

吉備国際大学  
政策マネジメント学部研究紀要  
第3号, 9-18, 2007

# 内部磁気圏 - 電離圏結合系における対流発達過程 - 電離圏の極 - 赤道電磁エネルギー結合の役割 -

橋本久美子

Convection Development in the Inner Magnetosphere-Ionosphere Coupling System

Hashimoto, K. K.

キーワード：磁気圏 - 電離圏結合、電離圏対流、内部磁気圏、エネルギー伝送

## 1. 序論

宇宙利用の拡大にともない、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。そのなかの解決すべき大きな課題のひとつとして、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が、これがどのような経路で内部磁気圏へ伝送するかは、いく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。我々は地上の磁力計やレーダーのグローバルネットワーク観測データの解析に基づき、電離圏のエネルギー伝送特性について研究を行ってきた立場から、磁気圏-電離圏結合系の電磁エネルギー伝送における電離圏の重要な役割について本稿で述べたい。

磁気圏-電離圏結合系の対流の議論は長い間、磁気圏と極域電離圏の間の結合の枠組みで行われてきた。これは Alfvén layer 形成により、低緯度電離圏

や内部磁気圏で対流電場が遮蔽されるというモデルによると考えられる。したがって電離圏対流が磁気圏対流の投影であるという認識から、中低緯度の電離圏は結合系の中で重要視されてこなかった。また、極域電離圏は強いエネルギー損失領域としての性質は、磁気圏から電離圏への対流の投影という一方通行の結合を招いている。我々は、極域に限られた電離圏対流、およびエネルギー損失領域としての極域電離圏という描像だけでは、磁気圏-電離圏結合系のエネルギー流入過程の一部しか理解できないと考える。次節以降で述べるように、電離圏は磁場に垂直方向への電磁エネルギー伝送という重要な性質をもつ。複合系の対流は、電離圏の一部と磁気圏の結合を取り出して理解することできず、磁気圏の各領域が内部境界において、物理的特性が異なる媒質である電離圏が強く結合した結果として全体系に生じる (Tanaka, 2003)。

変動する対流について、中低緯度電離圏と磁気圏の結合が観測データで示されたのはこの数年のこと

である (Hashimoto 他, 2002 ; Hashimoto and Kikuchi, 2005 等)。次節で述べるように日本では伝統的に、電離圏の極から赤道までのグローバルなエネルギー結合を研究する流れがあった。本稿では磁気圏 - 電離圏複合系の対流を理解する上で、欠くことのできない電離圏の役割について述べたい。

## 2. DP 2 型電離層電流系

Araki (1977) は、太陽風動圧の急増にともない地上で観測される約 1 - 2 分の磁場変動 (Preliminary Reverse Impulse: PRI) が、極域から磁気赤道まで 10 秒の精度で同時に始まることを示した。PRI は磁気圏から極域電離圏に印加された、電場ポテンシャルによる DP 2 型電離層電流 (図 3) の磁場効果によって生じる。こ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報告であった。表 1 に示すように、Araki (1977) 以後、太陽風磁場や動圧による数分から 1 時間程度の磁気圏対流電場変動が、極から赤道まで同時に発達することが明らかにされた。表 1 の現象は周期や空間スケールが異なるが、どれも DP 2 型電離層電流系であり、磁気赤道に東向きのパデーセン電流が流れる。つまり磁気圏から沿磁力線電流とともに極域電離圏に伝送された電磁エネルギーが磁気赤道まで伝搬することを意味し、Kikuchi 他 (1978) が提案した地球電離層導波管 (TM 0 モード) モデルにより説明された

(Kikuchi 他, 1996)。

図 1 は異なる緯度や磁気地方時 (MLT) で、どのような DP 2 地磁気変動が観測されるのかを示したものである (Hashimoto and Kikuchi, 2005b)。1840 UT に昼側に位置していた極冠の Resolute Bay (RES; 磁気緯度  $83.56^{\circ}$ , 1120 MLT) の地磁気 X、Y 成分と磁気赤道付近の Ancon (ANC; 磁気緯度  $3.05^{\circ}$ , 1350 MLT) の X 成分が 1839 UT (縦実線) から同期して約 30 分の準周期変動している (図 1 a)。このとき WIND 衛星により、太陽風磁場の Z 成分にも同様の周期的変動が観測された。低緯度の San Juan (SJG; 磁気緯度  $28.91^{\circ}$ , 1430 MLT) では、振幅が非常に小さい。また 12 MLT 付近と 17 - 21 MLT 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 1 b) と Greenland (図 1 c) で観測された地磁気 Y 成分にも、同時に逆位相の磁場変動が見られる。このようなグローバルな同時性と、地磁気変動の振幅の緯度依存性 (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 セル型 (図 1 中模式図) であることが DP 2 電流系の特徴である。

