小特集

# 「あけぼの」衛星の四半世紀にわたる観測で 明かされたジオスペースの姿と将来展望

Picture of Geospace Revealed by a Quarter of a Century of Observation of the Akebono (EXOS-D) Satellite and Future Perspective

1.「あけぼの」衛星の26年間のミッションの サマリと関連分野への貢献

# 1. Summary of the Akebono (EXOS-D) Satellite 26-Years Operation and Contribution to the Related Research Field

松 岡 彩 子, 三 好 由 純<sup>1)</sup>, 加 藤 雄 人<sup>2)</sup> MATSUOKA Ayako, MIYOSHI Yoshizumi<sup>1)</sup> and KATOH Yuto<sup>2)</sup> 京都大学大学院理学研究科,<sup>1)</sup>名古屋大学宇宙地球環境研究所,<sup>2)</sup>東北大学大学院理学研究科 (原稿受付:2022年7月25日)

#### 1.1 「あけぼの」衛星について

科学衛星「あけぼの」は、オーロラを光らせるプラズマ の加速機構解明を主目的として、1989年(平成元年)2月 22日に当時の文部省宇宙科学研究所によって打ち上げられ た衛星である[1].「あけぼの」衛星の運用停止から7年が 経過しようとしているが、その成果は「あらせ」衛星(放 射線帯・ジオスペースの探査)など後続の衛星ミッション や、FACTORS(オーロラの動的描像、イオンアウトフ ロー)等の将来計画の検討に大きな影響を与えている. 「あけぼの」衛星による研究成果の意義と、本小特集のねら いについて述べる.

「あけぼの」衛星が打ち上げられた頃、オーロラ現象を説 明する筋書きは、それ以前に比べれば明快に描かれるよう になりつつあった.太陽からのプラズマの流れである太陽 風を源とするエネルギーが、磁気圏に侵入して地表上 100 km近辺の極域電離圏に流入し、オーロラ現象を起こす ものと推論されていた.一つには、地球磁気圏尾部の磁気 再結合過程により相当量のプラズマが爆発的に地球方向に 輸送される事に起因すると考えられ、そしてもう一つに は、地球磁気圏におけるプラズマ対流による発電効果に起 因すると考えられた.これら二つの作用は、いずれも高エ ネルギー粒子や電磁場として磁力線を介し、オーロラが現 れる極域電離圏に伝わる.一方、オーロラと同時に現れる プラズマ波動や、オーロラに伴って観測されるプラズマ粒 子の描像から、磁気圏規模の要因だけでなく、地球のごく 近傍、地上数千 km に局所的な粒子の加速域が消長し、 オーロラを発生させていることが示唆されるようになっ た.しかし、「あけぼの」衛星が計画された頃は、オーロラ の要因の物理的な解釈を試みても、それを正しく描くため の実測データが不足していた.「あけぼの」衛星は、オー ロラ粒子加速域を直接精密に観測し、オーロラが発生する



図1 「あけぼの」衛星外観.

Graduate School of Science, Kyoto University

corresponding author's e-mail: matsuoka@kugi.kyoto-u.ac.jp

物理機構を解明するために計画された.

オーロラ粒子加速域は南北極域における数千 km の高度 に出現すると考えられたため、「あけぼの」衛星は遠地点 10500km、近地点270km、軌道傾斜角75度の、準極軌道に 投入された.「あけぼの」衛星は放射線帯を通過する軌道 をとっていたにもかかわらず、運用を停止するまでの26年 間、システム機器は通常運用を行うために必要な性能を維 持し、また搭載された9種の観測機器のうち3種は科学成 果を出すための性能を保って計測を継続した.一方で観測 機器の多くが放射線劣化により観測を停止し、近年打ち上 げられた衛星を凌ぐ一級の科学的成果を出すことが難しく なったこと、衛星の電源系機器の劣化や高度の低下により 十分な観測データが取得できなくなったことに伴い、2015 年4月に運用を終了した.

黒点数で代表される太陽の活動度は、11年の周期で増減 することが知られている.またこの活動度に関連し、太陽 の大規模磁場の極性の反転は22年周期で起こる.「あけぼ の」衛星の観測対象である地球の磁気圏は、太陽風の磁場、 密度、速度、擾乱などに影響を受け、太陽の活動度に大き く依存して様相を変える.「あけぼの」衛星が打ち上げら れた1989年、その11年後の2000年に太陽活動は極大期を迎 えたが、その次の極大期は遅れ2014年初頭となり、太陽の 活動度の2周期、太陽の大規模磁場反転の1周期に25年を 要した.しかし、「あけぼの」衛星はそれを超える26年2 か月の長期にわたって観測を継続し、太陽の大規模磁場反 転周期の完全なカバーを達成した.すなわち、あらゆる太 陽の局面に対する磁気圏の観測の完結という、重要な仕事 を成し遂げた.

#### 1.2 「あけぼの」衛星による科学観測

「あけぼの」衛星に課せられた主要課題は、オーロラ粒子 加速領域を直接かつ総合的に観測することにより、オーロ ラ粒子を加速する電磁的な物理機構を明らかにし、オーロ ラ粒子の加速域が出現する条件を特定することであった. このために、「あけぼの」衛星にはプラズマ、磁場、電場、 波動を観測する機器と、オーロラ撮像カメラの計9種の科

#### 学観測機器が搭載された.

「あけぼの」衛星に搭載された科学観測機器の一覧を 表1に示す.低エネルギー粒子計測装置 (LEP)[2]や低エ ネルギーイオン組成計測装置 (SMS) [3] により、オーロラ 粒子のエネルギー分布、加速されるイオンの種類、磁力線 に対するピッチ角分布の解析が行われた.オーロラ粒子加 速域の沿磁力線電流の分布と変化が磁場計測装置 (MGF) [4]により、電場構造の分布と変化が電場計測装置(EFD) [5]により観測された.オーロラ現象に伴うプラズマ波動 はプラズマ波動計測装置 (PWS, VLF) [6,7] により捉えら れ、オーロラ粒子との相互作用が研究された. 「あけぼの」 衛星は点における観測のみならず、オーロラ撮像装置 (ATV)[8]によりオーロラの2次元画像を取得した. 電子 温度計測装置(TED)[9]は、オーロラ粒子加速域の背景の 電子温度を測定する目的で搭載された. 放射線モニター (RDM) は元来は衛星に対する放射線の影響を調査するた めに搭載された機器であったが、取得したデータは磁気嵐 で変動する地球放射線帯の姿を明らかにした.

#### **1.3** 「あけぼの」衛星の科学成果

「あけぼの」衛星の観測によって、オーロラ粒子加速の 様相は強い季節依存性を持ち、その下部の電離圏における 太陽光照射量が大きく影響することが発見された.「あけ ぼの」衛星が打ち上げられた直後の1990年代には、時間分 解能の向上した観測によって、オーロラを発光させる高エ ネルギー電子(オーロラ電子)の詳細な時間変化や空間変 化が明らかになり、オーロラ現象への理解が飛躍的に進ん だ.オーロラ現象は、局所的であることや時間変化が速い ことから、これらの衛星による研究は「イベント観測」に よるものが主であった.一方で「あけぼの」衛星は太陽の 活動周期である11年を超えてオーロラ現象に関連するデー タを取得したことにより、太陽活動や地磁気活動への依 存、季節による違いを初めて示すことができた.オーロラ 電子の生成機構について、多くのデータを使った統計に裏 打ちされた、普遍的結論を導くことに成功した.

「あけぼの」衛星の科学成果は、地球極域のオーロラ現象

機器名		観測対象とレンジ	観測ターゲット
磁場計測装置	MGF	DC~低周波磁場	オーロラ現象に伴う沿磁力線電流, ULF/
			ELF 波動
電場計測装置	EFD	DC~低周波電場	オーロラ粒子加速電場
低周波プラズマ波動計測装置	VLF	数 Hz~10 kHz 磁場・電場	オーロラ現象や低緯度磁気圏におけるプラ
			△×仮剄
高周波プラズマ波動計測装置	PWS	20 kHz~5 MHz 磁場・電場・サウンダー	オーロラキロメートル放射およびプラズマ
			圏,サウンダーによるプラズマ温度計測
低エネルギー粒子計測装置	LEP	5 eV~24 keV 電子・6 eV~30 keV イオン	オーロラ加速粒子
低エネルギーイオン組成計測装置	SMS	~4 keV 熱的イオン・質量スペクトル	プラズマ組成、加速によって生じるコニッ
			クス,ビーム
電子温度計測装置	TED	電子温度(400~8000 K)	オーロラ加速域にける電子温度
放射線モニター	RDM	>0.3 MeV 電子,6.4-38 MeV プロトン,	放射線帯粒子モニター
		$15-45 \text{ MeV}\alpha$	
オーロラ撮像装置	ATV	UV 撮像(115-160 nm)・可視光撮像	オーロラ撮像 (UV, 可視)
		(557.7 nm)	

表1 「あけぼの」衛星に搭載された科学観測機器.

Special Topic Article 1. Summary of the Akebono (EXOS-D) Satellite 26-Years Operation and Contribution to the Related Research Field A. Matsuoka et al.

に留まらなかった.中低緯度に位置する放射線帯やプラズ マ圏のダイナミックな消長と,太陽風の変化との関連が明 らかにされた.放射線帯は,人工衛星や宇宙ステーション 等の安全性に大きな影響を及ぼすなど,人類が宇宙へと活 動領域を広げる上でも理解すべき領域である.「あけぼの」 衛星は,約3時間という比較的短い周期で放射線帯を緯度 方向に走査し,また,内帯からスロット領域を経て外帯に 至るまで,領域を欠くことなく放射線帯のデータを取得し た.26年間データを蓄積することによって,太陽活動や太 陽風条件と放射線帯との関係の理解が促進された.

加えて「あけぼの」衛星は、オーロラ帯や極冠域から磁 気圏への電離圏起源のイオン流出現象に関して、十分な解 析に耐えうる本格的観測データを初めて提供した. 太陽の 放射量の増大とともにイオンが多く流出されることが明確 に示された. この現象の研究は、惑星の大気進化の観点か らも重要である.

本小特集では、「あけぼの」衛星によって得られた科学 成果を、8名の方に解説いただいた.オーロラ現象に関連 する主要な成果として、オーロラ粒子加速研究(坂野井, 諸岡)およびオーロラキロメートル放射(AKR)(森岡)を あげた.また、オーロラと同じく極域現象の代表的な成果 として、前述した極域からのイオンアウトフロー(阿部, 北村)をあげた.更に、「あけぼの」衛星のミッション期間 の後半で大きな成果を出した、中低緯度領域であるプラズ マ圏(笠原・熊本)・放射線帯(三好)におけるプラズマ 現象をとりあげた.

#### 1.4 「あけぼの」衛星に続く計画

「あけぼの」衛星の成果を元にし、また「あけぼの」衛星 ではわからなかったことを明らかにするために、国内外で 新たな衛星ミッションが実施され、成果が出ている.

#### 1.4.1 オーロラ現象の観測

「あけぼの」衛星のデータを用いた研究によって、オーロ ラ現象の統計的描像や季節・太陽活動度への依存が明らか になった.一方で、オーロラを発光させる電子の分布関数 の速い時間変化や、オーロラの微細構造を明らかにするに は、「あけぼの」衛星の粒子観測の時間分解能や撮像の空 間分解能は不十分であった.1990年代に打ち上げられたス ウェーデンの FREJA 衛星や NASA の FAST 衛星では, 「あけぼの」衛星よりも1桁高い時間分解能で分布関数を 取得し,加速による電子の分布関数の時間変化を捉えて, 粒子加速のメカニズムの本質に更に迫る成果を上げた.更 に2005年に打ち上げられた「れいめい」衛星は,オーロラ 発光の3つの波長のカメラでオーロラの微細構造と共に, そのオーロラを光らせる電子の降り込みの速い時間変化を 観測した[10].

#### 1.4.2 放射線帯の観測

「あけぼの」衛星の放射線モニタは26年という長期にわ たり放射線帯の観測を行い、貴重なデータを蓄積して太陽 活動度や太陽風の条件に対する依存性の理解に大いに貢献 した. 放射線帯は一般的にはその過酷な環境のために観測 が難しく、まとまった期間観測した衛星は、長い間「あけ ぼの」衛星以外には存在しなかった.「あけぼの」衛星の 場合でも、放射線帯内では機器の劣化を防ぐために LEP や SMS は OFF する運用を行っていたため, 放射線帯生成 の物理メカニズムを研究するデータセットを取得すること はできなかった.近年の人工衛星の耐放射線技術の向上に より、放射線フラックスの強い領域におけるプラズマ及び 電磁場の総合観測が可能となってきた. 2012年に2機の衛 星から成る NASA の Van Allen Probes, 2016年12月20日に ジオスペース探査衛星 ERG (「あらせ」) が打ち上げら れ、低エネルギーから高エネルギーにわたる粒子観測と電 磁場総合観測から、放射線帯の生成メカニズムおよび内部 磁気圏に関する理解が更に進められた.「あらせ」衛星に よる科学成果は、6章で詳説いただいている.

#### 参考文献

- [1] H. Oya and K. Tsuruda, J. Geomag. Geoelectr. 42, 367 (1990).
- [2] T. Mukai et al., J.Geomag.Geoelectr. 42, 479 (1990).
- [3] B. A. Whalen et al., J.Geomag.Geoelectr. 42, 511 (1990).
- [4] H. Fukunishi et al., J.Geomag.Geoelectr. 42, 385 (1990).
- [5] H. Hayakawa et al., J.Geomag.Geoelectr. 42, 371 (1990).
- [6] H. Oya *et al.*, J.Geomag.Geoelectr. **42**, 411 (1990).
- [7] I. Kimura et al., J.Geomag.Geoelectr. 42, 459 (1990).
- [8] T. Oguti et al., J.Geomag.Geoelectr. 42, 555 (1990).
- [9] T. Abe *et al.*, J.Geomag.Geoelectr. **42**, 537 (1990).
- [10] Y. Obuchi et al., Earth Planet Sp. 60, 827 (2008).

# ● ● 小特集 「あけぼの」衛星の四半世紀にわたる観測で明かされたジオスペースの姿と将来展望

# 2. 「あけぼの」で観測されたオーロラ加速機構

## 2. Auroral Acceleration Processes Observed with Akebono

坂野井健,諸岡倫子<sup>1)</sup> SAKANOI Takeshi and MOROOKA Michiko<sup>1)</sup>

東北大学大学院理学研究科,<sup>1)</sup>スウェーデン国立宇宙プラズマ研究所

(原稿受付:2022年8月9日)

オーロラはその発光プロセスのみならず、太陽・惑星間空間プラズマダイナミクスの観点から多くの研究が なされてきた.この中心課題の一つは、高度数千kmの沿磁力線電場領域におけるプラズマ加速過程の解明であ る.沿磁力線加速領域は、磁気圏で生成されたエネルギーが、プラズマ不安定や波動粒子相互作用により様々な スケールに変換し、最終的に電離圏・熱圏で散逸する過程におけるキー領域である.これらの現象の解明は、 オーロラ現象の微細構造の研究のみならず、宇宙プラズマ輸送・エネルギー散逸の普遍的な理解に繋がる.「あ けぼの」の特徴はこの加速領域を通過する軌道にあり、磁場、電場、波動、粒子等の9つの機器による総合観測 をその場観測で実施した.また26年間の連続観測から、オーロラ現象の季節・太陽活動依存性等を明らかにした. これらの研究は、その後に続く国内外の衛星や地上観測に多大な影響を与えた.「あげぼの」によって明らかに されたオーロラ加速域の課題は多くが未解決であり、将来のより高空間・高時間・多点観測ミッションによって 解明するべき課題である.

#### Keywords:

aurora, particle acceleration, field-aligned current, seasonal effect, ionosphere, energy transfer, instability

#### 2.1 はじめに

極域で見られるオーロラは磁気圏から降下する荷電粒子 (プラズマ)の衝突により地球上層 120 km 高度付近の大気 分子が励起されて発光する現象である.大気分子の励起を 引き起こす荷電粒子は、様々なプロセスによって地球磁力 線と惑星間空間磁場が繋がることによって太陽風から流入 する.19世紀にノルウェーの物理学者クリスチャン・ビル ケランドがコイル磁場を入れた電球を地球に見たてた装置 テレラによる実験を示し、1950年代に実施された国際的な 共同多点観測「国際地球観測年(IGY)」で、オーロラの地 球規模的時間空間変化が明らかになった.

その後ロケットや衛星による観測によって、オーロラが 地球磁極を中心に環状に現れることが明らかになり、オー ロラ発生に伴ってオーロラ粒子と呼ばれる高エネルギー電 子が大気に降り込むことや宇宙空間磁場および電場が変化 するといった新たなプラズマの特徴が明らかになった.更 にオーロラ粒子の源は太陽風と呼ばれる太陽から放出され る高温プラズマであり、今日ではオーロラ現象の全てを理 解するには、活発な太陽大気を発端として惑星間空間、地 球磁気圏、そして地球大気のプラズマダイナミクスとその 相互作用を説明しなければならないことがわかっている.

オーロラ上空高度数千 km までに存在する沿磁力線電場 による粒子加速は、その惑星空間規模のプラズマプロセス の中で太陽風粒子がオーロラを光らせる過程において最重 要かつ最終プロセスである.

1960年代以降のロケット搭載プラズマ粒子観測によっ て、オーロラ粒子は数keVのエネルギーにピークをもつ電 子ビームであることが解った.これは、電子が磁力線上向 き方向の準静電場により加速されていることを示している [1]. その後、より高高度の衛星観測により、オーロラ粒子 加速領域の研究は大きく進んだ. アメリカのダイナミック エクスプローラー (DE) 衛星は、二機の衛星により異なる 高度でほぼ同時観測し、粒子のエネルギー分布を比べるこ とで、粒子加速領域はオーロラ上空の高度数千 km 付近に 存在することを突き止めた[2]. しかし最大の謎は、プラ ズマ密度が低くほぼ無衝突状態にあるオーロラ上空の宇宙 空間でどの様に定常電場が発生することができるかであっ た. 1989年に観測を開始した「あけぼの」衛星はオーロラ 粒子加速電場領域をその場観測できる軌道にあって、搭載 された9種の観測器で加速電場発生メカニズムの解明をめ ざした.オーロラ発生機構の解明を目的とした国内外の科 学衛星はこれまでに10機以上も存在したが、「あけぼの」 衛星は特に長期間運用したことによって、オーロラと太陽 活動周期との関係を継続的な観測を可能にしたことに特徴 がある.この長期データを活用して、オーロラ加速領域の 活動には顕著な季節変化が存在するなど、新たな事実が明 らかにされた[3]. この季節変化は、磁気圏ダイナミクス が太陽風ダイナミクスに依存するだけでなく、それに対す

Tohoku University

corresonding author's e-mail: tsakanoi@tohoku.ac.jp

る電離圏の応答も重要な役割を担っていることを示唆す る.

#### 2.2 オーロラ粒子加速電場と沿磁力線電流

従来の地上光学・磁場観測から、サブストームに代表される活発なオーロラが発生する期間には、磁気圏と電離圏の間で磁力線に沿った大規模な電流系が形成されることがすでに知られていた、オーロラは主に降下電子、すなわち上向き沿磁力線電流に対応しており、上空では閉じた磁力線領域である磁気圏プラズマシートに共役する.この際に、沿磁力線電流  $(J_{\parallel})$  と沿磁力線電位差  $(V_{\parallel})$ の関係はオームの法則に似た(1)式の比例関係があることが理論的にも観測的にも知られている.この関係はKnightの関係式と呼ばれ、次の式で表される[4].

$$J_{\parallel} \approx \sqrt{\frac{N_{\rm M} e^2}{2\pi m_{\rm e} T_{\rm M}}} V_{\parallel} = K V_{\parallel} \tag{(1)}$$

ここで, N<sub>M</sub>, T<sub>M</sub> は質量 m<sub>e</sub> の磁気圏電子の密度と温度,比 例定数K は磁気圏電子の温度や密度で決定される電気伝導 度である.すなわち,沿磁力線加速電場により,低プラズ マ密度状態でもより多くの沿磁力線電流を流すことができ ることから,加速領域は磁気圏 - 電離圏結合系に重要な役 割を果たしている.この関係式の検証は「あけぼの」磁場 と粒子観測データ解析により行われた[5,6].図1に沿磁 力線加速領域中のプラズマ,磁場の計測データならびに磁 場データから導出された沿磁力線電流の観測例を示す.電 子とイオンの Energy-time spectrogram に見られるピーク エネルギーから,それぞれ衛星より高高度と低高度の沿磁 力線電位差を調べた.この二つの電位差の合計と沿磁力線



図1 「あけぼの」衛星による沿磁力線加速領域の観測例.上から 電子エネルギー分布、電子ピッチ各分布、イオンエネル ギー分布、イオンピッチ各分布、磁場東西方向の変動成分、 磁場から見積もられた沿磁力線電流(上向きが正)[8].

