

氏名・(本籍)	こ ばやし かおり 小 林 香
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 1 3 0 2 号
学位授与年月日	平 成 5 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究課専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Studies on Origin of the Auroral Kilometric Radiations Based on Plasma Wave Sounder Experiments of the Akebono (EXOS - D) Satellite (あけぼの (EXOS-D) 衛星におけるプラズマ波及びサウンダー実験にもとづくオーロラキロメートル電波の起源に関する研究)
論文審査委員	(主査) 教 授 大 家 寛 教 授 服 西 浩 教 授 斎 藤 尚 生 副 教 授 森 岡 昭 副 教 授 岡 野 章 一

論 文 目 次

Acknowledgements

Abstract

Contents

1. Introduction

1.1 Auroral Kilometric Radiations as Non - Thermal Planetary Radiation

1.2 Motivation of Studies and Structure of the Present Thesis

2. A Review of the Studies on Auroral Kilometric Radiations (AKR)

2.1 Identification of AKR Phenomena and Source Position

2.2 Identification of Wave Modes

- 2.3 Source Condition
- 2.4 Source Mechanisms
 - 2.4.1 Direct Excitation Processes
 - 2.4.2 Mode Conversion Processes
 - a) Nonlinear Conversion
 - b) Linear Conversion
- 3. Effects of Source Conditions of AKR
 - 3.1 Expansion of Wu – Lee Theory into the Inhomogeneous Plasma
 - 3.2 Resonance Condition and Density Distribution
 - 3.3 Possible Growth Rate of AKR
 - 3.3.1 Plasma Density and Magnetic field Models
 - 3.3.2 Velocity Distribution of Particles in the Sources
 - 3.3.3 Calculated Growth Rate
 - 3.4 Problems Deferred for Present Thesis
- 4. PWS Experiments in AKR Source Region
 - 4.1 EXOS – D (Akebono) Satellite
 - 4.2 PWS System
 - 4.2.1 Dynamic Spectra mode (DS mode)
 - 4.2.2 Polarization Observation Mode (PL mode)
 - 4.2.3 Poynting Flux Observation Mode (PY mode)
 - 4.2.4 System of Stimulated Plasma Wave Experiments (SPW mode)
 - 4.3 Detail of Poynting Flux and Polarization Measuring Mode of PWS System
 - 4.4 Souder Experiments
 - 4.5 AKR Observation Results in the AKR Sources
- 5. Observation Results in the AKR Sources
 - 5.1 Plasma Distribution in the Source
 - 5.1.1 Observation of January 15, 1990
 - 5.1.2 Observation of January 18, 1990
 - 5.2 Propagation Mode of AKR
 - 5.2.1 The June 26, 1989 event
 - 5.2.2 The June 28, 1989 event
 - 5.3 Electrostatic Component in the AKR Source Region
- 6. Validity of the Theories – Discussions Based on the EXOS – D Observation Results
 - 6.1 Validity of the Source Conditions for the Theories
 - 6.1.1 ϵ value and possible growth rate of the Wu and Lee theory

6.1.2 Possibilities of the Linear Conversion Processes

6.2 Polarization and Propagation Mode of AKR

7. Conclusion

Appendix

References

論文内容要旨

第1章 緒言

我が地球を始め、木星や土星のように磁場をまとっている惑星は、宇宙空間に向かって、様々な電磁波を放射している。放射される電磁波は、各惑星の磁場強度、プラズマ環境に依存して、それぞれ特有な周波数を持ち、惑星間プラズマの熱的な放射である銀河電波に比べて、非常に大きなエネルギーで放射されている。従って、この惑星起源の電磁波は、共通した、非熱的な発生機構により放射されると考えられる。地球起源の強大な惑星電波であるオーロラキロメートル電波（AKR）に関しては、科学衛星による多量の観測結果が蓄積されているので、AKRの解析が惑星電波の発生機構の解明の大きな鍵を握っている。

惑星電波の発生機構としては、1970年代に2つの線形理論が提起されている。この2つの理論は、高エネルギー粒子から波動にエネルギーが渡される点では共通しているが、その際の波動と粒子の相互作用の型、粒子のエネルギーの大きさ、及び相互作用する波動の周波数等の点で本質的に異なるものである。サイクロトロン型の粒子波動相互作用により、電磁波を直接的に増幅する、直接発生説と、逆ランダウ型の粒子相互作用により励起された静電プラズマ波動が電磁波に変換されるという、変換説があげられている。AKRについては、科学衛星による初期の観測結果と、理論に基づく計算により、2つの線形理論の内、直接発生説がその発生機構として採用されていた。

