

木星のオーロラ：惑星磁気圏のリモート観測

佐藤 毅彦*

〈NASA Goddard Space Flight Center〉

Code 695, Greebelt, MD 20771, USA

近年の観測機器（赤外線、紫外線）の発達は、惑星磁気圏の研究に新しい領域を開きました。それは惑星の極域に光るオーロラの画像観測です。様々な姿を見せるオーロラの観測を通じて、磁気圏と太陽風、その衛星などが織りなす多様な活動を調べることができます。木星赤外オーロラに関する最新の成果をメインに、惑星環境を守る大切な磁気圏のリモート観測について紹介しています。

1. はじめに

我々生命を包む厚い大気層をより外側で守ってくれている存在、それは惑星自身が持つ磁場です。太陽からは太陽風と呼ばれる高速なプラズマ（電子やイオン）の流れが、休むことなく惑星間空間に向けて放出されています。惑星磁場は、このいわば危険な粒子流を迂回させ、最も外周で惑星環境を保護しているのです。太陽風のような外部からの圧力が加わることで、惑星の太陽側では圧縮され、太陽風の下流では大きく引き延ばされた惑星磁気圏が形成されます。この辺りの事情は、「現代の太陽系科学・下」（大家寛・大林辰蔵編、東京大学出版会）の第II部「惑星の電磁環境」に良くレビューされています。

生命活動の源である恒星は、いろいろな波長の電磁波とともにこうした高速プラズマ流を放出する宿命にあります。磁気圏と大気はその中から必要な電磁波だけを選別して我々に届けているのですから、自然の仕組みの妙に感嘆せざるを得ません。人類の将来として宇宙移民のようなことを考える際に、恒星からの高速プラズマ流と惑星磁気圏の相互作用の理解は不可欠といえます。各々に

異なった性質の磁気圏を持つ太陽系惑星の比較研究は、この重要な自然現象をつかさどる普遍的なメカニズムを理解するのにうってつけの対象といえます。本稿はそうした研究の一つとして、最新の赤外線機器で探る木星磁気圏現象について紹介しています。

2. 惑星磁気圏の観測

とはいえ磁気圏に展開する現象の詳細な観測は簡単なことではありません。惑星電波を観測して磁気圏の様子を探る方法では空間分解能が不足しがちです。例えば東西に置かれた二点の干渉計システムでは南北方向の位置情報を捉えることはできません。アレイシステムで電波を受信して二次元画像を再現するには長い積分時間が必要であり、積分時間に比べて高速に自転する惑星では経度情報は失われてしまいます。

惑星探査機により惑星磁場の強さや向きを直接観測するのは優れた方法ですが、探査機の打ち上げは高価なプロジェクトです。そのためこれまでの探査機の多くは、一台で複数の惑星を訪れるように計画されてきました。その代償として一つの惑星あたりの訪問時間は限られたものとなり、惑星をスイングバイしてゆく軌跡でしか磁場の観測はできなかったのです。空間的に限られた情報が惑星磁気圏の全貌を明らかにしないのはもちろんのこと、

* 現在の所属：東京理科大学
計算科学フロンティア研究センター
〒276 千葉県野田市山崎 2641



時間的にも限られた観測であれば、時々刻々と変化する太陽風に惑星磁気圏がどう反応しているかなどは不明のままに残されていたのでした。何とかして、惑星磁気圏の広い範囲を長期にわたり、しかも高い空間分解能で観測する必要があります。

3. 木星 H_3^+ オーロラの発見

我々の観測手法は、惑星オーロラを画像観測し、磁気圏の状態を推定してゆくという方法です。惑星の極域の現象から磁力線をトレースしてゆくことで、磁気圏のどこで何が起きているかを推定することができるはずで、つまり、惑星オーロラを磁気圏の様相を映し出すスクリーンのように使おうというわけです。その最良の例として、木星 H_3^+ オーロラ観測とその成果を以下に紹介します。

