

シューマン共鳴を用いた太陽フレアの特定及び 地球への影響調査に関する研究

Detection of solar flares and their effect on the Earth's ionosphere
by using Schumann Resonance

研究代表者 鹿児島工業高等専門学校一般教育科 講師 池田昭大
Akihiro Ikeda

共同研究者 九州大学理学府 准教授 吉川顕正
Akimasa Yoshikawa

We examined the Schumann resonance (SR) at low-latitude Kuju, Japan (M. Lat. = 23.4 degrees, M. Lon. = 201.0 degrees) detected by the ground magnetic field observation in the extremely low frequency (ELF) range. By comparing the SR parameters with solar parameters for analysis period of 2003 - 2012, we found that long-term variation of the SR frequency in H (horizontal northward component) well correlated with EUV flux. Thus the SR frequency is controlled by the electron density in the ionospheric D region which is ionized by the EUV. For solar flares, the response of SR correlated with the enhancement of solar X-ray flux and EUV flux. It seems that the X-ray and EUV caused the increase of the density in the ionospheric D region and SR frequency increased. In the case of the SPEs, the SR frequency in D component decreased with enhancement of solar proton flux. We suggest that the SPEs caused the decrease of altitude on the ionospheric D region at high latitudes, and the SR frequency decreased.

要旨

地表-電離圏間の電磁波の共鳴であるシューマン共鳴は、地球の気候変化の指標となる事が指摘されている。本研究では、新たに太陽活動の指標やモニタリングとしてシューマン共鳴を利用するため、シューマン共鳴と太陽活動の関連について調査した。長期的な太陽活動とシューマン共鳴の対応では、シューマン共鳴の周波数変化と、太陽活動によって変化する太陽極紫外線 (EUV) の間に相関があることが明らかになった。太陽フレアや太陽プロトンイベント (SPE) 発生時についても、シューマン共鳴の変化が捉えられた。シューマン共鳴が太陽活動のモニタリングや、電離圏の変動を表す指標として扱える可能性を新たに提示した。

1. まえがき

全世界の雷活動で励起される電磁波のうち、約8Hzなどの周波数帯は地表と電離圏の間で共鳴する。このような電磁波の共鳴はシューマン共鳴と呼ばれ、電磁場変動として常時観測される⁽¹⁾⁽²⁾。

シューマン共鳴のパラメータは全世界の雷活動に対応する⁽³⁾⁽⁴⁾。例えば、シューマン共鳴の強度の日変化は、全世界の主要な雷活動地域であるアフリカ、アジア、アメリカの雷活動と対応を見せることが報告されている⁽⁵⁾。

シューマン共鳴は地球の気候変化の指標として扱

える事も指摘されており、熱帯域の気温変化との対応⁽⁶⁾、大気中の水蒸気との関連⁽⁷⁾等が、報告されている。また太陽活動との関連についても、報告されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。さらに突発的な太陽フレアや太陽プロトンイベント (SPE) 発生時のシューマン共鳴の変化も報告されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾が、その報告例はまだ少ない。

本研究では低緯度の磁場変動として捉えられるシューマン共鳴に着目し、長期で変化する太陽活動との対応、さらに突発的な太陽活動現象として、太陽フレア、SPE との関連について調査する。本研究の調査結果は、シューマン共鳴を用いた太陽活動モニタリング、フレア等の特定及び、それらの太陽活動の地球電離圏への影響を見積もる基礎研究となる。

2. データセット

2.1 誘導磁力計データ

本研究では、大分県久住町 (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(水平北向き成分)とD成分(水平東向き成分)に現れるシューマン共鳴を解析した。図1のように、シューマン共鳴は7.8Hz程度の定常的なピークとして捉えられる。

シューマン共鳴を含むELF帯の磁場変動は、雷活動によって変動する⁽¹²⁾。よって、SRから雷活動の影響を除去するため、誘導磁力計地上観測データのPSD (power spectral density) に対して、以下のよう

