

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 24 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654157

研究課題名(和文) 高い電磁感受耐性を備えた科学衛星搭載適応型ソフトウェア電磁波観測器の研究

研究課題名(英文) Study on intelligent signal processing for noise reduction of plasma wave instruments onboard scientific satellite

研究代表者

笠原 禎也 (Kasahara, Yoshiya)

金沢大学・総合メディア基盤センター・教授

研究者番号：50243051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：科学衛星による宇宙空間中のプラズマ波動の観測において、衛星搭載品からプラズマ波動受信器に混入する人工雑音をデジタル的に低減し、本来のサイエンスターゲットである自然プラズマ波動を精度よく観測するための耐雑音性の高い電磁界計測法を研究した。

研究遂行においては、(1)観測波動データに混入した干渉ノイズ源の特定と除去・抑圧法、(2)有意な波動現象を自動認識・抽出するための信号処理アルゴリズム、(3)雑音が含まれる観測データをもちいた波動の伝搬方向推定法の3つの項目に大別して実施し、あけぼの衛星やかぐや衛星などの既存の観測衛星で取得した波動観測データを用いて、提案法の有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：In order to obtain high-quality data from plasma wave instruments onboard scientific satellite, it is important to reduce artificial noise radiated from the other instruments implemented in the satellite. In the present research project, we studied several digital signal processing methods to suppress these artificial noises to achieve precise observation of plasma waves. We performed the following three topics: (1) data processing algorithm for identification and suppression of interference noise mixed in the observed wave data, (2) signal processing algorithms by which significant wave phenomena are automatically recognized and extracted, and (3) direction finding method of plasma waves from the observation data contaminated by artificial noise. We applied these methods to the observation data obtained by Akebono and Kaguya spacecraft, and demonstrated that our proposed techniques are effective for the plasma wave measurements.

研究分野：電波情報工学

キーワード：宇宙科学 計測工学 磁気圏・電離圏 情報通信工学 人工衛星 科学衛星 電波受信器 電磁感受耐性

### 1. 研究開始当初の背景

太陽地球惑星系科学において、科学衛星による観測は、観測対象の宇宙プラズマを「その場 (in situ)」で直接測定する唯一の手段である。宇宙プラズマ中では、異なる時間・空間スケールの現象が混在し、その物理過程の理解には、プラズマ波動-粒子相互作用の解明が必須である。

上記の背景から、科学衛星を用いてプラズマ波動を観測する、いわゆる「プラズマ波動観測器」は、プラズマダイナミクスの理解に必要不可欠の測器として、近年ますます重要視されている。しかし、宇宙空間の微弱な電磁界信号をとらえる高感度電磁界センサの性能をフルに発揮するには、同観測器と共に衛星に搭載される衛星バスや種々の観測器が放射する電磁ノイズを極力抑制するために、電磁適合性 (EMC: Electro Magnetic Compatibility) 対策が必要である。一般に、実用衛星で要求される EMC 基準は他機器の誤動作防止が目的であるのに対し、プラズマ波動観測器を搭載する科学衛星は、上述した理由から、実用衛星に比べて極めて厳しい EMC 基準が必要となり、衛星搭載機器のノイズ抑制設計や、EMC 基準達成確認試験 (EMC 試験) に大きな負担がかかる。また設計上の制約から、EMC 基準を超える雑音混入が不可避なケースもあり、その場合は、観測後のデータを処理する過程で、自然波動と雑音を適切に切り分けて解析を行う必要がある。

### 2. 研究の目的

背景で述べたように、観測データには多かれ少なかれ人工雑音が入ることが不可避であることから、本研究課題では、自然波動と衛星起源電磁ノイズが重畳した観測信号から、電磁ノイズをデジタル信号処理によって除去するアルゴリズムを考案し、その性能を評価する。

