Data selection and statistical analysis of characteristic plasma wave observed by science spacecraft

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2017-10-05
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者:
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/42259

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博士論文

科学衛星による電磁波観測データの選別・抽出手法と それを用いた特徴的プラズマ波動の統計解析

Data selection and statistical analysis of characteristic plasma wave observed by science spacecraft

自然科学研究科 電子情報科学専攻

大池 悠太

Abstract

Plasma wave, which reflects plasma density and geomagnetic intensity along the propagation path to their propagation characteristics, is an effective tool to examine the magnetospheric plasma environment. Such plasma waves were observed on the ground entirely in the past and nowadays enormous amounts of the data are provided from the scientific spacecrafts.

Recently observational instruments onboard spacecraft have been digitized and can have faster processor and larger memory and data rate generated by the instruments are getting larger and larger. Therefore, unique, efficient software to select, extract, and detect the data is essential both onboard to reduce the data size transmitted to the ground and on the ground for analysis.

Based on this back ground, we evaluated the performance of the data selection algorithm implemented in WFC-L onboard Kaguya spacecraft for feedback to future onboard software design. It was found that the algorithm is effective for Kaguya orbit.

In addition, we developed a detection system to find out lightning whistlers from the data obtained by WBA onboard Akebono satellite. The detection algorithm is designed to be implemented onboard. we statistically analyzed the detected lightning whistlers. It was revealed that the occurrence frequency of the lightning whistlers has clear seasonal and diurnal dependence independently. We supposed that the seasonal one is originated in the lightning activity in source region and the diurnal one is due to the ionosphere which absorbs VLF waves in the D region in daytime.

We hope our works contribute to scientific research and future space exploration.

1 序論

1.1 研究の背景

我々の住む太陽系宇宙空間では,太陽大気を起源 とするプラズマ粒子の流れである太陽風が吹き付け られる.一方で地球は,およそ双極子に近似される, つまり地球を一つの棒磁石とみなせるような固有の 磁場を持ち,この磁場が太陽風によって有限領域に 閉じ込められることで,地球磁気圏が形成される[1]. 極域で見られるオーロラは,太陽風と磁気圏の相互 作用で発生する代表的な現象のひとつである.また, 地球の超高層領域の中性大気は,太陽からの紫外線 やX線によって電離し,電離圏及びプラズマ圏を形 成する.磁気圏プラズマの構造は,太陽活動や地磁 気活動,超高層大気の成分等,様々な要因により絶 えず変動し,その全容は未解明である.

このような複雑で巨大な電磁環境を解明するため の有効な道具として,磁気圏プラズマ内を伝搬する 電磁波,すなわちプラズマ波動が挙げられる.プラ ズマ波動は,その生成や消失,伝搬過程の振る舞いが プラズマ粒子密度や磁場の強さに依存するため,そ の特性を詳しく解析することで,磁気圏プラズマ環 境の推定が可能となる.磁気圏プラズマ波動は,条 件に制約はあるものの地上でも観測可能で,例えば, 雷ホイスラと呼ばれる電磁波の地上観測データの解 析により,磁気赤道域の電子密度分布の推定等が行 われてきた [2,3].そして今日では,人工衛星の利用 により,諸現象の発生源近傍で直接的に粒子とプラ ズマ波動とを観測することで,より詳細な発生原理 や成長過程,相互作用の解明が進められている.

こうした磁気圏環境の解明が進むことで実現が期 待されることのひとつに,空間的・時間的変動の予 測,いわゆる宇宙天気予報がある[1].宇宙天気予報 は,通信,放送,測位,気象,科学衛星の誤動作の 対策を可能にしたり,船外宇宙飛行士の被爆を防止 したりと,我々の身近な生活,さらには将来に向け た宇宙開発にとって非常に重要な役割を果たす.

