

特集「将来木星圏・土星圏探査計画へのサイエンス：その2」

地上近赤外観測で捉える木星極域の熱圏大気

宇野 健¹, 坂野井 健¹, 埜 千尋², 笠羽 康正¹

2011年9月30日受領, 2011年11月14日受理.

(要旨) 木星極域では、中性 H_2 分子および H_3^+ と呼ばれるイオンの回転振動励起による、波長 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ の近赤外オーロラが生じている。木星オーロラ発光の中でほぼ唯一地上観測が可能な近赤外観測により、電離圏電場やジュール加熱による熱圏へのエネルギー注入や、衝突によるプラズマと中性大気間の運動量輸送の情報を得ることができる。私たちはこれまで NASA の IRTF/CSHELL や、国立天文台のすばる/IRCS 等の望遠鏡に取り付けられた高分散分光器を用いて、木星熱圏のプラズマ大気および中性大気の温度分布とオーロラ発光分布の観測を試みてきた。本論文では地上赤外観測で得られた木星オーロラの知見と今後の展望を紹介する。

1. 木星オーロラの赤外地上観測

木星の熱圏・電離圏は惑星本体と磁気圏との遷移領域であり、極域ではオーロラ発光が観測される。ここでは惑星と共に自転する中性大気を持つ角運動量が、熱圏-電離圏における中性大気分子とイオンとの相互作用を介してプラズマを駆動し、さらに電離圏-磁気圏の電磁氣的結合を通して磁気圏プラズマの運動にも影響を与えている。このプロセスは、惑星本体の自転エネルギーをオーロラのような電磁圏現象に変換する過程とも言え、木星においてはメインオーバルと呼ばれる極を取り巻くリング状のオーロラ発光領域が、太陽風などの外的要因とはほぼ無関係に安定して存在していることが知られている。このように木星の電磁圏環境は、太陽風によって駆動されている地球とは駆動源が大きく異なる。地球との相違の点からも、惑星間空間と惑星本体との相互作用の普遍的理解のためにも木星の電磁圏環境の理解は重要である。

オーロラを磁気圏から降り込む粒子によって引き起こされる電磁波放射現象と捉えると、木星オーロラは

地球のオーロラと同様、電磁波領域からX線まで、実に様々な波長の電磁波を放出している。紫外線や可視光のオーロラは磁気圏からの降り込み粒子による水素原子(H)や水素分子(H_2)の直接励起による発光である。そのためこれらの波長域のオーロラ発光は、降り込み粒子のエネルギーやフラックスの空間分布、時間変化といった情報を直接反映しやすい。一方、オーロラ帯においては降り込み粒子により H_2 がイオン化されて H_2^+ が生じ、 H_2^+ がさらに H_2 と反応して H_3^+ と呼ばれるイオンが生成される。これらの H_2 や H_3^+ が背景大気分子との衝突により熱励起されることにより、近赤外域で発光が観測される。降り込み粒子による直接励起でなく熱励起であるため、これらの近赤外オーロラの発光は電離圏を流れる電流によるジュール加熱の情報も反映する。 H_2 の発光高度は $0.01\sim 10\ \mu\text{bar}$ 高度(= 1 barからの高度で400 km程度)、 H_3^+ の発光高度は $0.1\ \text{nbar}\sim 1\ \mu\text{bar}$ 高度(= 1 barからの高度で900 km程度)付近であり[1]、ペダーソン層と呼ばれる、電離圏で電気伝導度が最も高い領域である。したがってこの高度の中性大気ダイナミクスを観測することが、木星の電磁圏環境を理解する上で重要であると言える。また、より低高度($1\ \mu\text{bar}\sim 1\ \text{mbar}$ 高度 = 1 barからの高度で100 km程度)の成層圏付近には炭化水素化合物

1. 東北大学大学院理学研究科

2. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
uno@pat. gp. tohoku. ac. jp

が存在し、近赤外から中間赤外にかけての放射を行っている。

しかし、紫外線より短波長の光は地球大気による強い吸収を受けるため、探査機や宇宙望遠鏡等の宇宙空間における飛翔体観測以外に観測手段がない。また、木星は常に昼面を地球に向けているため、可視光では強力な太陽散乱光が障害となって、地上観測でオーロラの光を捉えることは極めて困難である。このため、地上からの木星オーロラ現象の観測は、主に電波によるものか中間赤外の熱放射に限られていた[2]。木星電波の主要な放射源は磁気圏領域にあり、一方で中間赤外の放射源である炭化水素化合物は木星成層圏付近の高度に存在すると考えられている。したがって、これらの観測では木星の熱圏領域の観測はできない。また、これまでの技術では電波や中間赤外の観測で撮像を行うことは困難であり、オーロラの発光強度や波長の空間分布を議論することはできなかった。そのためには探査機や宇宙望遠鏡による紫外線観測が必要であった。

