度構造を求めている。この図からわかるように、1回目のフロー・シアは ~ 08:05-08:15 UT に磁気緯度 ~ 64.5° に形成されており、2回目のフロー・シアは 08:58-09:15 UT に磁気緯度 ~ 64.0° 付近に形成されている。またフロー・シアの形成・消滅に伴ってフロー・シアの低緯度側では西向き→東向き→西向きとプラズマ流の向きが変わるが、この速度の反転はわずか数分で起こっていることが図より見てとれる。さらに shear の極性および

強さの観点では、どちらのフロー・シアも高緯度側が ~ 300-500 m/s の西向き流、低緯度側が < ~ 100 m/s の東向き流となっており、shear の極性からそこには下向き沿磁力線電流 (field-aligned current : FAC) が流れ込んでいることが予想される。また IGRF モデルによれば、この付近での地球主磁場の大きさは ~ 60000 nT 程度なので、このフロー・シアでは高緯度側で ~ 24 mV/m の極向き電場であったものが、緯度にしてわずか ~ 1° ほど低緯度に行ったところで ~ 3 mV/m の赤道向き電場となっており、電場の急な空間勾配がそこにあることを示唆している。

3 統計解析

前章で示した事例解析では、夕方側に見えるフロー・シアは DP2 電流系が減衰するタイミングで磁気緯度 ~ 64° 付近に形成されていた。このような結果が、他のフロー・シアに対してどれくらい普遍的な特性なのかを調べるために、統計解析を行った。まず 2007 年 4 月 ~ 2008 年 7 月までの全ての KSR データを参照して、MLT ~ 15 h-22 h の範囲でフロー・シアが確認できた例を全て同定した。さらにフロー・シアの観測と同時に ACE

衛星により太陽風・IMF データが得られ、かつ高緯度の地磁気活動を把握するために必要な RapidMag 地磁気データおよび THEMIS-GMAG 地磁気データが利用可能であるような例のみを抽出すると、この期間で合計 26 例のフロー・シアイベントを得ることができた。

図 8 は、得られた 26 例のフロー・シアイベントについてそのフロー・シアの位置を緯度-経度マップ上に示したものである。KSR の視野が MLT 方向にある程度の幅があり、通常フロー・シアもある MLT 幅にわたって見えるため、図 8 では 1 つのイベントで見たフロー・シアを 1 つの折線としてプロットしてある。結果としてはフロー・シアの緯度は大体～63-68°の範囲に分布しており、またほとんどのイベントが MLT ～18-21 h で見ついている。ただしこの分布は KSR で有効な電離圏エコーが観測され易い範囲とほぼ一致しているため、KSR の実効的な観測領域では、おおよそこれくらいの範囲に分布しているということしか言えない。したがってフロー・シアが KSR の視野の外で発生している可能性を否定していないことに注意する必要がある。

次に各フロー・シアイベントについて、同時に起こっていた地磁気活動が何であったかを RapidMag および THEMIS-GMAG 地磁気データを参照して調べ、またその時の IMF 変動について

も調べ、それらを表 1 にまとめた。1 つ重要な結果として、フロー・シア全 26 例中 8 例(～31%)は DP2 電流系の減衰に付随して発生するが、むしろその倍となる 16 例(～62%)は DP2 電流系減衰ではなくサブストームの期間中に起こっていることがわかった。また DP2 電流系減衰に伴って起こるフロー・シアの例では 1 例を除く他 7 例で南向き IMF の減少または IMF 北転が同時に起こっており、これは DP2 電流系減衰と矛盾しない。一方、サブストーム中に起こる例については、IMF の変動の明瞭な特徴は見受けられなかった。また、ここでは示していないが、サブストームの相についても調べた結果、サブストームの開始(onset)と同時に発生する場合や、爆発相(expansion phase)、または回復相(recovery phase)中に見られる例もあり、どれかの相に限定されるような顕著な相依存性を見出すにはいたらなかった。

次にフロー・シアとオーロラオーバルとの位置関係を調べるために、フロー・シアイベントの中で NOAA/POES 衛星 (<http://www.oso.noaa.gov/poes/>) および Metop-2 衛星 (<http://www.esa.int/esaLP/LPmetop.html>) による降下粒子の同時観測が得られているものを抽出した。極域での降下粒子の分布は複雑な空間構造を持ち、かつ時間変化も大きい場合も多いことから、ここでは (1) フロー・シアが KSR で観測された時間帯かその前後 5 分以内に、(2) フロー・シアが観測された MLT 範囲およびその東西端から 0.5 h MLT 以内で、NOAA/POES または Metop-2 の観測が得ら

