



4. 地球電離圏

4. The Earth's Ionosphere

細川 敬祐

HOSOKAWA Keisuke

電気通信大学大学院情報理工学研究科

(原稿受付：2014年6月3日)

地球電離圏は、太陽からの極端紫外線放射によって大気が部分的に電離されている領域である。電離圏に分布する弱電離プラズマは、背景に存在する中性大気の変化に強く影響を受ける。また、高緯度電離圏のプラズマ環境は、その上方に広がる磁気圏との磁力線を介した相互作用の結果、激しい時空間変動を示す。本章では、まず、地球電離圏の鉛直構造とプラズマの生成／消滅過程、および電離圏プラズマの大規模な分布を概観する。続いて、地球電離圏における代表的な擾乱現象として、極冠パッチ、中規模伝搬性電離圏擾乱、プラズマバブルの3つを取り上げる。最後に、電離圏に電子密度の揺らぎを作り出すプラズマ不安定について述べる。

Keywords:

ionosphere, electron density, weakly-ionized plasma, aurora, plasma convection, polar cap patches, medium-scale traveling ionospheric disturbances, plasma bubble, plasma instability

4.1 はじめに

地球電離圏は、太陽からの極端紫外線 (Extra Ultra Violet: EUV) 放射によって部分電離された地球の超高層大気領域である。60–800 km 程度の高度範囲に存在し、国際宇宙ステーションや低高度を周回する人工衛星は、電離圏の中を飛翔している。経験モデル[1,2]による電子密度および中性大気密度の鉛直構造を図1に示す。300 km付近に現れる電離圏のピーク高度では電子密度が 10^{11} から 10^{12} m^{-3} 程度にまで達するが、中性大気の密度は同高度で 10^{15} m^{-3} 程度であるため、地球電離圏はもっとも濃い部分ですら0.1%程度が電離しているに過ぎない弱電離プラズマであると言える。このため、地球電離圏では、電離大気が背景に存在する中性大気と運動量、熱量の交換を行うことにより、完全電離プラズマ中では見られないような物理過程が生じる。また、地球電離圏は、特に高緯度領域において、その上部に広がる地球磁気圏と磁力線を介して結合しており、磁気圏からの電場の投影、および荷電粒子の降下によって大きく影響を受けることになる。

4.2 地球電離圏の基本的性質

4.2.1 地球電離圏の鉛直構造

図1に示すような電子密度の高度分布、および主イオンの種別に基づいて、地球電離圏はD領域(60–90 km)、E領域(90–150 km)、F領域(150 km以上)という3つの高度領域に区分される。電子密度のピークは、通常F領域の300 km付近の高度に位置する。図1から、地球電離圏の電子密度は、特に200 km以下の高度において、日照のない

夜間に顕著に減少することがわかる。

地球電離圏における主イオンの種別は高度によって異なる。E領域は、 NO^+ 、 O_2^+ などの分子イオンによって構成されている。それに対して、電子密度のピーク高度を与えるF領域では、 O^+ という原子イオンが卓越している。主イオンが、原子イオンであるか分子イオンであるかによって、プラズマの消滅過程、とくにその時定数に顕著な差異が生じる。これによって、E領域とF領域ではプラズマの空間分布や時間変動に大きな違いが現れる。

4.2.2 地球電離圏プラズマの生成

電離圏では、太陽からのEUV放射を、酸素原子、窒素原子、酸素分子などの中性大気が吸収することによって光電離が起こり、その結果としてイオンと電子が生成される。電離生成の高度分布について考える際には、電離される側の中性大気と電離する側のEUV放射の高度分布の双方を考慮する必要がある。中性大気は、静水圧平衡にあるために、高度が上がるに従ってその密度が指数関数的に減少する。それに対し、EUVは中性大気を電離することによって減衰するために、低高度ほどその強度が弱くなる。電離生