近赤外の観測装置は装置全体を冷却する必要があることから大型化が難しく、また2次元センサの開発が困難であったが、1980年代の観測技術の進展に伴い、地球大気の吸収が少ない近赤外の窓領域を通した観測が可能になってきた。そして1989年、木星で $2\mu\text{m}$ 帯観測において初めて H_3^+ の発光輝線が観測されると、木星の近赤外観測に火がついた[3]。理論的に存在が予測されていた H_3^+ の存在が実験室以外の自然界で確認されたのはこれが初めてであり、これ以降、 H_3^+ の観測が盛んに行われるようになった。

H_3^+ の近赤外観測は、狭帯域フィルター（透過幅 $\sim 1/100$ 波長）を用いた撮像観測と、高分散分光器を用いた分光観測（波長分解能10,000以上）とに大別できる。撮像観測では、可視光より少ないとはいえ、木星の雲粒子などによる太陽散乱光が問題となってくる。このため、太陽散乱光を吸収するメタンの吸収帯を用いた観測が行われた。メタンは木星大気中にほぼ一定の割合で含まれると考えられており、雲層より上空にあるメタンは、木星雲層から反射された太陽光を幾つかの特定の波長帯において吸収する役割を持つ。この結果、木星の太陽散乱光は特定の波長帯において極めて弱くなる。近赤外においては波長 $3.4\mu\text{m}$ 付近のメタン吸収帯でこの効果が顕著であり、かつ $3.4\mu\text{m}$ 帯に強い H_3^+

の輝線が複数存在するため、この波長帯を用いた撮像観測が行われてきた。ただし $3.4\mu\text{m}$ 帯は地球大気の窓領域の端にあたるため、大気の水蒸気等の影響を受けやすい。このため、日本等での観測は難しく、観測は主にハワイ・マウナケア山頂にあるNASAのInfrared Telescope Facility (IRTF)等の望遠鏡を用いて行われてきた。地球大気のゆらぎの影響で探査機や宇宙望遠鏡のような空間分解能は得られないものの、撮像観測ではオーロラの全体像を捉え、空間分解が可能である。近赤外領域においても紫外光で観測されたような、木星の衛星イオと木星本体との電磁氣的なつながりを示唆するイオフットプリントオーロラが観測され、オーロラがリング状のオーロラオーバル構造をしていることが確認され、その放射高度や発光層の厚みなどが推定された[4]。

一方、高分散分光観測では、相対的に太陽散乱光が減衰するため、撮像観測ほどには観測波長を選ばない。初期の観測は $2\mu\text{m}$ 帯であったが、その後 $2\sim 4\mu\text{m}$ の幅広い波長帯で H_3^+ オーロラの観測が行われた。分光観測による大きな利点は、撮像観測では得られない物理量を得られる点にある。すなわち、オーロラ発光高度における発光分子の温度や、 H_3^+ イオンのコラム密度、プラズマドリフト速度（＝熱圏におけるイオン風速）を推定可能である。これまで H_3^+ の $3.953\mu\text{m}$ 輝線を用いた H_3^+ イオン風の観測が何度か行われている。IRTF搭載の近赤外エシェル分光器CSHELL（波長分解能43,000）を用いて行われた初の H_3^+ イオン風観測では、地球－木星間の相対速度と木星自転速度を差し引いた、地球からの視線方向速度にして $\pm 2\sim 3\text{ km/s}$ という、場所によっては木星熱圏中の音速を超えるような速度を得た[5]。音速を超えるイオン風速は、オーロラ活動が一時的に活発になったことに伴う過渡的な現象ではないかと理解されている。次いで行われた観測では、オーロラ発光強度の分布に対応して視線方向速度が変化している様子が見られ、磁気圏におけるプラズマ対流を反映した、電離圏における対流構造として説明された[6]。