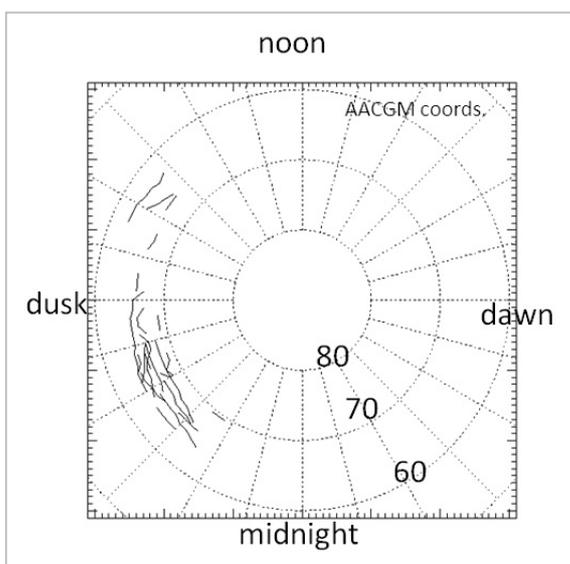


図8 フロー・シアが観測された場所

表1 フロー・シア発生時の地磁気活動および IMF 変動の対応表

フロー・シア発生に DP2 の減衰およびサブストームが付随していたかどうか、またその時の IMF 変化との対応についてまとめたもの。

	IMF N-turning or SIMF decrease	IMF S-turning or SIMF increase	Unclear variation	TOTAL
DP2 decay	7	0	1	8
With substorm	2	2	12	16
(unclear)	0	0	2	2
TOTAL	9	2	15	26

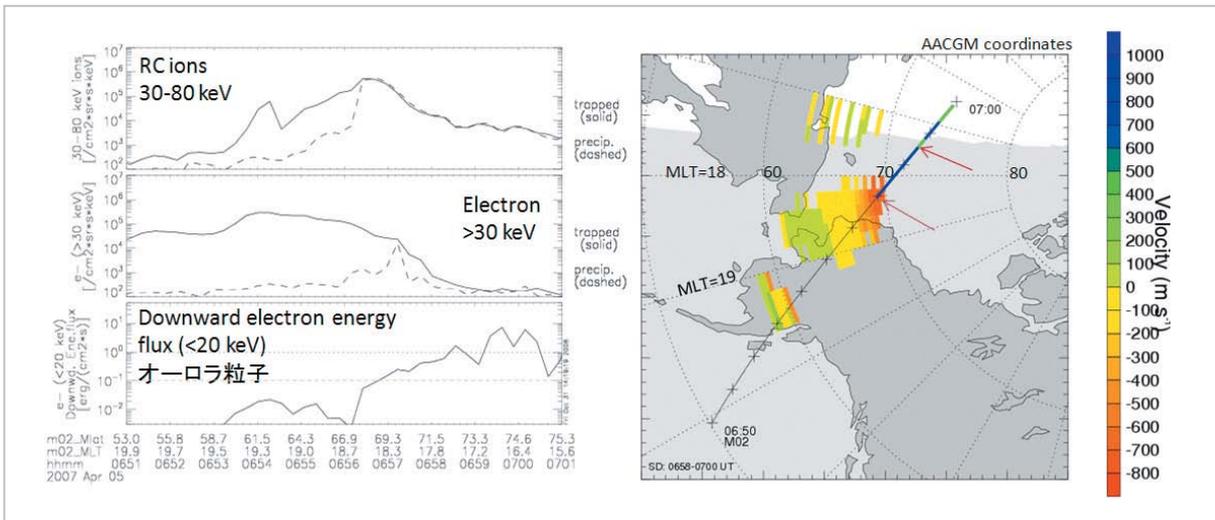


図9 Metop-2 衛星によるオーロラオーバルの観測とフロー・シアの位置関係

(左図) 2007年4月5日06:51-07:01 UTにMetop-2衛星がアラスカ上空で観測した30-80 keVのエネルギーを持つ捕捉・降下イオン(上パネル)、30 keV以上の捕捉・降下電子(中パネル)、および20 keV以下の降下電子によるエネルギーフラックス(下パネル)。(右図) その時のMetop-2の軌道。赤矢印は、軌道上でそれぞれ降下電子エネルギーフラックスが0.1(軌道上の青の太線)、1.0(緑の太線) [erg/cm² · str · keV · sec]を初めて超えた位置を表している。また同時にKSRによって観測されていたL shell方向の電離圏プラズマドリフト速度をカラーコンターで示している。

