

みんなでふたたび木星へ，そして氷衛星へ その3 ～非熱的中性粒子観測器 PEP/JNA ～

浅村 和史¹，二穴 喜文²，三好 由純³，坂野井 健⁴，
齋藤 義文¹，下山 学²，JUICE-PEP/JNA 日本チーム

(要旨) 欧州宇宙機関(ESA)は木星探査機 JUICE の開発を進めている。JUICE 衛星に搭載される予定の科学観測器の一つに非熱的中性粒子観測器 PEP/JNA (Plasma Environment Package / Jovian Neutrals Analyzer) がある。木星磁気圏において非熱的中性粒子の成因の一つは、Ganymede などの天体表面へのプラズマ粒子の降り込みによって起こる後方散乱及びスパッタリング現象である。生成した非熱的中性粒子は電磁場の影響を受けずに弾道飛行する。このため、希薄な大気しかもたず、氷衛星表面と木星磁気圏プラズマ粒子が直接衝突する環境における非熱的中性粒子観測は、氷衛星表面に投影したプラズマ構造の空間変化の情報をもたらす。これに対しプラズマ直接観測では、詳細なプラズマパラメータが得られるものの、原理的に時間・空間変化の分離が困難である。非熱的中性粒子観測はプラズマ観測に対して相補的な役割を持つものであり、両観測を通して木星/氷衛星磁気圏の理解を進めてゆきたい。

1. 非熱的中性粒子とは

希薄な大気しかもたない天体表面からは、プラズマ粒子の衝突や太陽光照射などによって粒子が放出される。これらの過程にはイオンが降り込んだ際に表面構成粒子がたたき出されるスパッタリング、自身が反射する後方散乱、宇宙塵/太陽光/電子衝突による粒子放出(MIV ; Micrometeorite Impact Vaporization/ PSD ; Photon Stimulated Desorption/ESD ; Electron Stimulated Desorption)，熱脱離 (TD ; Thermal Desorption) などがある。この中でMIV, PSD, ESD, TDについては放出粒子のエネルギーが低く、最も高いMIVであっても2500 - 5000K (0.2-0.5 eV)程度と考えられている。

一方、後方散乱(backscattering)過程では入射プラズマと同程度のエネルギーを持つ粒子まで存在し得る。また、スパッタリング(sputtering)過程は運動量交換

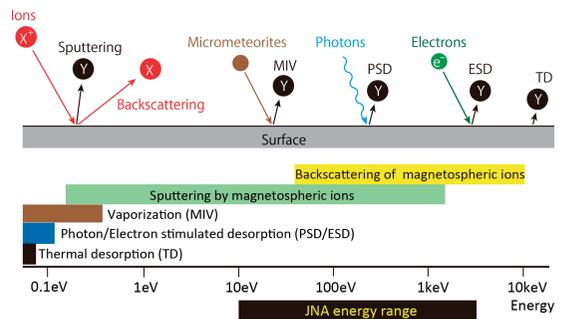


図1: 希薄な大気しか持たない天体表面からの粒子放出過程と放出粒子の典型的なエネルギーレンジ。

過程であり、入射粒子のエネルギー・質量、出射粒子の質量などによるものの、熱的エネルギーより十分高いエネルギーを持つ粒子が放出される(図1)。したがって、エネルギーの高い後方散乱粒子、スパッタリング粒子を選択的に計測することで、その生成起源である天体表面に降り込むイオンの情報を得ることができ[1, 2]。

これらの放出粒子のほとんどは電気的に中性の状態で放出される。このため、後方散乱粒子、スパッタリ

1. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
2. Swedish Institute of Space Physics
3. 名古屋大学太陽地球環境研究所
4. 東北大学惑星プラズマ・大気研究センター
asamura@stp.isas.jaxa.jp

