

平成 30 年 5 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17769

研究課題名(和文) オーロラ紫外スペクトルのオーロラ加速域情報から探る木星・土星電磁圏ダイナミクス

研究課題名(英文) Jupiter and Saturn magnetospheric dynamics explored using auroral electron accelerations derived from ultraviolet auroral emissions

研究代表者

埜 千尋 (TAO, Chihiro)

東北大学・理学研究科・客員研究者

研究者番号：80552562

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「ひさき」宇宙望遠鏡で観測された木星オーロラ・スペクトルからオーロラ電子パラメータを導出する方法を、ハッブル宇宙望遠鏡の観測との比較を通して確立した。さらに、スペクトル情報と加速理論を組み合わせ、磁気圏粒子パラメータ(加速前のプラズマ密度・温度)の変動量を導出した。それらを用いて、木星磁気圏の内因(自転に伴う磁気圏ダイナミクスおよび衛星火山活動)・外因(太陽風)それぞれの変動に対するオーロラ降り込み電子および磁気圏環境の応答を明らかにした。また、オーロラ・スペクトルのH/H₂比情報を用いた低エネルギー電子降り込みの解析を、土星に加えて木星にも適用し、惑星間の比較・考察を行った。

研究成果の概要(英文)：This study defined a new auroral intensity ratio according to the wavelength range of Hisaki space telescope and we developed a method deriving auroral electron density, flux, and magnetospheric parameters from the observation. We evaluated the method by comparing them with observations using the Hubble space telescope. Applying this method, we found the characteristic time variations of Jupiter aurora and magnetospheric plasma responding to the inner-driven (i.e., Jupiter rotation and Io volcanic activity) and outer-driven (i.e., solar wind) variations. We applied H/H₂ intensity ratio which is sensitive to the low-energy aurora electron to the Jupiter aurora and discussed similarity and difference compared to the Saturn aurora.

研究分野：惑星超高層・電磁圏物理

キーワード：オーロラ 木星 土星 電子加速 磁気圏 ひさき宇宙望遠鏡 ハッブル宇宙望遠鏡

1. 研究開始当初の背景

オーロラは、領域間の運動量・エネルギー輸送過程を反映し、大規模な大気電離・加熱をもたらす、惑星超高層環境における重要現象である。さまざま時間・空間スケールのオーロラ発光変動がとらえられてきた。ハッブル宇宙望遠鏡をはじめとする撮像観測は、オーロラ構造を調べることができるが、観測が断続的で時間変化をモニターするのに制約がある。他方、JAXA 惑星望遠鏡衛星「ひさき」による数か月にわたる継続的な木星極域積算オーロラ観測から、大きな強度変化が捉えられている。しかし、その強度変化の起源やメカニズムは不明である。

土星ではオーロラ電子エネルギーが低いために、広く用いられる紫外発光のメタン吸収帯によるオーロラ電子エネルギー推定法は、常に有効な手法ではない。それに対し、申請者は、低エネルギー (<20 keV) に感度のある H/H₂ 発光比を土星オーロラに適用してエネルギー-フラックス関係を求め、オーロラ電子加速の特徴を抽出した。

2. 研究の目的

相異なる環境を持つ惑星電磁圏ダイナミクスを比較し統括した理解を図る全体構想の中で、本研究は、

- (i) オーロラ電子エネルギー-フラックス関係の、オーロラ空間構造ごとの特徴解明
- (ii) 木星オーロラ発光強度変動時のエネルギー-フラックス関係の時間変化と変動要因の同定
- (iii) 木星における低エネルギーオーロラ電子の特徴解明と土星との比較を目的に研究を行った。

3. 研究の方法

(1) ハッブル宇宙望遠鏡(HST)データの解析
 オーロラ電子エネルギーを、メタンによる H₂ 紫外光吸収断面積が異なる波長帯の比 (Color Ratio = CR) を指標に求める [e.g., Gérard et al., 2003JGR]。スペクトル観測前後の撮像観測を参考にしてオーロラ空間構造(メインオーバル、高緯度)ごとに分けて、CR(エネルギー)-長波長発光強度(フラックス)関係を導出した。ひさきの観測開始に合わせて、研究代表者らが提案し観測した2014年1月上旬の観測データを解析に用いた。
 低エネルギーに感度がある H/H₂ 発光強度比について、HST による木星オーロラのスペクトル観測から導出する。H(Lyman-)発光は、地球や木星の背景光も同時に含まれるため、木星の中低緯度とリム外縁を補間して観測値から差し引くことで、オーロラによる発光強度を導出した。土星オーロラについては、Tao et al. [2014]の結果を参照した。