図 2 に DP 2 電離層電流の発達前後の 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示す。昼側極冠のリバースコンベクションセルが消え、2 セル型のプラズマ対流が発達したことがわかる。一般に太陽風磁場が

表 1 汎地球規模 (極 - 赤道) に同時発達する DP 2 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	DP 2 地磁気変動	数十分 ~ 1 時間	太陽風磁場
Motoba 他	2003	グローバル PC 5 地磁気脈動	2 ~ 10 分	太陽風動圧

南向きに変動する場合に、電離圏では DP 2 電流系発達がグローバルに観測され、極域では 2 セル型プラズマ対流が発達する。このような 2 セルのホール電流とプラズマ対流は、昼側磁気圏で発生した電磁エネルギーが領域 1 沿磁力線電流とともに、極域電離圏に流入した結果、印加される電場の存在を示唆する。磁気圏対流の発達は、領域 1 磁力線電流が昼側赤道の DP 2 電離層電流を含む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同時に伝搬する。

磁力線沿いにアルフベン波が磁気圏から電離圏に伝搬するのに約 100 秒要するのに対し、PRI は継続時間も 60~120 分と非常に短いため、電離圏から磁気圏への電磁エネルギーの反射が PRI 自体を変調することはないと考えられる。しかし、数分から 1 時間程度の継続時間をもつ DP 2 型電離層電流系の場合、磁気圏で発生した電磁エネルギーは、磁気圏から電離圏への一方通行ではなく極域電離圏からの

反射と、電離圏における（厳密には電離層の下空間）水平方向（中低緯度、及び夜側）への伝搬が、磁気圏-電離圏結合系全体へのエネルギー伝送過程において無視できなくなると考えられる。

磁力計観測による電流系の研究とは別に、中低緯度のレーダーによる電場観測も長い歴史をもち、磁気嵐など大規模な磁気擾乱時に電場が極から中低緯度に侵入することが報告されてきた (Kelly 他, 1979; Fejer 他, 1990; 1995 など)。レーダーでは電気伝導度の低い夜間でも電場を直接観測できる利点がある。しかし、レーダーによる中低緯度の電場侵入の観測からは、電磁エネルギーの伝送路としての電離圏の役割という議論に発展することはなかった。

一方、菊池 他 (2007) により、赤道環電流が強く発達する磁気嵐の主相にも、DP 2 電流系が昼間側磁気赤道に流れることが報告された。このように周期や空間スケールによらず、極域電離圏に流入し

