

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：57701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03956

研究課題名（和文）宇宙災害回避のためのシューマン共鳴による電離圏モニタリングシステムの開発

研究課題名（英文）Schumann Resonance for monitoring of ionosphere

研究代表者

池田 昭大（Ikeda, Akihiro）

鹿児島工業高等専門学校・一般教育科・准教授

研究者番号：90582833

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では宇宙災害回避を目的とし、地上磁場変動に現れる8.0Hz程度のシューマン共鳴(SR)を用い、SRの応答から下部電離圏の変動を調査した。大分県久住町の誘導磁力計データからSR強度・周波数の日変化、季節変化の特性を明らかにした。さらに、SR周波数の変化が太陽のEUV（極紫外線）と対応が良いこと、SR強度は全世界の雷活動の活発な地域の影響が現れていることがわかった。太陽フレアやSPE（太陽プロトンイベント）に対しても、SR周波数が変化することを確認できた。太陽フレアでは、電離圏下部の電子密度の変化の割合を見積もることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フレアや太陽プロトンイベント（SPE）といった、宇宙災害を引き起こす現象に伴うシューマン共鳴（SR）の変動を明らかにできたことは学術的意義を持つ。また、下部電離圏の変動は衛星などによる観測が困難な領域であるため、SRから下部電離圏の密度変化を推定できたことは、宇宙天気という観点からも意義がある事である。さらにSRは地球の気候変化、地震との対応も確認されており、本研究で解明したSRの特性は、それら異分野の学術研究にも利用可能という発展性を持つ。

研究成果の概要（英文）：We examined Schumann Resonance (SR) measured by an induction magnetometer at Kuju, Japan. The periodicity of SR parameters is dominant at about 360 and 180 days. The 27-days period, which corresponds to the solar rotational period, also can be seen. The daily variation of SR amplitudes corresponded with the thunderstorm activity in Africa, Asia, North America, and South America. We further found the SR frequency well correlated with EUV flux for long period. Variations of SR frequency often associated with solar flares. Since X-ray and EUV of flares enhance the ionization of Earth's ionosphere, the variation of the SR frequency seems to reflect the electron density in the ionospheric D-region. For SPEs (solar proton events), the variation of the SR frequency in eastward component corresponded with enhancement of the Proton flux. We conclude that SR reflects conditions of the lower ionosphere during the intense solar activity.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：シューマン共鳴 太陽活動 フレア SPE 電離圏

### 1. 研究開始当初の背景

シューマン共鳴は地表と電離圏の間で共鳴する基本波が約 8Hz の電磁波の共鳴現象である (Balsler, et al., 1962)。全世界の雷活動で励起され、電磁場変動として常時観測される。シューマン共鳴は励起源である全世界の雷活動を反映して変動するほか (Sátori et al., 1996)、全球的な下部電離圏電子密度の変化も反映する (Roldugin et al., 1999)。シューマン共鳴は、熱帯域の気温変化との対応等も報告されており、地球の気候変動の指標となり得る (Williamns et al., 1992)。太陽活動との関連についても、太陽フレアや太陽プロトン現象 (SPE) 発生時のシューマン共鳴の変化が報告されている (Roldugin et al., 1999, Roldugin et al., 2004)。しかしその報告例はまだ少ない。

### 2. 研究の目的

本研究では、大分県久住町での誘導磁力計観測データを下部電離圏の変動や、地球の気候変動の調査に利用するため、観測されるシューマン共鳴の変動特性を調査した。特に強度、周波数の変動特性に着目した。さらに長期の太陽活動や突発的な現象である太陽フレア・SPE との関連についても調査を行い、下部電離圏のモニタリングツールとしてシューマン共鳴の有効性を示すことを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では大分県久住町 (KUJ: 磁気緯度 23.4 度、磁気経度 201.0 度) の誘導磁力計地上観測データを用い、H 成分(水平南北向き成分)と D 成分(水平東西向き成分)に現れるシューマン共鳴の共鳴周波数を FFT (Fast Fourier Transform) より求めた。512 ポイント (約 10 秒) のウィンドウ毎に計算された PSD (Power Spectral Density) から背景を除去し、8.0Hz 付近で極大となる周波数 (ピーク周波数) を「シューマン共鳴の周波数」と定義した。また、シューマン共鳴周波数での強度を「シューマン共鳴の強度」とした。