考案した信号処理アルゴリズムを、衛星に搭載される波動受信器自身の機上搭載ソフトウェアや、地上でのデータ解析に適用することで、不要な雑音を除去し、本来のサイエンスターゲットである自然プラズマ波動を精度よく観測できる耐雑音性の高い電磁界計測法を確立することを目的とする。

### 3. 研究の方法

前項で述べた目的を達成するため、本研究課題では、以下の3つの項目について重点的に研究を実施した。

(1) 観測波動データに混入した干渉ノイズ源の特定と除去・抑圧法

既存の科学衛星では EMC 設計基準に基づいて、搭載機器類の雑音抑制対策が施されているが、プラズマ波動受信器は大変高感度であるゆえに、すべての人工雑音を受信器の背景雑音レベル以下に抑えることは不可能で

ある。また混入する雑音は多種多様であり、搭載機器の動作モードや動作環境によって、混入する雑音の周波数や雑音レベルが動的に変化するケースも非常に多いため、一律に混入した雑音を抑圧・除去することは極めて困難である。そこで本研究では、衛星搭載器の動作状態を表す機器ステータスと、波動観測データに混入する人工雑音の相関を求めることで、適応的に雑音を除去・抑圧する方法を提案する。

(2) 有意な波動現象を自動認識・抽出するための信号処理アルゴリズムの開発

既存の科学衛星によって観測された多種多様な波動現象について、その周波数・時間特性を定量化することで、波動現象の類似性や特徴量を短時間で算出するアルゴリズムを考案し、有意な波動現象を自動認識・抽出するアルゴリズムを開発する。

(3) 雑音が含まれる観測データをもちいた波動の伝搬方向推定法の開発

観測されたプラズマ波動の到来方向を求めることは、波動の伝搬特性や、波動が伝搬してきた媒質であるプラズマパラメータを明らかにするうえで、大変重要である。そこで、観測データに混入する雑音レベルが高い観測データでも、良好に伝搬方向を求める到来方向推定アルゴリズムを開発する。

### 4. 研究成果

先に示したそれぞれの各研究項目について研究成果を示す。

(1) 観測波動データに混入した干渉ノイズ源の特定と除去・抑圧法

当研究グループが有する、あけぼの・かがや衛星で取得した自然波動データに混入したノイズ源を特定・除去するために、衛星搭載の各機器の動作状態を示すステータスデータ (House Keeping Data) と波動観測データの相関解析を行い、ノイズ源が混入する機器ステータスを自動抽出するアルゴリズムを確立した。さらに同アルゴリズムで特定したノイズとステータスデータの相関関係を用いて、観測データからノイズを除去できることを実証した。

(2) 有意な波動現象を自動認識・抽出するための信号処理アルゴリズムの開発

将来衛星における高度自然波動計測の実現を目指して、計測したプラズマ波動データから、有意な波動現象の特徴を自動確認し、抽出するための信号処理アルゴリズムを検討した。具体的には、地球磁気圏内や月周回軌道上で観測される多種多様な波動現象について、その周波数・時間特性を定量化することで類似性を短時間で算出するアルゴリズムを考案し、あけぼの・かがや衛星で得られたスペクトルデータに適用し、その有効性

を実証した。

たとえば、あけぼの衛星で観測された VLF 帯の自然波動については、雷起源ホイスラやコーラスなどと呼ばれる複数種の波動を、高速に自動判別できることを実証した。

特に雷起源ホイスラについては、背景雑音レベルを適応的に推定しつつ、機上処理可能な計算量で高速に識別・抽出できることを実証し、あけぼの衛星の広帯域アナログ受信器で得た高い雑音レベルのアナログ波形信号から、低い誤検出率で大量に自動抽出する信号処理法を確立した。同成果は、26 年余りの連続観測を実現したあけぼの衛星のアナログ波形データに適用され、雷起源ホイスラの長期統計解析に大きく貢献した。また処理負荷が非常に軽いアルゴリズムが確立したことから、将来衛星における機上での雷起源ホイスラの自動検出・抽出につながる成果と言える。