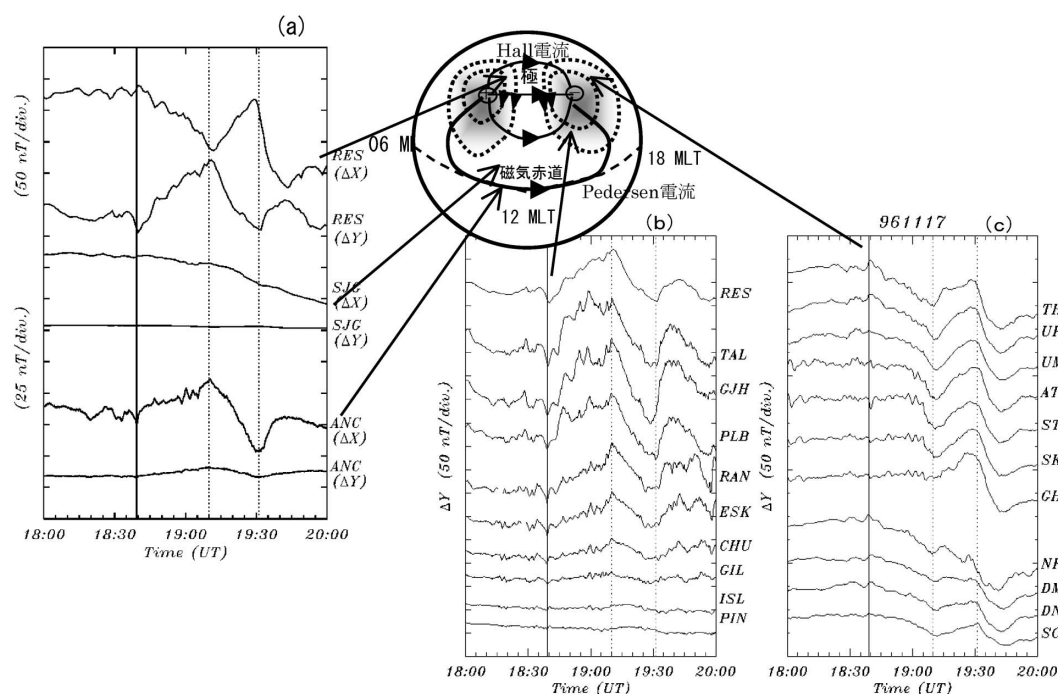


図 1 極から赤道まで観測される DP 2 地磁気変動。(a) 極冠と昼側低緯度・磁気赤道の地磁気 X, Y 成分。(1840 UT に 1120-1430 MLT)、(b) 極冠からサブオーロラ帯の磁力計チェーン (MACCS、CANOPUS) の地磁気 Y 成分 (1840 UT に 1120-1220 MLT)。(c) Greenland 磁力計チェーンの地磁気 Y 成分 (1840 UT に 1550-1635 MLT)。  
[Hashimoto and Kikuchi, 2005 b]

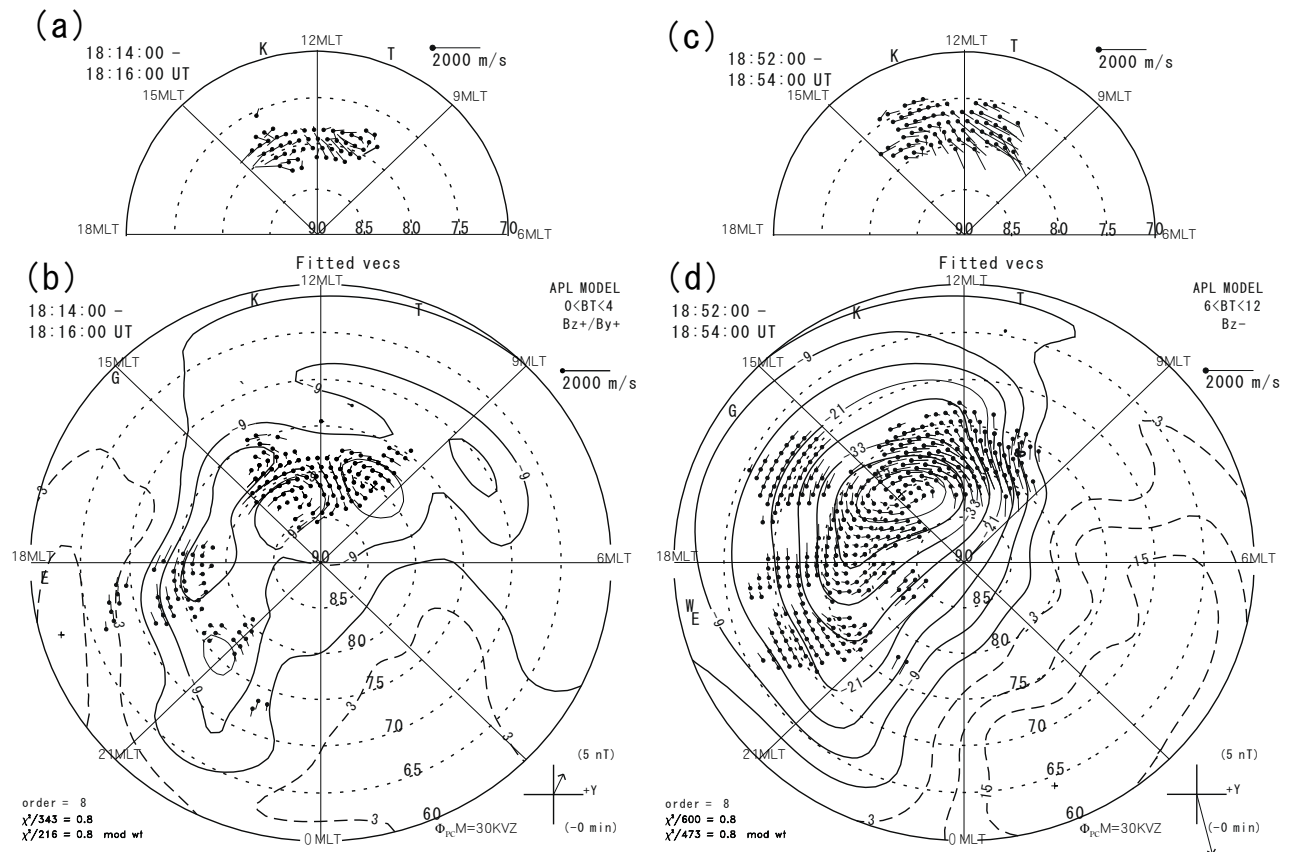


図2 1996年11月17日 (a)、(b) 1814-1816 UT、(c)、(d) 1852-1854 UT に SuperDARN で観測された IMF の南向き変動の前後に観測された極域電離圏 (F 層) のプラズマ対流パターン。(a)、(c) 2 箇所の HF レーダー (Saskatoon、Kapuskasing) で観測された視線速度を合成して得られた昼側のプラズマ流。(b)、(d) APL/JHU のポテンシャルマップモデルにより得られたプラズマ流。[Hashimoto and Kikuchi, 2005b]

