

特集「将来木星圏・土星圏探査計画へのサイエンス：その1」

木星内部磁気圏でのコーラス放射と放射線帯電子生成過程

加藤 雄人¹, 土屋 史紀², 三好 由純³, 三澤 浩昭², 森岡 昭²

2011年8月29日受領, 2011年10月12日受理.

(要旨) 太陽系最大の磁気圏を持つ木星には、数十MeVに達する相対論的電子や数百MeVにおよぶイオンによって構成される放射線帯が存在する。木星放射線帯は従来、磁気圏内を高エネルギー粒子が木星近傍の放射線帯領域まで輸送されることによる供給過程と、その過程で生じる衛星ヤリリングとの衝突等による消失過程とのバランスにより形成されると考えられてきた。その一方で近年、木星内部磁気圏で発生するプラズマ波動であるホイッスラーモード・コーラス放射と、高エネルギー電子との相互作用が、放射線帯形成過程において果たす役割の重要性が注目されつつある。その契機となったのは、地球放射線帯の形成過程に関する研究の展開であった。木星及び地球放射線帯研究の密接な関連を示す最近の研究を紹介し、特に衛星IoからGanymede公転軌道の領域を探査することの重要性について述べる。

1. はじめに

木星は、直径が地球の10倍という惑星本体の巨大さと同様、磁気モーメントで比較して地球の約2万倍の強力な固有磁場を持つ。磁気圏のサイズを、太陽風との境界である磁気圏界面までの距離で考えると、地球磁気圏では太陽直下点で地球半径($R_E=6,378$ km)の約10倍であるのに対して、木星磁気圏では木星半径($R_J=71,492$ km)の60~100倍であり、空間スケールは太陽系内の固有磁場を持つ惑星の中で最大である。惑星磁気圏の勢力範囲は、吹き付ける太陽風の動圧とそれに抗する磁気圏側からの力のバランスによって定まるが、木星磁気圏においては、強力な固有磁場による圧力に加えて、磁気圏内に存在する重イオンを豊富に含んだプラズマの圧力が支えている [1]。このプラズマの主な供給源は、木星磁気圏の内部深くに存在する衛星Io (公転軌道半径: $5.89 R_J$) である。また木星は、約10時間という短い周期で高速に自転しており、プラズマのダイナミクスに大きな影響を及ぼしている。実際、木星から約30 R_J までの領域は強大な固有磁場

の影響により、プラズマ流が木星の自転方向の回転に強く支配されている。本稿ではこの領域を内部磁気圏と呼ぶ。

内部磁気圏には前述のIoの他、Europa ($9.38 R_J$)、Ganymede ($14.97 R_J$)、Callisto ($26.33 R_J$)のガリレオ衛星が存在する。衛星それ自身も興味深い研究対象である一方、その周囲を取り巻く磁気圏プラズマ中では、他の惑星磁気圏でのプラズマ物理素過程に共通する様々な現象が生起している。本稿ではその中でも、光速の99%以上の相対論的な速度を持つ高エネルギー電子が存在する領域：放射線帯の形成過程と、内部磁気圏で発生するプラズマ波動・コーラス放射について、Galileo探査機による観測結果を示しながら述べる。木星の放射線帯の形成過程は、将来の木星探査計画において重要な研究対象の一つとして挙げられるとともに、地球を含む惑星の磁気圏に共通する物理過程であり、宇宙プラズマ中での普遍的な粒子加速過程の本質的理解に繋がる課題である。

2. 木星磁気圏と放射線帯

放射線帯とは、惑星近傍の宇宙空間においてMeV (10^6 eV)を超える相対論的エネルギーを持つ粒子が存

1. 東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻
 2. 東北大学大学院理学研究科附属 惑星プラズマ・大気研究センター
 3. 名古屋大学 太陽地球環境研究所
 yuto@stpp.gp.tohoku.ac.jp

