

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

Ionospheric Plasma Convection Observed by HF Radar Network in the Northern Polar region

橋本久美子 菊池 崇 国武 学 大高一弘 亘 慎一

HASHIMOTO K. Kumiko, KIKUCHI Takashi, KUNITAKE Manabu, OHTAKA Kazuhiro, and WATARI Shin-ichi

要旨

宇宙天気予報の対象である地球近傍の宇宙空間は、磁気圏と電離圏で構成されるが、この領域への電磁エネルギーの伝送機構の解明が大きな研究課題である。電磁エネルギーが伝送される結果発生する電離圏プラズマ対流は極域レーダーネットワークで観測され、電離圏 E 層中を流れる電流によるグローバル磁場変動は磁力計ネットワークで観測される。また、内部磁気圏へ伝送された電磁エネルギーは磁気圏尾部の磁場を変化させる。これらのデータを相関解析して、極域から赤道電離圏、そして、極域電離圏から内部磁気圏への伝送が高速で行われることを示す。この観測事実を基に、電離圏を水平に伝送される電磁エネルギーが、磁気圏電離圏複合系にとって重要な意味を持つことを結論する。

The space weather forecast is getting more and more important issue for the operations of the spacecrafts and telecommunication facilities. Among several important research subjects in the space weather, we studied the transmission mechanism of the electromagnetic energy into the inner magnetosphere and to low latitude ionosphere, using radar and magnetometer networks. We report in this article that the ionospheric plasma convection in the polar region is closely related with magnetic disturbances at the equator and in the inner magnetosphere. With these observational facts, we emphasize a crucial role of the ionosphere in transmitting the electromagnetic energy to the space.

【キーワード】

電離圏対流, 対流電場, DP2 電流, 磁気圏-電離圏結合系
Ionospheric convection, Convection electric field, DP2 current,
Magnetosphere-Ionosphere coupling system

1 まえがき

宇宙利用の拡大に伴い、予報という実学として宇宙天気の研究の重要性が増している。そのなかで解決すべき大きな課題として、衛星の軌道や宇宙飛行士の活動領域であり、放射線帯や磁気嵐環電流が発達する内部磁気圏、そして、GPS 衛星の測位精度に大きな影響を与える低緯度・赤道電離圏への電磁エネルギー伝送が挙げられる。電磁エネルギーは、太陽風磁気圏相互作用の結果、外部

磁気圏において発生する。しかし、どのような経路で内部磁気圏や低緯度電離圏へ伝送するかは、幾つかのモデルや考え方があり、決着がつかない問題である。

太陽風磁場 (IMF) や動圧の変動に伴い、磁気圏内のプラズマの大規模対流は盛衰を繰り返す。この磁気圏対流の原因となる電場は、磁力線沿いに電流を流しながら極域電離圏に伝わり、電離圏プラズマ対流を発達させる。したがって、極域電離圏のプラズマ対流を観測することにより、宇宙空

間へのエネルギー流入をモニターすることができる。このために、1995年から極域短波レーダー網 SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) が国際共同プロジェクトとして開始され、宇宙天気モニターとして重要な役割を果たしている。SuperDARN には 11 か国、13 機関が参加し、北半球に 11 基、南半球に 7 基の短波レーダーが稼働している。極域電離圏の対流パターンは、太陽風磁場(IMF)の向きに依存して複雑に変化するが、1 基のレーダーは 3000 km×54 度の扇型の領域を距離 45 km の精度で、1 分又は 2 分ごとに観測することが可能である。

中低緯度や赤道電離圏への電磁エネルギー伝送機構に関しては、地面と導電性電離圏 E 層が構成する導波管が重要な役割を果たす [Kikuchi et al, 1978]。また、中緯度電離圏は磁力線によって、内部磁気圏と結合しているため、磁気圏から極域電離圏へ伝送された対流電場が、中緯度電離圏を経由して内部磁気圏へ伝送される可能性がある。本稿では、このシナリオを検証するために、極域電離圏と赤道電離圏との結合、そして、極域電離圏と内部磁気圏との結合を SuperDARN レーダーネットワーク、磁力計ネットワーク (INTERMAGNET、IMAGE、MACCS など)、そして、衛星磁場データを用いて示す。

2 極域電離圏プラズマ対流と DP2 型電離圏電流系

磁気圏プラズマ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 IMF 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)。Dungey モデルでは、IMF が地球磁場と磁気再結合することによって作られた磁気フラックスが、南北両半球の極冠を通過して磁気圏尾部に運ばれる。この南北両半球の磁力線が磁気圏尾部の赤道面で再び出会い、磁気再結合を起こすことで閉じた磁力線は地球方向へ戻っていく。このモデルは、IMF と磁気圏磁場が結合する開いた磁気圏モデルであり、太陽風磁場や粒子が、磁気圏境界面から磁気圏へ侵入することを、概念的に容易に説明できるため、現在に至るまで有力な対流駆動モデルとして支持されてきた。

