

磁気圏観測衛星「あけぼの」の 運用終了について

平成27(2015)年4月9日
宇宙航空研究開発機構
理事 常田佐久

宇宙科学研究所 あけぼのプロジェクトチーム
プロジェクトマネージャ 松岡彩子

はじめに

- 磁気圏観測衛星「あけぼの」は、オーロラを発光する高エネルギー電子(オーロラ電子)の加速メカニズム解明を主目的として、1989年(平成元年)2月22日にM-3SIIロケット4号機によって打ち上げられた科学衛星である。
- その後、観測運用を26年間に渡り継続し、極域のオーロラ現象観測およびヴァン・アレン帯(放射線帯)の変動観測において重要な成果をあげた。
 - 査読付き論文311件、学位論文254件(うち、博士36件)等、多くの科学的成果を創出。
- 今般、観測機器の多くが放射線劣化により観測を停止していること、衛星の電源系機器の劣化や高度の低下により、科学成果を出せる十分な観測データが取得できなくなったことに伴い、衛星運用を終了することについて報告する。
- なお、あけぼのプロジェクトはこれまで、平成18・22・25年度の3回、宇宙理学委員会において運用延長の審査を受け、科学成果創出の観点から承認を受けてきている。
- 本日の説明内容は下記の通り。
 1. 磁気圏観測衛星「あけぼの」の概要
 2. 26年間の主な成果
 3. 「あけぼの」衛星の状況と今後の計画
 4. まとめ



1. 磁気圏観測衛星「あけぼの」概要

意義・目的

打ち上げ当初(1989年)は、

オーロラ電子生成機構・オーロラ現象に関連した物理現象の解明

が主目的であった。

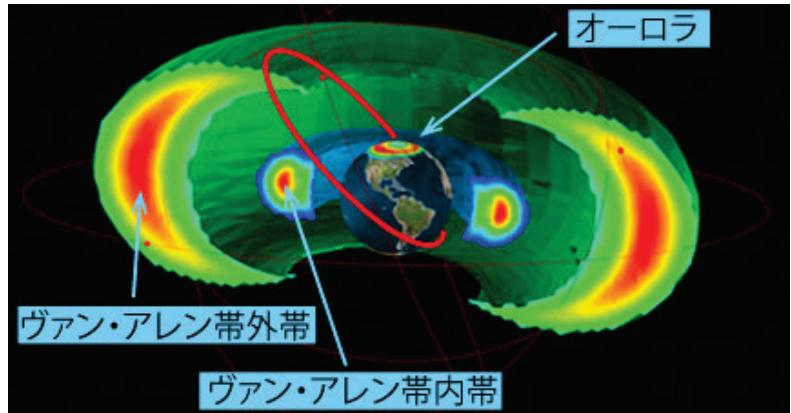
その後の科学コミュニティからの要請、搭載観測機器の性能維持状況等により、2011年度以降は、主目的を

ヴァン・アレン帯等の内部磁気圏現象と太陽活動との関連の解明

とした。

プロジェクトの特徴

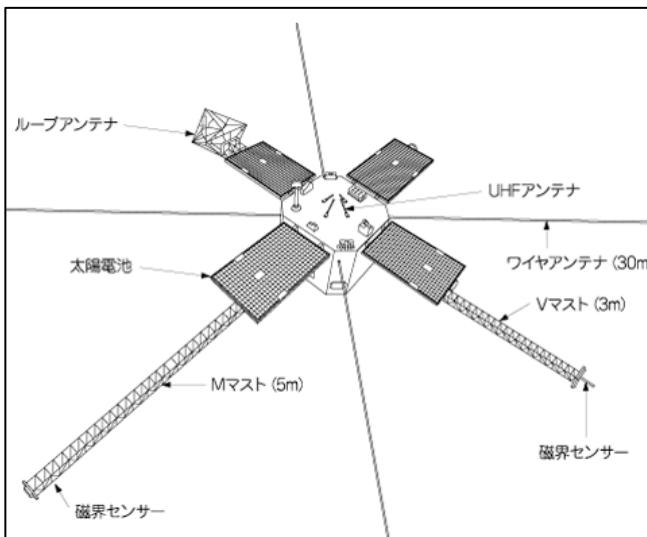
プラズマ、磁場、電場、波動を観測する機器と、オーロラ撮像カメラの計9種の科学観測機器を搭載している。ヴァン・アレン帯の中を通過するため、高い耐放射線性を持つ衛星設計により、打ち上げ以降26年間定常運用を継続した。



「あけぼの」の周回軌道(打ち上げ当初)

打上げ	平成元(1989)年2月22日(日本時間)
軌道 (打上当初)	遠地点10500km、近地点270km、傾斜角75度の長楕円準極軌道 (軌道周期:約211分)
構造	質量:約295kg 形状:高さ約100cm、対面寸法126cm 4枚の太陽電池パドル付き八角柱型 30m長のアンテナ／5m・3mの伸展マストを備える。
観測機器	磁場計測器(MGF) 電場計測器(EFD) 低周波プラズマ波動計測器(VLF) 高周波プラズマ波動計測器(PWS) 低エネルギー粒子計測器(LEP) 低エネルギーイオン組成計測器(SMS) 電子温度計測器(TED) 放射線モニター(RDM) オーロラ撮像カメラ(ATV)
目標寿命※	1年間

目標寿命(Interest Life): 科学衛星の場合、世界初の観測機器搭載等チャレンジングな要素が多いため、所謂設計(保証)寿命何年、何年後の生存確率何%という形は採らず、耐放射線、耐紫外線、バッテリ充放電サイクル、温度サイクル、搭載燃料量、クリティカルな部分の冗長化等を考慮した設計によりミッション達成のための寿命の目標値を設定している。



2. 26年間の主な成果

1. 地球電離層がオーロラ現象を支配することを発見

オーロラの発光が夏より冬で強くなることと、その理由を解明

- 1990年代には、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。一方で、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、「イベント観測」による研究が主であった。
- 「あけぼの」衛星が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出来た。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。

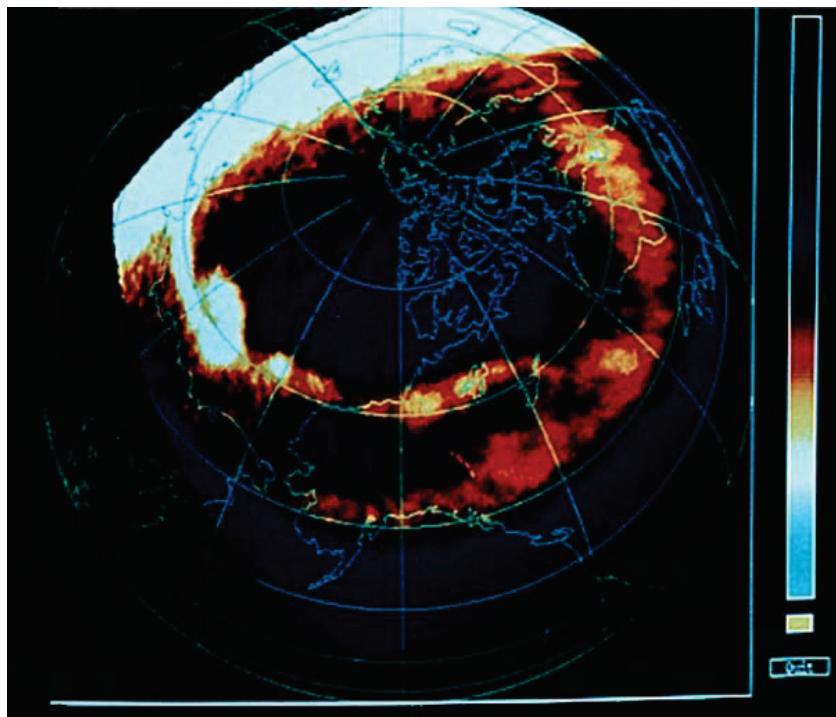
2. ヴァン・アレン帯の長周期変動の観測

26年間のデータを用い、太陽の状態の変動に伴うヴァン・アレン帯の変動を明らかにした

- ヴァン・アレン帯に存在する放射線は、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。将来のヴァン・アレン帯の状態を予想することが重要な課題となっており、宇宙天気予報として各国・各機関が精力的に取り組んでいる。
- この予報のためには、ヴァン・アレン帯のデータを、領域を欠くことなく、様々な太陽活動や、地磁気活動条件に対して取得することが必要である。ヴァン・アレン帯の観測は、主に静止軌道（またはGTO）衛星および約800km高度の極軌道衛星によって行われている。前者はヴァン・アレン帯全体の把握が困難であり、後者は地上の局所磁場の影響を免れない。
- 「あけぼの」の観測高度である数千kmは、約3時間の周期でヴァン・アレン帯を緯度方向に走査することを可能にし、地上の局所磁場の影響を受けずに全体像を把握できる点で優位であった。また、26年間データを蓄積することによって、太陽活動・地磁気活動とヴァン・アレン帯との関係の理解が促進され、ヴァン・アレン帯の将来の予見手法に貢献した。

2-1. 地球電離層がオーロラ現象を支配することを発見

オーロラを光らせる高エネルギー電子(オーロラ電子)の分布と生成機構が季節と共に変化することを発見し、オーロラの発光が夏より冬で強くなることと、その理由を解明した。