(3) 雑音が含まれる観測データをもちいた波動の伝搬方向推定法の開発

自然波動の伝搬方法(伝搬ベクトル)推定に、マルコフ確率場モデルを活用した新しい波動分布関数法を考案した。提案法は、波動の伝搬方向の推定時に、受信器の雑音レベルを同時推定するパラメータを含めることで、雑音レベルが高いデータでも良好に伝搬方向を求めることが可能である。さらに従来法より、計算量も小さく、高速に解が得られることも実証した。

さらに、考案した波動分布関数法の求解アルゴリズムを改良し、雑音混入時に困難とされていた到来波源の広がりや波源の数の推定精度、データに混入する雑音に起因する推定誤差(耐雑音性)が大幅に改善することを示した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

1. M. Ota, Y. Kasahara, and Y. Goto, A New Method for Direction Finding Base on Markov Random Field Model, *Radio Science*, 査読有, doi:10.1002/2014RS005635, (印刷中), 2015.
2. S. Matsuda, Y. Kasahara, and Y. Goto, M/Q = 2 Ion Distribution in the Inner Magnetosphere Estimated from Ion Cyclotron Whistler Waves Observed by the Akebono Satellite, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, doi:10.1002/2014JA020972, 120(4), 2783-2795, 2015.
3. 笠原 禎也, 後藤 由貴, 大池 悠太, あけ

ぼの衛星アナログ広帯域受信器による観測データの自動較正法, *宇宙科学情報解析論文誌*, 査読有, 4, 41-49, 2015. <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/bitstream/a-is/326237/1/AA1530026004.pdf>

4. Y. Oike, Y. Kasahara, and Y. Goto, Spatial Distribution and Temporal Variations of Occurrence Frequency of Lightning whistlers Observed by VLF/WBA onboard Akebono, *Radio Science*, 査読有, doi:10.1002/2014RS005523, 49(9), 753-764, 2014.
5. S. Matsuda, Y. Kasahara, and Y. Goto, High-altitude M/Q = 2 Ion Cyclotron Whistlers in the Inner Magnetosphere Observed by the Akebono Satellite, *Geophysical Research Letters*, 査読有, doi:10.1002/2014GL060459, 41(11), 3759-3765, 2014.
6. S. Matsuda, Y. Kasahara, and Y. Goto, Electromagnetic Ion Cyclotron Waves Suggesting Minor Ion Existence in the Inner Magnetosphere Observed by the Akebono Satellite, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, doi:10.1002/2013JA019370, 119(6), 4348-4357, 2014.
7. 西部 匡洋, 後藤 由貴, 笠原 禎也, かぐや衛星で観測した波動スペクトルにおける機器干渉ノイズ低減に関する研究, *電子情報通信学会論文誌*, 査読有, J95-B(11), 1567-1575, 2012. <http://www.ieice.org/cs/jpn/JP/>

[学会発表] (計 28 件)

1. 太田 守, 笠原 禎也, 後藤 由貴, 圧縮センシングに基づくスペクトル推定手法の提案, 統計数理研究所共同研究集会「電離圏・磁気圏モデリングとデータ同化」, 2015.1.9, 統計数理研究所(東京).
2. 嶋 啓佑, 神林 卓也, 後藤 由貴, 笠原 禎也, あけぼの衛星で得られた VLF/WBA 波動データへのクラスタリングの適用, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 136 回総会及び講演会, R006-P027, 2014.11.2, キッセイ文化ホール(長野).
3. 大池 悠太, 笠原 禎也, 後藤 由貴, あけぼの VLF/WBA で観測された雷ホイスラの統計解析とその応用手法の検討, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 136 回総会及び講演会, R006-P005, 2014.11.2, キッセイ文化ホール(長野).