電流を比較したところ,概ね(1)式の比例関係は成立する ことが実証された.一方で,沿磁力線加速領域の南北の端 付近では(1)式は成り立たず,沿磁力線電流のほうが増強 しているケースがしばしばあった.この事実は,加速領域 の端付近では別な物理プロセスが存在していることを示唆 する.これは空間スケール10km以下の現象であり,「あ けぼの」衛星のスピン周期平均データでは分解困難であっ たが,その後の「れいめい」衛星やFAST 衛星などの高時 間・高空間分解能を有する衛星における重要な研究テーマ となった.

#### 2.3 オーロラ粒子加速領域の季節変化

初めに述べた様に、オーロラ研究に於いて「あけぼの」 衛星データのユニークな点は、太陽活動周期を上回る長期 観測がオーロラ活動の太陽周期変化や季節依存性の検証を 可能にしたことにある.太陽放射量は太陽活動により変化 し、地球電離圏の電離度を変化させる.1990年頃から、 オーロラ活動の長期変化を調べる研究が注目され、オーロ ラ領域のすぐ上を低高度で観測する DMSP 衛星の粒子観 測はオーロラ粒子加速が夏半球より冬半球でより活発なこ とかを示した[7].「あけぼの」でも加速領域の季節依存性 の研究が進められ、加速領域発生高度の季節依存性が新た に明らかになった[8,9].

図2は、「あけぼの」衛星の粒子観測で得られた下向き に加速された電子の発生頻度を、高度別、季節別に示して いる.図が示すのは加速エネルギーが2keV以上の場合の みで、準静電沿磁力線電場によって発生するカーテン状で 形が明瞭なディスクリートオーロラの性質に相当する.こ れら比較的エネルギーの高い粒子加速は真夜中より少し前 (21地方時頃)で活発であることがわかる.このうち,左側 に示した夏半球における電子加速の発生頻度に高度変化は なく. つまり電子はすべての高度で既に加速されているの で,加速領域は高高度にあることが示唆される.それに 対して右側の冬半球では 6000 km 以下の低高度のみで発 生頻度が上がっており, すなわち粒子加速は高度 6000-8000 km の高度で起きていることになる. この様に 冬半球で加速領域がより低高度に現れるのは、電離圏密度 の変化によって磁力線に沿ったプラズマ密度の高度分布の 変化により、加速電場発生の条件を満たす高度が夏と冬と では変わるためと考えられる.実際,加速領域のプラズマ のスケールハイトは冬側でより小さくなることが示されて おり[10],冬に加速領域が低高度に現れるという結果と整 合的である.一方でオーロラは昼間側にも存在し、これら は比較的エネルギーの低い(数百eVから1keV程度)降下 粒子によって励起される.この昼間側のオーロラ粒子加速 領域の発生頻度は、夜側のオーロラとは逆に夏の方が高い 結果を示した.

オーロラ電流システムの性質は、ディスクリートオーロ ラに対応する領域では電離層電気伝導度にほぼ比例した電 流密度が観測されている[11].一方,昼間側でよく生じる 緯度方向の空間スケールが小さな(<100 km)沿磁力線電 流の電流密度の季節依存性はない[11,12].これらの結果



図2 「あけぼの」衛星粒子観測器で得られたオーロラ電子の加速分布.パネルは季節別(右/冬半球,左/夏半球),高度別(上から,高度8000 km以上,6000-8000 km,6000 km以下)の統計.冬半球では加速領域がおもに低高度(6000 km以下)のみ見えていることから,加速領域は低高度にあると期待される.一方夏半球では高度変化はなく,加速領域は8000 km以上の高高度に存在すると確認できる[8].

を「あけぼの」の沿磁力線電場の結果とKnightの式(1)に 照らし合わせると,昼間側と夜側のオーロラ粒子加速の季 節変化の性質の違いは,それぞれの起源となるダイナミク スの違いで説明できる.夜側の電流システムは,磁気圏尾 部で駆動された電場 ( $V_{\parallel}$ 一定,電場駆動型)が地球電離層 上空にアルフベン波として伝播し,電離層伝導度に応じた 電流を発生させる.それに対して昼間側では太陽風と磁気 圏の境界において電流で生じ ( $J_{\parallel}$ 一定,電流駆動型),電離 層電気伝導度に応じた沿磁力線電場を発生させると考える と辻褄が合う.これらの結果は,後に「あけぼの」で検証 された沿磁力線電流の季節変化の特徴ともよく一致してい る[13].

### 2.4 最近のオーロラ加速領域の研究成果

「あけぼの」による沿磁力線加速の理解は、その後の衛

星・地上によるオーロラ現象に大きな影響を与えている. 特に地上からの光学望遠観測により100mスケールのオー ロラ微細構造の存在が報告[14]されたが、その微細空間構 造は全ての加速メカニズムのモデルを用いても説明は不可 能であったため[15],これを発生させるプラズマ加速過程 への興味が集まった.オーロラ現象の構造スケールは,発 光などにみられる微細構造(100 m~数 km),降下電子の 逆V構造に代表される中規模構造(10 km~100 km), サブ ストームなどのグローバルな磁気圏-電離圏結合があり, それぞれ様々な時間スケールで相互作用(クロススケール カップリング)がある.近年,沿磁力線加速領域における クロススケールカップリング, すなわちとあるスケールで 発生した現象が、異なるスケールに変化しながらエネル ギー散逸する過程が注目されている. 1996年に打ち上げら れた FAST 衛星では, 高度数千 km の加速領域中の電磁場 とプラズマ粒子等の高時間・高空間分解観測がなされ [16], 準静電加速領域の原因としてダブルレイヤーの特徴 が明らかになった.また,磁気圏の高温・低密度プラズマ と電離圏の低温・高密度プラズマの混合より生じるダブル レイヤーのシミュレーションによる検証が進んだ[17].加 えて、オーロラ微細空間構造と速い時間変動については、 慣性アルフベン波が重要な役割を果たしていることが明ら かになった[18].

2005年に打ち上げられた「れいめい」衛星は極域低高度 (~650 km)を飛翔する小型科学探査衛星であり、世界初 の高空間・高時間分解能によるオーロラ粒子・発光の同時 観測成果をもたらした.「れいめい」搭載光学カメラは, 窒素分子イオン 427.8 nm 発光,酸素原子 557.7 nm 発光,窒 素分子670 nm発光の3波長を同時に観測することができ、 空間分解能は~1 km,時間分解能は8 frame/se であった [19]. また、電子とイオンのエネルギー静電分析器により 12 eV~12 keV のプラズマ粒子を 300 m の空間分解能で計 測した[20]. 図3に「れいめい」により観測されたオーロ ラ加速域の画像・電子同時観測例を示す[21,22]. この例 では、南北方向約100kmの逆V構造降下電子に対応して オーロラ発光が観測された. この逆 V 構造の高緯度側半分 の領域でピークエネルギーの微細変動が見られ、これに 伴って慣性アルフベン波加速により生じたと推定される~ 1 keV 以下に分散構造を持つ低エネルギー電子が観測され た. この時の670 nm オーロラは、アークに沿ったシアーな 流れを伴う微細構造を持っていた.また図3中段に示すよ うに、降下電子フラックスは、2-3kmの微細構造まで オーロラ発光とよく一致した.一方,図3下段に示した とおり100eV以下の電子フラックスは微細構造が見ら れる時間帯(09:10:46-51UT)に加えて、逆V構造の両端 (09:10:44 UT ならびに 09:111:00 UT) 付近に局在することが 明らかになった.これは微細構造ならびに逆 V 構造の両端 で慣性アルフベン波による低エネルギー電子加速が存在す ることを示唆する.

また,高度数千 km の加速領域中のシアー不安定の存在 も明らかになりつつある.図4は「れいめい」により観測 された微細なオーロラ発光のシアー運動と逆V型降下電子



図3 「れいめい」衛星により2005年12月26日に観測された微細 オーロラ構造の例.上から670 nmオーロラ発光画像(矢印 は衛星フットプリントの軌跡),下向き電子エネルギー分 布,全エネルギーフラックス(黒線)とフットプリントに おける670 nm オーロラ発光強度(青線),最下部は全エネ ルギーと低エネルギー(100 eV 以下)毎の上向きと下向き の電子エネルギーフラックス[21,22].

との関係である[23].この例では,数keV以上のピークエ ネルギーを持つ二つの逆 V 型降下電子が見られ,その低エ ネルギー側(1keV以下)にアルフベン波により加速され た速度分散構造をもつ低エネルギー電子が存在する.沿磁 力線加速域に対応して高度数千kmではU字電位差構造が 存在するが,ここでは磁力線直交方向の収束電場 E と地球 磁場 BのE×Bドリフトによりシアー流が生成される.こ れによりシアー不安定が成長してシアー流(平均流)から 慣性アルフベン波が励起されうることか示された.この慣 性アルフベン波により,速度分散を持つ低エネルギー降下 電子の加速が生成されること,また同時に元々の数keV 高エネルギー電子に変調が与えられた結果,オーロラ微細 構造が形成されうることが示唆された.

さらに、「れいめい」観測により観測されたオーロラ連 続画像データを用いて $\Omega_{\parallel}$ 、オーロラ2次元運動の渦度( $\omega$ ) と空間波数( $k^+$ )を見積もった[24,25].ここでオーロラ 発光の光学フローを、図4同様に沿磁力線加速領域の磁力 線直交方向電場と地球磁場によるE×Bドリフトによって 引き起こされると仮定し、アルフベン波加速と静電加速の それぞれについて渦度の空間スペクトルが推測した.この 結果を図5に示す、図5上段は「れいめい」電子データに



図4 「れいめい」衛星により2006年1月3日に観測されたシ アー流をもつオーロラ発光と同時の電子エネルギー分布 [23].

見られた速度分散構造から慣性アルフベン加速が卓越した と判定された時の結果で,空間スペクトル(赤点),ならび に慣性アルフベン波の分散関係式にFAST衛星の磁場観測 による磁場の空間スペクトル分布を適用して得られた理論 曲線 (数密度 n =0.1, 1, 10 / cm<sup>3</sup> の 3 つの場合) を示す. こ れから、アルフベンオーロラの空間スペクトルは、理論曲 線の傾きとよく一致することがわかった。一方、図5下段 は、「れいめい」データに逆 V 電子加速がみられた時の静 電加速の例で、オーロラ光学フロー解析から得られた空間 スペクトル (赤点) に対して, (1) 式と FAST 衛星観測磁 場スペクトルから理論推定された直線(k+2)が示されて いる.この図から,波数 $k^+ < 6 \times 10^{-4} (m^{-1})$ すなわち ~2kmよりも大きな空間構造においては、Knightの式か ら見積もられる傾きとオーロラ発光構造の空間スペクトル は一致することがわかる.これは~2kmよりも大きな空間 構造が静電加速で生成されることを示唆する.一方,これ よりも小さい構造では、観測された空間スペクトルは図6 上段に示されたアルフベン加速の傾きに漸近する. この結 果は, 逆 V 型静電加速領域においても, オーロラの小規模



図5 「れいめい」衛星により観測されたアルフベンオーロラ (上)と静電加速オーロラ(下)の空間スペクトル分布.詳 しくは本文参照のこと[24,25].

構造はアルフベン波加速により生じることを意味する.加速領域では、図4の例に示したシアー不安定以外にも様々な不安定によりアルフベン波が乱流的に発生することが提唱されている.この乱流のカスケードによって、電子加速のクロススケール結合が起こると考えられる.これを引き起こす不安定のメカニズムにはIonospheric Alfven resonator[26], Phase mixing[27], Ionospheric feedback instability[28], Tearing-mode instability[24]等が候補となっているが、具体的にどのメカニズムがどういう場合に支配的かは未解明である.この理解のためには、電子スケールの解明が可能な数値シミュレーションや、時空間変動分離が可能な編隊飛行衛星による新たな観測が必要である.

#### 2.5 惑星オーロラ

他天体においても、地球の様に固有の大気及び磁場が存 在すればオーロラが発生し得る.木星及び土星では,地球 の様にオーバル状の明るいオーロラ発光が存在することが 知られている[29]. 両惑星とも加速された電子の生成に 伴って発生すると考えられる電波放射が観測されているこ とから、オーロラ粒子加速電場も存在すると考えられる. しかしながら,太陽風動圧や自転速度の違いによる磁気圏 ダイナミクスの違い、更に惑星そのものと惑星磁場の大き さの違いからオーロラ現象の性質の違いも期待される.こ の事は2017年まで土星磁気圏を周回した Cassini 探査機や 2016年から木星周回軌道で観測を続けている JUNO 衛星の 観測により明らかになりつつある. 土星では加速領域で加 速されたイオンビームがCassini探査機で検出された [30]. しかし、地球より二倍ほど早い自転運動に支配され た磁気圏のダイナミクスは、太陽風の影響が強い地球の磁 気圏とは違う電離圏との相互作用を生み出している. Cassiniの観測では自転軸にほぼ対称に回転する磁気圏で あっても自転運動に季節変動があり,惑星電離圏が磁気圏

ダイナミクスに強い影響を与えている証拠であるとも考え られている.それに対して木星における JUNO の観測で は、オーロラ粒子のエネルギー分布の性質が逆 V 型定常電 場ではなくアルフベン加速的な加速が主であることがわ かった[31].木星オーロラ粒子加速領域ではアルフベン波 速度が光速にまで達し、加速される粒子も MeV 以上の高 エネルギーに達する.また、電離層の組成の違いや、磁気 圏内で新たなプラズマ源となる衛星の影響による磁気圏構 造の違いも、地球とは違ったオーロラの性質を与えると予 想される[32].2023年打ち上げ予定の JUICE 衛星には低 周波電場も捉える RPWI(プラズマ波動機器)が搭載され ており、JUNO 衛星では不可能な木星衛星イオの磁力線付 近やガニメデオーロラ領域で粒子加速に働くであろうアル フベン波を直接捉えることができると期待される.

固有磁場がほとんどない火星では、地球の様な極域にグ ローバルに分布するオーロラは確認されていない.しか し、近年の Mars Grobal Surveyer や MAVEN 衛星の観測か ら、地殻起源の局所的な磁場構造内で加速されたと考えら れる電子による紫外線領域の大気発光現象が確認されてい る[33].この現象がどの様な太陽風 – 磁気圏 – 電離圏ダイ ナミクスに関わっているかについて、今後の研究成果が待 たれる.

これらの惑星比較によりオーロラ粒子加速の理解が更に 深まることを期待したい.

#### 参考文献

- [1] C.E. McIlwain, J. G. Res. 65, 2727 (1960), doi:10.1029/JZ065 i009p02727.
- P.H. Reiff *et al.*, J. Geophys. Res. 93, 7441 (1988), doi:10.1029
  /JA093iA07p07441.
- [3] A. Kumamoto and H. Oya, Geophys. Res. Lett. 25, 2369 (1998).
- [4] S.Knight, Planet Space Sci. 21, 741 (1973), doi:10.1016/0032
  -0633(73)90093-7.
- [5] T. Nagatsuma *et al.*, J. Geophys. Res. 100, 1625 (1995), doi: 10.1029/94JA02440.
- [6] T. Sakanoi *et al.*, J. Geophys. Res. 100, 19343 (1995), doi: 10.1029/95JA01285.
- [7] P.T. Newell *et al.*, Nature 381, 766 (1996), doi:10.1038/ 381766a0.
- [8] M.W. Morooka and T.Mukai, J. Geophys. Res 108, 1306 (2003), doi:10.1029/2002JA009786.
- [9] A. Kumamoto *et al.*, J. Geophys. Res. **108**, 1032 (2003), doi: 10.1029/2002JA009522.
- [10] N. Kitamura *et al.*, J. Geophysi. Res. 114, A01206 (2009), doi:10.1029/2008JA013288.
- [11] R.Fujii and Iijima, J. Geophys. Res. Space Phys. 92, 4505 (1987).
- [12] J.F. Vickrey et al., Geophys. Res. Lett. 13, 495, (1986).
- [13] T. Hasunuma et al., J. Geophys. Res., 113, A12214-14 (2008), doi: 10.1029/2008JA013358.
- [14] J.E. Maggs and T.N. Davis, Planet. Space Sci. 16, 205 (1968).
- [15] J.E. Borovsky, J. Geophys. Res. 98, 6101 (1993), doi:10.1029 /92JA02242.
- [16] R.E. Ergun et al., Geophys. Res. Lett. 25, 2025 (1998), doi:

10.1029/98GL00635.

- [17] R.E. Ergun *et al.*, J. Geophys. Res. **109**, A12220 (2004), doi: 10.1029/2004JA010545
- [18] C.C. Chaston *et al.*, J. Geophys. Res. 108, 1091 (2003), doi: 10.1029/2001JA007537.
- [19] T. Sakanoi *et al.*, Adv. Space Res. **32**, 379 (2003), doi:10.1016 /S0273-1177(03)00273-4.
- [20] K. Asamura *et al.*, Adv. Space Res. **32**, 375 (2003), doi: 10.1016/S0273-1177(03) 90275-4.
- [21] D.K. Whiter *et al.*, J. Atmos. Sol-Terr. Phys. 89, 8 (2012), doi:10.1016/j.jastp.2012.06.014.
- [22] R. Kataoka *et al.*, Space Sci. Rev. **217**, 53 (2021), doi:10.1007 /s11214-021-00796-2.
- [23] K. Asamura *et al.*, Geophys. Res. Lett. **36**, L05105 (2009), doi:10.1029/2008GL036803.
- [24] C.C. Chaston *et al.*, Geophys. Res. Lett. **37**, L08104 (2010), doi:10.1029/2009GL042117.

- [25] C.C. Chaston *et al.*, Geophys. Res. Lett. 38, L20101 (2011), doi:10.1029/2011GL049185.
- [26] R.L. Lysak and Y. Song (2008), Geophys. Res. Lett. 35, L 20101 (2008), doi:10.1029/2008GL035728.
- [27] V.P. Genot *et al.*, J. Geophys. Res. **104**, 22, 649 (1999), doi: 10.1029/1999JA900154.
- [28] R.L. Lysak and Y. Song, J. Geophys. Res. 107, 1160 (2002), doi:10.1029/ 2001JA000308.
- [29] J.T. Clarke *et al.*, J. Geophys. Res. 114, A05210 (2009), doi: 10.1029/2008JA013694 (2009).
- [30] D.F. Mitchell *et al.*, J. Geophys. Res. 114, A02212 (2009), doi:10.1029/2008JA013621.
- [31] B.H. Mauk et al., Nature 549, 66 (2017).
- [32] R.L. Lysak *et al.*, J. Geophys. Res. Space Phys. **126**, JA 029886 (2021).
- [33] N.M. Schneider *et al.*, Science **350**, aad0313 (2015), doi: 10.1126/science.aad0313.

# ●●● 小特集「あけぼの」衛星の四半世紀にわたる観測で明かされたジオスペースの姿と将来展望

# 3.オーロラ現象とAKR

# 3. Auroral Phenomena and Auroral Kilometric Radiation

森岡 昭

MORIOKA Akira 東北大学惑星プラズマ・大気研究センター (原稿受付:2022年7月12日)

磁気圏サブストームは、太陽風と地球磁気圏の相互作用により磁気圏に蓄えられたエネルギーの放出過程で ある.太陽風から磁気圏へのエネルギー流入が進んでいる中、突発的に磁気圏尾部中間領域でサブストームが開 始され、磁気圏から極域にむかって沿磁力線電流が流れだし、これによって磁気圏-電離圏結合が急速に発達す る.この過程で磁力線に沿ってのオーロラ粒子加速が生じオーロラ爆発とともにオーロラ電波 Auroral Kilometric Radiation (以下, AKR) が放射される.「あけぼの」衛星は、まさにこのオーロラ粒子加速の現場に踏み込み、 粒子加速のメカニズム、オーロラひいてはサブストーム発生のメカニズムを探る観測を実施した.本章では、 「あけぼの」衛星による AKR 観測が明らかにしたいくつかの成果について報告する.

#### Keywords:

AKR, magnetosphere, plasma wave, auroral particle acceleration, substorm

#### 3.1 序

オーロラ電波 Auroral Kilometric Radiation (以下 AKR)は、オーロラ活動に伴って極域の電離圏上部から宇 宙空間に向かって放射される周波数50-800 kHzの電磁波 動である[1].地球からのこの電磁放射は、巨大惑星であ る木星および土星から放射されている強大な電磁放射現象 とならんで、惑星電波現象、ひいては惑星磁気圏粒子によ る電磁放射現象としても大変興味深い.