太陽フレアや SPE を捉えるため、GOES-10 によって静止軌道で取得された X 線フラックス (0.05 - 0.3 nm) 及びプロトンフラックス (40 - 80 MeV) を用いた。SOHO の SEM (Solar EUV Monitor) によって、ラグランジュ点 (First Lagrangian Point) にて取得された 0.1 - 50 nm の EUV (極紫外線) データも使用した。

### 4. 研究成果

#### 4.1. シューマン共鳴の変動特性

図 1 はシューマン共鳴の周波数・強度の周期性を表している。H 成分は周波数、強度ともに約 1 年の周期が目立ち、D 成分は強度の 1 年周期と、周波数の約半年の周期が卓越している。強度の 1 年周期や半年周期の変動は中緯度や低緯度の世界平均気温と相関がよい事が報告されており (Hobara et al., 2011)、久住で捉えられたシューマン共鳴も世界平均気温と対応した変動を示したと考えられる。また、H 成分の周波数には太陽自転周期に近い 26 日のピークも現れ、シューマン共鳴が太陽活動の影響を受けると言える。

シューマン共鳴の季節変化 (図 2) では、強度 H、D 成分ともに夏場に明瞭なピークを持つことがわかる。周波数 H 成分は目立った特性を持たず、周波数 D 成分では 4 月と 10 月にピークがあり、半年周期が現れている。強度が夏場にピークを持つことは、観測点である日本、アジアを含む地域で雷活動が活発になる季節と一致し、ローカルな雷活動を反映していると言える。異なる地域においても、このようなローカルな雷活動の影響が報告されている (Zhou et al., 2013)。世界的な平均気温の変化とシューマン共鳴の強度が同期して変動し、両者とも 7 月頃にピークを持つことも報告されており (Hobara et al., 2011)、気温と対応した変化も表れていると推察できる。

図 3 はシューマン共鳴の平均日変化を表している。シューマン共鳴の強度の日変化は、全世界の雷活動が活発化する時間帯と一致してピークが現れることが知られている (Sátori, et al., 1996)。図 3 の 15:00UT 頃の H 成分のピークはアフリカ、8:00UT 頃の D 成分のピークは東南アジア、23:00 ~ 24:00 UT の D 成分のピークは北アメリカ、南アメリカ大陸の雷活動とそれぞれ対応し、久住では全世界の主要な 4 地域の雷活動の影

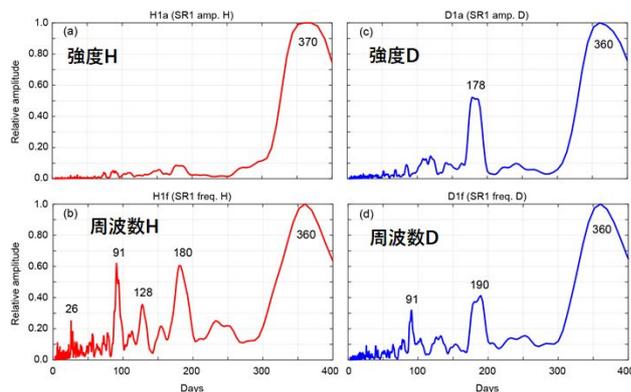


図 1. シューマン共鳴周波数・強度の周期性

響が現れていることがわかる。

#### 4.2. 太陽活動との対応

図4は2003年から2013年までのEUVとシューマン共鳴の周波数・強度の長期変化である。ここでの周波数と強度は平均季節変化(図2の実線)を除去したものである。EUVと周波数Hの変動パターンが比較的似ており、両者の相関係数は0.73であった。シューマン共鳴の共鳴周波数の変化は、全球的な下部電離圏の密度変化と対応するため(Roldugin et al., 1999)、EUVが強まると電離圏の電離が増強し共鳴周波数の変化が起こると解釈できる。H成分のシューマン共鳴周波数はEUVと高相関であり、一方、周期性(図1)は複雑であり明瞭な季節変化も見られなかった(図2)。H成分のシューマン共鳴周波数は、太陽活動の影響を最も強く反映する可能性がある。