木星熱圏の温度が、太陽からのEUV放射による加熱から予想されるよりも、全球的に数百K程度温度が高いというエネルギー収支の問題は H_3^+ 観測以前から指摘されていたが、 H_3^+ による温度場観測からはそれを裏付ける結果が得られた。この問題は未だ明瞭な答

えが得られていないテーマの一つであるが、高緯度オーロラ帯での加熱が低緯度へ輸送される効果や、低緯度帯での比較的低エネルギーの粒子の降り込みによる直接加熱、より低高度からの重力波による加熱の効果などが考えられている[7]。さらに、 H_3^+ の発光強度と温度場の関係から、 H_3^+ の赤外放射は熱圏・電離圏領域の重要な冷却機構であり、その放射量が温度に依存するため、結果として熱圏温度を一定に保つサーモスタットのような働きがあることが明らかになった[7]。この効果はHot Jupiterのような系外惑星の超高層大気を考える上でも重要となるだろう。

一方、イオンである H_3^+ の観測に加え、1989年の2 μm 帯観測では、中性 H_2 の輝線も検出された。複数の H_2 輝線強度の比を取ることで、分子の振動回転温度を導出することができ、その結果、オーロラ帯熱圏高度での中性大気温度が730 K(+490 K / -200 K)と導出された[8]。

このように近赤外の撮像、分光観測が可能になってからの木星オーロラ研究の進展は目覚しいが、さらに近年、撮像と分光を組み合わせた観測が可能となってきた。その中でも興味深い研究が2004年に報告された、Canada-France-Hawaii Telescope(CFHT)搭載のBEARと呼ばれる撮像フーリエ分光計(波長分解能 25,000)を用いて行われた2.1 μm 帯の観測である[9]。2.1 μm 帯には H_2 と H_3^+ の輝線が複数存在するが、分光撮像観測によりこれらの輝線1本1本に対応した2次元マップを得ることができ、 H_2 と H_3^+ の発光分布を同時観測で比較することが可能になった。この結果では、 H_3^+ には北緯70度、system-III経度160度付近に、特徴的な発光強度の極大が観測された。一方、 H_2 では同じ場所に極大は観測されず、西に50度ほどずれた経度210度付近を中心とした発光の増大が観測された。しかし未だ H_3^+ と H_2 の発光分布の違いを十分に説明する研究はなされていない。

本論文の第2章では、IRTFを用いて観測された H_2 と H_3^+ 発光分布の違いについて報告し、第3章では、 H_2 、 H_3^+ 発光分布と中性大気温度分布との比較を目的として行った、すばる望遠鏡を用いた観測の結果について報告する。

2. IRTF/CSHELLによるオーロラ観測

私たちのグループでは、これまで地上望遠鏡を用いて木星近赤外オーロラの観測を行ってきた。2009年の8月から9月にかけては、IRTF/CSHELLにより H_3^+ Q(1, 0)輝線(波長3.953 μm)を用いて木星オーロラの分光観測を実施した。図1のようにスリットを動かしてゆくことで分光情報に加え、空間情報も得ることができる。それに加えて H_2 S₁(1)輝線(波長2.122 μm)の輝線観測も実施した。 H_2 と H_3^+ の北極、南極それぞれの観測に対応する時間帯、およびその時間における、地球から見た木星の中央子午線経度(以後CML)の範囲を表1に示す。

Celestial north pole

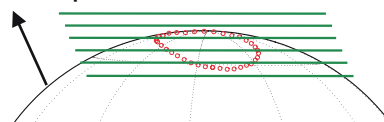


図1: 木星の北極をIRTF/CSHELLを用いてスリットスキャンする場合の模式図。横線がスリットであり、丸点線はオーロラオーバルを表す。2009年9月の木星視直径は48秒角であり、スリット幅は0.5秒角、スリット長は30秒角である。スリット1箇所あたりの積分時間は、輝線の強度にあわせて H_2 観測では5分間、 H_3^+ 観測では1分間とし、スリットの間隔(横線の間隔)は1秒角程度となるように望遠鏡を動かした。

表1: 2009年9月6日[UT]のIRTF/CSHELL観測における観測時間帯と、対応する中央子午線経度(CML)。スリットスキャンに要する時間は、 H_3^+ 観測では15分程度、 H_2 観測では75分程度である。

	時間[UT]	CML範囲[度]
H_3^+ (北極)	08:01 ~ 08:18	197 ~ 207
H_2 (北極)	08:22 ~ 09:36	210 ~ 254
H_3^+ (南極)	11:08 ~ 11:21	310 ~ 318
H_2 (南極)	11:24 ~ 12:38	320 ~ 5