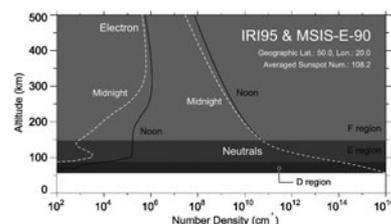


図1 経験モデル[1,2]による電子・中性大気密度の鉛直構造。

University of Electro-Communications, Chofu, TOKYO 182-8585, Japan

author's e-mail: keisuke.hosokawa@uec.ac.jp

成率の高度分布はその両者の掛け合わせとなり、例えばF領域において卓越する O^+ の生成率は、高度200 km付近で最大値を取る。

地球電離圏では、太陽 EUV 照射に伴う光電離以外にも、磁力線に沿って地球大気に降下する磁気圏プラズマによる衝突電離が起こる。磁気的な緯度が60度を超えるような極域の電離圏では、磁気圏プラズマシートにその起源を持つ荷電粒子が降下することによって、極を取り囲むリング状の領域においてオーロラが発生する。オーロラを光らせる荷電粒子（オーロラ粒子）の降下は、主として高度100 km近辺のE領域において突発的な電離を引き起こすことが知られている。よって、地球の極域電離圏において電子密度の空間構造やその時間変化を考える場合、太陽 EUV 照射による光電離と、磁気圏からの粒子降下による衝突電離の双方を考慮する必要がある。

4.2.3 地球電離圏プラズマの消滅

太陽 EUV 照射もしくは磁気圏からの粒子降下によって生成されたプラズマは、再結合によって元の中性大気粒子に戻る。前述のようにE領域プラズマは NO^+ 、 O_2^+ などの分子イオンによって構成されているため、以下に挙げる解離再結合反応によって電荷を失う。



それに対して、F領域の主イオンである O^+ は、以下に示すような分子(N_2 、 O_2)との組み替え衝突反応を経て分子イオンへと形を変えたあと、解離再結合によって消滅する。



分子イオンの解離再結合反応は、組み替え衝突の反応に比べて十分に速い。これにより、E領域の電子密度は生成が止まると速やかに減衰するのに対して、F領域では電離生成が止まった後（例えば日没後）も、少なくとも数時間以上はある程度の電子密度が維持されることになる。

4.3 地球電離圏プラズマの大規模構造

地球電離圏プラズマが水平方向にどのように分布するかは、EUV 照射による電離生成、オーロラ粒子降下による電離生成、高度によって異なるプラズマの消滅過程、さらには磁力線に平行および垂直な方向にプラズマが運動することによる輸送過程が複雑に絡み合って決まる。ここでは、極域と低緯度の電離圏について、典型的なプラズマの空間分布を示し、その分布を作り出す物理過程について述べる。

4.3.1 極域電離圏プラズマの分布

図2に冬季北半球の極域電離圏のプラズマ環境を模式的に示す。日照日陰境界線よりも昼側の領域では、EUV 照射によってプラズマが生成される。一方、夜側では光電離によるプラズマの生成がないために、一般には電子密度は低くなる。ただし、 O^+ が主イオンであるF領域においては、再結合に要する時定数が長いために、電子密度の空間構造は日照の分布と完全には一致せず、日没後もF領域ではあ

る程度の電子密度が維持される。

極域電離圏には、オーロラ粒子の降り込みが顕著であるオーロラ帯と呼ばれる領域が存在する。オーロラ帯では、荷電粒子の降り込みによって衝突電離が起こる。ただし、オーロラ粒子降下による電離は、主として分子イオンによって構成されるE領域において生じるため、再結合の時定数が短い。よって、オーロラ帯では、オーロラが出現している領域/時間帯においてのみ電子密度の増大が起こることとなり、電子密度の時空間変動が激しいことが知られている。図2に示すように、オーロラ帯よりも極側の領域を極冠域と呼ぶ。極冠域では、冬季には1日中日照がなく、かつオーロラも出現しないため、その場におけるプラズマの生成がない。よって、図2に示すように電子密度が非常に低くなることが予想されるが、次に述べるプラズマ対流の効果によって、極冠域にも高い電子密度の領域が現れることが知られている。