一方、磁気圏の電場は、領域 1 沿磁力線電流に

沿って、アルフベン波で極域電離圏へ伝送される (Southwood and Kivelson, 1991、Iijima, 2000)。領域 1 沿磁力線電流は、朝側で下向き (電離圏に流れ込む向き)、夕方側で上向きに流れる電流で、オーロラ帯の高緯度側に分布する (Iijima and Potemra, 1976)。電離圏に印加された電場は、 $E \times B$ ドリフトにより極域電離圏のプラズマ対流を駆動する (Ruohoniemi and Greenwald, 1998) と同時に、領域 1 沿磁力線電流の足元に中心を持つ二つの渦型の Hall 電流を流す。これを DP2 電流系と呼ぶ (Nishida et al, 1966)。Hall 電流は、電離圏 E 層中の電子の $E \times B$ ドリフトであるため、電離圏電気伝導度が一様であれば、DP2 電流は電離圏 F 層のプラズマ対流と逆向きで、同じパターンである。また、DP2 電流は、高緯度のみでなく、昼間の中緯度から磁気赤道まで流れる結果、高緯度と赤道でコヒーレントな磁場変動が観測される (Nishida et al, 1966)。

Araki [1977] は太陽風動圧の急増に伴い地上で観測される時間スケールが 1-2 分の磁場変動 (Preliminary Reverse Impulse : PRI) を解析し、極域と磁気赤道で、10 秒の精度で同時に始まることを示した。太陽風動圧の急増により、磁気圏が圧縮される結果発生した PRI 電場が、沿磁力線電流を伴って極域電離圏へ伝送され、さらに瞬間的に赤道電離圏へ伝搬し、赤道 PRI を発生させるとした。このような電場の赤道への伝搬は、地面と電離圏 E 層で構成される導波管のゼロ時 TM モードによって可能であることが、Kikuchi et al. (1978) により示された。PRI の同時性は、極から赤道までの電離圏が、電磁エネルギー結合系を形成していることを示唆する初めての観測であった。

Araki [1977] 以後、太陽風磁場や動圧による数分から 1 時間程度の時間スケールを持つ磁場変動が、極域と赤道で同時に発生することが明らかにされた (表 1)。表 1 の現象は、周期や空間スケールが異なるが、どれも DP2 型電離圏電流によるものであり、高緯度の磁場変動がホール電流、磁気赤道のそれがペダーセン電流による。すなわち、磁気圏から極域電離圏へ流入した沿磁力線電流は、磁気赤道まで流れ、電磁エネルギーが赤道まで流入することを意味している。

次に、DP2 電流に対応して、極域電離圏プラズ

マ対流がどのような時間、空間特性を持つかを示す。図 1(a) に示すように、1996 年 11 月 17 日に昼側の極冠に位置していた Resolute Bay (RES; 補正地磁気緯度 83.56°、1840 UT に 1120 MLT) の地磁気 X、Y 成分と、磁気赤道付近のペルー Ancon (ANC; 補正地磁気緯度 3.05°、1350 MLT)

の X 成分が、1839 UT (縦実線) から同期して約 30 分の準周期的な変動をした。このとき、WIND 衛星により、太陽風磁場の Bz 成分にも同様の周期変動が観測された。また、12 MLT 付近に位置していた極冠からサブオーロラ帯までの磁力計観測網 CANOPUS、MACCS (図 1b) と、17-

表 1 汎地球規模(極-赤道)に同時発達する DP2 型電流系の例

著者	年	現象	周期	原因
Araki	1977	地磁気急始部 (PRI)	1~2 分	太陽風動圧
Kikuchi 他	1996	DP2 地磁気変動	数十分~1 時間	太陽風磁場
Motoba 他	2003	グローバル PC5 地磁気脈動	2~10 分	太陽風動圧