ング粒子の多くは非熱的中性粒子であり、生成後、電磁場の影響を受けずに弾道飛行することとなる。これは、天体表面から飛来する非熱的中性粒子を撮像観測すると、天体表面に衝突した周辺プラズマ構造の空間構造やその時間変化といった情報を、天体表面に投影した形で得られることを意味している。これに対し、プラズマ直接観測では詳細なプラズマパラメータが得られるものの、原理的に時間・空間変化の分離が困難である。したがって、非熱的中性粒子の撮像観測はプラズマ直接観測の制約を補うものであり、相補的である。

本稿で紹介するPEP/JNAは、木星の衛星であるGanymede表面で生成される非熱的中性粒子の観測を主ターゲットとしており、観測される後方散乱粒子、スパッタリング粒子フラックスは天体表面と磁力線でつながった領域のプラズマ環境を示すものと考えることができる。

2. PEP/JNAの科学目的

木星の磁気圏において氷衛星起源のプラズマがどのような過程で生成され、どのような過程を経て磁気圏に供給されてゆくのかはよく分かっていない。例えば、過去のGalileo衛星の観測からはGanymedeが固有磁場を持つことが分かっており、木星磁気圏の中で独自の衛星磁気圏が形成されていると考えられている。また、希薄ながら大気圏を有している可能性も指摘されている。しかし、Ganymedeの磁気圏においては、木星磁気圏プラズマ流のマッハ数が小さいため、上流側に衝撃波面が形成されず、またAlfven Wingと呼ばれる特徴的な構造が形成される。これに対し、太陽風と惑星磁気圏の相互作用の場合には、超音速の太陽風が吹き付けることにより衝撃波面が形成され、Alfven Wingの形成が起こるのは極めて限られた太陽風条件に限定される。このように、木星プラズマ流-ガニメデ磁気圏相互作用は地球磁気圏とは異なる特徴を有している。こうした地球磁気圏とは大きく異なる磁気圏において、どのようにプラズマが分布し輸送されているか、さらには衛星磁気圏と木星磁気圏とがどのように相互作用しているかについては未だ理解されていない。また、Ganymede起源の中性粒子(H, O, H₂Oなど)は周辺空間に流出すると考えられる。しかし、流

出源がGanymede表面にどのように分布し、どのような放出過程を経て希薄な大気を形成するのか、さらには流出した粒子が木星磁気圏にどのように分布し、木星磁気圏ダイナミクスに影響を与えているのかは分かっていない。

後方散乱粒子、スパッタリング粒子は木星磁気圏/衛星磁気圏から衛星表面にプラズマ粒子が降り込むことによって生成される粒子であり、これらを観測することによって磁気圏空間構造や時間発展を観測することができる。また、プラズマ粒子の降り込み、そして後方散乱過程、スパッタリング過程による粒子放出とその後の電離は木星磁気圏プラズマの消失・生成を意味しており、衛星を介した磁気圏プラズマの輸送過程の一端を担うものである。

そこで、PEP/JNAチームでは、上記の問題意識のもとに以下の2つの科学目標を設定し、JUICEミッションの目標である氷衛星科学探査の一翼を担う。

- (a) Ganymede磁気圏構造、および木星磁気圏プラズマとの相互作用の理解
- (b) 木星磁気圏における物質の生成、輸送、消滅に果たす氷衛星の役割の理解

また、PEPはJNAによる非熱的中性粒子観測に加え、熱的中性粒子および4つのプラズマ直接観測を行うセンサーから構成される。さらにJUICEには磁場や波動を観測される機器も搭載される。これらのセンサーと同時観測を行うことで、氷衛星に起源をもつ中性粒子、プラズマがどのように生成され衛星磁気圏に分布するのか、さらに、それらが木星磁気圏の中でどのように輸送され、木星磁気圏のダイナミクスに影響を及ぼすかを解明し、JUICEのもう一つの科学目標である巨大ガス惑星の世界の理解にも貢献する。