図2に矢印で示したように、極域電離圏F領域には大規模なプラズマの対流が存在し、その対流によるプラズマの循環が生じる[3]。このプラズマの大規模な循環によって、プラズマ密度の空間分布が大きく変えられることになる。図2に示した対流は、惑星間空間磁場 (Interplanetary Magnetic Field: IMF) が南向きの時に見られる2つのセルから成るパターンを示している。極冠域において反太陽方向の流れが卓越し、この反太陽方向の流れは、真夜中に達すると向きを変え、朝夕のオーロラ帯で昼間側へ戻るような対流へと繋がっていく。対流の速度は数100 m/s から数 km/s 程度であり、極冠域を横断して昼から夜までプラズマを輸送するのに数時間程度の時間を要する。F領域では中性大気との衝突が十分に小さいため、イオンも電子も $E \times B$ ドリフトをしていると考えてよい。つまり、図2に示されているプラズマ対流は、電離圏F領域プラズマのバルクな運動を示していることになる。

電離圏とその上に存在する磁気圏は、磁力線を介して電磁氣的に結合しており、磁気圏プラズマの対流運動は電離圏を巻き込んで進行する。つまり、極域電離圏対流は、磁気圏対流によって駆動されているのである。このような磁気圏と電離圏が結合した系におけるプラズマ対流の概念は、Dungeyによって初めて導入された[4]。IMF が南向きの時には、昼間側磁気圏界面と磁気圏尾部赤道面におい

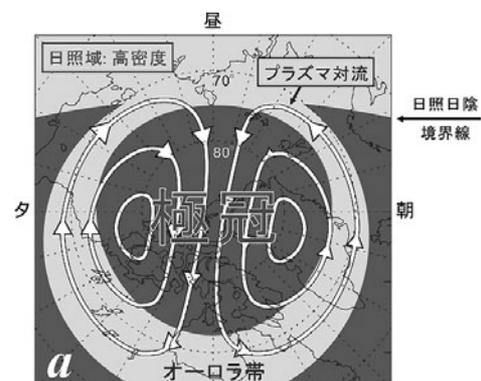


図2 極域電離圏のプラズマ環境の模式図。

て磁気リコネクションが起こり、それによって解放された電磁エネルギーが、磁気圏・電離圏の大規模プラズマ対流を駆動すると考えるいわゆる古典的な Dungey サイクルのパラダイムである。このコンセプトは、磁気圏のプラズマ運動に伴って発生した電場が、等電位である磁力線を介して電離圏に投影されることで電離圏の対流が駆動されるという考え方に基づいている。ここで述べたプラズマ対流によって、極域電離圏のプラズマ分布は激しい時空間変動を示すことになるが、その詳細については、4.4.1において極冠パッチという現象を例に取って示す。

4.3.2 低緯度電離圏プラズマの分布

4.3.1では、磁気圏から印加された電場による $E \times B$ ドリフトによって F 領域プラズマの循環が起こり、極域電離圏の電子密度分布が変わりうることを述べた。ここでは、電離圏を流れる中性大気風のドラッグで生じた電場による $E \times B$ ドリフトが、低緯度電離圏に赤道異常と呼ばれる電子密度の大規模構造を形成する様子を示す。

E 領域高度においては、中性粒子とイオンの衝突周波数がイオンのサイクロトロン周波数よりも大きくなる。しかし、電子については、衝突周波数よりもサイクロトロン周波数のほうが大きい。その結果、中性粒子との衝突によるドラッグ効果がイオンと電子で異なり、電離圏には電流が流れることになる。これにより、電離圏の電気伝導度が空間的に非一様である部分には分極電荷が蓄積し、結果として分極電場が生成される。電離圏高度では、赤道域の昼間側から放射状に中性大気の流れが生じ、同じく赤道域の夜側へと収束する。この中性大気の流れから電離圏電流の流れを計算すると、昼間側では低緯度の午前中の領域に収束、日没付近に発散があることがわかり、これらの領域にそれぞれ正負の電荷が蓄積する。その結果、昼間側の低緯度領域では、朝から夕方へ向かう東向きの電場（ダイナモ電場）が作られることとなる。この電場は、電流が流れる E 領域に生じるが、地球の磁力線が等電位であるために F 領域にもマップされ、プラズマの運動を引き起こす。