本研究では、AKRの発生機構に関して、観測より得られた発生域の変化に富んだプラズマ状態を考慮し、粒子と波動が非常に微妙な条件の上で共鳴するという直接発生説のかかえる問題点を指摘し、理論に基づく電磁波動の成長率の計算と科学衛星 EXOS - D (あけぼの) によるAKRとそれに伴う様々な現象の総合的な観測事実の分析から、2つの線形発生機構について検討を加えた。その結果、直接発生説が唯一のAKRの発生機構ではなく、プラズマ波動変換説が、実際のAKRをよりよく説明する場合が多いことが明確にされた。

第2章 オーロラキロメートル放射現象（AKR）

地球起源の惑星電波であるAKRは旧ソビエトの衛星 Elektron 2 及び 4 により、2つの周波数において発見され、その後、Gurnettにより系統的な現象の解析が報告された。この電磁波動は、200kHzを中心とする50kHzから500kHzの周波数帯域を持ち、極域の地球磁気圏から 10^7 Wattsでパースト的に放射されている。ディスクリットオーロラの出現、オーロラ現象と対応するinverted-V現象、及び、磁気圏の激しい活動であるサブストームとの密接な関連が指摘されている。夜側のオーロラオーバルの上空3000kmから12000kmの範囲が最も観測の頻度が高く、発生域と考えられている。

提言されている2つの発生機構のどちらがAKRを発生するのかという議論については、今ま

では、初期の人工衛星によって観測された波動モードが R-X であり、これが直接発生説の予言するものと一致するために、直接発生説と認識されていた。しかし、現在、L-O モード及び Z モードの存在等の衛星による観測事実と、両理論がそれぞれ拡張されたことで、AKR のモードのみから、発生機構を特定することは非常に難しいものとなっている。

発生域の内部は電子密度が 10cm^{-3} を下回る領域であり、これが発生機構を考える上で重要な点である。しかしながら、均一な低密度領域ではなく磁気圏尾部の活動に依存して、複雑な微細構造が存在する。本研究ではこの発生域の電子密度に着目し、2つのパラメータ、プラズマ周波数 f_p とサイクロトロン周波数 f_c の比である、 $\varepsilon (=f_p/f_c)$ とその空間変化の程度 $\partial \varepsilon / \partial r$ を検出する。

直接発生説は、波動粒子相互作用の成立条件として ε が小さいことを要求している。今までになされた理論計算は、 $\varepsilon = 0.01 \sim 0.1$ の条件のもとで行われ、実際の AKR 強度を説明するのに十分な成長率を示す例が報告されている。しかし、成長率を求める式を導出する際の仮定として、均一なプラズマ状態を用いていること、また、電磁波帯域で励起され、一波長が数キロメートルにわたることで、十分な成長を遂げるまで波動-粒子間の共鳴が持続するために 100km オーダーの ε 、 $\partial \varepsilon / \partial r$ ともに小さい領域、つまり、均一な低密度領域を発生域のプラズマに要求している。

一方、変換説においては、その発生源での波長は 10m~100m と極めて短く、発生した静電プラズマ波動が電磁波に変換する際に、 $\partial \varepsilon / \partial r$ が大きいことが要求される。また、 ε については特に制限はされていない。

本研究では、生じた波動ではなく、波動を生み出す発生域のプラズマ状態に注目して、それぞれの理論の要求する状態が現実に近いかを検討する。

第3章 AKR 発生域のプラズマが直接発生説に与える影響

直接発生説の中で中心的な理論である Wu and Lee 理論はとりわけ微妙なプラズマ状態が実現されていないと、大きな成長率を与えることはできない。

本論ではまず、Wu and Lee 理論を WKB 近似を用いて、緩やかに変化するプラズマ媒質に対して拡張する。実際に観測された結果から、大きな構造を持つ電子の低密度域と、粒子の降り込みに対応する小さな構造の低密度域のモデルを作成し、地球の双極子磁場のもとで、低密度域の中心から外側の高密度の方向に電磁波を伝搬させた場合の、それぞれの途中点での波動の成長率を計算している。その際に波動の成長率に直接関わる高エネルギー粒子の速度空間分布としては、粒子降り込みに対応するビーム型と、極域に特有なロスコーン型を採用した。その結果、電子密度の不均質は Wu and Lee 理論に深刻な影響を与えることが明確になった。

i) AKR と関連の深い粒子の降り込みを示すビーム型の速度空間分布では、全く成長が生じない。

- ii) ロスコーン型では、低密度の中心部分で磁力線にほぼ垂直に伝搬する場合にわずかの増幅がみられたが、その後、伝搬に伴って成長率が負になり、全体的には減衰を受けることになる。