木星大気中の H_3^+ イオンの発見は Drossart et al. (1989)¹⁾ が行った分光観測によるものが最初です。オーロラ領域には磁気圏から大量の荷電粒子が降り注いできます。これら粒子が、大気の大部分を構成する水素分子 (H_2) を衝突により H_2^+ へとイオン化し、 H_2^+ イオンが周囲の H_2 分子と素早く結合することで、 H_3^+ と H とを作るのです (Tennyson and Miller 1994)²⁾。 H_3^+ イオンは μ bar から nbar 気圧の高空で卓越しているといわれます。1991年にはNASAのIRTF 3m赤外線望遠鏡のために開発されたProtoCAM赤外線カメラを用いて、波長3-4 μ m帯で H_3^+ オーロラの画像が初めて得られまし

た (Baron et al. 1991³⁾; Kim et al. 1991⁴⁾)。この波長領域には強い H_3^+ 輝線があると同時に、強いメタン吸収が木星ディスクの輝度を非常に低いものとするため、相対的なコントラストが上がりオーロラを観測しやすいのです。この画像観測の成功を受けて、我々のグループの共同研究がスタートしました。

当初は小さなフォーマットの検出器 (62 × 58 画素 InSb アレイ) が使われていたため、複数のフレームから木星全面モザイクを合成する必要がありました。我々のグループでは望遠鏡のポインティン

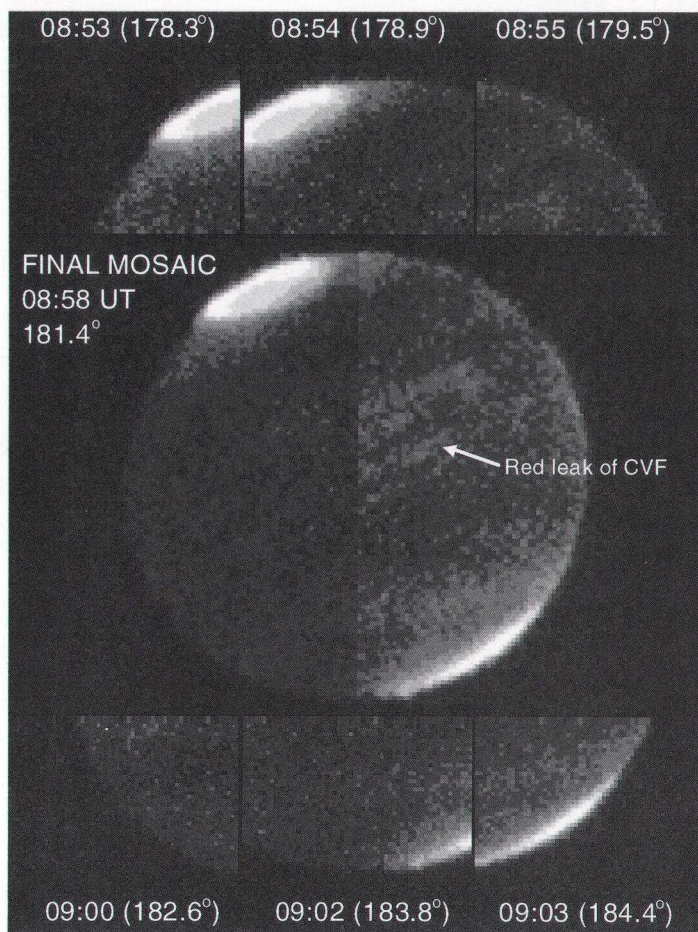


図1：ProtoCAM赤外線カメラによる木星 H_3^+ オーロラ画像。中央の全面モザイクを作るのに使われた9枚のフレームのうち、6枚（上段3枚、下段3枚）が示されている (Sato et al. 1996)。

グとカメラの露光を制御するマクロを組み、さらに画像処理の段階では精細な位置合わせを自動で行なうスクリプトを作り、多数の木星全面モザイク画像を得ることに成功しました。こうした画像を精査していた1993年春、我々はオーロラから少し離れて光る小さな輝点が南北半球ではほぼ同じ位置に現れていることに気がついたのです。これが衛星イオから磁力線を伝わって木星大気に到達するエネルギー流（イオ・フラックスチューブ）であることは、他のモザイク像をも調べて確認することができました。つまり、イオの公転軌道上の位置と、その輝点が現れるリム（明け方側か夕方側）とが完全に対応していたのです（Connerney et al. 1993）⁵⁾。