赤道域において地球磁場は北向きであることから、東向きのダイナモ電場による $E \times B$ ドリフトを考えると磁力線に垂直な方向の上向きのプラズマの運動が生じる。上昇したプラズマは、主として重力による力を受けて磁力線に沿って下向きに拡散する。この結果として、磁気的な赤道から南北に少し離れた領域に赤道異常と呼ばれる電子密度の極大領域ができる[5]。このように、低緯度電離圏では、熱圏大気の流れによって作られたダイナモ電場によるプラズマの輸送が、電子密度分布の大規模構造を決定する際に重要な役割を果たしている。

4.4 地球電離圏に見られるプラズマ擾乱

4.3で述べた地球電離圏の大規模構造の中には、それよりも空間スケールが小さい様々な電子密度の擾乱が現れる。数 100 km 程度の中規模スケールの現象として、極域においては、極冠パッチ、中・低緯度域においては、プラズマバブルや中規模伝搬性電離圏擾乱が挙げられる。ここでは、これらの現象について述べ、未解明問題を示す。

4.4.1 極冠パッチ

極冠パッチは、EUVによって電離された日照領域の高密度プラズマが、極冠域を流れる反太陽方向のプラズマ対流に乗って、夜側の日陰域へと輸送される現象である。この現象は、IMFが南向きの時に高い頻度で発生し、低高度衛星によるプラズマ密度観測、地上大気光観測、レーダー観測などに基づいてその形態が観測されてきた[6]。図3に極冠パッチの動態を模式的に示す。前述のようにIMFが南向きの時には、極域には2つのセルから構成される対流構造が現れる。特に昼間側の日照日陰境界線付近では、昼間側磁気圏界面で起こる磁気リコネクションの影響によって反太陽方向の対流が強まっている。この反太陽方向のプラズマ対流は、昼間側の日照プラズマを極冠域へと間欠的に取り込み、電子密度が局所的に増大した島状の領域を作り出す。この領域が、反太陽方向の対流に乗り、遠く夜側まで輸送される現象が極冠パッチである。

前述のように、F 領域プラズマは、再結合の時定数が大きく、生成が停止したあとも数時間にわたってその密度をある程度維持するため、日陰域を輸送されている間もパッチ内の電子密度は高いまま保たれる。これにより、日陰領域において、背景の数倍から10倍にまで達する高い電子密度領域が観測される。極冠パッチは、1980年代に発見されて以降、様々な地上・衛星観測や数値シミュレーションを用いて研究されてきた。特に、パッチが島状の領域に分断されるメカニズムに関しては、様々な仮説が提唱されてきたが、そのうちのどれが最も支配的なプロセスであるかについて、いまだに結論が出ていない。ただし、提唱された仮説のいずれもが極域対流の急激な時間変化に基づいたものであり、昼間側磁気圏界面における磁気リコネクションがパッチの生成に重要な役割を果たしていることが示唆されている[7]。特に、間欠的な磁気リコネクションがパッチの周期性を作り出している可能性が近年報告されている[8]。

図4に極冠パッチの全天大気光イメージャによる観測例[8]を示す。視野の中央部に見られる大気光発光強度（F 領域の電子密度におおよそ比例）の増大している領域が極冠パッチである。このような2次元のイメージング観測からは、パッチがその形状をダイナミックに変化させながら極冠域を旅していることが見て取れ、極域プラズマ対流が持つ激しい時間変化や空間的な非一様性がポーラーパッチ

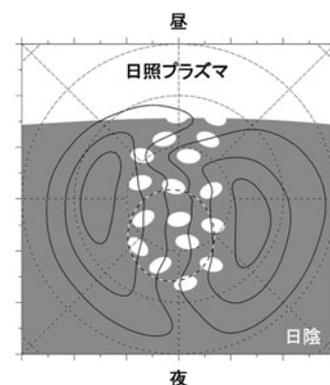


図3 極冠パッチの模式図。

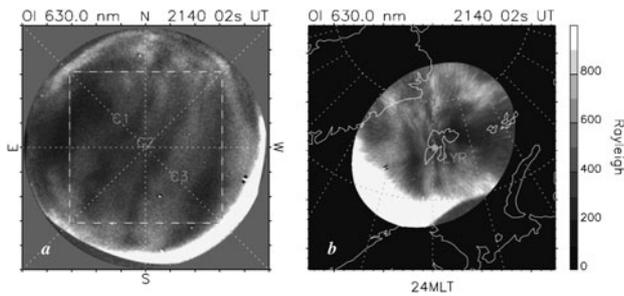


図4 パッチの全天大気光イメージャによる観測例[8].

