

特集「将来木星圏・土星圏探査計画へのサイエンス：その2」

小型科学衛星1号機Sprint-A/EXCEED計画の概要

吉川 一朗¹, 土屋 史紀², 寺田 直樹³

2011年9月28日受領, 2012年1月27日受理.

(要旨) EXCEED計画は、惑星周辺に分布するプラズマが発する極端紫外光を地球周回軌道から分光・撮像する衛星計画である。地球型惑星の大気散逸と、木星型惑星に見られる回転支配型磁気圏でのエネルギー輸送の問題に焦点を当て、地球とは異なる磁気圏特性の理解を目指す。宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所の小型科学衛星1号機(Sprint-A)に選定され、2013年の打ち上げに向けて開発が進行中である。

1. はじめに

固有磁場の強度と自転の速度は、惑星の磁気圏を特徴付ける重要な要素である。金星や火星は固有磁場が弱いため、磁気圏前面での太陽風の動圧は惑星固有磁場がもつ磁気圧を上回り、大気は太陽風に直接さらされて宇宙空間へ散逸する。一方、木星や土星は固有磁場が強く自転速度が速いため、自転効果が支配的な領域には太陽風の影響が及ばないと考えられている。本稿で紹介するEXCEED(EXTreme ultraviolet spectroSCOpe for ExosphERIC Dynamics)計画では、地球とは異なる環境下の磁気圏特性の理解を目指し、金星・火星周辺で生じているプラズマの散逸、及び木星磁気圏でのエネルギーの輸送過程の問題に取り組む。

EXCEED計画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[1]の1号機(Sprint-A)に選定され、2013年の打ち上げを目指して開発が進められている。極端紫外光を捉える分光撮像装置を搭載し、太陽系の惑星周辺に広がるプラズマを地球の周回軌道上から観測する。惑星磁気圏から放たれる極端紫外光は分光装置[2]や撮像装置[3]により観測された例があり、磁気圏のプラズマの様子を知る手段として威力を発揮してきた。EXCEEDは極端紫外光の波長域に高い感度をもつ光学素子を用いて、プラズマが

放射する輝線を分光、その空間分布を撮像し、惑星磁気圏の様子を概観することができるユニークな計画である。本稿の前半ではEXCEEDが目指す科学目標について述べ、後半で観測装置の概要を紹介する。

2. EXCEED ミッションの科学目標

2.1 回転支配型磁気圏におけるエネルギーの輸送

固有磁場を持つ惑星の周辺では、惑星の自転角運動量が磁力線を介してプラズマに輸送され、プラズマは惑星の周りを惑星と同じ角速度で回転(共回転)する。木星磁気圏内には木星中心から6 R_J (R_J : 木星半径)の位置に衛星イオがあり、その火山ガスを起源とするプラズマがトーラス状に分布している(イオトーラス)。このプラズマはゆっくりと外側へ輸送されながら自転角運動量の供給を受け[4]、木星から約10数 R_J までの領域では共回転が維持される。このため、動径方向のプラズマ輸送やエネルギーの伝搬は非常にゆっくりとなると考えられてきた。しかし、近年、この考えでは理解できない現象が観測されている。

図1に木星オーロラとイオトーラスが発する極端紫外線の明るさの変化を示す[5]。また、両者の増光現象(図1の点線と矢印)の一例についてその対応関係の詳細を図2に示す。オーロラは、共回転領域の外側の領域から高エネルギー電子(10-100keV)が磁力線に沿って大気へ降り込み、主に水素分子が衝突励起される

1. 東京大学大学院理学研究科

2. 東北大学大学院理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター

3. 東北大学大学院理学研究科

yoshikawa@eps.s.u-tokyo.ac.jp

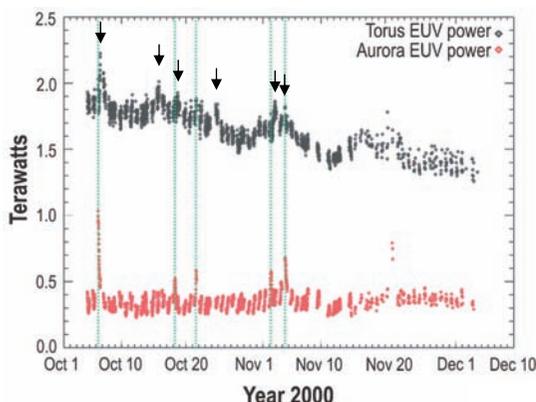


図1: カッシーニ探査機が計測したイオトラス(上)と木星オーロラ(下)のEUVの発光強度の変化^{*1}。オーロラとイオトラスの増光現象(点線と矢印)の間に相関が見られる[5,6]。その一方で、本稿では詳しく述べないが、イオトラスのみ増光が見られる場合もある。

*1 Courtesy of Drs W. Pryor and N. Schneider.