れている例のみを解析した。このように空間的にも時間的にも非常に近接した同時観測が得られたフロー・シアイベントは全26例中12例であった。その1例を図9に示す。左図の上、中、下パネルはそれぞれ2007年4月5日06:51-07:01 UTにMETOP-2が観測した30-80 keVイオン、30 keV以上の電子および20 keV以下の降下電子によるエネルギーフラックスを示している。この時Metop-2は高度約850 kmで北半球夕方側を低緯度側から高緯度側に向かって飛行していた。下パネルからわかるように、降下電子エネルギーフラックスが~06:56 UTから急激に増加しており、~06:56:30 UT(磁気緯度~68°、MLT~18.3 h)に降下電子エネルギーフラックスが0.1 erg/cm² · str · keV · sec、さらに~06:58:30 UT(磁気緯度~72°、MLT~17.4 h)で可視オーロラを作るために必要な経験的なフラックス値1.0 erg/cm² · str · keV · sec^[7]を超えており、その辺り(磁気緯度~68-72°)で衛星は電子オーロラオーバル上空に達したと考えられる。右図はその時の衛星の軌道と、06:58-07:00 UTに観測されたフロー・シアの様子を表している。ただしフロー・シアはこの2分間のみでなく、それを含む~06:50-07:10 UTの間、ずっと観測されていた。この時オーロラオーバルの低緯度境界は低く

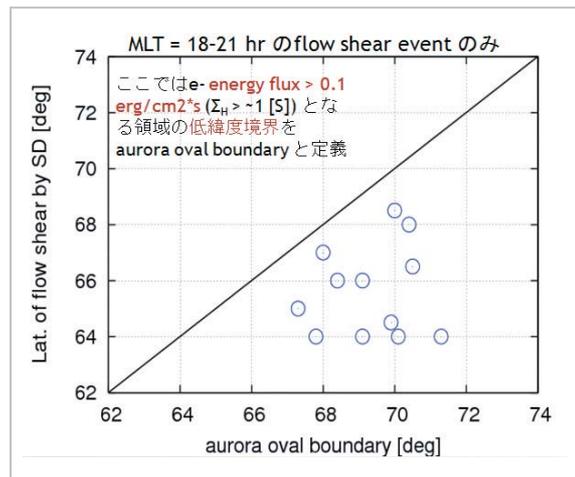


図10 フロー・シアの緯度とオーロラオーバルの下限緯度との比較

flow shearの緯度と、NOAAおよびMetop衛星によって観測されたオーロラオーバルの低緯度境界の位置との比較。

見積もっても磁気緯度~68°であり、したがって~65°付近であったフロー・シアはオーロラ帯の低緯度側、つまりサブオーロラ帯に形成されていたことがわかる。

このような解析を12例全てについて行い、フロー・シアの緯度とその時のオーロラオーバルの低緯度境界との関係を示したのが図10である。この結果より、フロー・シアはいつもオーロラ

オーバルより $\sim 1-6^\circ$ 低緯度のサブオーロラ帯に形成されることが明らかになった。またここでは示していないが、捕捉・降下イオンのフラックス比から決まるイオン isotropic boundary との比較も行っており、結果としてフロー・シアは 30-80 keV イオン isotropic boundary よりも $2-3^\circ$ 低緯度側にあることも明らかになった。つまりフロー・シアはサブオーロラ帯中の 30-80 keV の捕捉粒子が支配的な領域に形成されていることになる。

4 考察

今回観測された夕方側のフロー・シアは、一般的には以下に示すように領域-1 沿磁力線電流 (Region-1 Field-Aligned Current : 以下 Region-1 FAC) と領域-2 沿磁力線電流 (Region-2 FAC) [8] の相対的な強度変化の結果として理解することができる。概略図を図 11 に示す。南向き IMF が強まり磁気圏対流が強まるような状況 (図左) では、夕方側では時計回りの対流渦 (オレンジの矢印) を