(2) ひさき宇宙望遠鏡のデータ解析

HST と同様に、メタン紫外光吸収を指標にオーロラ電子エネルギーを求める。ひさき/EXCEED の波長範囲・特性から、126.3-130 nm と 138.5-144.8 nm の発光強度比(新 CR)を新たに用いた。138.5-144.8 nm 波長帯からエネルギーフラックスを求め、これらから、エネルギー-フラックス関係を得る。一般に使われるHSTのCR-エネルギー対応と整合するように、エネルギーと新CRを対応付けた。

時間変化の特徴調査として、HST と同時観測時期である(i)2013年12月-2014年1月 [e.g., Badman et al., 2016]と、イオ火山活動の違いを比較するために(ii)2013年から2015年5月、の解析を行った。十分な信号・ノイズ比を確保するため、10分積算値を用いた。

太陽風変動は、地球位置における観測太陽風を木星軌道まで伝搬させるモデル計算 [Tao et al. 2005]を参照した。イオ火山活動については、イオ周辺のプラズマ(イオ・プラズマ・トーラス)発光のひさきによる観測や地上観測を参照した。

4. 研究成果

(1) オーロラ空間構造ごとの特徴解析

オーロラ画像とスペクトルスリット上の発光強度分布の一例を図 1a と図 1b に示す。14 軌道のスペクトル解析から得られた発光強度(フラックス)と CR(エネルギー)の関係(図 1c)から、各オーロラ構造は比例関係を示す。メインオーロラのディスク側の相関よりも、リム側のメインオーロラはエネルギーが低い傾向にある。他方、極域発光はエネルギーが高いものが多いが、エネルギーが低い観測点もみられた。空間積算した観測量は、各領域の平均的な値をとるために変化が小さくなり、ひさきの観測誤差に対して優位にオーロラ構造を区別するのが困難であることが結論付けられた [Tao et al., 2016a]。

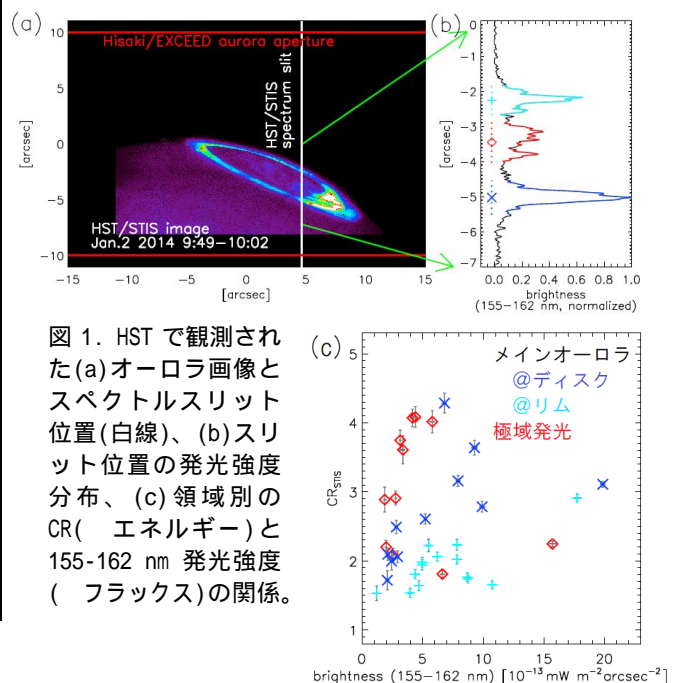


図 1. HST で観測された(a)オーロラ画像とスペクトルスリット位置(白線)、(b)スリット位置の発光強度分布、(c)領域別のCR(エネルギー)と155-162 nm 発光強度(フラックス)の関係。

(2) オーロラ発光変動要因の同定

2014年1月にひさきで観測されたオーロラ発光強度と導出した物理量および太陽風変化の時間変化を図2に示す。数日にわたる増光を水色、1自転約10時間よりも短い増光をオレンジ色で示す。前者は太陽風の動圧増大(図2f)と非常に高い相関を示し、太陽風動圧によって引き起こされたものと示唆される。他方、後者の短期間増光は、太陽風が静穏な時期にもみられる。

CR およびそこから換算したエネルギーは、増光時にあまり変化を示さない(図2b)。他方、オーロラ降り込み電子フラックスは、大きく変化し(図2d)、発光強度変化(図2a, 2c)を引き起こしていることが示された。Knight 加速理論を適用して見積もられる磁気圏側の起源の電流値も、発光強度増大時に増大していることが示唆された(図2e)。太陽風と関連する数日の増光と関連しない短期増光とで、時間スケール以外には、これらの物理量の特徴に違いが見られなかった。

