

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：32407

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17811

研究課題名(和文)世界初の長時間連続/高分解能/多点観測の構築に基づく中・短波帯オーロラ電波の探究

研究課題名(英文)A study on MF/HF auroral radio emissions based on construction of new long-term continuous, high-resolution measurement instruments at multiple locations

研究代表者

佐藤 由佳 (Sato, Yuka)

日本工業大学・共通教育学群・講師

研究者番号：60601408

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、新型デジタル受信機を用いた中・短波帯のオーロラ電波用の新たな観測機器をスバルバル・KHO観測所とフィンランド・KAIRA観測点に構築することからスタートし、これまでにない高分解能の干渉計・多点観測を実現させた。特筆すべき成果としては、中・短波帯オーロラ電波の中でも4fce auroral roarと呼ばれる高周波成分のスペクトル微細構造を初めて明らかにしたことが挙げられる。明瞭な構造がないものと、特徴的な変調が含まれるものに分類され、このような微細構造は、電離圏電子密度の空間構造に起因していることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の直接的なターゲットは地球極域電離圏内でオーロラに伴って生起する電波現象であるが、他の惑星の磁気圏や太陽を起源とする電波の発生と共通する普遍的なプロセスによるものであり、広く宇宙プラズマで生起するプラズマ素過程に関する理解の基礎を与える重要な意義をもつ。また、この電波現象の研究は、従来、莫大な費用を要する大型レーダー等でのみ観測可能な密度擾乱などの電離圏プラズマの遠隔探査において、比較的安価で多点展開可能な新たな方法論の構築につながる可能性も秘めており、そうした将来発展のための基礎研究としても意義がある。

研究成果の概要(英文)：We launched a new research project of ground-based observations of MF/HF auroral radio emissions at KHO in Svalbard and the KAIRA site in Finland. As a first step, we installed a new dedicated instrument at the latter site. It is a passive receiving system designed to realize a high-resolution spectral, interferometric measurements using 4 loop antennas and software-defined radio receivers. One of noteworthy findings is the first measurement of 4fce auroral roar fine structure. The 4fce auroral roar emissions were both unstructured and structured (3-4 Hz modulations), which might be attributed to spatial ionospheric density distributions in emission source regions.

研究分野：超高層物理学、電磁圏物理学

キーワード：オーロラ 電離圏 電波放射 スペクトル微細構造 オーロラサブストーム プラズマ波動

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) 研究対象とする現象について

地球の極域電離圏では、太陽からのエネルギー注入を受け、オーロラ発光現象のみならず、粒子加速、降下粒子による電離や加熱など、様々なエネルギー過程が生じている。その中で生じた非熱的電子を自由エネルギーとして、電離圏 200 ~ 1000 km では中・短波帯のオーロラ電波 (auroral roar, MF burst, THR) が発生し、その一部が地上と宇宙空間に向かって放射されている (図 1)。この発生源はプラズマ周波数 ( $f_{pe}$ ) が電子サイクロトロン周波数 ( $f_{ce}$ ) よりも大きいプラズマ環境のため、静電的 upper hybrid 波や Langmuir 波の励起・モード変換を介した間接励起が関与することが推定されるが、観測の不十分さのために未解明の謎が多い状況であった。本研究で対象とする電波現象は、宇宙プラズマ中の電子ビーム・プラズマ相互作用や電磁波放射に関する普遍的な物理過程を、地球という観測機会が比較的豊富な場を舞台として実証的に探究できる数少ない重要な研究対象である。

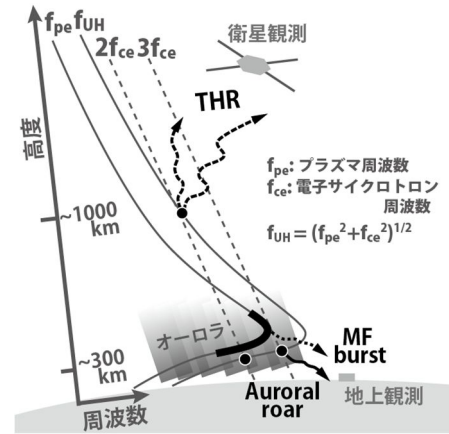


図 1 MF/HF 帯オーロラ電波発生と発生領域近傍の特性周波数を示す概念図。電子の特性周波数 ( $f_{ce}$ ,  $f_{pe}$ ,  $f_{UH}$ ) に関連した共鳴条件を満たす領域が発生領域と考えられている。