2.1 Ganymede磁気圏構造の理解

Ganymedeの公転半径は15R_J(R_J:木星半径)であり、木星磁気圏内で木星の自転によって形成されるプラズマ共回転領域内を公転している。このため、Ganymede固有磁場と木星固有磁場によって磁気圏が形成されていると考えられている(図2)。そして、Ganymede表面へのプラズマ粒子の降り込み構造が磁気圏形状に対応して存在するものと考えられている。Galileo衛星がGanymedeフライバイ時に観測したプラズマパラメータを入力としたMHDシミュレーショ

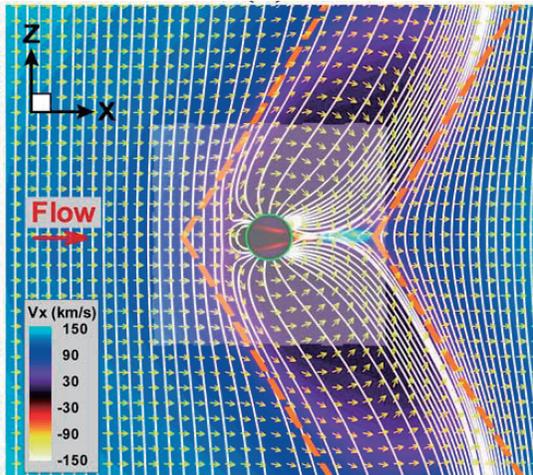


図2：MHD シミュレーションによって得られたGanymede磁気圏形状。白線は磁力線を示している。極域に「open」な磁力線、赤道域に「closed」な磁力線領域があることが分かる。[3]より転載。

ン[3]を用い、Ganymede表面に降り込むイオンフラックス分布を推定してみると、経度90°Eを中心としたtrailing hemisphere(反公転方向に面した半球)ではカスプ付近に降り込みがあり、経度90°Wを中心としたleading hemisphere(公転方向に面した半球)では赤道域付近に強い降り込みが存在することが確認できた。赤道域への降り込みの原因は、leading hemisphereの低緯度域上空で磁気リコネクションが発生し、Ganymede方向に向かう高温のプラズマ流が発生するためと説明されている。

一方、Galileo衛星で取得されたGanymede表面イメージでは、極域と赤道域でViolet/Green比が大きく異なっている。この理由として、Ganymedeの極域には片端がGanymede表面に接続し、反対側は木星磁気圏につながるいわゆる「open」な磁力線のフットプリントがあるが、低緯度域には両端がGanymede表面に接続する「closed」な磁力線フットプリントがあるため、長期間にわたるトータルのプラズマ粒子の降り込み量に差が出るのが表面特性の進化の差となって表れたという仮説が提唱されている[4]。この仮説は、極域にはプラズマ粒子の降り込みが多く、Ganymede表面に存在する氷の表面が不規則な構造になっているのに対し、赤道域ではプラズマ粒子の降り込みが少ない上に表面温度が極域より高く、氷の表面が滑らかになっているためViolet/Green比が異なる、というも

のである。しかし、この場合、上述のMHDシミュレーションの結果が正しければ、低緯度域にViolet/Green比が大きい領域が現れてもよいかもしれない(Ganymedeは自転と公転が同期しており、leading hemisphereの領域はleading hemisphereのまま維持される)。このように、Ganymede磁気圏構造の研究については、必ずしも整合的でない説が林立する状況であり、その統一の描像はまだ得られていない。プラズマ粒子が衛星表面に降り込むことによって生成される非熱的中性粒子を観測し、降り込み領域の空間分布、時間発展のリモート観測を実現することで、Ganymede磁気圏モデルに制限を与え、より現実的な磁場モデルが構築できると考えられる。