AKR 波動をオーロラ現象として捉え研究していくとき, 研究の興味の対象は大きく二つの柱をもつ.その一つは, 電波放射過程である.AKR の放射電力は 10<sup>9</sup> W[1]にもお よび,オーロラ嵐 (サブストーム)時に磁気圏から極域電 離圏に流入する粒子エネルギーの総量を考え合わせると, 極めて高いエネルギー変換効率をもって非熱的電磁波が励 起されていることになる.これは,他の巨大惑星でもおな じ事情であるが,従来のプラズマからの電磁放射理論では 説明できない強力な放射過程の存在を要請している.この AKR 放射の発生メカニズムに対して提唱されているモデ ルの検証が観測に課せられている.

もう一つの柱は、AKR 電波のもつ波動特性(スペクト ル,偏波およびそれらの時間変動)からAKRを生むオーロ ラ粒子の加速過程に関わる情報(加速域の構造,高度,そ れらの動的変動)やAKRが伝搬する経路のプラズマ分布 (極域プラズマ環境)の情報などを引き出す研究である.こ れらのアウトプットは、本小特集の他稿で述べられている 「あけぼの」衛星観測と相まって、地球磁気圏におけるオー ロラ嵐・サブストームの発生する仕組みを解明していく研 究に欠かせない.

#### 3.2 オーロラからの電波放射

「あけぼの」衛星は高度300 kmから10000 kmにわたる極 域電離圏から磁気圏基底部にかけての広い領域を観測する ため、観測の周波数はきわめて広帯域にわたる. 軌道上の 電子サイクロトロン周波数から電子プラズマ周波数までを すべてカバーするべく,長いクロスダイポールアンテナ (60m)と偏波分離機能を持つ広帯域受信機が搭載された [2].図1は、衛星が高緯度からオーロラ域上空を通過し て低緯度にぬける高度およそ9000 kmの軌道で観測された 典型的な AKR 放射の f-t ダイアグラム (ダイナミックスペ クトラム) である. 図で AKR は周波数 300-380 kHz 帯域 で観測され始め(20:00 UT),オーロラ帯上空に近づくに 従い次第に下限周波数を下げる. これは同図挿入の軌道図 に点線で示したように、AKR の波源はオーロラ帯につな がる磁力線のある高度領域に分布し、低い高度から放射さ れる(高い周波数の)AKR ほど広い放射コーンをもち,放 射域の高度が増すほどに放射コーン角が狭くなっているこ とを表している[3,4]. 衛星から観測される AKR スペクト ルはオーロラ帯上空(20:30-20:40 UT)で上限 380 kHz, 下限 80 kHz までと帯域を広げるとともに強度が最大にな る.このときの下限周波数80kHzは衛星の位置での電子サ イクロトロン周波数にほぼ一致し,放射周波数=電子サイ クロトロン周波数であることを示している. すなわち衛星 はオーロラ電波放射源の中を通過していたことになる. な お、図中 AKR より低い周波数帯で出現している波動は、

PPRC, Tohoku Univ.

author's e-mail: morioka.akira@outlook.jp



図1 「あけぼの」衛星が極域から赤道に向かってオーロラ帯を 横切ったときのプラズマ波動ダイナミックスペクトル観測 例.およそ磁気緯度70°のオーロラ粒子加速域(20:30~20: 40 UT 付近)では観測される AKR の下限周波数はその場の 電子サイクロトロン周波数に一致する.

auroral hiss や polar BEN と呼ばれる whistler モード波およ び静電的プラズマ波動である[5]. この auroral hiss は, オーロラを起こす電子が宇宙空間から超高層大気に降り込 む過程でチェレンコフ放射を起こすことによって発生する と考えられている.

さて,放射の周波数がその場の電子サイクロトロン周波 数にほぼ一致する AKR は, 先に [序] で述べたように, プ ラズマ中でのサイクロトロン放射過程では説明のつかない 強度で放射されていることから,オーロラを生じさせてい る電子ビームが主役となるあらたな電波放射メカニズムが 必要になってくる. これまで提出されている理論は二つの カテゴリーに分けられる. すなわち, 加速された電子が相 対論的な粒子とのサイクロトロン型共鳴(サイクロトロ ン・メーザー不安定:CMI) により直接電磁波放射する direct process[6]と、電子ビームによって励起されたプラズ マ波動がプラズマの不均一性を介して電磁波にモード変換 されるという mode conversion process[7]である.前者は R-X モード,後者はL-O モードの電磁波が主たる放射とな る.これらは理論としてはそれぞれ非の打ち所のないもの であるので、問題は自然がどちらを採用しているかであ る.「あけぼの」衛星の観測では、(詳細な解析データは紙 面の関係で省くが)、AKR 電波の偏波面観測、伝搬のカッ トオフからの伝搬モード決定, Poynting フラックス観測 [8] からの放射源位置同定などを通した観測・解析の結果 は、L-OモードとR-Xモードの両方のAKR波動が存在して いることを示した[8,9]. すなわち, 二つのカテゴリーの放 射機構が共存していると言う結論となった.

#### 3.3 AKR によるオーロラ粒子加速域の探測

加速された電子ビームによってその場の電子サイクロト

ロン周波数で放射される AKR のスペクトルは,その放射 域の特性,さらにはいまだ全貌が明らかでないオーロラ粒 子加速域の特性やダイナミックスの探測を可能にする.以 下に「あけぼの」衛星 AKR 観測によって明らかにされたい くつかの成果を紹介していく.

#### 3.3.1 AKR 放射の分布と電波源プラズマ環境

軌道周期約200分で極軌道をたどる「あけぼの」衛星は, 南北のオーロラ帯の上を一日およそ7回横切る. さらに楕 円軌道をとる衛星は日時とともにその遠地点の位置を変え るため衛星が極域を通過する高度もまた時間をかけて 300 kmから10000 kmまで変化する. このことを利用して, 長期間にわたって観測されたデータから AKR 放射を含む 地球のプラズマ波動の放射域の分布、さらにその太陽活動 依存性を調べることが可能になる[9,10]. 図2には1989年 ~1999年までの11年間の観測データから,夏期(左図:5 - 7月) と冬期(右図:11-1月)のプラズマ波動の平均 強度分布を周波数 260-380 kHz (上図) および 140-260 kHz 成分(下図)について磁気緯度子午線に沿ってプロッ トしたものである. なお, ここでは子午線の地方時はオー ロラ現象がもっとも活動的である磁気地方時21hのものを 示している.図中の白点線は電子サイクロトロン周波数 (f<sub>c</sub>) が 320 kHz (上図) および 200 kHz (下図) の等高線で ある. 高緯度(磁気緯度45-90°の領域)でfcより高い高度 において強い強度で観測されている波動が AKR である. また,fcより低い高度で観測されている波動は図1でも見 た polar BEN や whistler モードの auroral hiss と呼ばれるプ ラズマ波動である.

AKR放射について見ていくと、AKRは*f*=*f*<sub>c</sub>で生成され 宇宙空間に向かって放出されいる自由空間波であることが 示される.また南北半球の強度を見比べると、5-7月期



図2 11年間の統計にもとづくオーロラプラズマ波動の高度一緯 度分布とその季節変化.上段:周波数 260-380 kHz.下 段:周波数 140-260 kHz.左:北半球夏期.右:北半球冬 期.白点線は、電子サイクロトロン周波数.

には南極域で強く11-1月期には北極域で強い,すなわち AKRの活動は冬半球で活発であることも示される.磁力 線でつながっている南北極域でAKRの活動に季節依存性 があるということは,極域の日照の多寡・有無で大きく変 わる極域の電離圏の電気伝導度やプラズマ密度がAKRの 放射やその強度を支配していることを示している.このこ とは、オーロラ電子のフラックスも冬半球が夏半球より卓 越しているという報告[11]と整合し、オーロラとそれに伴 うAKR放射を生み出すオーロラ電子の加速は、電離圏の プラズマ環境(冬季に希薄・低伝導度)につよく支配され ていることを裏付けている.すなわち、電離圏のcold dense plasmaと磁気圏のhot tenuous plasmaの接合域で形 成される電子の加速域は、電離圏プラズマの導電性が高い 夏には高々度に押し上げられ、低 conductivity の冬には低 高度で活発化していることになる(図3参照).

### 3.3.2 磁気圏サブストーム・磁気嵐と AKR・オーロラ粒 子加速

さて、極域から放射される AKR 波動の基本的様相を見 てきたところで、こんどは AKR 放射スペクトルを探測の ツールとして、磁気嵐およびサブストーム時の磁気圏 - 電 離圏結合系おけるオーロラ粒子加速域の制御に関する研究 について述べる[12,13]. 図4には磁気圏プラズマシート と電離圏の結合を示す模式図を「あけぼの」衛星の軌道と ともに示しておく.

ここで図4にある磁気圏-電離圏結合領域について述べ ておく.太陽風と地球磁気圏の相互作用により磁気圏に注



図3 電離圏の cold dense plasmaと磁気圏の hot tenuous plasmaの接合域で形成されるオーロラ粒子加速域の季節 による高度・強度変化(三好由純氏提供).



図4 地球磁気圏と極域の模式図.

入されるエネルギーは、磁気圏プラズマシートと極域電離 圏とを結ぶ磁力線(磁気圏 – 電離圏結合領域)を介して電 離圏で消散される.この磁気圏と電離圏とが沿磁力線電流 を介して結合される様子は、電流回路に置き換えて考える ことができ、そこでの電流 – 電圧関係式は、Knight の式と 呼ばれる次のような式で書き表される[14].

$$\begin{split} \dot{\eta}_{\parallel} &= eN\left(\frac{K_{\rm th}}{2\pi m_{\rm e}}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{B_{\rm i}}{B_{V_{\rm i}}} \\ & \times \left[1 - \left(1 - \frac{B_{V_{\rm i}}}{B_{\rm i}}\right) \exp\left\{-\frac{eV_{\parallel}}{K_{\rm th} \left[\left(\frac{B_{\rm i}}{B_{V_{\rm i}}}\right) - 1\right]}\right\}\right] (1) \end{split}$$

ここで、 $j_{\parallel}$ 、N、 $K_{\rm th}$ 、および  $V_{\parallel}$ は、沿磁力線電流密度、磁 気圏プラズマ密度、磁気圏電子の熱エネルギー、そして磁 力線に沿ったポテンシャル差である.また、Biは電離圏の 磁場強度, B<sub>V</sub> はポテンシャル部の上部磁場強度である.こ の式は、磁気圏と電離圏をつなぐ沿磁力線電流は、磁気圏 プラズマシートの熱的電子の運ぶ電流(右辺第1項)と, 磁力線に沿って形成されたポテンシャルを通り抜ける際に 加速された電子が運ぶ電流(右辺第2項)とによって表さ れるというものである. 言いかえると, 絶えず変化する太 陽風 – 磁気圏相互作用に応じて、プラズマ加熱と沿磁力線 ポテンシャルが磁気圏と電離圏の結合系を制御しているこ とになる. その際形成される沿磁力線ポテンシャルがオー ロラ電子を加速する現場(磁気圏-電離圏結合域)になる. 以下に示す観測例(図5)は、高速で高密度の太陽風が地 球磁気圏を襲ったとき(磁気嵐時)の磁気圏-電離圏結合 系の変動を示すものである.

図5(a),(b),(c)は、太陽黒点の活発化に伴って発 生した強い太陽風変動が地球に到達した1994年2月21日か ら3日間の、(a)磁気圏尾部域からGeotail 衛星によって観 測されたAKRのダイナミックスペクトル, (b)極域で磁場 擾乱を引き起こすサブストームの強さを表す AE インデッ クス,および(c)地球の内部磁気圏を流れる環電流の強さ で表される磁気嵐指数 (Dst 指数インデックス) である. こ こで、Geotail 衛星とは「あけぼの」 衛星のカウンターパー トとして磁気圏遠部を観測する目的で打ち上げられた日本 の衛星である. Geotail 衛星のような遠方から AKR を観測 すると放射域全体を見渡せることになる.2月21日09UT に磁気嵐が始まった. Dst インデックス (図5(c)) は初め 正に振れ(磁気嵐初相),次いで大きく負に変動する(磁気 嵐主相). 極域のサブストーム (AE インデックス (図5) (b))) は磁気嵐の開始とともに大きく変動し以後2日間 その擾乱は継続する.磁気圏尾部で観測される AKR スペ クトル (図5(a)) を見ると,不思議なことに,それまで 100-800 kHz の帯域に出現していた AKR は磁気嵐の開始 とともに活動を止め、同日の 20 hUT 頃になって再び活動 をはじめる. (09 UT と 20 UT の間に見られる 100 kHz 以 下の波動は磁気嵐によって励起されたプラズマ波動であ る). この間, AE インデックスは大きな値を持って変動し



 図5 1994年2月21-23日の磁気嵐時の、(a)Geotail 衛星による AKRダイナミックスペクトル.(b)オーロラ活動の指標と なるAEインデックス.(c)磁気嵐指標のDstインデックス. (d)および(e)「あけぼの」衛星で観測されたAKR および極 域プラズマ波ダイナミックスペクトル.(f)、(g)電子の下 向きフラックスのE-tスペクトル.(h)、(i)電子の下向き フラックスのエネルギースペクトル.

ていたことから,磁気嵐の期間をとおしてオーロラを含む 極域のサブストーム,すなわち粒子の電離圏への降下現象 は活発に活動し続けていたことになり,通常であれば AKR も強く放射されていたことが予想される.ところが この磁気嵐の最中に,様々なオーロラ関連現象のうち,加 速電子によって放射されるはずのAKR だけが停止してし まい,磁気嵐がほぼ飽和に達した時間帯(回復相)になっ て再び出現してきたことになる.この「あけぼの」衛星に よる新発見は,いったい何を意味しているのであろうか?

この現象を更に詳しく調べていく.いま,磁気嵐主相中 にAKRが停止している時間帯の一点(図中縦点線A)と, AKRが再出現した時点のある時刻(図中縦点線B)につい て,「あけぼの」衛星データを詳細に見ていく.図5(d)か ら図5(i)は,「あけぼの」衛星が磁気圏-電離圏相互作用 域を低緯度から高緯度側に通過したときのデータを示して いる.はじめに時刻Bから見ていく.図5(e)は,時刻B のAKRダイナミックスペクトルである.AKRは図5(a)の Geotail衛星観測と矛盾することなく広い帯域で出現し,最 低周波数が衛星高度の電子サイクロトロン周波数(白のト レース)に一致するスペルトルを持っている.すなわち衛 星はAKR放射源のまっただ中を通過して強い放射のAKR を観測していたことがわかる.このときの磁力線下向き成 分の電子のスペクトル変動(E+ダイアグラム)とエネル ギースペクトルが図5(g)と図5(i)(矢印で示した2分間 のエネルギースペクトル) に示されている. AKR が強く放 射されているときは、降下電子のスペクトルは、スペクト ル幅が数百 eV~1 keV と狭く,磁力線に沿って直流的に加 速されたビーム状の降下電子フラックスであることを示し ている. この様相は、 逆 V (inverted-V) 型スペクトルと呼 ばれ、非磁気嵐時のサブストーム時に一般的にオーロラ上 空で見られる降下電子のエネルギースペクトル特性であ る. つまり、サブストーム時には、磁力線平行方向の電場 によってビーム状降下電子が生成され、その結果、電子 ビームから AKR が放射されていることを示している.こ のことを式(1)に照らして解釈すると、サブストームが発 生し,磁気圏と電離圏が沿磁力線電流を介して強く結合す ることが要請されたとき(たとえば磁気圏でのプラズマの 運動に起因する沿磁力線電流の励起など), プラズマシー トの熱電子だけでは要請される沿磁力線電流はまかないき れず、磁力線平行方向の電場が形成され電子を加速するこ とで、強い沿磁力線電流を維持していることを示してい る.

次いで磁気嵐主相を見ていく.時刻Aにおける図5(d) および図5(f)は、AKR ダイナミックスペクトルとそのと きの降下電子の *E*-t ダイアグラムである. AKR は**図5**(a) のGeotail 衛星による遠方からの観測と調和して AKR はほ とんど消失している.このときの電子のスペクトルは、広 く 100 eV から数 keV のエネルギー帯にわたって大きなフ ラックスをもって分布する特徴を示している.図5(h)は 矢印で示した2分間のエネルギースペクトルである. その 形状はマクスウェル分布の様相を示していることがわか る. それでは、太陽風からのエネルギー流入が通常よりも 激しく、磁気圏-電離圏結合域では強い沿磁力線電流が流 れている磁気嵐主相において、なぜ AKR が停止したので あろうか?答は降下電子のスペクトル(図5(h)と図5 (i))の違いにある.磁気嵐主相のAでは,降下電子のエネ ルギースペクトルが broad でフラックスが大きい. すなわ ち、電離圏に降下しているのは、フラックスが豊富で hot な熱的電子であるということになる.これを(1)式に照ら して解釈すると、磁気嵐主相では、磁気圏には太陽風との 激しい相互作用により、電流のキャリアーとなる熱的電子 が豊富に存在しかつその温度が高い状態にあり、(1)式 の第1項の電流だけで必要な電流をまかなえるため (Bohm 電流),磁力線に沿ってポテンシャル構造は形成さ れなかった,と考えることができる.

以上ここで述べた「あけぼの」衛星の成果は,磁気嵐時 には,通常のオーロラ嵐よりもすさまじい磁力線平行方向 の電子加速が生じ,強く加速された電子によって電離圏の 大擾乱を引き起こしているのであろうという概念を実証的 に否定した.すなわち,磁気嵐時には磁力線平行方向の電 場は抑制され,プラズマシートの熱的プラズマの増加と加 熱によって沿磁力線電流が担われ,その沿磁力線電流が極 域電離圏の擾乱の主要因であることを示した.

#### 3.3.3 オーロラ活動と内部磁気圏変動

「あけぼの」衛星がオーロラの緯度帯を離れ内部磁気圏

へと進むとき、衛星はその場 (in-situ) のプラズマ波動と オーロラ域からの (remote) AKRを同時に観測することに なる.図6は、衛星がプラズマ圏境界(プラズマポーズ)に さしかかった時(図6(a)参照)の波動ダイナミックスペク トルの一例である[15].ここで、プラズマ圏とは、地球の 電離圏の低温プラズマが宇宙空間に湧き出して形成される 領域であり、温度は1eV以下ときわめて低温であるもの の,密度は1000[/cm3]を超える高密度領域を形成してい る領域である[16]. 図では遠方からの AKR とともにその 場の静電的高域混成波動 (upper hybrid resonance wave: 以下 UHR 波動) が観測されている.ここで 「あけぼの」 衛 星が明らかにした大変興味深い事実は、オーロラ帯で放射 される AKR の強度が増すとき, in-situ UHR 波動の(1) 強度 が増加し、かつ(2)周波数が低下することである.つまり、 プラズマ圏境界のプラズマ波動変調が,遠く離れた AKR の放射域の強度変動(オーロラ粒子加速の変調)と同期し ていることが見いだされたことになる.このような現象 は、衛星が図6(a)のような軌道をとるときしばしば観測 されることがわかってきた.この現象を読み替えると, オーロラが発生する緯度域で磁気圏 - 電離圏結合が強ま



図6 「あけぼの」衛星がプラズマ圏境界にさしかかった時の波 動ダイナミックスペクトル.オーロラ域から伝搬してきた AKR とともにその場の静電的高域混成波動(UHR)が観測 されている.

り、磁力線平行方向の加速が発達・変動するとき、これに ほぼ同期してプラズマ圏境界周辺のプラズマの(1)freeenergyが増加するとともに、(2)プラズマ密度が減少す る、ことになる. つまり内部磁気圏に熱くて希薄なプラズ マが磁気圏内部に注入される(あるいは周辺が加熱され る) という,これまで知られていなかったプラズマダイナ ミックスを示したことになる.しかしこの事象が発生する プロセスを更に詳細に明らかにしそこで働く磁気圏過程を 解明することは、この領域での「あけぼの」衛星によるプ ラズマ・粒子観測が放射線障害を避けるために制限されて いたこともあり、今のところできていない、今後この現象 を解明し、サブストーム時の内部磁気圏とプラズマシート との間の領域で生じているプラズマダイナミックスを探っ ていくためには、「あけぼの」衛星観測ではできなかった 内部磁気圏の熱的および準熱的プラズマのプラズマパラ メータの計測,低エネルギー粒子,および背景電場の同時 観測が不可欠である.

#### 3.4 おわりに

オーロラ粒子からの非熱的放射である AKR は, 自身の 電波放射機構, オーロラ粒子加速のメカニズム, 磁気圏プ ラズマ環境, さらには磁気圏サブストーム発生にかかわる 情報をもたらしてくれる.本章では, とくにオーロラ加速 域を遠隔観測することから得られたあらたな磁気圏現象を 報告した.一方, 新しい解析と発見はさらなる謎と課題を 引き出してくる.その最たるものの一つは, 粒子加速過程 の実証的検証であろう.