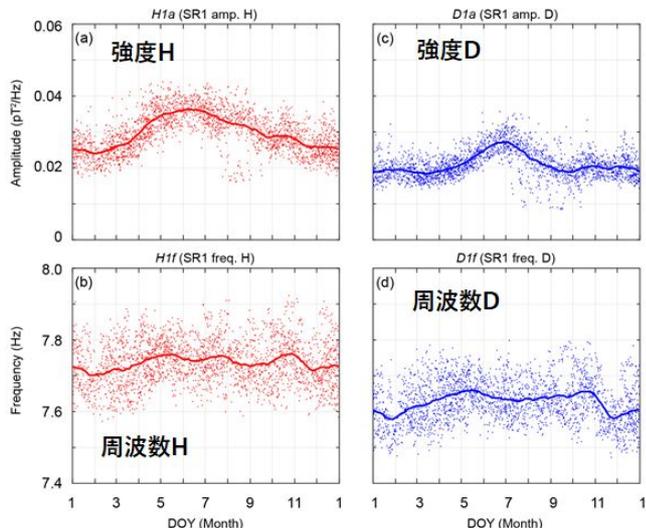


図2. シューマン共鳴周波数・強度の季節変化

#### 4.3. フレア・SPEに対するシューマン共鳴の応答

図5は、2003年11月3日の太陽フレア発生時のX線フラックス、EUV、プロトンフラックス、シューマン共鳴の共鳴周波数を表す。01:00UT頃(点線)のX線フラックス及びEUVの増加に伴い、H成分のシューマン共鳴の周波数増加が良く対応している(図5の矢印)。シューマン共鳴の共鳴周波数は、電離圏D層の電子密度及び高度によって変化する事が知られている(Roldugin et al., 1999)。このイベントでは、フレア時のX線やEUVの増加が電離圏D層の電子密度を増加させ、その結果、シューマン共鳴の共鳴周波数が増加したと解釈できる。さらに、他の太陽フレアのイベントも確認し、太陽直下点と観測点の地理的な位置関係が、シューマン共鳴周波数の変動成分に影響するという結果も得られた。

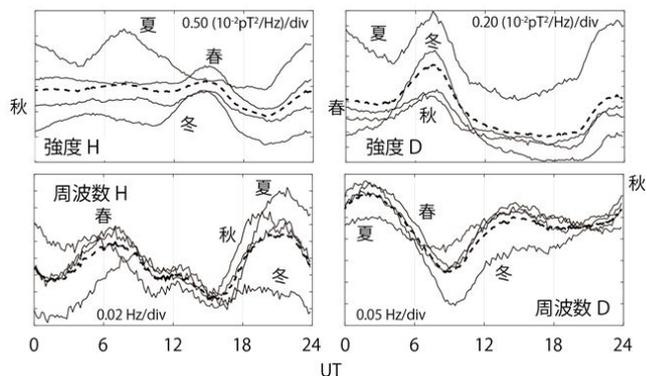


図3. シューマン共鳴周波数・強度の季節毎の平均日変化。点線は全期間の平均。

図6は、2003年10月26日から27日のSPE発生時のシューマン共鳴の周波数変化である。プロトンフラックスに着目すると、10月26日の18:00UT頃に急激な増加が見え、10月27日の13:00UT頃まで高い値を保っており、SPEが発生している。SPE時のシューマン共鳴の周波数は、D成分に特徴的な変化が現れており、D成分の共鳴周波数が、プロトンフラックス増加後に減少し(図6の矢印)、共鳴周波数の減少は長時間にわたって継続していた。SPE時は極域電離圏への太陽プロトンの降り込みにより、電離圏は強く電離され(Reagan et al., 1976)、電離圏D層の高度が押し下げられる(De et al., 2010)。電離圏の変化に対するシューマン共鳴の周波数変化の関係(Roldugin et al., 1999)を考慮すると、SPE時の共鳴周波数D成分の減少は、極域の電離圏D層の高度が下がったことに対応していると考えられる。

以上のように、久住の誘導磁力計で捉えられたシューマン共鳴は、全世界の雷活動との対応があり、世界的な平均気温変化で説明できる特徴も現れた。また、下部電離圏の電子密度を変化させるEUVとの対応もよく見られた。さらにフレア、SPE時のシューマン共鳴の応答も確認でき、下部電離圏の変動や雷活動のモニタリングとして、シューマン共鳴の活用ができる。