また、Ganymede磁気圏と相互作用する木星プラズマ流はマッハ数が低いいため、地球磁気圏に見られるような衝撃波面とシース構造が形成されない。したがって、Ganymede磁気圏界面領域のプラズマの分布やダイナミクスは、地球磁気圏のそれとは大きく異なっていることが予想される。さらに、木星の高速自転により、木星磁気圏共回転プラズマは磁気赤道付近に集中し、Ganymede軌道付近ではディスクを構成していると考えられるが、木星の自転軸と磁気双極子軸が約10度傾いていることにより、Ganymedeはディスクの内外を行ったり来たりする。それに伴ってGanymede磁気圏の形状も大きく変わると考えられる。JUICE衛星搭載機器の中で、PEP/JNAによる非熱的中性粒子観測は木星プラズマ流とGanymede磁気圏の相互作用を直接反映すると考えられるカスプの空間構造を可視化できる唯一の手法であり、JUICEがGanymedeを周回する間に、カスプの構造の時間発展を追跡することができる。そしてプラズマ粒子直接観測とあわせることにより、地球磁気圏と異なるカスプの動態を明らかにすることが期待される。

2.2 木星磁気圏における物質輸送の理解

プラズマ粒子が衛星表面へ降り込んだ際の後方散乱の効率について、月では数%から20%との観測結果がある[5, 6]。このため、衛星表面に降り込んだプラズマ粒子の一部は後方散乱されるが、多くは衛星表面に留まると考えられる。ただし、希薄な大気しかもたない固体天体表面において、非熱的中性粒子の後方散乱効率が導出された例は月での例のみであり、他天体

での観測例はなく、未解決問題となっている。特に氷衛星においては、その表面のほとんどが氷に覆われていると考えられており、 SiO_2 を主成分とする月の表面とは特性が異なる。そのため、後方散乱効率を観測的に導出することは物質輸送を理解する上で重要である。

また、後方散乱粒子やスパッタリング粒子でエネルギーの比較的低いものは衛星重力圏を抜けられず、途中で電子衝突などにより電離し電離圏/磁気圏プラズマとなるか、再度衛星表面に到達する。一方衛星の重力圏を十分脱出可能なエネルギーを持つ非熱的中性粒子は木星磁気圏内に直接供給され、電離によって木星磁気圏プラズマ構成粒子となる。実際、Europa軌道ではGalileo衛星が観測したプラズマビッチ角分布から中性粒子トーラスの存在が示唆されており、Europaからの流出と考えられている[7]。

このように、衛星の存在は木星磁気圏プラズマの消失・生成の一端を担っている。特にGanymedeでは、固有磁気圏の存在により粒子の降りこみが複雑になり、粒子流出の様相も変動しているものと考えられる。プラズマ直接観測とともに後方散乱粒子、スパッタリング粒子を観測することで、衛星表面に降り込むことによる木星磁気圏プラズマ粒子の消失、磁気圏内への後方散乱過程による粒子供給、スパッタリング過程による衛星表面構成物質の供給レートを定量的に明らかにできると期待している。

3. PEP/JNAの機器概要

3.1 開発経緯

私たちはスウェーデン宇宙物理研究所(IRF ; Swedish Institute of Space Physics)、ベルン大学(スイス)と共に非熱的中性粒子観測器を開発してきた。これまでにMars Express(欧州の火星周回探査機)搭載ASPERA-3観測機器パッケージ、Venus Express(欧州の金星周回探査機)搭載ASPERA-4観測機器パッケージ、Chandrayaan-1(インドの月周回探査機)搭載SARA観測機器パッケージに観測器を提供し、BepiColombo/MMO(欧州の水星探査計画に対して日本が提供する周回探査機)にも搭載が予定されている(MPPE/ENA)。この中でSARA/CENAとMPPE/ENAはPEP/JNAのベースとなる観測器である。