1.2 研究の目的

近年の科学衛星搭載機器はディジタル化,ソフト ウェア化が進み,衛星機上である程度高度な処理も 可能になっている.一方で,センサの高性能化,メ モリの大容量化を背景に,高精細・高分解能なデータ に対する需要は益々増加している.必然的に衛星機 上のデータ生成レートは増加し, さらに, 深宇宙探 査も徐々に活発化していることから,地上へのデー タ伝送レートと機上でのデータ生成レートの乖離は -層大きな問題となる.こうした問題への対策とし て,月周回衛星かぐやに搭載された電磁波観測装置 では,自律的にデータを選別する機能が実装された. 本研究ではまず,将来衛星において波形データを効 率的に取得するソフトウェア設計に向けたフィード バックを目的として,月周回衛星かぐや搭載の波形 観測装置 WFC が持つデータ選別機能である,自動 帯域選別機能 [4] を対象に,主に観測効率に着目し た性能評価を行った.

一方で,既存のデータに関しても,まだ充分なデー タ解析が行われていない状況も多く,新たな知見獲 得に向けた活用の余地があり、本研究では、あけぼ の WBA 長期観測データの網羅的解析として,特徴 的なスペクトル構造をもつ電磁波, 雷ホイスラ [5] に 着目し、その発生頻度の分布を調査した、雷ホイス ラは,地上観測においては以前からよく研究された 波動であるが,衛星観測での長期的な解析は未だ充 分に為されておらず,本研究は,雷ホイスラと関連 現象との包括的な理解に役立つと考えられる.また, 雷ホイスラのスペクトル形状を決定づけるパラメー タの変動から、既存の電子密度分布モデルの妥当性 を検証する手法についても検討する.本統計解析で 用いた雷ホイスラ検出手法は,衛星機上でのデータ 選別に応用することを視野に入れており, データを 取得しながら逐次的に行うことも可能な設計である.

2 月周回衛星かぐや搭載電磁波観 2.1 測装置のデータ選別機能性能評 波河価

宇宙空間の電磁波解析を詳細に行うためには、周 波数スペクトルの取得だけではなく,振幅や位相情報 を無歪みで保持できる波形の観測が重要となる.しか し,人工衛星における観測はテレメトリの伝送容量の 制約が厳しく,広帯域で長時間の連続波形を測定して も, すべてを地上に伝送することはできない. 観測機 上で生成されるデータは伝送容量に比べて非常に大 きく, WFC-L においても, 波形データ生成レートが 最大で 250ksample/s × 16bit × 3ch = 12Mbps であ るのに対し,割り当てられる最大伝送容量は128kbps で,生成レートの1/100程度である.このことから, オンボード処理で如何にデータを縮小するかが効率 的な波形観測を行う上で重要となる.波形観測では, できるだけ連続的な測定を行うことが望まれるが, WFC-L では上記の制約からリアルタイム伝送は不 可能なため,連続波形を一旦機上バッファに蓄積し, 少しずつ地上に伝送する手法がとられる.このため, 一定時間幅の連続波形を断続的に測定する間欠観測 となる.WFC-Lの波形観測の流れを図1に示す.-度の測定でバッファに蓄えられる連続波形時間は観測 チャネル数と A/D 出力レートに依存し, 1.5~6 秒で, これを約2分かけて伝送する.こうした状況下で観測 効率を向上させるために, WFC-Lには, ディジタル フィルタリング機能,及びそれを用いたデータ選別ア ルゴリズムとして「自動帯域選択機能」(Automatic Filter Selection) [4] が実装された.次節からそれら 機能について説明する.





2.1 ディジタルフィルタリング

波形測定頻度向上のため,ディジタルフィルタリ ングによるデシメーション機能が実装された.これ により取得する周波数帯域は狭まるが, 伝送時間が 短くなるため,波形測定頻度を向上させることがで きる. デシメーション処理は,図2、図3にそれぞ れ示される振幅・位相周波数特性を持った LPF を通 した後, 点数を 1/2 に間引くダウンサンプルを行う ことで実現している.複数の帯域幅に対応するため 3段構成となっており,最終的なサンプリング点数 を1/2,1/4,1/8から選択できるようになっている. フィルタは FIR (Finite Impulse Response) により 実現されており,図2に示すように,遮断域に対し ては -67dB 以下の利得を実現しており, サンプリ ング周波数 250kHz の場合に通過域は 50kHz となる よう設計されている.サンプリング周波数 125kHz の場合はそれぞれさらに 1/2 の帯域幅となる.また, 図3に示すように,通過域において線形位相となる ように設計されていることから,フィルタを適用し ても波形を歪みなく保持することが可能である.



