

京都大学	博士 (工学)	氏名	滝 朋恵
論文題目	Study on the plasma waves observed by single spacecraft interferometry in the terrestrial inner magnetosphere (地球内部磁気圏において単一衛星による干渉法で観測されたプラズマ波動に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、地球内部磁気圏を探索している「あらせ衛星」に搭載された2本のモノポール電界センサーを用いた干渉法(interferometry)による観測・解析手法、および、その手法を異なるプラズマ波動現象に適用して得られた観測結果とその考察についてまとめたものである。科学衛星に搭載されるプラズマ波動観測器は、プラズマ波動の電界成分を捉えるためにダイポールの電界センサーを用いることが一般的であるが、本論文ではそのダイポールセンサーを構成する2本のエレメントをモノポールセンサー2本として用いることにより、プラズマ波動の空間的な位相差とその時間変化を捉えることに焦点をあてている。これは単一衛星干渉法による観測であり、そこからプラズマ波動の波面やその移動速度(位相速度)を求めることができる。プラズマ波動の位相速度に関する観測は、そのプラズマ波動のモード決定や、空間スケール、周囲のプラズマ環境などを知る上で重要である。本論文は7章で構成される。以下に、本論文の概要を示す。</p> <p>第1章は序論であり、地球磁気圏における衛星観測の意義と干渉法による観測、および、本論文で干渉法を適用する静電孤立ポテンシャル、ホイッスラーモードコーラス波動、電子サイクロトロン高調波の概要について述べている。</p> <p>第2章は本論文で取り扱う、あらせ衛星とその搭載機器について概要をまとめ、更に、プラズマ波動観測器がもつ、モノポールセンサー2本による干渉法観測とそこから得られるデータの解析手法について述べている。特に、プラズマ波動の位相速度の導出、孤立ポテンシャルの移動速度や空間スケールの導出方法について詳しく述べている。</p> <p>第3章では、あらせ衛星で観測された静電孤立波に対し、干渉法を適用した結果について述べている。静電孤立波は、空間的に孤立した静電ポテンシャル構造が、衛星を横切って移動する際に観測される電界波形である。本論文では、干渉計を用いて静電孤立波を観測し、二本のモノポールセンサーで観測された電界波形から観測時間差を算出している。そして、そこから対応する静電孤立ポテンシャルの空間スケールを算出し、数100mから数km程度と導出することに成功している。また、更に、あらせ衛星で観測されている静電孤立波の波形の特徴から内部磁気圏に存在する静電孤立ポテンシャルとして、二次元のGaussianで表されるポテンシャルモデルを提案し、数値計算を行うことで観測波形の特徴を再現することに成功した。そして、一次元構造を示す磁気圏尾部領域における静電孤立ポテンシャルに対し、内部磁気圏では二次元ポテンシャル構造が主となっていることを明らかにした。</p> <p>第4章では、プラズマ波動のなかでも電磁波であるホイッスラーモードコーラス波動に対し、干渉法を適用して、その波面の特定などを行った。ホイッスラーモードに代表される電磁波モードは、一般に電界センサーの長さ比べてその波長が非常に長く、また、位相速度も速いため、本論文のように単一衛星による干渉法には制約がある。本論文では、衛星がスピンすることにより、電界センサーと波面の角度が変化していくことを利用して、干渉法から得られる位相差のスピン依存性から、コーラス波動に対する干渉法観測モデルを作成した。そして、その結果を元に、単一衛星における干渉法において、観測可能な位相速度の上限と下限を算出した。</p> <p>第5章では、静電波に対する干渉法観測についてまとめている。静電波は、4章で扱</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	滝 朋恵