の空間構造の決定に影響を与えていることが示唆される。パッチは、極冠域のプラズマ環境を支配し、複雑な密度擾乱を引き起こすために衛星測位にも影響を与える[9]。今後は、光学・レーダーによるイメージング観測と数値シミュレーションを組み合わせ、これらの影響をより定量的に理解していく必要がある。

4.4.2 中規模伝搬性電離圏擾乱

電離圏F領域を伝搬する電子密度の波状構造である中規模伝搬性電離圏擾乱 (Medium-scale Traveling Ionospheric Disturbances: MSTID) は、日本上空などの主として中緯度域において頻繁に観測される現象である。図5に、日本国内のGPS受信機網による全電子数の観測によって得られた典型的なMSTIDの様相を示す[10]。夜間、昼間ともに数100 kmスケールの水平波長をもつ電子密度の波状構造が日本上空を伝搬していく様子が見て取れる。MSTIDは大気重力波による中性大気の振動によって電離大気が磁力線に沿った方向に動かされるために生じると長年考えられてきたが、近年の中緯度夜間の大気光イメージャやGPS受信機網の観測から、夜間のMSTIDには、従来の大気重力波を原因とする考え方では説明できない特徴があることがわかってきている[11]。

夜間に観測されるMSTIDの空間構造は、中性大気の風が駆動する電流を電子密度の微小擾乱に沿って連続に流すために分極電場が生じ、その分極電場が電離圏を鉛直方向に変動させることによって作られていると考えられている。このPerkins不安定[12]と呼ばれるプラズマ不安定によるMSTIDの生成を支持する観測結果として、南北半球の磁気共役点において、波状構造の波長や伝搬速度、振幅などに磁気共役性が存在することが挙げられる[13]。これは、等電位である磁力線を介して南北半球で共有される分極電場が、夜間MSTIDの生成・伝搬機構に対して重要な役割を果たしていることを意味する。また、低高度衛星によるプラズマドリフトの観測によって、MSTIDの近傍に

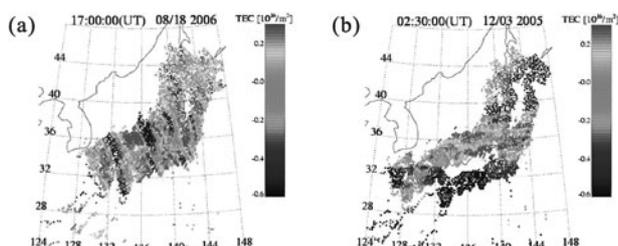


図5 MSTIDのGPS全電子数観測 (左:夜間, 右, 昼間)[10].

分極電場が実在することが確認されており[14]、夜間のMSTIDに関しては、中性大気の波である大気重力波の現れではなく、電磁気的な効果とその生成に寄与していることが示唆されている。但し、このプロセスは、夜間MSTIDの性質を定性的に説明できるものの、線形理論の範疇ではプラズマ不安定の成長率が小さく、観測の定量的な説明は未だに成されていない。現在は、電離圏E-F領域の電磁気的な結合過程を含めたMSTIDの生成機構が研究されており、今後、観測や数値シミュレーションによる解明が進むものと期待されている。

4.4.3 プラズマバブル

プラズマバブルは、電離圏下部に存在する低密度プラズマがF領域ピークよりも高い高度まで上昇する現象である。赤道域、低緯度域において観測される。図6に大気光イメージャによって捉えられたプラズマバブルのイメージを示す[15]。図中の枝のような暗い領域がプラズマバブルである。