木星の磁軸はその自転軸に対しておよそ10度の傾きを持っているため、ある経度では北半球オーロラが良く見え南オーロラはリム付近に輝くだけ、またはその反対という状況が発生します。このような幾何学では、「南北対称にイオ輝点が現れる」という現象は限られた経度範囲でしか観測されません。つまり、発見の直接のきっかけとなった画像はそれ自体がまれなものであったのです。また、オーロラの近傍に生じる独立した輝点が南北で対になって現れるということは、全面モザイク像を作るまではなかなか認識できませんでした。限られた枚数の木星部分画像を解析していた他の研究グループがこの現象を発見できなかったのは、こうした理由によります。そういう意味でこの発見は、木星全面のモザイクを多様な木星面経度とイオ公転位相角の組み合わせについて収集した我々の戦略がみごとに当たった成果といえるわけです。

4. イオ輝点の教えるもの

発見と同時に、このイオ輝点は木星の極域に展開する現象の中でも最も注目されるものとなりました。というのは、それまで観測されていた他の現象はそれが「磁気圏のどこに由来する現象か」ということがはっきりしていなかったからです。磁場モデルを使えば極域の現象を磁気圏の各部に対応づ

けられそうに思いますが、ことはそう簡単ではありません。前述したように空間的に限られた探査機データに基づいた磁場モデルは万能ではなく、特に惑星近傍で支配的となる高次の磁場成分に関しては情報不足です。そのため、極域の現象を磁気圏へと正確にマップすることは従来の磁場モデルでは事実上不可能でした。それに対して、イオ輝点は明らかにイオ本体からやってくるものです。イオ輝点の木星面での位置を追跡することにより、イオの公転軌道を通る磁力線がどのようにマップするかが分かります。このデータは、これまで探査機軌跡上でしか知られていなかった木星磁場に関する新しい制限であり、木星磁場モデルの改良に大きく役立つものです。

イオ輝点はその後、ハッブル宇宙望遠鏡 HST から紫外線領域でも観測されるようになりました（Prange et al. 1996⁶⁾, Clarke et al. 1996⁷⁾）。また、地上からの赤外線観測も IRTF 望遠鏡に新しい赤外線カメラ NSFCAM が利用可能になり、初期のものよりはるかに分解能の高い画像が得られるようになってきています。現在では赤外・紫外を合わせたかなりの数のイオ輝点の位置測定がなされており、我々のグループで木星磁場モデル改良の作業が推められています（Connerney et al. in preparation）。

しかし磁場モデルの改良は残念ながらこれだけでは完成しないことも分かってきました。というのは、ある瞬間のイオの位置を木星大気に結び付けるのには、もう一つ未定の要素があったのです。それはイオからの電流が曲がる効果で、イオ輝点の木星面での位置は、本来の位置よりも前進した（リード角を持った）ようになってしまいます。この効果を考慮すると、「リード角が大きな経度依存性を伴うモデル」から「ほぼ一定のリード角を持つモデル」まで無数の可能性が許されてしまいます。この状況はまだ打破されていませんが、我々のグループでは二つの可能性を探っています。一つは、より空間分解能の高いイオ輝点の観測で、電流の増減に応じたイオ輝点の位置の微妙なゆら



さを捉えようというものです。また、他の衛星、特にユーロパから伝わってくる同様なフラックスチューブ輝点を捉えることができれば、二つの衛星を取り巻くプラズマ環境の違いを考慮して不確定性を大きく減らすことができるかも知れません。

5. オーロラと太陽風の関係

地球のオーロラが太陽風の活動に呼応して明るさや、その発生する緯度を変えるというのは良く知られた観測事実です。同様の変化が木星オーロラにも見られるでしょうか？

その疑問に答えるために、我々のグループでは多数の木星モザイク画像からオーロラの明るさの変化を測定しました。1992年春という特定の時期に木星オーロラ観測プロジェクトを推進した理由の一つにユリシーズ探査機の木星訪問がありました (Smith et al. 1992)⁸⁾。激しく脈打つ太陽風を地

球軌道付近での観測から木星軌道まで外挿するのは無理があり、木星近傍を旅する飛翔体からの比較用データがどうしても欲しかったのです。その結果、以下のような結論が得られました (Baron et al. 1996⁹⁾。