図 2: デシメーションフィルタ振幅周波数特性

デシメーション処理段数と A/D 出力レート, 波形 測定間隔の関係を表1に示す.例えば, 2 成分観測, A/D 出力レート 250kHz の場合, デシメーション処 理なしでは約2分おきに 1.5 秒の波形測定となるの に対し,3段のデシメーション処理を行うことで,約 15秒おきに 1.5 秒の波形測定が可能となる.この機 能により, 波形データの取得帯域及び取得頻度に対



図 3: デシメーションフィルタ位相周波数特性



表 1: デシメーション処理段数による波形測定間隔 と有効周波数上限の変化

A/D 出力レート 250kHz						
段数	波形測定間隔	有効周波数上限				
0	117 秒	100kHz				
1	59 秒	50kHz				
2	29 秒	25kHz				
3	15 秒	12.5kHz				

データ選別アルゴリズム 2.2

前節のディジタルフィルタリングによるデシメー ション機能を有効に活用するためのデータ選別アル ゴリズムが,本節で説明する「自動帯域選択機能」[4] である.同機能のブロック図を図4に示す.ブロッ ク図上部がデシメーション処理部分,下部が自動判 定処理部分である.まず, BPF により, バッファに 蓄えた波形データから,50~100kHz,25~100kHz, 12.5~100kHzの3帯域を抽出し,それぞれの平均エ ネルギーを算出する.それを予め設定しておいた閾 値と比較することで,各帯域に有用な波動が存在す るかどうかを判定する.算出した平均エネルギー値 が閾値を下回り不要とみなされた高周波帯域に対し、 前述のデシメーション処理を適用することでサンプ ラムにおいて,黒線より下が選別された帯域である. ル数を削減し, 伝送時間を短縮する.



図 4: 自動帯域選択機能ブロック図

かぐやによる自然波動観測では低周波側の帯域で より重要な波動が多く観測されることが期待されて いたため, 同機能は有用な電磁波を効率よく観測す ることを目的に運用された.

データ選別アルゴリズムの性能評価 2.3

WFC-L 観測波形データのスペクトログラム例を図 5に示す.最下部の時刻は,連続波形データの測定開 始時刻を示しており、各周波数成分毎の強度の時間変 化を,右側のカラーバーに示す色を用いて dBµV/m 単位で表している.間欠観測であるため,連続波形 毎にスペクトログラム間に白抜きのギャップを設け て描画している.例えば,X,Y それぞれ左端のス ペクトログラムは, 2007年12月11日11時40分 05 秒 UT (Universal Time)を測定開始時刻とする 1.5 秒分の連続波形データの強度スペクトル変化を 表す.また,Sat. (Saturation)というタイトルの付 いたバーは,波形データが A/D 変換の数値上限に 飽和していたかどうかを示す.

本研究では,データ選別を行わず全観測帯域を地 上伝送した通常観測時のデータに対し,機上と同じ 選別アルゴリズムを地上で適用することで,その評 価を行った.通常観測時のデータに選別アルゴリズ ムを適用し,選別結果をスペクトログラムと共に可 視化した例を図6に示す、図の上部のスペクトログ 下部のグラフは,判定に用いた各抽出帯域の平均エ



図 5: 通常観測データのスペクトログラム例

ネルギーと閾値を表示している.線の色と帯域の対応 は、黒-0.1~100kHz(抽出無し)、青-12.5~100kHz, 緑-25~100kHz,赤-50~100kHzとなっており、実線 がキャプチャ毎に算出された平均エネルギー、破線 が閾値を示す.閾値の値は上から52.1dB,49.9dB, 48.7dBである.スペクトログラムは絶対強度で示し ているが、平均エネルギーと閾値は、A/D 変換器の 出力を用いて算出した相対dB値であり、各閾値を絶 対強度に換算すると、32.3dB μ V/m、30.1dB μ V/m、 28.9dB μ V/mとなる.このように、選別結果をスペ クトログラムと共に可視化することで、判定基準の 違いによる選別結果の比較を行った.