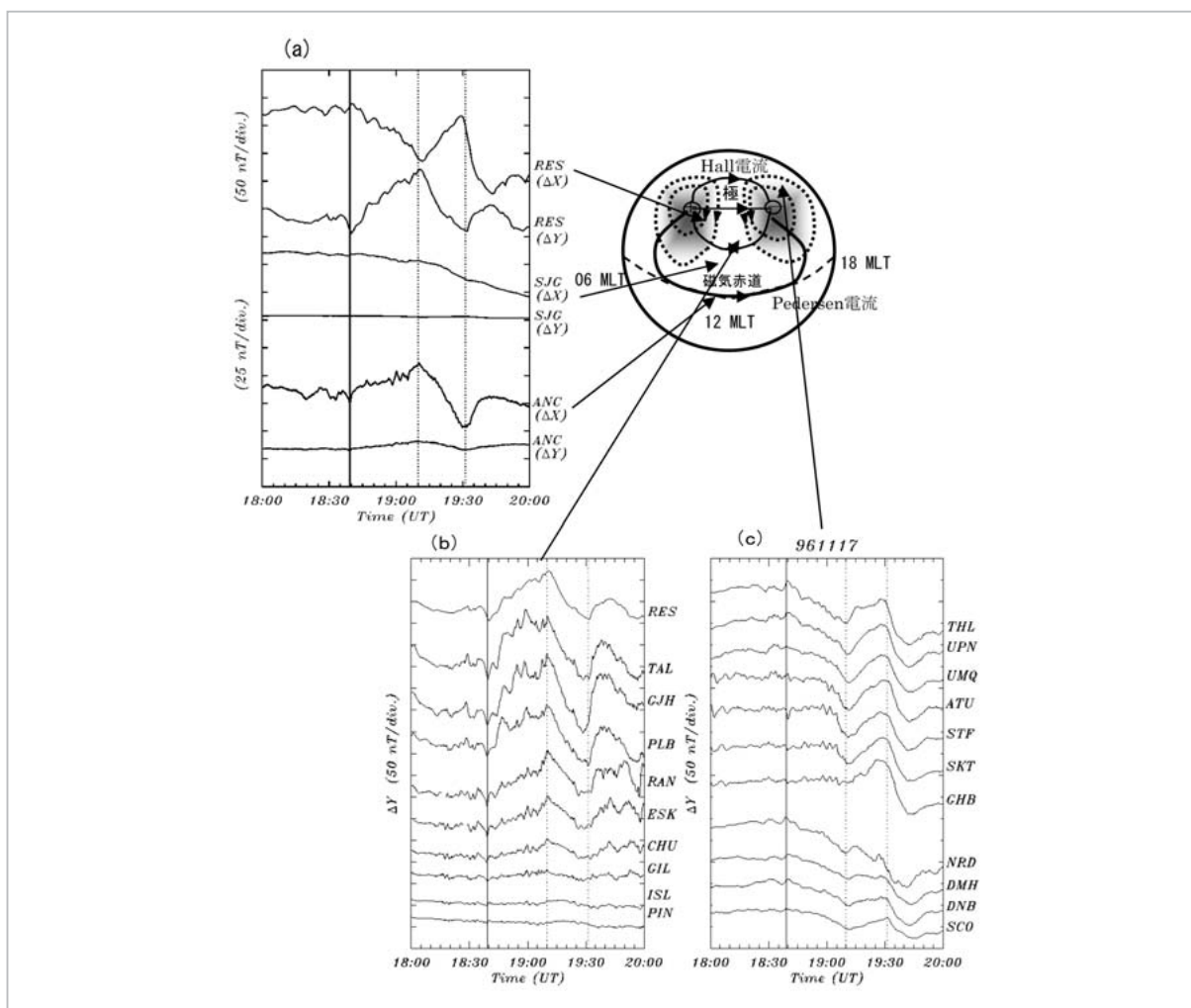


図 1 極から赤道まで観測される DP2 地磁気変動

(a) 極冠と昼側低緯度・磁気赤道の地磁気 X・Y 成分 (1840 UT に 1120-1430 MLT)、(b) 極冠からサブオーロラ帯の磁力計チェーン (MACCS、CANOPUS) の地磁気 Y 成分 (1840 UT に 1120-1220 MLT)、(c) Greenland 磁力計チェーンの地磁気 Y 成分 (1840 UT に 1710-2130 MLT) [Hashimoto and Kikuchi, 2005a]。

21 MLT に位置していた Greenland (図 1c) の地磁気 Y 成分は、相互に逆相関の磁場変動を示した。一方、低緯度の San Juan (SJG; 補正地磁気緯度 28.91°, 1430 MLT) では、振幅が非常に小さい (図 1a)。このような磁場変動のグローバルな同時性と、振幅の緯度依存性 (高緯度から緯度が下がるほど振幅が減衰し、昼側磁気赤道で振幅の異常増幅が現れる)、さらに 2 次元等価電流分布が 2 渦型 (図 1 中模式図) であることが DP2 電流系の特徴である。

この DP2 電流の発達前後の SuperDARN HF レーダー網による極域電離圏 F 層のプラズマ速度観測データを図 2 に示す。図 2(a)、(c) は Saskatoon と Kapuskasing (カナダ) の 2 基の短波レーダーで観測されたプラズマ視線速度を合成して得られた速度ベクトルである。また、図 2(b)、(d) は、ジョンズホプキンス大学応用物理研究所 (JHU/APL) のポテンシャルマップモデル (Ruohoniemi and Baker, 1998) を使用して、統計的な電場ポテンシャルモデルと観測による視線方向速度データを使用して計算した、極域の 2 次元プラズマ対流マップである。DP2 電流系が発達する前 (図 2a, b) に、昼側の磁気緯度 80~85 度に小さなプラズマ流渦が観測された。この対流渦は、