ことで発光する[7]。共回転領域の深部に位置するイオトラスと共回転領域の外側に起源を持つオーロラの増光が、ほぼ同時か、短い時間差で対応を示すのは何故だろうか。オーロラ増光は外部磁気圏で起こる磁気リコネクションによるエネルギーの解放[8]や太陽風中の衝撃波の到来[9]が原因であると考えられている。一方、イオトラス中の硫黄・酸素イオンは高温電子(10eV ~ 1keV)の衝突励起により発光し[10]、その強度変動はイオン密度あるいは電子温度の変化により生じるが、イオンがイオトラスから輸送によって取り除かれる時定数は数十日と長いのに対し、電子は極端紫外光の放射により1日程度の時定数で冷却されることから、短い時間スケールの変動は高温電子の増大・減少により引き起こされたと推測される。これらのことから、この増光現象は、共回転領域から遠方の領域で開放されたエネルギーが共回転領域深部に持ち込まれ、高温電子の出現・増大をもたらした結果であり、オーロラとイオトラスの増光の時間差はエネルギーの輸送に要した時間であると考えられる。

エネルギーの輸送機構の候補として考えられるのは、(1)対流による高温電子の輸送、(2)電磁流体(MHD)波動として伝播したエネルギーによる電子加熱、である。(1)に関して、共回転領域で動径方向にプラズマを輸送する機構として、遠心力が駆動力となる交換型不安定が提案されている[11]。この機構では、イオ起源の高密度プラズマと共に外向きに輸送される磁束

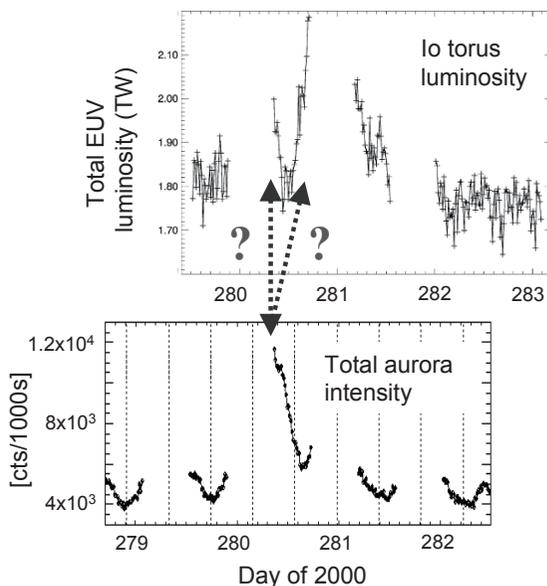


図2: カッシーニ探査機が観測したイオトラス(上) [6]と木星オーロラ(下)の増光現象の1例。カッシーニ探査機は10時間おきに観測を休止したため、増光の開始時間や継続時間が分からず、両者の対応関係の決定は困難である。上図はSteffl et al. (2004)[6]より引用^{*2}。下図はPlanetary Data Systemより取得したデータから作成。

*2: Copyright © 2004, Elsevier.

と、外側にある高温・希薄なプラズマと共に内向きに戻される磁束の収支がバランスする。Galileo探査機によって、高温・希薄なプラズマを含む磁束が共回転領域内で見つかっているが[12]、このような磁束が観測された時間は、共回転領域内での総観測時間の0.3-0.4%程度にすぎない[13]。これは、内向きの輸送が空間的に狭い領域で生じている事を示しており、磁束の収支がバランスするためには、内向きの輸送速度は外向きの数100倍の速さを持つと推定される[13]。仮に、この速さで外部磁気圏からイオトラスまで磁束が一気に戻される場合、輸送時間は10時間程度と見積もられる[14]。一方、(2)については、MHD波動による輸送時間として、Alfvén波の伝搬時間を見積もると、数分~1時間程度となる[14]。エネルギーの輸送時間は2つの機構で大きく異なるため、原因(エネルギーの解放)と結果(イオトラスでの高温電子の出現・増大)の時間差を知ることで、エネルギー輸送機構を検証できる。カッシーニ探査機の観測では、観測休止時間(10時間)が増光現象の継続時間に比べて長く、両者の相関関係や時間差の決定が困難であった(図