4. 太田 守, 笠原 禎也, 後藤 由貴, ベイズ推定に基づく VLF 波動の伝搬ベクトル推定に関する研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 136 回総会及び講演会, R006-P004, 2014.11.2, キッセイ文化ホール (長野) .
5. 神林 卓也, 嶋 啓佑, 後藤 由貴, 笠原 禎也, 周波数遷移を伴う波動スペクトルの統計処理のための自動抽出法, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 136 回総会及び講演会, R006-06, 2014.10.31, キッセイ文化ホール (長野) .
6. Y. Goto, K. Shima, T. Kanbayashi, and Y. Kasahara, Onboard Identification of Plasma Waves based on Large-data Clustering and its Feature Aggregation, Proc. of European Planetary Science Congress 2014, EPSC2014-106, 2014.9.9, Cascais, Portugal.
7. Y. Oike, Y. Kasahara, and Y. Goto, Spatial and Time Distribution of Lightning Whistlers in the Plasmasphere Observed by VLF/WBA onboard AKEBONO, Proc. 31th Int. Union of Radio Science (URSI), doi:10.1109/URSIGASS.2014.6929945, 2014.8.22, Beijing, China.
8. M. Ota, Y. Kasahara, and Y. Goto, Distribution Function Method with Markov Random Field Model for VLF Electromagnetic Waves, 2014 Asian Workshop on Antennas and Propagation, Kanazawa, Japan, 2014.5.16.
9. R. Higashi, T. Imachi, S. Yagitani, Y. Kasahara, and I. Nagano, Influence of External Electric Field on Impedance Measurement of Electric Field Sensors onboard Akebono Satellite, 2014 Asian Workshop on Antennas and Propagation, Kanazawa, Japan, 2014.5.15.
10. 大池 悠太, 笠原 禎也, 後藤 由貴, 雷ホイスラ解析を主眼としたあけぼの搭載 VLF/WBA データ解析の現状と今後の利活用について, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, PEM28-13, 2014.4.29, パシフィコ横浜 (神奈川県) .
11. 嶋 啓佑, 後藤 由貴, 笠原 禎也, AR 表現されたパワースペクトル分類法の自然波動データへの適用, 2014 年電子情報通信学会総合大会, D-12-4, 2014.3.18, 新潟大学 (新潟) .
12. 太田 守, 笠原 禎也, 後藤 由貴, マルコフ確率場モデルを用いた波動分布関数法の定量評価, 名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「電離圏・磁気圏モデリングとデータ同化」, 2014.3.4, 名古屋大学太陽地球環境研究所.
13. Y. Kasahara, Y. Oike, and Y. Goto, Automatic Detection of Dispersion Curves of Lightning Whistlers Propagating in the Plasmasphere, American Geophysical Union Fall Meeting, AE33A-0330, 2013.12.11, San Francisco, U.S.A.
14. Y. Oike, Y. Kasahara, and Y. Goto, Statistical analyses of Spatial and Time Dependence of Lightning Whistlers observed by VLF/WBA onboard AKEBONO, American Geophysical Union Fall Meeting, AE33A-0327, 2013.12.11, San Francisco, U.S.A.
15. 嶋 啓佑, 後藤 由貴, 笠原 禎也, あけぼの衛星で得られた VLF/WBA 波動データの自動識別に関する研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 134 回総会及び講演会, R006-P020, 2013.11.5, 高知大学 (高知) .
16. 太田 守, 笠原 禎也, 後藤 由貴, マルコフ確率場モデルに基づく伝搬ベクトル推定法の提案, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 134 回総会及び講演会, R006-29, 2013.11.3, 高知大学 (高知) .
17. 大池 悠太, 笠原 禎也, 後藤 由貴, あけぼの衛星 VLF/WBA 長期観測データの統計解析による雷起源ホイスラ観測頻度分布のローカルタイム・季節依存性, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 134 回総会及び講演会, R006-24, 2013.11.3, 高知大学 (高知) .
18. 嶋 啓佑, 後藤 由貴, 笠原 禎也, スペクトログラムの時間変化を利用した衛星観測電磁波動の自動識別に関する研究, 平成 25 年度電気関係学会北陸支部連合大会, F2-33, 2013.9.22, 金沢大学 (石川).
19. Y. Kasahara, Y. Goto, T. Imachi, K. Hashimoto, H. Kojima, and Y. Kasaba, Onboard Data Processing for Plasma Wave Instruments Implemented into Japanese Spacecraft, European Planetary Science Congress 2013,