「あけぼの」搭載の紫外線カメラ(ATV-UV)で撮像されたオーロラの連続画像のスナップショット

■「あけぼの」以前の理解

オーロラ電子の生成域が数千km高度にある“らしい”ことはわかっていたが、その空間分布や、出現頻度を決める要因に関する知識は無かった。

■「あけぼの」の成果

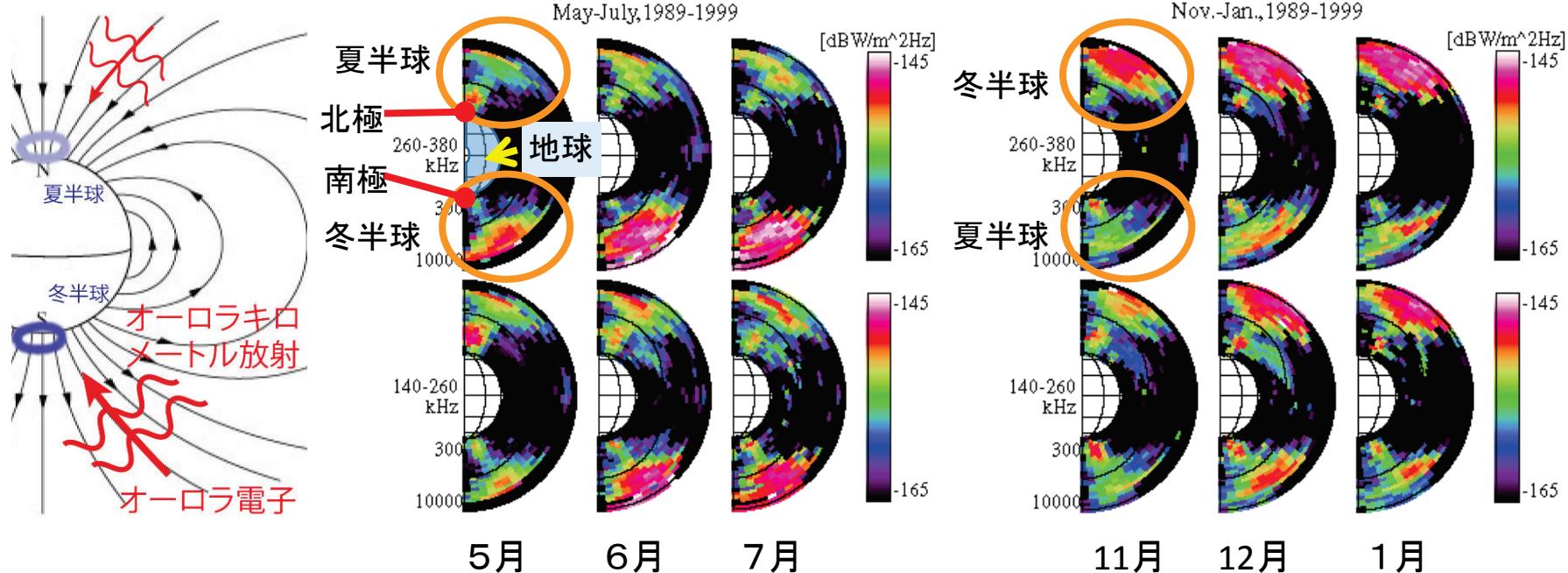
オーロラ電子や生成機構に関連する長期間にわたるデータを、季節のほか太陽活動や地球磁気活動に対して統計解析を行った。

その結果:



- I. オーロラ電子は冬半球に偏在して分布。
- II. オーロラ電子が生成される領域は、夏には高高度に、冬には低高度に発生。
- III. 宇宙空間に発生するポテンシャル(電圧)がオーロラ電子を生成し、このポテンシャルは冬に増大する。

I オーロラ電子は冬半球に偏在して分布することを示した。



赤い場所(冬半球)に、オーロラ電子が多く存在することを示している。

10keV程度に加速されたオーロラ電子が地球に向かって降下する時、電磁波の放射を伴い、オーロラキロメートル放射(AKR)とよばれる。「あけぼの」衛星の10年以上にわたる長期観測データを元に、AKRの強度の統計解析を行った結果、オーロラ電子は冬半球に偏在することを明らかにした。

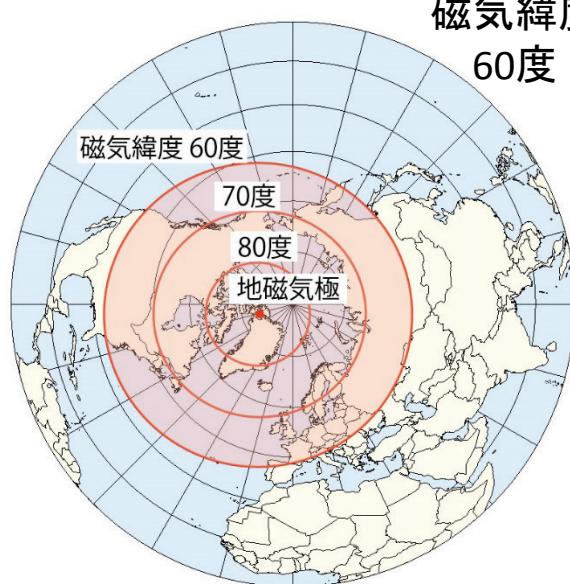
[Kumamoto and Oya, 1998; Kumamoto et al., 2001; Kumamoto et al., 2003a; 2003b]

II. オーロラ電子が生成される領域は、冬には低高度に、夏には高高度に発生することを示した。

オーロラ電子の出現頻度は、夏半球では高度による差異が少なく、冬半球では低高度で増大。

オーロラ電子の出現頻度は、高度 3000 ~ 11000km の範囲において、夏半球においては高度依存性を殆ど持たないのに対し、冬半球では 6000km 以下で頻度が著しく増えている。

 夏半球ではオーロラ電子の生成が高高度で起こっているのに対して、冬半球では低高度で起こっている。



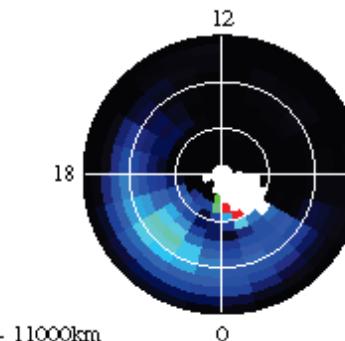
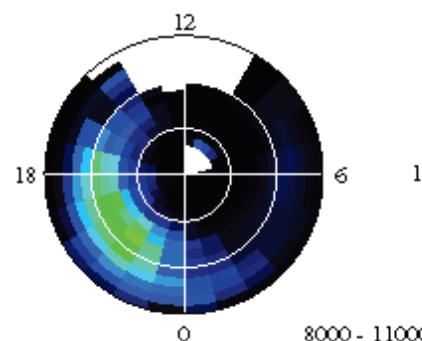
オーロラ電子(2keV以上の電子)の高度別出現頻度

electron acceleration occurrence frequency

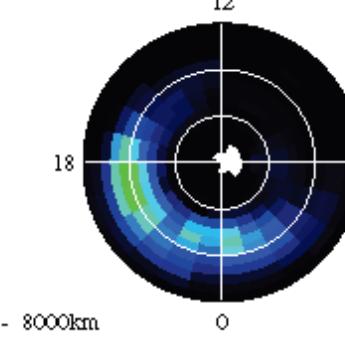
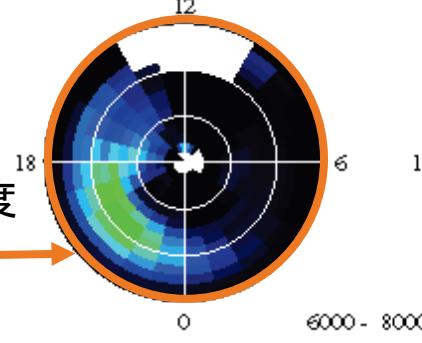
Total potential difference

Morooka et al., 2004

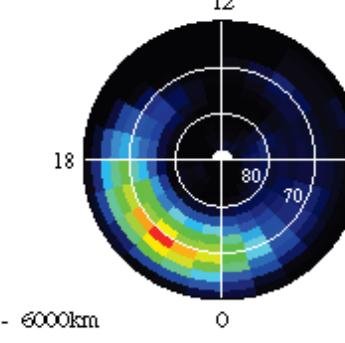
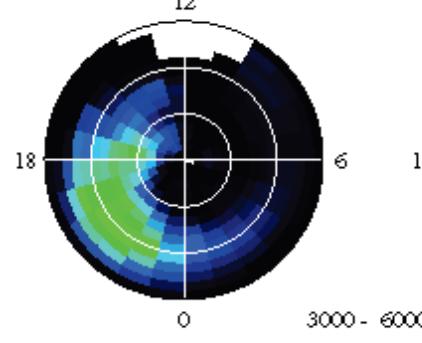
夏半球