図 6: 地上シミュレーションによるデータ選別例

データ選別アルゴリズムによって,観測1キャプ チャにおける伝送サンプル数は最小で1/8となるた め,それに伴い伝送時間も最小で1/8となる.伝送 時間が短縮されれば測定頻度が上がるため,観測効 率がよくなると言える.本論文では以降,ある期間 におけるデータ伝送時間の総和の比を観測効率向上 率と呼ぶこととし,観測効率の評価指標とする.観 測効率向上率は次式で算出する.

観測効率向上率 = データ選別なしの総伝送時間 データ選別ありの総伝送時間 (1)

データ伝送時間については,伝送サンプル数が1/8 となるデシメーション処理3段の場合を1と正規化 し,2段,1段,0段(デシメーション処理無し)で それぞれ2,4,8とする.

通常観測全キャプチャに対してデータ選別アルゴ リズムを適用した場合のデシメーション処理の内訳 を表 2 に示す.表 2 を基に,式(1)から観測効率向 上率を算出すると

$$\frac{8 \times N}{\sum_{i=0}^{i=3} [2^{3-i} \times N_i]} \approx 3.8$$
 (2)

となり,通常観測全キャプチャに対してデータ選別 モードを動作させた場合,約3.8倍の観測効率向上 が見込めたことがわかる.このことから,かぐや周 回軌道において,自動帯域選択機能は観測効率の面 で効果的であったと言える.

表 2: 通常観測時全取得データに対するデータ選別 処理の内訳

総キャプチャ数	31153(N)				
デシメーションなし	$2711(N_0)$				
1/2 デシメーション	$3401(N_1)$				
1/4 デシメーション	$5076(N_2)$				
1/8 デシメーション	$19965(N_3)$				

あけぼの VLF/WBA 長期観測 データを用いた雷ホイスラの統 計解析

3.1 雷ホイスラ

雷ホイスラは,その名の通り雷放電を起源とする VLF (Very Low Frequency, 超長波)の一種である [5]. 雷から放出されたエネルギーの大部分は,地表 と電離圏の間を導波管として伝搬し,空電(sferics) と呼ばれる[6].一方で,エネルギーの一部は電離圏 を通り抜けて,地球磁場の磁力線に沿う経路で反対 半球まで伝搬する.この電磁波は,電離圏プラズマ 中を伝搬する過程で分散性を持つ, すなわち, 高周 波成分ほど速く伝搬する性質を示す.その分散の度 合いは伝搬経路の電子密度分布,経路の距離,そし て背景磁場の強度に依存することが知られている [5]. 雷ホイスラは, 雷が波源となり, またその観測可能 性が電離圏の状態に大きく左右されることから,地 上の雷活動度や,電離圏及びプラズマ圏の電子密度 変動を推定するリモートセンシングツールとしての 応用が期待される.

3.2 WBA スペクトルデータからの雷ホ イスラ検出

図7に, 雷ホイスラが含まれるスペクトログラム (f-t図)を示す.スペクトログラムの時間・周波 数分解能は20ms, 50Hz である.スペクトログラム 中,カタカナの「ノ」を縦に細長くして左右逆にし たような形に強い強度が現れているのが雷ホイスラ である.

3.2.1 検出処理の流れ

雷ホイスラの周波数スペクトルにおいて,周波数 fの成分の観測時刻 t は,近似的に以下の式 (3) で 表されることが知られている.

$$t_2 - t_1 = D \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{f_2}} - \frac{1}{\sqrt{f_1}}\right) \tag{3}$$



図 7: 雷ホイスラが観測されているスペクトログラ ムの例

式中の変数の関係を図で示したのが図8である.式 (3)中,Dは雷ホイスラの分散の大きさ, $t_1 \ge f_1$ は, 雷ホイスラスペクトルの任意の成分の観測時刻と周 波数, $t_2 \ge f_2$ はその後に続く成分の観測時刻,周 波数を示す.厳密には,ひとつの雷ホイスラにおい て分散値Dは定値ではなく,fの関数となる[5]が, 本論文では,各周波数成分の観測時刻と周波数から 導出可能な定数として取り扱う.式(3)を変形して, 周波数と時刻の差分を使って表すと以下の式(4)の ようになる.

$$\Delta t = D \cdot \Delta \frac{1}{\sqrt{f}} \tag{4}$$

ここで, Δt は 2 成分間の時刻差分, $\Delta(1/\sqrt{f})$ は, 対応する周波数間の平方根の逆数 ($1/\sqrt{f}$)の差分である.式(4)の形に合わせてスペクトログラムの縦軸を周波数 f から, $1/\sqrt{f}$ に変換すると, 図 9 に示すように雷ホイスラは傾きを持った直線として現れる.この性質を利用して, $1/\sqrt{f} - t$ 図上で直線を見つけ出すことで雷ホイスラの検出を行った.