CSHELLの波長分解能は十分高いので、 H_3^+ 、 H_2 の輝線は1本ずつ独立して観測できる。観測されたスペクトルにバンドパスフィルター処理を行うことで H_3^+ Q(1, 0)および H_2 S₁(1)輝線強度の空間分布を導出し、木星面に投影した結果を図2に示す。ただし、図2ではスリットとスリットの間隙にあたる部分は線形補間を行なって連続的な分布としている。それぞれの図でカラースケールは異なっている。発光強度の誤差要因

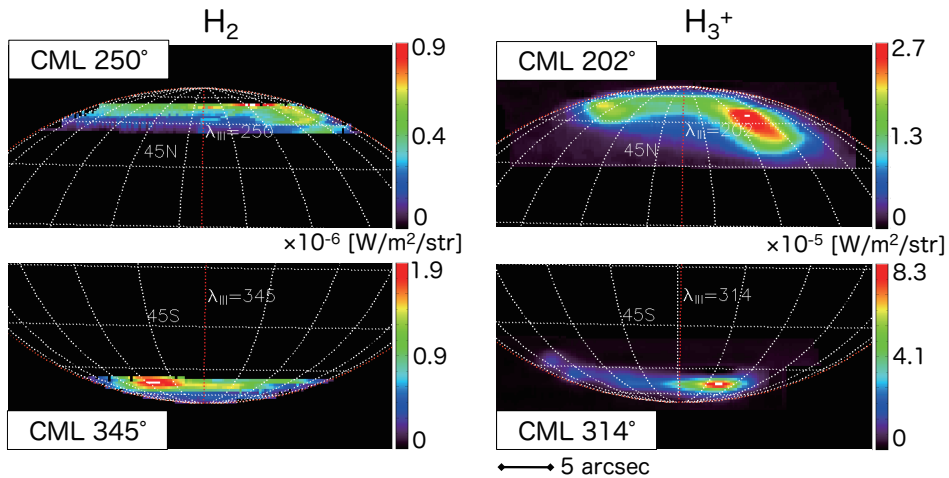


図2：2009/9/6における木星近赤外オーロラの発光分布。左：H₂，右：H₃⁺。上側が北極，下側が南極である。それぞれの画像でカラースケールが異なることに注意。

には、フラット校正や分光標準星を用いた発光強度校正が挙げられるが、誤差の大きさは概ね1割程度である。図2を見ると、誤差を考慮してもH₂とH₃⁺の分布には有意な違いが見出された。これは2004年の先行研究[9]を支持する結果である。特に図2の南極側からは、周囲より2倍以上明るいようなスポット状の発光領域の場所が、H₂とH₃⁺では明らかに異なることが見て取れる。また、総じて南極側の方がオーロラの発光強度は大きく、特にH₃⁺のピーク値で見ると、南極の方が北極の4倍以上明るかった。

H₃⁺の発光高度はH₂より500 kmほど高く、H₂の発光高度に届く電子よりも低いエネルギーの降り込み電子に应答して発光すると考えられる。しかし、単純に低エネルギーの電子降り込みが活発な領域で高エネルギーの電子降り込みも大きく、H₂発光高度での大気加熱も大きいとすると、H₂発光強度が最大値を示す場所が、H₃⁺と比べて西に50度ほどずれることを説明できない。H₃⁺の発光強度が大きい領域では、降り込み電子のフラックスは大きい電子のエネルギーが低く、H₂の発光強度が大きい領域では、より高いエネルギーの電子が降り込んでいると考えれば、発光分布の違いを説明できる。この場合、H₂の振動回転温度観測から中性大気温度の分布を推定すれば、高いエネルギーの電子によってH₂発光高度の中性大気が加熱され、それによってH₂発光強度が増大している様子が見られるはずである。また、H₃⁺は降り込み電子によるイオン化反応を経て生成されるため、降り込

み電子がなければオーロラ発光を起こさない。一方でH₂は電子降り込みがなくても背景大気の加熱があれば発光するため、降り込み電子のフラックスは小さいがジュール加熱が大きく働くような領域が仮に存在すれば、そこではH₃⁺よりもH₂がより強く光ることが予想される。その場合にも、H₂の観測から中性大気温度の分布を導出し、H₂の発光強度分布と比較することで、中性大気の加熱と、それに伴うH₂発光強度の増大が観測されると期待される。