<p>った電磁波と異なり、その波長が一般に短く、電界センサー長のオーダーにまでなることがある。また、位相速度が遅いことも特徴である。本論文では、静電波として、あらせ衛星で観測される電子サイクロトロン高調波に焦点をあてている。二本のモノポール電界センサーが捉える電子サイクロトロン高調波の位相差が、衛星のスピンの依存することに対して、観測モデルを作成し再現することに成功した。これにより、あらせ衛星の干渉法が正確に電子サイクロトロン高調波の位相を捉えていることを示した。一方、この詳細解析の中で、高調波スペクトルが更に複雑な構造を含んでいることを示し、そしてその構造ごとに、干渉法により得られた位相関係が大きく異なることを明らかにした。そして、その結果より、複数の方向から到来する電子サイクロトロン高調波が同時に観測されている可能性について言及した。</p> <p>第6章では、電子サイクロトロン高調波の観測モデルを用いて、電子サイクロトロン高調波の波数ベクトルの成分を推定する手法を提案した。そして、この手法によって推定した波数ベクトルを用いて位相速度を算出した。電子サイクロトロン高調波の分散関係は、電子の温度に強く依存している。特に、あらせ衛星が観測している低エネルギー電子が大部分を占める領域では、この低エネルギー電子の温度が分散関係に大きな影響を与える。一般に低エネルギー電子は、衛星の帯電などの影響で粒子センサーから温度を求めることが難しいが、本論文では、干渉法により観測された電子サイクロトロン高調波の位相速度から、電子サイクロトロン高調波の分散関係を推定して、そこから低エネルギー電子温度を算出することに成功した。算出された低エネルギー電子の温度は数 eV オーダーとなり、電離圏由来と考えられている低エネルギー電子の温度としては、矛盾ないことを示すと同時に、電子サイクロトロン高調波の干渉法観測により、粒子観測器を用いず、また、衛星帯電の影響を受けずに、低エネルギー電子の温度を導出する手法を提案することができた。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約した上で、将来ミッションにおける展望についても述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、地球内部磁気圏を探索している「あらせ衛星」に搭載された2本のモノポール電界センサーを用いた干渉法(interferometry)による観測・解析手法、および、その手法を異なるプラズマ波動現象に適用して得られた観測結果とその考察についてまとめたものである。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. あらせ衛星の干渉法で観測された静電孤立波の電界波形から、相当する静電孤立ポテンシャルの移動速度を算出した。そして算出した移動速度から静電孤立ポテンシャルの空間スケールが数 100m から数 km 程度であると明らかにした。また、この孤立ポテンシャル構造に対し、二次元 Gaussian モデルを提案し、数値計算を行うことで観測波形の特徴を再現することに成功した。そして、内部磁気圏で観測される静電孤立ポテンシャル構造が 2 次元的であり、1次元構造の様相を示す磁気圏尾部で観測される同様のポテンシャル構造と異なることを示した。
2. あらせ衛星の干渉法で観測されたコーラス波動に対し、二本のモノポール電界センサー間での位相差を算出した。得られた位相差にみられたスピン依存性を説明するコーラス波動に対する観測モデルを作成した。また、コーラス波動の観測を元に、干渉法観測で観測可能な位相速度の上限と下限を示した。
3. 電子サイクロトロン高調波対して、あらせ衛星の干渉法観測を行い、モノポール電界センサー間の位相差を算出した。また、電子サイクロトロン高調波の干渉法観測モデルを作成することで、数値計算によって位相差のスピン依存性を再現することに成功した。更に、周波数ごとの位相差のスピン依存性を比較することで電子サイクロトロン高調波の波数方向が周波数によって異なっている可能性を指摘した。
4. 電子サイクロトロン高調波の干渉法観測モデルを用いて、波数ベクトルを推定する手法を提案した。そして、そこから位相速度を計算することで、単一衛星では算出が難しい波数を求めることに成功した。そして、観測から求めた波数と角周波数が、線形分散理論曲線とよく一致することを示した。更に、電子サイクロトロン高調波の線形分散理論曲線が低エネルギー電子の温度に強く依存することを用いて、衛星搭載のプラズマ観測器からは導出が難しい低エネルギー電子温度を電子サイクロトロン高調波に対する干渉法観測結果から算出し、それが数 eV オーダーであることを示すことに成功した。

本論文は宇宙空間プラズマ波動に対する、単一衛星で行う干渉法観測の有効性を示した。そして、今後の衛星観測において、この手法が利用され、宇宙プラズマに対して更に多く知見をもたらすことが期待でき、本論文の成果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年8月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。