高高度



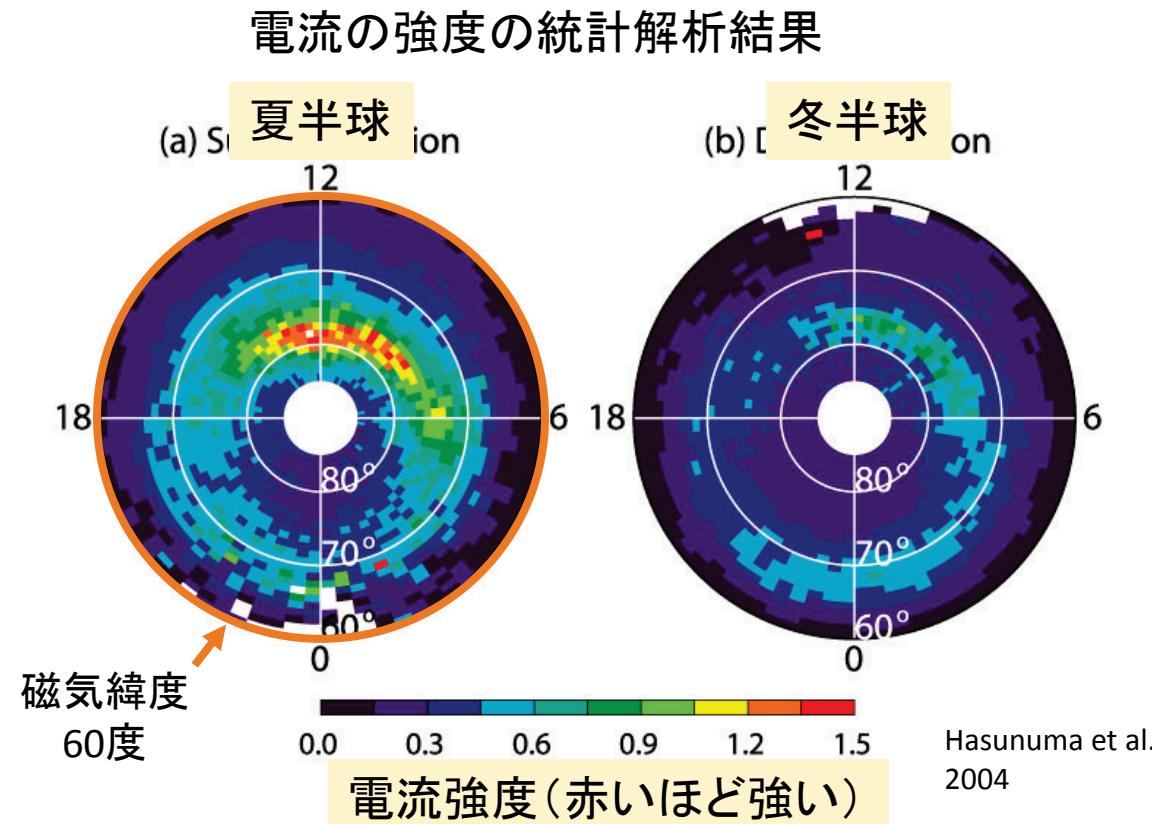
低高度



III. 宇宙空間に発生するポテンシャル(電圧)がオーロラ電子を生成し、このポテンシャルは冬に増大することを示した。

オーロラ現象に伴って生じる電流は、夏半球で大きく、冬半球で小さい。冬半球では電気伝導度が小さく、大きなポテンシャルの出現を可能にしている。【参考2】

- 冬半球では夏半球よりも電流の強度が小さいことが示された。
 - 高エネルギーのオーロラ電子だけでなく、低エネルギー電子が電流を担う重要な役割を果たしていることが示された。
- ▶ 冬半球では電離層の電子密度が低いために磁気圏に供給される低エネルギー電子が少なく、電気伝導度が小さい。この結果電流が流れにくくなり、オーロラ電子を生成する大きなポテンシャルの発達を阻害しない。



オーロラ現象の季節依存性は、地球電離層の状態に支配されることが明らかになった。



2-2. ヴァン・アレン帯の長周期変動の観測

太陽の状態の変動(1時間～11年単位の時間スケール)に伴うヴァン・アレン帯の変動を明らかにした。

■「あけぼの」打ち上げ前の理解

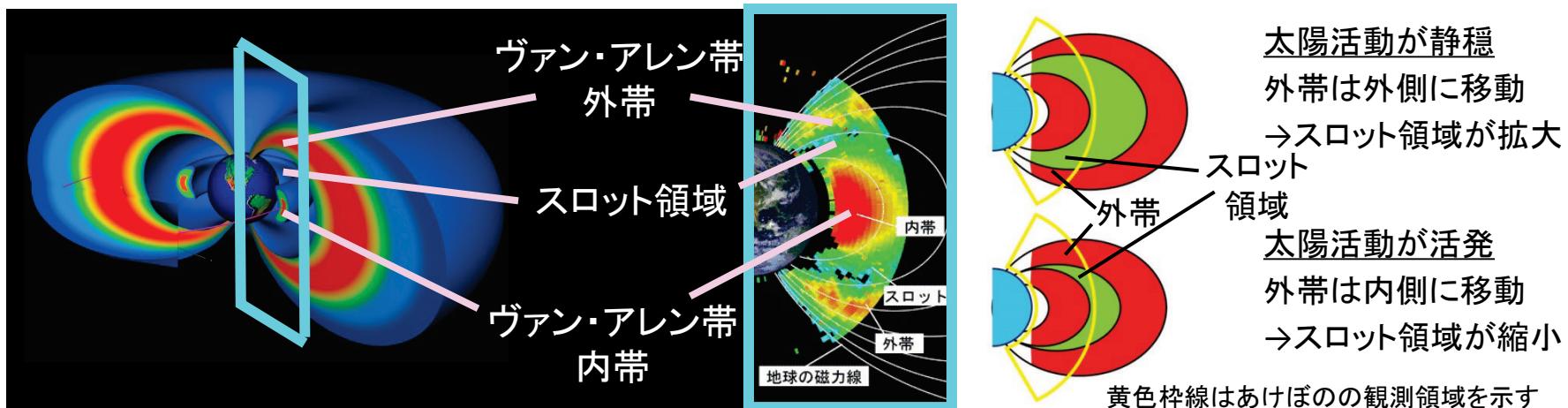
ヴァン・アレン帯の存在やその構造については知られていたが、形状や密度が時間変化することはわかつていなかった。

■「あけぼの」の成果

放射線モニターおよびプラズマ波動観測器による、26年間にわたる連続的なデータ取得を達成した。

その結果:

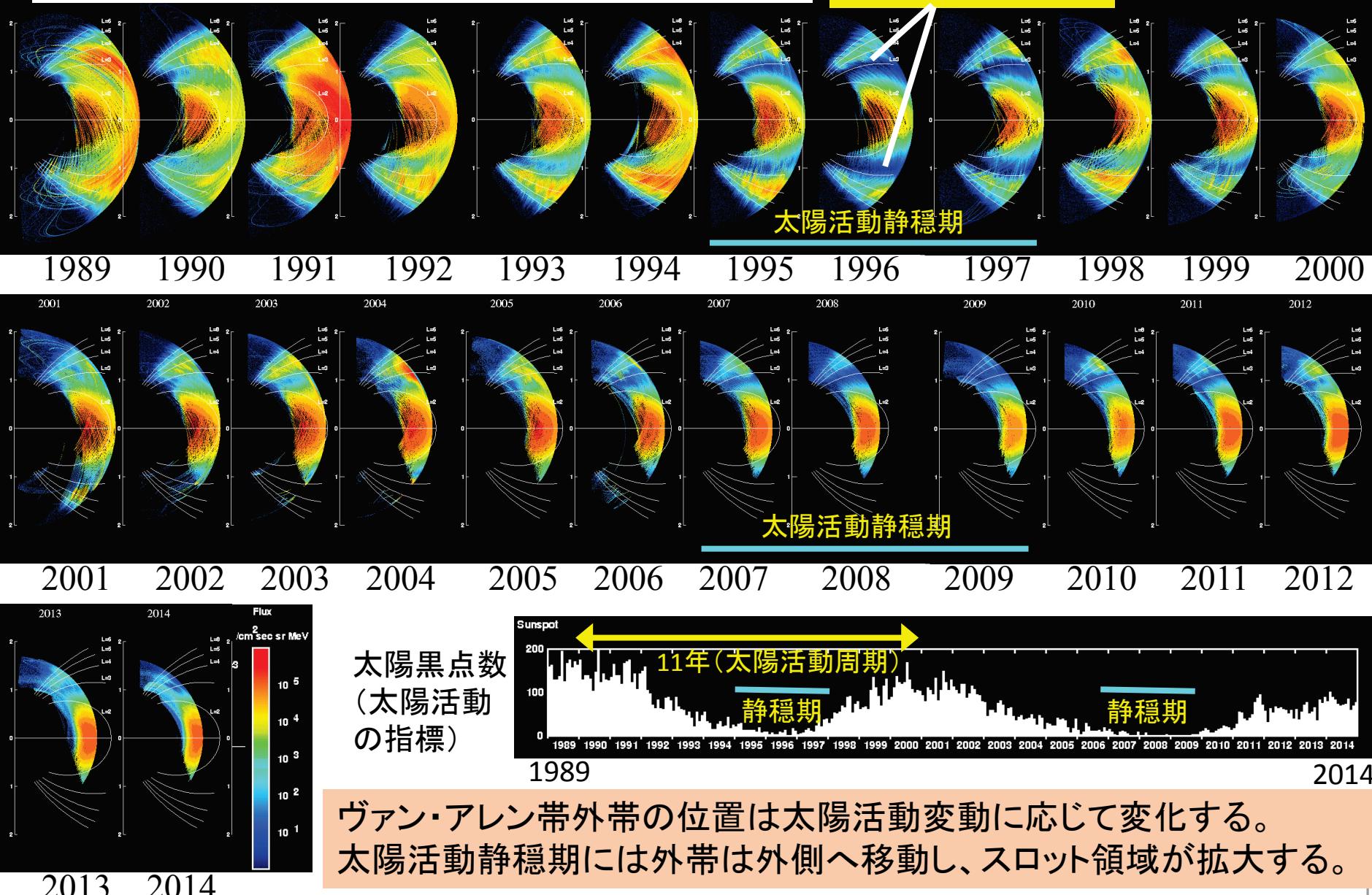
- I. 太陽活動変動(11年周期)に応じて、ヴァン・アレン帯外帯の位置が変動する様子を明らかにした。
- II. ヴァン・アレン帯外帯の高エネルギー電子が爆発的に増加する太陽風の条件(数時間スケール)を明らかにした。



