

特集「将来木星圏・土星圏探査計画へのサイエンス：その2」

探査機高緯度軌道からの
木星オーロラ・プラズマ撮像サイエンス埜 千尋¹, 藤本 正樹¹, 国際共同木星探査ワーキンググループ

2011年9月30日受領, 2012年1月27日受理.

(要旨) 自転エネルギーを源に磁気圏プラズマを共回転し, 高エネルギー粒子を生成し, 多彩な衛星を内包する木星電磁圏環境を解明するため, 木星探査ワーキンググループは木星探査機による高緯度からのプラズマ撮像観測を提案する. 撮像対象の一つであるオーロラ紫外・赤外発光は, 磁気圏・電離圏結合過程における角運動量・エネルギー輸送や加速過程および衛星-惑星相互作用を極域に映し, 自転駆動型の木星電磁圏の探査において重要な役割を果たす. X線・イオトラス・高エネルギー中性粒子の撮像を同時に行うことで, 木星探査機によって磁気ディスク(イオトラス)から放射線帯(高エネルギー粒子・X線)までのダイナミックな連携の様相をとらえることを検討中である.

1. はじめに

太陽系中最大のガス惑星である木星は周期約10時間で自転し, 磁気双極子モーメントが地球の約2万倍に相当する強い磁場をもつ. 木星磁気圏の主要なプラズマ供給源は木星半径5.9倍に位置する衛星イオであり, 磁気圏内の広い領域にわたってプラズマの回転運動が卓越する. 数10～数100 MeVに至る電子および重イオン粒子が磁気圏内に偏在し, 木星磁気圏は高エネルギー加速器でもある. この磁気圏環境下に, 火山を持つイオのほか, 生命が存在している可能性があるエウロパや固有磁場を持つガニメデといった多彩な衛星が存在し, 興味深い惑星-衛星系を成す.

惑星オーロラ発光現象は, 加速された高エネルギー荷電粒子が大気に衝突してエネルギーを緩和する過程で生じるものである. 赤外, 可視, 紫外, X線, 電波の波長域にわたる木星・土星のオーロラ関連放射は, 波長ごとの発光メカニズムに対応したさまざまな物理量のリモート探査の機会を提供する. 電波やX線オーロラは, 高エネルギー粒子の加速過程および惑星大気中でのエネルギー緩和過程で放射されるものであり,

高エネルギー粒子のモニターとして有効である. オーロラ電子が水素大気を直接励起した紫外・可視発光や, オーロラ電子により生成し熱励起した H_3^+ からの赤外発光は, 磁気圏・電離圏結合過程の角運動量・エネルギー輸送や磁気圏現象, さらに大気環境を反映したものである. オーロラの発光現場である惑星超高層領域は, 磁気圏と磁場でつながれた一端である. そのため, オーロラ発光現象は, オーロラ粒子を生じる広大な磁気圏活動を映したものであり, 磁気圏を知る手掛かりとなる.

太陽系最強の粒子加速機構や高速回転する磁気圏の物理と磁気圏・衛星相互作用の総合探査を目的とした木星磁気圏周回探査機(Jupiter Magnetospheric Orbiter, JMO)の検討を, JAXAおよび国内外の研究者を中心として進めている. これは, 生命居住の可能性がある衛星を理解することを目的とした欧米の木星衛星探査計画とともに, 2020年代の木星探査を目指すものである. これらの探査目的へのアプローチとして, 赤道周回軌道に加え, 探査機を高緯度に移動して高緯度からオーロラおよびプラズマを撮像観測することを検討中である. 本稿は, 木星オーロラ紫外・赤外発光について, オーロラが反映する物理量およびオーロラによる磁気圏現象のモニターに着目する. これま

1. 宇宙航空研究開発機構
tao@stp.isas.jaxa.jp

での探査機やオーロラ地上観測の背景を2章で紹介する。3章で、木星と同じ巨大ガス惑星である土星において、近年カッシーニ探査機が開拓した土星オーロラ高緯度観測の成果をレビューする。木星オーロラ観測項目を4章、他のプラズマ撮像と連携した観測項目を5章で議論する。

2. 木星オーロラの知見

2.1 観測手段

木星磁気圏の発見は、木星からの電波をとらえた1950年代にさかのぼる。その後のパイオニア10、11号およびボイジャー1、2号の木星フライバイで、オーロラ現象をはじめ、さまざまな発見がなされた。地球以外の惑星では初の磁気圏探査機であるガリレオ探査機は、磁気圏ダイナミクスの統計的描像や衛星の詳細な観測を行った。冥王星探査機ニューホライズンは磁気圏尾部を、土星探査機カッシーニは夕方側の磁気圏界面を探索した。さらに、太陽探査機ユリシースは、

木星フライバイ時に高緯度から低緯度までの広い緯度帯にわたってその場観測を行った。木星極域周回探査機ジュノが2011年8月に打ち上げられ、2016年の木星到着を目指して惑星間空間を航行中である。ジュノは、木星極域上空のその場観測を初めて実現する。