た電磁エネルギーの一部が、中低緯度・赤道までグローバル電離圏に伝送されることを示す研究が積み重ねられてきた。グローバルな磁力計観測に基づく研究から得られた電離圏を含む3次元電流回路の存在は、電離圏で損失するエネルギーの供給・伝搬を無視しては理解できない。我々地上観測に基づく研究グループでは、磁気圏-電離圏複合系の対流発達過程を、電離圏がもつエネルギー損失領域としての性質に加えて、エネルギー伝送路としての視点から、内部磁気圏、磁気圏尾部へのエネルギー伝送経路(過程)を検証しようと試みている。

### 3. 電離圏と内部磁気圏における対流発達の同時性

磁気圏内がプラズマの密度や温度によって領域が分類されるのに対して、電離圏における地球-電離

層導波管による水平方向の電磁エネルギー伝送は、緯度による境界が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捕らえ、磁気圏-電離圏の結合関係を見直すためにデータ解析による研究を行ってきた。電離圏と磁気圏の異なる領域で、対流電場変動の開始がどのような時間スケールで伝播するかという問題は、対流を駆動するエネルギーがどのようなモードで伝播するかを規定する。

図3は1998年3月28日(a)1056-1058 UTと(b)1106-1108 UTに6基の SuperDARN HF レーダーによる観測データを、ジョンホプキンス大学応用物理研究所 (APL/JHU) のポテンシャルマップモデルを使用し描いた2次元プラズマ対流パターンである。1100 UT から約6分の間に、極域電離層 F 層の