I. 太陽活動に応じて、ヴァン・アレン帯外帯が変動する様子を明らかにした。

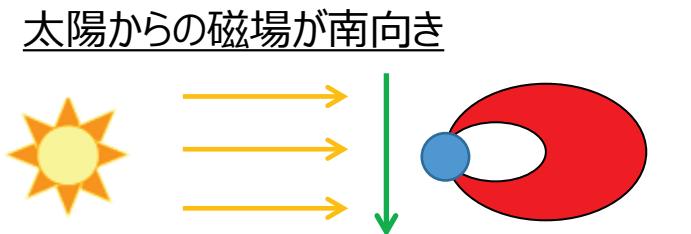
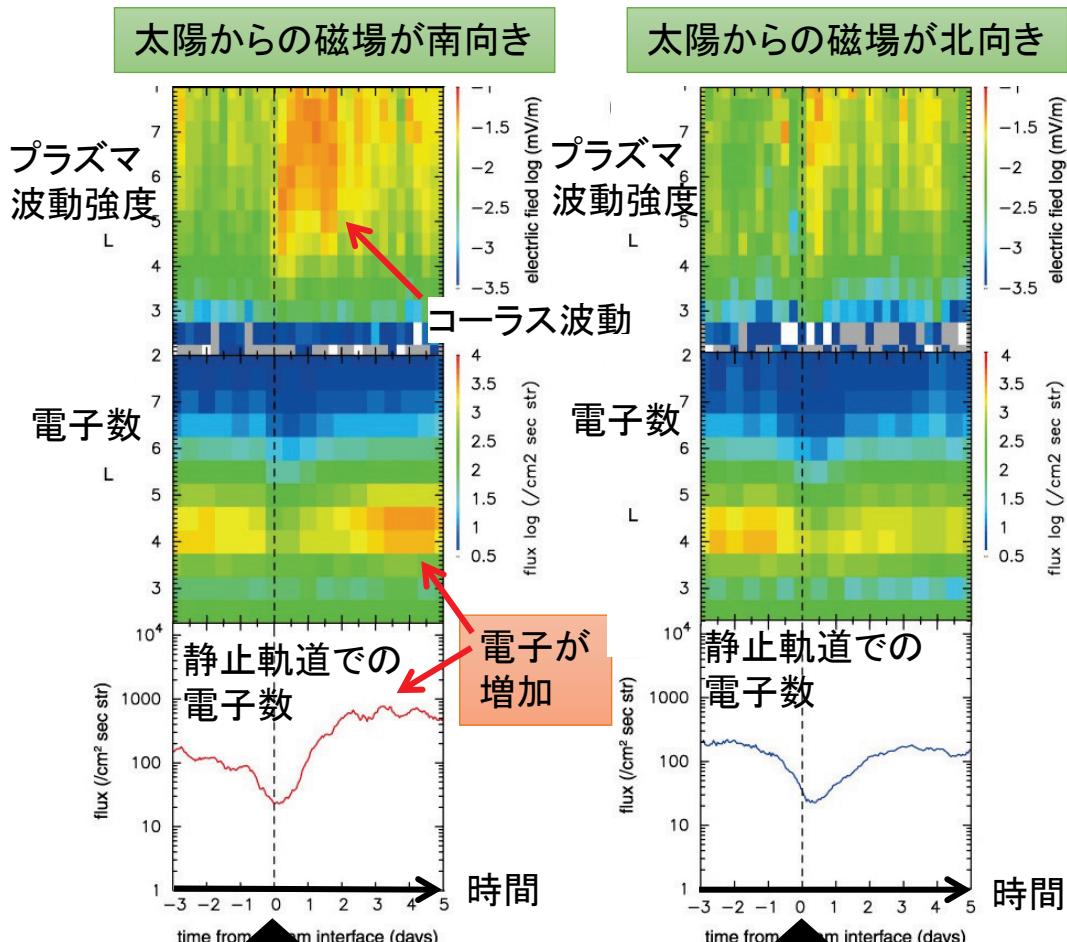
放射線モニターによる 2 MeV 以上のエネルギーの電子フラックス

スロット領域が拡大

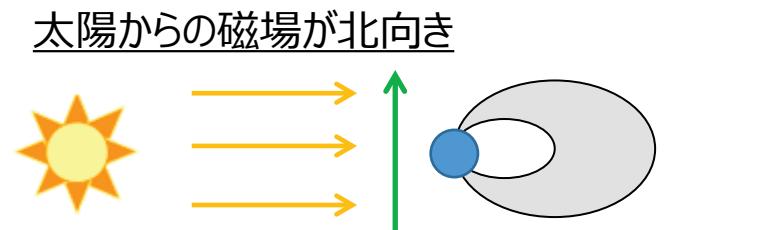


II. ヴァン・アレン帯外帯の高エネルギー電子が突発的に増加する太陽風の条件を明らかにした。

ヴァン・アレン帯外帯の高エネルギー電子の数は、宇宙嵐と呼ばれる地磁気の擾乱現象のときに10~100倍大きくなる。南向きの磁場を含んだ高速の太陽風が地球に到達した時に、この増加が起きることを明らかにした。



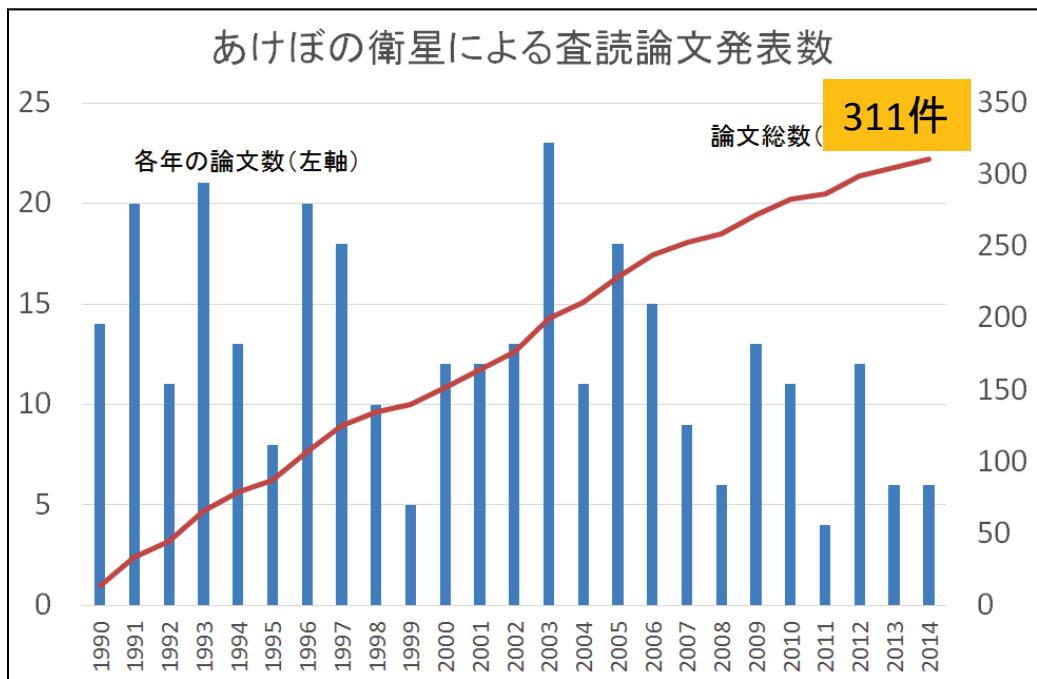
プラズマの波（コーラス波動）が活発化
ヴァン・アレン帯の電子の数が増える



プラズマの波（コーラス波動）は発生しにくい
ヴァン・アレン帯の電子の数は増えにくい

2-3. 論文等による成果発表

- 「あけぼの」衛星のデータを用いた査読論文の発表は計311件。(左下グラフ)
- 近年の傾向として、あけぼのプロジェクトチーム外の外国人が第一著者である論文の割合が増えている(2002年までは14%→2003年以降は36%)
 - データ公開が促進され、国際的に広く使われるようになっている
- これとは別に、254件の学位論文(卒業、修士、博士)を出しており、大学・大学院教育に大きく貢献した。(右下表)



あけぼの衛星のデータを用いた
学位論文数(計254件)

卒業論文	98
修士論文	120
博士論文	36

3. 「あけぼの」衛星の現状と今後の計画

3-1. 「あけぼの」衛星の現状と見通し

※旧宇宙開発委員会報告時点
平成21(2009)年3月25日

■ 現状

- 9種の科学観測機器のうち、6種は故障あるいは性能劣化により科学データ取得を停止したが、残る3種(VLF, PWS, RDM)は観測を継続している。
 - 尚、旧宇宙開発委員会報告(平成21年3月25日、打上後20年)時点では、2種が停止していた。(右表)
- 科学観測可能な機器の減少により、磁気圏研究を行う上で重要な情報(低エネルギー plasma、磁場、電場)が得られなくなっていたものの、ヴァン・アレン帯 plasma や plasma 波動に関するデータを継続的に得ている。