IMF が北向きのときに、発達する NBZ 沿磁力線電流に伴う電場によって生じる逆対流セルである。次に、DP2 電流が発達し始めたあと、2 セル型のプラズマ対流が発達した (図 2c, d)。一般に IMF が南向きに変動する場合に、電離圏では DP2 電流系がグローバルに発達し、極域では 2 セルプラズマ対流が発達する。昼側磁気圏で発生した電磁エネルギーが、領域 1 沿磁力線電流を介して極域電離圏に流入するとともに、電場が印加される結果、このような 2 セルのホール電流とプラズマ対流が発達する。磁気圏対流電場は、領域 1 沿磁力線電流が昼側赤道の DP2 電離圏電流と結合する電気回路を形成することにより、グローバル電離圏に数十秒以内の精度で瞬時に伝搬する (Kikuchi et al, 1996)。

IMF の南向き変動により対流が発達する際に、電離圏では数十秒以内に極から赤道まで、あるいは昼から夜まで DP2 型の対流電場が伝搬する (Kikuchi et al. 1996, Ridley et al. 1998, Ruohoniemi and Greenwald 1998, Murr et al. 2001 など) のに対し、極冠域の対流は北向きの対流パターンが完全に観測されなくなるまで、4~6 分かかかる (Hashimoto and Kikuchi, 2005a)。このことは、磁気圏内のプラズマ対流が南向きのパターンに入

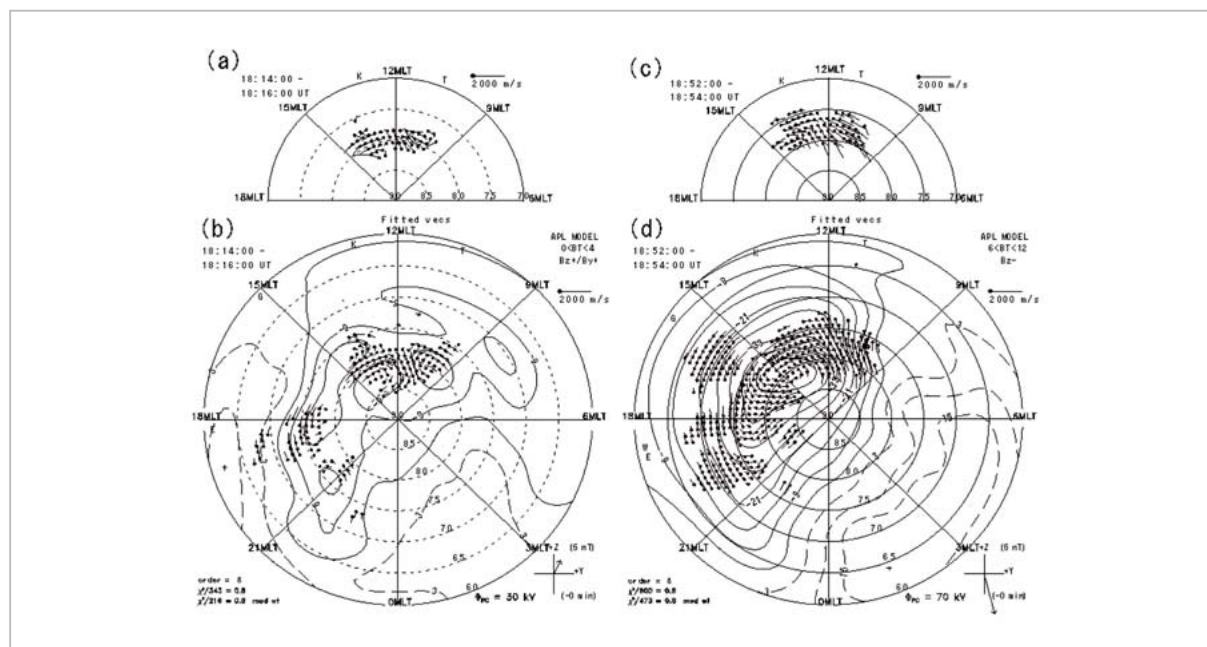


図2 1996年11月17日

(a)、(b) 1814-1816 UT。(c)、(d) 1852-1854 UT に SuperDARN で観測された IMF の南向き変動の前後に観測された極域電離圏 (F 層) のプラズマ対流パターン。(a)、(c) 2 か所の HF レーダー (Saskatoon, Kapuskasing) で観測された視線速度を合成して得られた昼側のプラズマ流。(b)、(d) APL/JHU のポテンシャルマップモデルにより得られたプラズマ流 [Hashimoto and Kikuchi, 2005a]。

れ替わるのに、4~6分以上の時間がかかることを示唆する。また、我々が SuperDARN で観測する極冠域のプラズマ対流は、沿磁力線電流に伴うポテンシャル電場により駆動されるので、IMF の南向き変動後に磁気圏で新たに発達した沿磁力線電流と、北向き IMF による沿磁力線電流が共存することを示している。この結果は、Tanaka (2000) が示したグローバル MHD シミュレーションの結果とよく一致する。