駆動する電離圏電場をもたらす FAC、つまり上向き FAC (夕方側では Region-1 センス) が増大している。対流が増大することで夜側の内部磁気圏に粒子が注入され部分環電流 (partial ring current : PRC) が形成されていく [9]。この PRC が電流として閉じるために上向き FAC より低緯度の領域に下向き FAC (Region-2 センス、青い点線矢印) を作るはずだが、PRC が十分に発達しない段階では上向き FAC の電場による時計回りの対流渦が卓越し、結果として夕方側のオーロラ帯-サブオーロラ帯では西向きの流れ (黒い矢印) となる。しかしその対流を駆動していた南向き IMF が弱まったり IMF が北転すると (図右)、昼間側磁気圏境界での磁気再結合は急速に弱まるので、それに伴って上向き FAC やそれがもたらす電場によって駆動される時計回りの対流渦も急速に弱まると考えられる。そうすると、それまでに十分に PRC が発達していた場合、PRC が作る下向き FAC によって反対向きの電場ができ、その周りに反時計回りの対流渦 (青い実線矢印) が駆動されることになる。結果として、ある緯度を境に高緯

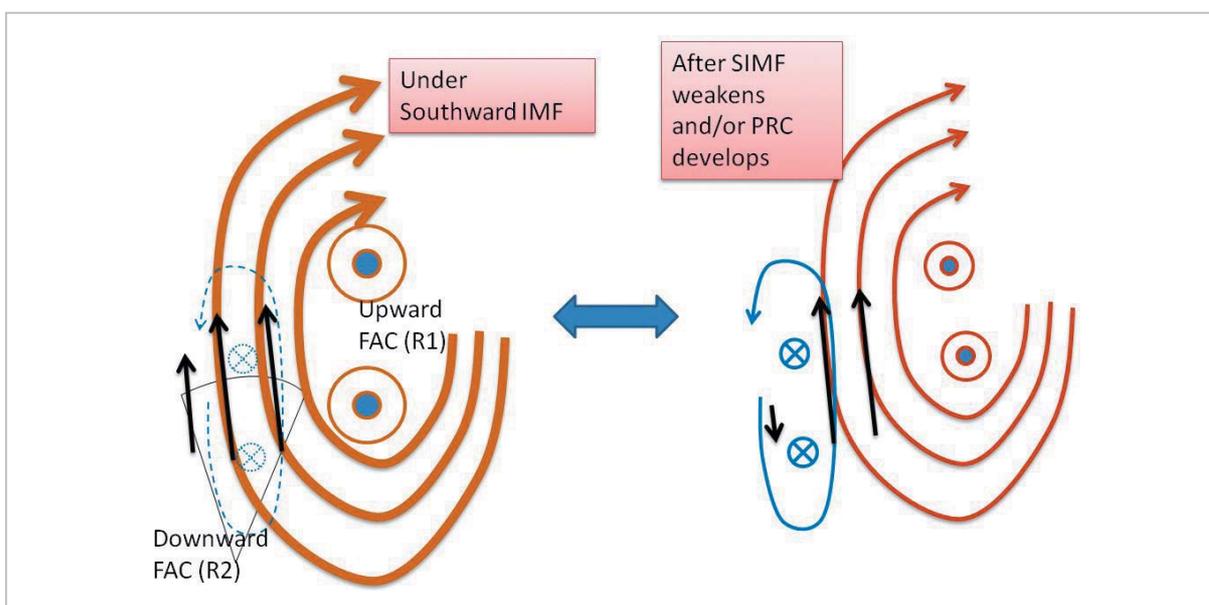


図 11 Region-1/Region-2 沿磁力線電流のバランス変動と対流パターン

南向き IMF の変動、および部分環電流 (PRC) の発達に伴う、Region-1/Region-2 FAC 起源の対流渦のバランスの変化について表した模式図。

度側で西向き流、低緯度側で東向き流となる(黒矢印)ことが予想される。これはまさに DP2 電流系が減衰している時の電離圏電場・FAC の状況を表しているが、上向き FAC (Region-1 FAC) に対して PRC 起源の下向き FAC (Region-2 FAC) が相対的に強くなるという意味では、サブストーム時(特に onset 後)でも同様の状態になっていると考えられる。つまりフロー・シアが DP2 電流系の減衰時とサブストーム時の両方で観測されるのは、どちらの現象も Region-1 FAC に対して相対的に Region-2 FAC を強めるセンスに働くからである、と理解できる。

Region-1 FAC に対して Region-2 FAC が強まり、それに伴って低緯度側に逆向きの電場が現れるという状況はまさに磁気嵐、サブストームの時に見られる過遮蔽^{[10][11]}と同じである。この過遮蔽については石川ら^[12]が IMAGE 地磁気チェーンのデータを用いた先行研究を行っているので、その結果と本研究の結果との比較について以下に議論する。