プラズマバブルは磁気赤道において生じるRayleigh-Taylor不安定によって生成されると考えられている。赤道域では、下向きの重力加速度によりイオンは東向きにドリフトし、結果として東向きの電流が生じている。F領域下部で等密度面に上下方向の揺らぎが生じると、電流の一樣性を保つために分極が生じる。分極による電場に伴う $E \times B$ ドリフトにより、等密度面の上昇部分で上向き、下降部分で下向きの力を受け、初期擾乱は成長する。F領域下部で上昇を始めた低密度プラズマがF領域ピークを超えて非線形的に発展し、泡状にF領域上部まで成長を続けたものがプラズマバブルとして観測される[16]。

プラズマバブルの内部では2次的なプラズマ不安定が起こり、よりスケールの細かいプラズマの粗密構造ができる。この粗密構造は、電離圏を通過する衛星電波に揺らぎ(電離圏シンチレーション)を引き起こすことが知られている[17]。このため、プラズマバブル発生の場所・時刻を評価・予測することが実用面から求められている。プラズマバブルの基本的な生成機構は既に明らかとなっているものの、プラズマ不安定の発生条件や、初期的な密度揺らぎの起源が未だに明らかになっておらず、赤道域における複数の観測機器による3次元的な物理量の測定、および数値シミュレーションによる研究の進展が必要とされている。

4.5 地球電離圏に見られるプラズマ不安定

極冠パッチやプラズマバブル、MSTIDの内部・近傍には、さらに細かい空間スケールの電子密度の揺らぎ(イレギュラリティ)が存在していることが明らかになっている

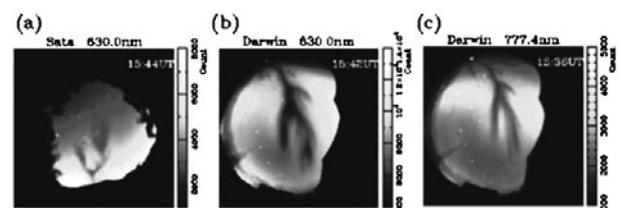


図6 大気光撮像によるプラズマバブルの観測例[15].

[17, 18, 19]. これは、電離圏 F 領域に存在する数 100 km スケールの電子密度構造の内部・近傍には、緯度に関わらず、微小スケールの密度擾乱が必然的に存在することを意味している。

極冠パッチの近傍で観測されるイレギュラリティは初期的な電子密度の微小擾乱を横切って流れる水平電流の連続性を保つために分極電場が生じ、その分極電場が初期擾乱を増幅することによって生成されていると考えられている。このプロセスは、Gradient-drift 不安定[20]として知られているが、根源的なメカニズムは、プラズマバブルや MSTID の生成の際に考えたプラズマ不安定と共通である。つまり、電子密度の勾配が存在する状況で、電離圏に流れる電流が初期的な電子密度擾乱を横切って連続であろうとするために生じる分極電場がプラズマの構造化を担っており、広い意味において、弱電離プラズマ中に生じる交換型不安定であるということが出来る。このように電離圏 F 領域の異なる緯度において観測される異なった構造が、共通の普遍的なプラズマ不安定によって形成されている可能性があることは特筆に値する。このことは、電離圏のような弱電離プラズマ中では、電子密度の勾配が存在し、電流が流れさえすれば、交換型のプラズマ不安定が生じることが「典型的に期待できる」ということを意味する。

但し、MSTID 生成の鍵を握ると考えられている Perkins 不安定、極冠パッチ近傍のイレギュラリティの生成に寄与していると考えられている Gradient-drift 不安定の双方において、線形理論によって得られる成長率は小さく、観測を定量的に説明できないことが指摘されている[21]。これは、構造の成長が非線形段階において起こっていること、他の不安定とカップルすることで成長が促進されていることを示すものである。例えば、極冠パッチに伴うイレギュラリティに関しては、Gradient-drift 不安定と Kelvin-Helmholtz 不安定との組み合わせによって大きな成長率が得られている可能性が示されている[7]。また、夜間 MSTID に関しては、Perkins 不安定が起こっている F 領域と、E 領域に現れるスプラディック E 層と呼ばれる構造の内部で生じている不安定がカップリングして、MSTID の成長を引き起こしている可能性が指摘されている[22]。これらの非線形性が生じるということが電離圏という状況において「典型的に期待できる」ことであるかどうかについては、まだ深い理解はなされていない。但し、E 領域、F 領域という電離圏と中性大気との結合過程が異なる二つの領域が磁力線によって結合されているという点と、太陽風／磁気圏から時間的空間的な変化が大きい電場の投影を常に受けているという 2 つの点において、非線形過程がプラズマ不安定による構造の形成に寄与する条件が揃っていると考えられる。