以上の結果は、磁気圏と電離圏が沿磁力線電流で結合され、その周辺に、プラズマ対流と DP2 電流系が発達することを示している。沿磁力線電流は、IMF B_z の向きにコントロールされており、IMF が北から南に変化したときは、領域 1 沿磁力線電流が発達し始めるために、赤道を含むグローバル電離圏に DP2 電流が発達する。しかし、極域電離圏では、4~6 分の間、両方の沿磁力線電流が共存して、磁気圏ではもっとゆっくり北向きの状態から南向きの状態へ移行すると考えられる。磁力線沿いにアルフベン波により磁気圏から極域電離圏に伝搬した対流電場は、中低緯度へ伝搬するが、この水平方向伝搬が、磁気圏-電離圏結合系全体へのエネルギー伝送を可能にしている。このように、磁気圏-電離圏複合系でのエネルギー伝送を考える上で、電離圏のエネルギー伝送路としての役割が重要である。

3 電離圏と内部磁気圏における対流発達の同時性

磁気圏がプラズマの密度や温度によって領域が分かれ、地球磁場による強い異方性を持つものに対して、地球-電離圏導波管を構成する電離圏 E 層は十分な導電性を持つために、低緯度赤道への電磁エネルギー伝送にとって、緯度方向の非一様性は大きくないことが特徴である。我々は、電磁エネルギー伝送における極-赤道結合を、電離圏の基本的性質ととらえて、内部磁気圏へのエネルギー伝送における電離圏の役割を調べるために、極域電離圏対流と静止軌道上の磁場変動の関係を調べた。両者の開始時間差から、内部磁気圏の対流を駆動するエネルギーがどのようなモードで伝搬するかを推定できる。

図 3 は、IMF が北向きの時の極域電離圏対流

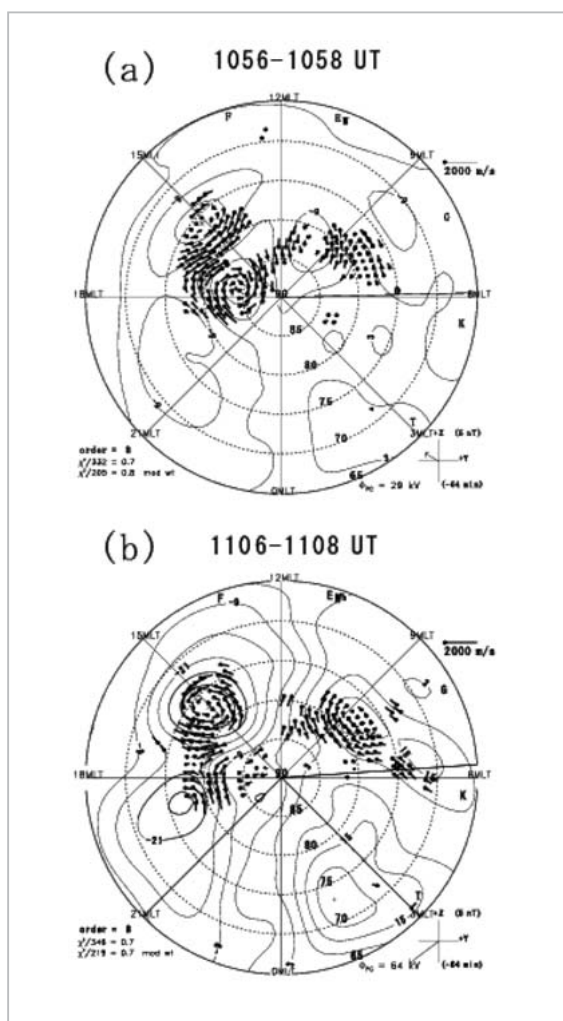


図3 1998年3月26日(a) 1056-1058 UT、(b) 1106-1108 UT に SuperDARN で観測された極域電離圏 (F 層) のプラズマ流パターン

APL/JHU のポテンシャルマップモデルを使用
[Hashimoto and Kikuchi, 2005b]。

パターン (a) と、南を向いたときのパターン (b) を示す。6 基の SuperDARN HF レーダーによる観測データから、ポテンシャルマップモデルを使用し、それぞれ、1998 年 3 月 26 日 1056-1058 UT と 1106-1108 UT のデータを用いて描いた 2 次元プラズマ対流パターンである。(a) は北向き IMF による 4 セルパターンであったが、(b) では南向き IMF による 2 セルパターンに変化したことが分かる。一方、極冠域の磁場観測によると、1100 UT に DP2 磁場変動が始まり (図 4 上段)、極域電離圏対流の増加が始まったが、対流パターンは、すぐに 2 セルにはならず、1100 UT から約 6 分後に、4 セルから 2 セルに変化した