在する領域である。地球の放射線帯は1958年に発見されVan Allen帯と名付けられたが、木星の放射線帯もほぼ同時期にデシメータ帯の電波観測により発見されている。数百MHzからGHz帯で観測されるこの電波放射は、放射線帯電子が木星の磁力線の周りをサイクロトロン運動することにより生じるシンクロトロン放射である。発見以後、定常的な観測が続けられ、年単位の長期変動から数日スケールの短期変動まで様々な時間変動を示すことが明らかとなっている。木星内部磁気圏には相対論的エネルギーを持つ粒子が広く分布しており、粒子フラックスのピークは木星のごく近傍(2~4 R_J)にある。木星の放射線帯と言った場合、その位置は粒子フラックスのピーク周辺の限定した領域を指すことが多いが、木星内部磁気圏は相対論的な粒子に満ちていると言える。

木星磁気圏の奥深くに存在する放射線帯電子は、どのような物理過程を経て作り出されているのだろうか。地上からのシンクロトロン放射観測結果の蓄積の他、1970年代のPioneer 10号・11号およびVoyager 1号・2号ならびに1992年のUlysses探査機によるフライバイ観測、さらに1995年から2003年までのGalileo探査機による木星内部磁気圏での直接観測を経てなお、その過程は未だ多くの謎が残されている。一方で、直接観測結果の蓄積という面からはより有利であるはずの地球放射線帯の形成過程に関しても、1990年代から2000年代にかけて行われた観測研究の結果、従来の定説を覆す観測事実が明らかとされ、その後の観測研究ならびに理論・シミュレーション研究の進展に伴って、放射線帯の物理は近年新たな展開を見せている。

本稿の主題である、惑星放射線帯の物理の展開について述べるその前に、従来の定説はどのようなものであったかを概観する。

木星放射線帯の形成過程は、磁気圏内を惑星に対して遠方から近傍に向かって動径方向に輸送することにより作り出されると考えられてきた。これは「断熱加速過程」と呼ばれ、サイクロトロン運動など荷電粒子が磁場中で行う周期運動の中での保存量である断熱不変量の保存を基本とする加速過程である。例えば第一断熱不変量 $\mu = mv_{\perp}^2/2B$ (mおよび v_{\perp} は荷電粒子の質量および背景磁場に垂直方向の速度、 B は背景磁場強度を示す)を取り上げると、 μ を一定としたまま、荷電粒子を相対的に磁場の弱い領域(惑星に対して遠

方)から磁場の強い領域(惑星近傍)まで輸送した場合、磁場強度の変化に応じて粒子のエネルギーは上昇する(ベータトロン加速)。この輸送は、電磁場の擾乱と粒子との相互作用によるものと考えられており(動径方向拡散と呼ばれる)、電磁場擾乱の起源として地球磁気圏では太陽風や環電流の変動を起因としたMHD波動との相互作用が考えられている。一方、木星内部磁気圏では太陽風の影響をほとんど受けないとされており、その代わりに相対論的電子の輸送過程を担うのは、磁気圏プラズマを貫く磁力線の根元にあたる木星電離圏領域での、中性風と電離圏プラズマとの相互作用によるダイナモ効果であると考えられている[2,3]。中性風により木星電離圏のプラズマが磁力線を横切る方向に引きずられ、その結果生じるダイナモ電場の擾乱によって、磁力線を介して繋がる磁気圏プラズマの動径方向内側への輸送を引き起こす。この動径方向輸送により木星放射線帯の電子が輸送・加速される過程で、相対論的電子の消失を担う要素と位置づけられてきたのが、シンクロトロン放射を放出することによるエネルギー損失、木星の衛星およびリングとの衝突、およびプラズマ波動との相互作用である。