な操作を行い、シューマン共鳴の周波数と、強度を特定した (図2)。

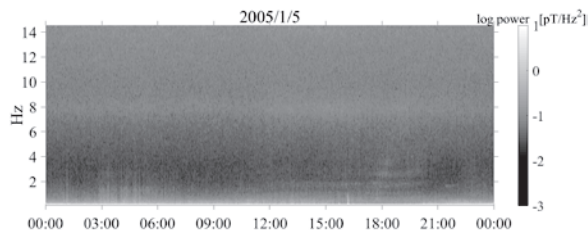


図1 久住で観測された2005年1月5日の地上磁場変動H成分 (水平北向き成分)。横軸は世界標準時 (UT)。白色部分が強度の強い部分であり、7.8Hz 辺りに定常的なピークが見られる。

- ① 6Hz と 10Hz 付近 ($\pm 0.5\text{Hz}$) のシューマン共鳴周波数帯付近の強度の平均値を計算 (水平太線)。
- ② ①で計算した強度を直線で繋ぎ、ベースラインとする (点線)。
- ③ ②のベースラインを PSD データから差し引き、規格化する (normalized PSD)。
- ④ ③で規格化された PSD (normalized PSD) から、シューマン共鳴の周波数と強度を取り出す。このとき、6.5~9.5Hz の範囲でピークを取り出す (中抜き○がピーク)

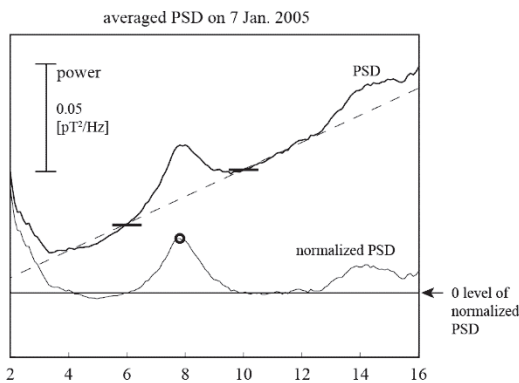


図2 PSD の例。太線は2005/1/7 の誘導磁力計データ H 成分の平均的 PSD、細線は規格化された PSD (normalized PSD)、点線は規格化するための直線、水平太線は規格化する際の強度を取り出した範囲、水平細線は規格化された PSD の 0 レベル、中抜き○はシューマン共鳴のピークを表す。

以上の手順によって取り出されたピークの周波数と、強度 (0 level からの強度) をシューマン共鳴

の周波数と強度とする。

上述の手法で求めたシューマン共鳴の周波数と、PSD データより 6-10Hz の範囲のピーク周波数を単純に取り出したものの長期変化を図3 に示す。シューマン共鳴の周波数は、単純にピークをとる手法よりも周波数が低く、一般的なシューマン共鳴の周波数といわれる 7.8Hz に近い。また、季節変化が目立たないことがわかる。

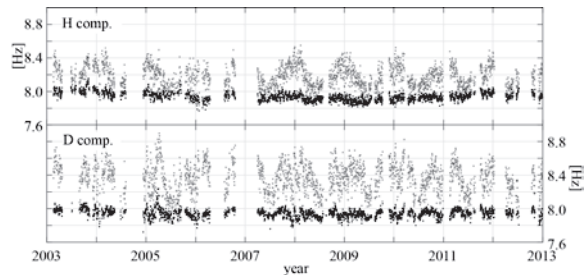


図3 6-10Hz の範囲でのピーク (灰色) とシューマン共鳴の周波数 (黒色) の長期変化。上が H 成分におけるもの、下が D 成分におけるものを表す。

2. 2 太陽活動に関するデータ

太陽活動の指標として、F10.7 (2, 800MHz の太陽放射) を用い、さらに、SOHO (Solar Heliosphere Observation Satellite) 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。EUV は地球電離圏の電離に大きく影響する事が知られている⁽¹³⁾。その他、太陽フレアを捉えるため、静止軌道衛星 GOES-10 によって取得された X 線フラックス (0.05 - 0.3 nm) データ、SPE を捉えるため、プロトンフラックス (40 - 80 MeV) データ も併せて使用した。

2. 3 地磁気活動に関するデータ

磁気嵐の発生など、地磁気活動度を表す Kp インデックスは 3 時間ごとの値として 8 段階で数値化されている。本研究では、1 日当たりの合計値 ΣKp を計算し、シューマン共鳴の長期変化と地磁気活動度の長期変化を比較した。