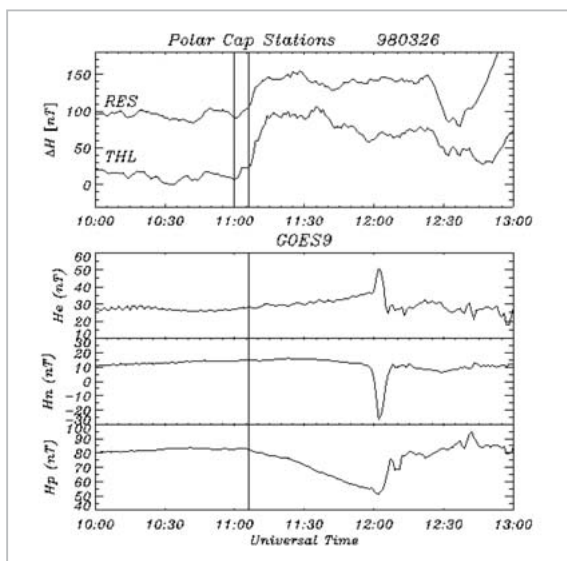


図4 (a) 極冠の地磁気 X 成分と (b) GOES-9 衛星で観測された磁場 3 成分

1100 UT に DP2 電流系が発達した。その後、1106 UT に GOES9 衛星で磁場 Hp 成分の減少を観測し、磁気圏尾部のシンニングが始まったことを示している [Hashimoto and Kikuchi, 2005b]。

(Hashimoto and Kikuchi, 2005b)。

極域電離圏対流の発達と、磁気圏近尾部の対流が発達したときに見られるプラズマシート・シンニングの開始を比較するために、極冠域の DP2 磁場変動と GOES-9 衛星によって観測された静止衛星軌道の磁場 3 成分を図 4 に示す。図 4 上段の最初の縦線が示すように、極冠磁場は、1100 UT に増加を始め、1106 UT に更に増加している。図 4 下段に示した静止軌道上の GOES-9 衛星が観測した磁場 Hp 成分は、1106 UT に減少し始めた。GOES-9 衛星は 1100 UT に 0020 MLT に位置しており、Hp 成分の減少は、磁気圏尾部の形状が引き伸ばされた(プラズマシート・シンニング)ことを示しており、磁気圏尾部のプラズマ対流が促進され、静止軌道のプラズマ圧が増加した結果と考えられる。

DP2 電流系が 1100 UT に発達し、それから 6 分経過した 1106 UT に、プラズマ対流が 4 セルから 2 セルパターンに変化し(図 3b)、GOES-9 衛星の位置でプラズマシート・シンニングが開始したという観測事実は、夜側内部磁気圏の対流の発達が、領域 1 沿磁力線電流による 2 セル対流が支配的になったときに開始することを示している。前節で述べたとおり、DP2 電流系は、電磁エ

ネルギーとともに光速で水平伝搬するため、1100 UT (図 4a 太線) に極冠から昼・夜側の中低緯度へ瞬時に伝搬していると考えられる。しかし、北向き IMF による 4 セル対流パターンが残っているために、内部磁気圏の対流電場の強度はそれほど大きくなく、プラズマシート・シンニングの発達開始は、2 セル対流パターンへ切り替わった 1106 UT であったと考えられる。

Dungey (1961) の磁気圏対流モデル以来、太陽風磁場と地球磁場が再結合することにより生じた磁気フラックスが、磁気圏尾部に運ばれ、対流が駆動されると考えられてきた。元々 Dungey モデルは極域電離圏電流系のパターンを説明するために提案された、定常的な磁気圏対流モデルである。このモデルでは、磁気フラックスが磁気圏尾部に輸送されて、内部磁気圏に達するのに、30~50 分かかる。したがって、前節までに述べたような電離圏対流が広い範囲にわたって同時に発達し、赤道の電離圏電流が極域と同時に発達するという特性と矛盾する。

太陽風磁場変動に伴う極域電離圏の対流電場発達に関して、Ridley ほか(1999) と Lockwood and Cowley (1999) の論争に端を発して、1998~2002 年ごろに、下記の速い伝搬とゆっくりした伝搬という異なる立場で議論が盛んになった。

- ① 電離圏昼間側と夜側で対流電場が 1 分以内の精度で同時に成長し始める(磁力計・短波レーダーのネットワーク観測) (Ridley ほか, 1998, Ruohoniemi and Greenwald, 1998, Murr ほか, 2001 など)。
- ② 2 セル型の電離圏対流が、昼側から夜側に数 10 分かけて広がる(ローカルな磁力計・レーダー観測に基づく) (Etemadi ほか, 1998, Todd ほか, 1988 など)。