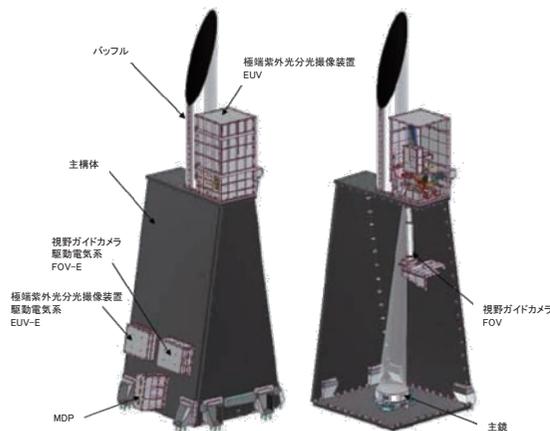


図3：小型科学衛星シリーズ1号機の衛星共通バスに取り付けられる、ミッション部構体と搭載機器。この他に、次世代小型衛星電源系要素技術実証システムが搭載される。このミッション部全体が衛星共通バスの上に結合される。

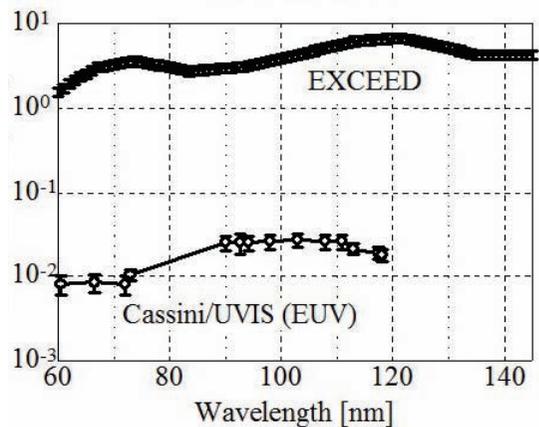


図5：装置全体の有効開口面積の波長依存性。主鏡、分光器、及び検出器それぞれの同等品の効率を波長毎に測定し算出した。カッシーニ衛星に搭載された装置の有効面積 (Steffl et al. (2004) [6] Fig.3より読み取った値) を比較として示す。

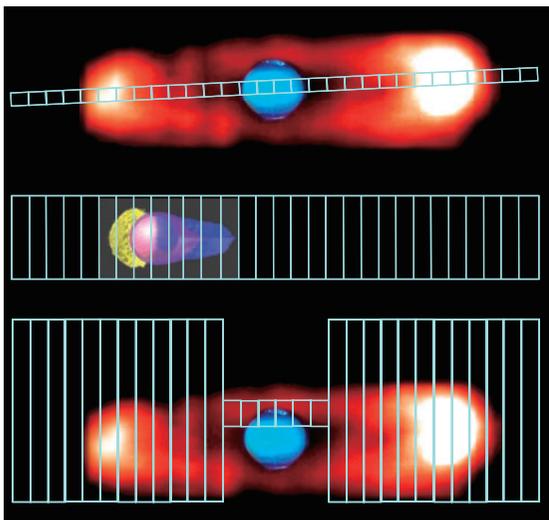


図4：3種類の形状のスリット(上から10°, 60°, 及び140°スリット)。10°と140°スリットの背景は、衝の時期の木星紫外オーロラ及びイオトラス(それぞれハッブル宇宙望遠鏡及びカッシーニ探査機による観測結果^{※3}の合成), 60°スリットの背景は視直径が35°の時の金星(大気散逸のシミュレーション結果[21])である。

※3：Courtesy of NASA/JPL-Caltech.