石川ら^[12]では、午後-夕方側の中緯度-オーロラ帯での DP2 電流を意味する東向き電流の増加(つまり H 成分の増加)中に、ある時刻を境に中緯度で逆に H 成分が減少に転じているようなイベントを遮蔽(または過遮蔽)が発生したと定義し、その時に H 成分の減少がどれくらい高緯度まで見えるかについて詳細に調べている。この H 成分の減少の高緯度限界の緯度と、本研究でのフロー・シアの緯度を重ねてプロットしたものが図 12 である。この地上磁場の変動が直上の電離圏の Hall 電流の変動を反映したものであるとすると、高緯度側：東向き電流、低緯度側：西向き電流という構造はそのまま高緯度側で西向き、低緯度側で東向きの電離圏対流に対応していると考えられる。つまりその境界は過遮蔽時に Region-1/Region-2 FAC に起因する電場・電流が支配的な領域が接する境界、とみなすことができる。すなわち、すぐ高緯度側に隣接する磁力計(ここでは H 成分は増加)との緯度差分の不確定性はあるもの、本研究で観測されたフロー・シアと本質的に同じものと考えることができる。同一のものであればどちらも同じような緯度に位置するはずであるが、結果は予想と異なり、KSR で同定したフロー・シアの緯度の方が、地磁気から同定した

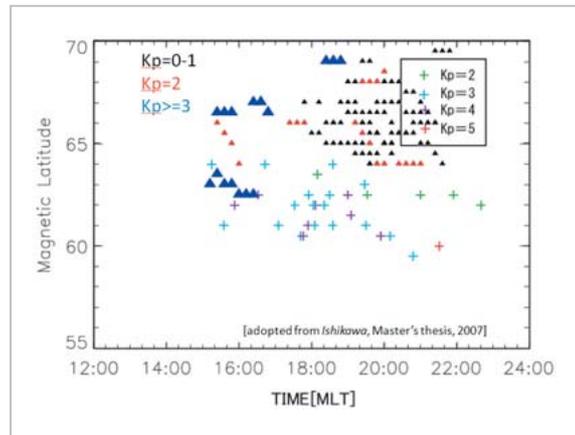


図 12 電離圏西向き電流の高緯度境界とフロー・シアの位置との比較

フロー・シア(図中三角)の位置(緯度・地方時)と、石川ら^[11]による IMAGE 地磁気チェーンから求められた電離圏西向き電流の高緯度境界の位置(図中プラス)との比較。同時刻の Kp 指数の値により色分けしてある。

過遮蔽時の西向き電流の高緯度限界より平均して 5° くらい高い。これは上述の磁力計の設置緯度間隔(最大~2°程度)より大きい。また石川ら^[12]と本研究では統計の母集団であるイベント時の Kp 指数に系統的な差はあるものの、例えばどちらの母集団にも共通する Kp = 2 のイベントのみを比較しても、やはりその差は歴然としている。

上述の緯度差は、直上の電離圏電流以外の電離圏電流による H 成分の変動を考慮することで理解できる。それを示すために、フロー・シアが形成された時の KSR 観測、およびそこから推測される電離圏電流、FAC、また地上磁場に現れる変動についてまとめたものが図 13 である。KSR により電離圏 F 領域では、ある緯度を境に高緯度側で西向き、低緯度側で東向きとなるようなプラズマ流(図中の緑色の記号)が観測されており、これは高緯度側(低緯度側)で極向き電場(赤道向き電場)があることを示している(赤の矢印)。この電場は磁力線に沿って E 領域に伝わり、そこで東西方向の Hall 電流(J_H)を流している。ただし KSR 観測から、Hall 電流を駆動する電場は高緯度側の方が低緯度側と比べて ~5 倍ほど大きく、また E 領域の Hall 電気伝導度も高緯度側のオーロラ帯の方がサブオーロラ帯に比べて数倍 ~10 倍以上大きいと考えられるので、結果としてオーロラ帯の東向き電流の方が低緯度側の西向き電流と比べて数十倍大きいことが予想される。そのよ