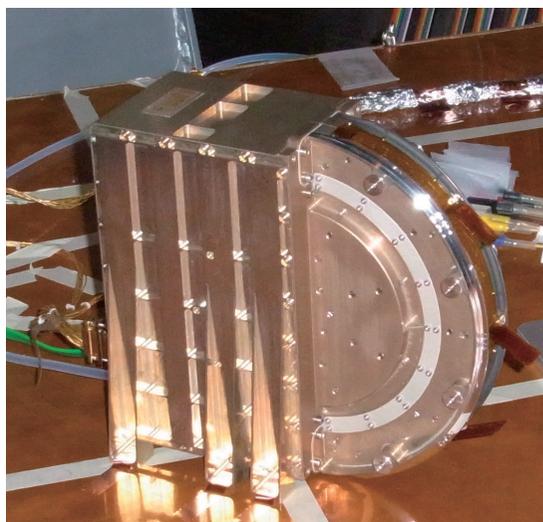


図3: MMO/MPPE/ENAプロトフライトモデル。

Chandrayaan-1は2008年に打ち上げられ、月周回軌道における観測を2009年まで行った。そして、Chandrayaan-1に搭載されたSARA/CENAは月のように希薄な大気しか持たない天体の周回軌道において、初めて非熱的中性粒子の観測に成功した。SARA/CENAは月表面で中性化・反射された太陽風起源後方散乱粒子を観測し[6, 8]、それによる経験的反射モデルを初めて構築した[9, 10]ほか、月表面でスパッタリングされたと考えられる酸素原子を初めて観測した[8]。また、月表面の磁気異常によって太陽風粒子の降り込みが抑制される「ミニ磁気圏」の発見[11]や、ミニ磁気圏内の電場構造のリモート撮像にも成功した[12]。これらの成果はBepiColombo/MMOにおける水星探査、JUICEにおける木星・氷衛星探査の基礎となるものである。なお、SARA/CENA開発において私たちは観測器(センサー)設計、検出器部設計・製作、電子回路部(ただし高压電源を除く)設計・製作を行った。BepiColombo衛星はまだ打ち上げられていない。ただし、MPPE/ENAとSARA/CENAはほぼ同じ観測器構成であり、SARA/CENAで得られた多くの知見を基に改良したものがMPPE/ENA(図3)となっている。開発体制は各機関の担当部分を含めSARA/CENAとほぼ同じであるが、後段のデータ処理部(MDP)は日本が開発するものであるため、機上ソフトウェア開発・実装も私たちが担当している。

PEP/JNAにおいても基本的な観測器構成、開発体

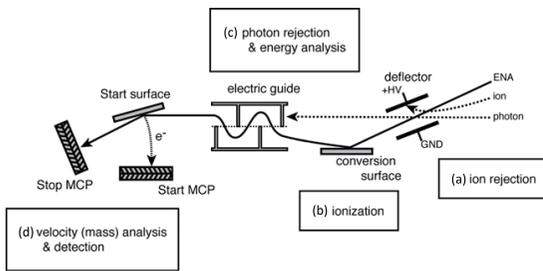


図4：PEP/JNA の観測原理。入射粒子を電離後、エネルギー分析、飛行時間分析を行う[13]。

制，開発担当部分はSARA/CENA，及びMPPE/ENAと同様となる予定である。ただし，JUICE衛星への搭載にあたっては環境条件・搭載条件などが異なるため，耐放射線環境対策，衛星搭載インターフェースなどの観点で改良や最適化を伴う構成変更を行っている。

3.2 観測原理

PEP/JNAの観測原理は図4のようになっており，非熱的中性粒子のエネルギー分析，到来方向弁別のほか，質量分析を実現している。

- (a) 荷電粒子除去部：入射粒子中に存在する荷電粒子は電場によって軌道を偏向し，除去する。
- (b) 粒子電離部：残った中性粒子をconversion surfaceに衝突させ，一定の確率(粒子種・エネルギーによるが，5%程度)でイオン化する。
- (c) エネルギー分析/光子除去部：イオン化した粒子の軌道を静電場によって偏向し，特定のエネルギー範囲のもののみを飛行時間分析部に導くことでエネルギー分析を行う。また，光子(紫外線)は静電場によって軌道偏向されないため，同時に光子除去を行う。
- (d) 飛行時間分析部：エネルギー分析部から出射した粒子は静電場による加速後，Start surfaceに衝突する。Start surfaceでは衝突によって二次電子がたたき出され，START MCPで検出される。二次電子が表面からたたき出された時のエネルギーは10 eV程度以下と低い。このため二次電子の軌道は容易に制御でき，電子の飛行時間のばらつきを抑制することができる。一方，Start surfaceに衝突し，反射した粒子はSTOP MCPで検出される。こうして二次電子と，もともとの入射粒子の