2). EXCEEDは約100分の周回時間のうち50分間を観測に当てる事によって、約1時間の時間分解能で観測を行い、2つの輸送機構を区別する。

イオトラスでの増光が、高温電子の出現・増大により生じた事を観測的に実証するために必要となるのは、硫黄イオンの輝線を分光観測し、プラズマ診断を

行うことである。広い波長域に渡る分光観測により、電子温度と密度、並びに高温電子の存在量を導出することができる[15]。イオトラス全体と木星オーロラの両方を同時に視野に入れて観測する事によって、オーロラの増光をトリガとして、イオトラスに高温電子が出現する様子を捉え、動径方向のエネルギー輸送機構を検証する。

2.2 弱磁場惑星からの大気散逸

大気の宇宙空間への散逸は惑星に共通の過程であり、その強弱は「惑星が大気を保有し得るか」「惑星が生命を育み得るか」を左右する。EXCEEDは、固有磁場の弱い地球型惑星(金星と火星)より散逸する電離大気の総量変化を調査する。これら弱磁化惑星では、惑星磁気圏の磁気圧で太陽風動圧に抗することができず、太陽風は惑星の超高層大気に直接作用し、大気の散逸を引き起こす。太陽風や紫外光放射量などに反映される太陽活動度は、太陽系誕生直後には非常に高かった[16]。従って、大気の散逸量の太陽活動度依存性を定量的に調べることは、初期太陽系に起きた大気散逸の歴史を知る手がかりを与える[17,18]。現在の太陽の活動極大期のEUV放射強度は、太陽系誕生初期の平均的な量に比較的近いとされている。また、太陽活動極大期には、コロナ質量放出(CME)現象の発生頻度が増上がり、太陽風密度が高い状況下での大気の散逸量を調べることが出来る。EXCEEDはまさにこの好機を

表1: Sprint-A/EXCEEDの諸元.

衛星諸元	打ち上げ	2013年
	重量	330 kg
	サイズ	1 m × 1 m × 4 m
	軌道高度	950 km × 1150 km
	ミッション期間	1年
	軌道傾斜角	31度
	指向精度	±2分角(視野ガイドカメラにより指向精度は±5"に改善)
分光撮像装置	波長範囲	60 nm - 145 nm
	視野	約400秒角
	空間の分解能	< 20秒角
	波長分解能	0.4nm
光学系	主鏡	放物面鏡, 口径20cm, F=8, 焦点距離160 cm 材質: Chemical vapor deposited silicon carbide (CVD-SiC)
	分光器	回折格子: ラミナー型 1800 lines/mm
	検出器	MCP with resistive anode encoder (RAE) 60 mm × 20 mm 光電物質蒸着: Cesium iodide (CsI)
	総合効率	1%以上

表2: EXCEEDが搭載するスリット.

スリット名称	サイズ(幅×長さ)	用途
10" スリット	10" × 400"	全ての観測対象(波長分解能0.4 nm)
60" スリット	60" × 400"	全ての観測対象(波長分解能1.0 nm)
140" スリット	140" × 400"	主に木星・金星 形状は図4参照

とらえて観測するよう計画されている。

地球の周回軌道からのリモートセンシングは、飛翔体を惑星に送り込む探査とは異なり、大気散逸の素過程を調べることはできないが、飛翔体では測定が困難な低エネルギーイオン(< 10eV)の計測が可能で、磁気圏や電離圏の大局的な様子を知り、惑星からの大気の散逸総量を計ることができる。EXCEEDは、惑星の外圏や電離圏の大局的な密度構造、並びに電離大気の散逸総量とその太陽風・紫外放射依存性を明らかにする。特に、一価の炭素イオン(CII 133.5 nm)及び一価の酸素イオン(OII 83.4 nm)の輝線の観測から、低エネルギーイオンの寄与を含めたイオンの散逸総量を把握し、惑星が保有する温室効果ガス(CO₂)の総量の長期的変遷の理解に寄与する。

3. EXCEEDミッションの概要と観測計画

図3に衛星のミッション部の外観を、表1に衛星の諸元を示す。軌道は高度950 km × 1150 km、軌道傾斜角31度の地球周回軌道で、軌道周期は約100分である。高度の下限は、ジオコロナを形成する水素原子と

酸素イオンに由来する雑音を軽減するように、高度の上限は地球放射線帯の粒子がコンプトン効果により観測機内部に作り出す2次電子やγ線に由来する雑音を軽減するように決定した[19,20]。ミッション機器として極端紫外分光撮像装置(EUV)と視野ガイドカメラ(FOV)が搭載される。ミッションデータプロセッサ(MDP)はこれらの機器を制御すると共に、観測データの収集・編集を行う。