木星の内部磁気圏にはガリレオ衛星に加え、Ioの公転軌道より内側に4つの衛星(Metis, Adrastea, Amalthea, Thebe)が存在する。また、木星の自転赤道面:1.3~3.1 R_Jの領域にはダスト粒子がリングを形成している。相対論的電子は木星磁気圏中を動径方向へ輸送される過程で、これらの衛星の公転軌道やリングの存在する領域を通過する。衛星およびリングと衝突した高エネルギー電子は消失するが、木星の磁軸が自転軸に対して9.4°傾いていることにより、磁気赤道に集中して存在する“ほぼ磁力線垂直方向に速度ベクトルを持つ電子”は衝突の頻度が相対的に小さくなる。このように衛星やリングとの衝突を免れた高エネルギー電子は消失することなく生き残り、放射線帯領域に到達できると考えられている[4]。

従来の木星磁気圏での放射線帯形成理論では、プラズマ波動との相互作用は衛星やリングと同様、消失過程の一つとして捉えられていた。プラズマ波動の中でも、広いエネルギー帯の電子と相互作用することのできるホイッスラーモードの波動が注目されたが、磁気圏内の高エネルギー電子を電離圏へと落とす効果が主に取り上げられ、木星のオーロラの要因の一つとして

考えられてきた[5,6]. この考え方に転換をもたらしたのは、地球の放射線帯の形成過程に関する研究成果である。

3. コーラス放射と放射線帯形成過程

はじめに地球放射線帯の形成過程の概要と、近年の研究の展開を紹介する。

1958年の発見以降、地球を取り巻く放射線帯は安定に存在する領域として考えられてきた。しかしながら、1990年代後半からの直接観測研究の結果、地球の放射線帯の激しく時空間変動する様相が明らかとなった。特に電子放射線帯の外帯と呼ばれる領域では、磁気嵐が発達する過程で相対論的電子が完全に消失した後、数日間の時間スケールでフラックスを増加させ、場合によっては磁気嵐前よりもフラックスが高くなる事が明らかとなっている[7,8]。放射線帯の再形成過程においては、動径方向への輸送による外部から

の供給過程に加えて、放射線帯領域内部での加速メカニズムも必要とされている。この放射線帯領域での加速メカニズムを担う物理過程としては、様々な周波数帯のプラズマ波動や磁気圏内で観測される諸現象が候補に挙げられているが、中でも有力な候補として、内部磁気圏で発生するプラズマ波動であるホイッスラーモード・コーラス放射との相互作用が注目されている[9]。コーラス放射は、電子のサイクロトロン周波数の0.2~0.8倍の周波数帯域で観測されるプラズマ波動であり、1秒以下の時間スケールで周波数が時間的に変化する微細なスペクトル構造を持つことが知られている[10](図1a)。この特徴的なスペクトル構造がどのように形作られるかは、1950年代の発見[11]以来の謎であったが、近年計算機実験により再現され、磁気赤道領域で生じる非線形過程が重要であることが明らかとなった[12,13]。この計算機実験では、発生したコーラス放射との非線形相互作用により、一部の高エネルギー電子が高効率に加速される様相も再現されている