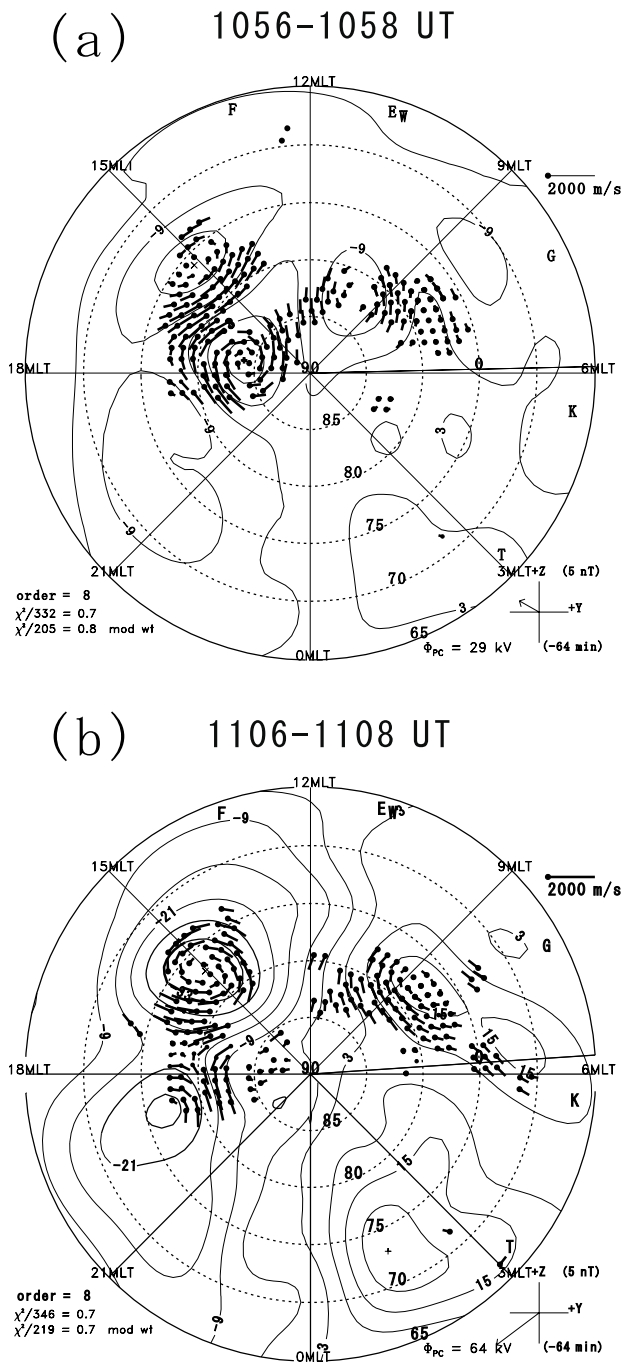


図3 1998年3月26日 (a) 1056-1058 UT、(b) 1106-1108 UT に SuperDARN で観測された極域電離圏 (F 層) のプラズマ流パターン。APL/JHU のポテンシャルマップモデルを使用。[Hashimoto and Kikuchi, 2005a]

プラズマ対流が4セルから2セルにパターンが変化した。ACE 衛星が1004 UT に太陽風磁場の南向き変動を観測し、さらに地上の磁力計観測網によると1100 UT に DP 2 磁場変動が始まった。これらの観

測から、太陽風磁場が北向きから南向きに変動したことにより、電離圏のプラズマ対流パターンが変化したと考えられる。

磁気圏近尾部で観測されるプラズマシート・シンニングの開始を電離圏対流発達と比較するために、極冠の DP 2 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。一般に電離圏対流が発達する場合に、電場ポテンシャルの中心は図3 (b) のように昼側の14-16 MLT 付近と08-10 MLT 付近に位置する。前節で述べたとおり、DP 2 電流系は電磁エネルギーとともに光速で水平伝播するため、1100 UT (図4 a 太線) に極冠から昼・夜側中低緯度赤道まで瞬時に伝播していると考えられる。領域1沿磁力線電流とともに、昼側磁気圏から昼側極域電離圏に流入した電磁エネルギーのすべてが電離圏で消失するとは限らず、一部が中低緯度あるいは夜側電離圏から磁気圏へと、磁力線に沿って伝播する可能性が考えられる。

GOES-9 衛星は1100 UT に0020 MLT に位置し、1106 UT に Hp 成分が減少し始め、尾部の形状が引き伸ばされたことを示す。GOES-9 衛星の位置で磁場強度が減少していることは、プラズマ圧の増加を意味し、地球方向のプラズマ対流が強まったことを示唆する。DP 2 電流系発達が1100 UT、プラズマ対流が完全に2セルパターンに変化した (図3 b) 時刻が1106 UT であることと、少なくとも GOES-9 衛星の位置で1106 UT にプラズマシート・シンニングが開始したという観測は、領域1沿磁力線電流とともに、昼側極域電離圏への電磁エネルギーが流入した結果、4セル型の電場ポテンシャルが打ち消され、2セルパターンに変化し、磁気圏近尾部の対流が2分の精度 (SuperDARN の時間精度) で同時に発達開始したと解釈できる (Hashimoto and Kikuchi, 2005b)。

図5 (a)、(c) は1995年9月5日の極冠と低緯度の磁場 H 成分である。太陽風磁場が約25分強い南

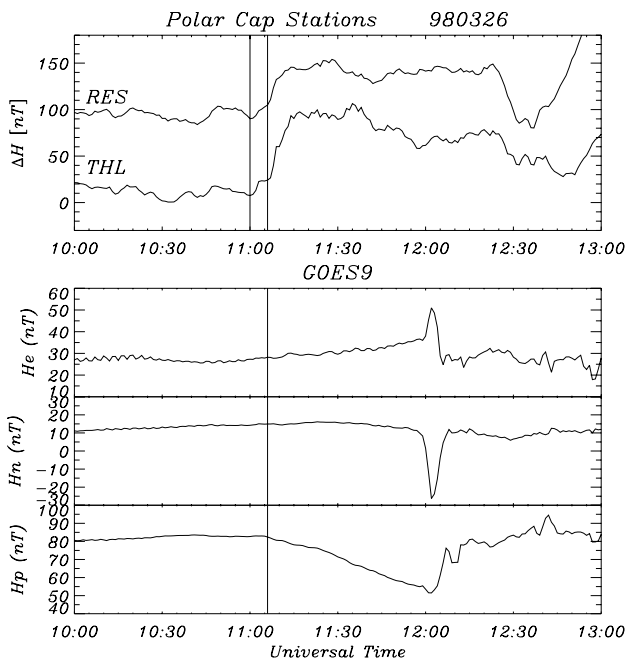


図4 (a) 極冠の磁場 H 成分と (b) GOES-9 衛星で観測された磁場 3 成分。[Hashimoto and Kikuchi, 2005a]