#### (2) 研究開始までの関連研究の状況

中・短波帯オーロラ電波の存在や出現特性については、1990 年代中頃からの米国グループの観測により明らかになりつつあり、近年は、高分解能観測によるスペクトル微細構造の検出など新たな側面が報告されていた。一方、研究代表者は自身が機器開発から主体として携ったアイスランドとスバルバルでの観測から、中・短波帯オーロラ電波の発生機構に関わる新たな複数の観測的証拠を提示している (例えば、従来型より高周波の  $4f_{ce}$  auroral roar の世界初検出、その偏波特性の初検出など)。しかしながら、特にスペクトル微細構造に関する観測は、極冠域の南極点での 21 イベントの  $2f_{ce}$  auroral roar に適用した Ye et al. [2007] の研究など限定的であった。このため、オーロラ電波研究に更なるブレークスルーをもたらすには、高分解能かつ広帯域な偏波・干渉計観測が長時間連続で可能な観測システムの多点展開が急務であるという着想を得て、本研究計画を立案するに至った。

### 2. 研究の目的

本研究では、新型のデジタル受信機を用いた中・短波帯のオーロラ電波用の新たな観測機器を 2 地点 (スバルバルおよびスカンジナビア半島北部) に構築し、これまでにない長時間連続かつ高分解能の干渉計・多点観測を世界に先駆けて実現する。スカンジナビア半島北部では偏波観測も同時に実現可能なシステムとする。これらの電波観測機器と他の地上観測と協同した総合観測により、オーロラサブストームの発達に伴う中・短波帯オーロラ電波のマクロなスペクトルや微細構造の時空間変動を初めて明らかにし、これらを規定する物理メカニズムを観測的に検証する。以上により、多様な宇宙プラズマにおいて普遍的なプラズマ波動励起やモード変換過程を介する電磁波放射に関する理解を、他の宇宙プラズマでは得難い観測的な実証に基づいて飛躍的に進めることが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

本研究では、研究期間前半に、スバルバルおよびスカンジナビア半島北部 (図 2) での新規観測システムの導入に主に取り組む。この観測システムは、新型デジタル受信機とループアンテナ 4 基を用いて、スペクトル・偏波・波形・到来方向の同時計測が可能な仕様とする。この導入後は、自動運用による定常観測を実施し、同定された中・短波帯オーロラ電波のイベントについて順次解析を進める。高周波の成分も含めたスペクトルのマクロな特徴や微細構造について、サブストーム発展に伴う変化や緯度・経度方向に対する変化を明らかにする。加えて、複数の地上観測データとの比較解析を進め、それらの物理メカニズムについて検証する。

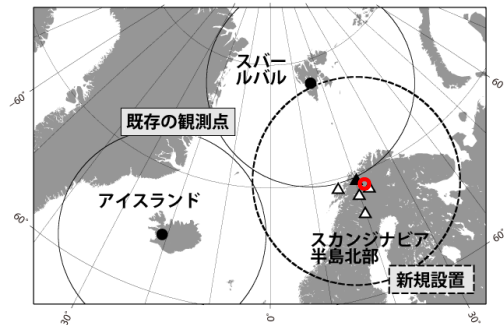


図 2 既存の観測システムの設置地点 ( : アイスランドとスバルバル) と本研究での新規設置地点 (○: フィンランド) および EISCAT\_3D レーダー (主局、受信局) の位置関係。円はそれぞれの観測点から観測可能なオーロラ電波の放射源の空間範囲の目安。