3. 解析結果と考察

3. 1 太陽活動の長期変化との対応

図4はF10.7、EUV、 ΣKp 、シューマン共鳴の共鳴周波数及び、シューマン共鳴の強度を示す。2003年から2012年の期間には、F10.7より太陽活動の極小期と極大期が確認できる。また、F10.7とともに、EUVの強度も変化している。

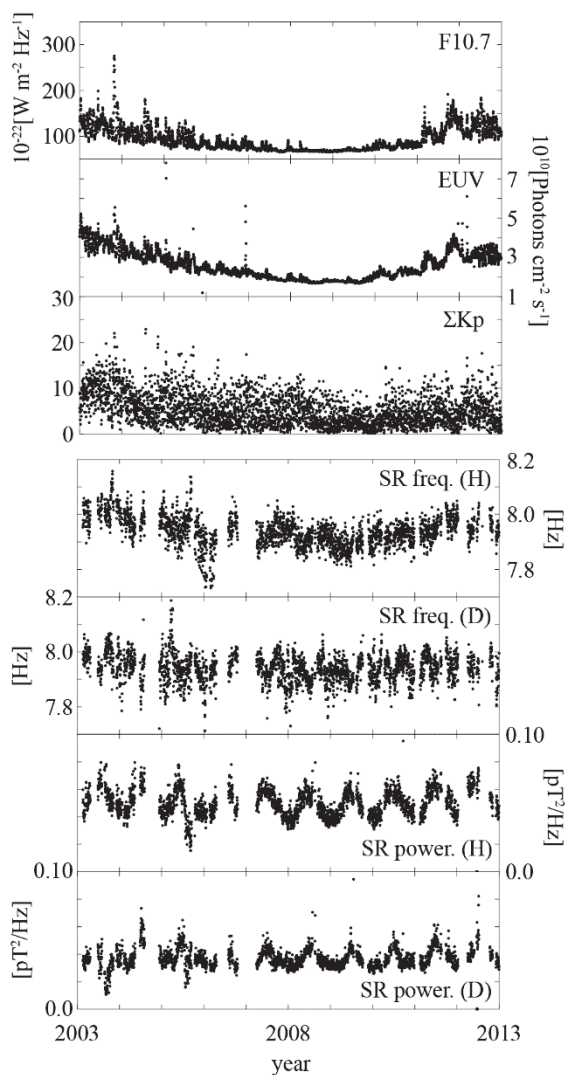


図4 太陽活動、シューマン共鳴の周波数・強度の2003年から2012年までの長期変化。上から、F10.7、EUV、 ΣKp 、シューマン共鳴周波数(H)、シューマン共鳴周波数(D)、シューマン共鳴強度(H)、シューマン共鳴強度(D)。

シューマン共鳴の周波数の変化に着目すると、特にH成分のシューマン共鳴において、F10.7及びEUVと長期変化の傾向が似ている。共鳴周波数はF10.7やEUVとともに、2009年頃の太陽活動極小期に最小となり、2003年頃の太陽活動極大期に最大となる事がわかる。2006年頃のH成分の周波数減少は、低周

波ノイズによるものと思われる。

シューマン共鳴の周波数は、電離圏D層の電子密度によって変化する事が知られており⁽¹⁰⁾、太陽活動と共に変化するEUVが電離圏D層の電子密度を変化させ、シューマン共鳴の共鳴周波数を増減させていたと解釈できる。

Roldugin et al. (1999)によると、シューマン共鳴の周波数の変化から、全球的な電離圏D層の電子密度変化を推定することができる⁽¹⁰⁾。その式は以下のように表現できる。

$$\frac{R_e(\delta f_1)}{R_e f_1} \approx 0.36 \left(\frac{\delta N}{2N} + \frac{\delta h}{h} \right)$$