イオトーラスの主成分の1つである硫黄イオンは、電子衝突で励起されて発光し、その輝線は極端紫外光領域に集中している。プラズマ診断から電子温度を導出するために、広い波長域(60 - 145 nm)を分光観測する。観測する空間領域は、木星の場合はオーロラとイオトーラス全体、地球型惑星の場合は磁気圏の前面から電離圏、並びに大気が出流する下流域までの広い範囲となる。このため、400秒角の視野を確保するように設計した。表2及び図4にEXCEEDが擁するスリットとその観測対象に対する大きさを示す(金星は大気散逸のシミュレーション結果[21])。木星オーロラ及びイオトーラスを観測する時は主に140秒角幅のスリットを、他の惑星の観測では60秒角スリットを用

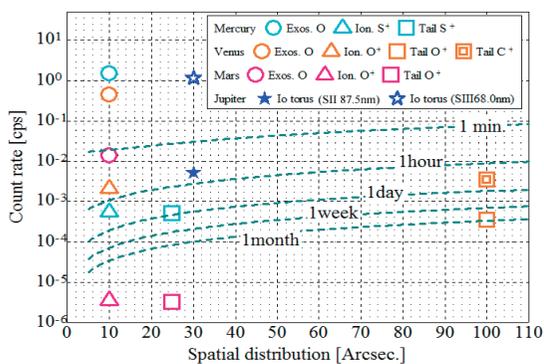


図6：観測対象の大きさ，光子の計数と積分時間の関係。Exos, Ionos, Tail はそれぞれ外圏，電離圏，磁気圏尾部を示す。破線は，SNR(signal-to-noise ratio)=1が得られるまでの積分時間を示す。光学系の有効面積を3.14cm²，波長分解能を1.2 nmとした。各観測対象で想定した輝線の波長と強度は以下の通りである。水星外圏：OI 130.4 nm, 2.6 kR(×10)；水星電離圏：SII 90.9 nm, 0.92R(×10)；水星尾部：SII 90.9 nm, 0.14R(×10)；金星外圏：OI 130.4 nm, 750R(×3)；金星電離圏：O II 83.4 nm, 3.5R；金星尾部：OII 83.4 nm, 5.8 mR(×10)及びCII 133.5 nm, 59 mR(×10)；火星外圏：OI 130.4 nm, 340 R(×3)；火星電離圏：OII 83.4 nm, 6.1 mR；火星尾部：O II 83.4 nm, 0.87 mR(×10)，イオトラス：SII 87.5 nm, 1R及び SIII 68.0 nm, 220R。地球型惑星の輝線の強度の一部(主に外圏と尾部)は，CME到来時の予想流出量に基づいた見積値であり，括弧内の数値は，通常時の輝線強度に対する倍率を示している。

いる。特別に高い波長分解能(0.4 nm)を必要とする時のために10秒角スリットを準備している(検出器の位置分解能が波長分解能の制約要因となっている)。

EXCEEDの重要な開発項目の1つは装置全体の検出感度である。光学系は，主鏡，スリット，分光器，及び検出器から構成され，反射面が2面と受光面が1面ある。極端紫外光の波長域で高い反射率をもつ材質と，高い効率で光子を電子に変換する光電物質を採用し，観測する波長域で，1 cm²以上の有効面積(主鏡の面積と検出器を含む光学系全体の効率の積)を確保した(図5) [22]。各惑星を観測するにあたり必要な積分時間の見積もりを図6に示す。イオトラスの硫黄イオンの輝線は，数10～数100Rの明るさがあり，1回の周回中の積分(約50分)で十分に高い信号強度が得られる。惑星大気に吹きつける太陽風の動圧が上昇すると，大気の散逸量は増加する事が知られている[23]。太陽活動極大期にはCMEが頻発し，これによって大気散逸量が1桁上昇すると，金星尾部の炭素イオンの輝線(CII 133.5 nm)は1日未満の積分時間で検出されると見積もられる。火星・金星尾部の酸素イオン(OII 83.4 nm)に関しては，数ヶ月に渡る長い積分

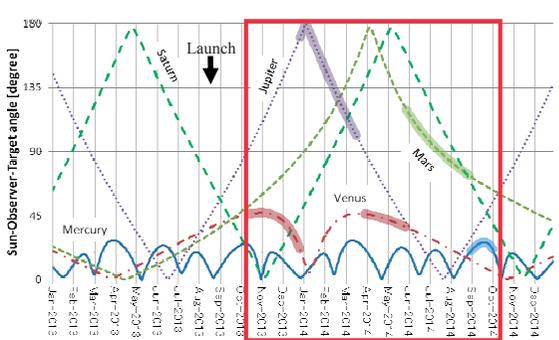


図7：2013年1月から2014年12月までの各惑星の位置(地球から見た太陽－惑星間離角)。EXCEEDによる木星，金星，火星，及び水星の観測予定時期を太線で示す。