地球大気による吸収の影響が小さい「大気の窓」波長域の木星オーロラ赤外輝線は、地上で観測できる。例えば、 $4\mu\text{m}$ 帯や $2\mu\text{m}$ 帯である。Infrared Telescope Facilityやすばる望遠鏡などで、撮像観測および分光観測が行われている。紫外線領域は地球の大気で吸収されるため宇宙空間に出て観測する必要がある。これまでに木星に向かう探査機のほか地球周回衛星によって観測されてきた。例えばハッブル宇宙望遠鏡等では鮮明な撮像やスペクトル観測が行われている。総合的なレビューについては[1]、赤外地上観測については[2]が詳しい。

2.2 木星オーロラの3分類

木星オーロラは、大きく3つの領域に区分される。南北の極を取り囲む磁気緯度75度あたりに位置する

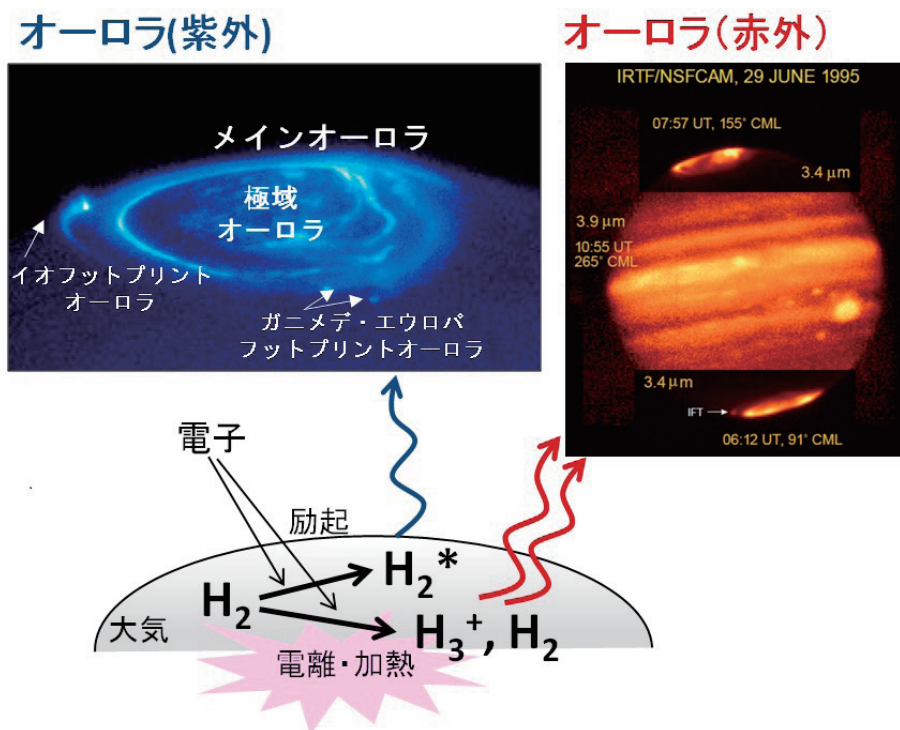


図1：木星オーロラの紫外画像と赤外画像[24]。紫外画像はNASA提供。

メインオーロラと、その高緯度側の極域オーロラ、そして低緯度側の衛星につながった磁力線の根元にある衛星フットプリントオーロラである(図1)。

ガリレオ衛星のうちメインオーロラに近いカリストを除くイオ・ガニメデ・エウロパについて、衛星とつながる磁力線の木星側根元に発光が見られる。衛星から磁気圏に放出される中性大気は、太陽紫外線の吸収や磁気圏プラズマとの電荷交換で電離する。衛星起因の硫化酸素等から成る重いプラズマは、共回転している磁力線をおもりとして引きずるため局所的に磁場に擾乱が生じる。この擾乱が磁力線沿いにアルフベン波として伝搬し、電流が流れる。電流を担う電子の降り込みで衛星から回転方向に延びる発光領域を生成するとともに、この衛星と木星の結合系によって、プラズマは加速され、ほぼ自転速度での回転運動(共回転)が保たれていると解釈されている。

ケプラー速度よりも速い共回転速度で回転するイオ起源のプラズマは、遠心力によって外側に輸送される。外側輸送されて回転半径が大きくなるにつれ、トルクの供給がないと角速度の保存から角速度が小さくなり、磁気赤道でプラズマが共回転から遅れる。磁力線沿いに、木星につながり共回転する領域と共回転から遅れる磁気赤道との間で速度差が生じて発電する。この結果生じる赤道域動径外向き電流 $\mathbf{J}$ は、 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ (磁場 $\mathbf{B}$ は赤道域で南向き)でプラズマを自転方向に加速する。この電流は、プラズマが共回転から遅れ、かつ、電流を流す十分な磁場強度の動径範囲に限られ、磁力線をたどって電離圏を介する電流系が形成される。磁力線沿いに流れる電流を担う電子が大気に降り込む位置で、大気原子・分子を励起しオーロラ発光を発生させる。これが木星メインオーロラの成因と考えられている。この過程で、角運動量は自転している惑星大気から電離圏プラズマを介して磁気圏プラズマへ供給される。地球のメインオーロラは開いた磁力線と閉じた磁力線の境界に位置するのに対し、木星のメインオーロラは、内側の閉じた磁力線領域の、磁気圏プラズマ対流が共回転から遅れる領域に対応する。