さらに、高速伝搬の立場をとるグループの中でも、磁気圏対流が 1000 km/s 以上の速度で伝わる磁気音波によって伝搬するという考えが支配的であった(Ridley ほか, 1999, Murr ほか, 2001, Slinker ほか, 2001) が、磁気圏中を伝搬する磁気音波は電離圏対流を駆動することができないと指摘する理論的考察(Southwood and Kivelson, 1991, Iijima, 2000 など)と、矛盾するものであった。この論争は未だ明確な決着がついていない。また、議論の対象が極域の電離圏対流に限定されており、極域

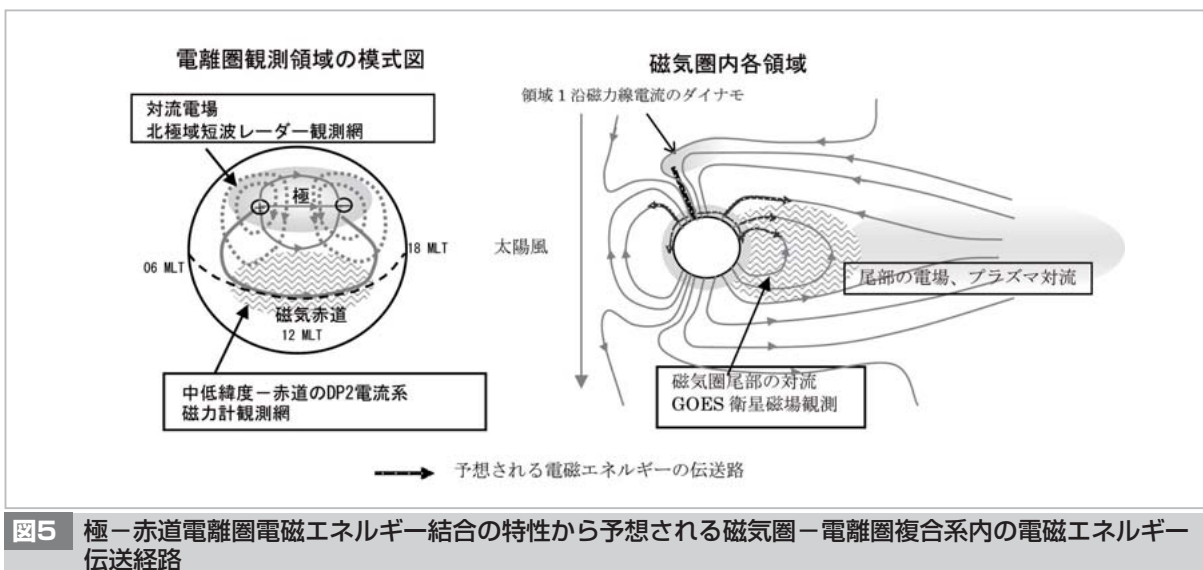


図5 極-赤道電離圏電磁エネルギー結合の特性から予想される磁気圏-電離圏複合系内の電磁エネルギー伝送経路

電離圏対流は磁気圏対流の投影とみなす従来の概念的モデルの枠組み内で議論されていた。

極から赤道までの電磁エネルギー伝送を電離圏固有の特性としてとらえ、その内部磁気圏・磁気圏尾部へのエネルギー伝送に果たす役割を検証することが必要である。これまで、電離圏の「非圧縮性」という言葉を使うことで、電離圏の重要な物理特性が省略されてきた。エネルギー損失領域という認識に反して、「非圧縮な電離圏」は、いとも簡単に運動が伝わる媒質であるかのように錯覚を起こす原因になると考えられる。我々は、電離圏の非圧縮性を、極-赤道と昼-夜の電離圏電磁エネルギー結合であるという視点から、磁気圏-電離圏複合系の対流駆動エネルギーの伝送を見直す試みを行った。

上で示したように、地上のレーダーと地磁気観測に基づく解析は、極-赤道電離圏が電磁エネルギーが流通する結合系を構成していることを示している。この特性から導かれる磁気圏-電離圏複合系内の電磁エネルギー伝送経路の模式図を図5に示す。磁気圏対流電場がグローバル電離圏に電流を流し、電離圏を経由して一部が内部磁気圏や近地球磁気圏尾部へ伝送するというモデルである。強いエネルギー損失領域であり、エネルギー伝送経路でもあるという電離圏固有の特性に注目することにより、内部磁気圏への電場伝送モデルに対して、満たすべき強い条件を与えることになると期待される。

謝辞

本研究は、IMAGE (International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects) と MACCS (Magnetometer Array for Cusp and Cleft Studies) 磁力計網のデータ提供を受けて行いました。IMAGEとMACCSを運用している関係機関に感謝します。磁気赤道のAnconの磁力計データは九州大学宙空環境研究センターから、また、CARISMA 磁力計データは、Alberta 大学から提供していただきました。湯元清文先生とI.R.Mann、CARISMA プロジェクトチームに感謝します。GOES-9 衛星の磁力計データはアメリカ宇宙航空局 NASA/NSSDC のデータベース公開サイト CDAWeb (http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdawev/sp_phys/) からダウンロードして使用しました。