検出タイミング差から粒子速度が求められる。エネルギー分析によって入射粒子のエネルギーが分かっているため，速度の情報から質量を割り出すことができる。

3.3 必要とされる性能と仕様

本章ではPEP/JNAの設計に必要な性能要求と，設計を行った結果得た仕様について述べる。

3.3.1 視野範囲

衛星(Ganymede)表面を見下ろす方向を中心とし，JUICE衛星の軌道運動に垂直な方向に衛星表面を見渡せること。JUICE衛星の運動方向(極軌道であるため，ほぼ緯度方向)の視野については，衛星の移動に伴って観測領域を掃引できるため，広い視野を持たなくてもよい。なお，Ganymedeの高度500 kmの周回軌道の場合，軌道周期は200分ほどであり，100分毎に南北両極域を観測できる。

3.3.2 視野角

110度以上(JUICE衛星の軌道運動に垂直な方向)。110度以上とすることでGanymede衛星上空高度500 kmからは地平線まで見渡すことができる。また，この条件下では連続した二軌道で，Ganymede表面に投影した視野がオーバーラップし，同じ領域を観測することができるため，非熱的中性粒子の観測に変化があった場合に，時間変化と空間変化の分離が可能となる。

3.3.3 角度分解能

Ganymede表面を10度以下(Ganymede中心基準)で分割できること。MHDシミュレーションに基づく予測(2.1章)では，leading hemisphereの赤道域における降り込み粒子の空間スケールは60度程度あるが，カスプ領域の降り込み粒子の空間スケールは20度程度である。上記科学目的を考慮し，カスプ領域を空間分割して観測できることを基準とする。

3.3.4 時間分解能

ダイナミックであると予測されるGanymedeのカスプ形状の時間変化を捉えること。空間スケールとしてGanymede半径2634 km，速度スケールとしてGanymedeにおける典型的なAlfven速度である190 km/sを仮定することで，15秒をノミナルとする。なお，必要角度分解能である10度を，衛星の移動方向(緯度方向)に掃引するために必要な衛星移動距離は550 km(高度500 km円軌道の場合)であり，衛星移動時間は

約5分である。これはノミナルと設定した15秒より十分に長いので、15秒の分解能を与えれば緯度方向にも必要角度分解能を達成できる。

3.3.5 質量分解能

H, O/S-groupを分離できること。衛星表面に存在するとされる水分子に対し、スパッタリング粒子の観測によって水分子と同定/推定するためにはHと重粒子を弁別した観測が必要である。

3.3.6 エネルギー範囲

10-10000 eVを計測すること。後方散乱粒子、スパッタリング粒子の典型的エネルギーはこれらの放出を引き起こす降り込み粒子のエネルギーより低い。月での後方散乱粒子の観測結果では50%以上のエネルギーロスとなっている[6]。計算機シミュレーション[3]を基に求めた降り込み粒子のエネルギーは、leading hemisphere上空の磁気リコネクションによる加速に対応した領域でも20 keV以下に分布しており、対応する後方散乱粒子、スパッタリング粒子のエネルギー範囲は10 keV程度以下と考えられる。また、月における後方散乱粒子の観測・解析結果[10]などから、非熱的中性粒子の全体フラックス及びエネルギー分布から後方散乱係数やスパッタリングによるyieldをより正確に推定するため、低エネルギー側は10 eVまでの計測が必要と考えられる。