メインオーロラよりも高緯度側の極域オーロラは、閉じた磁力線領域から開いた磁力線領域をカバーする。カスプ領域も含めて、太陽風と相互作用し太陽風起源の粒子が降り込んでいると考えられる。実際、極域オーロラは他の領域に比べて変動が速く大きな現象が見

られる。

3. カッシーニ探査機の土星オーロラ観測成果

土星は太陽系で木星に次ぐ大きなガス惑星で、自転周期も約10.7時間と速い。磁場は、電離圏高度では地球とほぼ同じ ~ 0.4 Gaussで、木星の1/10程度である。太陽からの距離は、木星が5.2天文単位であるのに対し、土星は9.6天文単位である。土星は地球より高速自転であるが磁場強度が木星よりも弱いので、電離圏への自転効果の寄与は木星と地球の中間的なものと、カッシーニ探査機前は考えられてきた。

しかし、土星が中間という位置づけで満足しないかのような土星特有の現象が、カッシーニ探査機による探査で多数見つかっている。2004年に土星周回軌道に入ったカッシーニ探査機は、現在(2012年2月)も観測を続けている。衛星エンケラドスからの氷の噴出現象がカッシーニ探査機により発見され、木星磁気圏におけるイオの代わりに、リングに加えてエンケラドスが土星磁気圏の主要なプラズマ源と考えられている。カッシーニ探査機は磁気赤道と高緯度を探査する軌道を取り、特に高緯度の探査軌道時期を中心に、紫外分光装置および赤外分光撮像装置でオーロラを観測している。地上赤外観測やハッブル望遠鏡とその場観測との組み合わせも加え、近年明らかになったオーロラに関する項目を以下挙げる。高速自転が木星と共通する土星において現在進行中のカッシーニ探査機の探査成果は、木星電離圏探査への展開を考える上で最も参考になるものと考えられる。

3.1 土星メインオーロラの起源

土星にも極を取り囲むメインオーロラが観測されているが、そのメインオーロラは開いた磁力線と閉じた磁力線領域の境界に位置することが示された。メインオーロラとつながる磁力線沿いを通過したカッシーニ探査機で、磁力線形状の遷移によると考えられるプラズマ密度の変化が検出されたからである[3]。このオーロラ位置は、磁気的につながる磁気赤道プラズマ対流のその場観測や、プラズマ対流分布の赤外地上分光観測からも支持されている。開いた磁力線と閉じた磁力線の境界にメインオーロラが位置することは、地球のオーロラと共通する。一方で、メインオーロラより

も低緯度側において、プラズマ角速度分布が共回転から遅れているところに対応した発光が地上赤外分光観測で同定され、木星のメインオーロラのメカニズム(2.2節)でできたものと考えられている[4].

カッシーニ探査機によって、紫外・赤外発光分布の直接的な比較が可能となった。地上赤外観測で遠い土星を観測するには空間分解能がよくなく、また、集光に長時間積分が必要である。カッシーニ探査機搭載の赤外スペクトル撮像によって、土星近くから空間分解した観測が可能となった。円状やスパイラル状と変わるメインオーロラは赤外・紫外で類似して見られるが、極域内部の開いた磁力線の広い領域にまたがる増光現象は赤外発光のみで報告されている[5]。また、赤外・紫外発光の同時観測も行われ、メインオーロラは両者で一致するが、低緯度および高緯度の発光は両波長域で異なることが示されつつある[6]。また、メインオーロラは夏半球が冬半球に比べて強いものに対して極域オーロラは冬半球のほうが強いことが赤外発光で検出され、メインオーロラの南北(夏冬半球)非対称性については電離圏電気伝導度との関連が考えられている[7]。

土星のメインオーロラから高緯度側に分岐するオーロラが、紫外[8]および赤外[9]で検出され、磁気圏界面における磁気リコネクションで引き起こされると考えられている。土星のメインオーロラが開いた磁力線と閉じた磁力線の境界にあることから、開いた磁力線領域の面積をオーロラから求め、リコネクションに伴う磁気フラックスの変化が数10%に至ることが見積もられている。また、この赤外発光現象に対応するカッシーニ探査機の高緯度その場観測において、沿磁力線沿いに数100 keVにまで至る高エネルギーイオンや電子ビーム、さらにこれらと同期した波動の周期的増大現象がとらえられている。

また、小さい(～500 km)複数の構造が紫外波長で観測された[10]。磁気圏電磁流体シミュレーションおよびカッシーニのその場観測でも報告されている、太陽風と磁気圏プラズマのシアで生成する磁気圏界面のケルビン・ヘルムホルツ渦との関連が議論されている。

エンケラドスの衛星フットプリントオーロラが紫外で見つかり、衛星-土星間の磁力線上において電子及びイオンのビームが検出された。このオーロラの観測頻度は数%で、観測限界をまたぐオーロラ発光強度