直接現場観測(in-situ観測)と遠隔観測(remote観 測)が同時に行える惑星の磁気圏は,ひろく宇宙に存在す るエネルギー粒子の加速過程の現場を捉えることができる 宇宙の実験場と言える.地球磁気圏では,「あけぼの」衛 星観測のあとを引き継いだわが国の「あらせ」衛星が,こ の利点を最大限に生かして,波動,粒子,電磁場の,これ までにない精密な観測を行い,海外の衛星観測や地上に展 開される観測網と協働しながら大きな成果を挙げてきてい る[17-19].一方,地球磁気圏の兄貴分,いや大兄貴分であ る木星の磁気圏では,米国のJUNO衛星が,地球磁気圏の 規模を大きくこえる壮大な波動・粒子現象をとらえ話題を 提供している[20,21].こうした惑星の磁気圏を舞台とし た波動・粒子・電磁場の相互作用の観測研究は,やがて宇 宙における「粒子加速」の謎の解明とへつながることが期 待される.

#### 参考文献

- [1] D.A. Gurnett, J. Geophys. Res. 79, 4227 (1974).
- [2] H. Oya et al., J. Geomag. Geoelectr. 42, 411 (1990).
- [3] W. Calvert, Geophys. Res. Lett. 8, 1159 (1981).
- [4] Y. Kasaba et al., Geophys. Res. Lett. 24, 2483 (1997).
- [5] D.A. Gurnett et al., J. Geophys. Res. 88, 329 (1983).
- [6] C.S. Wu and L. C. Lee, Astrophys. J. 230, 621 (1979).
- [7] H. Oya, Radio Sci. 6, 1131 (1971).
- [8] A. Morioka et al., J. Geomag. Geoelectr. 42, 443 (1990).
- [9] A. Kumamoto et al., J. Geophys. Res. 108, 1032 (2003).

- [10] A. Kumamoto et al., Geophys. Res. Lett. 25, 2369 (1998).
- [11] P.T. Newell *et al.*, Nature **381**, 766 (1996).
- [12] A. Morioka et al., J. Geophys. Res. 108, 1226 (2003).
- [13] T. Seki et al., J. Geophys. Res. 110, A05206 (2005).
- [14] S. Knight, Planet. Space Sci. 21, 741 (1973).
- [15] A. Morioka and H. Oya, J. Geomag. Geoelectr. 48, 309 (1996).
- [16] 三好由純 他:プラズマ・核融合学会誌 90,713 (2014).
- [17] 篠原育 他:htpp://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas\_ news/files/ISASnews\_arase.pdf
- [18] 三好由純他:プラズマ・核融合学会誌 95,269 (2021).
- [19] Y. Miyoshi et al., Space Sci. Rev. 218, 38 (2022).
- [20] B.H. Mauk et al., Geophys. Res. Lett. 45, 1227 (2018).
- [21] J. Saur et al., J. Geophys. Res. 123, 9560 (2018).



# 4. 極域電離圏からのイオン流出

## 4. Ion Outflow from the Polar Ionosphere

阿 部 琢 美<sup>1)</sup>, 渡 部 重 十<sup>2)</sup>, YAU Andrew<sup>3)</sup>, 北 村 成 寿<sup>4)</sup>

ABE Takumi, WATANABE Shigeto<sup>2)</sup>, YAU Andrew<sup>3)</sup> and KITAMURA Naritoshi<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>宇宙航空研究開発機構,<sup>2)</sup>北海道情報大学,<sup>3)</sup>カルガリー大学(カナダ),<sup>4)</sup>名古屋大学宇宙地球環境研究所

(原稿受付:2022年7月15日)

地球の極域電離圏から外向きに流出するイオンの存在は1960年代に理論的に予言され,1970年代には衛星観 測によりその存在が確認されるようになった。1989年に打ち上げられた「あけぼの」衛星はイオン流出に関する 良質なデータを長期間にわたって継続的に取得し,様々な観点からの本現象の研究を可能にした.本章では「あ けぼの」やその他の衛星観測が明らかにしたイオン流出の描像と,惑星探査機の観測により得られた火星・金星 からのイオン流出の特徴を紹介する.

#### Keywords:

ionosphere, magnetosphere, outflow, thermal plasma, plasma acceleration, polar wind, ion heating

#### 4.1 はじめに

#### 4.1.1 電離圏から磁気圏へのプラズマ流出

1970年代初頭に Shelly らが衛星観測データをもとに,高 高度から降下してくる重イオンを発見して以来[1],電離 圏は磁気圏プラズマの重要な供給源として注目を集めるよ うになった.それまでは太陽風からのプラズマ供給が主 で,ゆえに H<sup>+</sup>や He<sup>++</sup>イオンが支配的と考えられていたの に対し,太陽風には含まれない O<sup>+</sup>イオンが磁気圏高度か ら降下していることが観測されたからである.

これに対し、南北半球間で磁力線が閉じない高緯度の開 いた磁力線領域では、圧力の大きな電離圏から小さな磁気 圏に向ってプラズマが流体的に流れ出すはずであること が、1960年代に既に理論的に予言されていた[2,3,4]. これ は solar wind (太陽風) に倣って、polar wind と名づけられ た. その後の研究により、電離圏からは多様な加速メカニ ズムにより様々な種類のイオンが磁気圏に向って流れ出し ていることが明らかになった. これらを総称してイオン流 出現象 (ion outflow) とよんでいる.

#### 4.1.2 流出するイオンの多様性

高緯度電離圏では熱的または非熱的な加速過程により駆動される幾つかの種類のイオン流出メカニズムが存在する.高緯度域に発する"開いた"磁力線領域での圧力勾配に起因し分極電場によってイオンを加速する polar windの他,多様な過程により様々なエネルギーをもってイオン は流出する.Yau and André[5]はイオン流出を次のような 4つのタイプに分類した.

#### ポーラーウインド (Polar Wind)

極域の高度1000 km 以上に存在する低エネルギー (0.1 eV~数eV)の上向きイオン流で,主としてオーロラ帯 よりも高緯度の極冠域と呼ばれる領域に存在し, H<sup>+</sup>, He<sup>+</sup> の軽イオンが磁力線方向の両極性電場により上向きに加速 された結果生じる.後に述べるように,1960年代に初めて 理論的に提唱された電離圏からのプラズマの流出は,この ポーラーウインドに関するものである.

オーロラバルクアップフロー (Auroral Bulk Upflow)

高度 1000 km 以下のオーロラ帯で観測されるイオン 流.イオンの種類は主に O<sup>+</sup>.速度は 1 km/s (0.1~0.2 eV) 程度で,緯度方向にはかなり狭い領域に存在し,プラズマ の加熱に伴って観測されることが多い.

アップフローイングイオン (Upflowing Ions)

10 eV から数 keV のエネルギーをもつイオンの上向き 流.速度分布関数のピークを磁力線方向にもつのがイオン ビーム,磁力線に対して垂直方向に存在するものは TAI (Transversely Accelerated Ions),ピークが両者の中間の 角度に位置するものはコニクスと分類される.これらは概 ね高度 1000 km以上のカスプと呼ばれる領域あるいはオー ロラ帯で観測される.

アップウェリングイオン (Upwelling Ions)

1 eVから10 eV程度のエネルギーをもったイオンの上向 き流.夜側オーロラ領域では磁力線に垂直方向の加熱を伴 う事が特徴的である他,昼側オーロラ帯やカスプ領域で顕 著に観測される.主成分は $O^+$ であるが $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^{++}$ , お よび $N_2^+$ ,  $O_2^+$ ,  $NO^+$ などの分子イオンが伴うこともある. 2000~6000 km 高度では速度が1~3 km/s程度であるがイ オン密度が $10^8~10^9$ /m<sup>3</sup>であるため,単位面積あたりの流 束は比較的大きい.

#### 4.1.3 イオン流出が存在する領域

前節で述べたように、イオン流出現象には多様な種類が あり、粒子がもつエネルギーも低いものから高いものまで 様々である.図1にこれらの個々のイオン流出が存在する

corresonding author's e-mail: abe.takumi@jaxa.jp

領域を示した. 4.1.2に述べた4種のイオンフローの中で ポーラーウインドはオーロラ帯よりも高緯度側の極冠域と 呼ばれる領域に存在するが、プラズマの対流によってオー ロラ帯に入り込むことがある.これに対し、他の3種類の フローはカスプ領域またはオーロラ帯に存在する.カスプ 領域には高高度からのエネルギー流入量が多いことに起因 して、幾つかの異なる過程を経て、電離圏プラズマがエネ ルギー得て、単位面積あたりのイオン流出量が多くなるこ とが特徴である.オーロラ帯においても、プラズマ波動や 降下粒子がエネルギーを注入し、イオン流出現象を引き起 こすことがこれまでの観測からわかっている.

#### 4.2 イオン流出に関する理論的研究

電離圏高度においては O<sup>+</sup>イオン等の重イオンが支配的 であるが,電子とイオンに働く重力の違いにより発生する 電荷の分離のために上向きの分極電場が生じる.ところが 電離圏内に存在する H<sup>+</sup>や He<sup>+</sup>のような軽いイオンでは力 がバランスせず,この両極性電場により上向きの加速が起 こる.これがポーラーウインドの基本的な考え方である. 極冠域から上向きに流れ出したプラズマが磁気圏尾部に達 しても,その広大な体積のため容易には満たされず,圧力 勾配に起因する流れは準定常的に存在できる.

このようなイオン流出はプラズマの拡散による軽イオン のバルク的な流れとして[2],また熱的な蒸発過程として [3],1960年代中頃に初めてその存在が予言された.その 後,その流れは超音速になることが示され,Solar Wind (太陽風)に倣って,polar wind (ポーラーウインド)と名 づけられた[4,6].以下にポーラーウインドの数値モデル を幾つか紹介する.

#### 4.2.1 無衝突の運動論モデル

運動論的なポーラーウインドモデルでは,速度位相空間 上での分布関数はボルツマン方程式により表現される,無 衝突モデルでは衝突項が無視され,ボルツマン方程式はブ ラソフ方程式に帰着する.

このモデルの例としては、H<sup>+</sup>とO<sup>+</sup>イオンおよび電子を 考慮したLemaire and Schererの研究[7] があって、高度に



図1 地球電離圏からの様々なイオン流出現象の概念図.地球を タ方から見た図で左側が昼側になる.

対する電場とポテンシャルが計算された. この結果では, 高度 2000 km と 20000 km 間の電位差は約 1.7 V で H<sup>+</sup>イオ ンは超音速に達することが示された.

#### 4.2.2 流体力学モデル

流体力学的なポーラーウインドのモデルでは連続の式, 運動方程式,エネルギー方程式,高次のモーメント方程式 系がポーラーウインドの密度,エネルギー,モーメントを 記述するために用いられる.

Banks and Holzer[6], Marubashi[8]はポーラーウイン ド速度が超音速になることに注目し,H<sup>+</sup>イオンと電子から なるプラズマに対する定常解を導き出した.Raitt他[9,10] は対流および派生するイオン-中性大気間と衝突とイオン の摩擦加熱の影響を考慮して計算を行い,加熱により上昇 した温度が圧力勾配を大きくし,ポーラーウインドのフ ラックスが上昇することを示した.

近年の計算リソースの増大により, Schunk and Sojka [11], Glocer 他[12]によって,電場ドリフトによって移動 する多数のフラックスチューブを用いた3次元の時間変動 するポーラーウインド(+電子降り込みによる電子加熱, イオンの摩擦加熱)のモデリングが試みられている.

また,近年では電離圏で生成される光電子の分極電場へ の効果をできるだけ正確にモデルに取り込む試みも進めら れており[13,14],北村他[15]によって「あけぼの」衛星の 観測データから得られた地磁気静穏時の日陰,日照それぞ れの電子密度高度プロファイルがモデルによってかなりよ く再現できるようになってきている[13].

#### 4.2.3 輸送方程式に基づくモデル

このモデルでは速度分布関数の低次のモーメントは高次 とは独立に仮定され、方程式系は級数展開の高次の項を切 り捨てることで定義される.方程式系は5,13,20モーメ ントなど様々な項数で計算されているが、イオンや電子の 温度を非等方的に取り扱うことができるのが特徴である.

このモデルの例としては Schunk and Watkins の研究 [16]があるが、5モーメントでH<sup>+</sup>とO<sup>+</sup>イオン、電子を考 慮し1200~12000 km の高度領域で計算を行った彼らの結 果では、H<sup>+</sup>イオンでは磁力線方向の温度が垂直方向よりも 高いこと、低高度では温度が等方的であること、高い高度 での境界条件によるが電子に関しては磁力線方向の温度が 垂直方向より高いことが示された.

#### 4.2.4 粒子コードを活用したモデル

近年の計算機能力の向上により,粒子コードの技術を活 用したモデルが新たに出現し始めている[17,18,19].この タイプのモデルの特色は TAI やコニクスなどモーメント では簡単に扱えない分布関数を扱える点で,化学反応や衝 突が支配的な低高度は別のモデルを用い,その情報を境界 条件にして高度 1000 km 程度から高高度において高度ごと にセルを用意して,その中で適切な数の超粒子を用いて分 布関数を再現し,その情報を隣接するセルへと受け渡して いく.プラズマ波動による分布関数の拡散(=加熱)をモ デル化して入れることで,TAI やコニクスもある程度再現 可能となった.モデルによってはこのような波動加速を含 めたモデルが再現するものを一般化されたポーラーウイン ドと呼んでいる場合もある.

### 4.3 イオン流出現象の観測

イオン流出現象の中で初めて観測された現象はポーラー ウインドでExplorer 31 と ISIS-2 によるものである [20,21]. 1980年代には DE1 衛星によりポーラーウインド が超音速であることが実証され, H<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>に加え O<sup>+</sup>イオン が構成粒子となっていること等が観測的に実証された.

#### 4.3.1 「あけぼの」衛星による観測

イオン流出を引き起こす粒子加速過程は多種多様であ り、イオンコニクスやイオンビーム、ポーラーウインド等 はそれぞれがエネルギー分布や出現領域に特徴をもってい る.1989年に打上げられた「あけぼの」衛星には SMS(超 熱的イオン質量エネルギー分析器)、LEP(低エネルギー 粒子計測器)という異なるエネルギーに感度をもつ2つの 測定器が搭載されていたため、様々なイオン流出現象の観 測が可能になった.また、流出現象を駆動するイオン加速 過程の解明には電場、磁場、プラズマ温度の計測、プラズ マ波動の観測が必要であるが、「あけぼの」衛星に搭載さ れていた測定器によりこれら全ての観測項目を完全に網羅 していたこと、また、10年以上にわたり観測を継続できた ことが、様々なパラメータに対する依存性についての解析 を可能にし、イオン流出に関して世界でも卓越した観測成 果を生み出す原動力となった.

「あけぼの」衛星によるイオン流出現象に関する観測成 果は既に数多く学術雑誌に出版されているため[22-24], ここでは研究成果の幾つかについて述べる.

A) イオン流出速度の空間分布

図2に「あけぼの」衛星の観測に基づいたポーラーウイ ンドのH<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>イオンの流出速度(上向きが正)の高 度分布を示す.全てのイオンが高度とともに速度を増し, 軽いイオンほど速度が大きく,これは先に述べた分極電場 による加速であることと整合している.O<sup>+</sup>イオンは低高度 では速度がほぼゼロであるが,5000 km 以上では有意な速 度をもつようになる.H<sup>+</sup>もO<sup>+</sup>イオンも昼側において流出



図2 「あけぼの」衛星の観測から統計的に求めたポーラーウイ ンドのイオン速度の高度分布.地磁気緯度80度以上での平 均値である.

速度が大きく,これは高いプラズマ温度に応じた大きな分 極電場によるイオン加速,およびカスプ域周辺からの流出 速度が大きいこと,に関係している.また,オーロラ帯か ら極冠域の広い範囲についてのイオン流出分布が示された ことが重要である.

#### B) イオン流出の太陽活動度依存性

図3にH<sup>+</sup>とO<sup>+</sup>イオンの流出速度の太陽活動度依存性を 示す.速度は磁気緯度が80度以上かつ高度3000~5000 km の平均値で,季節変化を見るために夏,冬,春・秋分に分 けて表示している.この解析では太陽活動度を表す指数と して良く用いられる波長10.7 cm 太陽電波束を使用した. H<sup>+</sup>イオンに関して,夏季以外は太陽活動度が増すとともに 流出速度が減少する傾向が見られる.この傾向はO<sup>+</sup>イオ ンの場合はより明瞭になり,減少率も大きくなり,いずれ の季節でも依存性を示している.この傾向には幾つかの因 果関係が関与しているが,太陽活動度が活発な時期には熱 圏への入射エネルギーが増してスケールハイトが大きくな り電離圏高度での中性大気密度が増えるため,中性粒子と イオン間の衝突のために流出速度が大きくなりにくいとい う原因が大きい.

「あけぼの」衛星で観測された流出するイオンの速度と 密度からフラックスを推定する研究も幾つかなされてい る. Cully 他 [25] は「あけぼの」衛星の観測データをもと に,流出量を空間的に積分して得られた極域電離圏からの



図3 H+, O<sup>+</sup>イオン速度の太陽活動度依存性.地磁気緯度80度以上,高度3000~5000 kmでの平均値.夏季(6~8月),冬季(12~2月),春分(3~5月),秋分(9~11月)に分けて示している.

総流出量の太陽活動度依存性を調べた.それによれば、O<sup>+</sup> イオンの総流出量は活動度とともに増加し、静穏時の約 100倍に達すること、H<sup>+</sup>イオンにも同じ傾向が見られる が、10倍程度の増加であることが示された.これは太陽活 動度に伴って、O<sup>+</sup>イオンとH<sup>+</sup>イオンの流出比率が顕著に 変化する事を意味している.

#### C) 地磁気活動度依存性

同じくイオンの総流出量に関して,地磁気活動度を表す 指数である Kp インデックスに対する依存性についても Cully 他[25]により解析が行われた. O<sup>+</sup>イオンには地磁気 静穏時と活発な時で約20~30倍の変化が見られるのに対 し,H<sup>+</sup>イオンではこれだけ大きな増加は見られない.地磁 気活動度が活発な時の磁気圏における O<sup>+</sup>イオンの密度増 加がリコネクションに影響を与え,磁気圏の対流全体に影 響を与える[26] という研究結果もあり,イオン流出現象 が磁気圏全体や太陽風と磁気圏の相互作用に影響を与えて いる可能性が指摘されている.

#### 4.3.2 「あけぼの」衛星が観測したその他のイオン流出現 象

イオンコニクスは3次元の速度分布空間上で磁力線とあ る角度をなす方向にコーン状のピークをもつことから命名 された.これは,低高度で磁力線と垂直方向に加熱を受け たイオンが運動エネルギーと磁気モーメントの保存のため に,高度が上昇(磁場強度が減少)するとともに磁力線に 垂直方向の速度( $V_{\perp}$ )は減少し平行方向の速度( $V_{\prime\prime}$ )が増 加するためにコーン角(分布関数がピークをもつ磁力線方 向からの角度)が90度よりも小さくなって観測されるもの である.「あけぼの」衛星の観測データを用いてイオンコ ニクスの研究が行われ,三宅他[27]はコーン角の大小に応 じて,イオンに対する加熱・加速過程が異なるという結果 を報告した.

イオンビームは、速度分布空間上でのピークが磁力線方 向に近く、V<sub>⊥</sub>が小さくほぼ磁力線方向上向きに運動する イオンのことをいう.このような分布はイオンコニクスが さらに上昇しV<sub>⊥</sub>が小さくV<sub>//</sub>が大きくなった結果とも考え られるが、衛星データの解析結果によれば、イオンビーム の特性はそのような解釈では説明できない部分が多くあっ て、より複雑な加熱・加速過程が関与すると考えられてい る.「あけぼの」衛星の観測結果としては、三宅他[28]が イオンコニクスやイオンビームと太陽風の関係を解析し、 前者の発生頻度は太陽風の速度や密度、惑星間磁場の Y 成分、Z 成分に影響を受けるのに対して、後者はこれらの パラメータにあまり影響されないことを報告している.こ の研究結果はイオンビームが太陽風の影響を強く受けるプ ラズマの対流ではなくて、局所的な沿磁力線電流の大きさ を反映するものであることを意味している.