本検出処理は,予め長期大量データにアクセスす るような前処理は必要としないため,機上ソフトウェ アへの実装にも応用しやすい設計である.

3.2.2 検出例

スペクトログラム上での雷ホイスラ検出例を図 10 に示す.黒線でなぞられているのが検出された雷ホ



図 8: 雷ホイスラスペクトルにおける周波数と時刻の関係



図 9: $1/\sqrt{f} - t$ 図上での雷ホイスラ

イスラである.目視の判断に基づくと,検出されて いない雷ホイスラが見受けられるが,これは検出漏 れよりも誤検出を抑制することに重点を置いた結果 となる.ここでの誤検出とは,雷ホイスラではない 別の波動を雷ホイスラとして検出してしまうことを 指し,例えば,周期的に強度が変わるような比較的 広帯域な波動などが誤検出されることがある.

3.3 USC データを用いた雷ホイスラ統計 解析

本節では,WBA 観測の中で特にUSC(内之浦宇 宙空間観測所)からの追跡で得られたデータから雷 ホイスラを検出し,主に観測頻度に着目して統計解析



図 10: スペクトログラム上での雷ホイスラ検出例

を行った.以下,USC からの追跡で得られた WBA データを USC データと呼ぶ.対象となる USC デー タは,1989年2月から2010年12月までの約22年 間分であり,最大2時間程度の WAVE ファイル6000 個以上に相当する.電界観測データからの検出例は 観測時間に対する比として非常に少なく,有意な統計 を得ることが難しいと判断したため,磁界観測データ のみを用いたが,それでも総観測時間は約96705分, その間検出された雷ホイスラ数は91401となった.

3.3.1 観測頻度の月変化

観測頻度の月変化を図 11 に示す.横軸の月は英名称の頭文字で表され,縦軸は観測頻度である.観測 頻度は,単位時間当たりの検出ホイスラ数で定義される.図から,7月から8月にかけて,及び12月から1月にかけて,年に2回のピークがあることがわかる.

[7] は,ハンガリーのティハニー地上局における雷 ホイスラ観測頻度の季節変動が磁気共役点に相当す る南アフリカ地域の雷活動度の変動と高い相関を持 つことを示した[7, Figure 7].また,[8] は,南半球 のニュージーランド,ダニーデンの地上観測における 雷ホイスラが,主に北半球の夏季に頻繁に発生する ことを明らかにした.このような雷活動度と雷ホイ スラ観測頻度との密接な相関関係を考慮すると,あ けぼの衛星では南北両半球からの雷ホイスラを観測



図 11: 観測頻度の月変化

0.08 0.08 0.07 0.06

図 12: 観測頻度の MLT 変化

可能であることから, USC データから得られた観測 頻度季節変化(図11)では,北,南半球それぞれの 夏季における活発な雷活動度に対応して2つのピー クが現れていると考えられる.

3.3.2 観測頻度の日変化

図 12 は観測頻度の日変化を示す.横軸は MLT (Magnetic Local Time),縦軸は図 11 と同じ観測 頻度である.図から,雷ホイスラは主に夜間に観測 され,日中はほとんど発生していないことがわかる. より詳細には,観測頻度は16時頃から上昇し始め, 21時頃にピークを迎え,そこからはやや低減するも のの,深夜から朝まで高頻度を維持している.そし て,MLT6~15時はほぼ一貫して低い頻度となって いる.