この式の左辺は、シューマン共鳴の周波数の変化率を表し、右辺第一項は電離圏D層の電子密度変化率、右辺第二項は電離圏D層の高度変化率に対応する。

本研究によって得られたシューマン共鳴の周波数の変化は、H成分の場合、2009年頃の太陽活動極小期で約7.85Hz、2003年頃の太陽活動極大期で8.0Hz程度であった。この値を用い、さらに電離圏D層の高度変化を無視すると、太陽活動極大、極小期でのD層電子密度の変化は10%程度と見積もることができる。

シューマン共鳴の強度変化については、太陽活動との対応がはっきりと現れず、季節変化が目立っていた。シューマン共鳴の強度は、太陽活動の影響よりも全世界の雷活動に依存して変動していると考えられる。

地磁気活動度を表すKp指数は、太陽活動極大期に大きな値をとることが多いが、太陽活動との間に明瞭な相関があるとは言えない。長期変化を見ると、シューマン共鳴との対応が良いとも言えず、本研究の解析結果からは地磁気活動がシューマン共鳴へ影響しているとは結論できない。1イベントずつの磁気嵐を詳細に解析して対応を見る必要があると考えられる。

3.3 太陽フレアとシューマン共鳴

太陽フレアや太陽プロトンイベント(SPE)とシューマン共鳴の対応を調査するため、太陽活動が活発であった2003年10月から11月の期間(図5)でイベントを抽出した。X線の急激な増加が起こる太陽フレアや、プロトンフラックスが数時間から数日間

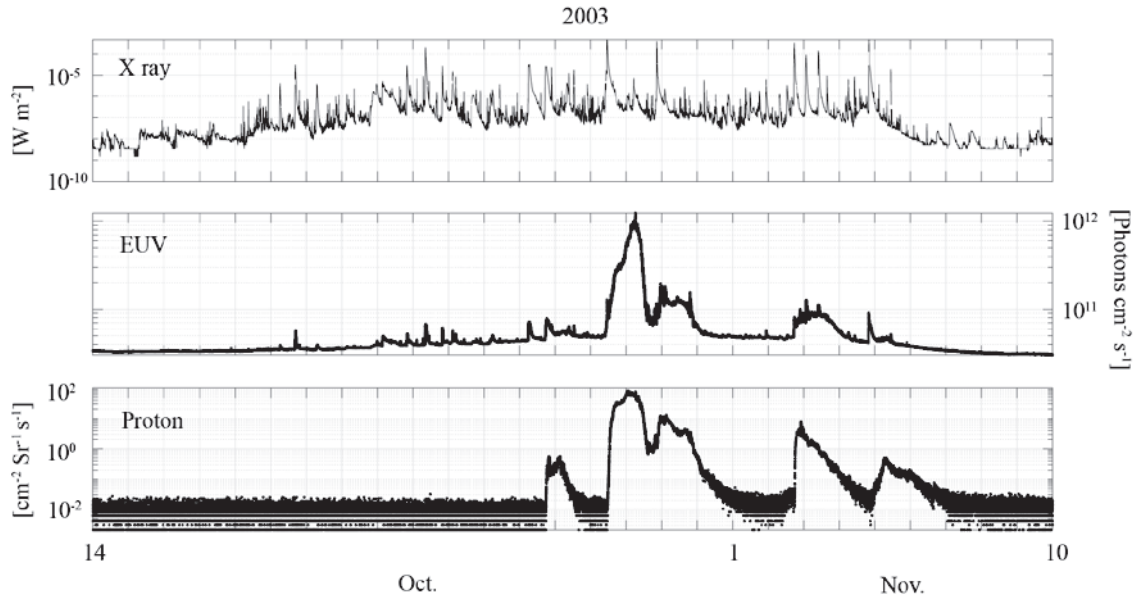


図5 2003年10月14日から11月9日までの太陽活動。上から、X線フラックス (0.05-0.3 nm)、EUV (0.1-50 nm)、プロトンフラックス (40-80 MeV)。

増加を続ける SPE が複数回発生していることが確認できる。

図6は2003年11月3日のX線フラックス、EUV、プロトンフラックス、シューマン共鳴の周波数を示している。01:00UT頃の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6の矢印)。