第4章 EXOS - D (あけぼの) 衛星に搭載された PWS による AKR の観測

1989年2月22日に、科学衛星 EXOS - D 衛星が地球磁気圏及び電離圏を探索する極軌道に打ち上げられた。この衛星は粒子、波動及び電場、磁場の同時観測を通じて、磁気圏と電離圏のつながりを総合的に解析するという、目的を持っている。

AKR とそれに関連する波動現象は、プラズマ波動観測及びサウンダー実験装置 (PWS) により高時間高周波数分解能をもって観測されている。PWS は自然電波の観測 (NPW) とサウンダー実験 (SPW) を行うことができ、それぞれの中でも様々な観測モードの実行で、高周波帯域の波動現象を最も適した状態で観測を行うことができる。本研究では、20kHz から 5.12MHz まで 2 秒間で計測可能なダイナミックレンジの広いスペクトル観測モード (Dynamic spectrum mode), DS mode と同じ周波数帯域の偏波観測モード (Polarization observation - PL mode) の他に、AKR 現象と発生域内部の電子密度との同時測定のため、PL mode, 電磁波動エネルギーベクトル (ポインティングベクトル) の測定 (Poynting flux measurement - PY mode), 及び 20kHz から 170kHz を 1 秒で計測できる、最も時間分解能の良いサウンダーモード (fp tracking mode) を短時間で切り替えて実行する複合モードによる高周波数高時間分解能観測の成果について述べる。また、20kHz から AKR の周波数帯 (890kHz) まで 16 秒間で測定可能なサウンダーモード (L - sweep mode) も、自然電波と高周波電場により励起された plasma resonance の両者を同時計測でき、電子密度の微細変化と AKR 現象を対応づけて解析できる非常に有効な観測モードであることが示されている。

特に PY mode での計測は、世界で初めて振幅及び位相情報を保存して AKR 発生域での波動電場 2 成分と磁場 3 成分の計測を行い、その波形を示した点で貴重なものである。これにより、波動電場の Z 成分は測定されないが、電磁波であるとの仮定 ($\mathbf{E} \cdot \mathbf{H} = 0$) のもとに、ポインティングベクトル 3 成分 \mathbf{S} ($\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$) を求めることができた。

第5章 発生域内部の総合的解析結果

EXOS-D 衛星により観測された AKR の様々な現象及びその解析結果特に 1990年1月15日の複合モード及び 1990年1月18日の L-sweep モードによる観測の結果は、

- i) AKR 発生域内の大規模な電子低密度領域が存在する、
- ii) 70° ILAT 近傍の強い AKR 現象には、粒子の降り込みにより励起される静電プラズマ波動が同時に観測され、また右回り偏波、左回り偏波のスペクトル場に強度の違いは特でない、
- iii) 62° ILAT の近傍の低緯度では、偏波に大きく依存する、
- iv) 1 波長に対して 10% 程度の電子密度変動 $\partial \epsilon / \partial r$ が常に存在する、
- v) 発生域に引き戻した ϵ 値はほぼ 0.1 から 0.2 程度の間にあるが、強度の大きな AKR 現象が観

測されている場合にも、 ϵ が0.5~1.0に及ぶ場合もある、
ことが示された。

また、1989年6月26日及び1989年6月28日の複合モードによる観測の結果は、

- i) ポインティングベクトル計測により、L-OモードのAKRが確認された、
- ii) 非常に強度が大きく、またバンド幅の拡大されたバースト状のAKRの前後で、偏波の強度関係が反転している、つまり、初期にはL-OモードをもつAKRが、バースト以降はR-Xモードになる、
- iii) AKRに伴う静電的なプラズマ波動の存在が、スペクトルとポインティングベクトル計測による電場の直線偏波により示された。

これらの結果は、EXOS-D衛星に搭載されたポインティングベクトル計測により初めて可能になった事柄である。

第6章 EXOS-D衛星の観測結果に基づく2つの線形発生機構の検討

第3章で、直接発生説の根拠となる波動-粒子相互作用は、非常に微妙な条件の上に成り立つものであること、また、実際に考えられる電子密度構造に基づく成長率の計算結果は、低密度域の中心から外側に向けて波束が通過するような場合、全体では負の成長率になり、また、わずかな密度の上昇によって粒子との相互作用が失われることを示した。

EXOS-D衛星の観測では、実際のAKR発生域では $\epsilon (=fp/fc)$ が1波長に対して10%の変動を示すこと、観測位置から発生域における値に引き戻した ϵ 値は、Wu and Leeの理論で共鳴条件を満たす限界である0.1という値をしばしば上回っている結果が得られた。従って、発生域で実際に存在するプラズマ状態を考慮すると、直接発生説によるAKRは存在し得ないという結論が導き出される。