[9] の解析によると, 雷はローカルタイムの正午過 ぎから活発になり始め, 夕方 15~17 時頃にピークを 迎えた後, 20 時頃までにはかなり低頻度となる. 雷 ホイスラ観測頻度と雷活動度の日変化は傾向に明ら かな差異があるが, この原因は, VLF 波動が日中に 電離圏 D 領域で中性粒子との衝突を主因として吸収 されやすいことにあると考えられる[1].[5] は,電 離圏における VLF 電磁波の吸収量を磁気緯度の関 数として示した [5, Figure 3-35]. この図から, 例え ば中緯度領域の 2kHz の電磁波強度は,電離圏での 減衰により日中は夜間よりも 10~30dB 小さくなる ことがわかる.以上のことから,雷ホイスラの発生 に対しては,雷活動がまず不可欠な要因となること は間違いないが,それだけではなく,電離圏環境に 依存した伝搬可能性がより重要な役割を果たすと言 える.

[7,10,11]は,ティハニーにおける雷ホイスラ検 出頻度の日変化を調査した.その結果から, 雷ホイ スラはローカルタイム6時から15時頃までは非常に 観測頻度が低く、日没頃から活発になり始め、深夜 過ぎにピークを迎えた後は夜間を通して高頻度を保 つ傾向が見られた.一方,我々の統計解析による観 測頻度の日変化(図12)は,夜間でも比較的早めの MLT21 時頃に頻度が最も高い.この違いは,衛星観 測と地上観測での雷ホイスラの電離圏透過回数の違 いによるものと考えることができる.衛星で観測さ れる雷ホイスラはその伝搬過程で電離圏を地表から 宇宙方向に一度通過するのみだが,地上で観測され るものは, さらに宇宙から地上へ向けて,計2回電 離圏を通過する必要がある.つまり,地上での雷ホ イスラ観測は電離圏での吸収の作用をより受けやす く、これが地上観測の日変化におけるピークが、衛 星観測よりもさらに深夜側にシフトしている要因だ と考えられる.また,地上観測だけでは波源半球と 観測半球のどちら側の電離圏環境がより強い影響を 持つのか断定するのは困難であり,このような衛星 観測との比較が有用な判断材料になると期待される.

3.3.3 月と地方時による頻度変化の独立性

これまでの節で,月とローカルタイムに対する雷 ホイスラ観測頻度の変動を個別に議論してきた.し かし,あけぼの衛星は地球の自転に依らない極軌道 を取るため,観測点の季節とローカルタイムは地球 の公転に沿って連動する形となる.そこで,お互い が独立しているかを確かめる必要がある.図13は月 とMLTに対する観測頻度の2次元分布を示してお り,色で観測頻度を表し,観測時間が0,及び極端に 小さい領域は除外の意味で白塗りとなっている.図 13では,雷ホイスラは年間を通して日中は観測頻度 が小さいが,夜間は全体的に大きく,季節による頻 度変化が見られる.このことから,雷ホイスラ観測 頻度は,月(季節)とローカルタイムに対して独立 に変動していると言える.



図 13: 月と MLT に対する観測頻度の 2 次元分布

4 結論

磁気圏プラズマ環境の解明や宇宙開発,そしてそ れらの実社会への応用へ向けて今後一層の進展が期 待される科学衛星探査という枠組みの中で,本論文 は,科学衛星データ解析のさらなる躍進に向けて,日 本の先端的月探査衛星かぐやのデータ選別機能を評 価し,さらに,世界に誇る長寿衛星あけぼのの観測 データを用いて,データ検出手法の提案,雷ホイス ラの統計解析を行った.

その結果,かぐや WFC-L 搭載の自動帯域選択機 能は,かぐや周回軌道において特に観測効率の面で 効果的であることがわかった.また,あけぼの WBA データから検出された雷ホイスラは,観測頻度につ いて季節とローカルタイムへの依存性があること等 が明らかになった.

本研究により,機上と地上双方におけるデータ選別・抽出処理の重要性が広く認識され,既存データの解析,将来衛星の観測効率化ともに建設的な発展 に貢献できれば幸いである.