■ 今後の見通し

- 太陽電池の発生電力の低下およびバッテリの機能劣化が進行している。(太陽電池発生電流が打ち上げ当初13A→現在5.5A等)【参考3-1】
- 遠地点高度が低下しており(打ち上げ当初10,500km→現在4,000km)、それに伴って日陰率が増大している。【参考3-2】
- 電力状況の悪化と日陰率の増大は、科学観測データの取得頻度の著しい低下を招いている。また、遠地点高度の低下によって観測領域が縮小、同時にノイズ除去作業が困難となっている。これらを踏まえ、今後予測される観測効率を試算【参考3-3】したところ、現在データ取得が可能な3機器(VLF, PWS, RDM)の運用を今後継続しても、科学的価値のあるデータを十分に取得できる見込みが無いと判断した。

科学観測機器	H21/3 時点※	H27/3 時点
磁場観測器(MGF)	△	×
電場観測器(EFD)	×	×
低周波プラズマ波動観測器(VLF)	○	○
高周波プラズマ波動観測器(PWS)	○	○
低エネルギー粒子観測器(LEP)	△	×
熱的イオン観測器(SMS)	○	×
電子温度観測器(TED)	○	×
放射線モニター(RDM)	○	○
オーロラ画像カメラ(ATV)	×	×

○ 打ち上げ時の性能をほぼ維持して運用中
△ 打ち上げ時から性能が劣化しているが運用中
× 放射線等の影響で性能が劣化し運用停止

3-2. 今後の計画(案)

- 3/19～4/18の全日照期間※は、プラズマ波動観測器(PWS)による観測の条件が良く、スウェーデン・EISCATレーダが連続的にデータを取得している時期もあり、地上レーダとの同時観測を行う。
- この観測好期の終了後、4月末頃を目途に停波し、運用を終了する。運用終了後に対外公表を行う。
- 「あけぼの」衛星によって得た成果および知見は、平成28(2016)年度打ち上げ予定のジオスペース探査衛星(ERG)における観測計画立案やデータ解析に役立てる。【参考4】

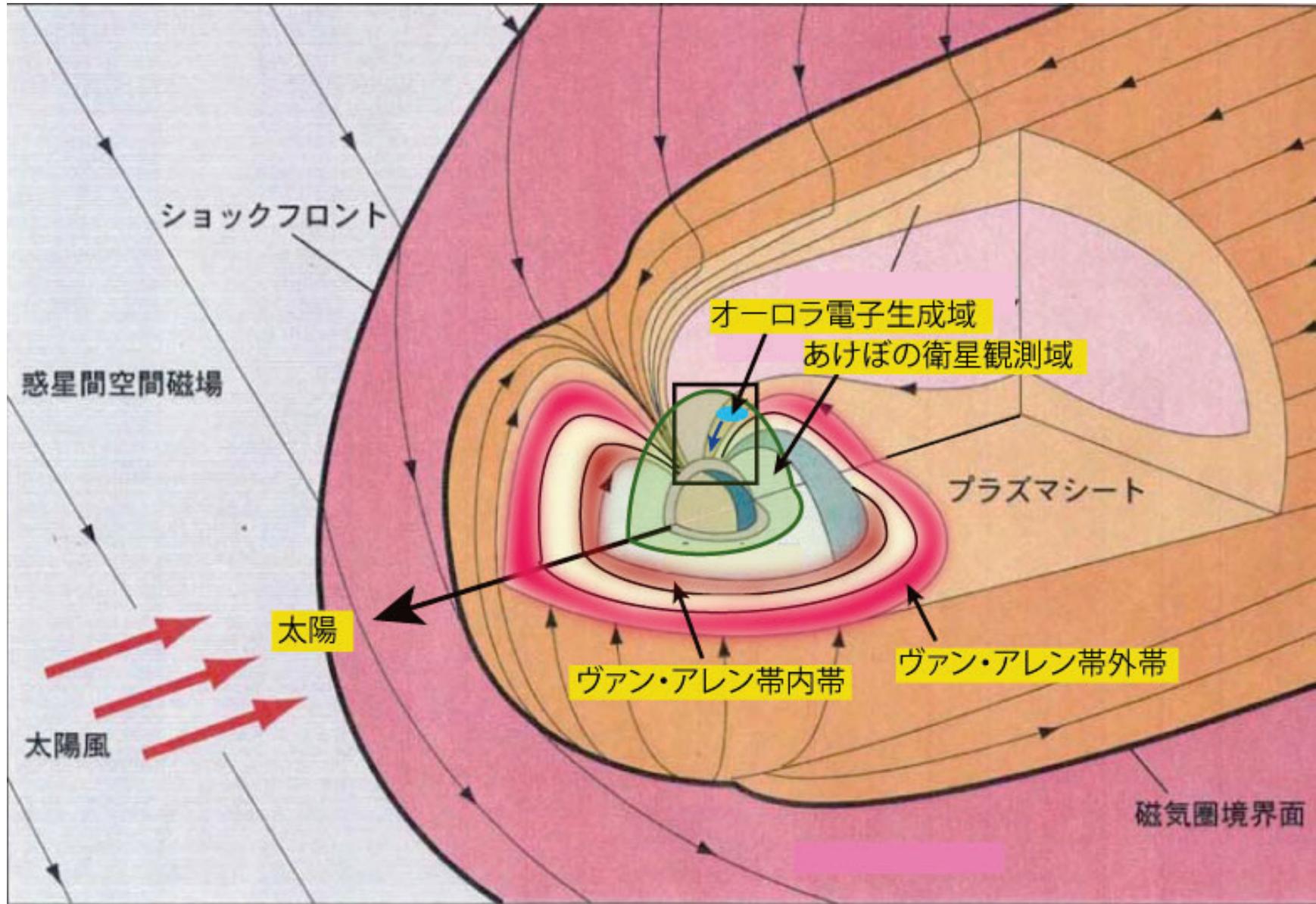
※衛星の地球周回軌道が地球の影を横切らないため日陰時間が発生しない期間。搭載バッテリーを使用せずに済むため、「あけぼの」の場合、観測機器を運用する電力が確保でき、観測好期になる。

4. まとめ

- ・磁気圏観測衛星「あけぼの」は、26年間という長期間にわたり観測を継続し、極域のオーロラ現象およびヴァン・アレン帯の長周期変動観測において重要な成果をあげた。
- ・衛星システムの性能劣化、遠地点高度低下による日陰率の増大、観測機器の多くが観測を停止している状況から、観測好期(4月の全日照期間)の観測終了をもって、衛星運用を終了する。

參考資料

【参考1－1】地球磁気圏の構造



【参考1－2】オーロラの光る高さ

1000km

300km

100km

80km

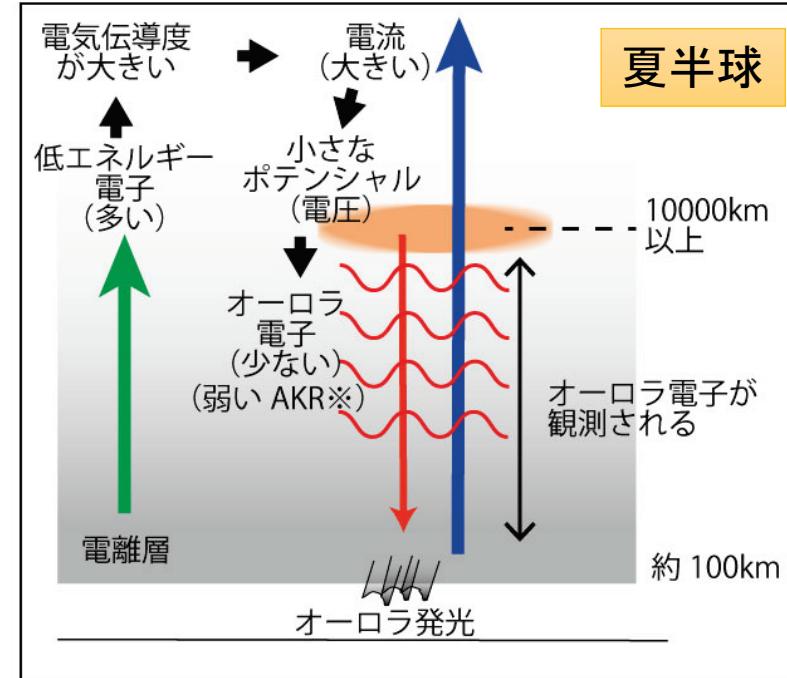
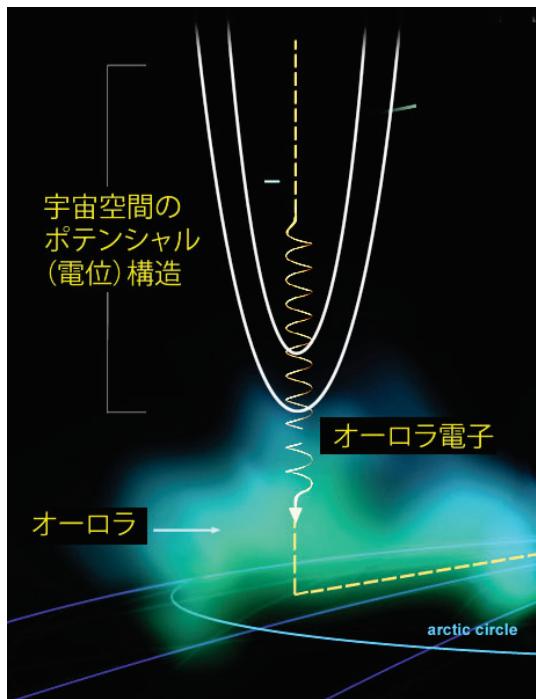
50km