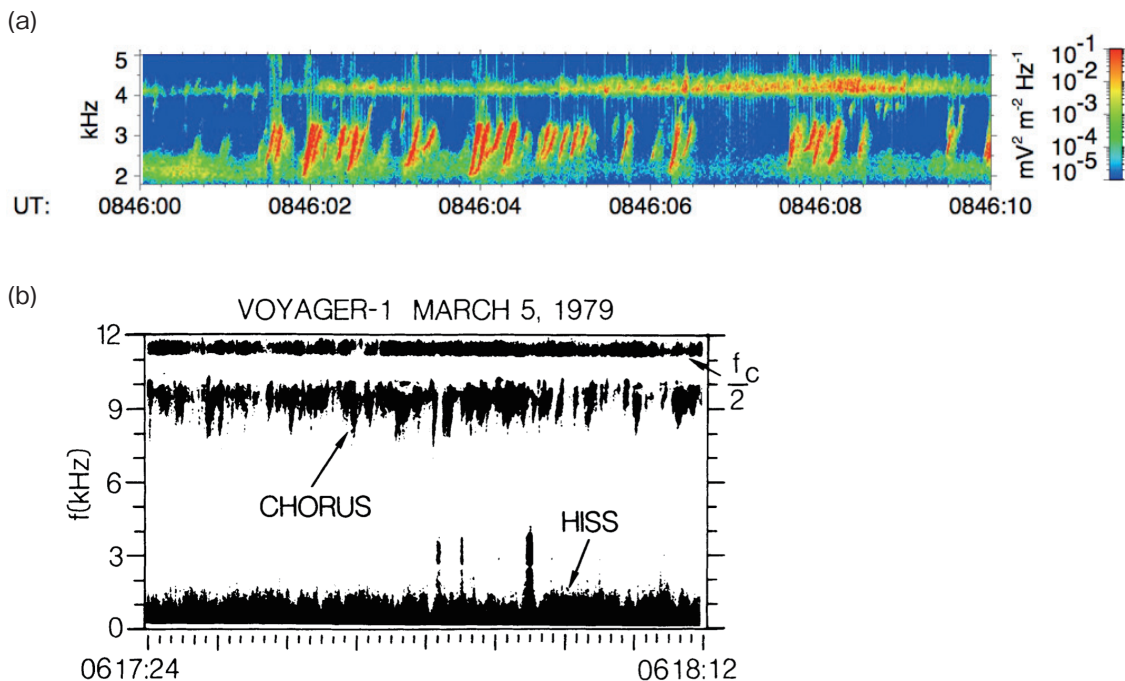


図1: (a) CLUSTER衛星により地球磁気圏の磁気赤道領域、地球からの距離が約 $4.4 R_E$ の位置で観測されたコーラス放射のスペクトル。Santolik et al.(2008)[10]より引用。(b) Voyager 1号により木星磁気圏の磁気赤道領域、木星からの距離が約 $7.9 R_J$ の位置で観測されたコーラス放射のスペクトル。Coroniti et al. (1980)[5]より引用^{*1}。

*1 Coroniti et al., Detection of Jovian whistler mode chorus: implications for the Io torus aurora, Geophys. Res. Lett., 7, 1, 45-48, 1980.
Copyright 2011 American Geophysical Union. Reproduced/modified by permission of American Geophysical Union.

[14]. 波動振幅が背景磁場強度の 10^3 程度になるコーラス放射は、コヒーレントな波動であるため、一部の共鳴電子は波動電磁場成分が作るポテンシャルに捕えられ、その結果効率よく加速される。この非線形相互作用による電子加速過程は、従来考えられてきた放射線帯電子の加速過程と比較して、加速効率が非常に高いプロセスである。理論・シミュレーション研究により指摘された非線形過程が、放射線帯の形成で支配的かどうかは定量的な実証が必要であり、物理過程を捕えるに必要な高分解能のプラズマ計測器による直接観測が重要な課題として残されている。放射線帯領域での相対論的電子加速過程を主なターゲットとする複数の科学衛星ミッションが、米国・ロシアを始めとして提案され、また各国が地上に展開する磁力計や光学観測網とも連携した国際的共同観測の実現に向け、議論が進められている。我が国でもERGプロジェクトが立ち上げられ、その中核となるERG衛星は宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所の小型科学衛星シリーズの2号機に選定され、2015年の打ち上げを目指して検討が進められている [15].