極域カスプ領域には様々な過程により高い高度からエネ ルギーが流入し、これが上向きのイオン流出を駆動するこ とが知られている.この中でクレフトイオンファウンティ ンはカスプ領域から低エネルギーのイオンが上向きに流出 する時に、極冠域の反太陽方向の流れに乗って夜側へと輸 送される時に、質量の重い0<sup>+</sup>イオンは加速を失い速度が 下向きに向かうため、噴水のような軌道を描くために名づ けられた.「あけぼの」衛星のデータを使用して、この現 象についても研究がなされており、例えば北村他[29]はプ ラズマ波動と熱的イオンの観測データをもとに、クレフト イオンファウンティンの結果として極冠域に流れ込むイオ ンは O<sup>+</sup>が支配的であること、上昇速度は 4~10 km/s でフ ラックスに換算すると 1×10<sup>13</sup>/m<sup>2</sup>/s になることを報告し た.また、このような速度で電離圏から流出していく O<sup>+</sup> イオンの軌道を計算すると、「あけぼの」衛星の高度では 脱出速度を下回っていても強いプラズマ対流のもとでは、 より高高度において遠心力加速の効果で脱出速度を超え、 磁気圏に達することができることを示した.

#### 4.4 その他の衛星による観測

「あけぼの」以外の衛星による観測でもイオン流出に関 する興味深い結果が得られている.近年では,北村他[30] が米国のFAST衛星のプラズマ測定器の観測データをもと に,電離圏から高高度に向う光電子の外向きフラックスは ポーラーウインドのイオンのフラックスにあまり影響を与 えず,イオンの運動を支配する極域磁力線方向のポテン シャル構造はH<sup>+</sup>イオンの生成量に左右されるイオンのフ ラックスと電子のフラックスが平衡するように決定される という結果を報告した.この結果はポーラーウインドが初 期の理論的な予測よりももっと複雑な物理過程によって支 配されていることを実証する重要な結果である.

イオン流出に関する研究は磁気圏尾部での衛星観測デー タを使っても行われている. Cluster 衛星が地球半径の 5倍以上の磁気圏尾部で取得したデータの解析からは,太 陽活動度によらず,数10 eV 以下の低エネルギーイオンが 流出イオンの密度と外向きフラックスを支配(高いエネル ギーをもつイオンのフラックスより大きい)し,積分量と しては10<sup>26</sup>個/秒のオーダーであることが示された[31]. このフラックスは数千 km の高度で「あけぼの」衛星が 行った観測と整合している. このフラックスを支配するプ ロセスは磁気圏におけるイオンのエネルギー励起過程では なく,太陽からのエネルギー入射によって左右される電離 圏側のプラズマ供給であることが研究結果として結論づけ られている.

#### 4.5 イオン流出現象研究の発展性

#### 4.5.1 エネルギー・物質輸送と惑星科学的な視点

イオン流出の位置づけは、単に極域電離圏・磁気圏に出 現する粒子加速の結果として生じるひとつの輸送現象には 留まらない.イオンの加速は太陽熱輻射,太陽風,磁気圏 からの流入エネルギーにより駆動され,大気圏から供給さ れる大気粒子が電離圏,磁気圏を経て惑星間空間へと流出 していく点を考慮すると,大気圏から惑星間空間まで連な る広大な空間に亘る,エネルギーと物質の輸送過程を担う 重要なプロセスであることがわかる.また,大気粒子の長 期の流出は惑星が所有する大気の量と組成に変化をもたら すため大気変遷の重要過程として位置づけられ,惑星科学 の研究者からは流出イオンの種類や流出総量の観測が特に

#### 注目を集めている.

#### 4.5.2 地球型惑星からのイオン流出

地球型惑星である火星や金星からのイオン流出現象も地 球と同様に研究の対象となっているが、これらの惑星は地 球と異なり強い固有磁場をもたないため、本質的に異なる 種類の流出過程が存在する.すなわち、地球では強い磁場 がプラズマの運動を支配するが、火星や金星では太陽風起 源の弱い磁場が多少運動に影響を与えるのみで、比較的小 さなエネルギー励起により惑星重力圏から惑星間空間に流 出することが可能である.但し、火星表面には局所的に残 留磁場が存在する領域があるため、ここでは特殊なイオン 流出過程があるかもしれない.

ヨーロッパの火星探査機 Mars Express にはプラズマ観 測用の測定器が搭載され,イオン流出に関する数多くの研 究がなされている。例えば,Lundin 他[32]は低エネルギー のH<sup>+</sup>,H<sup>±</sup>,O<sup>+</sup>,O<sup>±</sup> イオンが流出していることを報告した が,分子イオンの流出はこれらの起源が電離圏にあること を示している.さらにトータルでのHとOの流出量の比が 1程度であることは,大気中の水蒸気が流出イオンの供給 源であることの示唆であると位置づけている.

金星電離圏からのイオン流出についても数多くの研究が ある.米国のPioneer Venus Orbiter では限られた測定器に よる観測データをもとに数多くの結果が導き出され た.2000年以降ではヨーロッパの探査機 Venus Express に搭載されたプラズマ測定器のデータをもとに,流出イオ ンの分布やフラックスに関する研究が行われ,総流出量は 重イオンで 5.2±1.0×10<sup>24</sup>/s, H<sup>+</sup>イオンで 14±2.6×10<sup>24</sup>/s だ が変動量が大きく,これが観測により値に大きな差がみら れる原因であると結論付けている[33].

米国の火星探査機 MAVEN は火星大気の流出の研究を 主目的として2014年に打上げられた.研究成果はまだ限定 的ではあるが, Brain et al. [34]ではエネルギーが25 eV以上 のプラズマのデータを用いて,表面からの高度 1000 km の面を外向きに流出,内向きに流入するイオンのフラック スを計算し,トータルの流出量の下限として 3×10<sup>24</sup> /s と いう数字を導いている.流出するイオンは様々な過程を経 て生成されるが,金星電離圏でも観測された高い密度のプ ラズマが塊となって流出するクラウドと呼ばれる現象によ り,単位面積あたりのフラックスとして 10<sup>11</sup> /m<sup>2</sup> /s のイオ ンが流出されているという報告もある[35].今後, MAVEN が観測を継続することで,様々な種類のイオン流 出の過程とより正確なフラックス量が求められていくこと であろう.

#### 4.5 まとめ

本章に述べた「あけぼの」衛星の結果のほとんどはこの 衛星が長期にわたり観測を継続できたための賜物である. すなわち,長期にわたって信頼性あるデータを取得し続け てきたことが,イオン流出現象を空間構造,太陽・地磁気 活動度変化など様々な視点からの解析と研究を可能にし た.惑星科学的視点からイオン流出量を議論する場合に は、大気変遷を考える上で太陽活動度等のパラメータに応 じた長期的な変化が大変重要であり、このような研究に対 しても「あけぼの」衛星は貴重なデータを提供しているこ とになる.

プラズマ波動に関連するイオンの加速(TAI, コニクス) については、イオンを加速している波動の特性がほとんど 明らかになっておらず、今後複数衛星の観測(FACTORS 計画)等に残された課題となっている.

#### 参考文献

- [1] E.G. Shelly et al., J. Geophys. Res. 77, 6104 (1972).
- [2] A. Nishida, J. Geophys. Res. 71, 5669 (1966).
- [3] A.J. Dessler and F.C. Michel, J. Geophys. Res. 71, 1421 (1966).
- [4] W.I. Axford, J. Geophys. Res. 73, 6855 (1968).
- [5] A.W. Yau and M. André, Space Sci. Rev. 80, 1 (1997).
- [6] P.M. Banks and T.E. Holzer, J. Geophys. Res. 73, 6846 (1968).
- [7] J. Lemaire and M. Scherer, Phys. Fluids 14, 1683 (1971).
- [8] K. Marubashi, Rep. Ionos. Space Res. Jpn. 24, 322 (1970).
- [9] W.J. Raitt et al., Planet. Space Sci. 23, 1103 (1975).
- [10] W.J. Raitt et al., Planet. Space Sci. 23, 1103 (1975).
- [11] R.W. Schunk and J. J. Sojka, J. Geophys. Res. 102, 11625 (1997).
- [12] A. Glocer et al., J. Geophys. Res. 114, A05216 (2009).
- [13] A. Glocer et al., J. Geophys. Res. 117, A04318 (2012).
- [14] G.V. Khazanov *et al.*, J. Geophys. Res. Space Phys. **124**, 4384 (2019).
- [15] N. Kitamura et al., J. Geophys. Res. 116, A08227 (2011).
- [16] R.W. Schunk and D.S. Watkins, J. Geophys. Res. 86, 91 (1981).
- [17] A.R. Barakat and R.W. Schunk, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 63, 75 (2001).
- [18] J.L. Horwitz and W. Zeng, J. Geophys. Res. 114, A01308 (2009).
- [19] A. Glocer *et al.*, J. Geophys. Res. Space Phys. **123**, 2851 (2019).
- [20] J.H. Hoffman, Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys. 4, 315 (1970).
- [21] H.C. Brinton et al., J. Geophys. Res. 76, 3738 (1971).
- [22] T. Abe et al., J. Geophys. Res. 98, 11191 (1993).
- [23] T. Abe et al., Geophys. Res. Lett. 20, 2825 (1993).
- [24] T. Abe et al., J. Geophys. Res. 109, A09305 (2004).
- [25] C.M. Cully et al., J. Geophys. Res. 108, 1093 (2003).
- [26] A. Glocer *et al.*, J. Geophys. Res. Space Phys. **125**, e2020JA 028205 (2020).
- [27] W. Miyake et al., J. Geophys. Res. 101, 26961 (1971).
- [28] W. Miyake et al., Ann. Geophys. 20, 471 (2002).
- [29] N. Kitamura et al., J. Geophys. Res. 115, A00J06 (2010).
- [30] N. Kitamura et al., Geophys. Res. Lett. 42, 3106 (2015).
- [31] M. André et al., J. Geophys. Res. 120, 1072 (2015).
- [32] R. Lundin et al., Geophys. Res. Lett. 36, L17302 (2009).
- [33] Nordström et al., J. Geophys. Res. 118, 3592 (2013).
- [34] D.A. Brain et al., Geophys. Res. Lett. 42, 9142 (2015).
- [35] J.S. Halekas et al., Geophys. Res. Lett. 43, 1426 (2016).

# • 小特集 「あけぼの」衛星の四半世紀にわたる観測で明かされたジォスペースの姿と将来展望 5. プラズマ波動観測が明らかにしたプラズマ圏の時間・空間変動

# 5. Spatial and Temporal Variation of Plasmasphere Revealed by Plasma Wave Observation

笠原禎也,熊本篤志<sup>1)</sup> KASAHARA Yoshiya and KUMAMOTO Atsushi<sup>1)</sup> 金沢大学学術メディア創成センター,<sup>1)</sup>東北大学大学院理学研究科 (原稿受付: 2022年7月13日)

地表から 50~60 km の高度に存在する「電離圏」上空に広がるプラズマ空間は、地球とともに共回転する高 密度低温のプラズマで満たされた「プラズマ圏」と呼ばれる領域と、希薄で高温の磁気圏プラズマで満たされた 領域に分けられ、その境界面はプラズマポーズ (Plasmapause)と呼ばれる.「あけぼの」衛星は高度 300~10,500 kmの電離圏上層から磁気圏にわたるプラズマ波動観測から、insituの電子密度を決定し、1989年から2015年まで の長期にわたるプラズマ圏の変動を明らかにした.一方、プラズマ圏内にはホイスラーモードや電磁イオンサイ クロトロン (EMIC) モード等の ELF/VLF 帯の波動が存在し、これらの波動の伝搬特性から in situ だけでなく、 波動の伝搬通路に沿ったグローバルな電子密度やイオン組成等を推定することができる.本章では、「あけぼの」 衛星による電磁波、プラズマ波の電磁界観測から明らかになったプラズマ圏の描像を紹介する.

#### Keywords:

plasmasphere, plasmapause, upper hybrid resonance, electron density, DC electric field, magnetic storm, betatron drift, whistler wave, electromagnetic ion cyclotron wave, ray tracing

#### 5.1 はじめに

地表から 50~60 km の高度に存在する「電離圏」上空に 広がるプラズマ空間は、地球とともに共回転する高密度低 温のプラズマで満たされた「プラズマ圏」と呼ばれる領域 と、希薄で高温の磁気圏プラズマで満たされた領域に分け られ、その境界面はプラズマポーズ (Plasmapause) と呼 ばれる.

プラズマ圏の大きさ (プラズマポーズの位置) の変動は, 初期の理論研究[1]から,磁気圏対流電場の変動による現 象と理解されてきた.地球近傍のプラズマは共回転電場・ 対流電場によってドリフト運動するが,電離圏からのプラ ズマ供給によって低温高密度のプラズマで満たされるの は,ドリフト運動の軌跡が閉じた領域に限定される.共回 転電場が一定なのに対し,磁気圏対流電場の強度は,地磁 気活動に応じて変動する.このため,ドリフト運動の開い た軌跡と閉じた軌跡の境界位置は磁気圏対流電場の大きさ に応じて変化する.磁気圏対流電場が弱くなると,ドリフ ト軌跡の Open/Close 境界は地球から遠ざかり,プラズマ 圏は拡大する.一方,磁気圏対流電場が強くなると,ドリ フト運動の Open/Close 境界は地球に近づき,プラズマ圏 は縮小する.

PWS観測器[2]は20 kHzから5.1 MHzの電波, プラズマ 波動の電磁界観測を目的とする.電波, プラズマ波動の電 界および磁界成分は, 直交2軸のワイヤアンテナと直交3 軸ループアンテナを用いてそれぞれ検出された後,スーパ ヘテロダイン方式の周波数掃引受信機でスペクトルデータ に変換される(自然波動観測モード).また,2軸のアンテ ナのうち,1軸を送信アンテナとして,20kHzから 11 MHzのRFパルスを送信して,磁気圏・電離圏プラズマ 中でのプラズマ波動の励起実験,地球電離圏のトップサイ ドサウンディングを行うためのサウンダ観測機能も備えて いる.

VLF 観測器[3]は20 kHz以下のプラズマ波動の電磁界観 測を目的としており,電界および800 Hz以上の磁界成分は PWS と共通のワイヤアンテナおよびループアンテナを用 いる.また 800 Hz 以下の磁界成分の観測は,サーチコイル を用いている[3].VLF 観測器は,14 kHz 以下の電界また は磁界の波形を計測するアナログ受信器である WBA (Wide Band Receiver),100 Hz 以下の波形観測を行う ELF (Extra Low Frequency Range Analyzers),波動の伝搬方 向測定を目的とする PFX (Wave Normal and Poynting Flux Analyzers)等,計5つのサブシステムで構成される.

## 5.2 高域混成共鳴波 (UHR) 計測に基づく地球プ ラズマ圏の観測

#### 5.2.1 地磁気擾乱に対するプラズマ圏動径分布の変動

「あけぼの」衛星は高度 300~10,500 km の電離圏上層か ら磁気圏にわたる領域においてプラズマ波動観測を実施し

Kanazawa University

corresonding author's e-mail: kasahara@staff.kanazawa-u.ac.jp

たが、そのほぼ全領域において、衛星近傍で発生した高域 混成共鳴波 (Upper Hybrid Resonance, UHR) が観測され た[2]. UHR 波は広範囲の波数範囲で比較的平坦な周波数 をもつ波動モードで、位相速度が広い範囲をとることか ら、衛星近傍の低エネルギ帯の成分も含めた広いエネルギ 範囲の電子と共鳴することができる。UHR波の共鳴周波数  $f_{\text{UHR}}$ 、電子サイクロトロン周波数 $f_{\text{ce}}$ 、プラズマ周波数 $f_{\rho}$ の間には $f_{\text{UHR}}^2 = f_{ce}^2 + f_{\rho}^2$ の関係式が成り立つので、プラズマ 波動観測から $f_{\text{UHR}}$ を、磁場観測ないし IGRF モデルから  $f_{ce}$ を決めることで、以下に示すように、未知の $f_{\rho}$ を決定 し、電子密度  $N_{e}$ を求めることが可能となる。

$$N_{\rm e} = \frac{m_{\rm e}\varepsilon_0}{e^2} (2\pi f_{\rm p})^2 = 4\pi^2 \frac{m_{\rm e}\varepsilon_0}{e^2} (f_{\rm UHR}^2 - f_{\rm ce}^2)$$
$$= \frac{(f_{\rm UHR}[\rm kHz])^2 - (f_{\rm ce}[\rm kHz])^2}{81} \times 10^6 [\rm m^3]$$
(1)

この手法で「あけぼの」衛星が飛翔した領域の電子密度 を決定すると、おおむねL=4の磁力線(磁気赤道を4地 球半径の距離で通過する磁力線)の付近を境に内側では  $10^9$ 個 $m^{-3}$ 以上、外側では $10^8$ 個 $m^{-3}$ 以下の電子密度となり、 その境界であるL=4の付近にプラズマポーズが形成される。

「あけぼの」衛星は1989年から2015年までプラズマ波動 観測を実施し、この期間のプラズマ圏の変動を明らかにし た.図1に1989~2000年の波動観測にもとづくこの期間の 電子密度の動径分布の変動を示す。各パネルの上段は電子 密度の動径分布、中段はKp指数、下段はDst指数の1年間 の変動を示している。高度2500km以上の領域のデータを 使用し、磁力線に沿って投影した赤道面での動径に応じ て、0.1地球半径幅の動径 bin 毎に電子密度の中間値をとっ ている.いずれの年においても、L=4付近でプラズマポー ズの位置が変動し、プラズマ圏が拡大・縮小していたこ と、プラズマ圏が縮小するタイミングが磁気活動の増大時 に一致していたことを確認できる. 放射線帯外帯は、磁気 嵐主相時に消失した後、回復相において徐々に放射線帯電 子のフラックスが回復するが、この際の相対論的電子の加 速過程に、プラズマポーズのすぐ外側で生成したホイッス ラモードコーラス波の寄与が示唆されている[4].

#### 5.2.2 磁気嵐時に観測されるプラズマ圏内低密度領域

「あけぼの」衛星によって、プラズマ圏内であるにも関わ らず密度の低い領域が、磁気嵐時にしばしば形成されてい ることが明らかにされた[5]. 図2~4に1995年7月26日, 1989年3月14日,1989年11月30日の磁気赤道通過時に観測 されたプラズマ圏の例を、それぞれ示す.通常、準極軌道 の「あけぼの」衛星は、高緯度でプラズマ圏に入ってから、 磁気赤道を通過し反対半球の高緯度でふたたびプラズマ圏 を出るまでの間、高い周波数のUHR 波動を観測し続ける が(図2)、磁気嵐時にはしばしば、プラズマ圏内に周波数 の低い UHR 波動が観測される領域が出現する(図3,4). こうした低密度領域の成因に関しては、以下の2通りの解 釈がなされている.

(i)環電流の時間変動によってベータトロン電場が生じ、 その電場によるドリフトで磁気赤道を中心に希薄な 磁気圏プラズマが磁場を横切ってプラズマ圏内に流 入している.このドリフト速度をDst指数の時間変化 から見積もると、低密度領域の出現タイミングに整 合する[6].SELENE 衛星による赤道側からの EUV 撮像観測では、磁気赤道面近傍での密度減少が示唆 されている[7].



(ii)変動する磁気圏対流電場の中で、プラズマ圏が拡 大・縮小を経ながら共回転する過程で、動径方向に

図1 「あけぼの」衛星で観測された電子密度の動径分布の長期変動(1989~2000年).各パネルの中段・下段は地磁気指数(Kp,Dst)を示す.



図3 1989年3月14日に観測されたプラズマ圏.11:10~11:55 UTの時間帯にプラズマポーズより内側であるにも関わらず UHR 波動の周波数 が低下した領域が見られる.



図 4 1989年11月30日に観測されたプラズマ圏. 20:50~21:25 UTの時間帯にプラズマポーズより内側であるにも関わらず UHR 波動の周波数 が低下した領域が見られる.

不均一構造を形成することが、米国IMAGE衛星による極からの EUV 撮像によって明らかにされた.これらの観測では、plumes[8]、bulges、notches[9]、fingers、Channels[10]のような名前で報告され、また過去のその場の電子密度観測では detached plasma [11]と呼ばれていた構造に対応していると理解されている.

(i)によれば、環電流の時間変動によるベータトロン電場によるドリフト速度  $V_{\beta}$ は Dst 指数の時間微分を用いて

$$\mathbf{V}_{\beta}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{B(\mathbf{r})} \frac{r_{\rm RC}^2}{r_{\rm RC} - r} \frac{\partial (Dst)}{\partial t} \mathbf{e}_{\rm r}$$
(2)

と表される. ただしここでrはプラズマの位置ベクトル, *B*は磁場強度,  $r_{RC}$ は環電流の半径, *D*stはDst指数,  $e_r$ はr方向の基底ベクトルである[6].