時間を確保して流出総量の上限值を決定する。

2つ目の開発要素は，観測機の視野をいかに精度高く天体に向け，安定に追尾するか，という点である。小型科学衛星バスの指向精度は±2分角であるのに対し，EXCEEDの観測に必要な精度は±5秒角(衝の時期の木星視半径の半分に相当)である。この両者の差を埋めるため，視野ガイドカメラが搭載される。視野ガイドカメラは可視光に感度を持ち，4分角四方の視野を持つ。極端紫外分光器のスリット周縁で反射された光を視野ガイドカメラに導き，姿勢の制御に利用する。惑星を観測している間は，スリットからはみ出した惑星像の一部を視野ガイドカメラで撮像し，MDPがその重心位置を計算する。この情報を衛星バスの姿勢系機器に渡し，±5秒角の指向精度制御を実現する。

図7に，打ち上げ後の惑星観測の計画を示す。2013年の秋から約1年間の観測を計画している。太陽活動は2013-2014年に極大を迎えたと予測されており[24]，地球型惑星の大気散逸の観測には好機である。2014年初頭に木星観測の好機があり，その前後の期間に，太陽活動が最も高くなると予想される時期の金星観測を実施する。その後，火星と水星を観測できる時期が順に訪れる。この他に，土星(衛星エンセラダス起源の酸素原子)，並びにEUV放射の強い若い恒星も観測の対象として検討している。観測好機が重複する場合は，2つの観測対象を切り替えて観測する。

4. まとめ

地球の周回軌道から、惑星を取り巻く希薄なプラズマの様相を極端紫外光の分光撮像観測により明らかにする EXCEED 計画について、科学目標、観測装置と観測計画の概要を紹介した。EXCEED 計画では、装置の性能と観測方法を太陽系内の惑星磁気圏に最適化し、金星・火星の大気散逸および木星磁気圏のエネルギー輸送に関する未解明問題に取り組む。2013年の秋から約1年間、観測を行なう。

L03107.

[24] <http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle/>

参考文献

- [1] Saito, H. et al. 2009, *Acta Astronautica* 65, 1345.
- [2] Shemansky, D. E. and Smith, G. R., 1981, *J. Geophys. Res.* 86, 9179.
- [3] Nakamura, M. et al., 2000, *Geophys. Res. Lett.* 27, 141.
- [4] 埜千尋, 2010, *バリテイ* 25, 13.
- [5] Pryor, W. R. et al., 2001, AGU Fall Meeting abstract, #SM12A-0835.
- [6] Steffl, A. J. et al., 2004, *ICARUS* 172, 78.
- [7] Clarke, J. T. et al., 2004, in *Jupiter*, 639.
- [8] Woch, J. et al., 2002, *Geophys. Res. Lett.* 29, 1138.
- [9] Clarke, J. T. et al. 2009, *J. Geophys. Res.* 114, A05210.
- [10] Thomas, N. et al., 2004, in *Jupiter*, 561.
- [11] Siscoe, G. L. and Summers, D., 1981, *J. Geophys. Res.* 86, 8471.
- [12] Thorne, R. M. et al., 1997, *Geophys. Res. Lett.* 24, 2131.
- [13] Russell, C. et al., 2005, *Planet. Space Sci.* 53, 937.
- [14] Tsuchiya, F. et al., 2011, *Adv. Geosci.* 25, 57.
- [15] Yoshioka, K. et al., 2011, *J. Geophys. Res.* 116, A09204.
- [16] Ribas, I. et al., 2005, *Astrophys. J.* 622, 680.
- [17] Chassefiere, E. et al., 2007, *Planet. Space Sci.* 55, 343.
- [18] Terada, N. et al., 2009, *Astrobio.* 9, 55.
- [19] Yoshioka, K. et al., 2010, *Adv. Space Res.* 45, 314.
- [20] Yoshikawa, I. et al., 2010, *Adv. Geosci.* 19, 579.
- [21] Terada, N. et al., 2009, *J. Geophys. Res.* 114, A09208.
- [22] Yoshikawa, I. et al., 2011, *Adv. Geosci.* 25, 29.
- [23] Edberg, N. J. T. et al., 2010, *Geophys. Res. Lett.* 37,