再び木星磁気圏に話を戻す。前述の通り木星放射線帯の形成過程は、動径方向への輸送に伴う断熱加速過程に基づいて理解されてきたが、近年、木星近傍・数 R_J でのシンクロトロン放射強度の空間分布を説明する為には、放射線帯領域へ輸送される前の時点で、電子がある程度高いエネルギーを獲得している必要性が指摘された [16]. この内部磁気圏での電子加速機構を担う物理プロセスとして挙げられるのが、コーラス放射との波動粒子相互作用である。

コーラス放射については、地球磁気圏での発見と同時に、Voyager 1号による木星磁気圏での観測例が報告された [17]. 観測された周波数スペクトルには、地球磁気圏で観測されるコーラス放射に類似した特徴が見られ [5] (図 1b)、励起プロセスの共通性を示唆している。近年、木星磁気圏内を周回したGalileo探査機による観測結果の統計解析から、木星内部磁気圏で観測されるコーラス放射の空間分布が明らかにされた [18,19]. 図2はGalileo探査機により同定されたコーラス放射の空間分布を、磁気赤道面に投影したものである。木星磁気圏のコーラス放射はGanymedeの公転軌道よりも内側で、 I_0 の公転軌道付近までの領域で観測されている。また、波動強度はEuropa軌道の周辺に

ピークを持つことが明らかとなっている。さらに木星内部磁気圏でのプラズマ環境に関して、磁場モデルおよびプラズマ密度分布モデルとの比較から、コーラス放射の観測される領域における電子のサイクロトロン周波数(f_{ce})とプラズマ周波数(f_{pe})の比(f_{pe}/f_{ce})が、地球内部磁気圏で放射線帯電子が効率よく加速されるとされている領域(プラズマ圏の外側)と近い値になっていることが示されている。これらの結果は、地球磁気圏と同様、木星内部磁気圏においてもコーラス放射との非線形相互作用による相対論的電子加速過程が生起していることを指摘しており、木星放射線帯の形成過程におけるコーラス放射の果たす役割の重要性が注目されつつある [19-21].

4. まとめ：惑星磁気圏に共通する粒子加速機構の解明に向けて

本稿では、木星および地球放射線帯の形成過程について取り上げ、双方に共通する物理素過程として考えられるホイッスラーモード・コーラス放射による電子加速過程を紹介した。Galileo探査機による観測結果の統計解析による成果は、地球放射線帯の研究で注目されているコーラス放射による加速過程が、木星放射線帯の形成過程にも寄与している可能性を示唆するものであり、地球放射線帯の研究と木星放射線帯の研究との密接な関連を示す好例である。また、コーラス放射は木星磁気圏・地球磁気圏の他、土星や天王星の磁気圏でも観測例があり [22, 23], コーラス放射による相対論的電子加速過程は、磁場を有する惑星の磁気圏における普遍的な電子加速過程であることも予想される。特に土星磁気圏に関しては、Cassini探査機によりプラズマ環境の詳細な描像が明らかにされつつある。土星磁気圏の特徴としては、衛星Enceladusやリングを主な起源とする豊富な中性粒子・ダスト粒子の存在が挙げられる。放射線帯形成の物理の観点からも、磁気圏内の高エネルギー電子の輸送・消失過程に関する地球や木星放射線帯との比較研究が期待される。

様々な惑星磁気圏でのコーラス放射による電子加速過程の解明には、計算機実験が大きな役割を果たすことが期待される。一例として、惑星磁気圏の空間スケールの違いが電子の加速効率に及ぼす影響を考える。前節で示したように、地球と木星でコーラス放射が観測される領域のプラズマ環境は類似しており、観測さ