この磁気圏電流の増大の要因を説明する2つのメカニズム、磁気圏ダイナミクスに伴う断熱的加熱効果およびオーロラ発光位置変化のモデルを、定量的に議論した[Tao et al., 2016b]。

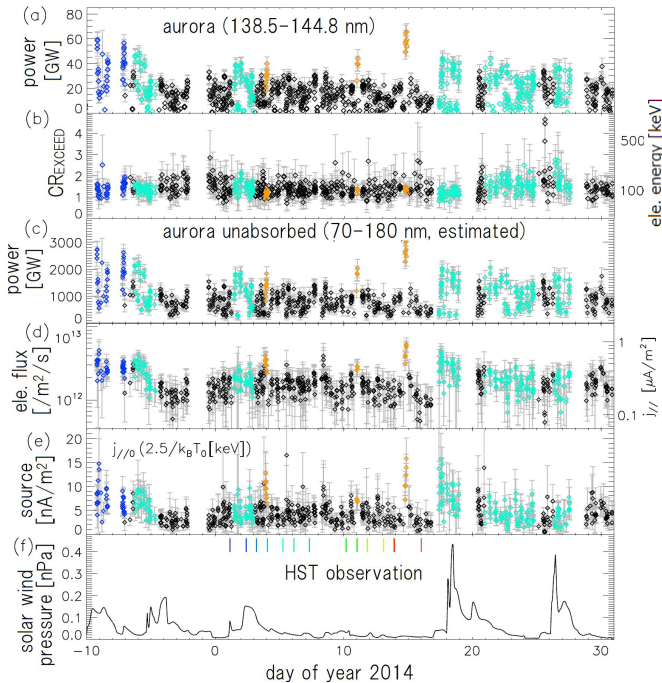


図2. ひさきで観測された、2014年1月の木星北極域の(a)オーロラ発光強度、(b)CR(オーロラ電子エネルギー)、(c)全波長域のオーロラ発光強度換算値、(d)オーロラ電子フラックス、(e)磁気圏起源電流、(f)太陽風動圧の時間変化。数日にわたる長期発光強度増大を水色、1自転(約10時間)未満の増光をオレンジ色で示す。

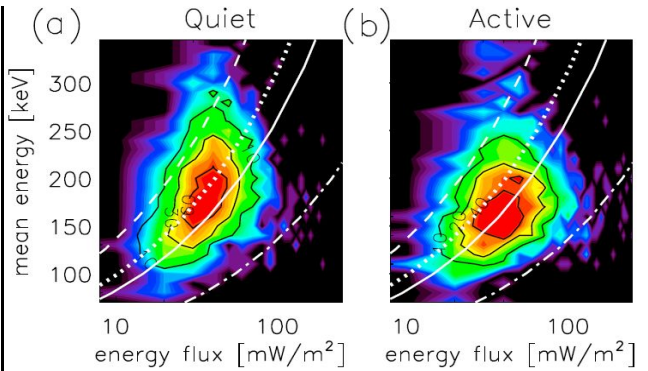


図3. オーロラ電子のエネルギーフラックスとエネルギーの関係、多く観測されたところを暖色で示す。白線は、異なる磁気圏プラズマ条件下のオーロラ電子加速理論の関係式を示す。静穏時(a)は白色点線(磁気圏の電子 2.5 keV, 0.0019/cc)がもっとも近いのに比べて、2015年1月の衛星イオ火山活発時(b)は、白色実線(2.5 keV, 0.0027/cc)に近くなった。

2015年1月に衛星イオの火山活動が活発になった。その時には発光強度が非常に大きい短時間増光が見られ、2014年の増光現象と同様に、非常に大きな電子数フラックス増大によるものであった。他方、オーロラ電子エネルギーは期間を通して30%ほど小さくなった。オーロラ電子のエネルギーとフラックスの関係式を、図3に示す。オーロラ電子加速理論と比較すると、火山活動が活発になった時には、オーロラ電子の起源である磁気圏の数keVのプラズマが優位に増大したことが示された。オーロラ活動および中間磁気圏もイオ火山活動に応じて変化することを直接的に初めて示した[Tao et al., 2018]。