の変化は、衛星から供給される氷やその電離プラズマ量の変化によるものと考えられている[11]。

3.2 土星周期現象

土星磁気圏探査によって、大きな議論を起こした現象の一つが、土星の多くの磁気圏パラメータで見られる周期性である。

磁軸が自転軸に対して傾きを持つ場合、磁軸を中心に広がる磁気圏は、自転のたびにゆすられる。磁気圏内地理赤道近傍のある一地点で観測されるプラズマ・磁場パラメータは、自転周期で大きく変化する。また、惑星から放出される電波は、惑星自転でダイナモ生成される磁場形状と関連するため、電波周期が自転周期の指標とされる。実際に木星では、磁軸と自転軸の傾きが9.6度であり、電波周期も9.925時間で非常に安定したものである。

土星は磁軸と自転軸の傾きがほとんどない(<1度)が、磁気圏内の探査機で観測されるプラズマ・磁場・電波に周期的な変動が見られている。さらに、電波は南北で異なる周期を持ち、冬の北半球10.6時間、夏の南半球側10.8時間、が2006年ころの値である。この周期は変化し、2009年8月の昼夜平分時を過ぎた2010年2月ごろに、南北半球の電波周期の反転が見られた[12]。高エネルギー中性原子(ENA, energetic neutral atom)の高緯度撮像観測は、ENAの生成源である高エネルギープラズマが尾部から流入され局所的な塊として自転周期で土星を周回している様子を捉えた。このプラズマ塊が朝側に来た時に、電波およびオーロラが増大する(e.g., [13])。さらに、観測される磁気赤道磁場成分の自転周期変動も、プラズマ塊領域の電流シート of 地理赤道への局所的な接近のためと解釈されている[14]。プラズマ・磁場・電波の周期性の生成は高エネルギープラズマ塊と関係し、南北非対称性および季節変化については、太陽紫外線と関連した電離圏伝導度や熱圏大気運動が原因の候補と考えられている。複数の観測事項を系統的に説明可能な周期性生成モデルはまだなく、議論の最中である。

3.3 比較惑星、太陽風応答

土星に向かうカッシーニ探査機が土星上流の太陽風および惑星間空間磁場をモニターし、ハッブル宇宙望遠鏡で観測したオーロラと比較するという貴重な機会

があった(e.g., [15]). このとき、太陽風動圧増大に対応して特に朝側で増光が見られ、その後メインオーロラが渦を巻いた様子が観測された。木星では夕方側で極側に張り出したオーロラ発光が平均的にとられているのと同対照的であり、また、スパイラル状のメインオーロラは木星では報告されていない。さらに、土星のメインオーロラが動圧に対応して高緯度側にシフトするのは、地球オーロラが活動時に低緯度に広がるのとも対照的である。磁気赤道を流れるリングカレントの増減も含め、地球と異なる回転系の応答と考えられる。

4. 木星オーロラ撮像の観測対象

前章で挙げたように、高緯度からのオーロラ撮像観測は土星電磁圏の知見を飛躍させるものであった。さらに自転駆動の特徴が強い木星磁気圏ダイナミクスの、観測を通して明らかにしたい項目を以下に挙げる。

4.1 オーロラ紫外・赤外探査

オーロラ紫外発光は、オーロラ電子が大気に降り込む過程で衝突励起した水素分子・原子からの発光であるため、オーロラ電子の流れ、すなわち磁気圏・電離圏間の電流の流れを可視化するものである。赤外発光は主に H_3^+ や炭化水素化合物からの熱放射である。オーロラ電子は大気直接励起のほか、水素分子を衝突電離して H_2^+ を生成し、その H_2^+ は即時に背景水素分子と反応して H_3^+ になる。木星熱圏は ~ 1000 K と高温であり、 H_3^+ や炭化水素化合物の一部は熱励起状態である。この熱励起状態から基底状態への遷移過程が赤外放射として観測される。そのため、赤外発光は背景大気温度を反映する。さらに、電離圏イオン化学も H_3^+ の存在量を左右する。オーロラ電子の大気への降り込みを起点にすると、オーロラ電子の降り込み(紫外)に対する大気の応答(赤外)を反映するものといえる。他方、地球において、対流圏・成層圏起源の波動が大気上方に伝搬し、熱圏・電離圏環境(温度および密度分布)へ影響しているという観測解釈およびモデル研究があり、同様に木星でも大気内で変動が起きている可能性は高い：大気下層からの大気波動は木星熱圏を高温に維持する加熱メカニズムの一つと考えられている。ガス惑星では、惑星大気深部からの影響もあるかもしれない。2.2節で述べたように、大気運動が

磁気圏・電離圏結合系の駆動源であることを考慮すると、赤外発光が反映する大気状態が大気運動を通して電子降り込み(紫外)を変える、というパスも示唆される。すなわち、外惑星における紫外・赤外発光の比較は、大気圏－電離圏－磁気圏にわたる多圏間のシステムを探る観測手段を提供する。異なる時間スケールを持つ複数の現象について紫外・赤外発光を比較し、オーロラ電子降り込みから大気応答のパス、さらに大気変動が引き起こす磁気圏・電離圏結合過程の変化のパスを指標に、系の理解を図る。