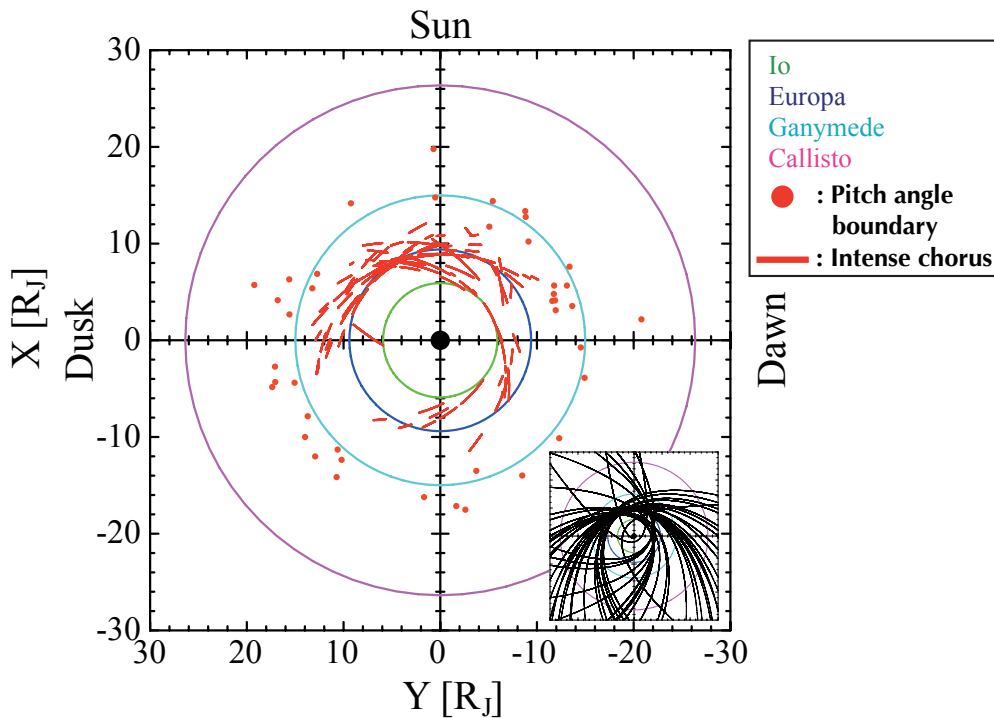


図2: Galileo探査機により同定されたコーラス放射の空間分布を、磁気赤道面に投影した結果。ガリレオ衛星の軌道もあわせて示している。コーラス放射を励起しているのは 10^5 eV程度のエネルギーを持つ電子であり、電子の持つ速度分布で背景磁場ベクトルと速度ベクトルのなす角(pitch angle)が大きい成分が卓越する場合に励起しやすくなると考えられている。木星内部磁気圏ではある程度木星に近づく、プラズマ波動を励起しやすい速度分布を持つ電子がほぼ定常的に観測されることが明らかとなっており、速度分布が変化する境界領域はpitch angle boundaryと呼ばれる。図中の赤丸はGalileo探査機により同定された境界の位置を示しており、Ganymedeの公転軌道付近に境界が存在する事、コーラス放射は境界よりも内側で観測されていることが示されている。図はKatoh et al. (2011)[17]より引用^{*2}。

*2 Katoh et al., Whistler mode chorus enhancements in association with energetic electron signatures in the Jovian magnetosphere, J. Geophys. Res., 116, A02215, 2011. Copyright 2011 American Geophysical Union. Reproduced/modified by permission of American Geophysical Union.

れるコーラス放射の周波数も同様にkHz帯である。この結果はすなわち、コーラス放射の波長は地球と木星で同程度であることを示している。地球磁気圏よりも空間スケール(すなわち磁力線の長さ)が一桁大きな木星磁気圏では、電子加速領域の大きさも一桁大きくなり、加速効率も高くなる事が期待され、テスト粒子解析の結果からもそのようなスケール則の存在が示唆されている[20]。一方で、電子加速過程が有効に生じ得るかについては、コーラス放射の波動振幅や継続時間など、詳細な波動特性を明らかにする必要がある。この点の解明には、背景磁場の空間スケール等、実際の惑星磁気圏の環境を初期条件に用いたプラズマ素過程の計算機実験が必要とされるが、現在の大型計算機のリソースでは地球磁気圏を対象とする計算が現実的に