向きに変化したのにもない、極冠の THL で 1725–1752 UT の間、DP2 電流が強められた。この間に、1930 MLT、0840 MLT、0230 MLT の低緯度の磁場 H 成分は非対称な赤道環電流の発達を示唆するものであった。一方、図 5 (d) は粒子シミュレーションによる赤道環電流から計算した地上の磁場変動である。シミュレーションモデルには、沿磁力線電流を含まず、対流電場は地球から半径  $10R_E$  の領域で同時に印加される。計算された磁場変動に見られる地方時依存性は、磁気圏赤道面のプラズマ圧の非対称性によって生じる (図 6 b)。観測と計算による磁場変動の一致から、図 5 (c) の非対称な磁場変動は、主に磁気圏赤道面のプラズマ圧の非対称な分布による赤道環電流の非対称性によるものであると解釈できる。このイベントでは、DP2 電流系発達から約 5 分後には、どの磁気地方時でも赤道環電流の発達が始動した。特に注目すべき点は、太陽風磁場の北向き変化にともない 1752 UT に DP2 電流系が減衰したとき、1 分の精度で同時に非対称な赤道環電流の分布にも大きな変化が始まったことである。

図 6 (c) に示すように、強い対流電場がかかっている間、強い非対称を示したプラズマ圧分布は、電場が弱まると対称なプラズマ圧分布へと変化を始める。これらの観測は、電離圏の対流 (DP2) 電場が変化するとき、内部磁気圏における対流電場が同時に変化することを示唆する。

#### 4. 考察

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。もともと Dungey モデルは極域電離層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たり、赤道の電離層電流が極域と同時に発達するという特性と矛盾する。

太陽風磁場変動にともなう極域電離圏の対流電場発達に関して、Ridley 他 (1999) と Lockwood and Cowley (1999) の論争に端を発して、1998–2002 年頃に、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 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・レーダー観測にもとづく) (Etemadi 他, 1998; Todd 他, 1988 など)。
  - ② 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 他, 1998; Ruohoniemi and Greenwald, 1998; Murr 他, 2001 など)。
- さらに、高速伝播の立場をとるグループの中でも、磁気圏対流が  $1000 \text{ km/s}$  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

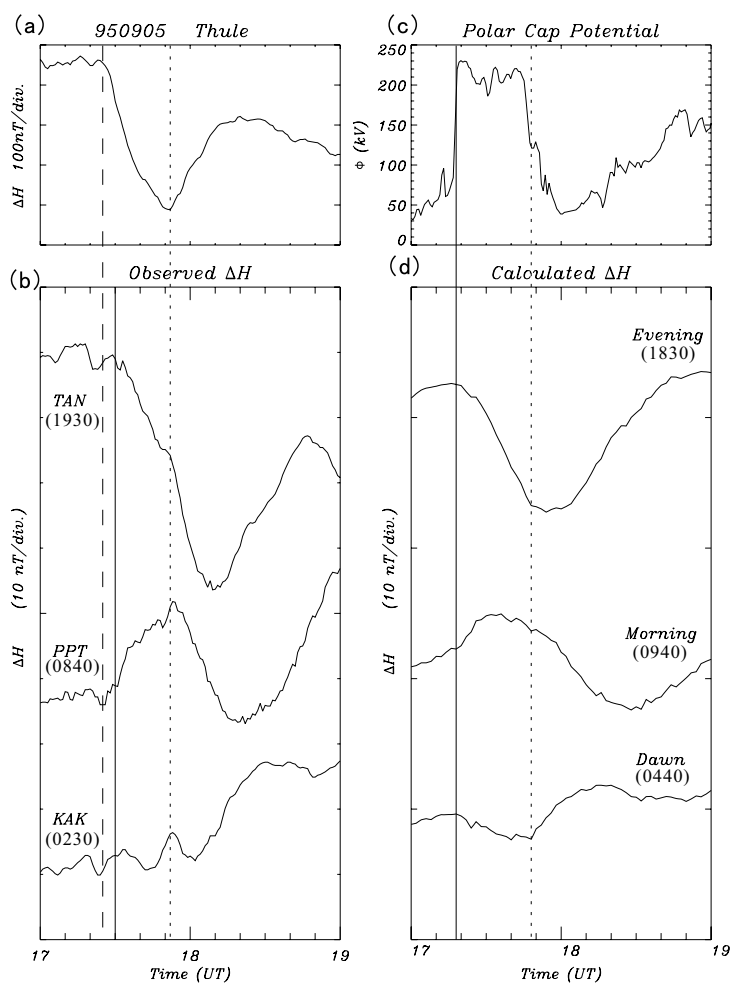


図5 1995年9月5日の (a) 極冠のTHLの磁場H成分。(b) 低緯度の3観測点の磁場H成分：TAN (1730 UTに1930 MLT)、PPT (0840 MLT)、KAK (0230 MLT)。(c) Boyle モデルで計算された極冠のポテンシャル値。(d) 粒子シミュレーションによる赤道環電流から計算された地上の磁場変動のH成分。(b) の3観測点と同じMLTの赤道において計算した。[Hashimoto 他, 2002]