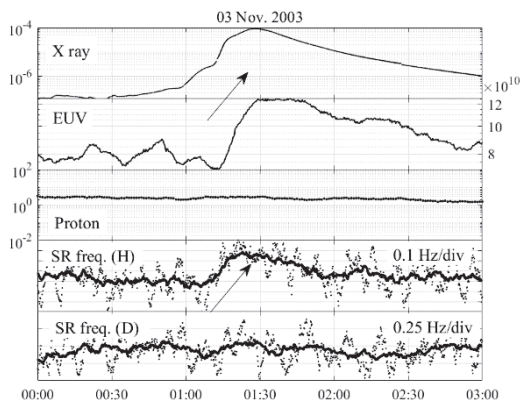


図6 2003年11月3日のフレア。上から、X線フラックス $[W m^{-2}]$ 、EUV $[Photons cm^{-2} s^{-1}]$ 、プロトンフラックス $[cm^{-2} Sr^{-1} s^{-1}]$ 、シューマン共鳴周波数(H)、シューマン共鳴周波数(D)。シューマン共鳴周波数は実線が1000秒の移動平均、点は200秒の移動平均を表す。横軸は世界標準時(UT)。

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⁽¹⁰⁾。このイベントでは、フレア時のX線やEUVの増加が、昼側の低緯度電離圏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。

図7は、異なる地方時における太陽フレアイベントを表している。このイベントでは、12:30UTにフレアが発生しており、誘導磁力計観測点の久住の地方時は21:30となる。この夜間に観測されたシューマン共鳴においても、フレアに対する応答が見られ、ゆるやかではあるが、12:30UTからH成分のシューマン共鳴の周波数の増加が見られる。全球的な電離圏D層の変動がシューマン共鳴に現れていると結論することができる。

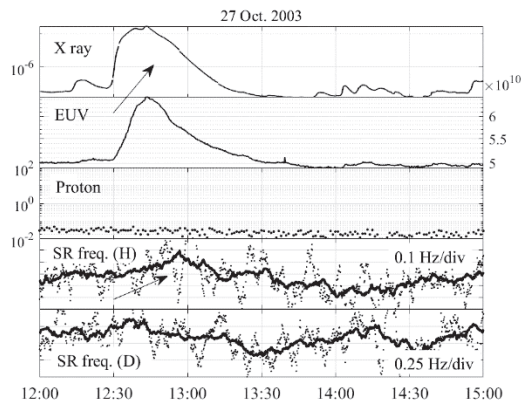


図7 2003年10月27日のフレア。図のフォーマットは図6と同じ。

3.4 太陽プロトンイベントとシューマン共鳴

図8は、2003年10月26日から10月27日の太陽プロトンイベント (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頃まで高い値を保ち、SPEが発生していると言える。

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成分の周波数が、プロトンフラックス増加後に減少し(図8の矢印)、共鳴周波数の減少が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⁽¹⁴⁾、電離圏D層の高度が押し下げられる⁽¹⁵⁾。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⁽¹⁰⁾を考慮すると、SPE時の周波数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。

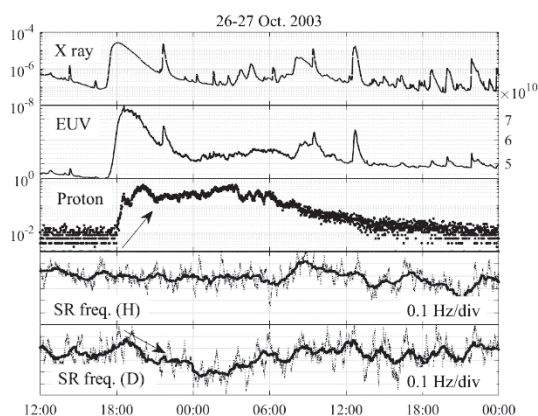


図8 2003年10月26日から10月27日のSPE。図のフォーマットは図6、図7と同じ。

4. 結論と今後の展望

本研究では、磁気的に低緯度の大分県久住町における誘導磁力計観測によって捉えられたシューマン共鳴を調査した。

太陽活動とシューマン共鳴のパラメータの長期変化では、シューマン共鳴の周波数H成分の変化とEUVの変化のパターンが類似していた。この事は太陽活動に伴って増減するEUVによって、電離圏の密度が変化し、その密度変化がシューマン共鳴に現れたと結論できる。