土星で見られる極域赤外増光現象が自転駆動の電磁圏に共通のものであるか土星固有のものは、この現象および系を理解するのに貴重な情報である。土星メインオーロラがスパイラル状の時にこの現象は見られず、円形の時に見られる[5]。メインオーロラが円形に近い木星南半球の極域で赤外発光が強いといった傾向があるだろうか？ 発光モデル研究からは、土星は温度の変化による赤外発光強度の変化が大きいことが示唆される。木星においても極で高温となるのか、木星熱圏温度あたりでは赤外発光の温度依存性が小さいために観測限界以下であるのか？

H_2 および H_3^+ は、それぞれ熱圏大気・電離圏の主要構成物質である。地上赤外観測から、 H_2 と H_3^+ の発光の局所的増大領域は異なる分布を持つ[2,16]。この違いについて、オーロラ電子のエネルギーや大気の局所加熱の効果が候補と考えられている。それに対し、これらの発光の時間変化の様子や、オーロラ電子エネルギーをより直接的に反映する紫外との同時観測が、要因をテストするのに有効であろう。この現象の理解は、地上赤外観測による電磁圏変動モニターの意味づけとしても重要である。

球面上に分布したオーロラ発光の空間積分のため惑星の縁(リム)が明るくなる効果が、空間分布の解析を困難にするもののひとつであり、特に赤外発光においてこの効果は顕著である。探査機による高緯度からの観測によって、地上観測からは困難な極周辺の観測が相補的にできる意義は大きい。

4.2 メインオーロラを通した角運動量輸送過程

木星メインオーロラは、2.2節で見たように、磁気圏プラズマへの自転角運動量の輸送過程を可視化したものであり、回転駆動電磁圏の特徴の抽出に最適な観

測対象と考えられる。高緯度軌道からオーロラを俯瞰して地方時・磁気経度分布の特徴を調べることで、太陽紫外線の日変動による電離圏電気伝導度の日変化や磁気圏磁場の太陽風による地方時変化、さらに自転方向と電離圏プラズマ流(すなわち中性・イオン相互作用)や磁場強度の変化による、角運動量輸送過程への影響を考察できる。これまでの低緯度からのオーロラ観測はメインオーロラの全体像を視野に入れることはできず、昼側に限られたものであった。オーロラ紫外・赤外発光のグローバル分布は、高緯度からの撮像観測によって初めて可能となる。

朝側メインオーロラ沿いに、 $\sim 300\text{--}400\text{ keV}$ に加速された電子が降り込み、メインオーロラの数〜数十倍の発光強度に至る朝側ストーム現象[17]は、これまで太陽風との相関も小さく謎とされてきた。夜側のどこから始まり、どのタイミング・頻度で発生するか、2-3(地球)日周期の磁気圏変動[18]との関係はあるのか?土星の朝側での電波・オーロラ活動増大との関係は何か?

電波周波数やオーロラ発光強度に見られる季節変化および南北非対称性は、電離圏電気伝導度の変化が一つの重要な要因として議論される。土星は自転軸と磁軸がほとんど一致し、黄道面垂直方向から 27° 傾くのに対し、木星は自転軸と磁軸が 9.6° 傾き、自転軸は黄道面垂直方向から 3.1° の傾きをもつ。そのため、木星では日変化で磁極域の電離圏電気伝導度が大きく変わり、木星電磁圏は電離圏電気伝導度の自転周期変動の役割を探るおもしろい環境といえる。

4.3 磁気圏リコネクションとプラズマ収支

木星磁気圏では、イオ起源のプラズマが周期的に尾部へ解放するVasyliunas対流と、地球と類似し太陽風が駆動するとされるDungey対流があると考えられている。それぞれの対流において、前者はプラズマの蓄積およびそれにはたらく遠心力による磁力線の引き延ばしによって、後者は太陽風リコネクションの増大による磁気圏尾部での磁気圧増大によって、磁気圏尾部でリコネクションを引き起こす。このリコネクションは磁気圏尾部において生じる現象であるが、磁場でつながった惑星上空でオーロラ発光を生じることが地球磁気圏では研究されてきた。木星においても、朝側のメインオーロラより高緯度側に、共回転から少し遅

れた円弧状や点状の発光が2-3日周期に見られることが報告された。周期性や位置の対応から、磁気圏尾部リコネクションに伴う磁気圏内側へのプラズマ注入現象との関連が示唆されている(e.g., [19])。また、夜側で見られる局所的な発光は、磁気圏尾部リコネクションやそれに伴うプラズマ流入に対応したものと考えられている[20]。リコネクションの発生場所や頻度がどうか? Vasyliunas対流かDungey対流かのリコネクションの要因によって、発光に違いが見られるか?解放されるエネルギーやプラズマは、それぞれのリコネクションでどの程度に達するか?オーロラを通して磁気圏のグローバルな活動度を直接的にみるのが可能であり、磁気圏の一点探査による統計解析[21]と相補的でもある。

4.4 開いた・閉じた磁力線境界の同定とその変動

木星のメインオーロラは、磁気圏の閉じた磁力線領域にあたる。地球や土星のメインオーロラのような開いた磁力線と閉じた磁力線の境界に対応した発光が木星に存在するかは議論の最中である。開いた磁力線は磁気圏昼側のリコネクションで生成し、磁気圏尾部のリコネクションで消滅する。つまり、開いた磁力線と閉じた磁力線の境界の変化をモニターすることで、グローバルな磁気圏形態を把握することが可能である。4.3節で述べたVasyliunas対流またはDungey対流に起因するリコネクションスポットの分布は、開いた・閉じた磁力線境界と関連したものと考えられる。