35km

15km

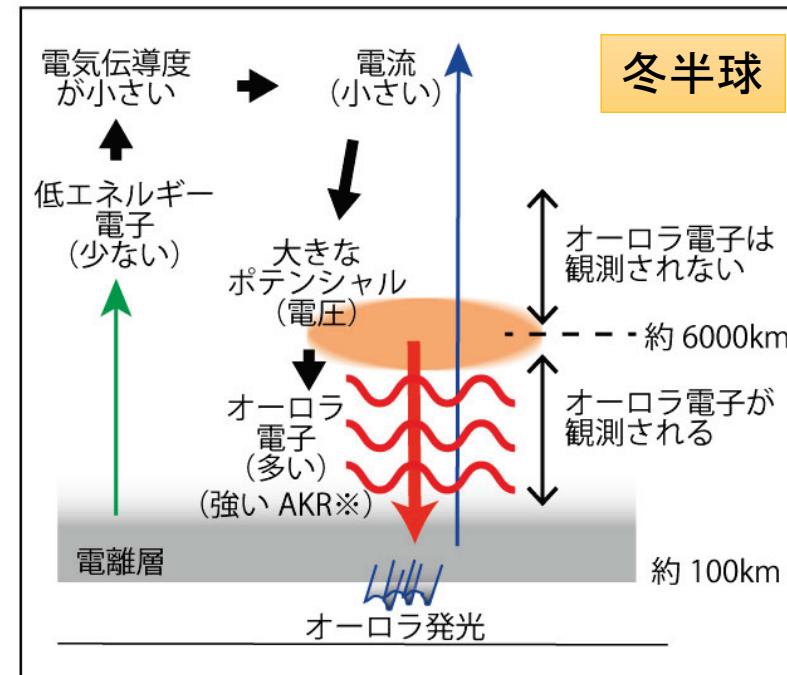


【参考2】 オーロラ電子生成 領域の季節による 違い(模式図)



「あけぼの」衛星の観測により、宇宙空間に発生するポテンシャル(電圧)がオーロラ電子を生成することが明らかになった。このポテンシャルは、冬、電離層の低エネルギー電子が少なく、電離層と磁気圏の間に流れる電流が小さい時に発達し、多くのオーロラ電子を生成する。

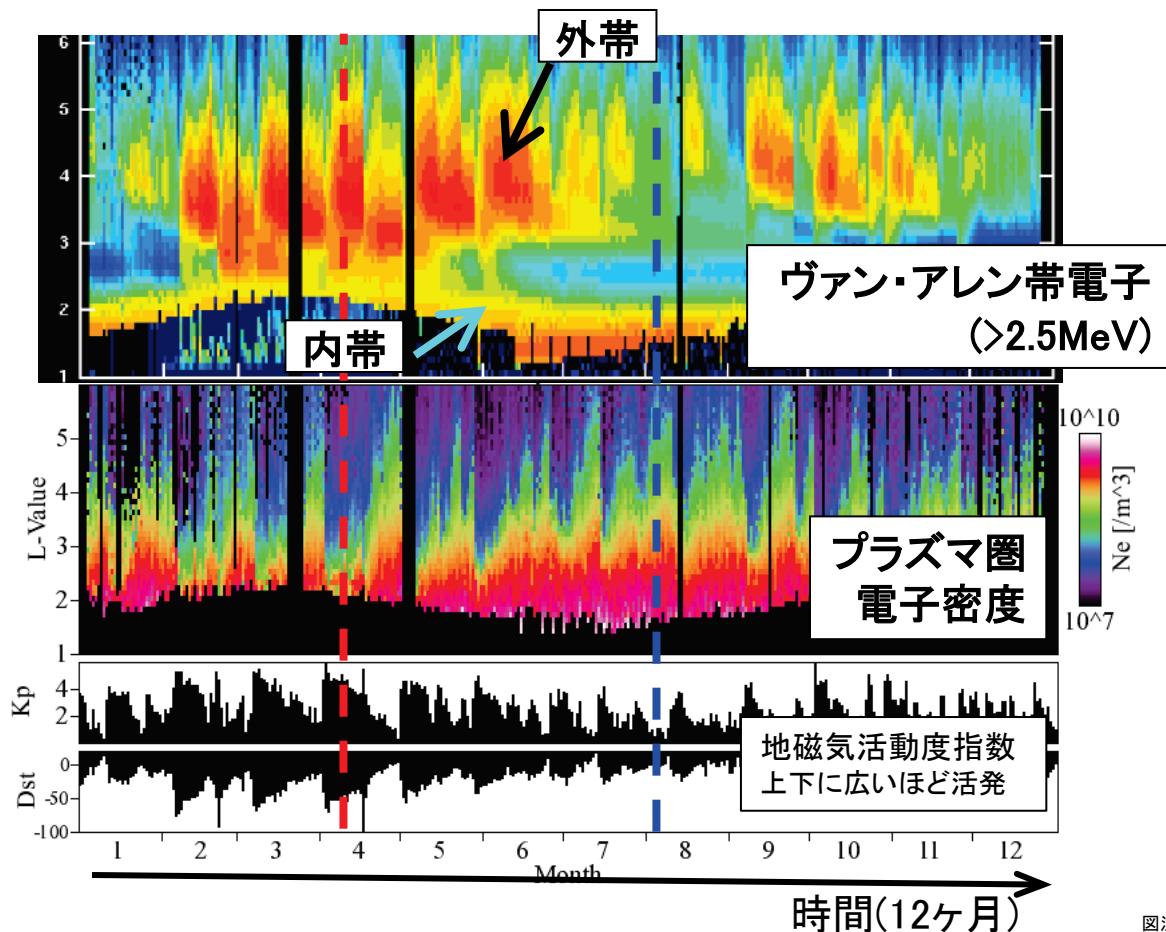
※ AKR : オーロラキロメートル放射。オーロラ電子によって放射される。



地磁気活動に応じて、ヴァン・アレン帯外帯の密度・エネルギーが激しく変動することを明らかにした。

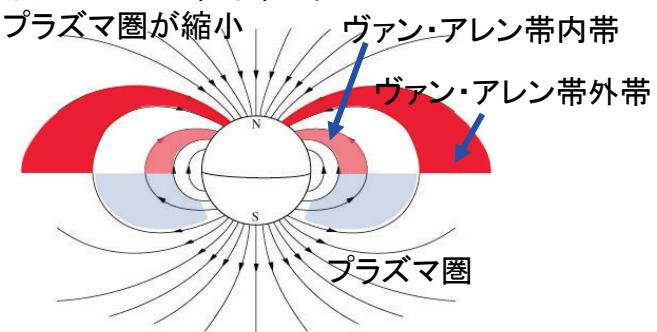
地球の磁気活動は月のオーダーの時間スケールでも激しく変動する。

地磁気が突然的に活発になるとヴァン・アレン帯外帯の電子は増加し、一方、プラズマ圏(エネルギーが低く濃い)電子は減少する。



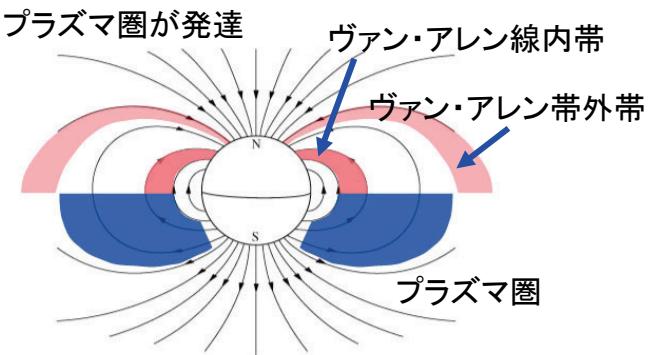
地磁気が活発な時(例:左図赤破線)

- ヴァン・アレン帯外帯が発達
- プラズマ圏が縮小



地磁気が静穏な時(例:左図青破線)