一方,(ii)の検討においては,地磁気活動に対応して変動する磁気圏対流電場を仮定する必要がある.本研究では Kp指数をパラメータとした Volland-Stern 電場モデル[12-14]を用いることにすると,共回転電場・磁気圏対流電場 によるドリフト速度は磁場 B と電位ポテンシャル

$$U(r,\phi) = -\frac{92.4 \text{ kV}}{(r/R_{\rm E})} + \frac{0.045 \text{ kV}(r/R_{\rm E})^2 \sin \phi}{(1 - 0.159 K_{\rm p} + 0.0093 K_{\rm p}^2)^3} \quad (3)$$

から求めることができる.ただしここで φ は磁気地方時

0時からの角度, K<sub>p</sub>は Kp 指数である.

これらのドリフト速度をもとに、プラズマ圏内で低密度 領域が観測された図3,4のイベントで観測された低密度 プラズマの軌跡を4日前までさかのぼってトレースし、そ の地心距離をそれぞれ図5,6に示した.破線はVolland-Stern 電場のみの場合の低密度プラズマの過去の軌跡,お よびプラズマの軌跡のOpen/Close境界を示す.一方,実線 は Volland-Stern 電場+ベータトロン電場の場合の低密度 プラズマの過去の軌跡を示す. 図5 (1989年3月14日)の ケースでは、低密度プラズマが観測された領域(磁気地方 時19.0時・L=2.1で観測)は、Volland-Stern 電場のみの場 合の Open/Close 境界 (L = 3.3, 3.2) より内側で観測されて おり、この電場モデルではプラズマ圏外から低密度プラズ マの輸送が期待できない.一方, Volland-Stern 電場+ベー タトロン電場の場合、10地球半径より外側から低密度プラ ズマが輸送されうることが確認できる.一方,図6 (1989 年11月30日)のケースでは、Volland-Stern 電場のみの想定 でも、Close な軌跡をとる L=3.5 のプラズマより内側の L=3.4にも、10地球半径より外側の低密度プラズマが運ば れうる可能性を示してはいるが、実際に低密度プラズマが 観測された領域(磁気地方時 5.1 時・L = 2.6 で観測)はこ れらよりもずっと内側だった. さらにVolland-Stern 電場+ ベータトロン電場を考えたとしても、このケースでは10地 球半径より外側の低密度プラズマがプラズマ圏内に輸送さ れないことが確認できる.



図5 1989年3月14日に観測されたプラズマ圏内低密度プラズマ の軌跡のバックトレース結果.横軸は低密度プラズマが観 測された時点をt=0とする時刻(単位:時間),縦軸は低密 度プラズマの地心距離(単位:地球半径).



図6 1989年11月30日に観測されたプラズマ圏内低密度プラズマ の軌跡のバックトレース結果.横軸は低密度プラズマが観 測された時点をt=0とする時刻(単位:時間),縦軸は低 密度プラズマの地心距離(単位:地球半径).

このように、大きな磁気嵐においては、ベータトロン電 場の考慮が必要と考えられる一方で、Volland-Stern 電場単 独でも、さらにベータトロン電場を加えても、低密度プラ ズマの観測位置を説明できないイベントも確認された.磁 気嵐時の電場に関しては、Volland-Stern 電場以外にも、 「あけぼの」衛星の電場観測データの統計解析によって明 らかにされた磁気嵐時特有の空間分布[15]が報告されてい る.また IMAGE の EUV 撮像観測との比較によって、従来 の電場モデルでは十分に再現できていない成分(SAPS 電 場等)の導出が行われ[16]、Van Allen Probe で観測され たプラズマ圏の構造との比較も進められている[17].

### 5.3 VLF 波動を利用したプラズマ圏の環境解析 5.3.1 オメガ信号による電子密度分布推定

前章でも紹介したように,従来安定な構造と考えられて いたプラズマ圏は、磁気嵐発生時は言うまでもなく、日常 的にダイナミックな構造変化をすることが、「あけぼの」 衛星をはじめとする種々の内部磁気圏観測衛星で明らかに されている.一般に磁気圏観測衛星に搭載される多くの観 測機器は、衛星軌道上の in situ 観測が主体である. そのた め観測データは時間・空間変化の切り分けが難しく、磁気 圏全体のグローバルな空間構造を把握するには限界があっ た. それに対し、磁気圏には雷やオーロラ等を起源とする 種々の電磁波が存在し、これらは電波源から観測点に至る 伝搬路上のプラズマ環境,特に電子密度(プラズマ周波数) と背景磁場(サイクロトロン周波数)の二つのパラメータ に大きく依存して、波の屈折・遅延特性が大きく変化する ことが知られている.このような波動の伝搬通路や伝搬時 間等のパラメータは、伝搬媒質であるプラズマの密度や背 景磁場等の空間構造をモデルとして与えることで、レイト レイシング[18,19]と呼ばれる方法で理論的に計算できる. 図7は10.2 kHzのホイスラーモードの波を,南半球の高度 100 km からプラズマ圏に向けて入射したときの波の伝搬 通路をレイトレイシングで理論計算した例である. 図中に 描かれた複数の実線が個々の波の伝搬通路を表しており, ホイスラーモード波が、背景磁場に沿うように大きく屈折 し、反対半球まで伝搬することがわかる。また図7の磁気 緯度-3.5~23°にかけ,「あけぼの」 衛星の軌道の1例 (1991年12月26日 5:00~5:20 UT)が、シンボルで示されて いる.このような衛星軌道に沿って、地表付近から伝搬し てくるホイスラーモード波の伝搬パラメータを連続測定 し、その結果がレイトレイシングと合致するようにプラズ マ圏の空間構造を決定できれば、伝搬媒質の情報、すなわ ちグローバルなプラズマ圏の環境が推定できることを意味 する.

「あけぼの」衛星で観測されるVLF帯の電磁波の一つに, 船舶の遠距離航行支援システムであるオメガ信号がある. 世界に8局設置されたオメガ送信局は,10~14 kHzの周波 数帯の電磁波をあらかじめ決められた周波数パターンで送 信しており,「あけぼの」衛星搭載のPFX はプラズマ圏内 において,オメガ信号を軌道に沿って連続受信し,その伝 搬方向を計測できる.加えて,送信局から衛星観測点まで Special Topic Article



図7 ホイスラーモード波の伝搬通路の理論計算.

の伝搬遅延と, PWS 観測器で得た UHR 周波数から軌道上 のローカルな電子密度が得られることから,レイトレイシ ングによる理論値との比較により,プラズマ圏内のグロー バルな電子密度が1軌道毎に推定可能となった[20].さら にGotoetal.[21]は,観測データの統計的な揺らぎを考慮し たモデルを駆使したより柔軟な推定法によって,磁気嵐中 におけるプラズマ圏内のダイナミックな電子密度空間構造 の変化を推定することに成功している.

#### 5.3.2 雷起源ホイスラーの伝搬特性解析

オメガ信号は GPS の発展に伴い1997年秋に停波された が,その後,同解析手法を雷を起源とするホイスラー波に 適用する方法が考案された[22]. 雷起源ホイスラーは,雷 放電に伴い放射される VLF帯の自然電波で,低周波ほど伝 搬速度が遅い周波数分散性があるため,雷放電時にインパ ルスとして放射された波が「ノ」の字が反転したスペクト ルとして受信される(図8).この特性は一般に式(1)で 表され,比例定数 D は「分散値」と呼ばれる.

$$t_{\rm w} = D \cdot \frac{1}{\sqrt{f_{\rm w}}} \tag{4}$$

ただし tw は周波数 fw の波が観測点に届くまでの伝搬遅 延時間を表す.(1)式より図8の縦軸を 1/√F に変換する と、雷起源ホイスラーのスペクトルは直線で表されるた





め, 笠原ら[23]は「あけぼの」衛星搭載 WBA で得られた 14 kHz 以下のアナログ波形信号を周波数解析し, 直線検出 アルゴリズムを適用することで雷起源ホイスラー波を機械 的に検出し,分散 D を算出する方法を開発した. 雷起源ホ イスラーの分散 D は, 波の伝搬距離が長いほど, また伝搬 通路上の電子密度が高いほど大きくなるため, オメガ信号 の伝搬遅延相当の情報として利用可能である.

図9は「あけぼの」衛星で測定した分散 D の時間変化の 一例である. 図中, 増加トレンドと減少トレンドの2つの 分散 D の変化がみられるが, これは衛星が北から南に向 かって飛翔する間に, 南北両半球に存在する雷発生源から ホイスラー波がそれぞれ反対半球へと伝搬していたためで ある. 20年余りに渡り蓄積された WBA データにより, 雷 起源ホイスラーの季節・ローカルタイム等, 種々の統計的 描像が明らかにされつつあり[24], このようにパッシブな VLF 波動受信のみでプラズマ圏内の空間プロファイルを 求める我々の解析法は, 世界的にもユニークで, 「あけぼ の」衛星の長期観測ならではの研究手法といえる.

#### 5.3.3 イオンサイクロトロン波を用いたイオン組成比の 推定

複数種のイオンが存在するプラズマ環境下では、H<sup>+</sup>モード、He<sup>+</sup>モード等、個々のイオン種に対応して異なる分散 関係を持つ複数のイオンサイクロトロン(EMIC)モード の波が伝搬可能である.このとき、電子モードであるホイ スラーモード波と個々のイオン種に対応するEMIC波の間 では、周波数的に隣接する分散ブランチ同士(ホイスラー モードとH<sup>+</sup>モード、H<sup>+</sup>モードとHe<sup>+</sup>モード等)が交差す るクロスオーバー(Crossover)周波数( $f_{cr}$ )や、波の屈折 率が無限大になる低域混成共鳴(Lower Hybrid Resonance, LHR)周波数( $f_{LHR}$ )等の特徴周波数が複数現れる.  $f_{cr}やf_{LHR}$ はイオン組成比の関数として理論的に求められる ため、EMIC 波のスペクトルからこれらの周波数を測定で きれば、観測点や波の伝搬通路上のイオン組成比が推定可 能となる.

プラズマ圏内のイオンは、大半がH<sup>+</sup>イオンで、He<sup>+</sup>イオ ンとO<sup>+</sup>イオンがそれに次ぐメジャーなイオンであるが、 「あけぼの」 衛星 ELF サブシステムは、M/Q (質量対電荷) 比が2のイオン (重水素またはα粒子) が少なくとも数%



MLT [hours] 17.63 18.15 18.52 18.81 19.04 19.27 19.5 19.74 19.97 20.36 図 9 あけぼの衛星軌道に沿って観測された雷起源ホイスラーの分散 D の変化.

程度存在しなければ説明できない EMIC 波を磁気赤道近傍 で発見した[25]. この組成比は電離圏起源の重水素や太陽 風起源の a 粒子のいずれを想定しても,従来の知見では説 明できない大きな数値である[25].

さらに前節で紹介した雷起源ホイスラーも,数百 Hz 以 下のELF帯でイオンと相互作用を起こし,ホイスラーモー ドと EMIC モードの波の分散ブランチが交わるクロスオー バー周波数 fcr でイオンサイクロトロンホイスラーと呼ば れる EMIC 波に変換することが知られている[26].図10 は ELF サブシステムで観測された一例である.f<sub>He</sub>, fo-と書かれた図中の破線は,観測点における He<sup>+</sup>,O<sup>+</sup>イオン のサイクロトロン周波数である.2:28:12~2:28:15 UT に, 80 Hz から 10 Hz へと周波数が下がる雷起源ホイスラーが 見えるが,それに加えて 55 Hz 付近から f<sub>He</sub> に漸近する 「く」の字状に折れ曲がったスペクトルが見られる.これが イオンサイクロトロンホイスラー波とよばれ,元の雷起源 ホイスラーからスペクトルが分離している周波数が,観測 点において EMIC 波へとモード変換を起こした fcr に相当す る.

「あけぼの」衛星では、イオンサイクロトロンホイスラー 波が大量に観測され、He<sup>+</sup>や O<sup>+</sup>だけでなく、従来はプラズ マ圏内でマイナーとされていた M/Q = 2イオンがプラズマ 圏内に広く分布することが示唆されている[27]. イオンサ イクロトロンホイスラーは「Van Allen Probes」衛星によ る波形観測でも多数得られており[28]、プラズマ圏内の重



図10 EMIC ホイスラーのスペクトル図.

イオンの空間分布が統計的に明らかにされつつある.

#### 5.4 まとめと将来への展望

「あけぼの」衛星に搭載されたPWS, VLFの両観測器は, 衛星運用が終了した2015年4月まで観測を継続した.同衛 星は,もともと極域におけるオーロラ粒子の加速機構の解 明が主たるミッションであったが,中低緯度におけるプラ ズマ圏や放射線帯のダイナミックな変化の解明に大きく寄 与する数多くの成果を挙げた.この26年余りに渡る長期観 測データは,地球磁気圏の長期変動の描像を探る手掛かり として,いまなお貴重なデータと言える.

その後,我が国では2016年12月,地球の内部磁気圏の波 動・粒子の網羅的観測をめざして、「あらせ (ERG)」衛 星[29,30]が打ち上げられた.同衛星には、コーラス、ホイ スラー,磁気音波, EMIC等, プラズマ圏内外のプラズマ物 理に大きく寄与する ELF/VLF 帯の波動の生波形観測 や,到来方向推定に用いるスペクトルマトリクス観測, UHR 周波数の決定が可能なHF帯スペクトル受信等の機能 を有するプラズマ波動観測器(PWE)が搭載されている [31,32].特に、磁気音波からEMIC波へのモード変換を捉 えた観測例[33]では、高度3,000 km以下で M/Q=2イオン が10%程度存在し、モード変換に寄与したことが報告さ れ、低高度プラズマ圏や上部電離圏のモデル改良に道を拓 く成果といえる.「あらせ」 衛星 PWE は現在も順調に観測 が継続されており、先行する米国の「Van Allen Probes」衛 星や地上観測網との同時観測によって、プラズマ圏の構 造・変動に関して新たな知見をもたらすともに[34-36], 内部磁気圏における様々な種々の波動・粒子相互作用の素 過程や、その帰結としてのグローバルな磁気圏物理の解明 に、数多くの成果を挙げている.近年はLEO 衛星も数多く 打ち上げられており、これら複数衛星を合わせた同時多点 の電子密度データの比較により、磁気嵐時のプラズマ圏の 変動を引き起こす電場の空間分布・変動の詳細が明らかに されていくものと期待される.

#### 参 考 文 献

- [1] A. Nishida, J. Geophys. Res. 71, 5669 (1966).
- [2] H. Oya et al., J. Geomag. Geoelectr. 42, 411 (1990).

Special Topic Article

- [3] I. Kimura et al., J. Geomag Geoelectr. 42, 459 (1990).
- [4] Y. Miyoshi et al., J. Geophys. Res. 108 (A1), 1004, (2003).
- [5] H. Oya et al., J. Geomag. Geoelectr. 43, S369 (1991).
- [6] H. Oya et al., J. Geomag. Geoelectr. 49, S159 (1997).
- [7] G. Murakami et al., Earth Planets Space 62, e9 (2010).
- [8] J. L. Burch, Rev. Geophys. 43, RG3001 (2005).
- [9] J. Goldstein et al., Geophys. Res. Lett. 30, 2243 (2003).
- [10] B. R. Sandel *et al.*, Space Sci. Rev. **109**, 25 (2003).
- [11] C. R. Chappell et al., J. Geophys. Res. 79, 1861 (1974).
- [12] H. Volland, J. Geophys. Res. 78, 171 (1973).
- [13] D. P. Stern, J. Geophys. Res. 80, 595 (1975).
- [14] N. C. Maynard, and A. J. Chen, J. Geophys. Res. 80, 1009 (1975).
- [15] Y. Nishimura et al., Geophys. Res. Lett. 33, L22102 (2006).
- [16] J. Goldstein et al., J. Geophys. Res. 110, A09222 (2005).
- [17] J. Goldstein *et al.*, J. Geophys. Res. Space Physics **119**,7464, (2014).
- [18] I. Kimura, Radio Sci. 1, 269, (1966).
- [19] I. Kimura and Y. Goto, Ray Tracing, http://waves.is.t. kanazawa-u.ac.jp/
- [20] I. Kimura et al., J. Atomos. Terr. Phys. 63, 1157 (2001).
- [21] Y. Goto et al., Radio Sci. 38, 1060 (2003), doi:10.1029/2002 RS002603.
- [22] 後藤由貴 他:信学論 J89-B, 1188 (2006).
- [23] 笠原禎也 他:宇宙科学情報解析論文誌 4,41 (2015).
- [24] Y. Oike et al., Radio Sci. 49, 753 (2014), doi:10.1002/2014

#### RS005523.

- [25] S. Matsuda *et al.*, J. Geophys. Res. **119**, 4348 (2014), doi: 10.1002/2013JA019370.
- [26] D. A. Gurnett *et al.*, J. Geophys. Res. **70**, 1665, doi:10.1029 /JZ070i007p01665.
- [27] S. Matsuda *et al.*, J. Geophys. Res. **120**, 2783 (2015), doi: 10.1002/2014JA020972.
- [28] S. Matsuda *et al.*, Geophys. Res. Lett. **43**, 28, (2016), doi: 10.1002/2015GL066893.
- [29] Y. Miyoshi *et al.*, AGU Monograph **199**, 103, (2012), doi: 10.1029/2012BK001304.
- [30] Y. Miyoshi *et al.*, Earth Planet Space **70**, 101 (2018), doi: 10.1186/s40623-018-0862-0.
- [31] Y. Kasahara *et al.*, Earth Planet Space **70**, 86 (2018), doi: 10.1186/s40623-018-0842-4.
- [32] A. Kumamoto *et al.*, Earth Planet Space **70**, 82 (2018), doi: 10.1186/s40623-018-0854-0.
- [33] Y. Miyoshi *et al.*, Geophys. Res. Lett. 46, 5662, (2019), doi: 10.1029/2019GL083024.
- [34] Y. Obana *et al.*, J. Geophys. Res. Space Phys. **126** (2021), doi:10.1029/2020JA029073.
- [35] N. Thomas *et al.*, J. Geophys. Res. Space Phys. **126** (2021), doi: 10.1029/2020JA027917.
- [36] A. Shinbori *et al.*, J. Geophys. Res. Space Phys. **126** (2021), doi: 10.1029/2020JA028943.



# 6. 「あけぼの」衛星による放射線帯の観測

# 6. Van Allen Radiation Belts; From Akebono to Arase

 三好由純
 MIYOSHI Yoshizumi
 名古屋大学宇宙地球環境研究所 (原稿受付:2022年7月20日)

1989年に打ち上げられた「あけぼの」衛星は、極域の探査に加えて、内部磁気圏、放射線帯領域の観測も行った. 放射線帯電子の加速過程は、放射線帯の発見以来、外部供給過程と呼ばれる断熱加速過程が主と考えられてきた. 一方「あけぼの」衛星等の観測から、これまでとは異なる概念ある内部加速と呼ばれるホイッスラーモード波動とのサイクロトロン共鳴による加速過程が存在することが示され、内部磁気圏に存在する6桁以上異なるエネルギー階層に分布するプラズマ・粒子群はプラズマ波動を介して動的に結合するエネルギー階層間結合が重要な役割を果たしていることがわかってきた. この問題意識は、2016年に打ち上げられた「あらせ」衛星の観測へとつながり、現在、「あらせ」衛星によって多くの新たな知見が得られてきている.

#### Keywords:

Akebono satellite, Radiation Belts, Electron acceleration, Cyclotron resonance, Cross-energy coupling

#### 6.1 はじめに

地球周辺の宇宙空間であるジオスペース,特に内部磁気 圏と呼ばれる地球近傍の領域には,放射線帯(ヴァン・ア レン帯)と呼ばれる領域が存在する.放射線帯には, 数百 ke から数十 MeV のエネルギーを持つイオン,電子か ら構成され,ジオスペースで一番エネルギーの高い粒子が 地球の磁場に捕捉されている.

図1に,放射線帯電子の空間構造の模式図(左)と「あらせ」衛星による2MeVの電子の観測結果(右)を示す.電子の放射線帯は,「内帯」と「外帯」という地球を取り囲む二つのトーラス状の分布と,その間に「スロット」と呼ばれる電子のフラックスが著しく少ない領域から形成されていることが知られている.なお,近年の研究から, 電子の「内帯」は1MeV以下では見られるものの,1MeV



図1 (左)放射線帯電子の空間分布の模式図.(右)「あけぼの」 衛星が観測した放射線帯電子(>2.5 MeV)の電子フラック スの空間分布.

Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

以上については,有意なフラックスを持つ内帯はないこと がわかっている.一方,イオンの放射線帯はこのような二 重構造ではなく,単一のトーラス状の分布として存在して いる[1,2].