4.5 高エネルギー加速現象

紫外やX線の極域局所増光位置で、アセチレンやメタンの赤外発光輝線も増大していることが報告されている(e.g., [22])。これは、紫外やX線発光を引き起こした降下荷電粒子が、炭化水素化合物が存在する大気低高度まで影響していることを示唆する。他方、極域の雲・ヘイズで謎とされる速い生成に、大気電離を介するイオン化学反応が有力な候補と考えられている。極域の大気圏・熱圏・電離圏の多圏間の関連性の調査に、多波長同時観測が有効である。

また、高緯度の探査機位置におけるその場観測が可能であれば、極域加速前のオーロラ電子を観測することができる。加速時に発生する電波や、オーロラから推定できる加速後のエネルギーとの比較を通し、加速

の特徴を調査できる。この手法は、この領域に限らず、メインオーロラや衛星フットプリントにおける加速領域の調査にも有効である。

4.6 衛星フットプリントオーロラ

衛星フットプリントオーロラの発光強度の木星経度依存性は、磁気圏プラズマディスクと衛星の相対位置に関連(e.g., [23])し、また、数十日スケールのイオ活動度とイオフットプリントオーロラの発光強度の関連が示唆されている。すなわち、衛星近傍のプラズマ環境が磁気圏・衛星相互作用に影響し、オーロラに反映されている。また、木星から離れるエウロパ・ガニメデにおいては、衛星近傍の磁気圏プラズマ密度が少なくなるため、外部太陽風の影響をより受けやすいことも示唆されている[23]。

衛星フットプリントである木星電離圏は、太陽紫外線の変化に伴って電気伝導度が変化する。オーロラのグローバル観測が可能になれば、木星・衛星双方のさまざまな電離圏環境における木星-衛星結合過程を抽出した調査が可能である。

また、メインオーロラから低緯度側に発光領域が時折張り出す様子が見られている。この現象の有無による、もとのメインオーロラの発光強度・分布との関係はどうか？磁気赤道におけるプラズマ交換型不安定や磁気尾部からのプラズマ流入現象との関係はどうか？イオプラズマ撮像との比較による、フットプリントオーロラとイオ近傍プラズマの対応付け(5章)とともに、太陽風による外部起因に対する木星電磁圏内部起因の変動モニターとしての位置づけも重要と考えられる。

4.7 太陽風応答

自転が卓越した木星において、太陽風の影響の評価は面白く重要なテーマである。広大な磁気圏がどのように・どの程度太陽風の影響を受けるか、は磁気圏全域とつながるオーロラを通して観測可能と考えられる。メインオーロラのモデルからの予測「太陽風動圧の増大に伴う磁気圏圧縮で、プラズマ回転半径が小さくなりプラズマ角速度が増加するため共回転からの遅れは減少してメインオーロラは弱くなり、開いた磁力線と閉じた磁力線の境界ではオーロラが強くなる」の検証は、メインオーロラの生成メカニズムをテストし考察を深めるよい課題である。地球や土星では、昼側磁気

圏界面リコネクションに対応した、メインオーロラから分離した局所的な円弧状の発光が同定されている。磁気リコネクションやケルビン・ヘルムホルツ渦に対応したオーロラが木星でも同定されれば、惑星間空間から磁気圏へのプラズマ輸送過程を可視化し評価できるかもしれない。高緯度からの撮像によって、ハッブル望遠鏡等で課せられる観測位置や惑星自転による視野の制約を受けず、グローバルな極域オーロラをモニターして調べることが可能である。地球・土星電磁圏の応答との比較を通して電磁圏の性質を考察するためにも、この木星太陽風応答の観測的制約が不可欠であり、高緯度からのオーロラ撮像が強く望まれる。

5. 高緯度軌道から見下ろしてのイメージング

ここまでは木星オーロラに焦点を絞り、特に極域を見下ろすような高緯度軌道からオーロラを撮像することの意義について述べてきた。オーロラの他にも、高緯度軌道から全体を俯瞰するようにイメージングすることの科学的意義が高い観測項目は、木星プラズマ環境科学において数多くある。ここでは、オーロラ撮像とこれらを組み合わせて巨大な木星磁気圏ダイナミクス(図2)の全体像に迫る計画案について紹介する。

木星探査は、特に木星磁気圏が太陽系において最も魅力的な対象のひとつであることから、常に研究者の頭の中にはあった。JAXA宇宙科学研究所・宇宙理学委員会下にワーキンググループを形成しての検討開始は、欧州との共同計画の可能性が見えたことがきっかけであった。2007年の欧州宇宙機関ミッション提案公募に日欧共同を前提に提出されたLaplace計画案では、日本は磁気圏探査機を提供することになっていた。その後いくつかの変遷を経て、現在(2012年2月)ガニメデ周回探査機によって、氷衛星における生命居住可能性を意識しつつ、巨大ガス惑星とガリレオ衛星等からなる木星系がどのように作動しているのかという課題に取り組むことになっている。2020年代での打ち上げを意識して欧米が主導するようになってからは、日本のワーキンググループの立場は一步引いたものとなったが、依然としてJMO(Jupiter Magnetospheric Orbiter)へ期待がかけられている。