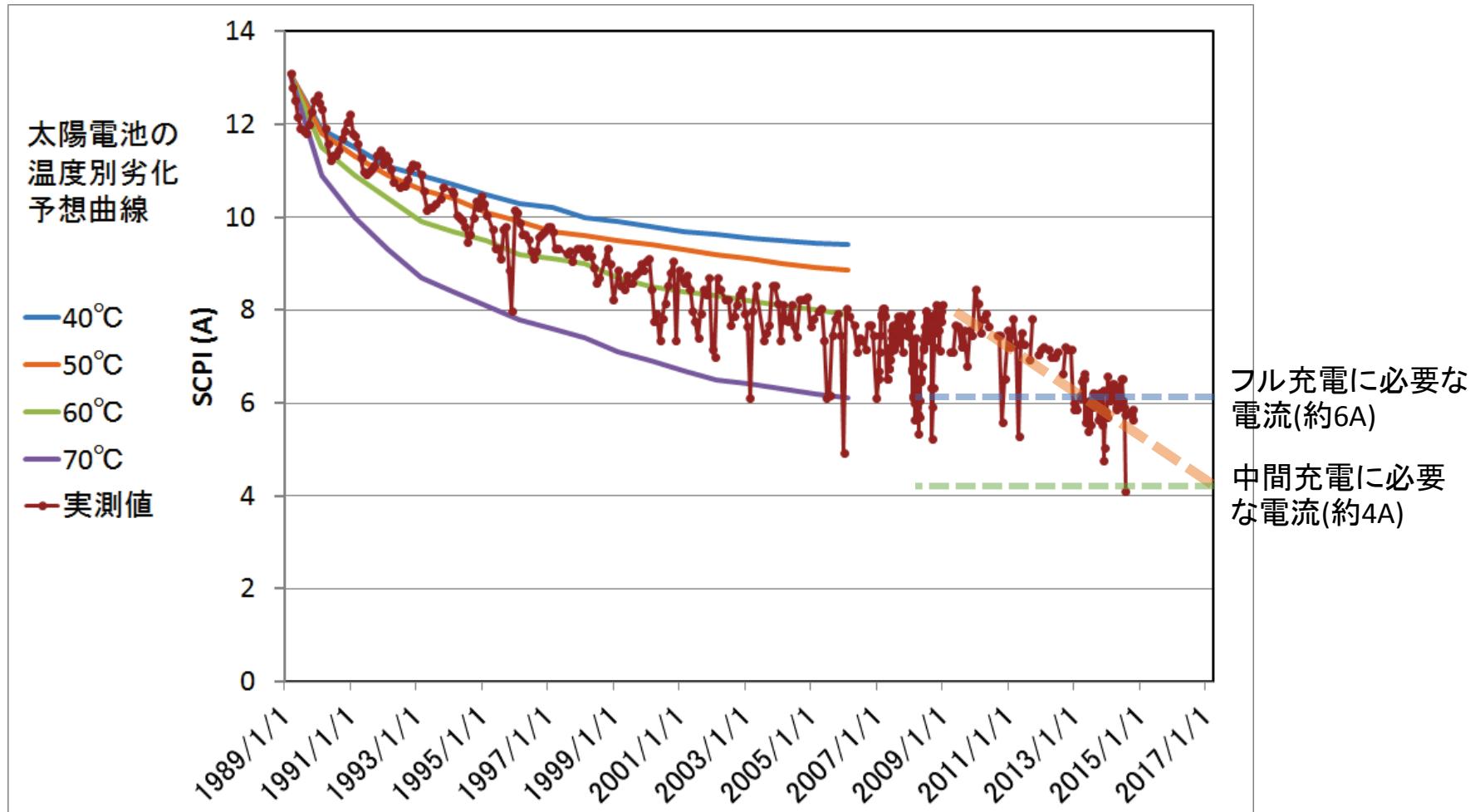
- ヴァン・アレン帯外帯が縮小
- プラズマ圏が発達



図注: 実際の磁気圏ではヴァン・アレン帯とプラズマ圏は南北対称な形状をしているが、ここでは北半球にヴァン・アレン帯、南半球にプラズマ圏を描画した。

【参考3－1】衛星搭載太陽電池の発生電流プロファイル

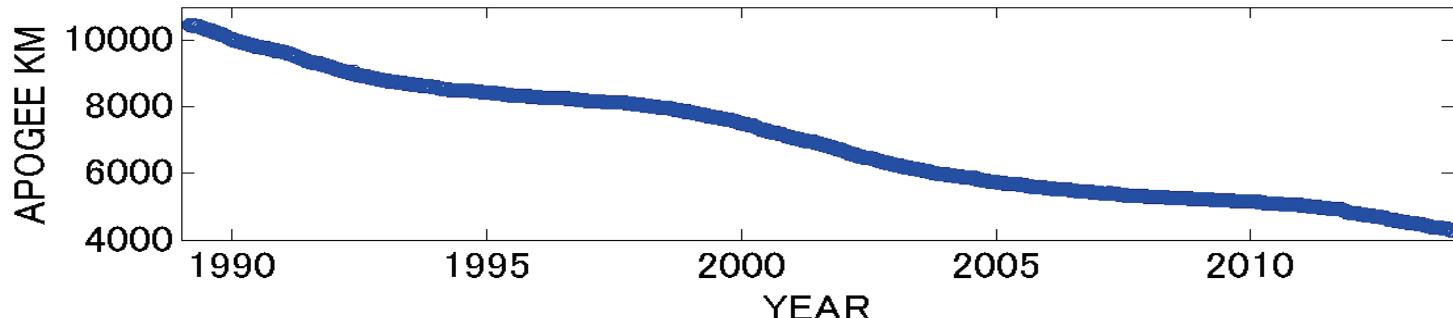
2013年に太陽電池の発生電力の低下が進み、バッテリのフル充電が出来ない場合が発生している。



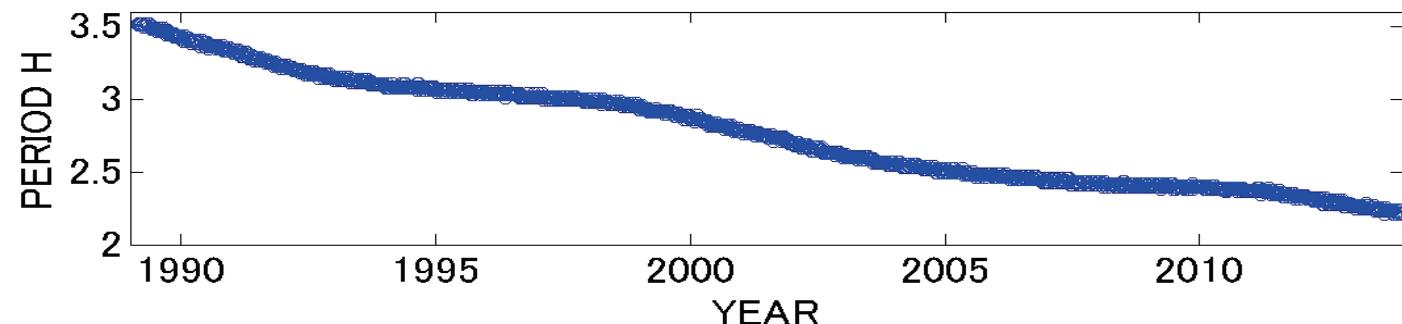
【参考3－2】遠地点高度、軌道周期等の推移

遠地点高度が、1989年打ち上げ当初の10,500kmから、2015年現在は約4,000kmまで低下している。それに伴って日陰率が増大(低高度域の存在確率が上昇)している。

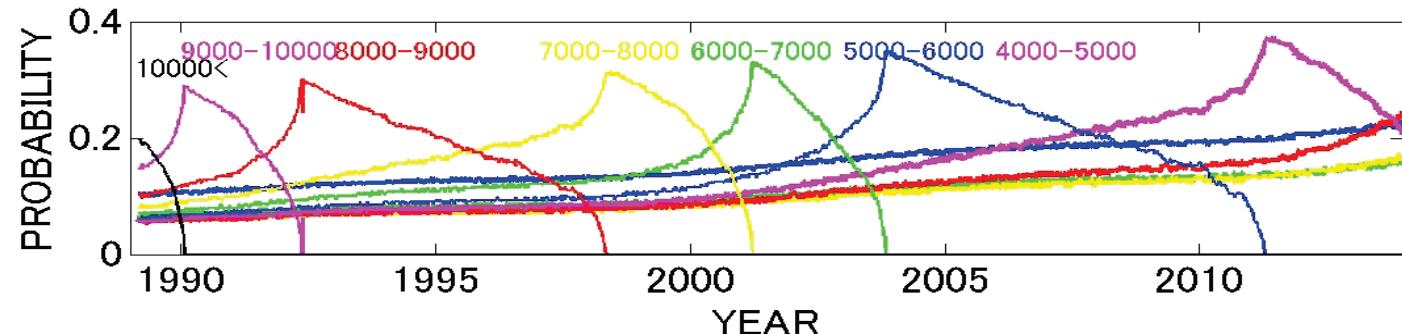
遠地点高度
(単位:km)



軌道周期
(単位:時)