放射線帯については、「あけぼの」衛星がそのミッショ ンを終えた後、2016年に「あらせ」衛星が打ちあがり、多 くの発見を行っている.「あらせ」衛星の最新の成果につ いては、[3,4]等をご覧いただきたい.

#### 6.2 宇宙天気研究と放射線帯

私たちの現代生活にとって必要不可欠なGPS衛星や気象 衛星の多くは,放射線帯の中あるいは放射線帯を横切るよ うな軌道で運用されている.放射線帯のエネルギーが高い 粒子は,帯電やCPUのビット反転等,人工衛星に様々な影 響を及ぼす.特に,放射線帯の電子は,深部帯電と呼ばれ る人工衛星内部の帯電を引き起こすことが知られている. 実際,放射線帯電子のフラックスが増加した際に,人工衛 星の異常が起きやすい傾向があることも指摘されている[5].

人間活動と密接にかかわる太陽地球系科学の研究のこと を「宇宙天気研究」と呼ぶが、人類が宇宙空間で安全に安 心して活動していくためにも、放射線帯の研究は、宇宙天 気研究において特に重要なものとされており、変動メカニ ズムの解明と変動の予測を目指した研究が世界で行われて いる.

#### 6.3 放射線帯の時間変化

図2の上段に、「あけぼの」衛星が観測した2.5 MeV 以

author's e-mail: miyoshi@isee.nagoya-u.ac.jp



図2 「あけぼの」衛星が観測した1993年の放射線帯電子 (> 2.5 MeV)のデータ.縦軸はL値.色で電子のフラック ス量を表す.下段は磁気嵐の指標である Dst 指数.

上の電子の時間変化を示す.この図は,横軸に時間,縦軸 にL値と呼ばれる地球からの距離をとり,カラーで電子の フラックスを示したものである.ここでL値とは,赤道面 を通る磁力線の位置を地球半径で規格化したもので,たと えばL=4の場合,地球半径の4倍の場所をとおる磁力線 を表している.下のパネルは,Dst指数と呼ばれる磁気嵐 の指標であり,この指数がマイナスに大きく振れると,磁 気嵐が発生していることを意味する.

図2は、1993年の1月1日から6月30日までの期間に対応しているが、この間、磁気嵐が起きると、外帯の電子はいったん消失し、その後ゆっくりと増加し、外帯が再形成されていることが何度も起きていることが分かる。このように外帯の再形成の際、電子フラックスは2桁以上も増大することもあるが、一方でフラックスの増加が起きない磁気嵐や、磁気嵐前に比べてフラックスが減少する場合など、磁気嵐時の外帯の変化は多様な変化を示す[6].

#### 6.4 エネルギー階層間結合による粒子加速

それでは、放射線帯外帯の電子フラックスは、どのよう なメカニズムによって変動するのだろうか、磁場中を運動 する荷電粒子は、断熱不変量と呼ばれる保存量が存在して おり、第一断熱不変量(サイクロトロン運動に対応)、第二 断熱不変量(磁力線に沿った往復運動に対応)、第三断熱 不変量(地球の周りを周回するドリフト運動に対応)を定 義することができる.このうち第一断熱不変量*M*は(非相 対論の場合)、以下のように荷電粒子の磁力線に垂直方向 のエネルギー*E*<sub>⊥</sub>と、背景磁場*B*の比で与えられる.

 $M = \frac{E_{\perp}}{B}$ 

このため,地球に近く磁場の強い場所に電子が輸送され ると,電子のエネルギーが上昇する(ベータトロン加速). この輸送においては,上記の3つの断熱不変量のうち,第 三断熱不変量のみが破れて,他の2つの不変量は保存して いる.この過程を「断熱過程」あるいは「外部供給過程」と 呼び,1950年代末の放射線帯の発見以来,放射線帯電子加 速の主要因として考えられてきた.このとき,電子の輸送 を引き起こしているのは,磁気圏に存在する ULF帯の MHD 波動(Fast mode 波動)と考えられており,1990年代 以降の理論研究やシミュレーション研究において,この MHD 波動との相互作用の素過程の理解も進み,効率的な 電子の加速が可能であることも示されている[7].

一方,1990年代末に,放射線帯の内部でプラズマ波動と のサイクロトロン共鳴によって電子を加速するという考え 方が提案された[8].サイクロトロン共鳴の条件は,次式 で与えられる.

$$\omega - k \cdot v = \frac{n\Omega_{\rm e}}{\gamma}$$

ここで $\omega$  は波動の周波数, k は波動の波数ベクトル, v は 電子の速度ベクトル,  $\Omega_e$  は電子のサイクロトロン周波数,  $\gamma$  はローレンツファクター, n は整数である. この過程で は、特にVLF帯のホイッスラーモード帯の波動との相互作 用による加速が重要な役割を担っていると考えられてい る. また, この過程はすべての断熱不変量が破れるため 「非断熱加速」あるいは「内部加速説」と呼ばれる.

この「内部加速」においては、

- ホイッスラーモード波動によって加速される種となる電子群(~数百 keV)
- ホイッスラーモード波動を励起する電子群(~数+ keV)
- 3)背景プラズマ媒質として、ホイッスラーモード波動の伝搬特性を決める冷たいプラズマ群(~eV)
- 4)加速された生成した放射線帯電子(~MeV)

と、6桁以上にわたるエネルギー範囲に存在するプラズ マ・粒子群が、波動粒子相互作用によって動的に結合しな がら、放射線帯電子を作り出していく.このことを「エネ ルギー階層間結合(cross-energy coupling)」と呼び[9]、放 射線帯電子加速を理解する重要なコンセプトとなっている.

図3に、内部磁気圏に存在する各エネルギー階層のプラ ズマ・粒子群の分布と概形と「外部供給」、「内部加速」そ れぞれのつながりを示す.背景媒質として密度を担う冷た



図3 内部磁気圏に分布するプラズマ・粒子群を地球からの距離 (L値)とエネルギーとで分類したダイアグラム.放射線帯 外帯の形成過程として、MHD波動による外部供給過程 と、VLF帯のプラズマ波動による内部加速過程を示し、そ れぞれの加速過程にどのエネルギー階層のプラズマ・粒子 が関わっているかを図示している[1]. いプラズマ群は「プラズマ圏」と呼ばれており,プラズマ 圏界面(plasmapause)と呼ばれる場所より内側で高密度 の領域を形成している.また,ホイッスラーモード波動を 励起する電子群は,プラズマシート(plasma sheet)および 環電流(ring current)群と呼ばれており,その場所のプラ ズマ圧力を担っている.

この図からもわかるように、「内部加速」においては、 広いエネルギー階層のプラズマ・粒子群が相互作用するた め、その過程の実証には、広いエネルギー階層のプラズ マ・粒子群の観測、またプラズマ波動の観測が重要となる.

「内部加速」が提唱された当初は、内部磁気圏のプラズマ 環境や加速効率を考えた場合に、放射線帯の形成には不十 分であると思われてきた.1990年代末から2000年代にかけ て、「内部加速」の過程の研究が進み、その概念が確立し ていく際に、「あけぼの」衛星は大きな役割を果たした. 次に、その「あけぼの」衛星が観測した放射線帯変動につ いて紹介していく.

#### 6.5 あけぼの衛星による観測

#### 6.5.1 あけぼの衛星

本小特集の他稿で紹介されているように,「あけぼの」 衛星は,オーロラ粒子加速過程の解明をめざして,1989年 に打ち上げられ,2015年まで継続した観測を行った.「あ けぼの」衛星の軌道は極軌道と呼ばれるものである. その 探査領域は極域だけではなく,図1に示されているように 内部磁気圏の領域(L値)を広くカバーしており,放射線帯 の観測も行った[10-12]. なお,衛星の(初期)遠地点高度 が約10000 kmであるため,「あけぼの」衛星は放射線帯外 帯の赤道面の計測は行うことはできない.

「あけぼの」衛星には、9つの観測器が搭載されている. そのうちの一つである放射線モニター(RDM)によって [13,14],放射線帯の粒子のフラックスの計測を行ってい た.また,低周波プラズマ波動計測器(VLF)によってホ イッスラーモード波動の観測が行われるとともに[15],高 周波プラズマ波動計測器(PWS)によって,高域混成周波 数(Upper Hybrid Resonance Wave: UHR)の観測が継続的 に行われていた[16].このUHR 波動の周波数は、その場 所のプラズマ周波数と電子サイクロトロン周波数によって 決まるため、UHR波動の周波数からその場のプラズマ密度 を決めることができる.

#### 6.5.2 あけぼの衛星による磁気嵐時の観測

図4に1993年11月の磁気嵐時に,「あけぼの」衛星が内 部磁気圏を観測した結果を示す.下段には,プラズマ波動 の周波数スペクトルと放射線帯電子のフラックスのL値の 分布を示している.この図から,放射線帯電子の増加過程 は,プラズマ圏の外側で発生しており,また,その場所で



図4 1993年11月におきた磁気嵐期間について、「あけぼの」衛星による内部磁気圏の観測結果.上図は、地磁気活動の指数である AE、 Kp、Dst の各指数を表す.下段は、それぞれの期間に対応する「あけぼの」衛星の観測結果で、プラズマ波動のデータと放射線帯電 子フラックスのデータをL値に対してプロットしている.波動のデータは色でその強度を表し、赤く示されているのがホイッスラー モード波動に対応する.また、矢印で、UHR 周波数から読み取られたプラズマポーズの位置が示されている.

は強いホイッスラーモード波動が,持続して励起している ことも観測されている[17].さらに,「あけぼの」衛星に よる電子のピッチ角分布の観測やエネルギースペクトルの 観測からも,ホイッスラーモード波動による加速過程が, 放射線帯電子フラックスの増加に重要であることを示す結 果が得られている.このような事例は,「あけぼの」衛星 でしばしば観測されており,ホイッスラー波動による内部 加速過程を示す結果となっている[17,18].

図5は、図4の期間を含む1993年11月の「あけぼの|衛 星の観測結果を示したものである[19].この期間、2つの 磁気嵐が観測されており、前半(図4に対応する期間)の 磁気嵐では放射線帯電子が増大するのに対し、後半の磁気 嵐では顕著な増加が起きていない事例を示している. 前半 に発生した磁気嵐では、「あけぼの」衛星は強いホイッス ラーモード波動が持続的に観測したのに対し、後半に発生 した磁気嵐では、観測されたホイッスラーモード波動の活 動は限定的なものとなっている.また,低高度衛星の観測 データからは、前半の期間ではホイッスラーモード波動を 励起する電子群が連続的に内部磁気圏に注入されているの に対し、後半の磁気嵐では電子群の注入がほとんど起きて いないことが示されている. ここで示された放射線帯電子 の増加の違いは、放射線帯電子の加速がホイッスラーモー ド波動によって起こるとする「内部加速」でうまく説明す ることができ、「内部加速」が加速に重要な役割を果たし ていることを示すものである.一方,別の研究からは、こ の2つの期間の両方において,外部供給に係るULF帯の波 動の強度が増加していたことが示されており[20],「外部 供給」では、この2つの磁気嵐における放射線帯電子の増 加の違いを説明することは困難である. このような研究を 通して,「あけぼの」衛星の観測は,「内部加速」の概念の 確立と実証に大きな役割を果たした.

#### 6.5.3 あけぼの衛星による電子急増過程の観測

「あけぼの」 衛星は, 放射線帯外帯内側およびスロット領



図5 1993年11月に起こった2つの磁気嵐時の内部磁気圏の変動 を時間とL値について示したもの.上から「あけぼの」衛星 が観測した放射線帯電子(>2.5 MeV),低高度衛星が観測 した30 keV の電子,「あけぼの」衛星が観測したホイッス ラーモード波動を示す.下段は、Dst 指数であり、この期間 に2回磁気嵐が発生していることがわかる.

域付近において、しばしば、磁気嵐中のサブストームに関 連して電子フラックスの急激な増加が起こることを観測し ている[12,19].図6は、L<3のスロット領域におい て、放射線帯電子フラックスが増加した例を示したもので ある[21].この増加の時間スケールは、「外部供給」およ び「内部加速」で予想される時間スケールよりも短い場合 があり、磁気嵐中におこるサブストームの誘導電場が大き な役割を果たしている可能性が指摘されている.

#### 6.5.4 あけぼの衛星によるピッチ角分布の観測

図7に、「あけぼの」衛星が観測した25 MeV の電子の フラックスとピッチ角分布を示す[22].ここで、正の値の 場合は、ピッチ角90度付近の電子のフラックスが高いパン ケーキ型のピッチ角分布であることを、逆に負の値の場合 には、ピッチ角90度付近のフラックスが低いバタフライ型 の分布であることを示している.L=1.8 から2.5の赤道面 付近において、バタフライ型の分布が発達している領域が あることがわかる.内帯からスロット領域において、この ような特徴的なピッチ角分布が存在することを観測したの は「あけぼの」衛星が初めてである.「あらせ」衛星の観測 からもバタフライ型の分布の存在が指摘されており[23]、 データ駆動型のシミュレーションによってプラズマ波動に よる散乱によって、このようなピッチ角分布が形成されて いることが実証されている[24].



図6 2005年8月に「あけぼの」衛星によって観測されたスロット領域での外帯電子増加の例.下段のaからbの期間の間に、L=2.5付近を中心に、>2.5 MeVの電子フラックスが3桁以上増加していることがわかる[21].





図7 「あけぼの」衛星が観測した放射線帯におけるピッチ角分 布の空間分布.(左)>2.5 MeV 電子のフラックスの分布. (右)ピッチ角αについて、ピッチ角分布 sin<sup>n</sup>α をで表した ときのnの分布.正の場合だと、ピッチ角90度付近のフラッ クスが多いパンケーキ型の分布を、負の場合だと、ピッチ 角90度付近のフラックスが少ないダンベル型の分布を示す [22].

#### 6.6 太陽風の変化と放射線帯の関係 6.6.1 放射線帯の増加を引き起こす太陽風

放射線帯外帯の電子の増加は、太陽風の速度とよい関係 があり、高速の太陽風が到来した際に、放射線帯外帯電子 フラックスは増加する傾向を持つ[25].また、南向きの惑 星間空間磁場(IMF)も、外帯電子フラックスの増加には 重要な影響を及ぼす[26].高速太陽風は、惑星間空間にお いては、Coronal Mass Ejection(CME)や Coronal Hole Stream(CHS)に対応しており、特に南向きの IMF を含む CHS が到来した際に、外帯電子は大きく増加することも知 られている[26, 27].

#### 6.6.2 太陽風とエネルギー階層間結合の関係

6.5章において,放射線帯外帯電子の増加には,ホイッス ラーモード波動によるサイクロトロン共鳴による内部加速 が重要な役割を果たしていることを紹介した. それでは、 上記のように放射線帯の増加を引き起こす太陽風が到来し た際に、内部磁気圏では内部加速による加速は起きている のであろうか? また, 逆に放射線帯の増加があまり起き ない北向き IMF を含む CHS が到来した際には、内部加速 は起きていないのであろうか? この問いにこたえるため には, 数多くの CHS 到来イベントを集め, それらのイベン トを南向き IMF を含むイベントと、北向き IMF を含むイ ベントとに分類して、そのときに放射線帯で何が起こって いるかを調べる必要がある. 十分な数のイベントを解析す るためには、数年にわたって均質な観測データセットを用 意する必要がある.「あけぼの」衛星は,1989年以来,長期 間にわたって放射線帯、ジオスペースの観測を行ってい る.したがって「あけぼの」衛星のデータを用いることで、 このような統計解析を実施することが可能となる.

[28]は、1994年から2008年において発生した約200例の CHS イベントを用いた統計解析を行った. 図8の左側 は、南向きの IMF が支配的な CHS,右側は左向きの IMF が支配的な CHS に対応する.これは、Superposed Epoch Analysis と呼ばれる解析手法で、特定の時間原点を基準 として、複数のイベントデータを重ね合わせ、変化の平均 描像を抽出するものである.ここでは、Stream Interface (流れの接触面) と呼ばれる低速の太陽風と高速の太陽風 が切り替わるタイミングをt=0として、様々な種類のデー タに対して Superposed Epoch Analysis を行っている. 図 は、上から(a) (f)ホイッスラーモード波動を励起する電子 群のフラックス、(b) (g) 背景プラズマ密度、(c) (h)ホ イッスラーモード波動の強度、(d) (i) 2.5 MeV 電子のフ ラックス、そして(e) (j) 静止軌道の 2 MeV 電子フラックス を示している.このうち、(b)、(c)、(d) ((g)、(h)、(i)) が「あけぼの衛星」によって取得されたデータで、縦軸を 地球からの距離(L値) として表示されている.

左側と右側を比較すると、南向き IMF が支配的な CHS が到来すると、その後、数日間にわたって、地球から遠い 場所(L値が大きい場所)から地球に近い場所において、ホ イッスラーモード波動を励起する電子群のフラックスが増 大していることがわかる.また、このとき、プラズマ圏の 縮小が起こり、プラズマ密度が低下している.この場所に おいて、ホイッスラーモード波動が励起し、その活動は数 日間持続し、放射線帯外帯の電子フラックスの増加も起き ている.一方、このような変化は、北向き IMF が支配的な CHS については見られないものである. Stream Interface



図8 南向き IMF が支配的な高速太陽風(左)と北向き IMF が支配的な高速太陽風(右)について、Stream Interface を時間原点として、放射線帯の電子加速に係るキーパラメータに対して Superposed epoch analysis を行ったもの. (a) (f) 30 keV 電子フラックス, (b) (g) 背景のプラズマ密度, (c) (h)ホイッスラーモードの波動, (d) (i) > 2.5 MeV 電子フラックス [28].

が通過した直後に,一時的にホイッスラーモード波動の強 度増加が起こるものの,その後,ホイッスラーモード波動 は元のレベルへと戻る.また,放射線帯外帯の電子フラッ クスの増加も起こっていないことがわかる.

これらの結果をふまえて,筆者らが提案している太陽 風-放射線帯電子の加速に関するモデルの模式図を図9に 示す[28]. 詳細は割愛するが、南向きの IMF が支配的な CHS が到来すると、ジオスペースではオーロラ活動に代表 される活動度が高い状態が数日にわたって発生し、地球か ら遠いところから内部磁気圏に向かって、ホイッスラー モード波動を励起させる高温電子が連続的に注入される. このような注入に起因して、ホイッスラーモード波動が数 日間にわたって励起を続け、その結果、放射線帯外帯電子 の加速が起こると考えられる.一方,北向き IMF が支配的 な際には、ジオスペースの活動度が低く、高温電子の注入 も限定的にしか発生しないため、「内部加速」が起こらず、 放射線帯外帯電子の増加も起こらないと考えられる. な お, IMF の南北の向きに関わらず, 高速太陽風が到来した 際には、「外部供給」に係る MHD 波動は活性化すること が予想される.このように、IMFの南北の向きで、放射線 帯外帯電子フラックスの増加に顕著な差が生じるのは, 「内部加速」が支配的な加速機構であることを示すもので ある.



図9 南向き IMF が支配的な高速太陽風(左)と北向き IMF が支 配的な高速太陽風(右)におけるジオスペースの違い。南 向き IMF が支配的な高速太陽風の場合には、オーロラ活動 等に伴って、高温プラズマが内部磁気圏に連続注入され、 その結果、ホイッスラーモード波動の励起と高エネルギー 電子の加速が促進され、放射線帯電子の増加が起こる [28].

#### 6.7 ジオスペース探査衛星あらせへ

「あけぼの」衛星は、26年以上にわたり、放射線帯、ジ オスペースの観測の長期間の観測を行った.「あけぼの」 衛星が示した放射線帯外帯電子の「内部加速」、そしてエ ネルギー階層間結合の概念は、放射線帯外帯電子のダイナ ミクスを理解するための基本的な考え方として認識されて いる.

一方,「あけぼの」衛星は,磁気赤道面での観測を行っ ていないため,ホイッスラーモード波動による加速が起き ている現場そのもの観測を行うことはできなかった.ま た,「あけぼの」衛星は,波動励起を担うと考えられてい るエネルギー帯の粒子観測器は搭載されておらず,また低 エネルギー粒子の観測器は放射線帯の中では機器を OFF にするため,エネルギー階層間結合を担う分布のいくつか のエネルギー帯のプラズマ・粒子の観測は行われていな い.このため,内部加速およびエネルギー階層間結合の素 過程を解明するためには,放射線帯の内部,特に赤道面付 近で広いエネルギー帯にわたるプラズマ・粒子,および電 磁場の総合観測を実現する必要がある.

2000年代以降,放射線帯の研究は,ジオスペース研究お よび宇宙天気研究の最重要課題とされ,新たな科学衛星観 測も計画,推進されている.2012年に米国 NASA によって 打ち上げられた科学衛星 Van Allen Probes [29] は,放射線 帯の赤道面付近において詳細な粒子と電磁場の観測を行 い,位相空間密度と呼ばれる量を正確に計測することに よって,「内部加速」が存在していることを実証した[30].