今後、不安定の時間発展を制御するパラメータ（密度勾配のスケール長、中性風速、背景電場、粒子降下など）を高い時空間分解能を持つ観測機器によって精密に測定し、得られたデータの特性を十分に考慮した数値シミュレーションを行うことで、弱電離プラズマ中のプラズマ不安定が電離圏プラズマの構造化に与える影響を定量的に吟味し

ていく必要がある。地上・衛星観測が充実している地球電離圏において、交換型プラズマ不安定によってプラズマに構造が生み出されていく過程を研究することは、その他の観測が疎な領域（磁気圏、惑星電離圏、太陽・恒星などの他天体）において生じている様々なプラズマ不安定現象を理解する上で重要な意義をもつと考えられる。

4.6 おわりに

地球電離圏プラズマは、弱電離プラズマであるがために、背景にある中性大気からの影響を強く受ける。また、上部に存在する磁気圏から電磁気的なエネルギーの流入があるために、複雑な物理過程が現れる。近年は、下層大気とのカップリングによって生じる電離圏変動が観測・数値シミュレーションによって示されつつあり、これらの隣接領域との結合を含めた形で、電離圏プラズマのダイナミクスを包括的に理解することが求められている。地球電離圏は長い観測の歴史を持ち、現在も最先端の観測機器を用いてグローバルな観測が行われている領域である。密な観測ができるという利点を生かして、複数の隣接領域とエネルギーの交換がある弱電離プラズマ環境を普遍的に理解することをめざした研究が行われるべきである。

参考文献

- [1] D. Bilitza, *Adv. Space Res.* **20**, 1751 (1997).
- [2] A.E. Hedin, *J. Geophys. Res.* **96**, 1159 (1991).
- [3] J.P. Heppner and N.C. Maynard, *J. Geophys. Res.* **92**, 4467 (1987).
- [4] J.W. Dungey, *J. Geophys. Res.* **69**, 3913 (1964).
- [5] H. Rishbeth, *Ann. Geophys.* **18**, 730 (2000).
- [6] G. Crowley, *Rev. Radio Science* 1993-1996, 619 (1996).
- [7] H.C. Carlson, *Radio Sci.* **47**, doi:10.1029/2011RS004946 (2012).
- [8] K. Hosokawa *et al.*, *J. Geophys. Res.* **118**, 447 (2013).
- [9] P. Prikryl *et al.*, *Ann. Geophys.* **29**, 377 (2011).
- [10] T. Tsugawa *et al.*, *GPS Solutions* **11**, doi:10.1007/s10291-006-0045-5 (2006).
- [11] A. Saito *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 3079 (1998).
- [12] F.W. Perkins, *J. Geophys. Res.* **78**, 218 (1973).
- [13] Y. Otsuka *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **31**, doi:10.1029/2004GL020262 (2004).
- [14] K. Shiokawa *et al.*, *J. Geophys. Res.* **108**, doi:10.1029/2002JA009639 (2003).
- [15] Y. Otsuka *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **29**, doi:10.1029/2002GL015347 (2002).
- [16] R.F. Woodman and C. La Hoz, *J. Geophys. Res.* **81**, 5447 (1976).
- [17] M.C. Kelley *et al.*, *J. Geophys. Res.* **87**, 5217 (1982).
- [18] A. Saito *et al.*, *Earth Planets Space* **54**, 31 (2002).
- [19] K. Hosokawa *et al.*, *J. Geophys. Res.* **114**, doi:10.1029/2008JA013707 (2009).
- [20] M.J. Keskinen and S.L. Ossakow, *Radio Sci.* **18**, 1077 (1983).
- [21] J.I. Moen *et al.*, *J. Geophys. Res.* **107**, doi:10.1029/2001JA000111 (2002).
- [22] T. Yokoyama *et al.*, *J. Geophys. Res.* **114**, doi:10.1029/2008JA013789 (2009).