したがって、仮にH₂、H₃⁺の発光分布と中性大気温度分布を比較することでH₂の発光分布と中性大気温度分布に相関があり、H₃⁺の発光分布には相関が見られないということが言えれば、H₂の発光領域で高エネルギーの電子降り込みか、ジュール加熱による加熱が強く働いており、H₃⁺の発光領域ではH₂の発光高度でそのような加熱が起きていない、ということが示唆される。このように、H₂とH₃⁺の発光分布の違いは熱圏の加熱プロセスを反映したものだと考えられるが、これまでの観測では中性大気温度分布に着目した観測はなされてこなかった。そこで本研究では、すばる望遠鏡を用いてH₂、H₃⁺の発光分布と中性大気温度を反映すると考えられるH₂の振動回転温度分布との比較を目的とした観測を行った。次章でその結果を報告する。

3. すばる望遠鏡IRCSによる熱圏温度場観測

そこで本研究では、 H_2 の発光が熱圏温度とどの程度対応しているか調べるため、発光強度分布に加え温度分布に焦点を当てた。中性大気分子である H_2 の輝線強度比から H_2 分子の振動回転温度を導出することで、赤外オーロラの熱励起過程で重要となる背景中性大気の温度の空間分布を求め、 H_2 発光強度の分布と比較することが本観測の目的である。

2010年10月13日に、ハワイ・マウナケア山頂のすばる望遠鏡(口径8.2m)を用いて $2.1\ \mu\text{m}$ 帯の H_2 と H_3^+ 輝線の同時観測を行った。観測に用いた装置はInfrared Camera and Spectrograph (IRCS)と呼ばれる近赤外観測装置で、その名の通り $1.5\ \mu\text{m}$ まで対応した近赤外カメラと、波長分解能20,000のエシエル分光器を搭載しており、撮像と分光のどちらも行えるようになっている。エシエル分光器の特徴は、高い波長分解能を有しながら幅広い波長範囲を一度に観測できることである。図3に得られたデータの一例を示す。

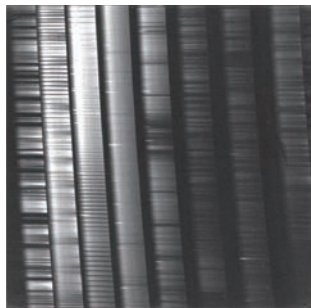


図3: 観測データの一例。縦軸が波長方向を表し、帯の一つ一つが回折格子の異なる回折次数に対応する。一つの帯の中では、横軸が空間方向に対応する。

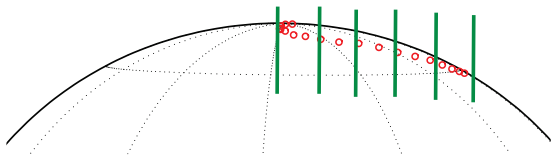


図4: すばるIRCSで木星の北極をスリットスキャンする場合の模式図。縦線がスリットであり、丸点線はオーロラオーバルを表す。2010年10月の木星視直径は49秒角であり、スリット幅は0.14秒角、スリット長は5秒角である。スリット1箇所あたりの積分時間は5分間とし、オーバル全体を観測するため、スリットの間隔(縦線の間隔)は木星自転によるオーロラオーバルの回転を考慮して、2秒角程度に設定した。

IRCSのスリット長は5秒角であり、スリット長30秒角のCSHELLと比較して短いため、CSHELLのように東西方向にスリットをあてて木星オーロラ帯をカバーすることはできない。そこでスリットは図4のように木星自転軸に沿ってあて、木星北極域と南極域をそれぞれ観測した。表2に北極、南極それぞれの観測時間帯、および木星のCMLの範囲を示す。

表2: 2010年10月13日[UT]のSUBARU/IRCS観測における観測時間帯と、対応するCML。IRCSは一度に観測できる波長範囲が広く、 $2\ \mu\text{m}$ 帯の H_2 と H_3^+ の輝線を同時に観測することができる。スリットスキャンに要した時間は、北極で50分程度、南極で90分程度であった。

	時間[UT]	CML範囲[度]
H_2 , H_3^+ (北極)	09:49 ~ 10:40	262 ~ 293
H_2 , H_3^+ (南極)	10:44 ~ 12:15	296 ~ 351