一方,内部加速を担うサイクロトロン共鳴については, その後の理論的な研究の進展により,コーラスと呼ばれる 非線形ホイッスラーモード波動の励起過程や,コーラスに よる電子加速過程が研究されている[31,32].このような 非線形波動粒子相互作用を観測的に実証するためには,詳 細なプラズマ波動の波形観測や,高い時間分解能での粒子 分布関数の観測が必要となる.

このような観測を実現するために、日本の JAXA は、ジ オスペース探査衛星 (ERG/あらせ)を開発し, 2016年に打 ち上げ,現在観測を行っている[33].「あらせ」衛星は, 広いエネルギー帯域のプラズマ・粒子の観測と、広い周波 数帯にわたって電磁場の観測を実現し,放射線帯,ジオス ペースの描像を大きく塗り替えている.「あらせ」衛星は, コーラス波動による放射線帯電子の内部加速を実証すると ともに[34],特に非線形波動粒子相互作用が,放射線帯粒 子の加速や散乱を担っていることを、様々な観測から実証 的に明らかにしている[35]. さらに、世界で初めて、無衝 突プラズマ系で波動粒子相互作用がピッチ角散乱を担って いることを実証するとともに[36],波動と粒子のエネル ギー交換過程の実証的な観測にも成功する[37] など、数 多くの成果を上げている. また, 波動粒子相互作用による ピッチ角散乱によって, 放射線帯高エネルギー電子が中層 大気に降り込み、オゾン層を破壊していることも見いださ れ,新たにプラズマ波動を介した磁気圏-大気圏結合とい う問題意識へとつながっている[34]. 最近のあらせの成果 については、[3,4,38]などの総説も参考いただきたい.

「あけぼの」衛星は、2015年4月にその観測を終了した. 「あけぼの」衛星は、放射線帯がダイナミックに変化し、プ ラズマ波動による加速過程が重要であることを示した. 「あけぼの」衛星が提示した内部加速、エネルギー階層間結 合に関する課題が、新たな科学衛星である「あらせ」に受 け継がれ、新たな発見によって放射線帯そしてジオスペー スの描像を大きく変革しつつある.

#### 参考文献

- [1] 三好由純:放射線帯,「総説宇宙天気」(柴田一成,上 出洋介編)(京都大学出版会,2011)p329.
- [2]小野高幸,三好由純:太陽地球圈(共立出版, 2012).
- [3] 三好由純他:プラズマ・核融合学会誌 97,269 (2021).
- [4] Y. Miyoshi et al., Space Sci. Rev. 218, 38 (2022).
- [5] V. Pilipenko et al., Adv. Space Sci. 37, 1192 (2006).
- [6] G.D. Reeves et al., Geophys. Res. Lett. 30, 1529 (2003).
- [7] S.R. Elkington et al., Geophys. Res. Lett. 26, 3273 (1999).
- [8] D. Summers *et al.*, J. Geophys. Res., 103, 20487 (1998).
- [9] Y. Miyoshi *et al.*, AGU monograph, **199**, 103 (2012).
- [10] T. Obara et al., Earth Planet Space, 52, 41 (2000).
- [11] T. Obara et al., J. Atm.Solar-Terr. Phys. 62, 1405 (2000).
- [12] T. Obara et al., Earth Planet Space 53, 1163 (2001).
- [13] T. Kohno, AGU monograph 97, 217 (1996).
- [14] T. Nagai, AGU monograph 199, 177 (2012).
- [15] I. Kimura et al., J. Geomag. Geoelectr. 42, 459 (1990).

- [16] H. Oya et al., J. Geomag. Geoelectr. 42, 411 (1990).
- [17] Y. Miyoshi et al., J. Geophys. Res. 108, 1004 (2003).
- [18] Y. Kasahara et al., Geophys. Res. Lett. 36, L01106 (2009).
- [19] Y. Miyoshi et al., J. Geophys. Res. 112, A05210 (2007).
- [20] G. Rostoker et al., Geophys. Res. Lett. 25, 3701 (1998).
- [21] T. Nagai et al., J. Geophys. Res. 111, D15216 (2006).
- [22] A. Morioka et al., Geophys. Res. Lett. 28, 931 (2001).
- [23] S. Kurita et al., Geophys. Res. Lett. 45, 7996 (2018).
- [24] S. Saito et al., J. Geophys. Res. 126 (2021).
- [25] G. A. Paulikas and J. B. Blake, AGU monograph 21 (1979).
- [26] Y. Miyoshi and R. Kataoka, J. Geophys. Res. 113, A03S09 (2008).
- [27] Y. Miyoshi and R. Kataoka, Geophys. Res. Lett. **32** (2005).
- [28] Y. Miyoshi *et al.*, Geophys. Res. Lett. **40** (2013).
- [29] B. Mauk *et al.*, Space Sci. Rev. **179**, 3 (2012).
- [20] D. Mauk *et ul.*, Space Sei, Rev. **119**, 5 (2012)
- [30] G. Reeves *et al.*, Science **341**, 991 (2013).
- [31] Y. Katoh and Y. Omura, Geophys. Res. Lett. **34** (2007).
- [32] Y. Omura *et al.*, J. Geophys. Res. 114 (2009).
- [33] Y. Miyoshi *et al.*, Earth Planet Space **70** (2018).
- [34] Y. Miyoshi *et al.*, Sci. Rep. 11 (2021).
- [35] S. Saito *et al.*, J. Geophys. Res. **126** (2021).
- [36] S. Kasahara *et al.*, Nature **554**, 337 (2018).
- [37] K. Asamura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 245101 (2021).
- [38] S. Kanekal and Y. Miyoshi, Prog. Earth Planet. Sci. 8, 35 (2021).



小特集「あけぼの」衛星の四半世紀にわたる観測で明かされたジオスペースの姿と将来展望

# 7. まとめと将来計画への発展

## 7. Summary and Future Perspectives

松 岡 彩 子, 三 好 由 純<sup>1)</sup>,加 藤 雄 人<sup>2)</sup> MATSUOKA Ayako, MIYOSHI Yoshizumi<sup>1)</sup> and KATOH Yuto<sup>2)</sup> 京都大学 大学院理学研究科,<sup>1)</sup>名古屋大学 宇宙地球環境研究所,<sup>2)</sup>東北大学 大学院理学研究科 <sup>(原稿受付:2022年8月9日)</sup>

#### 7.1 「あけぼの」衛星の成果を発展させた衛星計画

この小特集で紹介したように、「あけぼの」衛星はオー ロラ等の極域現象と放射線帯・プラズマ圏等の中低緯度領 域の探査に重要な役割を果たした.「あけぼの」衛星の成 果から直接あるいは間接的に触発された着想に基づき新た な科学目標を設定し、技術の進歩によって性能を向上させ た観測機器を用いて、新たな発見をめざした衛星ミッショ ンが多く計画された.「あけぼの」衛星自体が26年という 長期間にわたって観測を継続したため、「あけぼの」衛星 の観測に並行して実現した新規ミッションもあり、「あけ ぼの」衛星との同時観測が行われた.ここでは更に、「あ けぼの」の成果が背景となる衛星ミッションを、現在計画 段階のものも含めて紹介する.いくつかはこの特集の他の 章で既に述べられたものと重複するが、まとめて総観す る.

第2章「オーロラ粒子加速」および第3章「オーロラ現 象と AKR」でも詳解したように、地球のオーロラ現象と関 連する物理過程について、「あけぼの」衛星は多くの重要 な成果をあげた. それに続く「れいめい」 衛星, 海外のオー ロラ観測衛星による研究の進展を経て、オーロラ現象には 広いレンジの時間・空間スケールを持つ現象が関連するこ とが認識され、その間の相互作用が着目されるようになっ た.オーロラの帯であるオーロラオーバルは数百 km の幅 を持つが、電子を加速しオーロラの発光を生む機構はそれ よりもはるかに小さい空間構造を持つ. また磁気嵐は日単 位の現象であるが、そこで重要な役割を担う電子のサイク ロトロン周期は何オーダーも短い.「あけぼの」衛星をは じめ従来の単一の衛星で行った観測では、特にミクロの時 間変化と空間変化の分離が常に問題となった.現象の時間 変化と空間変化を分離する観測は、複数の衛星を近接して 飛行させることによって可能となり, 昨今の小型衛星技術 の発達により実現可能性が増している.現在日本では、複 数衛星を用いた編隊観測により現象の時間変化と空間変化 を分離するFACTORS計画が検討されており、ミクロとマ クロの両方の時空間スケールでのオーロラ現象の物理的描 像が明らかにされると期待されている.一方,「あらせ」 衛星によって,高度30000 kmにおいても,沿磁力線電場が 存在することが発見された[1].沿磁力線電場構造が,従 来考えられていたよりもはるかに上空に広がっていること は,これまでの加速域形成理論,また磁気圏-電離圏結合 系における加速域の役割についての理解に見直しを迫るも のであり,今後,さらに広い高度域にわたった観測の重要 性を示すものである.

近年のオーロラに関する新たな成果は地球に留まらず, 惑星で現れるオーロラに関する研究において大きな進展が みられた. NASA の木星探査機 JUNO による木星オーロラ の観測により、分散性アルフベン波(Dispersive Alfven Wave, DAW) が電子の加速に重要な寄与をしていること が発見された[2,3]. DAW は地球のオーロラを光らせる電 子を加速する現象としても観測されており、「あけぼの」 衛星のデータを使った初期的な研究も成されている[4]. しかし、地球におけるオーロラ電子加速の主な要因は静的 な沿磁力線電場であると考えられているのに対し、木星に おいては DAW による寄与のほうが大きいという報告があ り、今後の研究の進展が望まれる。また、地球と異なり惑 星規模の磁場を持たない火星においてもオーロラ現象が見 つかった. ESA の火星探査機 Mars Express のイメー ジャーにより、火星の磁気異常領域において極端紫外光の オーロラが発見された[5,6].地球のオーロラは大気中の 窒素や酸素が加速された電子で励起され発光するのに対 し,火星のオーロラは一酸化炭素と二酸化炭素の励起によ るものであり、地球とは波長が異なる要因となっている.

第4章「極域からのイオンアウトフロー」で述べた, 「あけぼの」衛星が観測した地球極域から流出する電離圏 起源のイオンは, Geotail衛星などの観測により磁気圏遠尾 部にまで広がっていることが明らかとなった[7].近年で は「あらせ」衛星によって,磁気活動度が高い時には一般 的に環電流領域で分子イオンが観測されている[8].また イオンの流出現象は地球だけでなく他の惑星においても普 遍的に起きており,惑星の大気進化や長期的な環境変動に 密接に関連することが示唆されている.前述のFACTORS では地球の極域においてイオンと電磁波動との相互作用の

Graduate School of Science, Kyoto University

corresonding author's e-mail: matsuoka@kugi.kyoto-u.ac.jp

直接観測を行い,イオンの流出に必要なエネルギーを授受 する物理過程の解明もめざしている.

「あけぼの」 衛星は耐放射線性を高めた設計によって, 軌 道が繰り返し地球の放射線帯を通過するにも関わらず26年 間の連続した観測を成し遂げた. その後, より高い耐放射 線性を有する宇宙機を製造する技術が発達し、それまでは 高い放射線に阻まれて探査ができなかった領域に探査機を 送り込むミッションが可能となっていった.太陽との距離 が近く放射線が強いために探査が困難であった水星に は、2011年に NASA の探査機 MESSENGER が周回軌道に 入った. 2018年に国際水星探査ミッション BepiColombo が打ち上げられ、2025年の周回軌道投入をめざして現在惑 星間空間を巡行中である. BepiColombo は、日本で製造さ れた「みお」衛星 (MMO) とヨーロッパで製造された MPOの2つの衛星で構成される.「みお」衛星で培われた 耐放射線技術が利用されて実現したのが, 第6章でも紹介 された「あらせ」衛星である.近年では、更に太陽に近い 軌道における探査が行われている.2018年に打ち上げられ た NASA の Parker Solar Probe は 380 万 km の 距離, 2020 年 に打ち上げられたESAのSolar Orbiterは4200万kmの距離 にまで太陽に近づき,太陽の詳細観測と,太陽風の加速機 構に関わる観測を行っている.

木星は地球よりも強力な放射線帯を持つ惑星として知ら れる.前述の JUNO の軌道は,先行ミッションである Galileoよりも近木点が低くかつ極軌道であり,より高い耐放 射線性が必要となったが,未踏の軌道を取ったことによっ て,木星の放射線帯について新たな発見をした.赤道域に おいては木星大気と輪の間に数百keVのイオンの放射線帯 が存在することが見つかった[9].一方で,相対論的電子 の放射線帯のフラックスは,それまで予想していたものよ りも一桁小さいこともわかった[10].

#### 7.2 今後の学際研究への期待

前節で述べた「あけぼの」衛星ならびにその後の地球・ 惑星探査により明らかとされた研究成果は、プラズマ科学 分野にも深く関わる内容を数多く含んでいる.オーロラ現 象に関わる電子加速メカニズムや電磁波発生過程, DAW と高エネルギー粒子との相互作用などは、実験室プラズマ で扱われるプラズマ加熱や高エネルギー粒子の生成・輸送 過程に共通する物理素過程が議論されている好例である. 宇宙プラズマと実験室プラズマにおける波動粒子相互作用 研究の共通性については、昨年の本誌小特集記事も参照さ れたい[11]. プラズマ科学と宇宙プラズマとの連携研究 が、各所で進められている.「あけぼの」衛星の成果に根 差した研究が進展し惑星研究にも広がっていったように, 本小特集を通じて「あけぼの」衛星による成果および宇宙 プラズマ分野での将来課題がプラズマ科学分野の研究者と 共有されることにより, 今後の学際研究の種が生まれ新た な枝が伸びていくことを期待する.

#### 参考文献

- [1] S. Imajo et al., Scientific Reports 11, 1610 (2021).
- [2] Mauk *et al.*, Nature **549**, 66-69 (2017).
- [3] J. Saur *et al.*, J. Geophys. Res. **123**, 9560 (2018).
- [4] Y. Hirano et al., J. Geophys. Res. 110, A07218 (2005).
- [5] N.M. Schneider *et al.*, Science **350** (6261), aad0313-aad 0313, doi:10.1126/science.aad0313, (2015).
- [6] L. Soret *et al.*, Icarus **264**, 398 (2016).
- [7] K. Seki et al., Science 291, 1929 (2001).
- [8] K. Seki et al., Geophys. Res. Lett. 46 (2019).
- [9] P. Kollmann et al., Geophys. Res. Lett. 44, 5259 (2017).
- [10] H.N. Becker et al., Geophys. Res. Lett. 44, 4481 (2017).
- [11] 永岡賢一: プラズマ・核融合学会誌 97,261 (2021).





### 松岡彩子

京都大学理学研究科 附属地磁気世界資料解析 センター 教授. 宇宙航空研究開発機構 宇宙 科学研究所勤務を経て,2020年より現職.専門 分野は地球惑星・宇宙空間電磁気学.人工衛

星や地上で観測された,地球・惑星環境や宇宙空間の磁場の データ解析を軸とした研究を行っています.趣味は城めぐり (国内&海外)ですが,きらびやかで綺麗なお城より,古い要 塞や廃墟をいにしえに思いを巡らせながら歩くのが好きです.



# 三好 由純

名古屋大学宇宙地球環境研究所統合データサ イエンスセンター長・教授. あらせ衛星のプ ロジェクトサイエンティストとして, ジオス ペースにおけるプラズマ波動粒子相互作用,

粒子加速の研究に従事するとともに,超高感度カメラや観測 ロケット実験によるオーロラに関する研究などを行っていま す.また,宇宙天気予報の基礎研究も行っており,データ同化 や機械学習を用いた高精度予測の研究についても取り組んで います.趣味はスターバックスのご当地マグカップ集めで, オーロラ観測の際に訪れた世界最北のスターバックスのマグ カップを持っています.



# 加藤雄人

東北大学大学院理学研究科教授.あけぼの衛 星の運用計画作成は当番制で,チーフとサブ 2名が週毎に交替でした.大学院生も担当可 能で,私も院生時代に携わりました.初めての

当番でのチーフは5章ご執筆の笠原先生,宇宙研担当スタッ フは本企画立案者の松岡先生でした.運用手順を間違えない よう大変緊張したことや,リアルタイムで衛星の生データを 目にした感動を覚えています.本小特集に関わる機会をいた だけたこと,大変感謝しています.



# がのいたけし 坂野井健

東北大学大学院理学研究科准教授.最初の研 究テーマが,あけぼの衛星観測データを用い たオーロラ加速領域でした.これを通じて体 験した,オーロラの科学データを解析する感

動と緊張感,そこで得た今回執筆されている先生方を含む多 くの方々との交流の楽しさが,その後の研究の駆動力になっ ています.現在は,光学装置を開発しながら,地球や木星の オーロラ現象の新しい観測と研究に取り組んでいます.あけ ぽの衛星の成果が,その後に続くれいめい衛星,あらせ衛星や LAMP ロケットなどの成功と,将来衛星計画に繋がっている ことを実感しています.



# もろ おか みち こ諸 岡 倫子

スウェーデン国立宇宙プラズマ物理研究所研 究員.学部研究でオーロラ地上観測,博士課程 で地球オーロラ観測衛星あけぼの,ポスドク としてヨーロッパの地球磁気圏観測衛星デー

タを解析し、オーロラ物理研究を続けました.その後の研究対 象は更に遠く、火星、土星、水星、木星、太陽周辺を観測する 衛星データも扱っています.専門はオーロラ現象も含む惑星 電離圏・磁気圏プラズマ物理学で、電場データを中心に研究 しています.最近は宇宙の塵の研究もしています.



### 森岡 昭

東北大学名誉教授.東北大学大学院理学研究 科教授,惑星プラズマ・大気研究センター長 を経て,2007年定年退職.惑星の磁気圏,太陽 コロナからの電磁波動の観測から,磁気圏や

コロナにおける粒子加速過程や太陽惑星相互作用過程の研究 に携わってきた.研究から遠ざかった最近は,かつて難病の親 友を介護した経験から,福祉機器の開発を細々行っている.10 点あまりを youtube に投稿しているが,時に問い合わせがあ り,製作・贈呈して喜んで貰えた時は,論文が採択されと時と はまた別の喜びがある.



#### 阿部琢美

近は観測ロケット搭載用真空計や電離圏熱的イオン速度測定 器の開発に取り組んでいます.趣味は山城巡り.



# たなべしげ と渡 部 重 十

北海道情報大学 宇宙情報センター 教授.北 海道大学名誉教授.1984年東北大学理学研究 科 理学博士,東北大学助教授,北海道大学教

授を経て2014年より現職.人工衛星,惑星探査 機,観測ロケット等の搭載観測機器開発とコンピュータシ ミュレーションにより,地球惑星の大気とプラズマを研究.失 敗から学ぶ宇宙開発について,大学だけでなく小中高校や科 学館で講演しています.

#### YAU Andrew



### 北村 成 寿

名古屋大学 宇宙地球環境研究所, 主な研究分 野:磁気圏物理学 プラズマ波動.

最近は将来電磁気圏探査衛星計画 FACTORS の検討を進めています.実現は早くても今か

ら10年ほど先になるので、その時には「あけぼの」で極域から の大気流出の研究で日本が世界の最先端の成果をあげたとこ ろから約40年ということになるでしょうか.再び日本が中心 になって、次世代の衛星で極域電磁気圏の最先端のデータを 手にできるように何とか実現させていきたいと思います.



# かさ はら よし ゃ

金沢大学 学術メディア創成センター 教授・ センター長,先端宇宙理工学研究センター兼 任.博士(工学).あらせ衛星プラズマ波動・ 電場観測器のPIをはじめ,かぐや・みおなど,

科学衛星搭載のプラズマ波動観測装置の開発と観測データの 解析に携わっています.もともと山歩きが趣味で,毎年のよう に信州に出かけておりましたが,最近は家の周りの散歩でス トレス発散しております.



## 熊本篤志

東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻准 教授.主な研究分野は電波・プラズマ波動観 測にもとづく惑星プラズマ物理学,レーダに よる月・惑星・小天体地下探査.あけぼの・

かぐや・あらせ等の科学衛星・電離圏観測ロケットでは,高 周波プラズマ波動受信機・プラズマサウンダ・地下レーダサ ウンダ・インピーダンスプローブ等の観測装置を担当.あけ ぽの衛星の運用当番(=学生アルバイト)でリアルタイムにダ ウンリンクされるプラズマ波動の生データを見た時の強い印 象が,現在の研究を志向する原点でしたが,近年,学生のそう した機会が少なくなっているのは残念なことと思っています.