モード変換説においては、静電プラズマ波動として励起されるために、1波長が短く、km~10km程度の不均質な媒質の影響を全く受けず、また、Zモードに変換された後では $\partial \epsilon / \partial r$ が大きいほど、電磁波への変換に際して、効率の高い値になる。また、強度の大きい静電的プラズマ波動が実際に、強度の大きいAKRに伴っている点、及び、その静電波動は粒子の降り込みに対応するビーム型の実速度空間分布により励起される点を考慮すると、静電プラズマ波動を源に持つモード変換説がより近いAKRの発生機構であるといえる。

特に1990年1月18日に観測された電子密度の壁の近傍で観測されるAKRはモード変換説がその発生機構として妥当であると結論される。

定常的なAKRはL-Oモードで観測され、オーロラ活動の上昇にともなうバースト状の強度の大きいAKRのモードがR-Xに反転する現象は、Oya and Izuimaによるドップラー変換機構により、矛盾なく説明できている。

第7章 結論

AKR 現象の発生機構の解明は、1970年代から継続して重要な問題であった。今にいたるまで様々な線形及び非線形の理論が提言されていたが、実証的な手法では特定されていない。

Wu and Lee による直接発生説に基づく波動の成長率を緩やかに変化する媒質に拡張した理論計算、及び、EXOS - D 衛星にて観測された実際の発生域の変化に富むプラズマの状態が実証され、いままで、絶対的に支持されてきた直接発生説が唯一の AKR の発生機構と見なされていたことに対して、十分な反証となるものである。

本研究では特に、

- i) AKR の発生域の電子密度構造はモード変換説に基づいて、定常的に L-O モードの波動を発生させるのに、必要な変動規模を持つこと、
- ii) 強い静電プラズマ波動を励起する、強い粒子の降り込みを伴う時には、その境界面での速度差によるドップラー変換論に基づく、爆発的な強度を持つ R-X モードの AKR が発生すること

が明確にされ、実際の AKR 現象を総合的に説明しうる理論としては、モード変換説が受け入れられると結論された。

論文審査の結果の要旨

小林 香提出の論文は、地球におけるオーロラ発生時に、オーロラ粒子の加速域で生ずるオーロラキロメートル電波の発射機構について、理論及び EXOS-D (あけぼの) 衛星の観測にもとづく実証をもって取り組み、その発射機構について静電的プラズマ波動及び高域ハイブリット波が電磁波に変換する機構が極めて重要な役割を果たすことを明らかにしたものである。

現在、提唱されているオーロラキロメートル電波の発射機構は、大きく二つのカテゴリーに分けられる。一つは ϵ ($=fp/fc$: fp プラズマ周波数, fc 電子サイクロトロン周波数) に対し $\epsilon < 0.1$ の希薄プラズマ中で生ずる相対論的サイクロトロン共鳴に起因する電子サイクロトロンメーザー機構で, Wu and Lee によって最初に提唱されている。本研究では、この理論が実際のオーロラ粒子加速域に適用可能か否かを理論的に検討した。検討に際してはいくつかの、実測に近いプラズマモデルを用いている。その結果、 $\epsilon < 0.1$ の場合でも不均一性が高いプラズマ中で、この Wu-Lee メカニズムでは十分な波動成長がないことが明らかになった。

本研究の後半は、実際にオーロラ粒子加速域に突入して観測を実施した EXOS-D (あけぼの) 衛星によりオーロラキロメートル電波のスペクトルや偏波の特性の観測を行い、同時にオーロラ粒子の加速域のプラズマ状態を解明したものである。その結果、オーロラ粒子加速域でオーロラ電波の放射域では、 $\epsilon > 0.1$ の場合が頻繁に生ずること、また源ではわずか一波長の間 ϵ の値は 10%~20% も変化し、サイクロトロンメーザー機構では説明不可能な状態が出現することが確認された。

また、観測される偏波の特性等と総合するとき、オーロラ粒子加速域では、波長の短い静電的プラズマ波動が生じていること、そしてそれが激しい媒質の不均一性を通じて電磁波に変換されるメカニズムが高い頻度で存在することが明らかにされた。これはオーロラキロメートル電波の発生について第 2 のカテゴリーであるモード変換の機構の重要性を指摘するもので、オーロラキロメートル電波の物理の理解を歴史的に塗りかえる独創性の高いものである。

よって小林 香提出の論文は著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示していて、博士(理学)の学位論文として合格と認める。