各高度範囲における存在頻度



【参考3－3】 今後予測される観測効率 1990

右図：これまでのデータ取得実績(例としてPWSデータ)とERG打ち上げ後(2016)の日陰時間から予測されるデータ取得可能期間

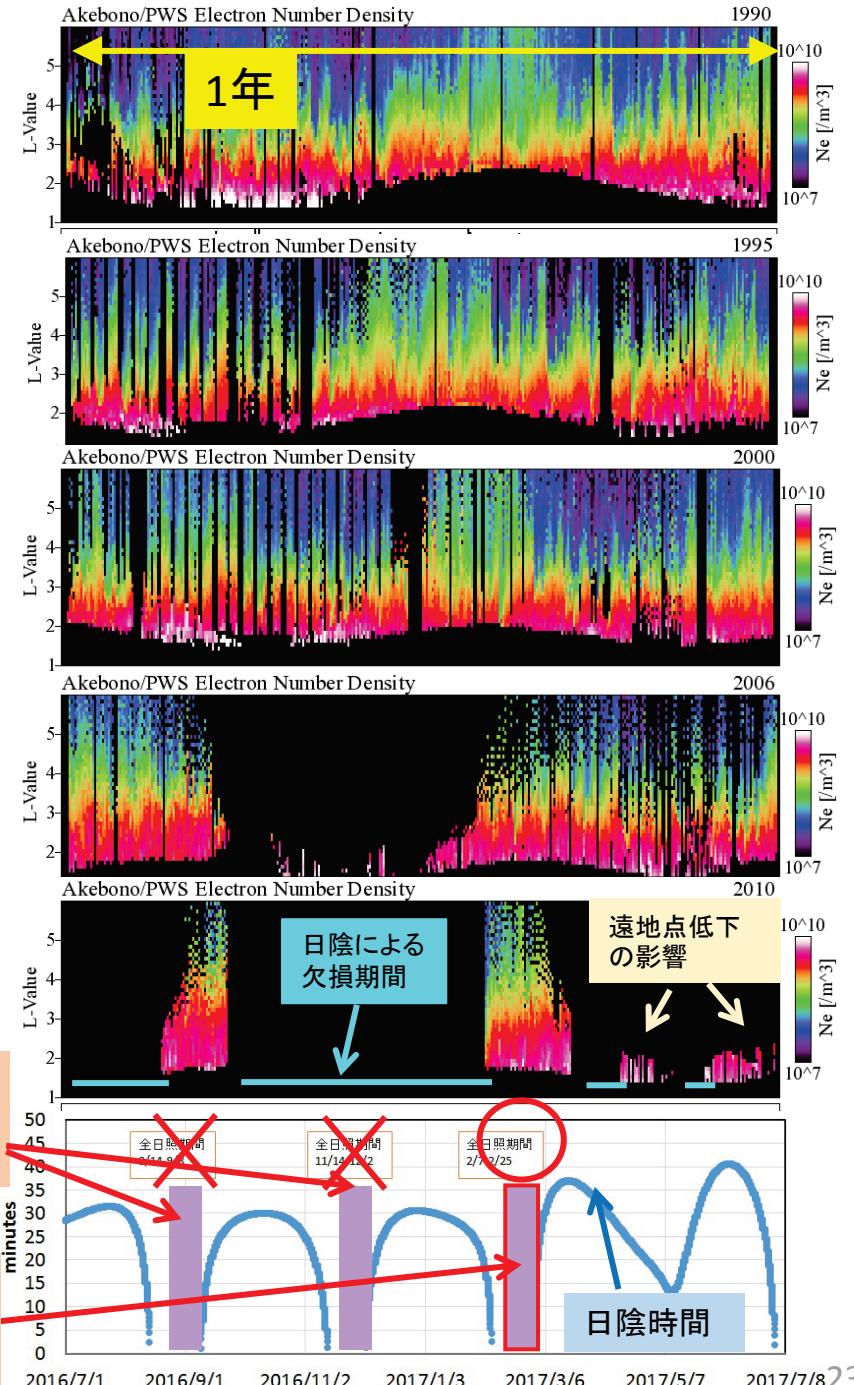
- 2006年以降、発生電力の低下およびバッテリの劣化により、軌道上に日陰がある期間は観測が出来なくなりつつある。
- 加えて、遠地点高度低下により、取得できる観測データが減少している。

ERG打ち上げ後1年間のあ
けぼの軌道予測からは、
ERGとの同時観測データが
取得できるのは20日間だけ
で、第一級の科学的成果を
出す十分な期待が出来ない

日照期間ではあるが、
遠地点高度低下等の影響
でデータ取得が困難

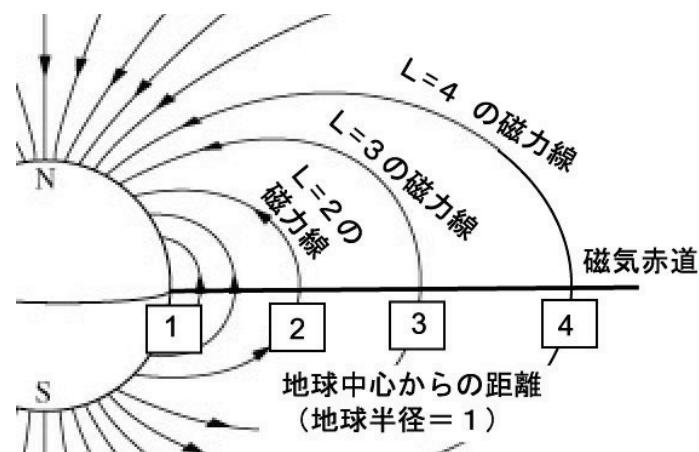
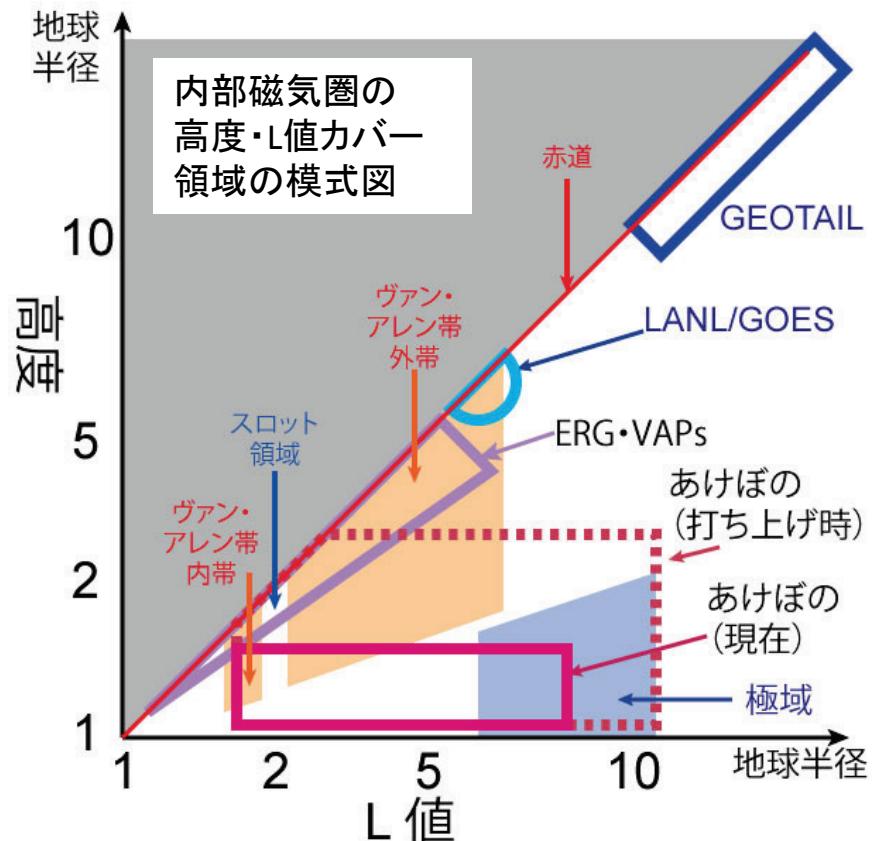
年間でERGとの同時観
測データを取得でき
るのはこの20日間だけ

2010



【参考4】 あけぼのからERGへ

- ・ ヴァン・アレン帯は、 $L=2$ 付近の内帯と、 $L=3 \sim 6$ 付近の外帯から形成される。
- ・ あけぼの衛星打ち上げ当初、あけぼの衛星はヴァン・アレン帯の L 値の全てを網羅して観測する唯一の衛星であり、その軌道の長所と長期間観測を生かして多くの成果をあげた。
- ・ あけぼのはその後の遠地点の低下により特に外帯のカバー領域が減り、ヴァン・アレン帯の網羅的な観測が困難となっている。
- ・ 既に観測を始めている米Van Allen Probes衛星(VAPs)、打ち上げ予定のジオスペース探査衛星(ERG)による、
 - 最先端の観測機器による研究
 - 赤道領域におけるエネルギー獲得機構の解明
 へと引き継がれていく。



磁気圏観測衛星「あけぼの」ならではの科学的成果

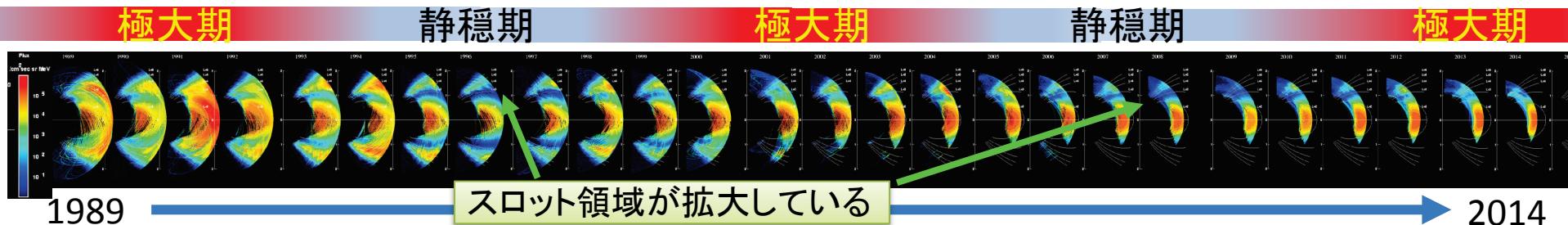
■ 「あけぼの」は、世界で最も長く地球磁気圏で観測を実施した衛星である。この長期観測データを国内外の研究者に公開することにより、査読付き論文311件、学位論文254件（うち、博士36件）等、多くの成果創出に貢献した。

➤ 代表的な例

地球近傍のヴァン・アレン帯の外帯が、太陽の状態の変動（1時間～11年単位の時間スケール）に応じてダイナミックに変動することを発見した。

- ・ ヴァン・アレン帯外帯は、太陽活動が活発な時に地球に近づく
- ・ 南向きの磁場を含んだ高速太陽風の到達に呼応して、高エネルギー電子が爆発的に増える

太陽活動



「あけぼの」の特徴的な観測高度を生かし、ヴァン・アレン帯の全体像把握ができるデータを26年間蓄積したことにより、太陽活動や太陽風の変動とヴァン・アレン帯外帯変動との関係理解が促進された。これにより、宇宙天気予報の精度向上に向けた課題の一つである「将来のヴァン・アレン帯の状態予測」に対し、太陽の状態とヴァン・アレン帯の位置や高エネルギー電子数との関係を明らかにするなど、学術的な知見で貢献した。