なりつつあるという状況であり、木星磁気圏を対象とするには、計算機環境のさらなる充実が待たれる。

将来の木星探査ではEuropa, Ganymedeの公転軌道を中心とした領域でのプラズマ環境の直接観測ならびにリモート観測の検討が進められている。図2が示すように、この領域では強い強度を持つコーラス放射が観測されており、コーラス放射による加速過程が放射線帯形成過程において、どの程度支配的な役割を果たしているかの定量的な議論が、観測結果を用いる事で可能となる。木星内部磁気圏での加速過程に関する議論では、地球磁気圏内での高エネルギー電子加速過程の研究で得られた(および今後得られる)知見が重要な鍵になると期待される。また、シンクロトロン放射の数日スケールの時間変動に関する、動径方向輸送に

基づいた放射線帯粒子フラックスのモデル計算結果からは、加速過程の議論に加えて、高エネルギー電子の消失過程をより詳細にかつ定量的に評価する事の必要性が指摘されている[24]。木星内部磁気圏での探査は、プラズマ総合観測に加え、高エネルギー電子の消失を担っている衛星本体およびその周囲を取り巻く中性粒子の分布を明らかにする事も、木星放射線帯の形成過程を理解する上で非常に重要である。将来の木星探査による放射線帯形成過程の解明は、現在検討が進められているERGプロジェクトによるジオスペース探査の成果とも密接に関連する、宇宙プラズマ中での粒子加速過程の本質的理解に繋がる重要な課題であることを強調したい。

謝 辞

本研究の一部は東北大学グローバルCOEプログラム「変動地球惑星学の統合教育研究拠点」の支援ならびに日本学術振興会科学研究費補助金(課題番号22684025)の助成を受けて行われました。Galileo探査機の観測結果の解析については、ドイツ・マックスプランク研究所のN. Krupp博士、米国アイオワ大学のW. S. Kurth博士から多くの支援と助言をいただきました。

参考文献

- [1] Khurana, K. K. et al., 2004, in Jupiter, 593.
- [2] Brice, N. M. and McDonough, T. R., 1973, Icarus 18, 206.
- [3] Miyoshi, Y. et al., 1999, Geophys. Res. Lett. 26, 9.
- [4] Bolton, S. J. et al., 2004, in Jupiter, 671.
- [5] Coroniti, F. V. et al., 1980, Geophys. Res. Lett. 7, 45.
- [6] Thorne, R. M. and Tsurutani, B. T., 1979, Geophys. Res. Lett. 6, 649.
- [7] Baker, D. N. et al., 1994, Geophys. Res. Lett. 21, 409.
- [8] Friedel, R. H. W. et al., 2002, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 64, 265.
- [9] Miyoshi, Y. et al., 2003, J. Geophys. Res. 108, 1004.
- [10] Santolik, O. et al., 2004, Ann. Geophys. 22, 2555.
- [11] Storey, L. R. O., 1953, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 246, 113.
- [12] Katoh, Y. and Omura, Y., 2007, Geophys. Res. Lett. 34, L03102.
- [13] Omura, Y. et al., 2008, J. Geophys. Res. 113, A04223.
- [14] Katoh, Y. et al., 2008, Ann. Geophys. 26, 3451.
- [15] Miyoshi, Y. et al., 2010, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. 8, Tm_1.
- [16] Sicard, A. and Bourdarie, S., 2004, J. Geophys. Res. 109, A02216.
- [17] Scarf, F. L. et al., 1979, Science 204, 991.
- [18] Menietti, J. D. et al., 2008, Ann. Geophys. 26, 1819.
- [19] Katoh, Y. et al., 2011, J. Geophys. Res. 116, A02215.
- [20] Summers, D. and Omura, Y., 2007, Geophys. Res. Lett. 34, L24205.
- [21] Horne, R. B. et al., 2008, Nature Phys. 4, 301.
- [22] Gurnett, D. A. et al., 1981, Science 212, 235.
- [23] Gurnett, D. A. et al., 1986, Science 233, 106.
- [24] Tsuchiya, F. et al., 2011, J. Geophys. Res. A09202.