JMOが企画された当初、衛星探査機と連携しての

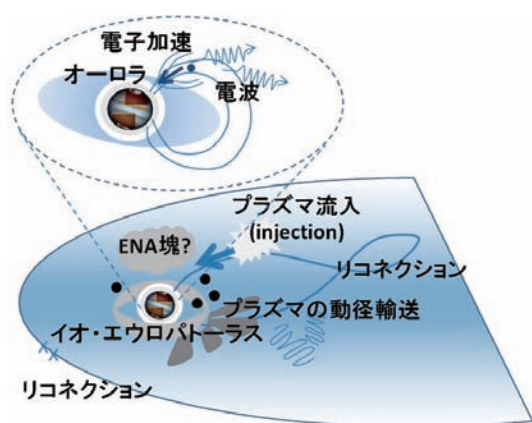


図2：木星磁気圏ダイナミクスの概念図。

プラズマ多点観測(ここでは2点)ということに主眼があった。木星磁気圏のダイナミクスは、強磁場を持つ惑星が高速自転すること、衛星イオという内部プラズマ源があり大規模輸送現象を誘発していること、かつ、これらが太陽風との相互作用下にあることに起因する。太陽系最強の粒子加速器である巨大な木星磁気圏がどのように振舞うのかを理解するのに、地球磁気圏において成功している多点観測という手法は魅力的である。さらに、ガニメデやエウロパという氷衛星の世界が大きく時間変動する過酷な宇宙環境に埋め込まれていることを考えると、時間変動の源をJMOで、衛星位置における局所的効果を衛星探査機で観測するという視点も生まれる。後者の立場とは、変動する巨大な木星磁気圏の全体像と局所的なガリレオ衛星周辺環境を同時に把握したい、ということである。木星磁気圏は巨大かつ様々な要素を内包するものであるので、JMOによって観測点をひとつだけ増やすということ以上のことは出来ないだろうか。そこでポイントとなるのが、プラズマ撮像という観測技術である。

プラズマの振る舞いは、実は、撮像できる。さらに、この手法は巨大磁気圏の全体像把握にたいへん効果的である。3.2節で紹介したENA (Energetic Neutral Atom) もその一つで、その有効性は、NASA・カッシーニ探査機による土星磁気圏でのENA観測によって証明された。ENAとは、中性粒子と衝突して電荷を失った高エネルギーのプラズマ粒子が、運動量を保存したまま高エネルギーの中性粒子となったものである。衝突後、ENA粒子はまっすぐ飛来するので、これを

検出することで、まさにプラズマの情報を撮像的に把握することが可能である。土星(や木星)の磁気圏では中性粒子が豊富にあるため、ENAという手法は特に有効である。土星の夜側にひろがる磁気ディスクから高温プラズマ雲が自転と同期して惑星方向へと射出され、その後惑星周囲を自転方向に回転する様相を、カッシーニの観測は明らかにした。「その場」観測では全貌を明らかにすることが困難な、巨大回転磁気体ならではのダイナミクスである。木星でも同様と考えられ、ガリレオ衛星はこのような環境に埋め込まれているのである。

ENA以外にも、プラズマを撮像する技術はいくつかある。以下、観測技術とそれによって可能になるサイエンスを挙げる。

紫外・赤外撮像：この波長ではオーロラ撮像が可能である。前節までに述べた通り、オーロラ発光領域は磁力線を介して外部磁気圏と繋がっており、オーロラの時間変化を継続的に撮像することで外部磁気圏での大規模変動を推測することが可能である。

ENA計測：エネルギー分解しながらENA像の時間空間変化を追跡することで、プラズマ粒子の空間分布の時間発展を映像化することができる。木星夜側に広がる磁気ディスクから高温プラズマ雲が木星近傍へと入射されることは推測されているが、これを明確に映像にすることができる。さらに、エウロパが水分子系の中性粒子を放出するので、その軌道にそってエウロパ・トールスができていますが、これもENAで明るく見え、エウロパ周辺の宇宙環境の全体像もENAから知ることができる。磁気ディスクからの擾乱がどのように磁気圏内部へと伝播し、エウロパ・トールス領域を乱すのか。この課題への答えを明快に示す結果を得られることが期待される。

極端紫外撮像：エウロパ以上にイオは火山ガスを周辺の宇宙空間に放出しており、その軌道にそってイオ・トールスが形成されている。イオ・トールスを構成する硫黄イオンは極端紫外領域で光るので、極端紫外波長で撮像することによりイオ・トールスの振る舞いを把握することができる。磁気ディスクから侵入する擾乱は、イオ・トールスまで達するのか。この外的要因だけでなく内的原因でイオ・トールスは乱れるとされるが、それはどのような様相を見せるのか。これらの課題に答えを出すことが期待される。