- (1) 木星磁軸の自転軸に対する傾き (約 10 度) がオーロラの見え具合を変えることによる、自転周期に同期した正弦波状の変動が見られる。ある観測夜の木星オーロラの明るさはこの正弦波状変動の極大と極小を平均して得られる。
- (2) ある観測夜から次の観測夜という短い時間を切りとって見た場合、オーロラの明るさの変化は太陽風動圧の変動におよそ対応している。その変化量は次に述べる成分に比べると小さい。
- (3) 数カ月の単位でながめると、振幅の大きな明るさの変動があり、極小と極大とで3倍程度の振幅を持つ。

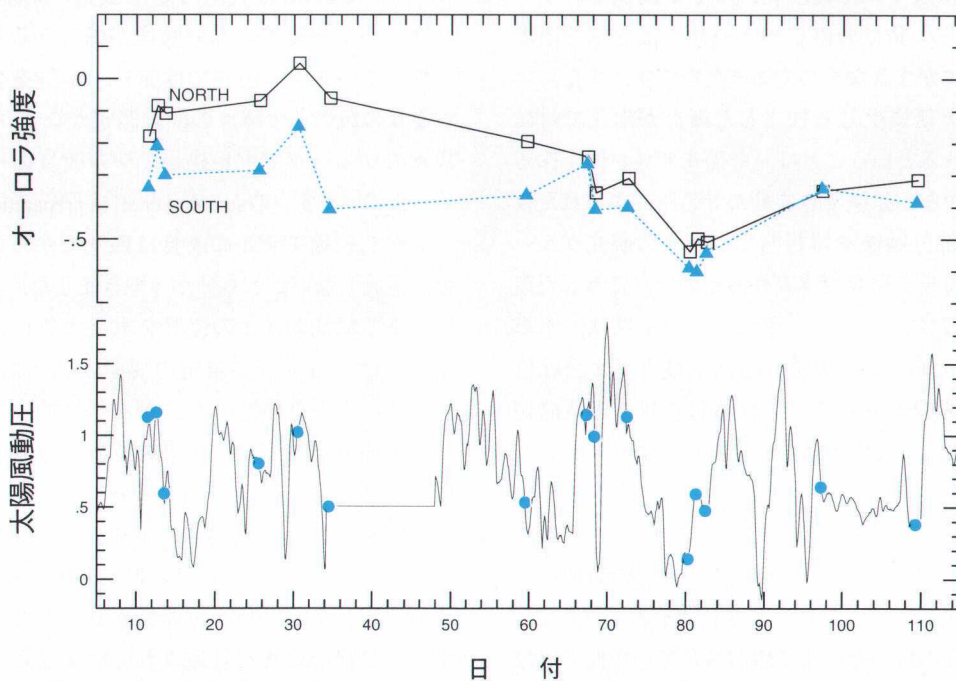


図3：木星赤外オーロラからのフラックス観測とユリシーズ探査機からの太陽風動圧データとの比較 (Baron et al. 1996)。

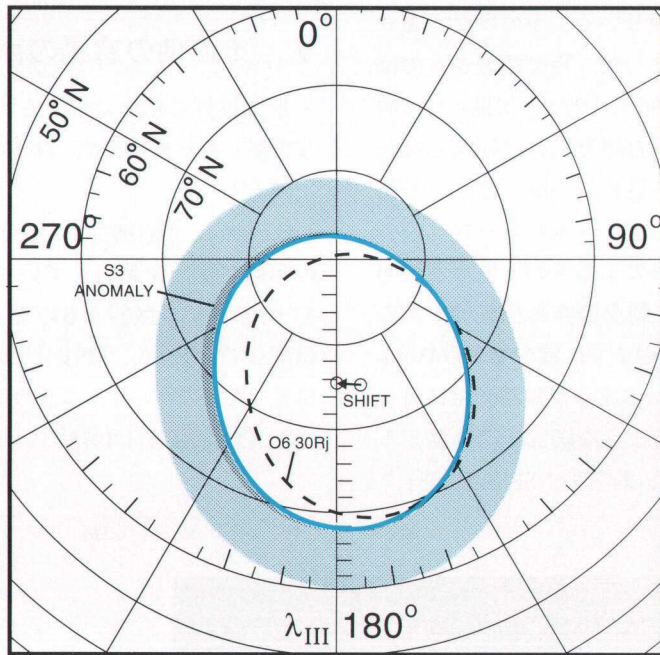


図4：木星北オーロラのモデル．経度範囲 $180^\circ \sim 270^\circ$ にかけて電子が集中的に木星大気に到達し，明るいアークを形成する (Satoh et al. 1996)．図は北極を見おろした場合．