観測の結果、極域において、 H_2 分子の波長2.22, 2.12, $2.03\ \mu\text{m}$ の輝線および、複数の H_3^+ の輝線の検出に成功し、さらに H_2 の輝線強度比から分子の振動回転温度を導出した。上述のように、 H_2 の振動回転温度は赤外オーロラの熱励起過程に関わる背景大気温度を反映していると考えられる。図5に視線方向に積分された H_2 と H_3^+ の発光輝線の強度分布を、図6には H_2 の輝線比から導出した熱圏の中性大気温度を示す。図5の木星北極の縁付近に注目すると、 H_2 と H_3^+ の発光強度はどちらも縁に近づくほど大きくなり、木星の縁で最大強度を持っているように見える。また、北極ほど明瞭ではないが、南極でもやはり縁に近づくほどオーロラは明るく、縁から離れると暗くなるという分布を示している。2009年の観測結果で見られたようなスポット状の構造は見られず、 H_2 と H_3^+ がおおよそ似た分布を示しているという結果となった。また、予想された H_2 の発光分布と熱圏温度との対応は明らかでない。しかし、 H_2 と H_3^+ の分布が同じようになったのは、惑星の縁付近で視線方向に積分する距離が長くなるために見かけ上明るくなる、リムブライトニングの効果であると考えられる。2010年の観測時には装置使用時間の都合上、図4のようにオーバルの大半が木星の縁を回りこんで夜側に位置しており、地球からはオーロラ構造が見えにくい時間となったため、この効果が強く現れ、 H_2 と H_3^+ の分布の違いが不明瞭になった可能性がある。また、北極に比べ南極の方が H_2 と H_3^+ の発光強度の違いが大きく、 H_3^+ がより暗いという結果が得られた。 H_3^+ の輝線が異なるため一概に比較はで

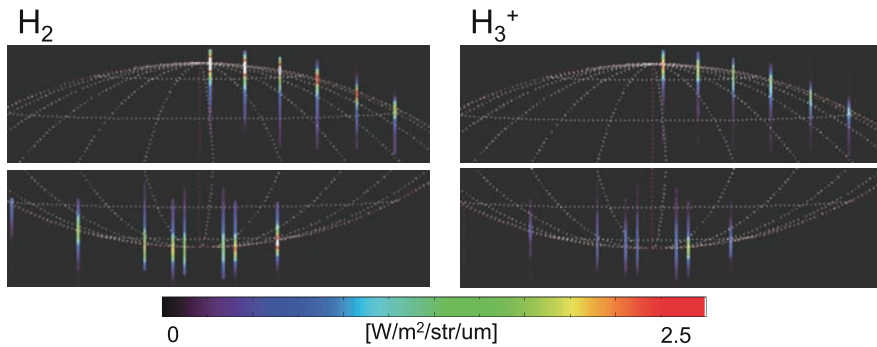


図5: すばる/IRCSで観測された2 μ m帯の木星近赤外オーロラ発光。左: H₂, 右: H₃⁺。上側が北極, 下側が南極である。4つの画像でカラースケールは揃えてある。

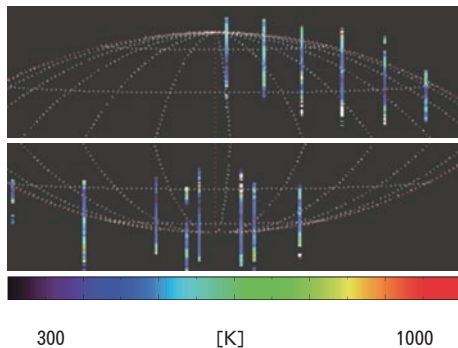


図6: H₂の輝線比から導出した, 中性大気温度分布。

きないが, 総じて北極よりも南極側の方が暗いという結果も, 2009年とは異なる傾向である。

本観測結果にはリムブライトニングの補正も含めさらなる解析の余地があるが, H₂とH₃⁺の発光分布の違いを理解するためには, 木星のCMLが適切で, オーロラオーバルの大半が地球側に向いているような, オーバルの構造を捉えやすい時間帯を選んだ観測が必要である。2011年には2010年よりも北半球のオーバルが地球からよく見える時間帯を選んで, 同じくすばる望遠鏡のIRCSを用いた観測を実施する予定である。