参考文献

- 1 Araki, T., "Global structure of geomagnetic sudden commencements", *Planet. Space Sci.*, 25, 373-384, 1977.
- 2 Dungey, J. W., "Interplanetary magnetic field and the auroral zones", *Phys. Rev. Lett.*, 6, 47, 1961.
- 3 Etemadi, A., S. W. H. Cowley, M. Lockwood, B. J. I. Bromage, D. M. Willis, and H. Luhr, "The dependence of high-latitude dayside ionospheric flows on the north-south component of the IMF, a high time resolution correlation analysis using EISCAT "POLAR" and AMPTE UKS and IRM data", *Planet. Space Sci.*, 36, 471, 1988.
- 4 Hashimoto, K. K., and T. Kikuchi, "Quick Response of the near-Earth Magnetotail to Changes in the Interplanetary Magnetic Field", *The Inner Magnetosphere: Physics and Modeling*, AGU Geophysical Monograph Series, 155, 47-53, edit. T. I. Pulkkinen, N. A. Tsyganenko, and R. H. W. Friedel, 2005a.
- 5 Hashimoto, K. K., and T. Kikuchi, "Evolution of ionospheric plasma flow in the polar cap due to southward turning of the IMF", *Journal of KIBI International University, School of Policy Management*, 1, 81-94, 2005b.
- 6 Iijima, T., "Field-aligned currents in geospace: Substance and significance, Magnetospheric Current Systems", *AGU Monograph* 118, 107-129, 2000.
- 7 Kelly, M., B. Fejer, and S. Gonzalez, "An explanation for anomalous ionospheric electric fields associated with a northward turning of the interplanetary magnetic field", *Geophys. Res. Lett.*, 6, 301-304, 1979.
- 8 Kikuchi, T., T. Araki, H. Maeda, and K. Maekawa, "Transmission of polar electric fields to the equator", *Nature*, 273, 650-651, 1978.
- 9 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.
- 10 Lockwood, M. and S. W. H. Cowley, Comment on "A statistical study of the ionospheric convection response to changing interplanetary magnetic field conditions using the assimilative mapping of ionospheric electrodynamics technique" by A. J. Ridley et al., *J. Geophys. Res.*, 104, 4387-4391, 1999.
- 11 Motoba, T., T. Kikuchi, T. Okuzawa, and K. Yumoto, "Dynamical response to the magnetosphere-ionosphere system to a solar wind dynamic pressure oscillation", *J. Geophys. Res.*, 108, 1206, doi:10.1029.2002JA010442, 2003.
- 12 Murr, D. L. and W. J. Hughes, "Reconfiguration timescales of ionospheric convection", *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2145-2148, 2001.
- 13 Ridley A. J., G. Lu, C. R. Clauer, and V. O. Papitashvili, "A statistical study of the ionospheric convection response to changing interplanetary magnetic field conditions using the assimilative mapping of ionospheric electrodynamics technique", *J. Geophys. Res.*, 103, 4023-4039, 1998.
- 14 Ridley A. J., G. Lu, C. R. Clauer, and V. O. Papitashvili, "Reply", *J. Geophys. Res.*, 104, 4393-4396, 1999.
- 15 Ruohoniemi, J. M. and R. A. Greenwald, "The response of high latitude convection to a sudden southward IMF turning", *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2913-2916, 1998.
- 16 Slinker, S. P., J. A. Fedder, J. M. Ruohoniemi, and J. G. Lyon, "Global MHD simulation of the magnetosphere for Nov. 24, 1996", *J. Geophys. Res.*, 106, 361-380, 2001.

- 17 Southwood D. J. and M. G. Kivelson, "An approximate description of field-aligned currents in an planetary magnetic field", J. Geophys. Res., 96, 67-75, 1991.
- 18 Tanaka, T., "The state transition model of the substorm onset", J. Geophys. Res., 105, 21081-21096, 2000.
- 19 Tanaka, T., "Formation of magnetospheric plasma population regimes coupled with the dynamo process in the convection system", J. Geophys. Res., 108(A8), 1315, doi:10.1029/2002JA009668, 2003.
- 20 Todd, H. and S. W. H. Cowley, M. Lockwood, D. M. Wills and H. Luhr, "Response time of the high-latitude dayside ionosphere to sudden changes in the north-south component of the IMF", Planet. Space Sci., 36, 1415-1428, 1988.

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



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

國武 学

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
磁気圏電離圏物理学



大高一弘

情報通信セキュリティ研究センターインシデント対策グループ主任研究員
(前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) 宇宙天気予報

萱 慎一

電磁波計測研究センター宇宙環境計測グループ研究マネージャー
博士（理学）
太陽地球系物理、宇宙天気