なお、~500 eV以上のエネルギー帯域はPEPに含まれる他観測器であるPEP/JENI(Jovian Energetic Neutrals & Ions)によって観測可能であり、PEP/JNAとしては機器間較正などのためのオーバーラップを含め3000 eV程度までをカバーすることが要求となる。

3.3.7 エネルギー分解能

$\Delta E/E = 1$ 以下の分解能を持つこと。後方散乱粒子のエネルギースペクトルは経験的にはMaxwell分布に従うとされる[10]。また、スパッタリング過程では理論式としてSigmund-Thompsonの式[14]があり、基本的に微分フラックスは E^2 に従う(ここで、Eはスパッタリング粒子のエネルギー)。これらの放出粒子のエネルギーが降り込み粒子のエネルギー程度まで存在することを考えると、 $\Delta E/E = 1$ 程度で両過程のエネルギー分布を判別できると考えられる。

3.3.8 設計結果(仕様)

表1に上述の性能要求を受けて設計を進めた結果得

表1: PEP/JNA仕様。

| | |
|----------|---------------------------------------------------------------------|
| 観測対象 | 非熱的中性粒子 |
| エネルギー | 10 eV - 3300 eV |
| エネルギー分解能 | 1 ($\Delta E/E$) |
| 質量分解 | 1, >16 amu |
| 視野範囲 | 15 deg x 150 deg |
| 角度分解能 | 7deg x 25deg |
| 感度 | $2 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ str/pixel}$ (efficiencyを含んだ値) |
| 時間分解能 | 15 s (ノミナル) |

られたPEP/JNAの仕様を示す。

4. 今後の展開

現在、PEP/JNAは試験モデルの開発段階にある。今後、試験モデルを用い、IRF担当部分(観測器電極、筐体、高圧電源)、ベルン大学担当部分(電離用表面、二次電子放出用表面)との噛み合わせ試験を経て、フライトモデルの開発に移行してゆく。打ち上げ前にやることはまだまだ数多く残っているが、打ちあがってからも観測計画立案、軌道上較正作業などを経て観測データを取得することとなる。息の長い計画であるが、気を引き締めて進めてゆきたい。

5. 謝辞

本連載を企画し、PEP/JNAの紹介の機会を作っていただいた木村淳氏(東京工業大学地球生命研究所)に感謝する。

6. 参考文献

- [1] Grande, M., 1997, Adv. Space Res. 19(10), 1609.
- [2] Futaana, Y. et al., 2006, Planet. Space Sci., doi:10.1016/j.pss.2005.10.010.
- [3] Jia, X. et al., 2009, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2009JA014375.
- [4] Khunara, K. K. et al., 2007, Icarus, doi:10.1016/j.icarus.2007.04.022.
- [5] McComas, D. J. et al., 2009, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2009GL038974.

- [6] Wieser, M. et al., 2009, *Planet. Space Sci.*,
doi:10.1016/j.pss.2009.09.012.
- [7] Lagg, A. et al., 2003, *Geophys. Res. Lett.*,
doi:10.1029/2003GL017214.
- [8] Vorburger, A. et al., 2014, *J. Geophys. Res.*,
doi:10.1002/2013JA019207.
- [9] Schaufelberger, A. et al., 2011, *Geophys. Res. Lett.*,
doi:10.1029/2011GL049362.
- [10] Futaana, Y. et al., 2012, *J. Geophys. Res.*,
doi:10.1029/2011JE004019.
- [11] Wieser, M. et al., 2010, *Geophys. Res. Lett.*,
doi:10.1029/2009GL041721.
- [12] Futaana, Y. et al., 2013, *Geophys. Res. Lett.*,
doi:10.1002/grl.50135.
- [13] Kazama, Y. et al., 2006, *Adv. Space Res.* 37, 38.
- [14] Sigmund, P., 1969, *Phys. Rev.* 184, 383.