- EPSC2013-395, (Invited), 2013.9.11, University College London, London, United Kingdom.
20. Y. Oike, Y. Kasahara, and Y. Goto, Trend of Observation Frequency and Dispersion Transition of Lightning Whistlers observed by AKEBONO (EXOS-D), 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC2013), H2b-3, 2013.9.5, Howard International House, Taipei, Taiwan.
21. Y. Goto, K. Uda, Y. Kasahara, and K. Hashimoto, Calibration Technique Applied on the KAGUYA/WFC Data for AKR Polarization Analysis, 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC2013), PI-H2-1, 2013.9.5, Howard International House, Taipei, Taiwan.
22. Y. Kasaba, H. Kojima, S. Yagitani, K. Ishisaka, A. Kumamoto, Y. Kasahara, Y. Katoh, Y. Miyoshi, Y. Nishimura, and ERG PWE team, ERG/PWE: Plasma Wave Experiment - from Mercury (BepiColombo/ MMO-PWI) to Earth's Radiation Belt, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, PEM07-03, 2013.5.22, 幕張メッセ (千葉県) .
23. Y. Oike, Y. Kasahara, and Y. Goto, Statistical Analysis of Lightning Whistlers Observed by VLF/WBA onboard AKEBONO, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, PEM07-07, 2013.5.22, 幕張メッセ (千葉県) .
24. 笠原 慧, 梅田 隆行, 村山 泰啓, 堀 智昭, 笠原 禎也, 三好 由純, SGEPS 将来構想 WG, 地球電磁気学・地球惑星科学の現状と将来 (3) --研究推進に必要な技術開発・環境整備, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, U05-P04, 2013.5.22, 幕張メッセ (千葉県) .
25. 宇田 和晃, 後藤 由貴, 笠原 禎也, AKR 偏波解析のためのかぐや WFC-H データの較正, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, PEM30-P03, 2013.5.20, 幕張メッセ (千葉県) .
26. K. Uda, Y. Goto, and Y. Kasahara, Calibration of the KAGUYA/WFC Data for AKR Polarization Analysis International Symposium on Lunar Science and Exploration using Data from Multi-Instruments, ISAS, 2013.1.23.
27. Y. Kasahara, F. Zhang, and Y. Goto, Similar Data Retrieval from Enormous Datasets on Plasma Wave Spectrum Observed by Solar-Terrestrial Satellites, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, U.S.A, 2012.12.7, IN53A-1720.
28. 笠原 禎也, 松田 昇也, 笠羽 康正, 小嶋 浩嗣, 三好 由純, 加藤 雄人, 石坂 圭吾, 熊本 篤志, 後藤 由貴, 井町 智彦, ERG 衛星搭載波動観測器 (PWE) の機上ソフトウェア仕様に関する一提案, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 132 回総会及び講演会, 札幌コンベンションセンター, 2012.10.23, B006-42.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
笠原 禎也 (KASAHARA YOSHIYA)  
金沢大学・総合メディア基盤センター・教授  
研究者番号 : 50143051
- (2) 研究分担者  
後藤 由貴 (GOTO YOSHITAKA)  
金沢大学・電子情報学系・准教授  
研究者番号 : 30361976
- (3) 連携研究者  
小嶋 浩嗣 (KOJIMA HIROTSUGU)  
京都大学・生存圏研究所・准教授  
研究者番号 : 10215254