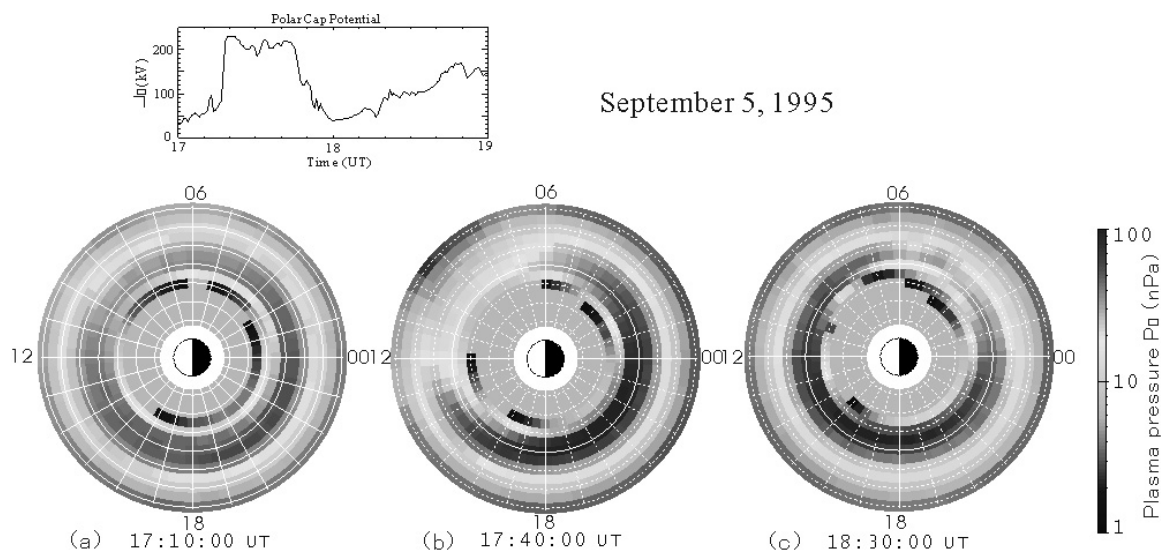


図6 磁気圏赤道面の磁場に垂直方向のプラズマ圧分布。(a) 対流電場が増加する前 (1710 UT) (b) 発達時 (1740 UT) (c) 減衰後 (1830 UT)。太陽方向は左手 [Hashimoto 他, 2002]

た (Ridley 他, 1999; Murr 他, 2001; Slinker 他, 2001) が、磁気圏中を伝播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 (Kivelson and Southwood, 1992; 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、極域の電離圏対流に限定されており、極域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捉え、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、電離圏を非圧縮たらしめているのは、極-赤道 (昼-夜) 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ている。

まとめとして、これまでの地上観測を基にした研究により得られた極-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を図 7 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かと期待される。

## 謝 辞

本論文は、『第一回磁気圏 - 電離圏複合系における対流に関する研究会』(於: 加計学園国際交流センター、世話人: 橋本久美子)、『地磁気の会』(於: 名古屋大学太陽地球環境研究所、世話人: 菊池崇) において発表し、有益なコメントをいただいた結果をまとめました。

名古屋大学の菊池先崇生、九州大学の田中高史先生、気象大学校の藤田茂先生を始め、ご意見をいただいた研究会の出席者の方々に深く感謝します。

## 参考文献

Araki, T., Global structure of geomagnetic sudden commencements, *Planet. Space Sci.*, 25, 373-384, 1977.