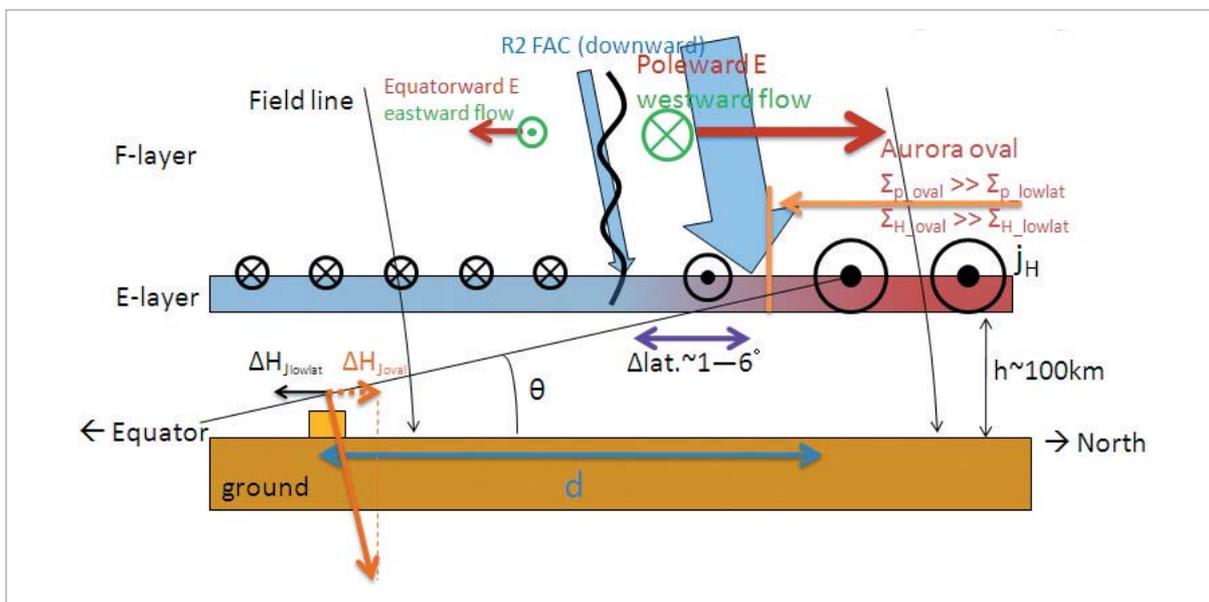


図13 電離圏電気伝導度が一様でない場合の、地上磁場変動と電離圏電流、および沿磁力線電流との関係

フロー・シア形成時の電離圏電場・プラズマ対流、沿磁力線電流、および電離圏ホール電流とそれが作る地上磁場H成分の変動について示した模式図。

うな状況ではサブオーロラ帯に位置する地磁気観測点(図左下のオレンジの長方形)では直上電離層電流によるH成分変動($\Delta H_{J_{lowlat}}$)だけでなく、水平方向に離れたところにあるオーロラ帯における電流に起因する効果($\Delta H_{J_{oval}}$)も無視できなくなる。またこの $\Delta H_{J_{lowlat}}$ と $\Delta H_{J_{oval}}$ は向きが反対なので、図のように極向き・赤道向き電場の境界(黒の波線)よりも低緯度にある観測地点において、見かけ上観測されるH成分変動がゼロとなるはずである。つまり地磁気H成分から決めた東西電流の境界は、極向き・赤道向き電場の境界より低緯度側になることが予想され、これは図12の結果とよく合っている。

このH成分変動の正負が反転する場所、つまり $\Delta H_{J_{oval}} = \Delta H_{J_{lowlat}}$ となる場所がどれくらい低緯度にずれるか(図中の“d”)を見積もると、電離圏のHall電流による地上磁場への影響に線電流近似を使えば、

$$\Delta H_{J_{lowlat}} \propto J_{H_{lowlat}}/h \quad (2)$$

$$\Delta H_{J_{oval}} \propto J_{H_{oval}} \sin \theta / \sqrt{(d^2 + h^2)} \quad (3)$$

ここで $J_{H_{lowlat}}$ $J_{H_{oval}}$ はそれぞれ地磁気観測地点直上の西向き電離圏Hall電流、およびオーロラ帯の東向きHall電流であり、hは電離層E領域の高度で、ここでは100kmと仮定する。Hall電流