2003年11月3日と2003年10月27日のフレア、及び2003年10月26日から27日のSPEでは、シューマン共鳴の周波数の変化が確認された。フレア時はH成分のシューマン共鳴の周波数増加が確認され、フレアによる低緯度電離圏の電子密度増加と対応していると考えられる。また、SPE時にはプロトンフラックスの増加に伴い、シューマン共鳴D成分の周波数減少が確認された。これは極域電離圏に降り込んだ太陽プロトンが極域電離圏D層の高度を押し下げた効果によるものと解釈できる。さらにこれらのイベントから、磁気的に低緯度の久住で観測されるシューマン共鳴は、H成分が低緯度電離圏の変化をよく反映し、D成分が高緯度電離圏とよく対応している事も明らかになった。

今後は、解析する太陽フレア、SPEのイベントを増やし、シューマン共鳴を用いた太陽活動モニタリングの実用化を進める。また、九州大学・国際宇宙天気科学教育センターでは、ロシアやペルー等でFM-CWレーダーによる電離圏観測を展開しているが、この観測より電離圏電子密度の高度プロファイルを得ることができる。FM-CWレーダー観測を組み合わせることでシューマン共鳴を解析する事により、ローカルな電離圏変化の影響なども見積もることができ、モニタリングという観点からは、その精度を高める調査が可能となる。

謝辞

本研究で使用した誘導磁力計データは九州大学・国際宇宙天気科学・教育センター(ICSWSE)から提供を受けました。F10.7はNOAA.NGDC SPIDR、X線フラックス及びプロトンフラックスデータは<https://www.ngdc.noaa.gov/>より、EUVデータは<https://www.usc.edu/>より取得しました。本研究の一部は、公益財団法人マツダ財団の第33回(2017年度)マツダ研究助成を使用しました。ここに関係各位に感謝の意を表します。

発表論文

- [1] 池田昭大, 魚住禎司, 吉川顕正, 藤本晶子, 阿部修司, 太陽フレア・SPEに対するシューマン共鳴の応答, 大気電気学会誌 Vol. 13, 2019 (受理済み, 掲載予定)
- [2] 池田昭大, 野澤宏大, 篠原学, 鹿児島高専の超高層大気観

- 測と学生の研究活動, 平成30年度 名古屋大学宇宙地球環境研究所 研究集会 地域ネットワークによる宇宙天気観測・教育活動に関する研究集会, 2019年3月, 福岡市
- [3] 太陽フレア・SPE に対するシューマン共鳴の応答, 池田昭大, 魚住禎司, 吉川颯正, 藤本晶子, 阿部修司, 日本大気電気学会第97回研究発表会, 2019年1月, 岐阜市
- [4] Ikeda A., T. Uozumi, A. Yoshikawa, A. Fujimoto and S. Abe, Schumann resonance parameters at Kuju station during solar flares, E3S Web of Conferences 62, Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186201012>, 2018
- [5] Ikeda A., T. Uozumi, A. Yoshikawa, A. Fujimoto, S. Abe, Variation of Schumann Resonance during the intense solar activity from October to November, 2003, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第144回総会, 2018年11月, 名古屋市
- [6] Ikeda A., Uozumi T., Yoshikawa A., Fujimoto A., Abe S., Schumann Resonance Parameters at Kuju Station during Solar Flares, VX International Conference «Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors», Oct. 2018, Paratunka, Russia
- [7] Ikeda A., T. Uozumi, A. Yoshikawa, A. Fujimoto, S. Abe, H. Nozawa, M. Shinohara, Response of Schumann Resonance to Solar and Geomagnetic Activities, AOGS 15th Annual Meeting, Jun., 2018, Honolulu, Hawaii
- [8] 池田昭大, 魚住禎司, 吉川颯正, 藤本晶子, 野澤宏大, Variation of Schumann resonance at Kuju station during solar flares, 日本地球惑星科学連合2018年大会, 2018年5月, 千葉県千葉市
- [9] 池田昭大, 魚住禎司, 吉川颯正, 藤本晶子, 阿部修司, 野澤宏大, 篠原学, シューマン共鳴の太陽活動への依存, 大気電気学会誌 Vol.12, No.1 (No. 92), 205-206, 2018
- [10] シューマン共鳴の太陽活動への依存, 池田昭大, 魚住禎司, 吉川颯正, 藤本晶子, 阿部修司, 野澤宏大, 篠原学, 日本大気電気学会第96回研究発表会, 2018年1月, 東京都新宿区
- [11] Ikeda A., T. Uozumi, A. Yoshikawa, A. Fujimoto, S. Abe, H. Nozawa and M. Shinohara, Characteristics of Schumann Resonance Parameters at Kuju Station, E3S Web of Conferences Volume 20, Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors, doi: 10.1051/e3sconf/20172001004, 2017
- [12] 池田昭大, 太陽活動の地球への影響, 平成29年度 かがしま技術21, 2017年12月, 鹿児島市
- [13] 池田昭大, 魚住禎司, 吉川颯正, 藤本晶子, 阿部修司, 野澤宏大, 篠原学, Dependence of Schumann resonance parameters on solar activity, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第142回総会, 2017年10月, 宇治市
- [14] Ikeda A., Uozumi T., Yoshikawa A., Fujimoto A., Abe S., Nozawa H. Shinohara M., Characteristics of Schumann resonance parameters at Kuju station, VIII International Conference «Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors», Sep., 2017, Paratunka, Russia