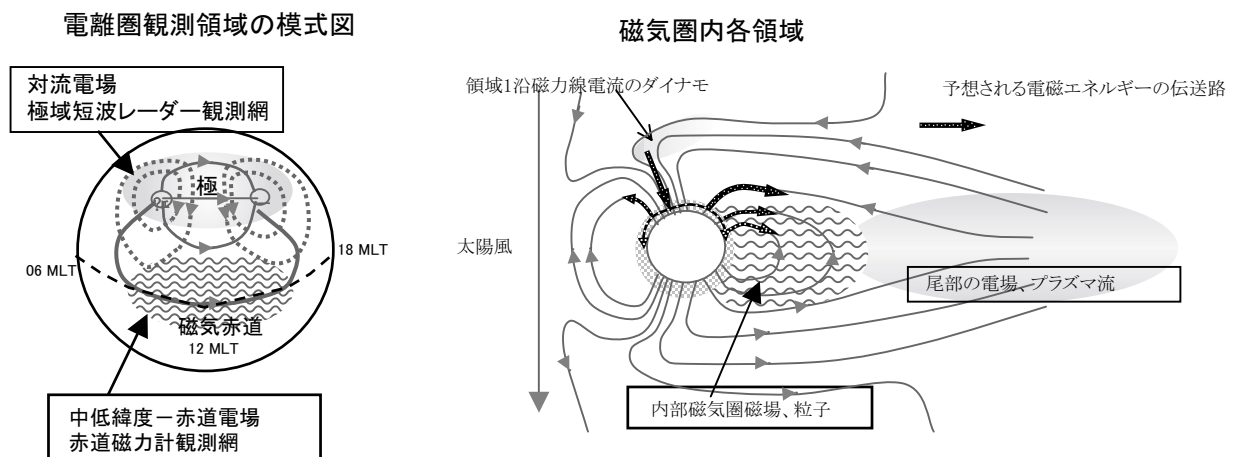


図 7 極-赤道電離圏電磁エネルギー結合の特性から予想される磁気圏-電離圏複合系内の電磁エネルギー伝送経路

- Dungey, J. W., Interplanetary magnetic field and the auroral zones, *Phys. Rev. Lett.*, 6, 47, 1961.
- 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.
- Fejer, B. G., and L. Scherliess, Time dependent response of equatorial ionospheric electric fields to magnetospheric disturbances, *Geophys. Res. Lett.*, 22(7), 851-854, 1995.
- Fejer, B. G., R. W. Spiro, R. a. Wolf, and J. C. Foster, Latitudinal variation of perturbation electric fields during magnetospherically disturbed periods: 1986 SUNDIAL observations and model results, *Ann. Geophys.*, 8, 441-454, 1990.
- 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, 1377, doi : 10.1029.2001JA0092228, 2002.
- 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, 2005.
- 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, 2005.
- Iijima, T., Field-aligned currents in geospace: Substance and significance, Magnetospheric Current Systems, *AGU Monograph* 118, 107-129, 2000.
- 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.
- 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. Luhr, 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.
- 菊池崇, 橋本久美子, 北村健太郎, 「磁気嵐時の赤道 DP2 とオーロラジェット電流」『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』抄録集 2007年 (印刷中).
- 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.
- 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.
- Murr, D. L. and W. J. Hughes, Reconfiguration timescales of ionospheric convection, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2145-2148, 2001.
- 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.
- Ridley A. J., G. Lu, C. R. Clauer, and V. O. Papitashvili, Reply, *J. Geophys. Res.*, 104, 4393-4396, 1999.
- 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.
- Slinker, S. P., J. A. Fedder, J. M. Ruohoniemi, and J. G.

- Lyon, Global MHD simulation of the magnetosphere for November 24, 1996, *J. Geophys. Res.*, 106, 361-380, 2001.
- 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.
- 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.
- Todd, H. and S. W. H. Cowley, M. Lockwood, D. M. Wills and H. Luhr, Response time of the high-latitude day-side ionosphere to sudden changes in the north-south component of the IMF, *Planet. Space Sci.*, 36, 1415-1428, 1988.

### Abstract

Plasma convection in the earth's magnetosphere is driven by the solar wind-magnetosphere interaction. The energy of the convection inflows from the dayside magnetosphere to the magnetotail and propagates to the polar ionosphere accompanying field-aligned currents. Enhancement and reduction in the convection would cause disturbances in the magnetosphere-ionosphere (MI) coupling system, such as geomagnetic storms, substorm, and so on. The energy inflow process has been, therefore, one of the important subjects of the space weather study, but it is still unsolved. This paper describes the crucial role of the ionosphere in the energy transmission in the MI coupling system. The ionosphere has been ignored in the energy transmission process, since the ionosphere is characterized by a medium that dissipates the electromagnetic energy as the Joule heating. In recent years, however, it has been observationally shown that the convection electric field instantaneously propagates from the dayside to the nightside in the polar ionosphere. Furthermore, we showed the observational fact that the plasma convection is enhanced in the inner magnetosphere and the near-earth magnetotail at one minute into the development of the convection electric field in the ionosphere. We argue that the transmission of the electromagnetic energy in the space below the ionosphere would play a major role in the energy redistribution of the convection in the entire MI coupling system.