このことから，木星オーロラも地球の場合のように太陽風活動と相関を持っていることが分かりました．しかし，その影響はずっと小さなものです．木星の磁気圏は地球のそれと比べるとはるかに大きくかつ高速に回転していますから，磁気圏内部のプラズマ粒子はこの回転に振り回されながら，そこからエネルギーを得ます．そして磁力線を伝わり，最後は木星大気電離層に突入してオーロラを輝かせます．こうした成分は，太陽風のような外的要因によるよりも，木星磁気圏それ自身が持つ不安定性や波動などに支配されていると考えられます．

6. オーロラのいろいろな成分

十分な分解能を持ったオーロラ画像を，起源の明確なイオ輝点を基準として解析することで，オーロラのいろいろな成分を分離し，木星磁気圏各

部の活動へと翻訳することができるはずですが，そうした試みの一つとして，IRTF/ProtoCAM 画像をデータとした解析を行ないました (Satoh et al. 1996¹⁰⁾．

まず様々な木星面経度で観測されたオーロラ画像を選びその中からオーロラを含む領域を取り出し，各ピクセルの持つ明るさをデータとします．一方，適当なオーロラ発光源分布を仮定して，各々の木星面経度に対応したシミュレーション画像を作ることができます．観測データに対応した領域から各ピクセルの明るさを取り出せば，これをデータと直接比較することができます．全ピクセルについて，観測データとシミュレーションとの残差二乗和が最小になるようにモデル（オーロラ発光源分布）を最適化してやるというのが基本的な流れです．



ProtoCAM 画像から 8 枚の時系列画像（およそ木星の自転をカバー）を選び出し、解析した結果、赤外オーロラには予想通りいくつかの異なる成分があることが確認されました。特に顕著なものは北オーロラの経度範囲 $180^\circ \sim 270^\circ$ に見られる明るいアークで、これは磁力線を南北に往復しながらドリフトする電子が木星大気へ降り注ぐと予想されている経度に一致します。木星オーロラの少なくともある部分は電子によるものであると証明されたわけです。また、朝夕の非対称成分があるらしいことも検出されています。残念ながら ProtoCAM データからは、個々の成分が観測夜毎に異なる明るさを見せるというような細部までは捉えることはできませんでした。新しい NSFCAM データ

ではもう少し、その辺に踏み込んだ結論を導き出せるものと期待して解析が続けられています。

7. その他の惑星のオーロラ

木星以外の惑星に対する同様の観測の成功例はまだ多くありませんが、以下のような報告がなされています。

Geballe et al. (1993)¹¹⁾ は分光観測により土星に H_3^+ の輝線の検出を報告しています。その強度は木星の 1/100 という微弱なもので、画像として捉えるには至っていません。HST による紫外線観測では S/N は良くないながらオーロラの画像観測に成功しています (Trauger et al. 1995¹²⁾).