4. 今後の観測展望

4.1 大口径望遠鏡による高空間・波長分解観測

近年の大型望遠鏡を用いた木星辺縁部(リム)の高空間分解観測により, H₃⁺のオーロラ発光を高度分解し, H₃⁺数密度と温度の高度分布を導出する試みがな

されている[10]。今後はすばる望遠鏡等にも搭載が進められている補償光学(Adaptive Optics; AO)技術の進展や, 今後予定されているTMT(Thirty meter telescope)+AOによる近赤外観測により, 地上望遠鏡を用いたさらなる高空間分解観測が可能となると期待される。飛翔体観測では達成が困難な高波長分解能観測と, 飛翔体観測に比肩する高空間分解能が同時に達成できれば, 高度分解観測からH₂やH₃⁺の発光高度分布の直接観測や, 発光高度分布の違いから粒子の降り込みスペクトルや加熱高度の緯度による違いを特定することも夢ではない。また, 輝線の強度比を高い精度で観測できれば, 分子の振動回転温度だけではなく降り込み粒子の平均エネルギーの推定が可能であることも示唆されており, 大口径望遠鏡と高分散分光器の組み合わせに期待がかかる。

4.2 超高波長分解能観測

中性大気の手速は熱圏のみならず電離圏, 磁気圏のプラズマ現象にまで影響を及ぼすため, 木星の電磁圏ダイナミクスの観点からも重要である。特に中・低緯度帯の中性大気の運動は, ダイナモ電場の形で内部磁気圏の放射線帯の電場に変調を加えるとも言われており, 熱圏中性大気速度の観測が強く求められている[11]。しかし, 100 m/s以下程度と予想される風速を直接観測することは困難であり, これまでのところ上限値の制約しかされていない。観測装置の波長分解能とS/N比が, 現在の速度分解能を規定している。観測波長が今のところ10 μ m程度以上の中間赤外に限られるという問題はあるが, 本学のグループでも開発を進めている中間赤外ヘテロダイン分光器(理論上の

波長分解能10,000,000以上)の技術進展が、木星中性大気観測に新たな風を吹き込むかも知れない。

4.3 小口径望遠鏡によるモニタリング観測

地上からの観測では観測できる地方時が昼側に固定されるが、全球を見渡せるというメリットがある。さらに重要な利点として、連続観測により変動を追跡できる点が挙げられる。近年のHubble宇宙望遠鏡による紫外オーロラの研究で、地球に比べて安定と思われていた木星オーロラにも、太陽風の擾乱に起因すると思われる、発光強度やオーロラ空間分布の変動が見られることが明らかになってきた[12, 13]。紫外線で見られる変動が近赤外オーロラにどのような形で現れるかを知ることは、熱圏・電離圏におけるエネルギーのやり取りを理解する上で重要であるが、変動の観測はまさに始まったばかりであり、これからの研究課題である。このような変動現象の観測には、観測時間が限られる大口径望遠鏡の利用は不向きであり、中・小型の望遠鏡を用いた連続モニタリング観測がより重要となる。私たちのグループでは、近赤外カメラおよび近赤外高分散分光器の開発を進めている。将来的には本学のグループも加わって建設を進めているPLANETS望遠鏡(口径1.85 m, ハワイ・ハレアカラ)に搭載され、数週間から数ヶ月単位の長期モニタリングを可能とする装置として開発を進めており、2012年には試験観測を開始する予定である。

謝 辞

本研究で用いた観測データは、国立天文台のすばる望遠鏡、およびNASAのIRTFによって得られたものです。両関係者の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Grodent, D. et al., 2001, J. Geophys. Res. 106, 12933.
- [2] Caldwell, J. et al., 1980, Icarus 44, 667.
- [3] Drossart, P. et al., 1989, Nature 340, 539.
- [4] Satoh, T. et al., 1996, Icarus 122, 1.
- [5] Rego, D. et al., 1999, Nature 399, 121.
- [6] Stallard, T. et al., 2001, Icarus 154, 474.
- [7] Miller, S. et al., 1997, Icarus 130, 57.
- [8] Kim, S. et al., 1990, Icarus 84, 54.
- [9] Raynaud, E. et al., 2004, Icarus 171, 133.
- [10] Lystrup, M. B. et al., 2008, ApJ 677, 790.
- [11] Brice, N. M. and McDonough, T. R., 1973, Icarus 18, 206.
- [12] Clarke, J. T. et al., 2009, J. Geophys. Res. 114, 5210.
- [13] Nichols, J. D. et al., 2009, J. Geophys. Res. 114, 6210.