(3) 低エネルギーオーロラ電子降り込みの木星・土星比較

H/H₂ 発光強度からオーロラモデルを用いてオーロラ電子のエネルギーおよびフラックスを導出した(図4a)。低エネルギー電子に感度があるH/H₂発光強度比と、>20 keVのエネルギー電子に感度があるH₂発光強度比との相関ははっきりしなかった。エネルギー・フラックス関係式について、エネルギー増大と共にフラックスが減少する特徴が見られた。土星オーロラのエネルギー・フラックス関係(図4b)が、低エネルギー(<数keV)ではエネルギーが増大するとフラックスが減少し、高エネルギー(>数keV)ではエネルギーが増大するとフラックスが増大することの相違について、起源となる磁気圏のプラズマの温度・密度の違いや、この手法がカバーするエネルギー帯の違いとの関連性を考察した[Tao et al., 2017]。

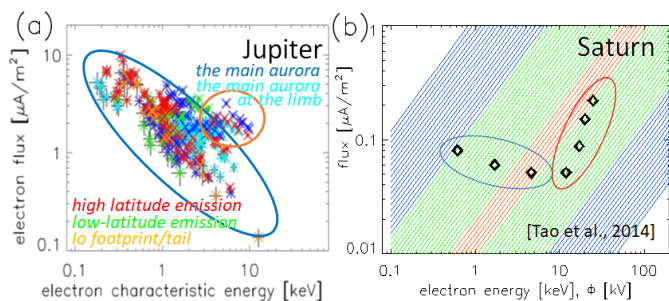


図4. (a)木星と(b)土星の電子エネルギー-フラックス関係。木星の×印は観測された値、土星の印は観測平均値を示す。

5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

[雑誌論文](計25件)

[1] Tao, C., T. Kimura, F. Tsuchiya, G. Murakami, K. Yoshioka, A. Yamazaki, S. V. Badman, H. Misawa, H. Kita, Y. Kasaba, I. Yoshikawa, and M. Fujimoto (2018), Variation of Jupiter's aurora observed by Hisaki/EXCEED: 3. Volcanic control of Jupiter's aurora, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 71-79, doi:10.1002/2017GL075814. [査読有]

[2] Tao, C., L. Lamy, R. Prangé, N. André, and S. V. Badman (2017), Auroral electron energy estimation using the H/H2 brightness ratio applied to Jupiter, in *Planetary Radio Emissions VIII*, edited by G. Fischer, G. Mann, M. Panchenko, and P. Zarka, Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 139-149. [査読有]

[3] Kimura, T., J. D. Nichols, R. L. Gray, C. Tao, G. Murakami, A. Yamazaki, S. V. Badman, F. Tsuchiya, K. Yoshioka, H. Kita, D. Grodent, G. Clark, I. Yoshikawa, and M. Fujimoto (2017), Transient brightening of Jupiter's aurora observed by the Hisaki satellite and Hubble Space Telescope during approach phase of the Juno spacecraft, *Geophys. Res. Lett.*, 44, doi:10.1002/2017GL072912. [査読有]

[4] Gray, R. L., S. V. Badman, E. E. Woodfield, and C. Tao (2017), Characterization of Jupiter's secondary auroral oval and its response to hot plasma injections, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 6415-6429, doi:10.1002/2017JA024214. [査読有]

[5] Badman, S. V., B. Bonfond, M. Fujimoto, R. L. Gray, Y. Kasaba, S. Kasahara, T. Kimura, H. Melin, J. D. Nichols, A. J. Steffl, C. Tao, F. Tsuchiya, A. Yamazaki,

M. Yoneda, I. Yoshikawa, and K. Yoshioka (2016), Weakening of Jupiter's main auroral emission during January 2014, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 988-997, doi:10.1002/2015GL067366. [査読有]

[6] Tao, C., T. Kimura, S. V. Badman, N. André, F. Tsuchiya, G. Murakami, K. Yoshioka, I. Yoshikawa, A. Yamazaki, and M. Fujimoto (2016b), Variation of Jupiter's Aurora Observed by Hisaki/EXCEED: 2. Estimations of Auroral Parameters and Magnetospheric Dynamics, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 4055-4071, doi:10.1002/2015JA021272. [査読有]

[7] Tao, C., T. Kimura, S. V. Badman, G. Murakami, K. Yoshioka, F. Tsuchiya, N. André, I. Yoshikawa, A. Yamazaki, D. Shiota, H. Tadokoro, and M. Fujimoto (2016a), Variation of Jupiter's Aurora Observed by Hisaki/EXCEED: 1. Observed Characteristics of Auroral Electron Energies, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 4041-4054, doi:10.1002/2015JA021271. [査読有]

[学会発表](計35件)

[図書](計0件)

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

埜 千尋 (Chihiro Tao)

東北大学・理学研究科・客員研究者

研究者番号: 80552562