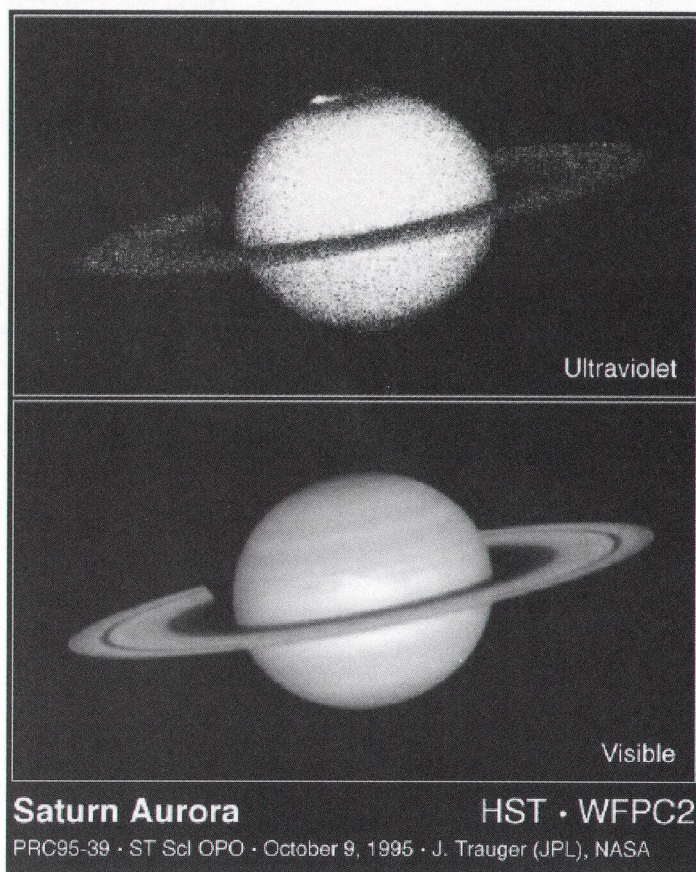


図 5 : HST WFPC2 が捉えた土星の紫外線オーロラ (上段: 紫外線画像, 下段: 可視光画像). (Trauger et al. 1995)

最近になって天王星の H_3^+ 発光の画像観測が報告されています (Lam et al. 1997¹³⁾). しかし容易に想像できるように, S/N, 空間分解能ともに詳細を研究するには不十分です. 加えて天王星の場合には自転周期が正確に分かっていないことから, ヴォイジャーが観測した当時の磁極と, 画像中の H_3^+ 発光とを同定できないという問題もあります.

これらは今後, すばるのような優れた性能の赤外線観測機器が登場することで, さらなる発展が期待される分野です.

8. あとがき

我々はまだほんのスターティングポイントに立ったに過ぎません. 地球外惑星の磁気圏に展開する現象を画像観測するための道具は, 紫外線, 赤外線ともに利用可能になったばかりです. 木星のように比較的観測しやすい対象に対してでさえ, 現在の観測機器ではまだ及ばない部分が多くあります. 遠方の惑星に対しても同様の研究を行なおうと思えば, 要求される観測能力にさらに高いものが必要となることはいうまでもありません. 次世代の, そしてはるか後世の人類の繁栄のために, 我々の太陽系天体に展開する大切な物理を忘れるべきではありません. この分野の研究は我々の観測能力の許す限り, 深く長く追求されてゆくべきものであると考えます.

参考文献

- 1) Drossart P., et al., 1989, *Nature* 340, 539
- 2) Tennyson J., and Miller S., 1994, *Contemporary Physics* 35, 105
- 3) Baron R.L., et al., 1991 *Nature* 353, 539
- 4) Kim S.J., et al., 1991, *Nature* 353, 536
- 5) Connerney J.E.P., et al., 1993, *Science* 262, 1035
- 6) Prange R., et al., 1996, *Nature* 379, 323
- 7) Clarke J.T., et al., *Science* 274, 404, 1996.
- 8) Smith E.J., Wenzel K.-P., Page D.E., 1992, *Science* 257, 1503
- 9) Baron R.L., et al., *Icarus* 120, 437, 1996.
- 10) Satoh T., Connerney J.E.P., Baron R.L., 1996, *Icarus* 122, 1
- 11) Geballe T.R., Jagod M.-F., Oka T., 1993, *ApJ* 408, L109
- 12) Trauger J.T., et al., 1995, in 27th DPS meeting abstracts, p.93
- 13) Lam H.A., et al., 1997, *ApJ* 474, L73

Jupiter's Aurora: Remote Observations of The Planetary Magnetospheres

Takehiko SATOH

NASA Goddard Space Flight Center
Code 695, Greebelt, MD 20771, USA

Abstract: The advent of high-performance instrument, both in the infrared and in the ultraviolet, has opened a new era to the studies of the planetary magnetospheres. Direct imaging observations of planetary aurorae will allow us to investigate the interaction between the planetary magnetosphere, the solar wind, and its satellites. Through the latest results on Jupiter's infrared aurorae, we discuss the remote observations of the planetary magnetospheres, the outmost protective layer for the planetary environment.