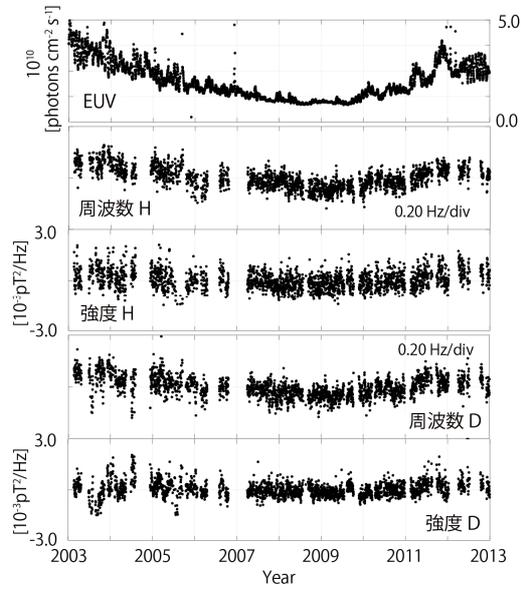


図 4. EUV と平均季節変化を除去した  
シューマン共鳴周波数・強度の長期変化。

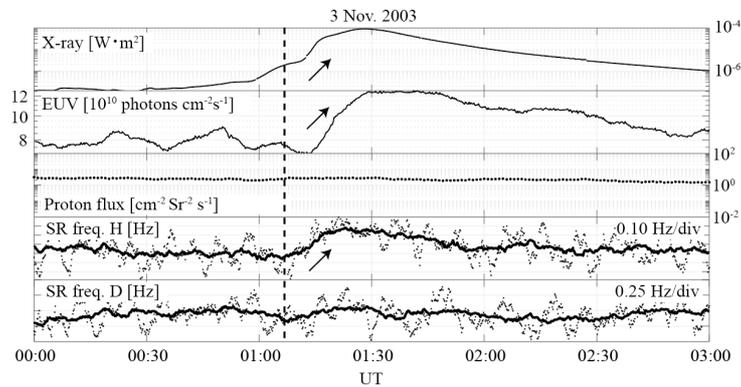


図 5. 2003 年 11 月 3 日のフレア時の X 線フラックス、EUV、  
プロトンフラックス、シューマン共鳴周波数 H 成分、D 成分。

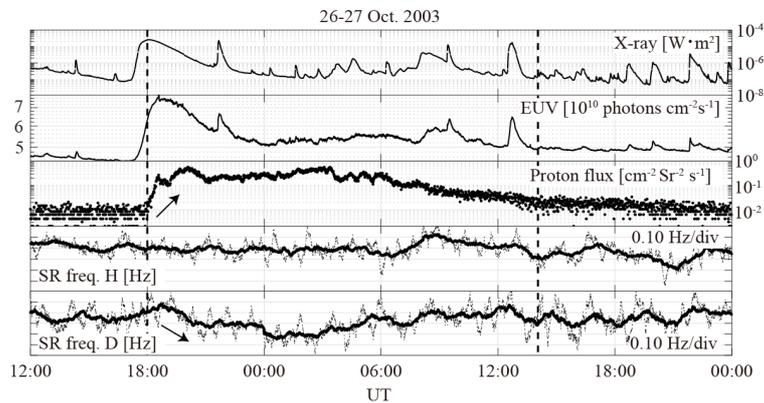


図 6. 2003 年 10 月 26 日から 27 日の SPE 時の X 線フラックス、EUV、  
プロトンフラックス、シューマン共鳴周波数 H 成分、D 成分。