の大きさは、電離圏でのHall電気伝導度 Σ_H と極向き・赤道向き電場の大きさ E_p との積に比例する($J_H \propto \Sigma_H \cdot E_p$)。本研究のKSR観測より、フロー・シアの高緯度側極向き電場と低緯度側赤道向き電場の大きさの比は典型的には5倍程度であることがわかっており、またオーロラオーバル内とサブオーロラ帯での Σ_H の比が5-10倍程度とすれば、 $J_{H_{oval}}/J_{H_{lowlat}} \sim 25-50$ となる。これを(2)、(3)式に代入して $\Delta H_{J_{lowlat}}/\Delta H_{J_{oval}} = 1$ とすれば、 $d \sim 500-700$ kmとなる。この距離は緯度幅 $\sim 4.5-6.3^\circ$ に相当し、図12で示された緯度差($\sim 5^\circ$)とよく合っている。つまり地上磁場H成分変動の正負が反転する場所が、高緯度にある強い西向き電流のために、直上の電離圏電流の向きが変わる位置より数度ほど低緯度側にずれているということは、定量的にも妥当であると言える。

次に、過去の研究によってわかっている夕方側の電離圏プラズマ流と、本研究で同定されたフロー・シアとの関係について議論する。図10の結果から、KSRで観測されたフロー・シアはオーロラオーバルから数度ほど低緯度のサブオーロラ帯に形成されていることがわかった。その時フロー・シアの高緯度側には西向きの速い($\sim 300-500$ m/s)プラズマ流があり、この西向き電流の低緯度部分もサブオーロラ帯に位置している

ことになる。特にサブストーム時にできるフロー・シアの場合、場所(緯度・MLT)、プラズマ流の速度の大きさの観点から、Subauroral Polarization Streams (SAPS)^[13]と同じものを見ていると考えられる。実際同じKSR、または他のSuperDARNレーダーでも同様の西向き流がSAPSまたはAuroral Westward Flow Channel (AWFC)として同定されている^{[14][15]}。そうすると、今回解析したフロー・シアはそのSAPSまたはAWFCの低緯度側境界を観測的に捉えたものと考えることができる。

Foster and Vo^[13]によって示されているSAPSの中心緯度および緯度幅は K_p が4以上で求められており、本研究のフロー・シアイベントの K_p レベル($K_p \sim 0-3$)と異なっているため単純な比較はできないが、 $K_p = 4$ の統計結果を参照すれば、MLT ~ 18 hでのSAPSの中心緯度は $\sim 63.5^\circ$ 、MLT ~ 22 hでのSAPSの平均的な緯度幅は $\sim 3.5^\circ$ 程度なので、SAPSの低緯度境界はおよそ $\sim 60^\circ$ くらいということになる。本研究でのフロー・シアの緯度は平均的には $\sim 66^\circ$ であり、SAPSの低緯度境界はそれよりは低い緯度に位置していることになるが、 K_p が大きくなれば一般にオーロラオーバルやSAPSが数度 $\sim 10^\circ$ 以上低緯度側にシフトするので、定性的・定量的にも十分考えられる範囲の差と言える。SuperDARN以外の地上レーダー観測や極軌道衛星観測によるSAPSイベントのうち K_p が小さい時のものによる統計結果が得られれば、それとさらに詳細な比較をすることが可能であろう。

5 まとめと結論

King Salmonレーダーによって夕方側電離圏のオーロラ帯-サブオーロラ帯領域で観測された、東西方向のフロー・シアについて、事例解析および統計解析を行った。以下のような結論が得られ

た。

- 夕方側で見つかるフロー・シアは高緯度側が速い($\sim 300-500$ m/s)西向き流、低緯度側で数十から 100 m/s程度の東向き流となっており、東西のプラズマ流の境界は磁気緯度 $63-68^\circ$ に分布する。
- このフロー・シアはDP2電流系が減衰するタイミングで形成されるほか、サブストームに伴って、特に爆発相と回復相中に発生する傾向がある。
- サブストーム時のフロー・シアの高緯度側、西向き速いプラズマ流はSAPS/AWFCに対応しており、本研究で同定されたフロー・シアはSAPS/AWFCの低緯度側境界の構造と考えることができる。
- DP2電流系の減衰に伴ってRegion-1 FACに伴う電場が弱まることや、またサブストーム時にPRCが増強されることで、Region-1 FACによる電場構造・対流渦に対して、相対的にRegion-2 FACによる電場構造・対流渦が強くなるために、このような過渡的なフロー・シアが発生すると考えることができる。

謝辞

本研究は、情報通信研究機構よりSuperDARN King Salmonレーダーのデータ、NICT-SWM地磁気データおよびRapidMag地磁気データの提供を受けて行いました。亘 慎一氏、またSuperDARN, NICT-SWM, RapidMagを運営している関係機関に感謝致します。ACE衛星のデータはACE Science Center (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/>)よりダウンロードして使用しました。