#### 4. 研究成果

##### (1) 新規観測装置の開発および設置に向けた準備

初年度の平成 28 年度にはスカンジナビア半島北部に設置する新規観測装置の初期設計を行い、平成 29 年度に製作を進め、所期の性能を満たすことを確認した。本観測装置は、平行 3 面と直行 1 面のループアンテナ 4 基からなるアンテナ部と、Ettus Research 社製ソフトウェア無線機 (USRP N210) 2 台と汎用パソコン 1 台からなる制御・データ収録部で構成されている (図 3)。スカンジナビア半島北部での設置場所の候補地の絞り込みを行うために、進行中の大型国際共同プロジェクトの EISCAT\_3D 計画の進展および EISCAT\_3D 計画で建設予定の複数のレーダーサイトの電磁ノイズや観測所の施設環境などに関わる最新情報を集め、最終的にはフィンランドのソダンキラ地球物理観測所が管理する KAIRA 観測点 (フィンランド・キルピサルピ) を設置場所として選定した。平成 30 年度前半までは、観測装置の設計・製作・動作確認などを進めるとともに、ソダンキラ地球物理観測所の研究者や技術スタッフと遠隔で議論を行い、観測装置設置の準備を進めた。加えて、連続観測の開始に向けた準備として、オーロラ電波の現象の自動同定の手法の開発を進めた。パターン認識の問題に帰着させ、2008 年以降取得していた現在の電波スペクトル観測データを試験データとして、雷放電や無線通信等の人工的なノイズとオーロラ電波を機械的に識別することを試みた。前処理として背景スペクトルを導出し、その後、背景差分のスペクトルの中で閾値を超える信号に対してその特徴を表す量 (ピーク周波数、ピーク強度、周波数帯域幅、中心周波数、それらの時間変化率など) を計算し、特徴ベクトルの抽出を行った。この結果、目視でもはっきりと特徴が捉えやすい現象については、特徴ベクトルの分布の偏りの違いからオーロラ電波と人工的なノイズを分けて識別をすることが可能であることが確認できた。

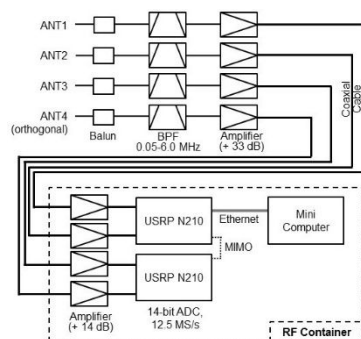


図3 スカンジナビア半島北部・KAIRA 観測点に設置した観測機器の (上) システムブロック図と (下) アンテナ部の写真

##### (2) 新規観測装置の設置および既存の観測装置の修繕による所期観測の開始

平成 30 年夏季には、現地 KAIRA 観測点を訪問し、設置作業や受信強度・到来方向についての較正データ取得作業を実施し、無事に新規観測装置の設置作業を完了した。加えて、スバルバル・KHO 観測所に既設のアンテナの修繕や屋外ケーブルの交換、観測データを集録する外付けハードディスクドライブの交換などを実施した。本現地作業の前までは、主にケーブルの断線により 3 基のアンテナによる同時観測が不可能な状況であったが、これにより観測装置の復旧が完了し、所期のフル観測を再開することができ、これまでにない高分解能の干渉計・多点観測を実現させた (図 4 に観測の一例を示す)。

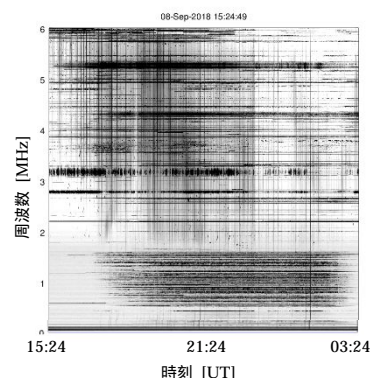


図4 KAIRA 観測点での観測例 (2018 年 9 月 8 日の半日分のスペクトルデータ、夜間の電離圏電波吸収の低減による遠方雷放電の検出強度増加などが確認できる)

##### (3) 新規観測による成果： $4f_{ce}$ auroral roar のスペクトル微細構造の初検出など

平成 30 年度後半以降は、主にこれらの観測によるデータを基にして、中・短波帯のオーロラ電波の各イベントを同定し、出現特性やスペクトル微細構造の特徴についての個別の解析を進めた。特筆すべき成果としては、中・短波帯オーロラ電波の中でも  $4f_{ce}$  auroral roar と呼ばれる高周波成分のスペクトル微細構造を初めて明らかにしたことが挙げられる。明瞭な構造がないものと、特徴的な変調 (3~4 Hz 程度) が含まれるものに分類され、このような微細構造は、電離圏電子密度の空間構造に起因していることが示唆された。今後の観測によって、他の電離圏観測との同時観測イベントを得て、これを検証する計画である。また、以上の解析研究に加え、令和元年度では、各観測点での取得データのサマリープロットのデータベース化を進め、このデータベースのウェブ公開に向け、プロトタイプ製作を進めた (最終的な整備を進め、近日中に一般公開予定である)。