## 参考文献

- Balsler, M., Wagner, C. A., On frequency variations of the earth-ionosphere cavity modes, *J. Geophys. Res.* 67, 4081-4083, 1962.
- Satori, G., and B. Zieger, Spectral characteristics of Schumann resonances observed in Central Europe, *J. Geophys. Res.* 101, D23, 29,663-29,669, 1996.
- Roludugin V C, et al., Changes of the first Schumann resonance frequency during relativistic solar proton precipitation in the 6 November 1997 event. *Ann. Geophysicae* 17, 1293-1297, 1999.
- Roldugin, V. C., Y. P. Maltsev, A. N. Vasiljev, A. Y. Schokotov, and G. G. Belyajev, Schumann resonance frequency increase during solar X-ray bursts, *J. Geophys. Res.*, 109, A01216, doi:10.1029/2003JA010019., 2004
- Williams, E. R., The Schumann resonance: a global tropical thermometer, *Science*, 256 (5060), 1184-1187, 1992.
- Hobara, Y., et al., A study on global temperature and thunderstorm activity by using the data of Schumann resonance observed at Nakatsugawa, Japan, *Journal of Atmospheric Electricity*, Vol.31, No.2 pp.111-119, 2011.
- Zhou, H., et al., Diurnal and seasonal variations in the Schumann resonance parameters observed at Chinese observatories, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 98, 86-96, 2013.
- Reagan, J. B., and T. M. Watt, Simultaneous satellite and radar studies of the D region ionosphere during the intense solar particle events of August 1972, *J. Geophys. Res.*, 81(25), 4579-4596, doi:10.1029/JA081i025p04579., 1976
- De, S. S., B. K. De, B. Bandyopadhyay, S. Paul, D. K. Haldar, and S. Barui, Studies on the shift in the frequency of the first Schumann resonance mode during a solar proton event, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 72(11-12), 829-836., 2010

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 池田昭大, 魚住禎司, 吉川顕正, 藤本晶子, 阿部修司	4. 巻 Vol.17
2. 論文標題 太陽フレア発生時のシューマン共鳴の特性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 大気電気学会誌	6. 最初と最後の頁 40-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 池田昭大, 魚住禎司, 吉川顕正, 藤本晶子, 阿部修司	4. 巻 Vol.13
2. 論文標題 太陽フレア・SPEに対するシューマン共鳴の応答	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 大気電気学会誌	6. 最初と最後の頁 168-169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 池田昭大, 魚住禎司, 吉川顕正, 藤本晶子, 阿部修司
2. 発表標題 太陽フレア発生時のシューマン共鳴の特性
3. 学会等名 日本大気電気学会第101回研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池田昭大, 魚住禎司, 吉川顕正, 藤本晶子, 阿部修司
2. 発表標題 Schumann resonance parameters at Kuju during intense solar activity
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第152回総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久永学実, 池田昭大, 藤本晶子, 古川翔大, 吉川顕正, 魚住禎司, 阿部修司
2. 発表標題 シューマン共鳴の経験モデル作成
3. 学会等名 第27回高専シンポジウムオンライン
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田昭大, 魚住禎司, 吉川顕正, 藤本晶子, 阿部修司
2. 発表標題 Seasonal and long-term variations in the Schumann Resonance observed at Kuju Japan
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第150回総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田昭大, 魚住禎司, 吉川顕正, 藤本晶子, 阿部修司
2. 発表標題 シューマン共鳴の変動特性と太陽活動との関係
3. 学会等名 令和3年度 STE現象報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田昭大, 魚住禎司, 吉川顕正, 藤本晶子, 阿部修司
2. 発表標題 Schumann Resonance Parameters at Kuju during solar flares and solar proton events
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第148回総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田昭大, 魚住禎司, 吉川顕正, 藤本晶子, 阿部修司
2. 発表標題 大分県久住町で観測されたシューマン共鳴の特性
3. 学会等名 日本大気電気学会第98回研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ikeda A., T. Uozumi, A. Yoshikawa, A. Fujimoto, and S. Abe
2. 発表標題 Diurnal and seasonal variations in the Schumann Resonance observed at Kuju Japan
3. 学会等名 AGU fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田昭大, 魚住禎司, 吉川顕正, 藤本晶子, 阿部修司
2. 発表標題 Daily and seasonal variations of Schumann Resonance
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第146回総会・講演会
4. 発表年 2019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 分担者	吉川 顕正  (Akimasa Yoshikawa)  (70284479)	九州大学・理学研究院・教授    (17102)	

6. 研究組織（つづき）

	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 分 担 者	藤本 晶子  (Akiko Fujimoto)  (40578803)	九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授    (17104)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関