参考文献

- 1 Greenwald, R. A., K. B. Baker, J. R. Dundeney, M. Pinnock, T. B. Jones, E. C. Thomas, J. -P. Villain, J.-C. Cerisier, C. Senior, C. Hanuise, R. D. Hunsucker, G. Sofko, J. Koehler, E. Nielsen, R. Pellinen, A. D. M. Walker, N. Sato, and Y. Yamagishi, "DARN/SuperDARN, A global view of high-latitude convection", *Space Sci. Rev.*, Vol.71, pp.763-796, 1995.
- 2 Baker, J. B. H., R. A. Greenwald, J. M. Ruohoniemi, K. Oksavik, J. W. Gjerloev, L. J. Paxton, and M. R. Hairston, "Observations of ionospheric convection from the Wallops SuperDARN radar at middle latitudes", *J. Geophys. Res.*, Vol.112, A01303, doi:10.1029/2006JA011982, 2007.
- 3 橋本久美子, 菊池崇, 國武学, 大高一弘, 巨慎一, "北極域レーダーネットワークで観測された電離圏対流の変動", *情報通信研究機構季報*, Vol.53, No.1/2, pp.103-111, 2007.
- 4 Nishida, A., N. Iwasaki, and T. Nagata, "The origin of fluctuations in the equatorial electrojet: a new type of geomagnetic variation", *Ann. Geophys.*, Vol.22, pp.478, 1966.
- 5 Nishida, A., "Geomagnetic 2 fluctuations and associated magnetospheric phenomenon", *J. Geophys. Res.*, Vol.73, pp.1795-1803, 1968.
- 6 菊池崇, 橋本久美子, 篠原学, 野崎憲朗, ビル プリストウ, "アラスカKing Salmonレーダーによる宇宙天気の研究", *情報通信研究機構季報*, Vol 53, No.1/2, pp.113-121, 2007.
- 7 Yahnin, A. G., V. A. Sergeev, B. B. Gvozdevsky, S. Vennerstrom, "Magnetospheric source region of discrete auroras inferred from their relationship with isotropy boundaries of energetic particles", *Ann. Geophys.*, Vol.15, pp.943-958, 1997.
- 8 Iijima, T., and T. A. Potemra, "Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms", *J. Geophys. Res.*, Vol.83, pp.599-615, 1978.
- 9 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.*, Vol.107, No.A11, 1337, doi:10.1029/2001JA009228, 2002.
- 10 Kikuchi, T., H. Luhr, K. Schlegel, H. Tachihara, M. Shinohara, and T. -I. Kitamura, "Penetration of auroral electric fields to the equator during a substorm", *J. Geophys. Res.*, Vol.105, No.A10, pp.23,251-23,261, 2000.
- 11 Ebihara, Y., N. Nishitani, T. Kikuchi, T. Ogawa, K. Hosokawa, and M. - C. Fok, "Two-dimensional observations of overshielding during a magnetic storm by the Super Dual Auroral Network (SuperDARN) Hokkaido radar", *J. Geophys. Res.*, Vol.113, A01213, doi:10.1029/2007JA012641, 2008.
- 12 石川裕子, 橋本久美子, 菊池崇, 渡辺堯, 國武学, 大高一弘, "電離圏における対流電場の過遮蔽", *吉備国際大学政策マネジメント学部研究紀要 (3)*, 31-41, 2007.
- 13 Foster, J. C., and H. B. Vo, "Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream", *J. Geophys. Res.*, Vol.107, No.A12, 1475, doi:10.1029/2002JA009409, 2002.
- 14 Koustov, A. V., R. A. Drayton, R. A. Makarevich, K. A. McWilliams, J. - P. St-Maurice, T. Kikuchi, and H. U. Frey, "Observations of high-velocity SAPS-like flows with the King Salmon SuperDARN radar", *Ann. Geophys.*, Vol.24, pp.1591-1608, 2006.
- 15 Parkinson, M. L., M. Pinnock, H. Ye, M. R. Hairston, J. C. Devlin, P. L. Dyson, R. J. Morris, and P. Ponomarenko, "On the lifetime and extent of an auroral westward flow channel (AWFC) observed during a magnetospheric substorm", *Ann. Geophys.*, Vol.21, pp.893-913, 2003.



塙 智皓

名古屋大学太陽地球環境研究所
特任助教 博士(理学)
磁気圏物理学