X線撮像：木星は太陽系最強の粒子加速器であり、木星近傍の磁場が強い領域は放射線帯等、高エネルギー電子が強いフラックスを持つことで特徴づけられる。そのような強い宇宙放射線環境でのその場観測は不可能であるが、硬X線による撮像観測で電子の様相を探ることは可能である。惑星探査機への搭載が可能な軽量小型の硬X線観測装置を開発し、粒子加速器の心臓部を探る観測を実施することが企画されている。また、極域への高エネルギー粒子降り込みに伴うX線放射も知られており、これも観測対象である。いずれも、磁気圏変動にともなってどのように高エネルギー粒子加速が起きるのかという課題に取り組む上での、実証的な足掛かりを与えるものである。

これらを全て組み合わせ、磁気ディスクから放射線帯までのダイナミックな連携の様相を一望の下に収める、ということが可能となる。また、高緯度からの撮像という意味では、木星本体の極域での熱流量も面白い観測項目であることがワーキンググループ内の議論で指摘されている。

ここで問題となるのは、これらの魅力的な観測を行うことができる高緯度軌道に探査機を投入することは可能なのだろうか、ということであろう。カリストを複数回スイングバイすれば可能であること、かつ、カリストと整数：1の共鳴条件を乗り移りつつこれを行うことができるので、柔軟なミッション計画が可能であること（例えば、何かの不都合があった時には、一周回だけ待てばまったく同じ条件が再現されるので、その際に再トライすればよい）が、ワーキンググループでの検討によって示された。つまり、木星周回軌道投入直後は必然的に長楕円軌道となるが、その後、近木点を上げてカリストとのスイングバイが可能となるように調整すれば、その後の軌道変遷は燃料をほとんど使うことなく実施可能である。また、最終的な軌道傾斜角は45度以上にすることが可能であることもわかっている。

この軌道計画は、カリストのサイエンスにも機会も与えることになる。カリストは未分化のガリレオ衛星である。この天体をフライバイ観測することから得られる有益な情報とは何なのだろうか。これは、是非、考えておきたい課題である。

6. おわりに

オーロラで木星を探る物理的意義は、地球・土星で培った電磁圏物理を、磁場・電場・スケールの違う木星に適用・拡張して解釈を試し追究することにある。また、オーロラ観測は、生命の存在可能性がある衛星周囲の電磁圏環境の理解に貢献する。さらに、自転駆動と外部環境の関係や、エネルギー加速器としての詳細な直接探査は、地上からの木星オーロラリモート観測の意味づけにとどまらず、リモート探査のみの天文天体に対し有効な情報・制約を与えるポテンシャルをもつ。木星電磁圏探査は、普遍的電磁圏物理から惑星科学・生命環境探査、さらに天文へ橋渡しする、またとない機会である。

参考文献

- [1] Clarke, J. T. et al., 2004, *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere* (Cambridge: Cambridge Univ. Press).
- [2] 宇野 他, 2012, 本号.
- [3] Bunce, E. J. et al., 2008, *J. Geophys. Res.* 113, A09209, doi:10.1029/2008JA013257.
- [4] Stallard, T. et al., 2008, *Nature* 453, 1083.
- [5] Stallard, T. et al., 2008, *Nature* 456, 214.
- [6] Melin, H. et al., 2011, *Geophys. Res. Lett.* 38, L15203, doi:10.1029/2011GL048457.
- [7] Badman, S. V. et al., 2011, *Icarus* 216, 367.
- [8] Radioti, A. et al., 2011, *J. Geophys. Res.* 116 (A11), doi:10.1029/2011JA016661.
- [9] Badman, S. V. et al., 2012, *J. Geophys. Res.* 117, A01211, doi:10.1029/2011JA017222.
- [10] Grodent, D. et al., 2011, *J. Geophys. Res.* 116, A09225, doi:10.1029/2011JA016818.
- [11] Pryor, W. R. et al., 2011, *Nature* 472, 331.
- [12] Gurnett, D. A. et al., 2010, *Geophys. Res. Lett.* 37, L24101, doi:10.1029/2010GL045796.
- [13] Mitchell, D. G. et al., 2009, *Planet. Space Sci.* 57, 1732.
- [14] Khurana, K. K. et al., 2009, *J. Geophys. Res.* 114, A02211, doi:10.1029/2008JA013312.

- [15] Clarke, J. T. et al., 2005, *Nature* 433, 717.
- [16] Raynaud, E. et al., 2004, *Icarus* 171, 133.
- [17] Gustin, J. et al., 2006, *J. Geophys. Res.* 111, A09220,
doi:10.1029/2006JA011730.
- [18] Woch, J. et al., 1998, *Geophys. Res. Lett.* 25, 1253.
- [19] Radioti, A. et al., 2008, *Geophys. Res. Lett.* 35,
L03104, doi:10.1029/2007GL032460.
- [20] Grodent, D. et al., 2004, *J. Geophys. Res.* 109, A05201,
doi:10.1029/2003JA010341.
- [21] Woch, J. et al., 2002, *Geophys. Res. Lett.* 29, 7,
doi:10.1029/2001GL014080
- [22] Kunde, V. G. et al., 2004, *Science* 305, 1582.
- [23] Wannawichian, S. et al., 2010, *J. Geophys. Res.* 115,
A02206, doi:10.1029/2009JA014456.
- [24] Satoh, T. and Connerney, J. E. P., 1999, *Icarus* 141,
236.