なお、本研究で構築した観測機器は、令和元年度中に機器不具合 (KHO 観測所：データ集録用パソコンの故障、KAIRA 観測点：高分解能データ集録用 SSD) が発生したことにより、十分な観測イベントを得る前に、高分解能観測の継続が困難な状況となってしまった。しかし、本研究により、中・短波帯オーロラ電波の未解明事項 (オーロラサブストームの発達に伴うマクロなスペクトルや微細構造の時空間変動など) の観測的探求において十分な観測性能を有することは確認できた。今後、データ集録部の修繕を行い、高分解能観測の再開によってより多くのイベントを検出し、これらの未解明事項を究明する計画である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1 . 発表者名 Yuka Sato, Atsushi Kumamoto, Yuto Katoh, Yasunobu Ogawa, Akira Kadokura, and Atsuki Shinbori
2 . 発表標題 Ground-based observations of MF/HF auroral radio emissions at three stations
3 . 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Akira Kadokura, Yoshimasa Tanaka, Ryuho Kataoka, Uchida Herbert Akihito, Kiyoka Murase, Masaki Okada, Yasunobu Ogawa, Makoto Taguchi, Mitsunori Ozaki, Kazuo Shiokawa, Yuka Sato, Masashi Kamogawa, Yasuhiro Minamoto, Tetsuo Motoba, Hirohisa Sakurai, Hisao Yamagishi, Natsuo Sato, and Gunnlaugur Bjornsson
2 . 発表標題 Current status of Iceland - Syowa conjugate observation for upper atmosphere physics studies in 2019
3 . 学会等名 Online meeting for alternative ISAR-6 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Yuka Sato, Atsushi Kumamoto, Yuto Katoh, Akira Kadokura, Yasunobu Ogawa, and Atsuki Shinbori
2 . 発表標題 Observations of MF/HF auroral radio emissions at three ground-based stations
3 . 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yuka Sato, Yasunobu Ogawa, Nickolay Ivchenko, and Nicola M. Schlatter
2 . 発表標題 Strongly enhanced plasma lines observed by the EISCAT Svalbard Radar during the International Polar Year
3 . 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤由佳, 熊本篤志, 加藤雄人, 小川泰信, 門倉昭
2. 発表標題 New Observation of MF/HF Radio Emissions in the Northern Scandinavia
3. 学会等名 第144回 SGEPPSS総会および講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuka Sato, Atsushi Kumamoto, Yuto Katoh, Yasunobu Ogawa[3], Akira Kadokura, and Atsushi Shinbori
2. 発表標題 Ground-based observations of MF/HF auroral radio emissions at three stations
3. 学会等名 The Ninth Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤由佳, 小川泰信, Nickolay Ivchenko, Nicola M. Schlatter
2. 発表標題 Strongly enhanced plasma lines observed by the EISCAT Svalbard Radar during IPY
3. 学会等名 第142回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuka Sato
2. 発表標題 Observation plan of MF/HF radio emissions in the northern Scandinavia
3. 学会等名 The Eighth Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuka Sato, Yasunobu Ogawa, Nikolay Ivchenko, and Nicola M. Schlatter
2. 発表標題 Strongly enhanced plasma lines observed by the EISCAT Svalbard Radar during the International Polar Year
3. 学会等名 The Eighth Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤由佳、熊本篤志、加藤雄人
2. 発表標題 Frequency structure and polarization of MF/HF auroral radio emissions observed in the topside ionosphere
3. 学会等名 Japan Geoscience Union MEETING 2016
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	門倉 昭  (Kadokura Akira)		
研究協力者	小川 泰信  (Ogawa Yasunobu)		
研究協力者	熊本 篤志  (Kumamoto Atsushi)		

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力 者	加藤 雄人  (Katoh Yuto)		