参考文献

- (1) Balser, M., Wagner C. A., Observation of earth-ionosphere cavity resonances, *Nature*, 188, 638-641, 1960.
- (2) Balser, M., Wagner, C. A., On frequency variations of the earth-ionosphere cavity modes, *J. Geophys. Res.* 67, 4081-4083, 1962.
- (3) Satori, G., and B. Zieger, Spectral characteristics of Schumann resonances observed in Central Europe, *J. Geophys. Res.* 101, D23, 29,663-29,669, 1996.
- (4) Satori, G., Monitoring Schumann resonances - II. Daily and seasonal frequency variations, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol 58, No. 13, pp. 1483-1488, 1996.
- (5) Zhou, H., H. Yu, B. Cao, and X. Qiao, Diurnal and seasonal variations in the Schumann resonance parameters observed at Chinese observatories, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 98, 86-96, 2013.
- (6) Williams, E. R., The Schumann resonance: a global tropical thermometer, *Science*, 256 (5060), 1184-1187, 1992. Balser, M., Wagner, C. A., On frequency variations of the earth-ionosphere cavity modes, *J. Geophys. Res.* 67, 4081-4083, 1962.
- (7) Price, C., Evidence for a link between global lightning activity and upper tropospheric water vapor, *Nature*, 406 (6793), 290-293, 2000.
- (8) Sao, K., Yamashita, M., Tanahashi, S., Jindoh, H., and Ohta, K., Experimental investigations of Schumann

- resonance frequencies, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 35, 2047–2053, 1973.
- (9) Kulak, A., J. Kubisz, A. Michalec, G. Michalek, S. Zięba, RELATION OF SCHUMANN RESONANCES AND IONOSPHERIC PARAMETERS TO SOLAR ACTIVITY, *Proc. SOHO 11 Symposium*, 485–488, 2002
- (10) Roludugin V. C., Maltsev Ye P., Vasilljev A. N., Vashenyuk E. V., Changes of the first Schumann resonance frequency during relativistic solar proton precipitation in the 6 November 1997 event. *Ann. Geophysicae* 17, 1293–1297, 1999
- (11) Roldugin V. C., Maltsev Y. P., Vasiljev A. N., Schumann resonance frequency increase during solar X-ray bursts. *J. Geophys. Res.*, 109, A01216, doi:10.1029/2003JA010019, 2004
- (12) Füllekrug, M., and A. C. Fraser-Smith, Global lightning and climate variability inferred from ELF magnetic field variations, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 2411–2414, ????
- (13) Liu, L., W. Wan, B. Ning, O. M. Pirog, and V. I. Kurkin, Solar activity variations of the ionospheric peak electron density, *J. Geophys. Res.*, 111, A08304, doi:10.1029/2006JA011598., 2006
- (14) 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
- (15) 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