参考文献

- [1] 恩藤忠典, 丸橋克英. 宇宙環境科学. オーム社, 2000.
- [2] C. G. Park. Some features of plasma distribution in the plasmasphere deduced from antarctic whistlers. J. Geophys. Res., Vol. 79, No. 1, pp. 169–173, 1974.
- [3] Gy. Tarcsai, P. Szemerdy, and L. Hegymegi. Average electron density profiles in the plasmasphere between l = 1.4 and 3.2 deduced from whistlers. J. Atmos. Terr. Phys., Vol. 50, No. 7, pp. 607–611, 1988.
- [4] 後藤由貴, 笠原禎也, 橋本弘藏. かぐや衛星搭 載波形捕捉器における高効率波形データ取得法.
 信学論(B), Vol. J91-B, No. 5, pp. 617-625, 2008.
- [5] R. A. Helliwell. Whistlers and Related Ionospheric Phenomena. Stanford Univ. Press, Stanford, Calif., 1965.
- [6] S. L. Bernstein, M. L. Burrows, J. E. Evans, A. S. Griffiths, D. A. McNeil, C. W. Niessen, I. Richer, D. P. White, and D. K. Willim. Long-range communications at extremely low frequencies. *Proc. IEEE*, Vol. 62, No. 3, pp. 292–312, 1974.
- [7] A. B. Collier, A. R. W. Hughes, J. Lichtenberger, and P. Steinbach. Seasonal and diurnal variation of lightning activity over southern africa and correlation with european whistler observations. *Ann. Geophys.*, Vol. 24, No. 2, pp. 529–542, 2006.
- [8] A. B. Collier, S. Bremner, J. Lichtenberger, J. R. Downs, C. J. Rodger, P. Steinbach, and G. McDowell. Global lightning distribution and whistlers observed at dunedin, new

zealand. Ann. Geophys., Vol. 28, No. 2, pp. 499–513, 2010.

- [9] R. J. Blakeslee, D. M. Mach, M. G. Bateman, and J. C. Bailey. Seasonal variations in the lightning diurnal cycle and implications for the global electric circuit. *Atmos. Res.*, Vol. 135– 136, pp. 228–243, 2014.
- [10] A. B. Collier, B. Delport, A. R. W. Hughes, J. Lichtenberger, P. Steinbach, J. ster, and C. J. Rodger. Correlation between global lightning and whistlers observed at tihany, hungary. J. Geophys. Res., Vol. 114, No. A7, 2009.
- [11] J. Lichtenberger, C. Ferencz, L. Bodnr, D. Hamar, and P. Steinbach. Automatic whistler detector and analyzer system: Automatic whistler detector. J. Geophys. Res., Vol. 113, No. A12, 2008.

学位論文審査報告書(甲)

学位論文題目(外国語の場合は和訳を付けること。)
科学衛星による電磁波観測データの選別・抽出手法とそれを用いた特徴的プラズマ波動の統計解析

2.	論文提出者	(1) 所	属	電子情報科学	専攻
		(2) 氏	がな 名	おおいけ ゆうた 大池 悠太	

3. 審査結果の要旨(600~650字)

平成27年2月4日に第1回学位論文審査委員会を開催した後、口頭発表を行った。その 直後に、第2回審査委員会を開いて慎重審議を行った結果、以下の通り判定した。なお、口頭 発表における質疑を最終試験に代えるものとした。

宇宙プラズマ中における電磁波の波形観測は、波の生成・消失・伝搬過程がプラズマ 密度や背景磁場に大きく依存するため、宇宙プラズマのダイナミクスを知る重要な手が かりとなる。しかし、一般に波形データは容量が大きく、地上伝送可能な容量内で有用 な情報を得ることが観測上の重要な要件となる。本研究ではまず、月探査衛星かぐや搭 載の波形観測器に実装された自動データ選別機能を定量的に検証し、その有効性を示し た。続いて、雷を起源とする自然電波である「雷ホイスラ」を、科学衛星あけぼので取 得した大量の波形観測データから自動抽出し、その出現頻度を統計解析した。その結果、 雷ホイスラの出現頻度は、雷の活動度や電離圏の VLF 電波吸収効果によって顕著な季 節やローカルタイム依存性を持つことを明らかにした。本研究は、プラズマ波動観測に おいて特徴的な波形データの選別・抽出処理が、宇宙プラズマ環境の計測に極めて有効 かつ重要であることを実証したもので、今後のプラズマ波動観測装置の開発における有 用な知見を得たといえる。以上より、本論文は博士(工学)に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定(いずれかに〇印) 合格・ 不合格

(2) 授与学位 博士(工学)